

01146

1



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Tesis

**"Tecnología del Concreto en las Estructuras
Costafuera"**

Presenta

Ing. Mario Carlos Flores Ramírez

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

(CONSTRUCCIÓN)

Dirigida por: Ing. Juan Luis Cottier Caviedes

Cludad Universitaria

enero/ 2001



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

“Dame un apoyo y moveré el mundo”

Gracias por su apoyo:

**Margarita, Agustín
Ricardo, Ivonne
Victoria, Nieves
Daniel, Isabel**

Al Instituto Mexicano del Petróleo

A mis amigos

ÍNDICE

OBJETIVO

HIPÓTESIS

INTRODUCCIÓN

GENERALIDADES

1. ESTRUCTURAS DE CONCRETO COSTAFUERA

1.1. Tipos de Estructuras

1.1.1. Estructuras con Cimentación

1.1.1.1. Estructuras con Base Gravitacional (GBS)

1.1.1.2. Estructuras Soportadas por Pilotes

1.1.1.3. Estructuras con Armazón de Concreto de Tipo Flotante con Cimentación

1.1.2. Estructuras Flotantes

1.1.2.1. Plataformas de Piernas Tensionadas (Tension Leg Platform TLP)

1.1.2.2. Flotadores de Concreto con Tirante Profundo

1.1.2.3. Barcazas de Concreto para Producción y Almacenamiento

1.1.2.4. Plataformas Spar

1.1.3. Otros Tipos

1.1.3.1. Tanques de Almacenamiento

1.1.3.2. Cajones de Concreto

1.2. Consideraciones de Diseño

1.2.1. Cargas

1.2.2. Requerimientos de Diseño

1.2.2.1. Requerimientos de Resistencia

1.2.2.1.1. Combinación de Cargas

1.2.2.2. Requerimientos de Servicio

1.2.2.3. Requerimientos Especiales

1.2.2.3.1. Implosión

1.2.2.3.2. Aire Comprimido

1.2.2.3.3. Temperatura

1.3. Construcción

1.3.1. Sitios de Construcción

1.3.1.1. Dique Seco

1.3.1.2. Barcazas

1.3.1.3. Rampa

1.3.1.4. Instalaciones Prefabricadas

1.3.2. Limitaciones del Sitio de Construcción

1.4. Bibliografía

2. REQUERIMIENTOS DEL CONCRETO

2.1. Durabilidad

2.1.1. Condiciones de Exposición

2.1.2. Permeabilidad

2.1.2.1. Materiales

2.1.3. Ataques por Sulfatos

2.1.4. Abrasión

2.1.5. Reacción Álcali – Sílica

2.1.6. Reacción Álcali – Carbonato

2.1.7. Carbonatación

2.2. Resistencia al Fuego

2.2.1. Fuego de Celulosa

2.2.2. Fuego de Hidrocarburos

2.2.3. Mecanismos de Desprendimiento

2.2.4. Comportamiento con la Temperatura

2.2.5. Efectos de la Humedad

2.2.6 Permeabilidad Crítica a/c

2.2.7. Mineralogía

2.2.8. Coloración del Concreto a Elevadas Temperaturas

2.2.9. Concreto Armado

2.2.10. Fibras

2.3 Bibliografía

3. CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA

3.1. Concreto Alta Resistencia

3.1.1. Diseño de Mezclas

3.1.2. Cemento

3.1.3. Agregados

3.1.4. Aditivos Químicos

3.1.4.1. Reductores de Agua (Plastificantes)

3.1.4.1.1. Lignosulfonatos

3.1.4.1.2. Naftalenos

3.1.4.1.3. Melaminas

3.1.4.2. Retardantes

3.1.4.3. Incluidores de Aire

3.1.5. Resistencia a la Compresión

3.2. Concreto de Alto Desempeño

3.2.1. Mezclas

3.2.2. Cemento

3.2.3. Agregados

3.2.4. Aditivos

3.2.5. Compatibilidad del Cemento - Superplastificante

3.2.6. Trabajabilidad

3.2.7. Contracción

3.2.8. Curado

3.2.9. Acabado

3.2.10. Microestructura

3.2.11. Propiedades Mecánicas

3.2.12. Aplicación en la Hiberna GBS

3.3. Concreto con Agregados de Peso Ligero

3.3.1. Agregados

3.3.1.1. Producción

3.3.1.1.1. Horno Rotatorio

3.3.1.1.2. Proceso de Sinterización

3.3.1.2. Estructura Interna

3.3.1.3. Humedad

3.3.1.4. Permeabilidad

3.3.2. Propiedades

3.3.3. Aplicación en la Troll GBS

3.3.4. Mezcla para 100 MPa

3.4. Construcción

3.4.1. Trabajabilidad

3.4.2. Vaciado

3.4.3. Varillas con Cabeza en "T"

3.4.4. Juntas de Construcción

3.4.5. Slipforming

3.4.6. Método Tremie

3.5. Inspección

3.5.1. Recomendaciones Prácticas

3.5.2. Técnicas de Inspección

3.5.2.1. Visual

3.5.2.2. Video

3.5.2.3. Fotografía

3.5.3 Programa

3.5.4. Métodos de Inspección

3.5.5. Anomalías

3.5.5.1. Filtración de Agua

3.5.5.2. Filtración de Petróleo

3.5.5.3. Permeabilidad

3.5.5.4. Membranas

3.5.5.5. Durabilidad del Concreto

3.5.5.6. Refuerzo

3.5.5.7. Depasivación

3.5.5.8. Grietas

3.5.5.9. Protección Catódica

3.5.5.10. Cargas y Resistencia

3.5.5.11. Cargas de Impacto

3.5.5.12. Asentamientos

3.5.5.13. Fuego

3.5.6. Densidad de Corriente

3.5.7. Mantenimiento

3.6. Bibliografía

4. TENDENCIAS

4.1. Hidrocarburos

4.2. Estructuras

4.3. ISO 13819

4.4. Garantía de Calidad / Control de Calidad

4.4.1. Organización del GC/CC

4.4.2. Programa GC/CC

4.5. Tecnología del Concreto

4.6. Bibliografía

5. VENTAJAS

5.1. Concreto vs acero

5.2. Ventajas del Concreto

5.3. Costos de Construcción

5.4. Costo de Vida Útil

5.5. Mercado Potencial

5.6. Bibliografía

CONCLUSIONES

OBJETIVO

Realizar una investigación que identifique los principales adelantos que ha tenido la Tecnología del Concreto en las Estructuras Costafuera en todo el mundo considerando: el desarrollo y las características principales del concreto para obtener un alto desempeño en el medio en que se encuentra, las tendencias para su mejoramiento y los fundamentos para investigaciones futuras.

HIPÓTESIS

El desarrollo que ha tenido la Tecnología del Concreto en las Estructuras Costafuera, ha permitido fabricar estructuras de concreto con mayor durabilidad y vida útil. Los adelantos tecnológicos del concreto en esta área no restringen su aplicación en otros tipos de estructuras como: puentes, edificios, pavimentos, etc.

INTRODUCCIÓN

La tecnología del concreto en las estructuras costafuera ha tenido grandes adelantos en las últimas tres décadas, esto ha permitido desarrollar Concretos de Alta Resistencia de Alto Desempeño con Baja Densidad. La aplicación de este tipo de concretos ha incrementado considerablemente la durabilidad y la vida útil de la estructura, sin requerir casi de mantenimiento lo que ha hecho que las estructuras sean muy rentables. El problema principal que se presenta en esta tecnología es la falta de conocimiento que tiene el diseñador y sobre todo el propietario para su aplicación.

En el primer capítulo, se describen los principales tipos de estructuras costafuera, las consideraciones y requerimientos para su diseño, las formas de construcción y las limitaciones que tiene el sitio de construcción.

El capítulo dos, menciona las principales características que necesita el concreto para tener un buen desempeño en el medio marino como es la durabilidad y la resistencia al fuego.

El capítulo tres, refiere las características y propiedades de los tres tipos de concretos que se han desarrollado y aplicado en las estructuras costafuera, así como los principales adelantos que se han realizado en la construcción. Se menciona también, la inspección empleada en este tipo de estructuras para encontrar anomalías en el concreto.

El capítulo cuatro, describe las tendencias que presentan las estructuras costafuera, considerando las fuentes de explotación de hidrocarburos en el mar, las estructuras, normas, calidad y la tecnología del concreto.

En el capítulo cinco, se mencionan las ventajas que tiene el concreto considerando que es un material de construcción con respecto al acero estructural, los costos en la construcción, el costo de inversión por su vida útil y el mercado potencial que tiene.

OBJETIVO

Realizar una investigación que identifique los principales adelantos que ha tenido la Tecnología del Concreto en las Estructuras Costafuera en todo el mundo considerando: el desarrollo y las características principales del concreto para obtener un alto desempeño en el medio en que se encuentra, las tendencias para su mejoramiento y los fundamentos para investigaciones futuras.

HIPÓTESIS

El desarrollo que ha tenido la Tecnología del Concreto en las Estructuras Costafuera, ha permitido fabricar estructuras de concreto con mayor durabilidad y vida útil. Los adelantos tecnológicos del concreto en esta área no restringen su aplicación en otros tipos de estructuras como: puentes, edificios, pavimentos, etc.

INTRODUCCIÓN

La tecnología del concreto en las estructuras costafuera ha tenido grandes adelantos en las últimas tres décadas, esto ha permitido desarrollar Concretos de Alta Resistencia de Alto Desempeño con Baja Densidad. La aplicación de este tipo de concretos ha incrementado considerablemente la durabilidad y la vida útil de la estructura, sin requerir casi de mantenimiento lo que ha hecho que las estructuras sean muy rentables. El problema principal que se presenta en esta tecnología es la falta de conocimiento que tiene el diseñador y sobre todo el propietario para su aplicación.

En el primer capítulo, se describen los principales tipos de estructuras costafuera, las consideraciones y requerimientos para su diseño, las formas de construcción y las limitaciones que tiene el sitio de construcción.

El capítulo dos, menciona las principales características que necesita el concreto para tener un buen desempeño en el medio marino como es la durabilidad y la resistencia al fuego.

El capítulo tres, refiere las características y propiedades de los tres tipos de concretos que se han desarrollado y aplicado en las estructuras costafuera, así como los principales adelantos que se han realizado en la construcción. Se menciona también, la inspección empleada en este tipo de estructuras para encontrar anomalías en el concreto.

El capítulo cuatro, describe las tendencias que presentan las estructuras costafuera, considerando las fuentes de explotación de hidrocarburos en el mar, las estructuras, normas, calidad y la tecnología del concreto.

En el capítulo cinco, se mencionan las ventajas que tiene el concreto considerando que es un material de construcción con respecto al acero estructural, los costos en la construcción, el costo de inversión por su vida útil y el mercado potencial que tiene.

OBJETIVO

Realizar una investigación que identifique los principales adelantos que ha tenido la Tecnología del Concreto en las Estructuras Costafuera en todo el mundo considerando: el desarrollo y las características principales del concreto para obtener un alto desempeño en el medio en que se encuentra, las tendencias para su mejoramiento y los fundamentos para investigaciones futuras.

HIPÓTESIS

El desarrollo que ha tenido la Tecnología del Concreto en las Estructuras Costafuera, ha permitido fabricar estructuras de concreto con mayor durabilidad y vida útil. Los adelantos tecnológicos del concreto en esta área no restringen su aplicación en otros tipos de estructuras como: puentes, edificios, pavimentos, etc.

INTRODUCCIÓN

La tecnología del concreto en las estructuras costafuera ha tenido grandes adelantos en las últimas tres décadas, esto ha permitido desarrollar Concretos de Alta Resistencia de Alto Desempeño con Baja Densidad. La aplicación de este tipo de concretos ha incrementado considerablemente la durabilidad y la vida útil de la estructura, sin requerir casi de mantenimiento lo que ha hecho que las estructuras sean muy rentables. El problema principal que se presenta en esta tecnología es la falta de conocimiento que tiene el diseñador y sobre todo el propietario para su aplicación.

En el primer capítulo, se describen los principales tipos de estructuras costafuera, las consideraciones y requerimientos para su diseño, las formas de construcción y las limitaciones que tiene el sitio de construcción.

El capítulo dos, menciona las principales características que necesita el concreto para tener un buen desempeño en el medio marino como es la durabilidad y la resistencia al fuego.

El capítulo tres, refiere las características y propiedades de los tres tipos de concretos que se han desarrollado y aplicado en las estructuras costafuera, así como los principales adelantos que se han realizado en la construcción. Se menciona también, la inspección empleada en este tipo de estructuras para encontrar anomalías en el concreto.

El capítulo cuatro, describe las tendencias que presentan las estructuras costafuera, considerando las fuentes de explotación de hidrocarburos en el mar, las estructuras, normas, calidad y la tecnología del concreto.

En el capítulo cinco, se mencionan las ventajas que tiene el concreto considerando que es un material de construcción con respecto al acero estructural, los costos en la construcción, el costo de inversión por su vida útil y el mercado potencial que tiene.

GENERALIDADES

De alguna forma el material cementante ha sido utilizado durante miles de años, pero el empleo del concreto reforzado fabricado con cemento portland se remonta a mediados del siglo XIX, después al final de este siglo adquirió mayor aplicación, posteriormente se incremento considerablemente en la segunda guerra mundial 1939 a 1945 debido principalmente a la escasez del acero y desde entonces ha incrementado su aplicación en la construcción de estructuras.

Hoy los dos materiales estructurales que más se emplean en la construcción son el concreto y el acero, a veces se utilizan ambos en la misma obra y compiten entre sí, pues algunas estructuras similares en su tipo y función se pueden construir con uno de estos materiales o también debemos mencionar que el cliente y el ingeniero diseñador sabe menos del concreto que del acero.

El acero se fabrica en condiciones cuidadosamente controladas, sus propiedades se determinan en un laboratorio y se describen en el certificado del fabricante. En este caso el proyectista debe especificar el acero con respecto a una norma adecuada y el supervisor se limita a verificar la mano de obra que debe ser calificada debido a los cortes y soldadura que se utiliza.

Si la magnitud de la obra es considerable, existen mejores condiciones de control en la elaboración del concreto por la utilización de las plantas de premezclado, que garantizan la calidad del concreto que se especifica, de esta forma la calidad de los miembros estructurales depende de la colocación del concreto.

Existen dos partes o etapas muy importantes en la elaboración del concreto; el estado plástico y el endurecido. Las condiciones en su estado plástico, son que la consistencia sea la adecuada para la compactación, sin demasiado esfuerzo y también que la mezcla tenga cohesión suficiente con respecto al método de colocación utilizado para no producir segregaciones.

El requisito habitual del concreto en estado endurecido es su resistencia a la compresión, indudable entre mayor sea la resistencia del concreto sus características intrínsecas son mejores, pero en la actualidad las diversas propiedades del concreto: densidad, durabilidad, resistencia a la tensión, impermeabilidad, resistencia a la abrasión, resistencia a los ataques de sulfatos y muchas otras más, han aumentado su requerimiento en los diseños de las estructuras. Las especificaciones que se elaboran tienden a estipular los requisitos de propiedades particulares del concreto, en lugar de limitarse a la resistencia y la cantidad de los materiales componentes. Por consiguiente, el conocimiento de las propiedades del concreto hace posible la selección de una mezcla más adecuada y económica.

Aun no cambia en nuestro país el concepto del concreto y este entorno ha causado que no se puedan aplicar los adelantos que ha tenido la Tecnología del Concreto para poderlos aplicar en el desarrollo de nuestra infraestructura. La idea de que el concreto es un material común es cierto sin embargo, la Tecnología del Concreto ha tenido grandes adelantos para poder producir un material con mayor potencial en su aplicación en la construcción, estos potenciales son sin duda la alta resistencia, la durabilidad y su bajo costo comparado con otros materiales de construcción. La creencia de que su

calidad sea comparada únicamente con la resistencia se tiene que quedar en el siglo pasado y pasar a formar parte de una característica dentro de las propiedades que se requieren debido a su *exposición y servicio en que se encontrará la estructura*. Las condiciones de exposición se refieren a las del medio externo y a las de contacto; el medio externo depende principalmente de la posición geográfica y del carácter urbano, rural o industrial del lugar y las características del medio de contacto corresponden a las del suelo, agua o cualquier otra sustancia sólida, líquida o gaseosa que pueda estar en contacto con la estructura. Las de servicio son inherentes a las funciones que desempeña cada estructura en particular, edificios, puentes, depósitos, etc.

Al realizar este estudio, se pueden establecer las características y propiedades que deberá tener el concreto, para que pueda resistir las acciones deteriorantes y de servicio. Si el diseñador y el constructor se unieron para construir una estructura idónea a las condiciones de exposición y servicio, se podrán olvidar de deterioraciones futuras y únicamente aplicar mantenimiento de tipo preventivo.

Una gran área de aplicación del concreto reforzado son las estructuras que se determinan como costafuera y que actualmente sirven para la explotación de hidrocarburos mar adentro.

Este trabajo se dirige básicamente a las plataformas como las principales estructuras en la aplicación y desarrollo de la Tecnología del Concreto, sin embargo se mencionará en el siguiente capítulo los diferentes tipos de estructuras costafuera existentes.

Barcos

Antes de que aparecieran las plataformas de concreto para la explotación de hidrocarburos se fabricaron barcos de concreto, estas estructuras tuvieron apogeo durante la segunda guerra mundial y posteriormente ya no tuvieron mayor auge, tal vez porque no se puede romper el paradigma de la utilización de otro material diferente al acero en la construcción, sin embargo actualmente existen grandes barcasas de concreto para el apoyo de la explotación de hidrocarburos en el mar.

Jean Louis Lambot en 1848 fue el primero en utilizar el ferrocemento en la construcción de botes en Francia ^(1, 2), Lambot después de esta experiencia pudo concluir que la aplicación del concreto tenía las siguientes características en las embarcaciones:

- ◆ Costo bajo de construcción
- ◆ Mantenimiento bajo
- ◆ Construcción rápida
- ◆ Reparación rápida en caso de accidente o daño
- ◆ Impermeable

Posteriormente en la primera guerra mundial nació la necesidad de fabricar barcos y fue hasta agosto de 1917 que en Noruega se construyó el primer barco con motor, el Namsenfjord de 400 ton de desplazamiento fabricado con concreto armado. En USA el American Bureau of Shipping fue el encargado de la construcción de barcos durante esta época, construyendo el Launch y el Atlantus que fueron botados en 1918 y el Polias con una capacidad de carga muerta de 2,460 ton en 1919. En el

Atlantus se obtuvo una resistencia de 21 MPa y una densidad de $1,910 \text{ kg/m}^3$, la experiencia ganada y los estudios que se realizaron en aquella época indicaron que el concreto para los barcos debería tener una resistencia de 350 kg/cm^2 y un peso no mayor de $1,760 \text{ kg/m}^3$ y que los agregados de peso ligero de tipo natural que se utilizaron hasta entonces no lograban alcanzar los requerimientos planteados. Poco tiempo después, se realizó la producción de esquistos expandidos que no solamente alcanzaba la meta sino que los rebasaba, este agregado se utilizó en la construcción del tanquero Selma de 7,500 ton, 130 m de largo, 16 m de ancho y 11 de alto. La resistencia que se alcanzó fue de 390 kg/cm^2 y $1,600 \text{ kg/m}^3$ de densidad, logro extraordinario para la Tecnología del Concreto en aquella época.

En la referencia 1, se realizó un estudio de las características del concreto en los barcos mencionados y en otras embarcaciones. El estudio comparó las conclusiones y ventajas que se obtuvieron del concreto en los barcos que realizó Lambot en 1848 y las experiencias ganadas posteriormente.

- ◆ Costo bajo de construcción. La construcción de 104 barcos que se construyeron durante la segunda guerra mundial con un costo bajo, da soporte a esta conclusión.
- ◆ Mantenimiento Bajo. Todos los reportes analizados especifican que el mantenimiento es muy bajo.
- ◆ Construcción rápida. Se construyó un casco de 3,500 ton en $6 \frac{1}{2}$ semanas.
- ◆ Reparación rápida en caso de accidente o daño. Cuando el Selma tuvo daños en el concreto fue rápida su reparación.
- ◆ Impermeable. La experiencia ganada en la primera guerra mundial sirvió para los barcos de la segunda guerra, los cuales reportaron que eran ideales para conservar la carga seca.

Además de comprobar la visión que Lambot tenía en la aplicación del concreto en las embarcaciones, los autores concluyeron que: Después de 80 años de exposición, los concretos con agregados de peso ligero y sin aire incluido, presentan poca deterioración debido al congelamiento y deshielo en ambiente marino. Las superficies expuestas están relativamente sin agrietamiento y por último que los barcos construidos de 50 a 80 años están funcionando en buen estado y requieren un mínimo de mantenimiento.

El testimonio anterior nos muestra que el concreto es un material que se puede utilizar en ambiente marino y que unido a los adelantos que ofrece actualmente la Tecnología del Concreto se pueden construir embarcaciones obteniendo gran desempeño, sin embargo es extremadamente difícil cambiar la tradición y las costumbres de construcción en este medio donde el acero, las fibras de vidrio e incluso la madera no se han podido cambiar.

Plataformas

Desde hace cincuenta años inició la industria costafuera con la instalación de dos plataformas de perforación en el Golfo de México, utilizando al acero como material de construcción.

Las primeras plataformas de concreto para la producción de gas y petróleo se instalaron en el Golfo de México en 1950 en el litoral de USA. Desde entonces en esta área se han construido más de 1,000

estructuras, con la primera estructura de concreto con base de gravedad que se instaló en 1978. Pero la primera gran plataforma de concreto que se instaló en el Mar del Norte fue en 1973. Tres plataformas de concreto funcionalmente similares a las del Mar del Norte fueron construidas en Brasil para operar en las aguas de América del Sur. El concreto tiene una larga historia y presencia significativa en aplicaciones marinas y costafuera pero es virtualmente ignorada, con la excepción de Noruega, en la consideración del desarrollo de nuevos proyectos.

El concreto se utilizó con la construcción por parte de los noruegos en la plataforma de almacenamiento Ekofisk en 1973 y desde entonces han construido más plataformas. Los principales adelantos en la Tecnología del concreto se han desarrollado en el Mar del Norte, Inglaterra y muy en particular en Noruega, país que ha aplicado este material en la mayoría de sus instalaciones costafuera, otros países donde se han construido plataformas son Australia, Holanda y Canadá. Existe una gran variedad de estructuras construidas, desde las pequeñas estructuras de concreto en el Golfo de México en el área perteneciente a USA, la Hibernia GBS la cual fue diseñada para resistir los impactos de iceberg y la gran plataforma construida a la fecha, la Troll instalada a 303 m. de profundidad. Los adelantos en el diseño, materiales y la construcción han sido muy significativos en este último periodo. Mientras que en las primeras estructuras tuvieron una resistencia de 30 a 40 MPa, hoy se aplican resistencias en el concreto arriba de los 75 MPa con un gran volumen de producción. Durante tres décadas se han fabricado 3 millones de metros cúbicos de concreto de Alta Resistencia en la construcción de plataformas en el Mar del Norte, lo que ha permitido el desarrollo de mayores conocimientos en la tecnología del concreto, la cual no únicamente se puede aplicar en esta área sino en otras con gran éxito.

La experiencia en el Mar del Norte ha mostrado que las estructuras elaboradas con concreto son competitivas con las estructuras de tipo Jacket en acero en términos de inversión inicial y costos de mantenimiento ⁽³⁾, esta experiencia es considerada relevante para otras áreas, particularmente en: países que importan el acero, áreas gélidas, áreas costafuera sin infraestructuras, para lugares donde se requieran instalaciones para el almacenamiento de petróleo y para áreas donde las grandes embarcaciones con grúas no estén disponibles para levantar estructuras de acero muy pesadas o grandes módulos en la cubierta. Además, los flotadores de concreto son muy atractivos como soluciones de bajo costo para aplicaciones en aguas profundas.

Las estructuras de concreto se han utilizado extensamente en el Mar del Norte como soporte de grandes instalaciones de producción, para mejorar el almacenamiento de grandes volúmenes de producción y soportar condiciones ambientales duras.

El concreto es el único material que se puede fabricar en el sitio de construcción con materiales y mano de obra local ⁽⁴⁾. Se puede amoldar a cualquier forma geométrica que se desee y tiene un vasto potencial para variar sus características de acuerdo a los requerimientos de ingeniería costafuera, ventajas que se puedan reunir en un material. Tiene el potencial de ser de bajo costo, porque los

materiales utilizado son locales y la mano de obra que se utiliza en su fabricación no requiere de grandes niveles de especialización comparado con el acero.

La aplicación del concreto dentro de la industria costafuera es baja, su potencial debe ser más difundido para considerar las ventajas del concreto. Vender la idea del concreto para estos desarrollos costafuera, necesita señalar que: La tecnología del concreto esta bien cimentada, no se requiere de materiales especiales, la calidad del concreto ya es usual, los requerimientos para el diseño ya están bien establecidos, existen compañías competentes para el diseño en varias regiones del mundo, no se requieren de prácticas de construcción especiales, existe flexibilidad en los sitios de construcción, los costos de capital son competitivos y los costos del ciclo de vida útil son significativamente menores.

Bibliografía

- 1 Bremner, T. W., Holm, T. A., Morgan, D. R., "Concrete Ships – Lessons Learned", Proceedings, Concrete in Marine Environment, Third CANMET/ACI International Conference St. Andrews by-the-Sea, ACI SP 163, Editor Malhotra, V. M., Canada, 1996, pp 151-169.
- 2 Steiger, R. W., "Going to Sea in Concrete", Concrete Construction, USA, 1992.
- 3 Hoff, G.C., "Considerations in the Use of Concrete for Offshore Structures", Proceedings, Evaluation and Rehabilitation of Concrete Structures and Innovations, ACI SP 128-47, Hong Kong, 1991.
- 4 Gudmestad, O.T., Warland, T., Stead, B.L., "Concrete Structures for Development of Offshore Fields", Journal of Petroleum Technology, August 1993.

1. ESTRUCTURAS DE CONCRETO COSTAFUERA

Las estructuras de concreto representan una solución muy competitiva para el desarrollo de campos de explotación costafuera, principalmente existe el interés particular cuando se requiere de un almacenamiento en estructuras de tipo flotante ^(1.1). Además, las plataformas de concreto tienen la gran ventaja de que se pueden reutilizar, esto representa un ahorro y una solución para otras aplicaciones. Las características que se necesitan en el concreto, ya se puede obtener en la fabricación en el sitio de construcción.

Este tipo de estructuras han sido usadas principalmente en el Mar del Norte, en grandes instalaciones para la producción y almacenamiento de grandes volúmenes de petróleo o gas, bajo condiciones ambientales severas donde se presentan olas de más de 28 m de alto.

Estas estructuras se pueden diseñar para diferentes tipos de suelo, incluyendo arcillas muy duras con fragmentos de roca y en suelos muy suaves donde se puede penetrar una parte de la cimentación. Otra gran ventaja de estas estructuras es que tienen la capacidad de llevar todo o una parte de las instalaciones y equipos durante su remolque al sitio, permitiendo incrementar la productividad para el izaje y comparar el trabajo en tierra con el que se realiza en el mar el cual es más caro y difícil de realizar.

Ya existen muchas estructuras construidas de este tipo, su uso también ha ganado interés en el Golfo de México, gran número de compañías petroleras tienen interés de unir proyectos con los constructores Noruegos ya que son los que han desarrollado mayor tecnología en este ámbito.

El costo de mantenimiento en las estructuras de concreto es muy bajo, esto se ha comprobado con las estructuras que ya están en operación desde hace un buen tiempo y el seguimiento de su inspección ha demostrado que los límites de deterioración es muy pequeña.

En muchas regiones del mundo, el material que se utiliza predominantemente es el concreto, este es el único material de construcción que se fabrica en el sitio de construcción usando materiales y mano de obra locales, con este se puede fabricar cualquier forma que se imagine y además tiene un vasto potencial en sus características, debido a los materiales que lo componen, lo que permite garantizar los requerimientos de ingeniería establecidos. Su potencial de bajo costo se debe a que se utilizan materiales locales y la mano de obra empleada no requiere de alto grado de especialización. Cuando el concreto se fabrica apropiadamente, el mantenimiento de las estructuras desaparece.

La primera plataforma de concreto en el Golfo de México para la producción de gas y petróleo fue en 1950 y desde entonces más de 1000 estructuras se han construido en esta área. La primera con base de gravedad de USA fue instalada en 1978 y la primer gran plataforma Ekofish Tank fue instalada en 1973 en el Mar del Norte; después tres plataformas funcionalmente similares, han sido construidas en Brasil e instaladas en aguas sudamericanas.

El concreto tiene una larga historia y una presencia significativa en aplicaciones marinas y costafuera pero esto es virtualmente ignorado, a excepción de Noruega que ya considera otros nuevos desarrollos costafuera.

Dependiendo de la localización de las estructuras las podemos agrupar en:

- ◆ Onshore, se refiere a la localización que se encuentra en tierra cercana a la línea de playa.
- ◆ Inshore, es la localización que se encuentra en el mar cercana a la playa o aquella superficie en la costa que se encuentra en áreas protegidas, con respecto al mar abierto.
- ◆ Offshore, es la localización en el mar abierto, este concepto se mencionará como costafuera en este documento.

1.1. Tipos de Estructuras

Las estructuras de concreto que se localizan costafuera generalmente se pueden agrupar en estructuras con cimentación que se apoya en el fondo del mar y las de tipo flotante que se localizan en la superficie del mar ^(1.2 y 1.3).

1.1.1. Estructuras con Cimentación

Varios tipos de estructuras con cimentación, requieren flotar en diferentes etapas de su vida; cuando son construidas y cuando son remolcadas al sitio donde operarán. Estas estructuras se agrupan en:

- ◆ Estructuras con Base Gravitacional (Gravity Base Structure, GBS).
- ◆ Estructuras Soportadas por Pilotes.
- ◆ Estructuras con Armazón de Concreto de Tipo Flotante con Cimentación.

1.1.1.1. Estructuras con Base Gravitacional (GBS)

Mantienen su posición sobre el fondo del mar debido a su gran peso. La fuerza de desplazamiento y el momento de volteo que provocan las grandes cargas ambientales son absorbidas por su gran peso el cual está integrado por: El concreto, las cargas de operación sobre la estructura y el peso del lastre adicional que este contenido dentro de la estructura (figura 1.1).

Este tipo de estructura es común donde la producción de petróleo pueda ser almacenada antes de ser transportada por tubería o barco carguero. El rango de profundidad práctico para estas plataformas es de 40 a 300 m, anteriormente era menor la consideración pero la plataforma Troll opera a una profundidad de 303 m sin problema alguno. Estas estructuras son construidas en tierra o en la línea de playa y posteriormente se remolcan hasta su localización final mar adentro. El diseño de estas estructuras les permite tener la consideración de ser removidas del lugar cuando se requiera.

1.1.1.2. Estructuras Soportadas por Pilotes

Este tipo de estructuras fue utilizado en las primeras plataformas de concreto costafuera. Consisten en un arreglo de pilotes de concreto presforzado que se hincan en el fondo del mar, este arreglo está

hecho de acuerdo para poder recibir la losa de la cubierta que servirá como superficie de trabajo. La cubierta puede ser fabricada de concreto u otro tipo de material (figura 1.2). Para prevenir el impacto de embarcaciones en la zona de splash, se colocan camisas de concreto reforzado alrededor de los pilotes. Se pueden utilizar contra venteos de acero entre los pilotes para poder dar una mayor rigidez a los pilotes principalmente cuando estos son muy largos. El rango de profundidad práctico para estas plataformas es de 5 a 20 metros. El uso de este tipo de estructuras es común en los puentes, muelles y carreteras sobre el mar.

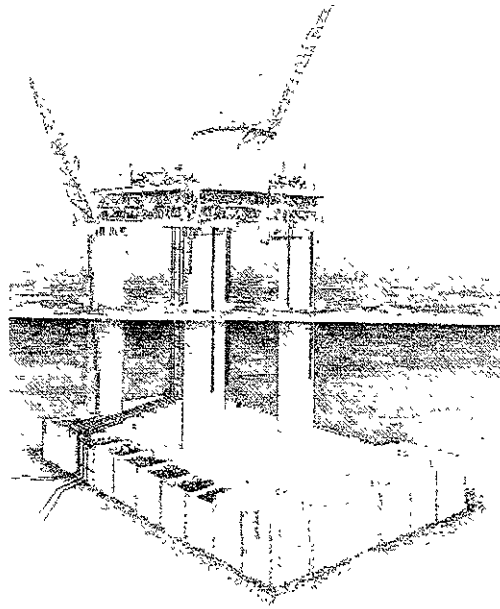


Fig. 1.1 Estructura con Base de Gravedad.

(<http://www.oil-gas.uwa.edu.au/platforms.html>)

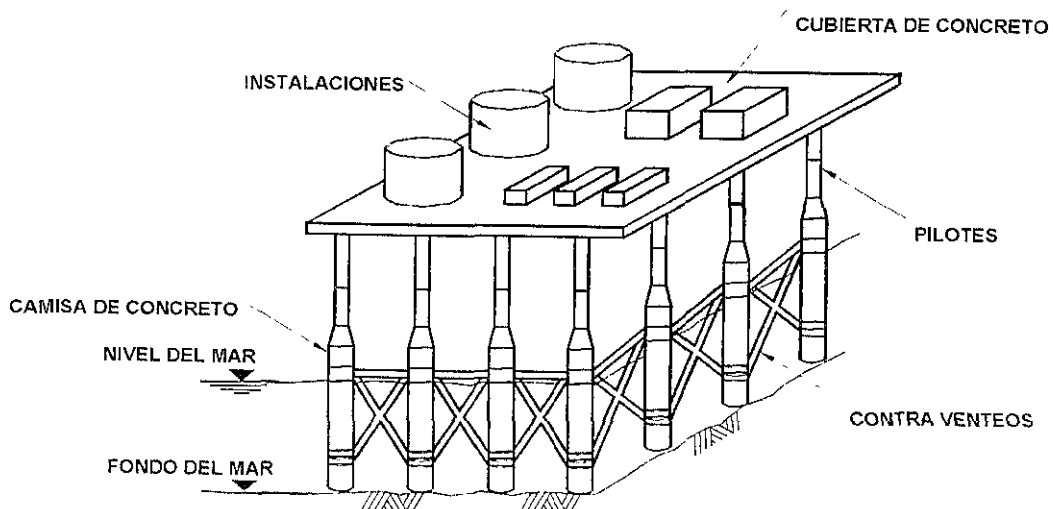


Fig. 1.2 Estructura Soportadas por Pilotes. (1.2)

1.1.1.3. Estructuras con Armazón de Concreto de Tipo Flotante con Cimentación

Generalmente consisten de una barcaza con casco de concreto el cual es diseñado para flotar, extendiéndose hacia arriba desde el casco por medio de postes o columnas las cuales actúan como soporte tipo marco para la plataforma. Estas columnas pueden ser de concreto o de acero. El casco flota hasta el sitio de localización y se llena con agua que sirve de lastre permitiendo a la estructura colocarse en el fondo del mar, esta es anclada al fondo del mar por pilotes alrededor de su perímetro. Estos pilotes mantienen a la plataforma en su posición y ayudan a resistir el deslizamiento y los movimientos que la plataforma pueda tener por las cargas ambientales. La cubierta superior y el equipo se colocan por medio de un barco – grúa (figura 1.3). Estas plataformas tienen varios tipos de arreglos, también pueden almacenar petróleo en su armazón. El rango de profundidad práctico para estas plataformas es de 4 a 30 m. Este tipo de estructuras se ha usado en el Golfo de México, con la ventaja de que pueden ser reutilizadas en diferentes lugares.

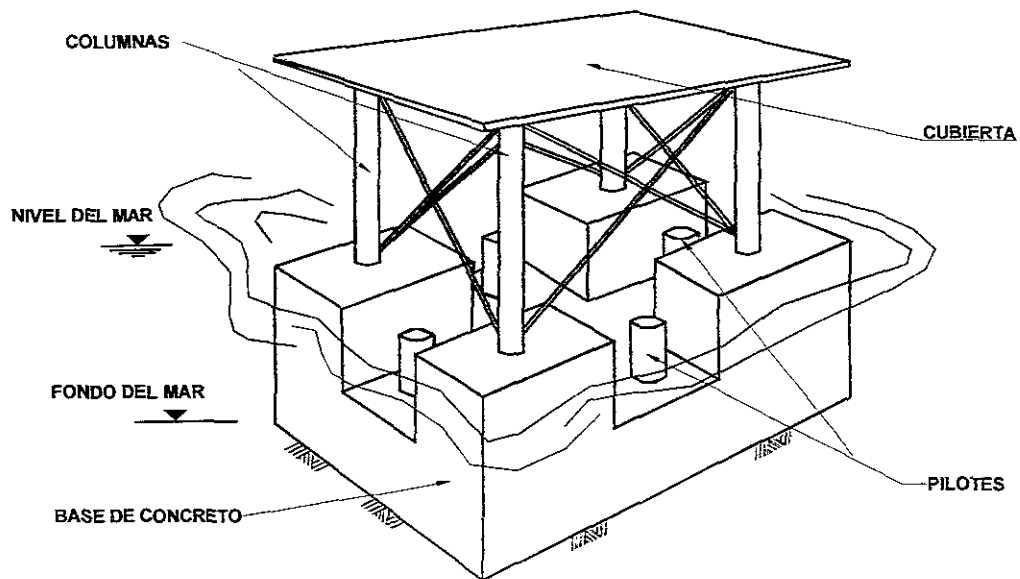


Fig. 1.3 Estructuras con Armazón de Concreto de Tipo Flotante con Cimentación.^(1,2)

1.1.2. Estructuras Flotantes

Son estructuras que operan de modo flotante y requieren de un sistema permanente de amarre, este tipo de estructuras se agrupan en:

- ◆ Plataformas de Piernas Tensionadas (Tension Leg Platform TLP).
- ◆ Estructuras Flotantes de Concreto con Calado Profundo.
- ◆ Barcazas de Concreto para Producción y Almacenamiento
- ◆ Plataformas Spar

1.1.2.1. Plataformas de Piernas Tensionadas (Tension Leg Platform TLP)

Derivan su nombre del hecho de tener fijos unos tirantes (piernas) que nacen en la estructura y se anclan en el suelo marino con una tensión determinada. Estos amarres que se localizan en las esquinas de la plataforma, la mantienen flotando en una posición muy precisa. La plataforma por sí misma puede tener varias configuraciones, estas estructuras tienen semejanza con los semi – sumergibles; su arreglo consiste de pontones que son la base principal de flotación y de donde se levantan cuatro grandes columnas que sirven de apoyo a la cubierta superior (figura 1.4). Toda la estructura puede hacerse de concreto. El rango de profundidad operacional para este tipo de plataformas es de 300 a 1,500 m, el tamaño de la TLP está generalmente en función de la cantidad de peso de las instalaciones que debe cargar, los diseños actuales tienen un rango aproximado de 50,000 ton.

1.1.2.2. Flotadores de Concreto con Tirante Profundo

Es similar en principio a las TLP pero estos usan un sistema de amarre convencional que mantiene su posición durante su operación debido a que esta estructura tiene un tirante muy profundo, gran peso, centro de gravedad bajo y amarres que se sujetan en la parte baja de su armazón (figura 1.5). Estos factores tienden a hacer que la estructura sea relativamente insensible a los movimientos del mar. Toda la estructura puede fabricarse en concreto. Su rango de operación en aguas profundas es de 300 a 900 m, a semejanza de la TLP su tamaño está generalmente de acuerdo a la cantidad de peso de las instalaciones que deba cargar; los diseños actuales tienen un rango aproximado de 50,000 ton.



Fig. 1.4 Plataforma de Piernas Tensionadas (TLP).

(<http://gomr.mms.gov/homepg/offshore/deepwatr/options.html>)

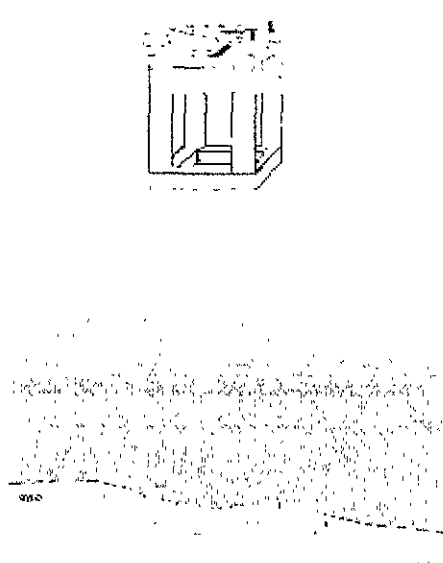


Fig. 1.5 Flotadores de Concreto con Tirante Profundo.

(<http://gomr.mms.gov/homepg/offshore/deepwatr/options.html>)

1.1.2.3. Barcazas de Concreto para Producción y Almacenamiento

Son fabricadas en forma similar a los barcos que conocemos con la diferencia de que se utiliza concreto en su fabricación, estas estructuras proporcionan una superficie suficiente para colocar las áreas del equipo de proceso, de trabajo, almacenamiento y habitacionales necesarias para la producción de gas y petróleo (figura 1.6). Los nuevos diseños ya permiten realizar actividades de perforación en sus instalaciones. Los pozos de producción son usualmente localizados cerca de monoboyas. Toda la barcaza se puede fabricar de concreto y el sistema de amarre lo proporciona la embarcación. Se pueden almacenar petróleo y otros fluidos procesados en la embarcación lo que permite ayudar a la transportación del producto por medio de buques tanque. El tamaño de la barcaza depende directamente de las condiciones del mar en el cual opera y por las superficies necesarias para poder realizar sus trabajos de operación. La profundidad a la cual el barco puede operar esta en función del calado del barco y el estado operacional del mar donde operará.

1.1.2.4. Plataformas Spar

Este tipo de plataforma es un nuevo concepto de estructuras que se están utilizando y que tiene forma de un gran cilindro que flota en forma vertical, su gran calado, peso y la localización en la parte baja de su centro de gravedad le dan estabilidad (figura 1.7). Requiere de un sistema de amarre que en este caso se encuentra en las partes altas de la estructura. Su forma le permite almacenar los materiales de explotación en cantidades considerables. Se puede fabricar totalmente de concreto o utilizar en algunas partes el acero para el apoyo de la cubierta. Las profundidades a las que puede operar son mayores a los 150 m.

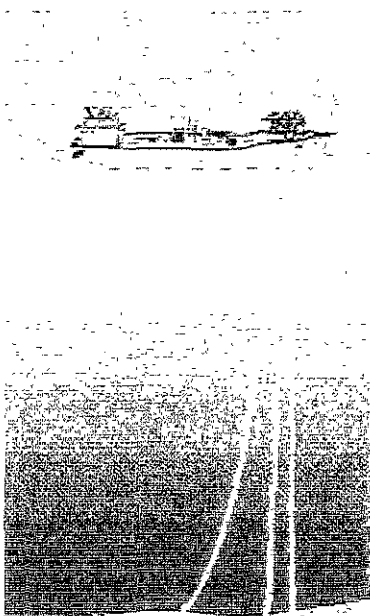


Fig. 1.6 Barcazas de Concreto para Producción y Almacenamiento.

(<http://gomr,mms.gov/homepg/offshore/deepwatr/options.html>)

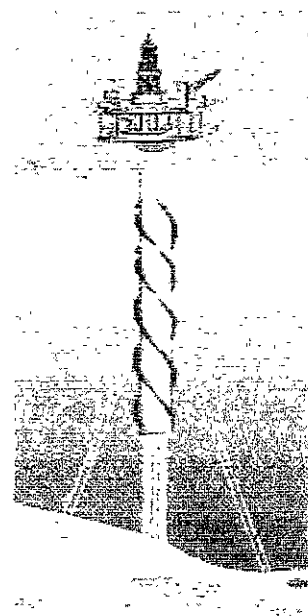


Fig. 1.7 Plataformas Spar.

(<http://gomr,mms.gov/homepg/offshore/deepwatr/options.html>)

1.1.3. Otros Tipos

1.1.3.1. Tanques de Almacenamiento

Tanques para el almacenamiento de petróleo, se han construido en profundidades de 20 a 400 m. Estos tanques se pueden construir en forma semejante a las bases de las GBS, considerando únicamente que estos están totalmente sumergidos en el fondo del mar donde funcionan como una estructura de base gravitacional.

1.1.3.2. Cajones de Concreto

Son estructuras en forma de cajón, en las cuales sus paredes actúan como muros de retención, se utilizan principalmente para construir islas artificiales, estas islas proporcionan una superficie de trabajo para la producción y explotación de gas y petróleo. El cajón es construido como un elemento flotante, que posteriormente se remolca hasta el sitio de operación y entonces se lastra para que llegue al fondo del mar, el armazón de la caja forma el perímetro de la isla artificial. El material de lastre es un relleno hidráulico que se utiliza para rellenar totalmente el cajón; cuando el uso de la isla artificial se termina, esta estructura se puede remover del lugar y ser utilizada en otra parte. Estos cajones ya se han construido de concreto con agregados de peso ligero. El uso de estos cajones para la construcción de islas artificiales son generalmente limitados a profundidades menores de 15 m.

1.2. Consideraciones de Diseño

Para el diseño de una estructura costafuera, se deben considerar todas las etapas a las que se somete la estructura, las cuales se pueden dividir en:

- a) Construcción. Incluye la construcción de la estructura en la costa y en su etapa de flotación.
- b) Transportación. Incluye la transportación de la estructura o parte de la estructura de la costa al mar, o de la costa a la barcaza, la transportación en mar abierto hasta la localización de permanencia y las operaciones de amarre.
- c) Instalación. Incluye la instalación de la estructura hasta su localización final, el periodo desde el sitio donde se sumergirá, los movimientos para posicionarla o su lanzamiento desde la barcaza, incluyendo el piloteo, lastre y anclaje, hasta que la estructura esté preparada para su operación normal.
- d) Operación. Es el periodo desde el final de la instalación hasta su desmantelamiento o abandono.
- e) Rehabilitación. Incluye la rehabilitación o traslado de la estructura.

En las etapas que se describieron, es importante considerar los siguientes puntos.

- ◆ Definición de las cargas máximas que actúan en las diferentes etapas.
- ◆ Análisis cuidadoso de los estudios geotécnicos, para la estabilidad de la estructura.
- ◆ Selección de las características y propiedades del concreto para asegurar un óptimo comportamiento.

- ♦ Análisis de seguridad para definir el criterio de diseño de la estructura al impacto de un barco.
- ♦ El tipo de lastre a utilizar en su caso, agua de mar o de tipo sólido.
- ♦ Prediseño del arreglo más adecuado con el fin de dimensionar la cubierta de la estructura, considerando los requerimientos de espacio para las actividades de operación.
- ♦ Criterios climatológicos y de seguridad para la estabilidad de la estructura durante y después de la instalación.
- ♦ Estimación del ángulo máximo vertical permitido durante el remolque de la plataforma, altura mínima permisible del centro de masa durante todas las etapas.

1.2.1 Cargas

En las estructuras costafuera por lo general se tienen que considerar dos etapas de diseño, una para resistir las cargas operacionales en la estructura y cimentación y la otra para resistir las cargas asociadas a una estructura flotante como si fuera un barco.

Las cargas que actúan en estas estructuras se diferencian de las comunes por el tipo, la frecuencia, la duración y magnitud. La ingeniería de detalle de los elementos estructurales de concreto es semejante a las comunes, ya que también se consideran las mismas características como: La tensión, flexión, compresión, cargas excéntricas, etc., las cargas tienen una influencia directa sobre el dimensionamiento de las estructuras costafuera y se deben considerar en las diferentes etapas antes mencionadas. Las cargas las podemos agrupar en:

Cargas Permanentes o Muertas. Son las cargas permanentes como: el peso propio de la estructura, el lastre fijo, el equipo permanente, la presión hidrostática externa.

Cargas Variables o Vivas. Son las cargas que se asocian con la operación y uso normal de la estructura, en esta categoría que son únicas para las estructuras costafuera se incluyen: el lastre variable, cargas por instalación y perforación, impacto de embarcaciones, defensas para el atraque y amarre, peso de productos del petróleo temporalmente almacenados en la plataforma, cargas por helicóptero, operaciones con grúa, personal y vehículos.

Cargas Ambientales. Estas cargas son producidas por la acción de los fenómenos naturales como: el oleaje, viento, corriente, hielo y sismo.

Cargas Accidentales. Estas se presentan como un resultado de un accidente o por condiciones excepcionales y que generalmente no pueden cuantificarse con precisión en magnitud y frecuencia, se incluyen: al fuego, explosión, impacto de objetos que caen, colisiones, inundaciones, distribución de lastre no intencional y cambios en las diferencias de presión presupuestas.

Cargas de Deformación Son el resultado de deformaciones impuestas como: el presfuerzo, contracción y expansión, fluencia y relajación, gradientes térmicos y asentamientos diferenciales.

Las estructuras actuales son diseñadas con suficiente margen de seguridad para resistir grandes cargas accidentales. A los elementos de concreto se les debe dar la suficiente ductilidad para eliminar los problemas de un colapso progresivo. Las estructuras de concreto flotantes son diseñadas con una

configuración basada en compartimentos, que dan estabilidad cuando se sufre un daño local, el cual pueda causar la filtración del agua de mar dentro de la armazón y poner en riesgo a la estructura en su totalidad. Estos criterios se aplican de forma similar a las estructuras de la cimentación para que no pongan en riesgo la integridad total de la estructura.

1.2.2. Requerimientos de Diseño

Como se puede observar una estructura costafuera está sometida a una gran variedad de cargas durante su vida, por eso los requisitos de resistencia y servicio de la estructura deben analizarse para asegurar que el sistema cimentación-estructura soporte los fenómenos ambientales y de esta manera evitar la falla, así el diseñador estructural deberá elegir la configuración y el detalle del refuerzo que asegure un modo de falla dúctil y no frágil evitando un colapso progresivo ^(1.4).

1.2.2.1. Requerimientos de Resistencia

Se debe obtener una resistencia tal que garantice una adecuada seguridad contra la falla de la estructura o de sus componentes. Entre los posibles modos de falla se consideran: la pérdida total de equilibrio, la falla de los miembros más importantes, la inestabilidad debida a grandes deformaciones, y las grandes deformaciones plásticas o de fluencia.

Las estructuras deben tener una adecuada resistencia a las grandes cargas causadas por el ambiente o por el hombre y así poderse mantener sin algún daño permanente. Estas grandes fuerzas se presentan por lo menos una vez durante la vida útil de la estructura.

Los requerimientos de resistencia deben satisfacer:

- a) Oleaje, corrientes y viento con largos períodos e intervalos de presencia.
- b) Sismos de gran intensidad
- c) Estructura sumergida durante la construcción, instalación de la cubierta, e instalación de la estructura en el sitio.
- d) Condiciones extremas de nieve o hielo.

Se recomienda un periodo de retorno de 100 años para todos los eventos ambientales.

1.2.2.1.1. Combinación de Cargas

Los requisitos de resistencia de la estructura y miembros pueden ser iguales o mayores a los valores máximos calculados. Cuando el diseño es gobernado por el sismo, entonces no se debe combinar simultáneamente con otras cargas ambientales. Una circunstancia especial, es cuando el diseño no es controlado por una sola carga ambiental, en este caso si se puede considerar la ocurrencia simultanea de eventos ambientales

En realidad existen combinaciones ya establecidas que se pueden considerar como principales, pero el diseñador puede realizar muchas otras que pueden generar una carga última máxima, según la

combinación de eventos simultáneos que haya considerado. Esto es indispensable, principalmente para las etapas de construcción e instalación.

En el ACI 357R-84 y otras guías para el diseño de estructuras costafuera, se establecen las combinaciones y los factores de carga según sus criterios propios.

1.2.2.2. Requerimientos de Servicio

La estructura debe ser capaz de operar según la función planeada, bajo grandes y frecuentes cargas originadas por las condiciones ambientales. Entre las condiciones que pueden causar que la estructura se encuentre fuera de servicio son: el agrietamiento excesivo, grandes deformaciones, corrosión del refuerzo o deterioración del concreto, grandes vibraciones y filtraciones excesivas.

La estructura puede revisarse elásticamente o por medio de los diagramas esfuerzo-deformación. Es importante revisar el agrietamiento en los miembros estructurales para que su durabilidad no se vea afectada. El control del agrietamiento que se basa en el esfuerzo límite es lo más recomendable.

1.2.2.3. Requerimientos Especiales

Debe verificarse la resistencia de la estructura en las diferentes etapas de construcción, principalmente en las etapas de flotación y sumergida.

1.2.2.3.1. Implosión

Los muros de concreto deben dimensionarse adecuadamente para prevenir colapsos catastróficos durante la exposición de presión hidrostática. Los modos de falla potenciales se consideran a aquellas debidas a los materiales y a la inestabilidad estructural. En estructuras que son más complejas, como las de tipo cascarón se debe verificar basándose en un análisis racional al comportamiento de la estructura, incluyendo la influencia de las cargas y en un segundo orden observar los efectos producidos por las deformaciones. Después de esto, se debe realizar una evaluación para considerar: posibles agrietamientos, efectos del refuerzo sobre la rigidez del miembro, efectos de fluencia y los efectos de una posible deficiencia geométrica. El diseño supone que las deficiencias geométricas se verificarán por medio de las mediciones realizadas durante la construcción. Las observaciones que se realizan entre las pruebas experimentales y el análisis de predicción, permitirán que los factores de seguridad utilizados contra la implosión por estabilidad geométrica sean más precisos.

1.2.2.3.2. Aire Comprimido

Cuando se utiliza la presurización en los compartimientos de aire para pequeñas inmersiones de la estructura, se deben de tomar precauciones principalmente en el suministro de: equipo, fuente de poder y de materiales que se utilizan en el caso de filtraciones. La presión de aire interna no debe exceder de un valor igual a la presión externa en menos de dos atmósferas, a cualquier tiempo y en cualquier localización, pero no debe ser menor de una atmósfera.

Se deben considerar los cambios de temperatura del aire interno como un resultado de la compresión, expansión, e inmersión.

1.2.2.3.3. Temperatura

Las cargas por temperatura pueden conducir a agrietamientos severos en regiones de restricción estructural. Cuando se investigan los efectos térmicos, se debe considerar:

- ◆ Identificar el patrón crítico del almacenamiento del líquido.
- ◆ Seleccionar un método que pueda definir la diferencia de temperatura en diferentes secciones del muro.
- ◆ Definir un modelo real del comportamiento del concreto para predecir los esfuerzos inducidos.

Para reducir la severidad de los efectos de los esfuerzos térmicos es recomendable usar el método de reducción para mantener una presión hidrostática externa para contener el almacenamiento en exceso de la presión interna del fluido.

1.3. Construcción

La construcción de grandes estructuras de concreto se realiza tradicionalmente en su primera etapa en un dique seco, después de esta etapa se continúa la construcción afuera del dique en una dársena en aguas poco profundas en donde la estructura pueda flotar. La estructura se sumerge gradualmente durante la construcción reduciendo la altura del nivel del mar con respecto a la altura de la estructura, por lo que se debe buscar un sitio con suficiente profundidad para realizar esta operación. Esta dársena se debe localizar en un lugar que este al resguardo de las acciones climatológicas severas y del mar abierto.

En estructuras pequeñas existe una gran flexibilidad en la construcción si la cimentación de la estructura se construye en barcazas. El uso de barcazas permite a las estructuras de concreto ser construidas en cualquier parte, proporcionando únicamente un sitio que sea protegido por las grandes olas y corrientes. En este caso no se requiere de una gran infraestructura porque el equipo necesario como las fuentes de energía eléctrica, la planta de mezclado y los materiales de construcción se pueden tener en otro barco o se puede realizar la fabricación a base de módulos, los cuales se podrán ensamblar rápidamente.

Para una fabricación eficiente, el slipforming (cimbra deslizable) es muy recomendable para obtener un concreto homogéneo y de alta calidad. Como una alternativa, es posible el uso de cimbras fijas. Para la fabricación de formas cónicas o inclinadas, se puede utilizar el equipo y la tecnología existente de escala internacional, tecnología que involucra principalmente a equipos agrupados en módulos y al slipforming

Al término de la construcción de la estructura, la cubierta que contiene al equipo de proceso y producción se puede instalar sobre la estructura antes de que sea remolcada a su sitio de permanencia. En las grandes plataformas, estas se sumergen a la profundidad requerida para poder

colocar y fijar la cubierta, después la estructura flotará a la profundidad calculada para ser remolcada hasta su localización final. En este caso los compartimentos de la cimentación tienen la capacidad de llenarse o vaciarse con agua de mar que sirve de lastre y de este modo obtener la profundidad deseada en la plataforma.

1.3.1. Sitios de Construcción

Las estructuras con cimentación y las de tipo flotante se pueden construir total o parcialmente en:

- ◆ Dique seco
- ◆ Barcazas
- ◆ Rampas
- ◆ En instalaciones prefabricadas

1.3.1.1. Dique Seco

El método principal de construcción utilizado en las grandes plataformas de concreto es el de iniciar la construcción en un dique seco, una vez que la base de la estructura esté lo suficientemente rígida y tenga suficiente capacidad para flotar en este dique, se permitirá la entrada de agua para que la base pueda flotar. Posteriormente la estructura será remolcada hasta una localización más profunda donde será temporalmente amarrada, continuando su construcción en este sitio (figura 1.8).

Lo más recomendable es disponer de un sitio en aguas profundas que pueda ser cerrado en la costa para tener un mejor resguardo, de esta forma se podría comunicar a la estructura con la costa por medio de un puente permitiendo el acceso al equipo, materiales y personal de la construcción. Las oficinas, la bodega y las instalaciones para la producción del concreto se podrían instalar en la costa. Si la estructura es localizada lejos de la costa, se tendrá que hacer uso de embarcaciones adyacentes que servirán como oficinas, bodegas y planta de producción, apoyándose también de otras embarcaciones para el acarreo de materiales y equipo.

Una vez concluida la construcción en este sitio, la estructura se moverá a una localización más profunda donde se acoplará la cubierta, los equipos y las instalaciones.

En general el costo para la construcción de una GBS es menor si se realiza en un dique seco, la productividad es mayor, no se requiere de equipo especial y sobre todo el riesgo de construcción es menor. Las plataformas pequeñas de concreto se pueden construir totalmente en el dique seco con suficiente capacidad de flotación permitiendo posteriormente su remolque hasta la localización final.

Se genera un gasto mayor en la construcción de una plataforma si se tiene que construir el dique seco, o en la modificación de uno existente para poder integrar las instalaciones de construcción, este costo incluye: la compra del terreno, excavación, construcción de compartimentos, sistemas de desagüe, dragado de canales, construcción de muelles, diques y mejoramiento de la infraestructura que apoye el proyecto: caminos, puentes, suministro de energía, suministro de agua, tratamiento de aguas, etc. Estos costos pueden fácilmente incrementar el costo del proyecto.

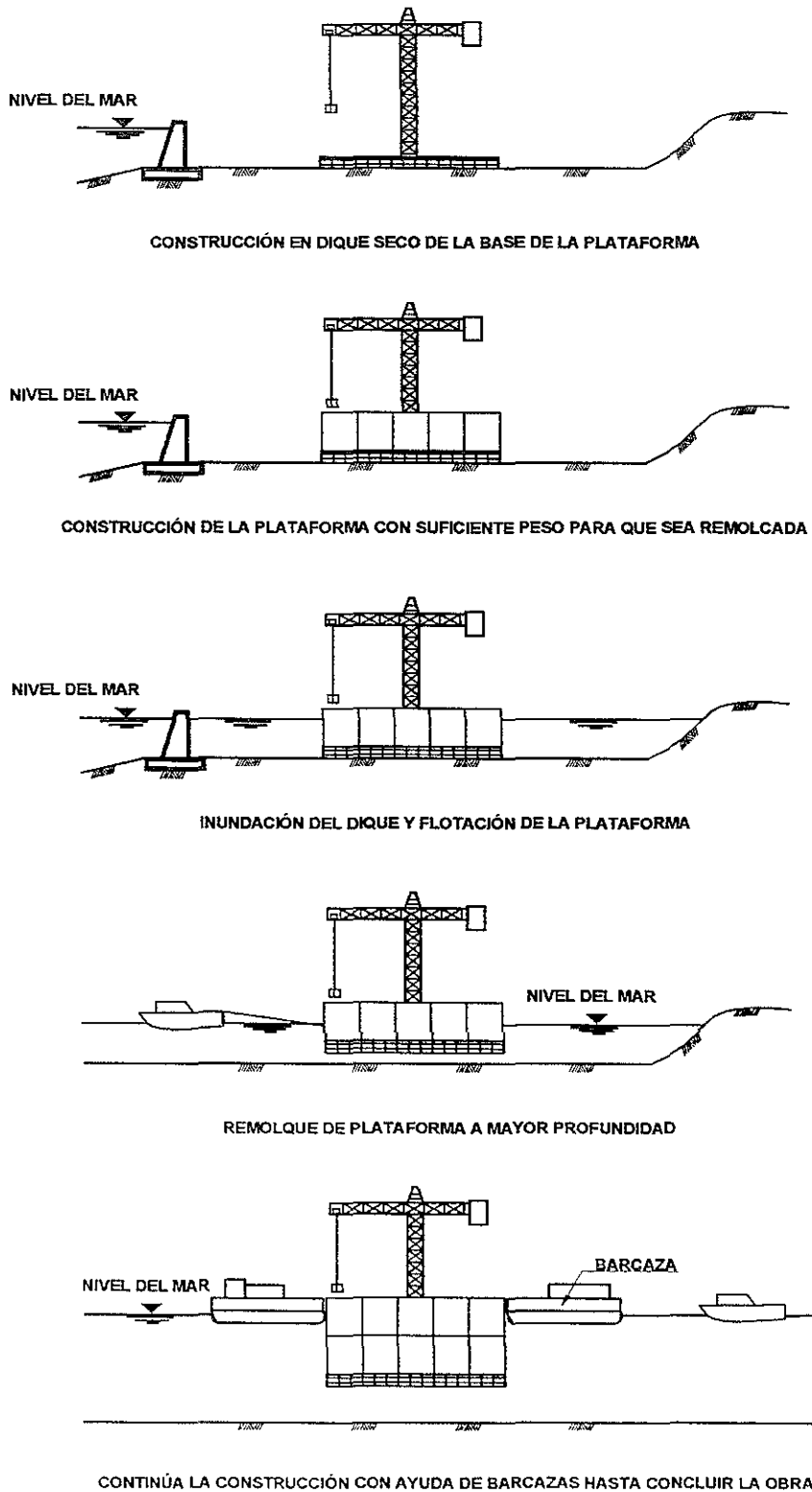


Fig. 1.8 Construcción en Dique Seco. ^(1,2)

1.3.1.2. Barcazas

Para eliminar muchos de los costos asociados con la construcción de un dique, es una buena solución la construcción en barcazas para toda o una parte de la plataforma. Estas eliminan la necesidad de un dique y sus demás instalaciones en el sitio de construcción. Cualquier localización con suficiente profundidad para las barcazas y las operaciones de los barcos de suministro es un buen sitio de construcción, este sitio preferiblemente se debe encontrar en aguas protegidas y no estar sujeto a aguas agitadas. El número de barcazas requeridas dependerá del tamaño de la estructura y de la capacidad de las barcazas (figura 1.9). La construcción en barcazas especiales siempre es una buena solución pero es más económico utilizar las suficientes barcazas de tipo y tamaño estándar que se acoplen para el mismo objetivo. Una vez que las barcazas hayan sido ensambladas para proporcionar una plataforma de trabajo, los procedimientos de construcción son los mismos como si se estuviera en tierra. La capacidad de construcción depende de la profundidad de agua disponible. Inicialmente, la construcción puede empezar con los amarres de los barcos adyacentes a la costa para que todo el apoyo de la construcción pueda venir directamente de tierra. Si la plataforma es pequeña, toda se podría construir sobre las barcazas en un mismo sitio, pero si la plataforma es grande, solamente una parte podrá ser construida en la barcaza y posteriormente flotará sin la ayuda de las barcazas. Temporalmente será amarrada y la construcción se terminará de este modo.

1.3.1.3. Rampa

Existen en casi todos los astilleros, son básicamente losas estructurales de carga que inician en una área de construcción y se introducen en el mar. Las estructuras que se construyen en la rampa se ayudan de maniobras desde tierra y estas se van deslizando sobre la pendiente de la rampa conforme avanza su construcción para poder introducirse en el mar (figura 1.10). Estas estructuras pueden posteriormente flotar por sí mismas o se pueden apoyar sobre barcazas y continuar su construcción.

Las plataformas como las GBS de concreto, pueden ser parcial o totalmente construidas sobre una rampa. Esta es la mejor opción para estructuras de menor tamaño, porque el peso de una gran estructura de concreto es muy difícil de manejar, esto es probablemente una gran limitación ya que no se puede utilizar una rampa determinada sin antes realizar una mejora estructural. Sin embargo esta mejora no garantiza que se puedan realizar los trabajos para estructuras muy pesadas, la gran mayoría de las estructuras de concreto se pueden construir sobre una rampa hasta cierto nivel para posteriormente flotar por sí mismas y ser remolcadas hasta un sitio de mayor profundidad y terminar su construcción.

1.3.1.4. Instalaciones Prefabricadas

Las instalaciones prefabricadas son usadas principalmente con concreto premezclado en pilotes y en cubiertas. Estas instalaciones pueden ser usadas para prefabricar partes principales de la estructura. Los elementos prefabricados son transportados y ensamblados en otros lugares. El método seleccio-

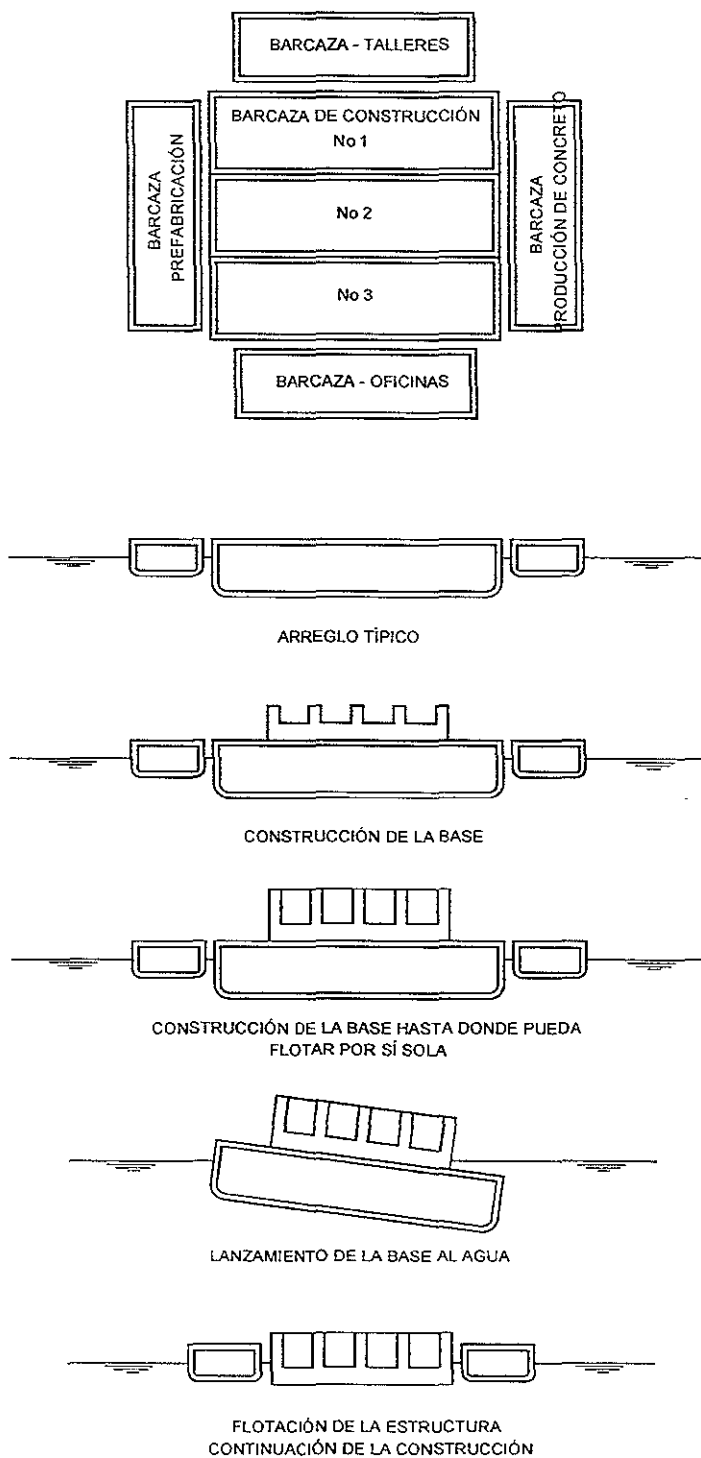


Fig. 1.9 Construcción en Barcazas.^(1,2)

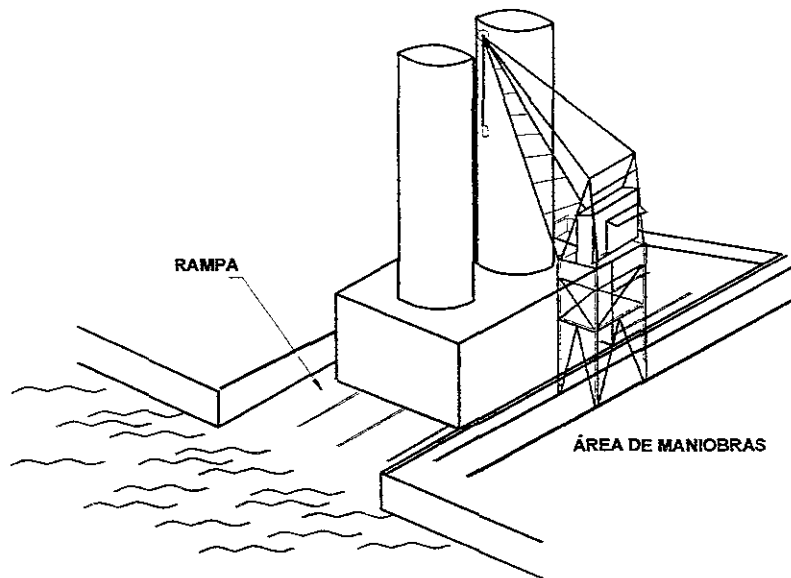


Fig. 1.10 Construcción en Rampa.^(1,2)

nado dependerá principalmente de las instalaciones existentes donde se planeará la construcción y el potencial económico del proyecto.

1.3.2. Limitaciones del Sitio de Construcción

La principal limitación para cualquier sitio de construcción, es encontrar un acceso a mar abierto que tenga canales de navegación. La mayoría de las estructuras flotarán al mismo tiempo que se construirán, por lo que este lugar deberá tener el calado suficiente para que floten las estructuras y de aquí puedan ser remolcadas a la localización final. El dragado de nuevos canales es muy costoso y la factibilidad desde el punto de vista físico, ambiental o político no es muy viable. Este sitio además de tener la profundidad necesaria, se debe encontrar en un lugar donde el viento, las olas y las corrientes sean de baja intensidad. Son ideales los lugares en la costa que son cerrados con buena comunicación terrestre para el suministro de los materiales y la utilización de la mano de obra local o cercana, esto es para evitar el manejo de materiales y personal por vía marítima, lo que provoca el encarecimiento de la obra.

Si un dique seco se requiere y existe la factibilidad de ser construido, la infraestructura que se requiere se debe estudiar cuidadosamente antes de que el sitio sea seleccionado. Si el sitio no se puede escoger en una área cercana o en una pequeña ciudad, el costo se incrementaría porque el desarrollo del sitio deberá incluir: alojamiento para los trabajadores, comedor, abastecimiento de agua, alcantarillado, instalaciones recreativas, comunicación, transportación y todas aquellas instalaciones que tiene una pequeña ciudad.

1.4. Bibliografía

- 1.1 Gudmestad, O.T., Warland, T., Stead, B.L., "Concrete Structures for Development of Offshore Fields", *Journal of Petroleum Technology*, August 1993.
- 1.2. Hoff, G.C., "Considerations in the Use of Concrete for Offshore Structures", *Proceedings, Evaluation and Rehabilitation of Concrete Structures and Innovations, ACI SP 128-47, Hong Kong, 1991.*
- 1.3. Hoff, Reusswig, Ugaz, "Concrete GBS Platforms for Southeast Asia: Structural Concepts and Site Considerations", *Proceedings, Offshore Technology Conference, OTC-7160, Houston, Texas, 1993.*
- 1.4. ACI Committee 357, "Guide for The Design and Construction of Fixed Offshore Concrete Structures", ACI - 357R-84, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1984.

2. REQUERIMIENTOS DEL CONCRETO

La tecnología del concreto ha tenido un desarrollo muy importante en la construcción de plataformas, gracias a la demanda para obtener un concreto de alta resistencia de peso ligero, de gran durabilidad, con grandes volúmenes de fabricación y de buena velocidad de construcción que requiere: del desarrollo de cementos especiales, uso de puzolanas, procesos hidráulicos para la selección del tamaño de arenas, agregados de cuarzo triturados en forma cúbica, producción industrial de Agregados de Peso Ligero (APL), superplastificantes refinados y otros aditivos químicos para satisfacer el diseño de las mezclas de concreto ^(2.1).

Las demandas principales para los concretos para las nuevas plataformas se pueden dividir en varios puntos: resistencia, durabilidad, E-módulo/rigidez, peso/densidad y constructibilidad.

La resistencia: debido al continuo desarrollo de investigaciones con relación a los materiales que constituyentes al concreto y al diseño de mezclas, se ha incrementado la resistencia y al mismo tiempo las propiedades relacionadas con los procesos de construcción, tales como la trabajabilidad, la cual se ha mantenido y mejorado. Los niveles de resistencia se han incrementado desde el grado C40 a C80 en 20 años desde 1970. Una relación máxima de agua/cemento (*a/c*) de 0.35 y un uso extensivo de microsilica en un rango de 8% del peso del cemento, que unido con el uso de una alta calidad en el cemento y en los agregados, resulta un concreto resistente de más de 100 Mpa. Hoy en día existe una gran tendencia para utilizar concretos de baja densidad, los cuales se puede producir por medio de los agregados de cuarzo. Esta característica se explicará con mayor detalle en el capítulo de concretos, donde se hablará del desarrollo de los Concretos de Alta Resistencia (CAR).

La durabilidad: la mayoría de las plataformas se han diseñado para una vida útil de aproximadamente 30 años, hoy ya se plantea la vida útil de diseño de 50 a 70 años. Las dos áreas principales de interés dentro de la investigación de la durabilidad del concreto son: la excesiva temperatura de hidratación y sus gradientes que se involucran directamente con el agrietamiento térmico y la reducción de resistencia, la otra área es la penetración de cloros que provocan la corrosión del refuerzo. Los grandes contenidos de cemento combinados con las secciones delgadas que se usan en las estructuras, son los factores que contribuyen a generar altas temperaturas de hidratación en el concreto. De acuerdo con las especificaciones de las plataformas del Mar del Norte, la temperatura máxima no debe de exceder los 70°C y tener un gradiente de 30°C por 30 cm de espesor. Para mantener estos límites se tomaron precauciones tales como, el enfriamiento de los materiales del concreto y/o el reemplazo parcial del agua de mezclado por hielo, cuidado muy especial en la insolación del concreto fresco y del endurecido.

Las investigaciones sobre el CAR han mostrado el impacto negativo que tiene la generación de la temperatura de hidratación sobre la disminución de las propiedades del concreto con bajas relaciones *a/c*. La utilización de silica fume y otras puzolanas han sido beneficiosas.

El problema principal de la durabilidad en las estructuras de concreto reforzado en ambiente marino es la corrosión del acero. La corrosión es debida a la penetración de cloro dentro del concreto. Las investigaciones han mostrado que los cloruros penetraran en el concreto si la relación a/c es menor que 0.45.

La intrusión de cloruros en la zona de marea de una plataforma de concreto se determinó después de 9 años de exposición, el contenido de cloruros en el concreto a una profundidad de 40 mm fue menor que el 0.15 % del peso del cemento. El recubrimiento actual del refuerzo es de 50 mm. estos resultados indican que el tiempo antes de un contenido critico de cloruros mayor de 0.4 % por peso de cemento alcanzara al refuerzo en más de 50 años.

Se puede concluir que no se necesitan grandes ajustes en el diseño de las mezclas de concreto y los límites que se muestran en la tabla 2.1 y que servirían como parámetros para alcanzar o extender la vida de servicio de 30 a 50 o 70 años. Las precauciones que se deben de tomar son limitar la exposición de la temperatura de hidratación excesiva y del gradiente.

Módulo de Elasticidad y Rigidez: la rigidez del concreto es particularmente importante para las plataformas, el reforzar de más una estructura para darle una mayor rigidez, por lo regular no es muy eficiente y además es más costoso.

La relación entre el esfuerzo a la compresión y el módulo de elasticidad proporcionado por varios reglamentos es errónea para el CAR. Sin embargo, en los proyectos donde se requiera conocer el módulo de elasticidad, este se deberá calcular mediante ensayos previos a la construcción de la estructura.

El módulo de elasticidad esta muy ligado al tipo de agregado que se utilice, el uso de APL son mejores principalmente la utilización de rocas duras como los agregados de cuarzodiorita/anorthosite que dieron un módulo mayor que el gneis/granítico en algunos estudios.

Peso/Densidad: la reducción del peso es de gran importancia para las estructuras de tipo flotante ya que mejoran su desplazamiento y tamaño. Para las plataformas con base gravitacional el uso de concreto de baja densidad les proporciona mejores soluciones a sus problemas de flotación cuando se encuentran fuera de su dique, el calado que requieren en el canal de remolque, su estabilidad de flotación, etc..

Hoy se utilizan diferentes densidades del concreto en varias partes de una estructura, lo cual permite al diseñador desarrollar una estructura más optima y competitiva. Sin embargo, es palpable el incremento del costo del concreto debido al uso de APL, que al final de todo será plenamente justificado.

En la plataforma Troll se colocaron tres tipos de concretos con diferentes densidades, en la parte de la base de cimentación se colocó un concreto más pesado, en la parte después de la cimentación hacia la superficie, un concreto con densidad media, y en la parte superior arriba del nivel de mar se usó un concreto de baja densidad.

Constructibilidad: una característica que tiene el concreto en su fabricación es su calidad, es un material que puede ajustarse en el sitio de construcción por medio de la modificación de sus

materiales y el cambio en sus proporciones ^(2.2). El objetivo de un diseño práctico, es el desarrollo de un concreto que pueda ser producido, transportado, y colocado de una manera eficiente y consistente para obtener la calidad requerida en el sitio. Una mezcla de concreto con apropiadas características de Constructibilidad en el bombeo y la fluidez para su colocación es de vital importancia para obtener un óptimo resultado económico. Los costos en la construcción son más altos por: La suspensión impredecible de los trabajos, la disminución en los avances, o por las grandes reparaciones en la superficie del concreto.

Una característica especial de las plataformas costafuera es la alta densidad del refuerzo que se usa, la densidad del refuerzo común es normalmente de 300 a 500 kg/m³ de concreto, incrementándose localmente de 800 a 1,200 kg/m³. La colocación del concreto en áreas congestionadas con grandes cantidades de refuerzo requiere del desarrollo de mezclas con revenimientos de 220 a 250 mm. La colocación del concreto en esas secciones demanda un concreto extremadamente trabajable conociendo la necesidad para la fluidez sobre un sitio y la estabilidad sobre otro sitio. En especial para las áreas congestionadas se tiene que considerar una reducción en el tamaño máximo del agregado con diámetros de 12 a 20 mm, lo que asegurar una operación de llenado total.

La utilización de la cimbra deslizante slipforming, es ya un método de construcción conocido y aplicado en diferentes construcciones de plataformas de concreto costafuera con alturas considerables. Esta técnica ha sido muy eficiente y además tiene muchas ventajas, en consecuencia una parte de los esfuerzos tienen que ser para realizar configuraciones apropiadas en las operaciones del slipforming que verifiquen el sistema de producción y la optimización de la mezcla de concreto.

En la tabla 2.1 se muestra un resumen de los principales retos y requerimientos del concreto en las estructuras costafuera.

2.1. Durabilidad

La durabilidad de una estructura de concreto se puede valorar en función de su capacidad para resistir las acciones deteriorantes derivadas de las condiciones de exposición y servicio a que este sometida. Las condiciones de exposición se refieren a las del medio en que se halla la estructura y son particulares de cada sitio, en tanto que las de servicio son inherentes a las funciones que desempeña cada estructura en particular, de acuerdo con los fines para los que fue construida ^(2 3).

Para construir estructuras durables bajo las condiciones mencionadas, se tiene que documentar y evaluar ambas condiciones y adoptar oportunamente las medidas adecuadas para resistir las acciones deteriorantes que de ellas se deriven.

Las condiciones del medio en que se halla la estructura normalmente se refieren a las del medio externo, sea este el medio ambiente o el de contacto, pero también pueden referirse a las del medio interno, es decir, las condiciones que prevalecen en el interior del concreto.

RESISTENCIA	Resistencia del concreto. Densidad Normal. 1970s: 460 a 560 kg/cm ² 1980s: 560 a 715 kg/cm ² 1990s: 816 a 1,020 kg/cm ² Concreto con agregado de peso ligero: 560 a 715 kg/cm ²	Resistencia a la compresión Resistencia a la tensión Resistencia en-sitio
MÓDULO DE ELASTICIDAD	C 60-70 Ec: 2.5 – 3.5 GPa C 75 Ec: 3.0 – 4.0 GPa LC 60 Ec: 2.0 – 2.5 GPa	Módulo de Elasticidad Relación Esfuerzo - Deformación
PESO	C 80-90 : 2,450 kg/cm ³ LC 75 : 2,250 kg/cm ³ LC 65 : 1,950 kg/cm ³	Densidad del Concreto Peso en-sitio
DURABILIDAD	Corrosión y ataque químico Intrusión de agua Normal: 15 mm Máximo: 25 mm Resistencia al congelamiento (zona de splash)	Materiales sanos Baja permeabilidad: $K < 10^{-13}$ m/s Baja relación agua-cemento: Zona sumergida < 0.45 Zona splash < 0.40 Contenido Mínimo de cemento: 350 kg/m ³ Recubrimiento mínimo del acero de refuerzo: 5.0 cm Contenido de aire:
CONSTRUCTIBILIDAD	Densidades Altas de Refuerzo e instalación Cimbra deslizante (slipforming) Alta producción y Sistemas de transporte avanzados Alta presión de bombeo (concreto normal) Máxima temperatura del concreto 70°C Máximo gradiente: 30°C por 300 mm Grandes dimensiones	Alta trabajabilidad (revenimiento > 220 mm) Ausencia de sangrado o segregación Graduable y ajustable Tiempo de fraguado Revibración Calidad constante y coherente Control y distribución del colado Alta bombeabilidad Temperatura del concreto Calor de hidratación

Tabla 2.1 Retos y Requerimientos para el Concreto Costafuera. (2.1, 2.2)

Las condiciones del medio ambiente dependen de la posición geográfica y del carácter urbano, rural o industrial del lugar, y las características del medio de contacto son el tipo de suelo, el agua o cualquier otra sustancia sólida, líquida o gaseosa que eventualmente pueda tener contacto con la estructura.

Las condiciones que prevalecen en el interior del concreto pueden ser químicamente estables o inestables, dependiendo de la compatibilidad de sus componentes. La condición inestable que más afecta la durabilidad del concreto, es la que se origina cuando se producen reacciones deletéreas entre el cemento y los agregados.

Se ha comprobado en la práctica que las estructuras de concreto pueden permanecer en servicio, por más de 50 años en ambiente marino, sin necesitar casi de mantenimiento.

Un estudio que se realizó en diferentes estructuras que se construyeron durante la segunda guerra mundial y que todavía se encuentran en buen estado de manera general, mostró que: únicamente existe corrosión en el acero de refuerzo y deterioración en el recubrimiento en las áreas ubicadas sobre la línea de mareas altas de la estructura, esta área es parte integrante de la zona de splash, encontrándose también que el concreto que se encuentra en la zona sumergida no presenta deterioración ^(2,4).

En este estudio se obtuvieron dos conclusiones en el funcionamiento del concreto que se encuentra en la zona sumergida y de splash.

En la zona sumergida el concreto no presenta degradación por que: La concentración de iones de cloruro no puede excederse debido a la saturación total, la cual es relativamente baja, alrededor del 0.1 % del peso de cemento y que es también uniforme, la concentración diferencial de celdas no se formará. Para continuar el proceso de corrosión es necesario oxígeno el cual en esta zona es muy limitado, sin embargo el agua de mar contiene algo de oxígeno disuelto cerca de 5 ppm a la profundidad considerada, esta se difunde a través del recubrimiento del concreto y la disponibilidad del refuerzo es obviamente insignificante comparada con la zona de splash.

En la zona de splash de la estructura, se producen iones de cloruro debido a los ciclos sucesivos de evaporación, estos iones se pueden unir a una probable compactación deficiente y variable del concreto, que conduce a la formación de macro - celdas de corrosión y unido a la alta disponibilidad de oxígeno en estas áreas provoca la continuidad de la corrosión en estas celdas, esto puede ser suficiente para causar astillamientos o desprendimiento del recubrimiento de concreto en un tiempo relativamente corto.

Hoy en día existen diferentes comités internacionales que hablan de la durabilidad y aunque cada uno difiere en algunos detalles y algunas veces considerablemente, se mencionan tres características básicas que se relacionan con el diseño de la durabilidad, que son: las condiciones de exposición, la baja permeabilidad que se basa en los componentes de la mezcla, los recubrimientos, la compactación y el curado, finalmente las agresiones químicas o físicas como el ataque de los sulfatos, la abrasión, congelación y deshielo. Este último tema no es aplicable en gran porcentaje en México, a

pesar de esto se mencionaran las características generales que se describen en la literatura internacional en las estructuras costafuera.

2.1.1. Condiciones de Exposición

En las estructuras costafuera se consideran tres zonas con diferentes tipos de exposición y las características de la durabilidad por consiguiente son diferentes ^(2.5, 2.6, 2.7).

Zona Sumergida. Es la zona que esta totalmente cubierta por el agua de mar, es la parte de la estructura por abajo de la zona de splash. En esta zona se debe evitar la deterioración química del concreto, prevenir la corrosión del acero de refuerzo, y la abrasión.

Zona de Splash. Es la parte de la estructura sujeta a ciclos de humedecimiento y secado por el agua de mar, esta zona también es limitada por los niveles altos y bajos de las olas dentro de un periodo de retorno estadístico de seis meses, también se le conoce como zona de rocío o salpicadura. Aquí debemos considerar el congelamiento y deshielo, prevenir la deterioración química del concreto, prevenir la corrosión del acero de refuerzo, y la abrasión.

Zona atmosférica. Es la parte de la estructura que se encuentra por arriba de la zona de splash y que no esta en contacto con el agua de mar. En esta zona se debe prevenir el deterioro debido al congelamiento y deshielo, la corrosión del acero de refuerzo, el fuego, y la abrasión.

Teniendo en mente el riesgo de la degradación del concreto y la corrosión del acero de refuerzo, las estructuras de concreto costafuera deben ser de una geometría simple con superficies lisas y redondeadas, teniendo cuidado especialmente en la zona de splash para evitar las esquinas angulares y los detalles complejos en el acero de refuerzo.

2.1.2. Permeabilidad

La baja permeabilidad es considerada la clave principal del concreto durable, las diferentes recomendaciones internacionales no ponen límite al respecto sino al contrario, dan características para la utilización de materiales y proporciones de mezclas, recubrimientos, compactación y curado.

Las causas de una alta permeabilidad en las nuevas estructuras de concreto no son limitadas por las mezclas que son hechas con bajos contenidos de cemento, altas relaciones de a/c o inapropiadas graduaciones en los agregados. Si lo anterior lo pudiéramos corregir no sería suficiente ya que una causa frecuente de alta permeabilidad son las deficientes prácticas de construcción que se realizan como: la mezcla incompleta del concreto, la mala compactación, el curado inadecuado después de la colocación, el insuficiente recubrimiento del acero de refuerzo y las pésimas juntas de construcción. De aquí surgen áreas heterogéneas en la estructura del concreto endurecido que son sitios potenciales para el desarrollo de microgrietas ^(2.8).

Aún las estructuras bien construidas, hechas con mezclas de alta calidad, pueden ser permeables en servicio debido a la presencia de grietas excesivas, causadas por varias razones: hundimientos, pre carga, sobre carga e impactos continuos.

En las estructuras de concreto reforzado, es común observar agrietamientos y desprendimientos frecuentes acompañados de corrosión del acero embebido. El refuerzo no previene el agrietamiento debido al secado o a la contracción térmica; para restringir la contracción del concreto el acero reduce el ancho de grieta, en lugar de pocas grietas anchas se forman numerosas microgrietas. El ensanchamiento de estas grietas en servicio facilita la penetración de iones y gases, los cuales son necesarios para el proceso de corrosión. Para obtener una buena durabilidad en las estructuras de concreto, el control del agrietamiento en servicio es de mucha importancia tanto como el control de la permeabilidad del concreto, así como el uso de mezclas de proporcionamiento adecuadas y la aplicación de buenas prácticas de concreto.

2.1.2.1. Materiales

Para las características y propiedades de los materiales empleados en las mezclas existen varias especificaciones y bastante información sobre los agregados, cementos y aditivos así como los factores claves en la relación a/c, la cantidad de cemento y la clasificación del concreto. En la tabla 2.2, se muestran las características que recomiendan el American Concrete Institute (ACI), la Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP), Det norske Veritas (DnV) y la Canadian Standards Association (CSA) y en la tabla 2.3, se dan recomendaciones de la compresión mínima y otras características del concreto según la zona donde se utilice.

Actualmente ya es una práctica común el utilizar puzolanas, las ventajas técnicas en el empleo de estos materiales entre otras son, la resistencia al ataque de sulfatos y cloruros, menor incremento de calor y mayores resistencias a los 28 días. Sin embargo con estos materiales se obtiene una menor resistencia inicial, especialmente a bajas temperaturas y una mayor sensibilidad a un mal curado.

Este tipo de materiales tienen mucho que ofrecer, pero deben emplearse en las circunstancias apropiadas.

El método y la secuencia de mezclado ayudan significativamente a producir una mezcla de concreto, la cual debe ser lo más homogénea posible ⁽²⁹⁾. Cuando se presenta la defloculación de las partículas de cemento así como de otros materiales finos como la sílica fume, con un aditivo plastificante se pueden llegar a una rápida velocidad de mezclado antes de que los agregados sean adicionados ⁽²¹⁰⁾.

Es importante respetar el tiempo de mezclado que se especifique en la elaboración del concreto, el periodo de mezclado debe medirse desde el momento en que todo el cemento y agregado se encuentren en el tambor mezclador a condición que toda el agua se agregue antes que transcurra un cuarto del tiempo de mezclado, algunas especificaciones, permiten que se reduzca el tiempo de mezclado si se demuestra por medio de pruebas de desempeño del mezclador que el concreto es adecuadamente uniforme al ser descargado.

COMPOSICIÓN DEL CEMENTO	El contenido de C ₃ A no debe ser menor de 4% para proporcionar protección al acero de refuerzo. El contenido máximo C ₃ A debe ser limitado al 10 % para obtener resistencia al ataque de sulfatos. Se debe considerar una reducción del C ₃ A en las estructuras que almacenan petróleo, debido a los sulfatos solubles.	En la zona de splash y la zona atmosférica, cemento portland con moderado C ₃ A. Cementos de fraguado rápido se usan sólo para reparaciones. Cementos con bajo calor de hidratación se utilizarán para estructuras con dimensiones grandes.	En plataformas se a utilizado el C ₃ A en un rango del 5 al 8 %. Se puede utilizar los de tipo ordinario, modificados, dureza rápida, bajo calor de hidratación, resistentes a los sulfatos, puzolánicos, Portland Tipo I, II, III, IV, IS y IP.
AGREGADOS	Arena y grava natural, o grava triturada según el reglamento de la ASTM C33. Y agregados ligeros de acuerdo con la ASTM C330. Se pueden utilizar agregados marinos previamente lavados y cuidando que no excedan los límites permitidos de iones de cloro.	Agregados que puedan sufrir cambios físicos o químicos que afecten al concreto o reaccionen con el cemento no se usarán. Los agregados de tipo marino no deberán utilizarse si exceden los límites permitidos de contenido de cloro.	No utilizar agregados con partículas reactivas o deletéreas como: ciertos minerales reactivos silíceos o carbonosos, sales, sulfatos, arcilla, polvo fino, materia orgánica u otras impurezas..
ADITIVOS Cloruro	No se deberán adicionar cloruros intencionalmente. El total de agua soluble de iones de cloruro de una mezcla de concreto para todos los componentes no debe de exceder de 0.1% por peso del cemento para concreto reforzado, y 0.06% para concreto presforzado.	CaCl ₂ o aditivos con más de 0.1% de cloruros por peso de cemento no se deberán usar.	No se podrán usar aditivos con cacl ₂ . Cuando dos aditivos sean utilizados en la misma mezcla se realizarán pruebas previas para comprobar su compatibilidad.
QUIMICOS Y CONTENIDO DE AIRE	Donde se requiera durabilidad al congelamiento - deshielo el concreto deberá contener aire según las recomendaciones del ACI-201.2R	Los aditivos para el contenido de aire, ayudan a la trabajabilidad y como retardantes, pero se deben evaluar antes de su uso.	El contenido de aire en la zona de splash, será de 3 a 5 % de aire, con un factor de espacio de 0.25 mm.
PUZOLANAS	Puzolanas de acuerdo a la ASTM C618 (Únicamente el uso de puzolanas naturales y fly ash) se pueden utilizar bajo pruebas previas que garanticen sus ventajas y desventajas, considerando principalmente su resistencia a los sulfatos, la trabajabilidad, y la corrosión del acero.	Materiales puzolánicos de alta calidad, como la sílica fume se pueden adicionar para elevar la resistencia, durabilidad, y trabajabilidad del concreto. No se permite el uso de High Alúmina.	En la plataforma Gullfaks el concreto utilizado en la zona de splash contiene aproximadamente 5% de sílica fume en peso de cemento.

Tabla 2.2 Materiales del Concreto Utilizados en Estructuras Costafuera.^(2.9)

Compresión Mínima Mpa	42 degradación superficial severa. Zona Atmosférica 35 Zona Splash 35 Zona Sumergida 35	36 resistencia a la abrasión. Zona Atmosférica 32 Zona Splash 32 Zona Sumergida 32	Zona Atmosférica Zona Splash Zona Sumergida	Zona Atmosférica 40 Zona Splash 40 Zona Sumergida 30
Relación Máxima Agua / Cemento	Zona Atmosférica 0.40 Zona Splash 0.40 Zona Sumergida 0.45	0.45 como máximo. 0.40 es preferible	0.45 como máximo. 0.40 es preferible	Zona Atmosférica 0.40 Zona Splash 0.40 Zona Sumergida 0.45
Contenido Mínimo de Cemento (Kg/cm²)	Zona Atmosférica 356 mín. 415 máx. Zona Splash 356 mín. 415 máx. Zona Sumergida 356 mín. 415 máx.	320 mín. agregado 40 mm. 360 mín. agregado 20 mm. Zona de Splash 400 mín. 500 máx.	Zona Atmosférica 300 mín. máx. Zona Splash 400 mín. máx. Zona Sumergida 300 mín. máx.	Zona Atmosférica 300 mín. Mat. Cementante 400 mín. Zona Splash 300 mín. Mat. Cementante 400 mín. Zona Sumergida 300 mín. Mat. Cementante 360 mín.
Recubrimiento (mm)	Zona Splash Refuerzo 65 Presfuerzo 90 Zona Atmosférica y Sumergida Refuerzo 50 Presfuerzo 75	Zona Splash y Atmosférica Refuerzo 65 Presfuerzo 90 Zona Sumergida Refuerzo 50 Presfuerzo 75	Zona Splash y Sumergida Refuerzo 50 Presfuerzo 100 Zonas Atmosférica Refuerzo 40 Presfuerzo 80	Zona Splash y Atmosférica Refuerzo 65 Presfuerzo 90 Zona Sumergida Refuerzo 50 Presfuerzo 75
Permeabilidad Mínima	Sin requerimientos	Sin requerimientos	10 ⁻¹³ a 10 ⁻¹⁴ kg / Pa. m.s	

Tabla 2.3 Especificaciones del Concreto en Estructuras Costafuera.^(2.9)

Bajo condiciones normales, hasta aproximadamente un 10 % del agua de mezclado se debe colocar en el tambor antes que se agregue los materiales sólidos, entonces el agua se debe vaciar uniformemente con los materiales sólidos, dejando aproximadamente un 10 % para agregarla después que todos los demás materiales se encuentren dentro del tambor. Cuando se use agua caliente en climas fríos, puede ser necesario modificar este orden de carga para evitar algún posible endurecimiento acelerado, en este caso, la adición del cemento deberá retrasarse hasta que la mayoría de los agregados y del agua se hayan entremezclado en el tambor. Cuando se cargue directamente el mezclador desde los dosificadores, los materiales se deberán agregar simultáneamente a velocidades donde el tiempo de carga sea aproximadamente el mismo para todos los materiales.

Si se utilizan aditivos retardantes o reductores de agua, deberán agregarse en la misma secuencia en el ciclo de carga, de otra manera se podrían presentar variaciones de importancia en el tiempo de fraguado inicial y en el porcentaje de aire incluido, la adición del aditivo deberá completarse dentro del primer minuto después de que se haya completado la adición del agua de cemento o con anterioridad al inicio de los últimos tres cuartos del ciclo de mezclado, lo que ocurra primero. Si en la misma mezcla de concreto se usan dos o más aditivos, se deberán agregar por separado para evitar cualquier posible interacción que interfiera con la eficiencia de cualquiera de los aditivos y afecte de manera adversa al concreto.

El recubrimiento del acero de refuerzo es muy importante no sólo en términos de durabilidad sino también para proporcionar resistencia al fuego. El método tradicional consiste en especificar recubrimientos nominales para las diferentes condiciones de exposición, los recubrimientos que se especifican son buenos, pero el principal problema son los recubrimientos que se obtienen en la práctica, cada reglamento especifica tolerancias para el recubrimiento sin embargo se deben de estudiar con cuidado. Varios trabajos de investigación han estudiado este problema y por lo general han encontrado que con una supervisión apropiada, los recubrimientos requeridos para el lecho inferior pueden obtenerse sin problema, pero las variaciones suelen ser mayores en los recubrimientos laterales y en el recubrimiento del lecho superior, de gran importancia en estos casos es la cuestión de la actitud, los proyectistas no solo deben especificar el recubrimiento nominal correcto, sino también dar los pasos necesarios para asegurar que éste se cumpla en la práctica, esto podría incluir la atención apropiada a métodos de detallado y a una serie de verificaciones que se llevarían a cabo en la obra ^(2.11).

La compactación, tercer aspecto importante dentro de la durabilidad y aunque se menciona en todas las publicaciones de la tecnología del concreto, existe poca información cuantitativa sobre sus efectos directos en la durabilidad. En el ACI-309 "Compactación del Concreto" ^(2.12), indica que las mezclas más secas y rígidas requieren mayor esfuerzo de compactación, pero con la utilización de aditivos se pueden lograr esfuerzos menores para realizarla. La reducción del contenido de agua en el concreto mejora su calidad siempre que se haya compactado adecuadamente, sin embargo si el concreto esta

demasiado rígido con relación al esfuerzo de compactación que se va aplicar, su consolidación y calidad bajan muy rápidamente.

La trabajabilidad del concreto recién mezclado es la propiedad que determina la facilidad y homogeneidad con la cual se puede mezclar, colocar, compactar y dar un acabado. La trabajabilidad en esencia es una función de las propiedades reológicas del concreto.

La estabilidad que tiene una mezcla de concreto es debida a la resistencia, al sangrado y a la segregación; la compactabilidad es la facilidad de remover el aire atrapado de una mezcla; la movilidad o fluidez, es afectada por la viscosidad y cohesión del concreto y el ángulo de fricción interna.

La trabajabilidad se ve afectada por la granulometría, la forma de las partículas y la proporción de los agregados, el contenido de cemento, el uso de aditivos, el contenido de aire y el agua de la mezcla.

El objetivo básico de la compactación es producir una masa sólida sin cavidades, con menos del 1% del aire. Cuando el concreto se cuela en un elemento aperaltado y se realiza el vibrado, el aire y el agua se movilizan hacia arriba dentro del concreto fresco en proceso de endurecimiento. Esto puede reducir la porosidad, pero también es posible que produzca un gradiente en la relación a/c, ocasionando una impermeabilidad mayor en la dirección vertical al formarse canales capilares, conforme se continúa la hidratación, dependiendo del curado estos canales capilares se pueden sellar, es obvio mencionar que alrededor del elemento este efecto es semejante y sobre todo en secciones muy reforzadas, existe el problema adicional de lograr que el concreto se acomode alrededor de las varillas mientras se evitan los defectos debidos a asentamientos plásticos.

El recubrimiento en las diferentes estructuras de concreto debe tener un espesor adecuado como ya se menciono, y sobre todo debe de estar adecuadamente compactado para poder garantizar la protección requerida al acero de refuerzo, la calidad del concreto en la zona del recubrimiento es muy importante tal vez más que en otra zona de la estructura.

El curado afecta en primer instancia al concreto en el recubrimiento del refuerzo, siendo esto de gran importancia para la durabilidad del material. Lo que es muy significativo es que el curado afecta la calidad real del concreto más que su calidad potencial.

El curado en general se especifica para: que el cemento se hidrate tanto como sea posible, contribuir a la retención de humedad, permitir el desarrollo apropiado de resistencia, y evitar gradientes de temperatura excesivos. Las superficies horizontales por lo general son más fáciles de curar como las losas, los elementos verticales son más difíciles de curar como las columnas y los muros. Parte del problema del curado se ha expresado en términos de condiciones ambientales durante la construcción y no se ha relacionado con la durabilidad y las condiciones ambientales durante el servicio. El curado es esencial ya que ayuda a desaparecer los canales capilares que se mencionaron anteriormente.

El curado del concreto debe tener una atención especial para asegurar la máxima durabilidad y minimizar su agrietamiento, el agua del mar no se debe de utilizar para el curado del concreto reforzado y presforzado aunque, si es solicitado por el programa de construcción, el concreto podrá sumergirse en agua de mar para proporcionar la suficiente resistencia evitando daños físicos por

oleaje, etc.. Cuando exista duda de la disponibilidad para que la superficie del concreto permanezca húmeda por el periodo total de curado, se deberá usar una membrana para trabajo pesado.

Los cuatro aspectos mencionados en realidad se unen para poder producir un concreto permeable con la calidad requerida, cada uno por si mismo es importante pero unidos eficazmente es lo que nos debe de importar.

2.1.3. Ataque por Sulfatos

Existen varias acciones de tipo agresivo para el concreto reforzado. En la tabla 2.4 se mencionan las que lo afectan principalmente, las acciones se dividieron para el concreto y para el acero de refuerzo. El concreto puede estar expuesto a gases, aguas y suelos que contienen productos químicos agresivos. El concreto expuesto a soluciones agresivas y sujeto a presión y alta temperatura es más vulnerable a la acción destructiva ^(2.13).

Las medidas preventivas están en función del grado de agresividad del ambiente, en todos los casos un concreto con baja permeabilidad, bien proporcionado, compactado y curado, raramente se deteriora.

En algunos casos, es necesaria una protección adicional al concreto. En ambientes que disuelven productos de calcio, los cementos mezclados con escoria de alto horno o puzolanas son mejores que el cemento portland con un alto contenido de silicato tricálcico, el cual libera grandes cantidades de iones de calcio durante la hidratación.

En exposiciones severas, el cemento hidráulico está limitado a un contenido máximo de C_3A del 8%. Un cemento resistente al sulfato no contiene más de 5% de. Debido al equilibrio de la reacción química, la formación de la etringita disminuye de un valor máximo a cero en el rango de temperatura de 0 °C a 80 °C. En Climas cálidos se produce una aceleración de la reacción. El empleo de fly ash baja en calcio ha servido para mejorar la resistencia del concreto a los sulfatos.

Además de la selección apropiada del cemento hidráulico, son esenciales otros requisitos para concretos durables expuestos a concentraciones de sulfatos como la baja relación a/c , resistencia, aire incluido, bajo revenimiento, compactación adecuada, uso de superfluidificante, uniformidad, recubrimiento adecuado y curado húmedo.

2.1.4. Abrasión

La resistencia a la abrasión es la capacidad que tiene el concreto para resistir daños en su superficie por frotación o fricción, esta resistencia esta en función de su resistencia a la compresión, las propiedades de los agregados, los métodos de curado, los acabados y la capacidad de la superficie para resistir los daños por congelamiento y deshielo.

La abrasión es una combinación de desgaste directo, por esmerilado y golpeteo de partículas discretas como las arenas y los agregados de cuarzo. La matriz de cemento y la arena, las cuales llevan las partículas de los agregados de cuarzo pueden debilitarse con un ataque de congelamiento y

deshielo, agravando el problema de desgaste. El enlace entre la matriz y las partículas de los agregados de cuarzo es muy importante. Los APL son muy resistentes al desgaste directo, pero son quebradizos y se fracturaran si existe suficiente exposición de la pasta circundante.

Para mejorar la resistencia a la abrasión, se debe tener mucha atención en la calidad para desarrollar una matriz durable y muy resistente, la cual se puede obtener con la aplicación de relaciones bajas de a/c y puzolanas como la silica fume.

Existen reacciones químicas dañinas entre los constituyentes de la pasta hidratada de cemento y el agua de mar, la carbonatación, el ataque a los sulfatos y el ataque de los iones de magnesio cuando estas son limitadas en la superficie y cuando un buen conocimiento de las medidas que aseguran la baja permeabilidad del concreto son rigurosamente implementadas. Las estructuras sin refuerzo hechas con una baja relación de a/c y un alto contenido de cemento mayor de $350 \text{ kg} / \text{m}^3$ muestran generalmente un servicio satisfactorio en ambiente marino excepto cuando se expone a gradientes térmicos altos, acciones de heladas, ataque álcali - agregado. Las estructuras construidas desde 1950 usualmente se protegían para la acción de heladas con aire incluido propiamente, y para el ataque de álcali - agregado por el uso de bajo álcali en el cemento y/o aditivos puzolánicos.

2.1.5. Reacción Álcali – Sílica

Esta es una reacción muy compleja entre los iones OH^- de la pasta hidratada de cemento asociada con los álcalis y el sílice reactivo presente en algunos agregados. Los álcalis (Na_2O y K_2O) provienen del cemento y otros ingredientes. Además de ciertos constituyentes silíceos presentes en los agregados, algunas estructuras pueden tener ingreso adicional de álcalis cuando se encuentran en un ambiente marino o por la aplicación de sales descongelantes.

El efecto de la temperatura juega un papel importante ya que las reacciones químicas se aceleran al aumentar ésta. A bajas temperaturas las reacciones permanecen en estado latente. La humedad relativa del ambiente también influye. Los minerales agresivos más importantes con sílice reactivo que pueden contener las rocas son: horsteno, opalina, calcedonia y cuarzo. Entre las rocas con potencial reactivo se encuentran la toba, pizarra silicosa, filitas, calizas cuando los antecedentes de servicio indican que la reactividad puede ser posible.

Si los agregados son potencialmente reactivos no deben usarse en concretos expuestos al agua de mar o en ambientes donde los álcalis estén disueltos y puedan introducirse en el concreto.

Se pueden usar materiales reactivos siempre y cuando se hayan realizado pruebas concluyentes y después de conocer sus antecedentes en servicio con un apropiado límite de contenido de álcalis en el cemento o con el uso de cantidades apropiadas de una puzolana o escoria o ambas una vez comprobada su eficiencia pueda anticiparse una vida de servicio. Sin embargo, debe considerarse que la finura de los materiales puzolánicos aumenta la demanda de agua y se puede aumentar la contracción por secado y originar agrietamiento

La ASTM limita el contenido de óxidos de sodio equivalente $0.658 \text{ K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ a 0.6 % por masa del cemento previendo el ingreso de álcalis en solución

Congelación Y Deshielo		<p>Por lo general se previene con:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Elección adecuada de materiales, proporciones de mezcla y clasificación de concreto. ◆ Diseño para minimizar la exposición a la humedad ◆ Inclusión de aire, el contenido de aire depende principalmente del tamaño del agregado. ◆ Curado y compactación adecuados ◆ El empleo de sales descongelantes agrava el problema
Exposición a Sustancias Químicas Agresivas	Ataque de Sulfatos	Se recomiendan materiales y proporciones de mezcla específicas para cantidades definidas de concentración de sulfatos
	Ataque de Acidos	El valor del pH es una guía de la gravedad del ataque, con valores menores de 4.5 se necesitarían medidas especiales de protección. El concreto de baja permeabilidad proporcionará protección aceptable contra ataques leves.
Abrasión		La resistencia a la abrasión depende principalmente de: la clasificación del concreto, contenido de cemento y relación agua – cemento, propiedades de los agregados, métodos de acabado, compactación y curado apropiados, uso de capas de desgaste.
Reacción Química de los Agregados	Reacción Álcali – Sílice	Poco usual cuando viene de los materiales básicos del concreto y no de ataque externo.
Corrosión	Carbonatación	La corrosión es consecuencia de la penetración de líquidos y gases a través del concreto hasta alcanzar al acero de refuerzo. La resistencia a estas acciones depende fundamentalmente de la permeabilidad del concreto.
	Difusión de cloruros	Existen dos fases distintas en el mecanismo de ataque: el tiempo que tarde la sustancia deteriorante en llegar al acero y después, la velocidad de corrosión. Ambos periodos requieren cálculos de evaluación de pérdida de servicialidad y de vida útil. Estos pueden ser diferentes para distintas formas de ataque, de ahí la necesidad de distinguir entre la carbonatación y penetración de cloruros.
	Gases y Líquidos Potencialmente Dañinos	Existen opciones para el diseñador para proveer resistencia adecuada, incluyendo protección de la superficie de la estructura, recubrimiento directo del acero de refuerzo, protección catódica. La opción elegida depende de la severidad del ataque y de factores económicos.

Tabla 2.4 Condiciones que Requieren Atención Especial en Términos de Durabilidad.^(2.8)

Una condición de exposición intermitente de secado y humedecimiento puede originar una gran expansión, la impermeabilización puede producir o retardar suficiente la expansión.

2.1.6. Reacción Álcali – Carbonato

Reacción que ocurre con ciertas rocas con carbonatos y los álcalis del cemento originando expansión. No existe a la fecha una correlación entre las expansiones que ocurren en el laboratorio y las que ocurren en el campo. Los factores involucrados son complejos e incluyen la heterogeneidad de la roca, el tamaño del agregado grueso, la permeabilidad del concreto, los cambios en las condiciones ambientales en servicio, que incluyen la disponibilidad de humedad y el nivel de temperatura. La reacción se distingue de la álcali-silica por la ausencia general de la exudación del gel de sílica de las grietas.

Los procedimientos más seguros y generalmente más económicos son evitar los agregados reactivos seleccionando la cantera adecuada, mezclar los agregados con otros reactivos o usar un tamaño nominal más pequeño de agregado. Las puzolanas sirven como diluyentes pero no son efectivas para controlar la reacción álcali-carbonato. Generalmente es útil emplear un cemento muy bajo en álcalis, menor del 0.6 % como Na_2O equivalente siempre que el elemento estructural no esté expuesto al ingreso de álcalis en solución.

2.1.7. Carbonatación

La carbonatación del concreto producida por la reacción del CO_2 presente en el aire o en el agua con el hidróxido de calcio originado al hidratarse el cemento, aunque mejora la resistencia a la compresión, origina contracción y disminuye el pH a valores menores de 10 propiciando la corrosión electroquímica.

La reacción del hidróxido de calcio de la pasta de cemento con el CO_2 del aire es un proceso lento que avanza desde la superficie a una velocidad que depende en forma importante de la concentración de CO_2 , la humedad relativa, la temperatura del medio ambiente y de la permeabilidad del concreto. El inicio de la corrosión del acero depende además de la permeabilidad del concreto que a la vez es función de la relación a/c, del tipo de cemento, de la compactación y de la eficiencia del curado, del recubrimiento.

Los avances más rápidos de la carbonatación son cuando la humedad relativa se mantiene entre 50 y 75 %. Los sitios con mayores concentraciones de CO_2 como los localizados en zonas industriales o estacionamientos de vehículos son los más susceptibles al ataque. En los casos anteriores el uso de una relación a/c baja, una buena compactación y curado reducen la permeabilidad del concreto y limitan la velocidad de carbonatación desde la superficie.

2.2. Resistencia al Fuego

Para el diseño de las plataformas de concreto costafuera se debe considerar la posibilidad de un incendio con hidrocarburos. la filosofía de este diseño es suministrar la suficiente seguridad, que

proporcione protección al personal dando el tiempo suficiente para poder evacuar la plataforma, ya que en el caso de presentarse y salirse de control un siniestro de esta naturaleza sería imposible conservar la estructura ^(2.14). A la fecha han ocurrido dos incendios en plataformas de concreto, en ambos casos el fuego se extinguió rápidamente sin llegar a grandes deterioros en la estructura, únicamente se presentaron desprendimientos en el recubrimiento del concreto. Ambas plataformas construidas en los 70's tienen un concreto de 50-60 Mpa sin sílica fume, en la actualidad ya se alcanzan resistencias mayores a 80 Mpa, con el uso de sílica fume y APL, estas características tienen el potencial de causar desprendimientos y rupturas del concreto bajo un rápido incendio de hidrocarburos como se describe a continuación ^(2.15).

La experiencia que se tiene del comportamiento de las estructuras de concreto frente a un fuego es reducida, debido a las dificultades que se presentan para realizar las pruebas a una escala real, los estudios que se han desarrollado también difieren bastante de un incendio real por que existen grandes variantes en cada incendio que se presenta, como: la cantidad y tipo de material combustible, configuración de la carga de fuego, distribución de la carga de fuego en el sitio, la geometría y tamaño del lugar, las propiedades térmicas de los materiales del sitio y las condiciones de ventilación que influyen directamente en el suministro de aire durante el incendio.

En la información que se basa principalmente en pruebas desarrolladas en USA está confirmado que los Concretos con Agregados de Peso Ligero (CAPL) tienen mejor resistencia que el Concreto de Densidad Normal (CDN). En Noruega existe una experiencia opuesta, hay varias razones para esta contradicción pero la más importante es la utilización de diferentes cargas de fuego, por ejemplo la combustión de celulosa y la combustión de hidrocarburos.

2.2.1. Fuego de Celulosa

El fuego de celulosa que normalmente se llama "Fuego ISO" es un estándar, que se aplica en Europa de acuerdo a la ISO 834, la cual es idéntica a la DIN 4102, en USA y Canadá se rige con la ASTM E119 que difiere un poco en el aumento de temperatura en los primeros minutos del incendio, estos tres tipos de estándar es lo que determinaremos como "fuego de celulosa", la cual su característica principal es la combustión con madera ^(2.16).

La mayoría de las referencias afirman que los CAPL tienen mejor resistencia que el CDN, debido a la menor conductividad de calor la cual conduce a menores temperaturas en el refuerzo. Esas experiencias están basadas probablemente en la combustión de celulosa (ISO 834, ASTM E119, DIN 4102) y agregados de concreto ligero con alta proporción de agua relativamente comparada con la alta resistencia de agregados de concreto ligero.

Los resultados que se obtiene con estas normas no corresponden con las que se generan en un fuego real como ya se menciono, de aquí que se deban establecer equivalencias entre la relación del patrón temperatura-tiempo de cada norma y así realizar las comparaciones con las reales.

Bajo estas pruebas el CAPL tiene una mayor resistencia al fuego que el CDN. De acuerdo a las resistencias y densidades, es posible que la mayoría de las pruebas con CAPL tengan una mayor relación a/c y así mayor permeabilidad comparada con la densidad y baja permeabilidad de agregados ligeros del concreto noruegos.

El aislamiento de los CAPL se mejora debido a la menor conductividad de calor, esto conduce a un menor calentamiento del refuerzo y reducción de tensiones térmicas. Las estructuras con CAPL tendrán únicamente mayor potencial a la resistencia al fuego que las estructuras de CDN si no ocurre desprendimiento.

Los parámetros críticos que influyen en la resistencia de los CAPL, es que incrementan el riesgo de fractura o desprendimiento si el contenido de humedad excede un cierto nivel crítico y que a mayor densidad de la pasta de cemento con igual relación a/c pueden compensar la ventaja con menor elevación de temperatura.

Las experiencias y pruebas que se desarrollen con fuego en los CAPL comparadas con los de CDN deberán mencionar las condiciones de prueba que se apliquen por ejemplo, el tipo de fuego, el contenido de humedad, la permeabilidad, etc.

2.2.2. Fuego de Hidrocarburos

La diferencia principal entre el fuego de hidrocarburos "HC-fire" y el fuego de celulosa, es que la combustión de hidrocarburos tiene una mayor elevación en la temperatura a los pocos minutos de combustión, ver figura 2.1. Además, el valor máximo de temperatura es algo mayor en una combustión de hidrocarburos 1100 °C, comparado con la combustión de celulosa de 1050 °C.

La mayoría de las prácticas realizadas con el fuego de hidrocarburos, se basan en pruebas de alta resistencia en CAPL con baja proporción de agua en la mezcla.

De acuerdo a la experiencia en Noruega, los CAPL tienen mayor desprendimiento que el CDN durante un fuego de hidrocarburos, las principales razones para esto son:

- ◆ Mayor contenido de humedad, los agregados ligeros pueden actuar como reservas de agua y así se incrementa la cantidad de agua evaporable.
- ◆ Menor permeabilidad, se maneja una presión de vapor mayor en los CAPL.
- ◆ Menor conductividad de calor, se maneja gradientes de temperatura mayores.

El hecho de que los CAPL tienen menor esfuerzo a la tensión comparados con el CDN a la misma relación a/c , es también una de las causas para prolongar la tendencia de desprendimiento en CAPL.

2.2.3. Mecanismos de Desprendimiento

El desprendimiento del concreto se presenta cuando este material se expone al fuego y las partes más superficiales se desprenden lentamente, este mecanismo es muy complejo y difícil de entender, es evidente que el desprendimiento es causado principalmente por la deformación mecánica de una excesiva restricción asociada a una reducción de la resistencia en la pasta por la deshidratación ^(2 17)

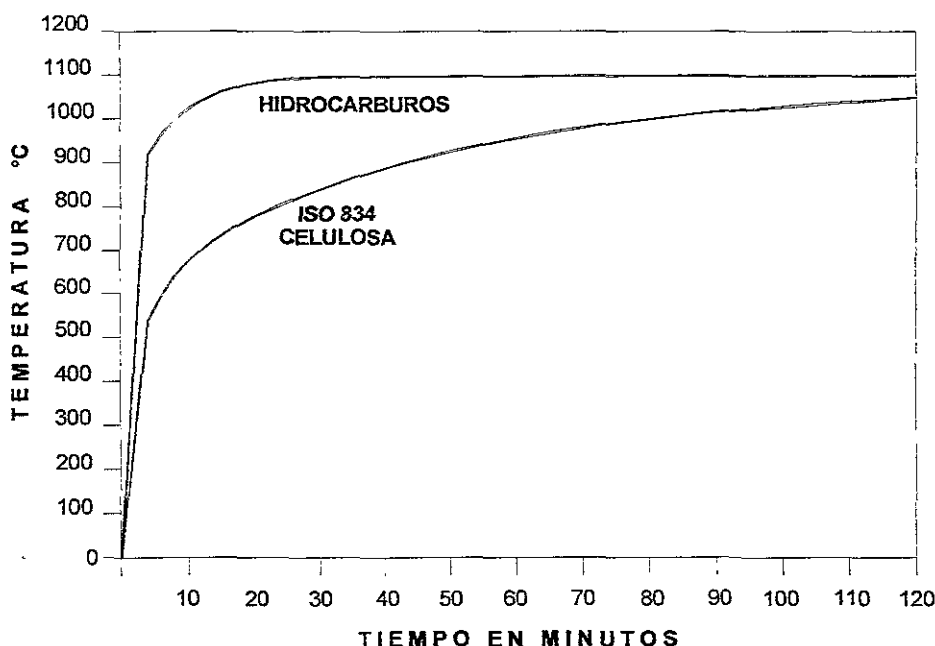


Fig. 2.1 Curvas de Temperatura de Hidrocarburo y Celulosa.^(2.16)

Teóricamente el desprendimiento es causado por una combinación de:

- ◆ Esfuerzo/Deformación por cargas externas: presforzado, cargas inducidas.
- ◆ Esfuerzo/Deformación por temperatura, estos esfuerzos dependen: del gradiente de temperatura, capacidad de calor/propiedades de aislamiento, forma geométrica, relajación por temperatura, expansión del acero de refuerzo.
- ◆ Incremento de la presión de poro, que depende de: cantidad de humedad presente, cantidad y tipo de poro, gradiente y nivel de temperatura, densidad/porosidad.
- ◆ Material deficiente: grietas existentes, estabilidad química de agregados a altas temperaturas.

El desprendimiento es un fenómeno superficial, que tiene lugar con la evaporación del agua a más de 100 °C, este potencial aumenta con la localización de los movimientos interiores durante el fuego, por que existe un incremento de agua libre debido a la condensación del flujo interior de vapor y por que hay más concreto para resistir el flujo de vapor hacia el exterior. La distancia crítica bajo circunstancias normales se estima que puede ser de 5 cm aproximadamente, el desprendimiento se puede restringir si existe una buena distribución del acero de refuerzo, estribos, mallas y varillas localizadas cerca de las orillas.

La estabilidad de los agregados tiene una gran importancia para resistir el desprendimiento del concreto y se requiere fundamentalmente que no sufran una transformación química a altas temperaturas.

Las microgrietas en particular cuando se encuentran en condiciones de humedad, generan una gran posibilidad de que se presente un desprendimiento, el concreto tiene un marcado incremento al

agrietamiento cuando se calienta por primera vez, esta capacidad se presenta en la pasta de cemento y se restringe gracias a los agregados, lo que proporciona un material con una extraordinaria estabilidad térmica.

2.2.4. Comportamiento con la Temperatura

Los efectos de temperatura por la variación del gradiente térmico y el contenido de humedad tienen grandes efectos en la resistencia al fuego como también los agregados y la pasta de cemento.

Cuando el concreto se somete a la acción del fuego sus componentes sufren cambios importantes, así el agua libre o capilar dentro del concreto se empieza a evaporar a los 100 °C.

De 180 a 300 °C la pérdida de agua es total sin que se aprecie aún alteración en la estructura del cemento hidratado y sin que la resistencia y la elasticidad se reduzcan por la formación del gel de tobermorite a alfa silicato – dicálcico.

De 300 a 400 °C se produce la pérdida del agua del gel del cemento teniendo lugar una apreciable disminución de las resistencias y apareciendo las primeras fisuras en el hormigón.

A los 450 °C una parte del hidróxido de calcio procedente de la hidratación de los silicatos se transforma en óxido de cal.

A los 573 °C el SiO₂ se transforma de beta-cuarzo a alfa-cuarzo, de arena a una estructura de cristal, estos cambios tienen influencia en las pruebas de fuego. Los cambios en la estructura física incrementan la transmisión de temperatura y permiten crear esfuerzos debidos a la expansión de volumen, los agregados, que no poseen el mismo coeficiente de dilatación térmica, se expanden fuertemente y con diferente intensidad dando lugar a tensiones internas que empiezan a disgregar al concreto. Muchas veces estas expansiones se incrementan por las transformaciones estructurales que ocurren en determinados agregados.

Aproximadamente a los 700 °C, el carbonato de calcio CaCO₃ y los silicatos se eliminan. A esta temperatura los agregados calizos son los menos afectados por el fuego debido a su bajo coeficiente de dilatación térmica. Los calizos tienen también a su favor el hecho de que la reacción que se produce en la descomposición del carbonato de calcio a óxido de cal CaO es endotérmica y además que el bióxido de carbono CO₂ formado, crea una película térmica aislante que envuelve a estos agregados.

Los gradientes de temperatura tienen una gran influencia en el desprendimiento. Los CAPL aíslan mejor que el CDN debido a la baja conductividad de calor. Algunos autores aseveran que esto es positivo con respecto a la resistencia al fuego

En un a fuego de hidrocarburos los gradientes de temperatura en la capa exterior del concreto son mucho mayores comparados con los gradientes de una combustión ISO. La menor conductividad de los CAPL comparados con el CDN conduce a un gradiente de temperatura más largo en la capa exterior de los CAPL, de este modo se incrementa el desprendimiento También Malhotra quién habla

muy positivamente de la resistencia al fuego de los CAPL, comenta que a un calentamiento más rápido ISO se manejará un mayor desprendimiento.

Algunos autores han desarrollado pruebas con una protección de fuego pasiva en contacto con la combustión de hidrocarburos. El propósito es reducir la carga de fuego y reducir los gradientes de temperatura cercanas a la superficie de concreto. Los resultados muestran que si la protección de fuego no se ha perdido durante la prueba de combustión, la elevación de temperatura en el concreto y en el refuerzo son retrasan y reducen.

El comportamiento del concreto depende del coeficiente de conductividad térmica y de que este coeficiente vaya disminuyendo conforme aumenta la temperatura hasta valores que llegan a ser de un tercio del inicial. En experimentos que se han realizado en elementos estructurales, se ha observado como en un recubrimiento de 5 cm se registran temperaturas superiores a los 300 °C, que alteran las características mecánicas del hormigón a pesar de que la temperatura exterior en contacto con la superficie puede llegar a ser de 1000 °C, equivalente a una duración de 2 horas de fuego patrón ISO.

2.2.5. Efectos de la Humedad

El contenido de humedad en el concreto endurecido también es uno de los principales factores que tienen influencia en la resistencia al fuego. Cuando el contenido de humedad aumenta, la cantidad de agua evaporable se incrementa, si se incrementa el contenido de humedad, se aumentara la presión y el gradiente de temperatura durante la combustión. Varias pruebas han confirmado que la reducción del contenido de humedad reduce el desprendimiento en el concreto.

La pérdida de la humedad en el concreto durante el fuego a altas temperaturas tiene un complicado mecanismo el cual depende de diferentes factores: Nivel de temperatura, gradiente de temperatura, nivel inicial de humedad, porosidad/gradiente de humedad y forma geométrica.

Solamente una muy pequeña parte del contenido de agua desaparece a una temperatura de 100°C, como el 3% de agua evaporada escapa durante un incendio con temperaturas de 20 a 100 °C, con gradiente de 1 °C por minuto, sin embargo a 0.2 °C por minuto se escapa el 9 %.

Alrededor del 90 % del agua evaporada se retiene cuando el concreto llega a los 100 °C, esto es debido a las condiciones hidrotérmicas que puedan existir. Esto causa una transformación de los silicatos a un hidrato débil o fuerte, que depende de la relación de CaO/SiO_2

El gradiente de la temperatura puede inicialmente seguir con la misma humedad interior, causando un aumento de humedad y presión de poro en la región central del concreto al mismo tiempo que se libera el agua capilarmente por su capa superficial. Esta tendencia obviamente se incrementa con el aumento de la temperatura.

A una temperatura de 250 a 300 °C el concreto esta seco, sin embargo continua perdiendo peso, debido a la liberación de agua en los silicatos.

El exceso de humedad es una forma muy compleja y es una razón seria para incrementar la tendencia del desprendimiento explosivo, que depende de otros factores como: la forma geométrica, la

exposición de las superficies, la carga inicial, el gradiente térmico, la porosidad, la conductividad térmica.

Los CAPL a menudo tienen un mal comportamiento en el fuego como los CDN, debido a la capacidad de los APL a actuar como reservas de agua evaporable, la cual se puede absorber por prehumedecimiento de los agregados, en el concreto fresco o en el medio ambiente. Existe un gran número de recomendaciones que se dan en investigaciones realizadas acerca del contenido crítico de humedad, tanto para los CDN como para los CAPL considerando fuego de celulosa e hidrocarburo, sin embargo mencionaremos la sugerencia que hace el FIP y la CEB que es del 5% del volumen y del 2 al 3 % por peso en el contenido crítico de humedad en concretos endurecidos.

2.2.6. Permeabilidad Crítica a/c

La baja permeabilidad permite incrementar la presión de vapor durante un incendio, los CAPL tienen por lo general muy baja permeabilidad, usualmente menor que el CDN a igual relación a/c, un incremento en esta relación, aumenta el contenido de agua en el concreto fresco e incrementa el contenido de humedad y la permeabilidad del concreto endurecido. El aumento del contenido de humedad tiene una influencia negativa en la resistencia al fuego, mientras que el incremento de la permeabilidad tendrá una influencia positiva, teóricamente esto puede ser posible para poder encontrar una permeabilidad a/c crítica, en resumen es recomendable impregnar los APL para prevenir la succión de agua en el concreto fresco. El contenido de sílica fume y las condiciones de curado también tienen influencia en la permeabilidad y en el contenido de humedad.

Es posible incrementar la permeabilidad de un concreto durante una combustión, se han realizado investigaciones con el uso de fibras de polipropileno que se añaden durante el mezclado, estas fibras tienen un punto de fusión cercana a los 140 °C, la idea es que las fibras se fundan durante un incendio y se desarrollen canales en el concreto endurecido para que el vapor pueda salir.

2.2.7. Mineralogía

Un concreto con agregados calcáreos tendrá un mayor rango de resistencia al fuego tanto como los agregados de silicio, si analizamos a los agregados desde el punto de vista mineralógico tenemos que el granito y el gneis se fisuran por encima de los 500 °C como consecuencia de la acción producida por el aumento volumétrico que experimenta el cuarzo al cambiar su estructura con el calor. Los agregados ígneos como el basalto no experimenta daños por la acción del calor, las arcillas expandidas y pizarras dilatadas presentan una reacción frente al fuego muy similar a los agregados ígneos debido a que las temperaturas a las que se han formado pueden ser más elevadas que las de un incendio. También se ha observado que los concretos con agregados de buena granulometría y relaciones altas de agregado/cemento tienen mejor comportamiento

La composición mineralógica y la estructura de los agregados es el principal factor en la determinación del coeficiente de dilatación térmica del concreto, esta importancia es principalmente por que los agregados ocupan un gran porcentaje en peso y volumen en el concreto ^(2.18).

Diferentes estudios realizados indican que el principal factor para la expansión de las rocas y en consecuencia del concreto, es la proporción del contenido de cuarzo, las rocas con un alto contenido de cuarzo como la cuarcita y arenisca tienen un alto coeficiente; las rocas con poco o sin cuarzo, como la caliza tiene un coeficiente bajo, y las rocas ígneas, granito, riolita, basalto, tienen valores intermedios.

Las rocas tienen cambios con la exposición a altas temperaturas, reflejando cambios en sus propiedades físicas de los minerales, un cambio rápido en la expansión invariablemente indica la presencia de cuarzo; las rocas con carbonato frecuentemente se contraen después de los 900 °C cuando se presenta dolomita; y una gran expansión después de los 650 °C indica principalmente un alto contenido de biotita, como ya se menciona el cuarzo sufre un cambio a los 573 °C de alfa a beta cuarzo que genera una súbita expansión de volumen, causando la ruptura de la estructura, seguido de un periodo en donde no existe expansión adicional arriba de los 900 °C.

2.2.8. Coloración del Concreto a Elevadas Temperaturas

El concreto en el proceso de elevación de la temperatura va perdiendo resistencia y va sufriendo cambios en la coloración que son más intensos en los agregados silíceos que en los calizos y en los ígneos ^(2.19). Este cambio de coloración permanece después del incendio durante días e incluso meses y puede quedar disimulado por los limos que arrastre el agua contra incendio, esto es importante porque es un índice para determinar la pérdida de resistencia y los cambios de condiciones que ha experimentado el concreto.

A los 200 °C el concreto es gris y no presenta un cambio apreciable en sus condiciones ni en su resistencia a compresión.

A los 300 °C experimenta una disminución del 10 % aproximadamente, a esta temperatura el concreto se vuelve rosáceo debido a la pérdida de agua de las sales de hierro presentes en los agregados.

De 300 a 600 °C la resistencia a la compresión disminuye en un 50 % y el módulo de elasticidad en un 80% variando su color de rosa a rojo.

Entre 600 y 950 °C el color cambia de nuevo a gris con puntos rojizos siendo índice de alta succión del agua, a esta temperatura la resistencia es muy reducida.

De 950 a 1,000 °C el color cambia a amarillo anaranjado o ante y el concreto empieza a sinterizarse.

Entre los 1,000 y 1,200 °C el concreto se sinteriza y su color se vuelve amarillo claro, perdiendo totalmente la resistencia.

Si la temperatura del concreto no ha sobrepasado los 500 °C éste puede experimentar una rehidratación posterior al incendio que puede hacerle recuperar hasta el 90 % de su resistencia inicial

al cabo de un año, sin embargo la ganancia de resistencia al enfriar es pequeña y depende mucho de la velocidad a la que se haya hecho el enfriamiento.

2.2.9. Concreto Armado

A las estructuras de concreto armado las integran dos materiales principales, el concreto y el acero de refuerzo si consideramos el comportamiento de estos dos materiales el más sensible al fuego es el acero de refuerzo, de aquí la importancia que tienen el protegerlo.

La generación de tensiones entre el acero y el concreto a una temperatura ambiental es nula debido a que los coeficientes de dilatación térmica de los dos materiales son prácticamente los mismos $1.2 \times 10^{-5} \text{ m/m } ^\circ\text{C}$, cuando las temperaturas son elevadas ambos coeficientes se disparan llegando a ser en el acero treinta veces superior al del concreto, produciendo grandes tensiones que producen el desprendimiento. Cuando esto ocurre, el acero queda directamente expuesto a la acción del calor con lo cual disminuye su límite elástico y su tensión de ruptura, conduciendo a la falla si se aproxima a la temperatura crítica de $500 \text{ }^\circ\text{C}$.

Otro aspecto importante es la pérdida de adherencia entre el concreto y acero por la elevación de la temperatura, los estudios que se han realizado muestran que la adherencia sigue un comportamiento similar a la variación de la resistencia a la compresión del concreto hasta los 300 o $400 \text{ }^\circ\text{C}$, por encima de estas temperaturas la adherencia disminuye más que la resistencia a la compresión en un 65% para $400 \text{ }^\circ\text{C}$ y el 35% a los $600 \text{ }^\circ\text{C}$, entre 600 y $800 \text{ }^\circ\text{C}$ la adherencia prácticamente desaparece. En la pérdida de adherencia de las varillas no sólo influye la temperatura sino también su diámetro, a mayor diámetro mayor resistencia, influye también la resistencia a la compresión del concreto, el tipo de agregado, las dimensiones y la sección transversal, los estribos mejoran la adherencia del acero de refuerzo por que lo restringen.

2.2.10. Fibras

En un estudio de los efectos del fuego de hidrocarburo en CAPL para plataformas, concluyó que se tendría buen funcionamiento si la relación a/c fuera mayor de 0.55 , el contenido de sílica fume menor del 5% del peso de cemento, el sistema capilar de poro *parcialmente o totalmente seco* y los APL secos y sellados para prevenir el contenido de reserva de agua evaporada. Desafortunadamente, ningún punto mencionado tiene una aplicación práctica para un CAR) en un ambiente marino, sin embargo se pueden utilizar fibras de hidrófilo como la celulosa o las fibras de baja fusión como el polipropileno para incrementar la permeabilidad del concreto durante el fuego.

Un estudio sobre las propiedades termo – mecánicas de fibra – modificada en Concreto de Alta Resistencia con Agregados de Peso Ligero (CARAPL), hechos con agregado granular de arcilla expandida, concluyó que hay una falla de degradación en la resistencia a la compresión y el módulo elástico por arriba de los $800 \text{ }^\circ\text{C}$

La humedad en el concreto en cantidades muy pequeñas, es la causa principal del problema ya que esta no puede escapar del concreto debido a la matriz densa asociada con el CAR, esta matriz densa es el resultado del uso de la sílica fume junto con los altos contenidos de cemento superiores a los 400 kg/m^3 y bajas relaciones de a/c menores a 0.35. El efecto de las cargas sobre el concreto no aparenta afectar significativamente pero si conduce a un colapso prematuro una vez que el concreto y el refuerzo se calientan por arriba de la temperatura críticas por largos periodos de tiempo. El CAR tendrá una significativa degradación a elevadas temperaturas aun cuando no ocurran desprendimientos. A pesar del factor que incrementa en los APL el contenido de agua del concreto por que sus relaciones altas de absorción como los APL, tienen una pequeña diferencia en el funcionamiento de ambos concretos bajo un incendio.

La aplicación de pequeñas cantidades de fibras de polipropileno al CARAPL mejora significativamente su resistencia al desprendimiento en un incendio con hidrocarburos, este mejoramiento ocurre incluso cuando el concreto esta totalmente saturado.

Los mecanismos por los cuales la fibra de propileno contribuye a mejorar la resistencia al desprendimiento no se han examinado específicamente por que se piensa que es el resultado del derretimiento y reducción de su volumen bajo la presencia del fuego. Las fibras desarrollan una red de huecos a través del concreto donde la presión de vapor asociada con la conversión del agua a vapor es liberada causando una ruptura del concreto unida con desprendimientos.

Según lo mencionado anteriormente podremos concluir que los CAR no tienen grandes tendencias al desprendimiento durante el fuego, sin embargo como se explico el desprendimiento tiene un mecanismo muy complicado, que unido a la combinación de propiedades y condiciones de carga, hacen que los efectos del desprendimiento ocurran más frecuentemente en los CAR que en el CDN, las condiciones de carga hacen al concreto más vulnerable al desprendimiento durante un incendio principalmente por: las condiciones externas que llevan a un alto contenido de humedad en el concreto, aplicación de grandes esfuerzos, estructuras delgadas, posibilidad de grandes cargas de fuego, baja porosidad de materiales. Estas condiciones se presentan más cuando se utiliza CAR, esto nos podrá llevar a grandes conocimientos y consideraciones al problema de desprendimiento, sin embargo es de importancia hacer notar que estas condiciones son indirectamente unidas en concretos resistentes, o en los materiales utilizados para altas resistencias.

Existen dos grandes motivos para iniciar investigaciones en el área de CAR bajo cargas de fuego.

Primero, este tipo de concreto ya tiene una gran utilización en diferentes tipos de construcción como el concreto presforzado y en las instalaciones marinas, muchos de estos usos tienen un alto riesgo potencial con respecto al desprendimiento por lo que se requiere un mayor conocimiento en esta área. Segundo, la falla del concreto bajo cargas de temperatura es un mecanismo extremadamente complicado, que dependen del nivel de temperatura, humedad, condiciones de poro-presión y condiciones geométricas. El conocimiento de las cargas de fuego en CDN es muy completa, cuando los factores como son la densidad, tamaño de poro y distribución, etcétera, varían de valores conocidos, se requiere de una gran información para asegurar una apropiada seguridad.

Los CAPL tiene una mayor resistencia al fuego que los CDN, debido a su baja conductividad de calor u aislamiento del recubrimiento del concreto, en fuegos de celulosa.

En fuegos con carga más severa como la de hidrocarburo, el recubrimiento sufre desprendimientos durante el incendio. La causa principal es la presión de vapor más un posible esfuerzo debido a una carga externa, que excede la resistencia a la tensión del concreto. La presión de vapor se determina principalmente por la cantidad de vapor de agua, la permeabilidad del concreto y la carga de fuego debida al incremento de calor y la máxima temperatura.

Los CAPL pueden contener más vapor de agua debido a la agua absorbida en los APL, también el riesgo de desprendimiento puede ser grande en los CAPL, esto se demuestra con las pruebas con bajas relaciones a/c expuestos a un fuego de hidrocarburos. La relación de a/c al parecer tiene una pequeña influencia en el porcentaje de la pérdida de resistencia por el temperatura.

Tampoco la modificación de la pasta de cemento por la introducción de escoria de alto horno o por fly ash, al parecer tienen un mayor efecto sobre la pérdida relativa de la resistencia.

Los CAPL tienen una mejor resistencia que el concreto de peso normal, debido de hecho a la disminución de la porosidad que incrementa el aislamiento en contra en la transferencia del calor. Sin embargo, la ventaja de la resistencia se puede compensar, por la saturación de los huecos con agua o cuando la matriz de cemento es muy densa.

Generalmente, la capacidad de la transferencia de calor se reduce con altas temperaturas.

2.3. Bibliografía

- 2.1 Hang A. K., "Concrete Technology, the Key to Current Concrete Platform Concepts", Proceeding, ACI SP 149, International Conference on High Performance Concrete, Editor V. M. Malhotra, , Singapore, 1994, pp 63-80.
- 2.2 Sandvik M., Haug A. K., Hunsbedt O.S., Moksnes J., "Condensed Silica Fume in High Strength Concrete for Offshore Structures – A Case Record", Proceedings, ACI SP 114, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Fourth International Conference, pp 1,117-1,129.
- 2.3 ACI Committee 201, "Durabilidad del Concreto", ACI 201, Instituto Mexicano del Concreto y Cemento, México, 1989.
- 2.4 Bury, M. R. C., Domone, P.L, "The Role of Research in the Design of Concrete Offshore Structures", Proceedings, Offshore Technology Conference, OTC-1949, Houston, Texas, 1974.
- 2.5 FIP Commission on Concrete Sea Structures, "Recommendation, Design and Construction of Concrete Sea Structures", 4a Edition, Thomas Telford Limited, London, 1985, 29 pp.
- 2.6 ACI Committee 357, "Guide for The Design and Construction of Fixed Offshore Concrete Structures", ACI 357R-84, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1984, 23pp.
- 2.7 DnV, "Rules for the Design Construction and Inspection of Offshore Structures", Det norske Veritas, Oslo, 1977, pp 67.
- 2.8 Somerville, G., "The Live of Concrete Structures in Service", The Structural Engineer, V 64, No. 2, London, February 1986

- 2.9 Mehta, P. K., "Durability of Concrete Exposed to Marine Environment. a Fresh Look", Proceeding, Concrete in Marine Environment, ACI SP 109, Second International Conference St. Andrews by-the-Sea, Editor Malhotra, Canada 1988.
- 2.10 Kosmatka, Steven H., Panarese, William C., "Diseño y Control de Mezclas de Concreto", Instituto Mexicano del Concreto y Cemento, México, 1992.
- 2.11 Neville, Adam, "Nosotros Podemos Hacer Buen Concreto Hoy Día", Concreto 1999 Mitos, Retos y Oportunidades en el Próximo Milenio, Instituto Mexicano del Cemento y Concreto, México, D. F., septiembre 1999.
- 2.12 ACI Committee 309, "Guide for Consolidation of Concrete", ACI -309 R-87, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1987.
- 2.13 NMX-C-403-ONNCCE 1999, "Industria de la Construcción – Concreto Hidráulico para Uso Estructural", Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., México, 1999.
- 2.14 ACI Committee 357, "State-of-the-Art Report on Offshore Concrete Structures for the Arctic", ACI 357.1R-85, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1985.
- 2.15 Hoff, G. C., "Fire Resistance of High-Strength Concretes for Offshore Concrete Platforms", Proceedings, ACI SP 163, Concrete in Marine Environment, Third CANMET/ACI Conference St. Andrews by-the Sea, V. M. Malhotra Editor, Canada, 1996.
- 2.16 Lindgard, Jan, Hammer, T. A., "Fire Resistance of Structural Lightweight Aggregate Concrete a Literature Survey with Focus on Spalling", SINTEF Civil and Environmental Engineering Cement and Concrete, Trondheim, Norway.
- 2.17 Jahren, P. A., "Fire Resistance of High Strength / Dense Concrete With Particular Reference to the Use of Condensed Silica Fume – A Review", Proceeding, ACI SP 114, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Third International Conference, 1989.
- 2.18 Zoldners, N. G., "Thermal Properties of Concrete Under Sustained Elevated Temperatures", ACI SP 25, Temperature and Concrete, 21 st ACI Fall Meeting, Memphis, 1968.
- 2.19 Fernández Canovas M., "Patología Terapéutica del Hormigón Armado", Tercera edición, Madrid, septiembre 1993.

3. CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA

Frecuentemente el Concreto Alta Resistencia (CAR) es considerado un material relativamente nuevo, sin embargo este material ha tenido una evolución gradual a través de los años, por eso su definición a cambiado con los años incluso sus características en base a los requerimientos que han surgido de la necesidad de utilizarlo y hacerlo más durable tal es el caso de las estructuras costafuera. En la década de los cincuenta su resistencia llegaba a los 34 MPa, en los sesenta los concretos con 41 y 52 MPa ya se utilizaban comercialmente. Al principio de los setenta, ya se empezaba a producir concreto de 62 MPa y no es hasta esta década que se aplica en ambiente marino en grandes volúmenes de producción en las plataformas del Mar del Norte. Ya se habían realizados bastantes investigaciones de las aplicaciones de este material, en el reporte del ACI 363 ^(3.1) se menciona entre otros las bondades de este material.

Su resistencia en las estructuras costafuera empezó con 40 MPa y con el paso de los años no se requería únicamente de mayor resistencia sino desarrollar un concreto que fuera más durable bajo condiciones ambientales severas, permitiendo además minimizar costos y su mantenimiento, de este modo surgen los Concretos de Alta Resistencia de Alto Desempeño. Posteriormente las necesidades de desarrollar un concreto aun más ligero del que se conocía surgen los Concretos de Alta Resistencia con Agregados de Peso Ligero, que indudablemente se implementan en los sistemas flotantes al considerar a este tipo de concreto dentro de su diseño en lugar de utilizar al acero estructural; con esta característica las estructuras tienen una mayor flotación, por el ahorro en la carga muerta de su propia estructura, estos mismos conceptos son aplicables a las plataformas del tipo gravitacional. Podemos mencionar de esta forma que la tecnología del concreto en las instalaciones costafuera ha tenido un desarrollo impresionante en las últimas décadas en los concretos de alta resistencia hasta llegar hoy en día a la aplicación de los Concretos de Alta Resistencia de Alto Desempeño de Peso Ligero.

3.1. Concreto Alta Resistencia

El Concreto de Alta Resistencia (CAR) ha sido utilizado en instalaciones costa afuera para la explotación de petróleo en el Mar del Norte a partir de 1973 y desde entonces se han producido millones de metros cúbicos ^(3.2). La primera plataforma que se construyó fue la Ekofisk que requirió de 80,000 m³ de concreto con resistencia de 40 MPa, posteriormente se construyeron más, tabla 3.1, la última de estas es la Troll GBS que requirió de 224,000 m³ y alcanzó una resistencia de 70-80 MPa con concreto ligero.

La mayoría de las plataformas son del tipo de base de gravedad y operan en aguas profundas de 70 a 303 m. ^(3.3). Son estructuras ampliamente reforzadas y presforzadas para resistir severas condiciones de carga, que incluyen un diseño de ola de 30 m de altura, sismo y grandes presiones de agua.

El concreto tiene buen funcionamiento en el medio marino, su esfuerzo a la compresión es la base fundamental para el diseño y la durabilidad que se requiere, tiene un impacto muy importante en el costo - efectivo de una plataforma ya que es menor, debido al aumento de la vida útil de la estructura y el poco o casi nulo mantenimiento que requiere.

<i>Ekofisk 1</i>	1973	70	80,000	40
<i>Beryl A</i>	1975	118	52,000	45
<i>Brent B</i>	1975	140	64,000	45
<i>Frigg CDP-1</i>	1975	104	60,000	45
<i>Brent D</i>	1976	140	68,000	50
<i>Frigg MP-2</i>	1976	94	60,000	50
<i>Frigg TP-1</i>	1976	104	49,000	50
<i>Statfjord A</i>	1977	145	87,000	50
<i>Frigg TCP-2</i>	1977	104	50,000	50
<i>Dunlin A</i>	1977	153	90,000	50
<i>Brent C</i>	1978	141	105,000	50
<i>Cormorant A</i>	1978	149	120,000	50
<i>Ninian Central</i>	1978	136	140,000	50
<i>Statfjord B</i>	1981	145	140,000	55
<i>Statfjord C</i>	1984	145	130,000	55
<i>Gullfaks A</i>	1986	135	125,000	55
<i>Gullfaks B</i>	1987	141	100,000	55
<i>Oseberg A</i>	1988	109	120,000	60
<i>Gullfaks C</i>	1989	216	240,000	70
<i>Ekofisk PB</i>	1989	75	106,000	70
<i>Sleipner A</i>	1992	82	77,000	70
<i>Draugen</i>	1993	251	80,000	75
<i>Heidrum TLP</i>	1995	345	65,000	60*
<i>Troll GBS</i>	1995	303	224,000	70 - 80*

*Concreto Alta Resistencia con Agregados de Peso Ligero (CARAPL)

Tabla 3.1 Plataformas de Concreto. ^(3.2, 3.17)

Principal atención en sus propiedades incluye algunos adelantos y conocimientos sobre las curvas esfuerzo-deformación, el cortante y el esfuerzo a la tensión y la resistencia a la fatiga del CAR.

3.1.1. Diseño de Mezclas

Algunas características de las diferentes mezclas se muestran en la tabla 3.2. El diseño de las mezclas ha tenido especial cuidado en varios requerimientos contradictorios, como la alta resistencia y la baja permeabilidad por un lado y el moderado calor de hidratación y la alta trabajabilidad de otra (3,4). De 1972 a 1993 la resistencia del concreto se incrementó de 45 a 75 MPa, mientras la trabajabilidad (revenimiento) se ha incrementado de 12 a 24 cm. por la alta densidad del acero de refuerzo. Desde entonces se han aplicado más herramientas automáticas y eficientes para aplicarlas en las estructuras que demandan constructibilidad en las mezclas de concreto fresco.

El mejoramiento de las propiedades del concreto ha sido consecuencia principal del mejoramiento de la calidad del cemento por la utilización de mejores aditivos desde los lignosulfonatos, naftalenos y melaminas, así como un mejor control en la producción del agregado, con estas medidas ha sido posible obtener mayores resistencias y constructibilidad manteniendo bajas la relación agua/cemento (a/c) y el contenido de cemento.

	45-50	55-60	65-70
Resistencia, MPa			
Cemento kg/m ³	430	380	380
	SP30	SP30-4A	SP30-4A MOD
Arena 0 - 5 mm kg/m ³		1,030	940
0 - 10 mm kg/m ³	900		
Grava 5 - 20 mm kg/m ³		845	945
10 - 32 mm kg/m ³	900		
*Betokem PA (B) l / m ³		4	6
*Betokem LP l / m ³	4		
a / c	0.41	0.42	0.43
Revenimiento cm.	12	22	24

SP = Cemento Portland Ordinario; * Aditivo Plastificante

Tabla 3.2 Concreto de Alta Resistencia, Diseño de Mezclas. (3,3,3,4)

3.1.2. Cemento

La composición química del cemento se optimizó para obtener mayores resistencias a la compresión a los 28 días con moderado calor de hidratación, reduciendo también, el tiempo de fraguado como consecuencia del aumento de la fineza del cemento.

Hasta 1978 el cemento portland ordinario SP30 fue utilizado en las plataformas costafuera. Como respuesta al requerimiento de obtener un CAR y al desarrollo de los procesos de diseño se desarrolló un nuevo cemento SP30-4A, con alta resistencia y moderado calor de hidratación. Sin embargo, el incremento del tiempo de fraguado y el moderado calor de hidratación, se obtuvieron varias desventajas durante las operaciones del slipforming, ya que se requería una velocidad de deslizamiento de 3 metros por jornada. Posteriormente, se tuvo que reducir el tiempo de fraguado aumentando la resistencia temprana, por lo que se modificó este cemento, obteniendo el SP30-4A MOD, ver tabla 3.3.

	3000	3100	4000
<i>Finesa (Blaine) cm²/g</i>	3000	3100	4000
<i>Tiempo de fraguado (min.)</i>			
<i>Inicial</i>	120	140	120
<i>Final</i>	180	200	170
<i>Composición mineral</i>			
<i>C₂S %</i>	18	28	28
<i>C₃S %</i>	55	50	50
<i>C₃A %</i>	8	5.5	5.5
<i>C₄AF %</i>	9	9	9
<i>Composición Química</i>			
<i>MgO %</i>	3	1.5-2	1.5-2
<i>SO₃ %</i>	3.3	2-3	2-3
<i>Na₂O equivalente %</i>	1-1.2	0.6	0.6
<i>Calor de hidratación</i>			
<i>Kcal / kg</i>	71	56	70

Tabla 3.3 Características de los Cementos.^(3.4)

Los límites del contenido de MgO y del SO₃, durante el desarrollo para mejorar al cemento quedaron en el rango de 1.5 a 2 y de 2 a 3%, mientras que los requerimientos en el código noruego son de 5 y 3.7% respectivamente.

Considerando la durabilidad en ambiente marino, el contenido de aluminato tricálcico C₃A es el más importante, normalmente un contenido del 5 al 8% se recomienda para uso en estructuras marinas. El cemento SP30-4A MOD contiene el 5.5%.

En resumen, para obtener una influencia sobre el desarrollo de resistencia temprana el contenido de álcali en el cemento juega una parte importante en relación con los agregados reactivos.

Anteriormente se tenía un contenido de más del 1% en Na_2O equivalente ($0.658 \text{ K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) y ahora el cemento modificado contiene el 0.6%.

3.1.3. Agregados

En la parte suroeste de Noruega existe grandes depósitos de material de origen glaciofluvial, el examen petrográfico muestra que el mineral predominante en las fracciones gruesas de estos agregados es de cuarzo y feldespato.

Para poder alcanzar la resistencia de 65 a 70 MPa se requiere de un estricto control del proceso en los agregados, la graduación de los agregados se logró por medio de una unidad hidráulica. Las partículas de arena se suspenden en el agua y pasan a través de una unidad de sedimentación donde la arena es separada en ocho tamaños, la granulometría deseada se obtiene por la combinación de estas ocho fracciones. El módulo de finura de la arena es 2.64 y del agregado grueso es de 6.52 en promedio.

3.1.4. Aditivos Químicos

Son comúnmente usados en el concreto, el volumen que ocupan no es significativo no supera el 0.6 % del volumen en el concreto pero su aplicación es decisiva en el resultado final. El uso equivocado o las deficiencias en estos aditivos pueden tener grandes consecuencias.

Diferentes aditivos químicos son constituyentes esenciales para obtener mejor trabajabilidad en la fluidez del concreto así como control del tiempo de fraguado en las operaciones del slipforming.

La plasticidad, el contenido de aire y el tiempo de fraguado son las características principales en las mezclas de diseño, en años recientes se han tenido adelantos muy importantes en el uso de estos materiales. En 1978 los aditivos superplastificantes fueron aplicados.

Para el concreto utilizado en la zona de mareas de todas las plataformas construidas en el Mar del Norte se especificó aire incluido. Los parámetros importantes para la utilización de los aditivos son: el proceso de mezclado, el momento de aplicación, la cantidad y la compatibilidad de los aditivos.

3.1.4.1. Reductores de Agua (Plastificantes)

Son utilizados en el concreto para reducir el contenido de agua y mejorar la trabajabilidad. El uso de estos aditivos es esencial en la producción de concretos de alta resistencia para plataformas y se producen a base de lignosulfonato, naftaleno y melamina.

3.1.4.1.1. Lignosulfonatos

Antes de 1978, los plastificantes más comunes eran los lignosulfonatos, producidos por la industria de la celulosa. La dosificación de 4 l/m^3 daba un revenimiento de 12.0 cm., posteriormente la densidad del acero se incrementó, por lo tanto se requería mayor fluidez en el concreto Incrementando la dosificación del lignosulfonato daba como resultado un incremento en la dilatación y mayor cohesión, permitiendo al concreto permanecer en estado fresco por mas tiempo.

3.1.4.1.2. Naftalenos

Los aditivos elaborados con naftaleno se introdujeron a los finales de los 70's. El efecto de la reducción de agua es excelente, si la dosificación es incrementada arriba de los 4 l/m³ existe un incremento en la dilatación y el bajo tiempo de fraguado es de 11 a 13 horas lo que limita la velocidad para los trabajos del slipforming donde se requieren deslizamientos lentos de 1 m por día.

Los naftalenos son los mejores aditivos usados y aproximadamente el 80% del concreto contiene este aditivo. El uso del cemento SP30-4A y de 5 a 6 l/m³ de naftaleno facilitan la producción de concreto de 70 a 80 MPa con un revenimiento de 25.0 cm.

3.1.4.1.3. Melaminas

Comparadas con los naftalenos son considerablemente menos retardantes y son fácilmente combinables con los aditivos inclusores de aire. El tiempo de fraguado del concreto se reduce en un 50 %. El concreto conteniendo melamina tiene buena trabajabilidad, pero puede perder revenimiento porque la temperatura del concreto es relativamente alta. Para minimizar este problema, una pequeña cantidad de naftaleno se adicionó a la melamina en la plataforma Oseberg A, dando buenos resultados. Debido a la reducción del tiempo de fraguado se aumento la velocidad de operación del slipforming, dando un mayor rendimiento por jornada.

3.1.4.2. Aditivos Retardantes

El uso de retardantes en el slipforming muchas veces es necesario, son una herramienta muy utilizada en el control de la velocidad de deslizamiento. Estos aditivos son a base de gluconato de sodio.

3.1.4.3. Inclusores de Aire

Se especifican para la zona de splash en todas las plataformas. La dosificación normal de aire incluido es 0.2 a 0.4 l/m³ en el concreto, se adiciona al concreto en forma diluida con agua en relación 1:20. Esto asegura la distribución de la solución y asegura el desarrollo de un excelente sistema de vacíos. Los agentes superplastificantes se adicionan en dos etapas, el inclusor de aire se adiciona junto con la primera parte de la mezcla y el resto se adiciona después de 30 segundos. El tiempo total de mezclado no será más de 90 segundos.

3.1.5. Resistencia a la Compresión

La calidad del concreto generalmente se ha descrito como la resistencia a la compresión, en el proceso de diseño es el parámetro principal que se considera, pero también se deben considerar otras propiedades importantes con respecto a la resistencia como son: el módulo de elasticidad, el comportamiento esfuerzo-deformación, la resistencia a la tensión y la resistencia a la abrasión.

El módulo de elasticidad de los agregados, contribuye en el 70% del volumen del concreto, por lo tanto es el parámetro principal. En una de las plataformas la mezcla de diseño se modificó para

incrementar el módulo de elasticidad, el material de morrena fue reemplazado por roca triturada para obtener agregado de cuarzo lo que permitió incrementar el módulo de 25 a 35 GPa.

El Esfuerzo-Deformación ha tenido atención particular para este tipo de concretos. La falla en los CAR de 70 a 100 MPa se debe a que son más frágiles que los concretos con resistencias de 50 a 60 MPa. Las curvas esfuerzo-deformación son casi lineales arriba del 70-90 % del esfuerzo de falla en estos concretos.

Los valores de resistencia a la tensión de los concretos de 50 y 70 MPa fueron de 4 y 5 MPa.

3.2. Concreto de Alto Desempeño

El término Concreto de Alto Desempeño (CAD) fue utilizado primero por Mehta y Aitcin ^(3,5), para las mezclas de concreto que tienen tres características principales, alta trabajabilidad, alta resistencia y alta durabilidad. La principal diferencia entre el CAR y el CAD es la durabilidad.

Entonces desde su resistencia y otras propiedades que son deseables bajo ciertas circunstancias son: Módulo de elasticidad alto, densidad alta, permeabilidad baja, resistencia a la abrasión, resistencia al congelamiento y deshielo, a la oxidación y al ataque químico.

El ACI lo define más ampliamente, como un concreto que tiene los requisitos especiales del comportamiento y de la uniformidad, que no se pueden lograr con los materiales, mezclas, colocación, compactación y curado tradicionales. Los requerimientos que pueden necesitar altos comportamientos son: la colocación, compactación sin segregación, propiedades mecánicas, altas resistencias a edades tempranas, estabilidad de volumen y mayor vida útil en ambientes severos.

La alta resistencia del concreto puede ser requerida, no por si misma sino por que este concreto tiene un módulo de elasticidad alto, esto es de gran importancia con respecto a la deformación del miembro estructural ^(3,6). Un uso importante de CAD es el de asegurar una muy baja permeabilidad del concreto, que es esencial en condiciones severas de exposición donde es peligroso el ingreso de cloruros y sulfatos u otros agentes agresivos, condiciones que son comunes en ambientes marinos.

Otra condición que conduce a daños es el continuo movimiento del agua y el cambio de temperatura, los periodos alternativos de rápido mojado y prolongado secado son particularmente nocivos. Si es un cambio cíclico de temperatura, hay una sinergia entre las dos, la combinación repetida de mojado y secado con una frecuente variación de temperatura nos conduce a daños considerables. El CAD con una baja permeabilidad asegura larga vida en las estructuras expuestas a dichas condiciones.

El CAD se ha venido utilizando más ampliamente en recientes años debido al incremento de la demanda de concreto durable, para poder incrementar la vida útil y reducir al máximo el costo de mantenimiento de las estructuras de concreto.

Podemos enfatizar que el factor de durabilidad no es justamente un problema único en condiciones extremas de exposición. El bióxido de carbono siempre esta presente en el aire y principalmente en las ciudades, la carbonatación del concreto en la zona de recubrimiento puede destruir la pasivación

del refuerzo e inducir a la corrosión, así como algunas sales agresivas se presentan en el suelo. Debemos admitir que la baja permeabilidad del CAD es una de las mayores desventajas, como es el caso de su comportamiento ante el fuego, ya mencionado anteriormente.

3.2.1. Mezclas

La elaboración del CAD se hace basándose en la utilización apropiada de tres puntos importantes: la relación agua/cemento, la sílica fume u otro material finamente dividido y los aditivos químicos como los superplastificantes y los inclusores de aire.

En la práctica, la proporción de la mezcla varía dependiendo de las propiedades de cada uno de los ingredientes y de las características que se desean del concreto en servicio. La relación del agua y el material cementante es de 0.35 a 0.25, el término cementante es utilizado para indicar la mezcla de cemento con fly ash, escoria, sílica fume, caliza u otra clase de material finamente dividido.

Desde hace 80 años que la relación a/c es un factor que controla la resistencia del concreto porque el volumen relativo del espacio original ocupado por el agua determina el volumen total de material sólido en el concreto endurecido.

3.2.2. Cemento

Usualmente se utiliza el cemento tipo I de acuerdo con la clasificación ASTM C150, pero si se requiere resistencia temprana se puede usar el tipo III. El contenido de material cementante es muy alto entre los 400 a 550 kg/m³, cuando se utiliza sílica fume, esta representa del 5 al 15 % del total del material cementante, el valor de 10 % es normalmente utilizado. La dosificación requerida depende del contenido de sólidos activos en el superplastificante líquido y la reactividad del cemento, la cual es una función del contenido de C₃A (Aluminato Tricálcico) y su forma polimórfica y de la cantidad de álcali sulfato, así como otros factores. Esta dosificación permite una reducción en el contenido de agua de 45 a 75 litros por metro cúbico de concreto.

3.2.3. Agregados

Los agregados tienen que ser cuidadosamente seleccionados y tener un pequeño tamaño máximo, en los CAD el tamaño máximo es usualmente de 10 a 14 mm, existen dos razones para esto. Primero, con un tamaño pequeño el esfuerzo diferencial en la interface de la pasta cemento-agregado puede conducir al microagrietamiento. Segundo, las partículas de agregados pequeños son más resistentes que las grandes, se debe a que el factor de trituración de la roca elimina los grandes defectos mejorando el control de la resistencia.

Los agregados no deben ser mayores al tamaño máximo especificado, el agregado de cuarzo deben tener varias características: Debe ser resistente, estar absolutamente limpio, libre de arcilla o polvo, no debe contener sílica reactiva y debe tener una forma equidimensional, no escamosa ni alargada, comúnmente se utilizan los agregados de caliza dolomítica, granito, dolerita y diorita. El agregado fino tiene que ser graduado de preferencia con módulo de finura de 2.7 a 3.0.

3.2.4. Aditivos

El fly ash y la escoria, son materiales baratos como el cemento portland, estos materiales hidratan o reaccionan químicamente después que el cemento portland, en consecuencia, el desarrollo del calor de hidratación es más lento. De este modo el incremento temprano de la temperatura es bajo. Una pequeña reducción en la temperatura máxima es importante porque, con el alto contenido de cemento usado en el CAD, la elevación de la temperatura en el centro de masa del concreto puede ser de 50°C o más.

Otra razón para el uso de fly ash o escoria es porque es benéfico y esto tiene que ver con la pérdida de revenimiento del concreto fresco. Estos materiales reaccionan muy poco durante las primeras horas y no contribuyen a la pérdida de revenimiento, aquí los plastificantes nos ayudan a obtener mayor revenimiento. En otras palabras, la cantidad de superplastificante necesario para asegurar una adecuada trabajabilidad se rige únicamente por la cantidad de cemento portland. De otra forma, las mezclas que tienen más de fly ash o más escoria desarrollan baja resistencia de 12 a 24 horas como cuando todo el material es cemento portland, pero esto puede ser compensado por la baja relación de a/c.

Lo más importante es saber que cantidad de superplastificante se usará en la mezcla por que estos son ingredientes con costo elevado y estos se deben incluir en la mezcla. La silica fume también es muy cara, un kg de silica cuesta alrededor de 10 veces más que un kg de cemento portland. Sin embargo, hay que recordar los beneficios de la silica, no es solamente un gran material puzolánico, es un material extremadamente fino tal que sus partículas son alrededor de 100 veces menor que el cemento.

Las partículas de silica se envuelven herméticamente en la superficie del agregado y se ajustan entre las partículas del cemento, esto mejora al empaque. Por esto, las cantidades bajas de silica fume no son buenas, las proporciones menores de 5 % no son efectivas y si hay más del 15% no existe espacio entre las partículas de cemento para acomodar toda la silica, provocando el desperdicio de esta.

Las partículas finas de silica fume reducen el tamaño y volumen de los vacíos cercanos a la superficie del agregado, la llamada zona de interface o zona de transición mejora sus propiedades con respecto a las microgrietas y la permeabilidad. La liga entre el agregado y la pasta de cemento se mejora permitiendo al agregado participar mejor en la transparencia de esfuerzos.

3.2.5. Compatibilidad del Cemento - Superplastificante

Es imposible producir concreto con un revenimiento de 20 cm. y una relación a/c menor de 0.40 sin la utilización de un plastificante ⁽³⁷⁾ No todos los superplastificantes comerciales tienen la misma eficiencia por ende no reaccionan de la misma forma con el cemento portland y viceversa.

Algunas pruebas sencillas proporcionan una pobre indicación de la compatibilidad del cemento y superplastificante. Usualmente un cribado preliminar se requiere para realizar pruebas complicadas

como el revenimiento bajo o el cono de Marsh para prueba de flujo. Pero a pesar de los méritos de estas pruebas muy simples, las pruebas de mezclado son necesarias para observar que los revenimientos iniciales pueden realizarse y por cuanto tiempo se pueden mantener.

Es necesario explicar la incompatibilidad que puede existir entre ambos materiales. El superplastificante actúa sobre el concreto para darle una gran trabajabilidad, estos aditivos tienen moléculas largas y duras, las cuales se cubren ellas mismas alrededor con partículas de cemento y generan entonces una gran carga eléctrica negativa por lo que se repelan unas contra otras. Esto resulta en una floculación y dispersión de las partículas de cemento y también en una gran trabajabilidad de la mezcla. La estructura fundamental de la pasta de cemento hidratada no se afecta, pero el superplastificante interactúa con el aluminato tricálcico C_3A en el cemento portland, recordando que el aluminato tricálcico es el primer componente del cemento a hidratar y la reacción es controlada por el yeso adicionado en la fabricación del cemento portland.

De esta forma el superplastificante y el yeso pueden reaccionar con el aluminato tricálcico, aunque una cierta cantidad de superplastificante es necesaria durante el mezclado para mejorar la trabajabilidad, es esencial que todos los superplastificantes no vengan unidos por aluminato tricálcico. Dicha fijación podrá ocurrir si el yeso no libera rápidamente los iones de sulfato suficiente para reaccionar con el aluminato tricálcico. Cuando los iones de sulfato son liberados lentamente, el cemento portland y el superplastificante son incompatibles.

Así, en la práctica el factor de control es la solubilidad del yeso en el cemento portland. El término "yeso" es usado para describir al sulfato de calcio en el cemento, pero éste puede existir en diferentes formas, dependiendo de la materia prima utilizada en la fabricación del cemento, este puede ser: yeso, que es sulfato de calcio dihidratado, hemihidratado y anhidro. Cada uno de estos tiene diferente proporción de solubilidad, además, la solubilidad del anhidro depende de su estructura y origen.

El problema de la incompatibilidad descrita, puede existir en el concreto común, pero este es mucho más grave en el CAD, existen dos razones para esto. Primero, en el concreto de alto comportamiento la relación a/c es muy baja entonces existe menos agua disponible para aceptar los iones de sulfato. Segundo, el contenido de cemento portland por metro cúbico de concreto es muy grande, entonces existe más aluminato tricálcico cuya reacción debe ser controlada para asegurar la trabajabilidad deseada.

3.2.6. Trabajabilidad

Uno de los principales problemas que se reportan con estos concretos es la pérdida de la trabajabilidad prematura (revenimiento), la cual los productores controlan aumentando la cantidad especificada del aditivo reductor de agua de alto rango o por el ajuste de dosificación de la mezcla en el sitio ^(3.8).

Se debe reconocer que la prueba de revenimiento no califica totalmente la trabajabilidad del CAD y que otras pruebas disponibles no son fáciles de aplicar. La reología del concreto se caracteriza por

dos parámetros: esfuerzo a la ruptura y viscosidad plástica. El esfuerzo a la ruptura es el esfuerzo necesario para iniciar el movimiento y la viscosidad es la pendiente del esfuerzo contra la relación de cortante después del esfuerzo excedido del esfuerzo a la ruptura.

El esfuerzo a la ruptura puede ser relacionado con la medida del revenimiento. La medición de viscosidad es más sofisticada porque esta puede hacerse mientras el concreto esta en movimiento. Existen pocos instrumentos que puedan medir ambos, la viscosidad directa y un valor relacionado con la viscosidad. Más precisamente, el fenómeno de la pérdida de revenimiento generalmente corresponde a un incremento del esfuerzo de ruptura, mientras la viscosidad plástica solamente presenta cambios menores.

Otro problema relacionado con las propiedades reológicas del concreto es la segregación. Mientras el CAD es generalmente cohesivo y se mantiene junto, pequeños cambios en las características de los materiales pueden ocasionar la segregación como, la graduación del agregado y el contenido de humedad. La vibración puede incrementar la segregación si se realiza inadecuadamente. De otra forma ajustando la viscosidad de la pasta de concreto se puede prevenir el problema.

3.2.7. Contracción

El CAD tiene contracción mientras este se encuentra en su estado plástico, la magnitud de esta se llama contracción plástica que es efectuada por la cantidad de agua perdida expuesta en la superficie del concreto, si la cantidad perdida por unidad de área excede la cantidad de agua llevada a la superficie por el sangrado, el agrietamiento por contracción plástica puede ocurrir. El CAD tiene un contenido de agua muy bajo, expresado en litros por metro cúbico de concreto y el desarrollo de los poros capilares son consecuentemente menores, no hay por lo tanto un sangrado y esto permite un agrietamiento plástico a menos que se prevenga la pérdida de agua desde la superficie del concreto, por lo tanto se requiere de un curado húmedo en las primeras etapas. La contracción plástica no es un problema común porque hay normalmente suficiente agua de sangrado.

Existe mayor conocimiento en la contracción por secado del concreto endurecido, su causa es la pérdida de agua por evaporación fuera del concreto. En el CAD es muy pequeña la contracción por secado, porque depende de la capilaridad que es muy pequeña.

Otra contracción de importancia que se presenta es la autógena, y se debe a la continua hidratación del cemento a través de su masa y no justamente de la superficie. Esta contracción se estimula por la baja relación *a/c* y también por la baja cantidad y tamaño de poro capilar. La silica fume, reacciona muy rápidamente con el agua y también contribuye a su desecación.

Un volumen A de cemento reacciona con un volumen B de agua para formar un volumen C de pasta de cemento hidratada: $C < A + B$ por tanto, la hidratación del cemento genera una contracción volumétrica. Esta contracción volumétrica genera o no una porosidad abierta dependiendo de la disponibilidad de una fuente externa de agua para rellenarla. Si el agua no es proporcionada durante la hidratación, el agua de mezclado se drena por capilaridad y los vacíos se crean. Los poros creados por la hidratación del cemento inmediatamente se llenan con vapor de agua y se forman meniscos

Los esfuerzos de tensión desarrollados por estos meniscos son responsables de la contracción por desecación. Como la hidratación del cemento usualmente se desarrolla muy rápidamente en los CAD la contracción es muy rápida si no se proporciona agua externamente.

Después de un periodo de tiempo, el secado fuera de la malla capilar de la superficie exhibe menos contracción por secado por que la capilaridad es mucho más fina y esta parcialmente drenada hacia afuera por desecación.

A través de la desecación y la contracción en el secado ambas crean poros en el concreto, pero son básicamente diferentes, la desecación desarrolla los poros dentro de toda la masa de concreto, mientras el secado empieza a desarrollarse en la superficie del concreto y progresa más o menos rápidamente hacia el centro del concreto, creando gradientes de resistencia a la tensión en la superficie del concreto.

El esqueleto de los agregados de cuarzo aumenta su rigidez cuando la reacción de la hidratación del cemento se desarrolla, opuesto a los esfuerzos de tensión que son desarrollados dentro de la pasta debido a la contracción, el resultado es microagrietamiento debido a la rigidez del esqueleto del agregado y a la contracción de la pasta de cemento hidratada.

3.2.8. Curado

Sabemos que frecuentemente no se practica el curado del concreto que es de gran importancia, principalmente cuando existen relaciones bajas de a/c . En este caso en los CAD es crucial, debido a la diferencia significativa en el desarrollo de contracciones dentro del concreto, el curado húmedo en las primeras etapas es absolutamente esencial y puede continuar con el esfuerzo a la tensión de la hidratación de la pasta de cemento la cual es muy resistente, suficiente para resistir el microagrietamiento interno.

El curado con membrana no es suficiente para ser utilizado con el CAD, todas las membranas prevén la pérdida de agua del concreto, estas son suficientes cuando el concreto tiene una relación a/c alrededor de 0.42 por que la cantidad de agua en la mezcla es adecuada para la hidratación total. Sin embargo para valores bajos como los utilizados por el CAD son esenciales para adicionar agua del exterior para ingresarlo en el concreto, en algunos casos inmediatamente la aplicación de brisa o cubrir la superficie del concreto con agua por medio de encharcamiento no es posible.

Siete días de curado generalmente pueden eliminar cerca del 75 % de la contracción por desecación el cual puede representar más del 50 % de la contracción total del concreto.

3.2.9. Acabado

Los factores como el alto contenido de material cementante, grandes dosificaciones de los aditivos químicos y el aire incluido contribuyen a dificultar al acabado de estos concretos.

Lo pegajoso del CAD se relacionan con su alta cohesión, la viscosidad de la mezcla y la falta sangrado debido al incremento de partículas finas y de su baja relación a/c . El CAD es diferente al concreto normal y su acabado reconoce la necesidad de una diferente secuencia de operación.

Debido a la falta de sangrado, una capa se debe de formar rápidamente previniendo la herramienta de acabado para su correcta aplicación. La formación de la capa puede crear otros problemas como el agrietamiento y dificultades en el sangrado de las capas de concreto.

3.2.10. Microestructura

El CAD tiene una microestructura muy compacta con una estrecha liga entre los agregados y la pasta de cemento hidratada, el concreto normal tiene una microestructura muy abierta, llena de poros y de cristales de portlandita y etringita. Esta diferencia esencial en la microestructura del CAD y el concreto común es por la diferencia en su relación agua/cementante (*a/c*).

Los concretos normales son más bien compuestos producidos por productos de hidratación exterior, mientras los CAD son más bien compuestos de hidratación interior desarrollados por difusión de moléculas de agua dentro de las partículas cementantes. Esta diferencia microestructural da como resultado diferencias en la permeabilidad y durabilidad, especialmente cuando se mide la permeabilidad de los iones de cloruro.

3.2.11. Propiedades Mecánicas

Una relación *a/c* baja es una premisa para el CAD, con grandes resistencias a la compresión a los 28 días, si los agregados son lo suficientemente resistentes, cuando se fabrica concreto con resistencias mayores a los 60 Mpa los agregados débiles se deben eliminar para beneficiar la disminución de la relación.

Otra gran característica es su módulo de elasticidad el cual es influenciado directamente por los agregados. Es posible fabricar CAD a 100 Mpa con un módulo elástico menor de 25 GPa o arriba de 65 GPa simplemente por usar agregado de cuarzo con diferente módulo de elasticidad. Por lo tanto, el módulo de elasticidad que se especifica en diferentes códigos se debe considerar con muchas reservas, siempre será mejor medir directamente el módulo elástico en especímenes de concreto que en los códigos. El CAR y CAD tienen relaciones de Poisson similares.

3.2.12. Aplicación en la Hibernia GBS

La plataforma Hibernia en Canadá ⁽³⁹⁾, de 166,000 m³ de concreto es el primer ejemplo del uso del concreto de alto desempeño a gran escala, figura 3.1. Su base de cimentación y su superestructura incorpora estructuras densamente reforzadas como la losa de cimentación, trabes y muros internos y externos.

La altura de su armazón es de 85 m, los muros exteriores forman un muro para soportar el impacto del hielo o iceberg por medio de 16 dientes, los cuales se diseñaron para absorber el impacto de hielo, tabla 3.4. Estos muros tienen un espesor de 1.4 m, los muros diagonales son de 0.75 a 0.95 m y los muros interiores de 0.90 m.

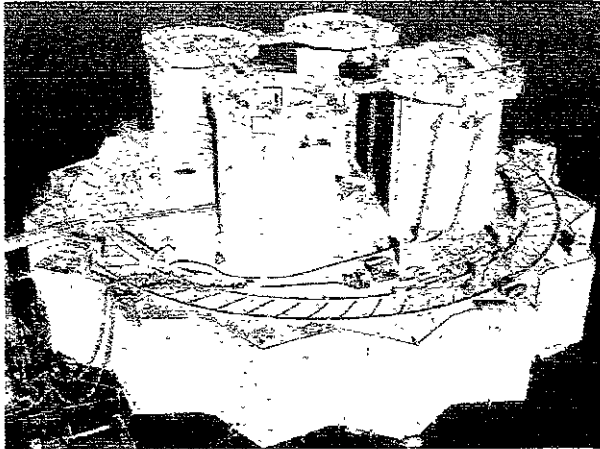


Fig. 3.1 Hibernia GBS.

Profundidad de agua	80.0 m
Altura (tope de columnas)	111.0 m
Altura de armazón	85.0 m
Diseño de altura de ola	29.3 m
Diámetro	105.0 m
Volumen de concreto	166,000 m ³
Peso	500,000 ton
Almacenamiento petróleo	1.3 millones de barriles

Tabla 3.4 Características Principales de la Hibernia GBS.^(3.10)

Todos los elementos estructurales requieren de concreto con niveles óptimos, fluidez, control, impermeabilidad, durabilidad, y otras propiedades necesarias para resistir el ambiente marino. La plataforma Hibernia está sujeta a condiciones ambientales severas en términos de temperatura, oleaje y hielo^(3.10).

El concreto está sujeto al ataque por acción de congelamiento y deshielo, abrasión física por el agua y bloques de hielo, corrosión del acero de refuerzo y a las reacciones químicas de los agregados, por lo que debe ser extremadamente durable, especialmente porque es difícil y costosa su reparación. Esta estructura está densamente reforzada y debe estar libre de agrietamiento para reducir la corrosión del acero de refuerzo y asegurar que no exista filtración de agua o petróleo.

El concreto se elaboró con ingredientes de alta calidad, baja relación a/c, alto revenimiento, bajo calor de hidratación y fue sometido a un estricto control de calidad para asegurar la consistencia. Para conseguir este objetivo el contenido de silica fume fue de 7.5 a 9.5% en el contenido de cemento, el contenido total de álcali es de 0.70 % para reducir la posibilidad de reaccionar con los agregados, tabla 3.5.

El agregado que se suministró fue una arena local granito limolita y depósitos de grava que fueron aceptados en base a las pruebas de álcali reactividad, el tamaño máximo fue de 14 mm. Desde la planta de cribado la arena pasa a través de un clasificador de arena para cambiar la graduación si es necesario, se realiza un lavado al material y es probado en la planta y en el sitio de construcción.

La mezcla básica contiene 450 kg/m³ de material cementante y una relación a/c de 0.34, la resistencia a la compresión a los 28 días de 69 MPa, la mezcla contiene un aditivo reductor de agua y un superplastificante que produce un revenimiento de 15-23 cm. En la zona de splash y arriba de esta se aplicó un contenido de aire de 61% que se consiguió con el uso de aditivo inclusor de aire por lo que el contenido de cementante en esta zona fue de 480 kg/m³.

La densidad máxima saturada fue de 2,400 kg/m³, para minimizar el agrietamiento térmico por especificación la temperatura máxima fue de 65°C con un gradiente en la sección transversal de 20 °C por 300 mm y una velocidad máxima de enfriamiento de 20 °C a 24 hrs.

Cemento (7.5 % de silica fume)	450 kg / m ³
Agregado Fino	830 kg / m ³
Agregado Cuarzo	907 kg / m ³
Agua	153 l / m ³
Relación Agua/Cemento (a/c)	0.34
Aditivo HRWR (reductor de alto rango de agua)	1.5 l / m ³
Aditivo Inclisor de Aire, Aire Extra	Como sea requerido
Revenimiento (antes HRWR)	2.5 cm.
Revenimiento (después HRWR)	15.0 a 23.0 cm.
Resistencia a los 28 días	69 Mpa (700 kg/cm ²)

Tabla 3.5 Diseño de la Mezcla en la Hibernia GBS. ^(3.9)

3.3. Concreto con Agregados de Peso Ligero

Se han requerido de consideraciones adicionales en el diseño estructural de plataformas de concreto en el Mar del Norte por el descubrimiento de gas y petróleo en aguas profundas entre los 250 y 350 metros en el Mar del Norte ^(3.11).

Para poder explotar estas fuentes de energía, estas grandes estructuras se deben adaptar a las aguas profundas, a las malas condiciones del suelo, tener la capacidad para poder flotar desde el sitio de construcción hasta el sito de operación localizado a varios kilómetros costafuera y además, se pueden deteriorar más sino se emplea Concreto de Alta Resistencia con Baja Densidad en las partes altas de la estructura. La reducción en peso de la estructura en lugares específicos ayuda a encontrar el balance entre las operaciones de flotación y desplazamiento con adecuados márgenes de seguridad, además la baja densidad y la alta resistencia del concreto permite al análisis estructural ahorrar en carga muerta para el diseño de la estructura y cimentación, dando como resultado menores dimensiones generales y miembros estructurales menos robustos.

Los Concretos con Agregados de Peso Ligero (CAPL) se han utilizado con propósitos estructurales por varios años, pero anteriormente era más importante la densidad que su resistencia, sin embargo como ya se ha argumentado en las estructuras costafuera son importantes ambos conceptos además de la durabilidad. Bajo estos conceptos surgen los Concretos de Alta Resistencia con Agregados de

Peso Ligero (CARAPL), en este trabajo se hará mención de este tipo de concreto, aunque se omite el mencionar alta resistencia.

Existe una basta bibliografía sobre el CAR, que comparada con CARAPL existen muy pocos documentos ^(3.12). En una breve semblanza mencionaremos que en el año de 1957 Shideler reportó la producción y las propiedades de los concretos de peso ligero con resistencia de 58 MPa a los 28 días. En 1978 Kaar, Hanson y Capell reportaron el comportamiento esfuerzo-deformación, el módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión con resistencias arriba de 86 MPa, ambos estudios mencionados se basaron en mezclas sin revenimiento. En 1978 Wang, Shah y Naaman reportaron las curvas del esfuerzo-deformación con resistencias arriba de los 55 MPa, proponiendo una expresión analítica para la curva esfuerzo-deformación en estos concretos.

Con el rápido desarrollo de la tecnología del concreto en recientes años, el concreto con alta resistencia se fabrica más fácilmente, desde 1980 a la fecha ya existe un detonador más importante de las investigaciones dirigido a su aplicación en las estructuras costafuera. En 1980 Holm reportó los resultados de su investigación sobre las propiedades físicas y mecánicas utilizando esquisto expandido. En el mismo año Lydon y Balendran investigaron la resistencia a la flexión con fly ash sinterizado así como una mezcla sinterizada de fly ash y clinker. En 1986 Slate, Nilson y Martínez encontraron que el curado húmedo se desarrolla rápidamente en las primeras etapas pero después la resistencia es insignificante. G. C. Hoff en 1990 publica la aplicación de estos concretos en el Ártico. Ya existen dos grandes aplicaciones de este tipo de concreto en el Mar del Norte, en la Hidrum TLP y en la plataforma Troll GBS, ambas puestas en operación en el año de 1995 considerando una vida útil de 70 años.

3.3.1. Agregados

Para los CARAPL, las características de los agregados ^(3.13) es lo más importante para poder obtener buenas propiedades en estos concretos, los Agregados de Peso Ligero (APL) se producen con diferentes materias primas, como: Arcilla, esquistos, pizarra, fly ash, escoria de alto horno, piedra pómez, diatomita, perlita y vermicurita. Las condiciones de producción incluyendo principalmente la temperatura puede variar, por lo tanto las propiedades y las características de los agregados de peso ligero tienen un amplio margen de variación. Por ejemplo, la densidad puede ser baja desde los 30 kg/m³ o alta hasta los 900 kg/m³. Únicamente los agregados que se producen con arcilla, esquistos, pizarra, fly ash y escoria de altos hornos tienen suficiente resistencia para aplicaciones estructurales.

3.3.1.1. Producción

En todos los casos los agregados utilizados son de peso ligero debido a su estructura celular, esta estructura dentro de las partículas es formada por altas temperaturas. La temperatura de expansión para su producción es de 1,225 °C en promedio, para que se pueda minimiza el potencial de expansión residual del agregado y que el concreto no sufra daños significativos cuando se presente el

riesgo de un incendio en una plataforma de concreto con temperaturas máximas de 1,100 °C. Estos agregados se pueden producir en tres formas ^(3.14, 3.15).

- a) Formación de gases, debido a la reacción del calor sobre ciertos constituyentes en la materia prima que se fusionan con el material, produce gases que son atrapados en una masa viscosa pirolástica causando expansión.
- b) Después del calor, se somete una masa suave que se entremezcla con cantidades controladas de agua o vapor, el cual es atrapado cuando la masa se enfría dando una estructura celular.
- c) Materiales combustibles dentro de una matriz, las celdas en las partículas de los agregados pueden variar de tamaño desde microscópicas a macroscópicas y estar interconectadas o separadas.

En varios casos la trituración de estos materiales es prerequisite para obtener el tamaño adecuado, en los casos de materiales finamente divididos como son los limos, las arcillas y el fly ash, estas materias primas necesitan ser aglomerados con agua o posiblemente requieren la adición de cementante, gas o agentes fluidificantes antes de su calentamiento.

Se utilizan diferentes métodos para producir agregados estructurales de peso ligero, los agregados utilizados en los CARAPL son triturados o granulados por lo que se mencionara estos procesos únicamente.

3.3.1.1.1. Horno Rotatorio

El horno rotatorio es un cilindro grande con cierta inclinación horizontal integrado con materiales refractarios en donde se introduce continuamente la materia prima en la parte superior y debido a la rotación lenta e inclinación el material se mueve hacia abajo calentándose. El calor produce la formación de gases y comienza una condición pirolástica en el material, la viscosidad de la masa ablandada es suficiente para atrapar los gases y formar una estructura celular interna. Esta estructura se coloca en un refrigerante para formar un material duro vitrificado. En este caso, el agregado triturado se obtiene del material caliente que fue expandido, el cual se descarga, se enfría entonces se tritura y por último se criba según la graduación requerida. Las partículas obtenidas tienen forma cúbica o angular.

3.3.1.1.2. Proceso de Sinterización

La materia prima usada contiene materia carbonosa que sirve como combustible o se mezcla con combustible, como el carbón fino de tierra o coque

El material triturado es una variante en este proceso. Una capa de la mezcla se prehumedece y se coloca en una parrilla transportadora donde se seca y después se continua con el calentamiento para llegar a todas las capas. Los gases se forman causando expansión que coincide con el inicio pirolástico, hasta que el material es suficientemente viscoso para atrapar el gas y crear una estructura celular. El clinker formado es entonces enfriado, triturado y cribado para obtener la

graduación requerida. En algunos casos la estructura celular resulta por el calentamiento del material carbonoso y la pérdida de humedad y la fusión de la materia prima original. El producto terminado generalmente es filoso y angular con una textura superficial vesicular.

El material granular es una segunda variación del proceso de sinterización, la arcilla o esquisto pulverizado es mezclado con combustible y humedad, entonces es granulado o estirado antes de ser calentado, el producto terminado es de forma cilíndrica y redondeada.

El proceso de granulación para expandir a la escoria de alto horno que se encuentra a una temperatura mayor a los 1,200 °C es tratada con cantidades limitadas de agua y carbón en un tambor rotatorio. Las aspas del tambor rompen a la escoria para formar pequeñas partículas que solidifican en forma de esferas.

3.3.1.2. Estructura Interna

Se han realizado investigaciones sobre la microestructura de varios tipos de agregados y se ha observado que la microestructura es muy similar a pesar de las diferentes materias primas y los diferentes métodos de fabricación, esto sugiere que existe una composición química similar en la materia prima y la aplicación de regímenes de temperaturas similares.

Prácticamente todas las propiedades incluyendo la densidad, absorción y resistencia de un material poroso, están influenciados por la estructura interna del material. La estructura porosa interna tiene gran influencia sobre la absorción de agua y la resistencia de los agregados.

Cuando se discute la porosidad de un material es importante distinguir entre los dos tipos de poros o vacíos. Los llamados abiertos o interconectados, son poros que forman un sistema de poro continuo dentro del material, los poros cerrados son aislados o no son poros interconectados. Únicamente los sistemas de poro abiertos contribuyen a la transportación de materia a través del agregado.

La mayoría de los poros en los APL son abiertos, por lo que son susceptibles a la absorción y al flujo de agua.

La resistencia y rigidez de las partículas dependen del tamaño, distribución, forma y volumen total del poro en las partículas de los agregados ^(3.16). Largas cavidades de forma irregular debilitarán las partículas de los agregados.

3.3.1.3. Humedad

Es importante para la producción de concreto de baja densidad que los APL tengan un contenido uniforme de humedad ^(3.17), esto se puede alcanzar teniendo un contenido bajo de humedad inicial de 0 a 5 %. Diversas pruebas han mostrado que tampoco la resistencia ni la densidad se pueden controlar adecuadamente si se usan agregados saturados. Por lo tanto los agregados de peso ligero deben ser protegidos de la lluvia durante su almacenamiento y transportación.

La absorción fue una de las consideraciones principales en la selección del agregado en la plataforma Hibernia por dos razones principales.

♦ Las estructuras costafuera se construyen generalmente utilizando concreto bombeado y además deben de tener una gran trabajabilidad con rangos de revenimientos de 22 cm. al final de la línea de bombeo.

♦ En este caso la estructura estará expuesta a ambiente severo de congelación y deshielo.

Los agregados con alta absorción anulan ambos requerimientos. Las pruebas de absorción indicaron a las 24 hrs un 5.1%, en condiciones de trabajo una absorción de 6 a 9.5% de la superficie saturada seca y en condiciones de bombeo con presiones de 1 a 2 MPa de 9.4 a 10.7%, para poder alcanzar estos rangos de absorción de 6 a 9% el agregado se prehumedeció en periodos de 48 hrs.

3.3.1.4. Permeabilidad

Aunque los APL normalmente son muy porosos, varias investigaciones han mostrado igual o menor permeabilidad al agua en los CARAPL ^(3.18), estas investigaciones atribuyen este comportamiento a una combinación del mejoramiento de la zona de interface, a más estructura unificada, reducción de esfuerzo interno debido al cambio de volumen en el estado inicial sin carga. Otras investigaciones sugieren que la formación de una capa de recubrimiento de pasta de cemento densa alrededor de las partículas individuales del agregado puede explicar el mejoramiento de la permeabilidad.

Los autores proporcionan más información sobre la permeabilidad de los CARAPL con resistencias de 50 hasta 100 MPa. Las conclusiones a las que llegaron fueron: la permeabilidad de los CARAPL son generalmente muy bajas, pero la dispersión de las medidas de permeabilidad de agua fueron altas.

La permeabilidad de estos concretos aparentemente depende más de la porosidad de la matriz del mortero que de la porosidad del agregado. Ya que en las muestras utilizadas los agregados porosos tuvieron la misma permeabilidad baja que los agregados más densos. Los agregados que se utilizaron fueron la arcilla expandida, fly ash sinterizado. Un alto contenido óptimo de cemento mejora la permeabilidad, el uso de arena natural en lugar de arena de peso ligero reduce la permeabilidad.

No existe una relación directa entre la permeabilidad de agua y la conductividad eléctrica, pero si existe una relación directa entre la permeabilidad de agua y la penetración acelerada de cloro. Por lo tanto, la prueba acelerada de penetración de cloro parece ser mejor para evaluar la permeabilidad que la prueba de conductividad eléctrica.

3.3.2. Propiedades

En el estudio que se realizó con varias mezclas se obtuvo que la resistencia a la compresión no se afecta mucho por el incremento de cemento o por remplazo de cemento por sílica fume. Ni fue afectado significativamente por el uso de arena natural como un reemplazo parcial de la arena de peso ligero. Los resultados demuestran claramente que el tipo de agregado de peso ligero es el principal factor de control de la resistencia a la compresión. Esto indica claramente que la resistencia a la compresión alcanza probablemente un mayor nivel por los agregados y las resistencias no benefician significativamente el mejoramiento de la resistencia de la matriz.

El concreto con agregado de peso ligero se puede considerar compuesto en dos fases con el agregado de cuarzo como una inclusión esférica empotrada en una matriz de mortero continua. El comportamiento de la resistencia y la deformación principalmente será controlada por la matriz y agregado y la interacción entre los dos componentes. Una deficiente compatibilidad entre los agregados y la matriz puede causar concentración de esfuerzos y agrietamiento. Si la liga es suficientemente fuerte como el agregado, el esfuerzo a la tensión en el agregado puede dirigir su resistencia a la tensión sin agrietamiento en el mortero, esto puede explicar el efecto de limitación del agregado de ligero sobre la resistencia del concreto.

El uso de una matriz de alta resistencia dará una resistencia total mucho mayor y será menor si se considera únicamente la resistencia del agregado. Para el CARAPL, el módulo de elasticidad del agregado es generalmente bajo como la matriz del mortero, cuando al concreto se le aplica una carga de compresión axial, el agregado está sujeto a un confinamiento lateral del mortero circundante.

En los concretos comunes el desarrollo de la resistencia es proporcional a la resistencia del mortero, mientras que la resistencia del CAPL es determinada por la resistencia del agregado.

3.3.3. Aplicación en la Troll GBS

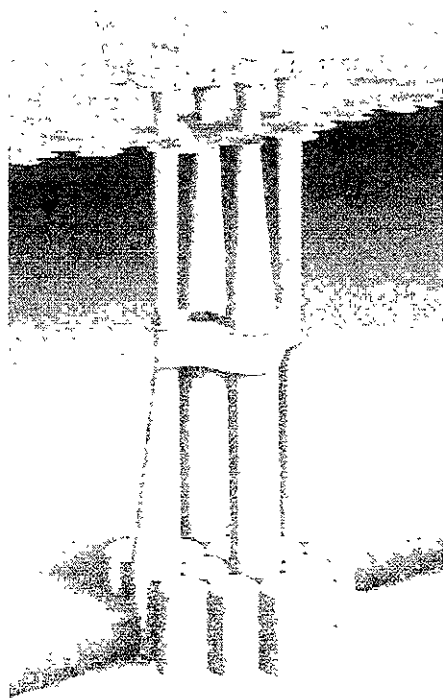
La plataforma Troll GBS tiene el récord de altura de 369 m. en su estructura de concreto, la altura total de la plataforma es de 474 m. incluyendo su cubierta lo que la hace la estructura más alta que se haya movido sobre la faz de la tierra ^(3,19). La cimentación tiene un faldón de 36 m. de profundidad que se empotró dentro de un suelo muy suave a una profundidad de agua de 303 m., los faldones son circulares con diámetro de 32 m. y lo conforman 19 celdas, tabla 3.6. Cuatro de las celdas se extienden para formar las columnas de la plataforma que alcanzan una altura de más de 300 m, los diámetros de estas columnas varían de 33 a 14.5 m. El diseño también incluye una gran abrazadera a media altura de las columnas que es una junta flexible y rígida que evita la transferencia de momentos a la cubierta de la plataforma, figura 3.2.

La gran altura de la estructura fue un desafío en las operaciones de remolque con respecto a su desplazamiento de gran calado 237 m., que es una gran superficie para remolcar considerando que se debe tener un extremo cuidado al paso en aguas superficiales por la ruta de remolque. Sin embargo los 237 m. de calado en esta operación fueron dirigidos por la flotación de la estructura y por la operación estrictamente controlada de los remolcadores.

La plataforma fue diseñada para una vida útil de 70 años, sin embargo durante el proceso de diseño el peso de la plataforma se incrementó 30,000 ton más debido a que su vida útil se incrementó de 50 a 70 años, existía un efecto de resonancia, la carga muerta de la cubierta aumentó de 17,000 a 22,000 ton.

Para solucionar el problema de flotación de la plataforma durante su remolque al lugar de colocación, se consideraron varias alternativas para aligerar el peso siendo la más económica y viable, el aligerar el peso del concreto. Este concreto de densidad normal modificada se utilizó en las partes bajas de la

plataforma entre las elevaciones 98 y 191 m., la densidad en el sitio fue de 2,250 kg/m³ con una resistencia de 75 Mpa.



Profundidad de agua	303.0 m.
Altura de la GBS	369.4 m.
Altura total	472.0 m.
Area de cimentación	16,600 m ²
Profundidad de los faldones	36.0 m.
Volumen de concreto	245,000 m ³
Peso de acero de refuerzo	94,000 ton.
Almacenamiento de petróleo	1.3 millones de barriles

Tabla 3.6 Características Principales de la Troll GBS.^(3.19)

Fig. 3.2 Plataforma Troll GBS.^(3.19)

La reducción del peso fue obtenida por el reemplazo parcial del agregado de cuarzo natural por agregado de alta calidad de peso ligero. El requerimiento principal fue el de obtener concreto con las mismas propiedades mecánicas del concreto de alta resistencia propuesto para la construcción de la plataforma.

Durante la investigación se realizaron varias mezclas diferentes, tabla 3.7, pero únicamente se mencionará las dos mezclas que lograron mantener la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad del CAR.

El cemento utilizado fué el HS 65, el cual se diseñó para aplicaciones costafuera, este se caracteriza por un alto contenido de C₂S, un contenido medio de C₃A y un bajo contenido de álcali. El contenido de microsilica varió de 2.9 a 3.5 % peso del cemento.

La arena natural de tipo glaciofluvial bien graduada 0-5 mm con partículas de granito consistentes, caracterizada por una continua graduación cóncava ligera que proporciona baja demanda de agua y excelente estabilidad del concreto.

El agregado de cuarzo natural se substituye por un agregado de cuarzo diorítico con un módulo de elasticidad de 70 MPa.

El APL fue una arcilla expandida granulada (Leca 800), la cual fue producida para el uso de CARAPL, la idea original radicó en saturar los agregados de peso ligero antes del mezclado para prevenir la absorción del agua de mezclado durante el mezclado y la colocación, permitiendo de ésta manera la aplicación de la presión del bombeo. En las pruebas de laboratorio todos APL fueron presaturados excepto la mezcla MND50kd, la cual fue mezclada con los agregados secos.

La densidad de las partículas es aproximadamente de $1,500 \text{ kg/m}^3$ y en una hora, la absorción de agua fué de 7-8% en peso.

El aditivo superplastificante utilizado en la mezcla fue a base de naftaleno Mighty 150.

MND50	420	12	0.38	164	911	455	132	108	7	2,260	70.8
MND50kd	434	14	0.36	178	911	455	132	108	7	2,330	84.8

Tabla 3.7 Mezcla de Concreto en la Troll GBS.^(3.19)

3.3.4. Mezcla para 100 MPa

En 1991 Zhang y Gjorv^(3.12), realizaron una investigación para poder obtener un CARAPL con una resistencia a la compresión de 100 MPa y una densidad de $1,850 \text{ kg/m}^3$, es importante mencionar que esta fue una prueba en laboratorio y no una aplicación para un proyecto determinado y que lo trascendental es el ahorro de carga muerta, ya que si consideramos los $2,400 \text{ kg/m}^3$ del concreto normal ahorraríamos 550 kg/m^3 , o sea el 23 % de carga muerta de la estructura.

1	600	60	0.28	1:1.02:1.92	46.8	98.8	102.4	109.6	1,865	1,735
2	500	50	0.34	1:1.46:2.30	39.4	84.2	91.8	98.8	1,835	1,690
3	400	40	0.43	1:2.15:2.88	33.5	77.3	93.4	96.0	1,750	1,645
4	500	50	0.36	1:1.46:2.30	0	87.2	98.0	104.8	1,800	1,635
5	500	50	0.44	1:1.46:2.30	0	76.8	88.4	90.4	1,880	1,710

Tabla 3.8 Mezclas para CARAPL.^(3.10)

En este estudio se utilizaron cinco tipos de agregados utilizados en 9 mezclas diferentes, mencionaremos las mezclas más representativas que alcanzaron las mayores resistencias, tabla 3.8. Los agregados incluyeron cuatro diferentes tipos de arcilla expandida y un tipo de fly ash sinterizado, el contenido de cemento varió de 600 a 40 kg/m^3 de concreto, se dosificó silica fume en 9% del contenido de cemento, la relación $a/(c+s)$ varió de 0.28 a 0.44 donde "a" es el contenido total de agua en la mezcla. En las primeras tres mezclas se utilizo un 40% del agregado fino que se remplazó por

arena natural y el agregado de cuarzo de peso ligero se utilizó en todas las mezclas. El cemento que se utilizó fue portland de alta resistencia con silica fume, en todas las muestras se incluyó el 4% de agente dispersante de base-naftaleno y retardante carboxílico e hidroxílico por peso del material cementante. Arena natural en dos fracciones, de 0 a 0.5 y 0.5 a 2 mm se usaron en combinación de los cinco diferentes tipos de agregados. El tamaño del agregado máximo fue de 8 mm para todas las mezclas. Todos los agregados de peso ligero se secaron a 105 °C a peso constante antes de ser utilizados.

Para evitar la pérdida del revenimiento en las primeras etapas, el agregado de cuarzo se premezcló con aproximadamente la mitad de la cantidad total de la mezcla durante 10 minutos, después se incluyó el cemento, silica fume y el agregado fino junto con el resto del agua, el agente dispersante y el retardante por otros 5 minutos, el revenimiento de todas las mezclas tuvo un rango de 23.5 a 27.5 cm.

El módulo de elasticidad del concreto es principalmente afectado por la dureza y el volumen de los agregados y la liga entre la pasta y el agregado. Los agregados utilizados en esta investigación tuvieron un rango de elasticidad de 10 a 20 GPa, mientras que los agregados de caliza variaron de 35 a 95 GPa. Para varias pruebas de concreto los Códigos Noruegos tienen una buena predicción aplicando las fórmulas para los concretos con resistencia a la compresión arriba de 85 MPa, mientras que el Código del ACI tiene una sobre estimación de estas propiedades, esto se debe a que el ACI aplica solamente a concretos con resistencias aproximadas de 40 MPa.

3.4. Construcción

Existe la percepción en la industria costafuera de que el concreto utilizado en las plataformas costafuera es especial y que requiere de una tecnología más desarrollada que las prácticas comunes para la construcción de concreto^(3,20). No hay algo especial en la aplicación de mezclas, transporte, consolidación y curado del concreto si son proporcionadas adecuadamente. Algunas veces se requieren de diferentes valores en las relaciones a/c, contenido de cemento y recubrimiento de varillas entre otros para mejorar el rendimiento del concreto en las estructuras expuestas al ambiente marino. En general, las prácticas recomendadas para la fabricación de concreto incluyendo la selección de material y el proporcionamiento de mezclas, que existen en varios reglamentos de construcción, especificaciones, y prácticas de diversos países son suficientes para el uso de la industria del concreto costafuera, lo único que se debe de cumplir es que estas especificaciones se apliquen y se hagan reales, que se desarrollen con un alto grado de calidad para que garanticen una estructura óptima y funcional.

La mayoría de las plataformas del Mar del Norte han sido construidas utilizando diversos métodos de construcción, debemos mencionar que la aplicación única de un sólo método es difícil y que la

combinación de ellos ha sido lo más aconsejable según su etapa de construcción, por ejemplo el slipforming, jump formed, los elementos prefabricados y el pre y post tensado.

El concreto se puede vaciar por medio de bombeo, plumas, banda transportadora, carretillas o pequeños carros de transporte, los sistemas de distribución sofisticada generalmente no son necesarios. La distribución del concreto en el slipform se realiza con carretilla. La consolidación eficiente del concreto es esencial, el equipo y los procedimientos para realizarlo son los adecuados para aplicarlos en las estructuras costafuera.

Los espesores normales que se manejan son del orden de 50 a 60 cm., sin embargo se han llegado a manejar paredes de ancho hasta los 180 cm., el control de la temperatura del concreto en estos muros es esencial para limitar los problemas por agrietamiento térmico. La densidad del refuerzo por lo general es del orden de 400 kg/m^3 , pero existen áreas extremas donde se alcanza los $1,100 \text{ kg/m}^3$, el proporcionamiento del concreto y los métodos de consolidación pueden ser adaptados para asegurar que el acero de refuerzo quede completamente protegido por el concreto. El presfuerzo se usa también en la estructura, esto es para asegurar la hermeticidad de la estructura de concreto.

3.4.1. Trabajabilidad

La facilidad de colocar, consolidar y dar un acabado al concreto recién mezclado se denomina trabajabilidad, el concreto debe ser trabajable pero no se debe segregar ni sangrar excesivamente, el sangrado es la migración del agua hacia la superficie del concreto recién mezclado provocada por el asentamiento de los materiales sólidos, cemento, arena y grava ^(3.21). El asentamiento es consecuencia del efecto combinado de la vibración y de la gravedad.

Un sangrado excesivo aumenta la relación a/c cerca de la superficie superior, dando como resultado una capa superior débil de baja durabilidad, particularmente si se llevan a cabo las operaciones de acabado mientras está presente el agua de sangrado. Debido a la tendencia del concreto recién mezclado a segregarse y sangrar, es importante transportar y colocar cada carga lo más cerca posible de su posición final. El aire incluido mejora la trabajabilidad y reduce la tendencia del concreto fresco de segregarse y sangrar.

La ceniza volante, la escoria molida y muchos materiales inertes generalmente mejoran la trabajabilidad de los concretos de igual resistencia y revenimiento, el humo de sílice podría reducir la trabajabilidad, por eso normalmente se agregan reductores de agua de alto rango a los concretos con humo de sílice para mantener la trabajabilidad.

Los concretos en los que se emplean ceniza volante o sílica fume por lo general muestran menos segregación y sangrado que los concretos simples, este efecto hace a la ceniza volante particularmente valiosa en los concretos fabricados con agregados que presenten deficiencias en su contenido de finos. Los concretos que utilizan ciertas escorias granulares molidas de alto horno, tienden a presentar sangrados ligeramente mayores que los concretos sin aditivo, las escorias no tienen efectos adversos en la segregación.

La trabajabilidad de un concreto es la capacidad de fluidez o deformabilidad y la resistencia a la segregación que es afectada por la viscosidad, estas son las propiedades principales para poder obtener una buena capacidad de relleno^(3 22). La fluidez generalmente se mide con el revenimiento o por la fluidez del revenimiento, y se define este último como el diámetro promedio de la muestra de concreto después de la prueba de revenimiento, pero aún no se ha establecido como estimar la resistencia a la segregación, que es el medio de separación del mortero y el agregado.

Para obtener gran fluidez, se debe incrementar el contenido de agua o la dosificación del agente reductor de agua o superplastificante, pero la dosificación excesiva de superplastificante causa una demora del tiempo de fraguado o un desarrollo menor de resistencia temprana, la fluidez del concreto se puede cambiar considerablemente, cuando se reemplaza parcialmente cemento portland por fly ash o por escoria de horno granulada.

Cuando la viscosidad es suficientemente alta mantiene un flujo estable, el flujo bajo en su proporción indica una alta resistencia a la segregación, pero cuando la viscosidad es muy baja será incapaz de mantener un flujo estable, las proporciones bajas y las variaciones grandes indican segregaciones de mortero y agregados. Así, la resistencia a la segregación cuando el concreto pasa a través del refuerzo se puede observar que es afectada por la viscosidad del mortero y el volumen del agregado. En consecuencia la capacidad de relleno del concreto al pasar entre muchas varillas de refuerzo, se puede afectar por la fluidez, viscosidad y el volumen de agregado. Mucha resistencia a la segregación no es siempre necesaria para un concreto super trabajable, como puede resistir un flujo suave y una proporción de flujo seriamente bajo. En otras palabras, un rango apropiado de la resistencia a la segregación de la mezcla puede existir de acuerdo con el espacio entre las varillas del refuerzo o las condiciones de operación.

Es posible controlar la viscosidad del concreto trabajable con el uso de diferentes tipos, formas y finesa del cementante sin afectar la fluidez.

Cuando el volumen de cementante es suficiente para obtener una buena resistencia a la segregación, este no se puede mantener para reducir el calor de hidratación, sin embargo se pueden utilizar polvos inactivos como el polvo de caliza reemplazando al cemento. La resistencia a la segregación no cambia cuando el fly ash es total o parcialmente reemplazado por polvo de caliza, en este caso, formas diferentes en las partículas no influyen prácticamente sobre la resistencia a la segregación.

Como se ha mencionado es muy importante el control y la calidad del concreto trabajable, especialmente la fluidez y la resistencia a la segregación, así como los agregados y las propiedades de otros materiales que pueden variar, o la temperatura puede cambiar.

3.4.2. Vaciado

La densidad del acero de refuerzo y el vaciado que se tiene que realizar a grandes alturas, hacen que este trabajo se tenga que elaborar parcialmente a ciegas, por que es imposible ver directamente si el

concreto ha sido colocado correctamente en el fondo de los muros, por lo tanto las instrucciones detalladas en los métodos de construcción se deben realizar antes de la colocación del concreto ^(3.23). En los muros más densamente reforzados, las varillas de refuerzo y el acero de presfuerzo tienden a evitar que el concreto y los vibradores lleguen hasta los lugares más congestionados, este problema se solucionó colocando tuberías verticales de plástico desde el fondo del colado evitando las redes de refuerzo, esto asegura que el concreto y los vibradores puedan llegar hasta estas localizaciones, así en los sitios más densamente reforzados se utilizaron tres métodos para asegurar que el concreto sea colocado con éxito.

- ◆ Algunas de estas tuberías de plástico que se localizan a cada 2.5 m al centro del muro, son reemplazadas por tubería de acero de 75 mm hasta el fondo del relleno. El concreto el cual es bombeado a través de dos bombas con 32 m de radio se vacía con la ayuda de estas tuberías, las mangueras de 4" de diámetro se conectan a la tubería por medio de coplees. Hasta que el concreto llegue al límite superior de la cimbra la parte de tubería de acero se reemplaza por una más corta para evitar daños al concreto en longitudes menores de 1.5 m
- ◆ Pequeñas pilastras de 14 cm. de ancho por 6 cm. de espesor se colocan a los lados de los muros para colar el concreto por el área de recubrimiento, este método es utilizado en pocas áreas con la consideración de que el peso del concreto tenga que ser minimizado.
- ◆ La densidad del refuerzo y la presencia de los conductos horizontales de presfuerzo hacen que el primer método sea imposible de aplicar, por lo que el concreto tiene que colocarse a través de orificios a los lados de la cimbra, también la vibración del concreto es extremadamente difícil, pero es muy importante que se realice la vibración del concreto que se vacía en el fondo de la cimbra para que la estructura pueda tener una buena unión impermeable entre el concreto viejo y el nuevo. Para garantizar una adecuada compactación se emplean dos métodos. Primero la utilización de vibradores internos con alta frecuencia y bajo voltaje de 30, 40, 50 y 60 mm de diámetro colocados en el concreto a través de los espacios en el refuerzo que deja la salida de la tubería de plástico, estos sitios son marcados con cinta adherida al refuerzo en donde la tubería de plástico se extrae, la inmersión entre los vibradores será según su zona de influencia. Segundo se utilizan vibradores externos que se colocan en la cimbra, estos vibradores son utilizados en la industria de prefabricados y tiene la ventaja de que se pueden montar y desmontar rápidamente.

Para asegurar que el concreto pueda ser colocado y vibrado adecuadamente, la mezcla de concreto es una parte principal en este proceso.

En esta plataforma el tamaño del agregado de cuarzo fué minimizado para ayudar al flujo dentro de los espacios pequeños y el aire se adicionó para mejorar la fluidez y la bombeabilidad. Como una preparación final para ayudar a la colocación del concreto, se realizaron varias reuniones de pre-colocación, estas reuniones diarias se realizaron entre ingenieros de QA/QC y la construcción, con el propósito de asegurar que la información más reciente se utilizara, y que las dudas se resolvieran. Un día antes de la colocación, dos reuniones se llevan a cabo con todo el personal de turno, donde se les

informa sobre los métodos y secuencia que se aplicará, la localización y altura de los colados y el método de vibrado que se empleará.

3.4.3. Varillas con cabeza en "T"

En las áreas saturadas por el acero de refuerzo también se colocan otros tipos de accesorios, placas, tubería y conductos para el presfuerzo, estas áreas demandan un gran cuidado por parte de los trabajadores, un caso especial es el habilitado y los detalles del refuerzo transversal como son los estribos^(3.24).

El uso de estribos convencionales ocasiona en la cimbra problemas por el dobléz de las varillas principalmente cuando se requieren grandes porcentajes de acero transversal, figura 3.3.^(3.25)

- ◆ Primero por que el tamaño de las varillas se limita por el radio de dobléz permisible, así cuando se requieren grandes cantidades, la única solución puede ser la colocación de paquetes con dos o tres varillas,
- ◆ Segundo para proporcionar una ductilidad máxima, los extremos se pueden meter hacia el núcleo del elemento, de otro modo la falla podrá ocurrir prematuramente por la abertura de los estribos provocando el desprendimiento del recubrimiento,
- ◆ Tercero el modo de falla del estribo es limitado por el dobléz, por lo tanto las varillas de los estribos desarrollan solamente el 70 % de la falla a la ruptura,
- ◆ Cuarto el dobléz del estribo es difícil además de que consume más tiempo para su fabricación, finalmente el exceso de varillas hace difícil la colocación y vibrado del concreto.

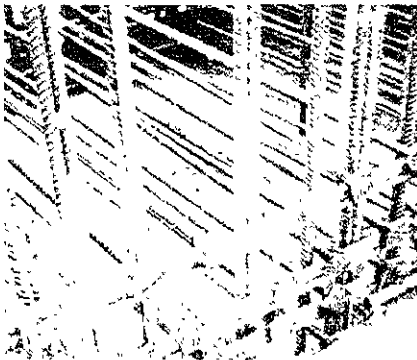


Fig. 3.3 Varillas con Cabeza en "T".^(3.25)

Todos estos factores y puntos de consideración permitieron desarrollar una más eficiente y efectiva forma para confinar y colocar acero de refuerzo transversal.

Estos estribos estándar se pueden remplazar fácilmente, por medio varillas con cabeza en "T", que es una varilla de refuerzo anclada mecánicamente por una placa soldada en el extremo de la varilla. La ventaja de estos elementos para la construcción en el sitio son:

El extremo de la placa requiere menos lugar comparado con los ganchos de los estribos estándar, es más fácil colocarlo entre el sistema de malla del refuerzo debido a su limitado dobléz, los estribos estándar se usan con un diámetro de 12 mm, sin embargo las varillas con cabeza en "T" se pueden producir con diámetros de 25 mm o mayores, lo que representa en economía por este remplazo ya que la cabeza "T" de 25 mm de diámetro reemplaza a cuatro estribos de 12 mm de diámetro.

La placa extrema se fija a la varilla por soldadura de fricción, esta es una técnica de producción en la cual la placa gira y con presión de contacto con la varilla de unión se produce calor con la superficie de revestimiento, la soldadura se completa con fuerza de forja después de alcanzar suficiente calor. La soldadura de fricción es por lo tanto un proceso de forjado con un calentamiento local a una temperatura moderada, después de un calentamiento mayor la temperatura afecta al material, el cual se estira y forma un anillo de material.

Estos elementos desarrollan una gran ductilidad en el área de soldadura y una capacidad de carga de soporte igual a las varillas rectas, estos elementos en la zona de soldadura resisten un dobléz de tres diámetros a más de 90° sin presentar grietas visibles, estas pruebas demuestran que en caso de pura tensión estos elementos no presentan falla en el área de soldadura sino en la longitud libre de la varilla, las propiedades de soporte de carga se han investigado bajo carga estática y dinámica en orden para establecer la información requerida para su aplicación a las estructuras de concreto costa afuera.

Se han realizado análisis de elemento finito no lineal dando como resultado una capacidad mayor de 1 a 8 para especímenes con varillas con cabeza en "T", debido a su gran ductilidad en el confinamiento del concreto. Estos resultados muestran una gran cantidad de energía de absorción y que pueden disipar la energía por el impacto de objetos o por sismo, el costo del material de las varillas con cabeza en "T" al parecer pueden ser el mismo para un número equivalente de estribos doblados, desde el último que tiene largos ganchos y que son 70 % eficientes, sin embargo el costo de colocación de uno que reemplaza a seis es muy atractivo.

3.4.4. Juntas de Construcción

Las juntas de construcción se crean cuando existe un motivo para suspender el colado del concreto fresco; los motivos pueden ser de carácter fortuito o por procedimientos de construcción, los motivos fortuitos pueden ser: que se terminen los agregados o materiales, que se descomponga el equipo de fabricación de concreto, que el concreto no llegue a tiempo, que se presenten factores ambientales impidiendo el proceso de colado suspendiéndolo por grandes lapsos de tiempo; por procedimientos de construcción: se puede suspender el colado al terminar la jornada de trabajo o al terminar el ancho de colado programado ^(3.26).

En la construcción de las grandes estructuras costa fuera estos puntos mencionados se evitan por medio de una planeación anticipada como se mencionó anteriormente durante la colocación del

concreto, que prevé los problemas eventuales que se puedan presentar durante el colado ya que se tiene que realizar de un modo continuo y eficiente.

Si sólo ha transcurrido un tiempo corto entre colados sucesivos que deban estar bien adheridos, no es necesario preparar la superficie de contacto del concreto más viejo si la superficie está limpia y húmeda, pero no mojada. Si el concreto fresco no está sucio, seco o cubierto con una capa de lechada, el concreto nuevo puede adherirse adecuadamente vibrándolo perfectamente sobre el área de contacto. Obviamente, mientras más pronto se coloque el colado subsecuente, son mejores las probabilidades de lograr una adherencia satisfactoria.

El requisito esencial para las juntas de construcción en concreto más viejo es que estén limpias y que el agregado no se afloje ni que los bordes sean quebradizos. La limpieza por medio de chorro de aire y agua o cepillado puede hacerse mientras el concreto esté todavía lo suficientemente blando de modo que pueda removerse la parte superficial del concreto, después se debe de mantener la superficie húmeda hasta que llegue el nuevo colado o de lo contrario estas superficies se ensucian para cuando se quiera continuar el colado que únicamente con un sopleteado con arena o agua a muy alta presión se puede limpiar, pensando en la economía esta operación se deberá hacer justo antes del colado.

Una práctica que recomienda el ACI 311-92 en la mezcla del concreto nuevo, es que si el agregado que se utilizará es de tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ ", se aumentará el contenido de cemento en las primeras dosificaciones y más agua suficiente para hacer un revenimiento mayor en una capa de aproximadamente 15 cm. en varios puntos de la superficie, cuando la primera capa de concreto con mezcla normal se coloque sobre esta mezcla de comienzo, se vibrará perfectamente ambas capas asegurando que los vibradores penetren cada vez hasta el fondo duro. Si la superficie de la junta esta limpia, el método de la mezcla inicial es igual de efectiva en cuanto a la adherencia y evita las posibles concentraciones de concreto y los problemas causados por la interrupción de la operación de colado del concreto.

Si el mortero del concreto esta bien vibrado en las superficies verticales o muy inclinadas, generalmente se considera que es suficiente. Sin embargo, si se requiere una fuerte adherencia, primero debe sopletearse con arena la superficie del concreto viejo cuando sea accesible antes del montaje de la cimbra. Más tarde, a medida que se coloca el concreto, puede vibrarse muy bien contra la junta, puesto que las áreas superiores de una junta vertical se debilitan por sangrado por lo que hay que vibrar el concreto en la junta profundamente hasta que el vibrador penetre por su propio peso.

En el ACI-357R-84 ^(3 27) especifica que las juntas de construcción deben prepararse con extremo cuidado principalmente en donde la estructura necesite de impermeabilidad y en los lugares que se diseñaron para almacenar petróleo o gas, requerimiento que se debe cumplir de forma permanente principalmente durante el remolque y la instalación de la estructura, cuando las juntas de construcción se hayan especificado requieran que se garantice su impermeabilidad.

La superficie de contacto se deberá de limpiar y preparar cuidadosamente por medio de arena abrasiva o presión de agua y exponer el agregado, después se podrá utilizar resina epóxica para que sirva de unión antes de que se utilice el nuevo concreto. Esta propuesta puede considerarse que es otra alternativa para las juntas de construcción.

La generación de calor causada por la hidratación del cemento se debe de evaluar para secciones delgadas de concreto para controlar el agrietamiento bajo varias consideraciones de cambio de volumen y restricciones.

Los gradientes térmicos se pueden minimizar aislando la cimbra y las superficies de concreto controlando la pérdida de calor de la sección y por medio de la extracción de calor con conductos de agua fría, estos métodos se deberán utilizar hasta que la temperatura interna se estabilice con niveles aceptables.

3.4.5. Slipforming

Slipforming (cimbra deslizante) es diferente a la cimbra convencional por que los paneles de la cimbra se mueven semi continuamente con relación a la superficie de contacto del concreto que se empezó a formar y al tirante de la cimbra que ya se utilizó ^(3.28). Este procedimiento ayuda a reducir sustancialmente los costos de la cimbra en estructuras que tenga una sección constante y una altura considerable.

El sistema lo integran cinco elementos básicos: cimbra o panel, largueros, estribos, gatos hidráulicos y plataformas.

El slipforming se mueve por medio de gatos hidráulicos, los cuales se elevan sobre barras o tubos verticales que permanecen enterrados en el concreto, los gatos se localizan en la parte superior, en la parte baja de la U invertida de acero que se ensambla con los estribos. El slipforming se sujeta a las piernas de los estribos; las ménsulas de los andamios y las plataformas de trabajo juntas se sujetan sobre el larguero. Los estribos resisten hidrostáticamente la presión del concreto y transmiten la carga vertical de los andamios y plataformas de trabajo a los gatos.

El slipforming tiene tres plataformas en tres niveles diferentes, figura 3.4. La plataforma en el nivel alto se utiliza para colocar el refuerzo vertical, los gatos de rosca y distribuir y colocar el concreto,

El concreto es bombeado desde el piso de trabajo hasta la plataforma superior a una elevación de 20 m, por medio de inyección a lo largo de una línea de bombeo por arriba de los 4 m³ hasta donde se localizan las tolvas, cerca de la tolva la línea de bombeo contiene una unión en V con una válvula para que el concreto se pueda vaciar directamente en cualquier tolva que requiera de llenado, una cámara de circuito cerrado monitorea el nivel del concreto en la tolva. El concreto se distribuye por buggies especialmente diseñados por medio de canaletas.

La plataforma de trabajo es usada para la colocación del refuerzo horizontal, vibración del concreto, formación de juntas de construcción y colocación de accesorios empotrados, camisas, etc. El acero de refuerzo se selecciona, etiqueta y carga a un remolque para una zona particular del muro, donde se

sube a la plataforma de trabajo, los estribos en contra de los cuales los gatos empujan para elevar la cimbra, están localizados 85 cm. sobre la plataforma de trabajo, para que el refuerzo horizontal no pueda ser colocado arriba de esta elevación, se utilizan espaciadores para que el refuerzo pueda ser colocado exactamente y así asegurar el recubrimiento exacto, por último en estas plataformas se colocan dibujos para proporcionar un ilustración de fácil entendimiento para la instalación del refuerzo. La cubierta inferior se utiliza para el curado y acabado del concreto endurecido que en este nivel por lo regular requiere de reparaciones menores, las placas empotradas se limpian, las juntas verticales de construcción se descimbran y cortan en fresco, posteriormente se aplica un componente para el curado del concreto.

Una vez que el sistema vertical del slipforming se pone en marcha, la cimbra se debe de llenar en capas uniformes de 20 cm. de espesor dentro de los 20 cm. de la parte alta, la cantidad de concreto endurecido en la cimbra debe ser de 30 cm. desde el fondo, la proporción del concreto endurecido es controlada por la cantidad de aditivo retardante en la mezcla, el tiempo de fraguado del concreto depende de la temperatura del concreto cuando se esta colocando y de la temperatura ambiente.

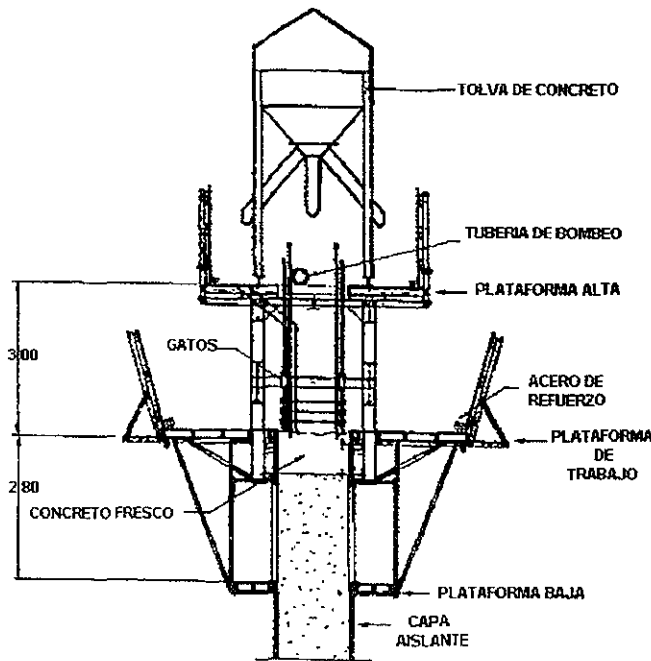


Fig. 3.4 Slipforming (Cimbra Deslizante).^(3,23)

La cantidad del acero de refuerzo es tan elevada que su colocación debe tener un programa de control, por ejemplo, en los muros de una plataforma pueden existir siete capas de refuerzo en una cara, cuatro horizontales y tres verticales del # 8 al 11 frecuentemente en pares y unidas por coplees en lugar de traslapes. También se utilizan varillas con cabeza en "T" como refuerzo al corte en la

sección transversal del muro, las tolerancias son tan pequeñas para asegurar que las varillas queden perfectamente niveladas verticalmente como horizontalmente. Las varillas verticales y los tirantes horizontales de columnas se pueden colocar a través del concreto fresco durante el avance de la cimbra. Sin embargo, las varillas horizontales no se pueden colocar hasta que la sección transversal de los estribos se eleve sobre el acero de refuerzo.

La velocidad de elevación de la cimbra esta en función de: la rapidez de colocación del concreto, de las varillas horizontales y de los detalles de instalaciones. La velocidad de colocación del concreto esta en función del: ambiente, temperatura del concreto, humedad relativa, ventilación, tipo y cantidad de cemento y revenimiento. Para ayudar al vaciado del concreto se utilizan aditivos retardantes y acelerantes.

Grandes progresos se han realizado durante los últimos 15 años en los sistemas de slipforming, que benefician principalmente a los detalles y a los procedimientos de operación. Uno de estos adelantos es el desarrollo de una mayor capacidad de los estribos, lo que permite obtener mayor espacio entre estribos para la colocación de detalles e instalaciones en la estructura, los espacios entre los estribos ahora llegan hasta los 6.50 m. La colocación de menos estribos permite disminuir la interferencia en la colocación de varillas, permitiendo a los trabajadores la colocación prehabilitada de varillas en la cimbra. Esta mayor capacidad también permite incrementar los claros libres permitiendo colocar varillas sin que se les doble, aumenta el tiempo para realizar el detalle del armado del acero de refuerzo antes de que se realice el colado de la siguiente capa.

La construcción con slipforming requiere que sus movimientos tengan una gran precisión tanto horizontal como verticalmente, respetando los niveles que se especifican. Actualmente esta actividad se realiza más económicamente debido al uso de instrumentos topográficos con tecnología láser que tienen una gran precisión para guiar el proceso de deslizamiento de la cimbra. Estos instrumentos no solamente se utilizan para la cimbra si no también para guiar la verticalidad y checar la torsión de la estructura.

Los materiales de tipo plásticos y otros materiales con superficie lisa reducen la fricción entre el movimiento de la cimbra y el concreto y proporcionan un acabado más fino, además el concreto no se adhiere a la superficie de la cimbra con este tipo de recubrimiento plástico. Esto previene la formación de pequeñas cantidades de concreto endurecido en la parte del fondo de la cimbra, lo que puede crear pliegues en el concreto fresco cuando se desliza el slipforming en la estructura.

El concreto que se utilizó en la plataforma Hibernia, tuvo una alta rango de fluidez con revenimientos de 22 cm. y tiempo de fraguado inicial de 12 hrs, bajo este esquema se puede apreciar que la presión lateral sobre la cimbra es muy alta y la cual se considerada como una carga líquida. La proporción de la colocación del concreto fue de 30 cm. por hora, realizando la colocación completa en 10 horas que es menor que el tiempo de fraguado del concreto. Se encontró que la presión máxima del concreto fue de 4.1 ton/m² que se alcanzó después de 4 horas cuando la altura del concreto fue de 1.83 m, la cual fue muy cercana a la presión que especifica el ACI 347 por medio de su fórmula para muros, aunque esto no es válido para concretos superplastificantes, sirve como referencia.

La cimbra fue construida con madera contrachapa de alta resistencia, con pies derechos de madera horizontales y contrafuertes verticales que fueron prefabricados con estructuras ligeras de acero, estas cimbras fueron prefabricadas dentro de los paneles y colocadas en su lugar después de que el acero de refuerzo se colocó, porque debido a los pequeños espacios en varias celdas la instalación frecuentemente se dificultó. El fondo de 30 cm. de la madera contrachapa se dejó fuera del molde y colocada después para permitir cualquier escombros desde el final de la limpieza que puede ser removido desde el fondo del molde.

3.4.6. Método Tremie

El principio de este método es llevar el concreto a través de una tubería al interior del concreto que se está colando para de esta manera prevenir el contacto con el agua circulante, antes de que el concreto se vierta dentro del tubo tremie, un tapón que mantiene al concreto separado por el agua que está colocado en la tubería ^(3.29). Cuando el primer concreto que es más bien un primer tapón alcanza el fondo, la tubería se llena, hasta que el concreto fluye hacia afuera, el concreto es continuamente alimentado por la tubería tremie a través de tolvas y la tubería que se llenan hasta la elevación de los niveles de concreto especificados.

Este método tiene mayor aplicación en el vaciado de moldes de forma regular, en las estructuras de planos horizontalmente grandes normalmente no es aplicable este método, debido a que el número de salidas será mayor que la cantidad de concreto colado. Este método es particularmente adaptado para el vaciado de grandes volúmenes de tipo angosto, como son las pilas de grandes diámetros.

Como una guía para la colocación submarina del concreto por el método tremie, es considerar que el volumen que se concentrara debe tener un área de sección transversal de no más de 23.2 m² para cada tubería tremie que se utiliza simultáneamente. La distancia horizontal máxima desde la tubería tremie a cualquier parte de la mezcla no debe exceder los 3.0 metros, y la dimensión horizontal mayor de la mezcla no debe ser menor de que 4.57 m.

Al inicio del vaciado, se deben tomar precauciones para prevenir la mezcla de agua y concreto en la tubería tremie, en el primer vaciado es aconsejable mayor contenido de cemento en la mezcla, durante el proceso de vaciado la tubería tremie se debe sumergir 90 cm. en el concreto, si la tubería accidentalmente se mueve del concreto, el concreto en contacto con el agua se puede remover por la superficie del concreto antes de la continuación del proceso. La planta de mezclado puede ser fiable y con suficiente capacidad para proporcionar concreto. El flujo del concreto no debe ser interrumpido, por periodos largos de tiempo, en el caso de que sea importante que la estructura sea monolítica, se debe de disponer de un sobrante de mezcla, si el vaciado en seco está hecho después del bombeo en seco, el concreto superficial se debe eliminar o tratar de limpiar, durante el vaciado la superficie del concreto no se debe exponer al flujo de agua, y no debe existir ninguna diferencia en elevación del agua adentro a fuera del molde

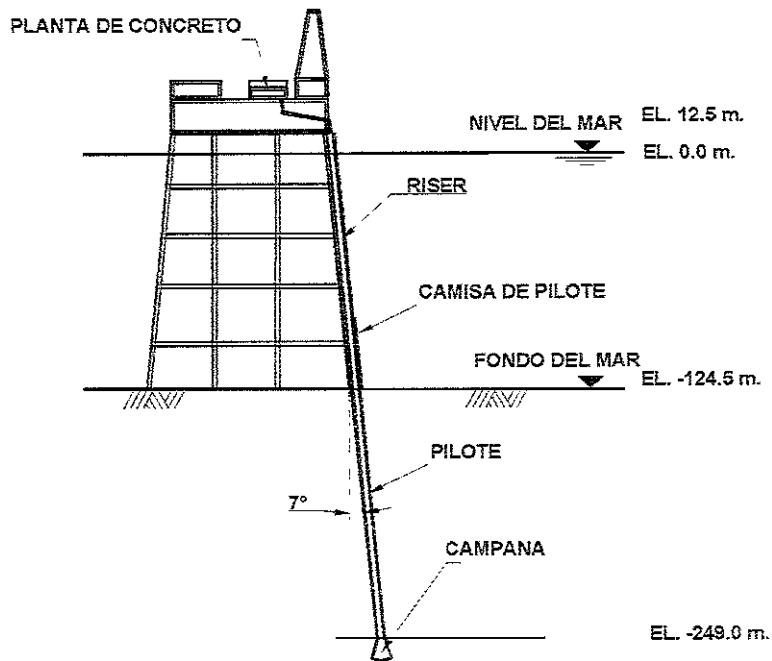


Fig. 3.5 Método Tremie a 260 m. de Profundidad.^(3.30)

En la referencia 3.30 se menciona la colocación de concreto a 260 m de profundidad utilizando el método tremie para la rehabilitación de la cimentación en la plataforma North Rankin A, figura 3.5. Esta gran experiencia demostró la eficiencia de este método no obstante sus grandes limitaciones. Se utilizó gran cantidad de aditivo plastificante para poder reducir el contenido de agua de la mezcla, incrementar la fluidez, reducir el esfuerzo cortante del flujo y aumentar el tiempo de fraguado, el bajo contenido de agua permite dirigirse a altas resistencias, mientras la fluidez aumenta y la baja resistencia al corte proporcionada por el plastificante permite al concreto fluir a través de la red de acero y consolidarse, también se busca que el tiempo de fraguado sea largo entre 8 a 12 horas para facilitar las operaciones costafuera, donde las demoras y accidentes ocurren frecuentemente.

Cemento	156	
Blast Furnace Slag	444	± 32
Microsilica Fume	32	
Agregado Fino	750	± 40
Cuarzo de 7 mm	745	
Plastificante	1.8	± 0.1
Agua de Mar	209	± 10

Cemento tipo C australiano de bajo calor de hidratación

Tabla 3.9 Mezcla de Diseño.^(3.30)

La mezcla de diseño se busco que fuera fluida y cohesiva (tabla 3.9), con muy pequeña tendencia a segregar. La segregación es una importante consideración que se debe de evitar en la colocación del concreto tremie.

El bloqueo de la línea de vaciado debido a la segregación del agregado arquea contra el muro interior de la línea de vaciado, arrastra al material cementante cuando el concreto entra primero al agua por la línea tremie, el fluido subsecuente se interrumpe, obteniendo un concreto heterogéneo dentro de la campana, con la perdida consecuyente de resistencia y el inicio de grietas.

Aquí se coloco el concreto a una gran profundidad con la necesidad de asegurar una alta calidad con una evaluación cuidadosa del proceso de vaciado. El ángulo vertical de inclinación de la tubería tremie fue de 7° la cual forma una garganta de aire a lo largo de la parte alta de la primer tubería, cercana a su entrada, permitiendo entrar y salir al aire para acomodar las oscilaciones en el flujo de concreto. Para comprender como este ángulo ayuda al vaciado del concreto es preciso considerar como el flujo del concreto cae en la tubería tremie iniciando, desarrollando y teniendo un equilibrio, cuando el flujo inicia con vaciado por gravedad, primero se coloca un tapón en la tubería que es presionado por el concreto arriba de él, el peso del concreto es mayor que la presión hidrostática del agua debajo el tapón y la fricción superficial de las paredes de la tubería, de esta manera el flujo se mueve relativamente lento, entonces la aceleración se incrementa aumentando la fricción y la velocidad, si el ritmo al cual el bombeo es suministrado el concreto es menor que la velocidad de equilibrio. Eventualmente se formara una garganta de aire en la entrada de la tubería, en esta condición la garganta de aire se extenderá abajo de la tubería a un nivel donde arriba de este nivel el concreto se mueve relativamente rápido debido a la reducción de la superficie de fricción causada por la garganta de aire y por debajo el cual el concreto se mueve lentamente debido a la gran superficie de fricción de toda la tubería y la resistencia de la presión hidrostática del agua exterior, estos niveles de transición se pueden mover hacia arriba o abajo, la tubería puede aumentar o disminuir el ritmo de bombeo respectivamente, se ha notado que los diámetros pequeños de las tuberías incrementa la relación de la fricción superficial por volumen de concreto por unidad de tubería al punto donde se desee cerrar el sistema a la atmósfera y bombear el concreto hacia abajo las líneas en orden para mantener una flujo aceptable, para los diámetros menores se pude inyectar presión en la línea cerrada suministrada por bombas, sin embargo las velocidades de flujo del concreto requieren mantener una posible presión mayor en diámetros más grandes lo que no resulta práctico, para diámetros de tubería de 10 cm. y mayores es recomendable el uso de sistemas abiertos a la atmósfera, especialmente para vaciados a grandes profundidades.

Por lo general un vaciado tremie común es mucho más seguro que el bombeo hacia abajo del concreto por varias razones: Cuando esta abierto a la atmósfera, el nivel del concreto en la tubería se regula por si solo considerando la cabeza hidrostática exterior, la presión asociada con el bombeo puede incrementar la segregación del agregado por la pasta de cemento y tapar la línea de vaciado, cuando el bombeo es cerrado a la atmósfera, se forma un vacío dentro de la tubería, que permite al concreto caer rápidamente conforme este sea suministrado, la formación del vacío provoca que la

pasta de cemento se separe del agregado y cause que la línea se tape, la concentración por el bombeo del concreto perjudica el flujo del concreto e incrementa la tendencia al bloqueo de la línea, el bombeo incrementa la posibilidad de crear una sobrepresión en la campana y perjudicar la cavidad. El ángulo de inclinación de la catenaria de la línea de vaciado mientras flota facilitará el vaciado tremie por la inhabilitación de obstrucciones en la línea por el aire atrapado y acomodarse por el movimiento del barco, la experiencia que se obtuvo ha demostrado un número de aspectos de importancia para otras aplicaciones costafuera que incluyen: El concreto de alta resistencia se puede colocar en elementos delgados, con o sin refuerzo, sin mantener excesivos esfuerzos térmicos, el uso de concreto de alta resistencia minimiza la cantidad de concreto requerido vaciado costa afuera, el agua salada se puede usar en la mezcla para el concreto debido a la concentración reducida de oxígeno en el agua a grandes profundidades, esto elimina la necesidad de suministrar agua fresca costafuera, el concreto se puede colocar casi sobre superficies horizontales, sin agua de sangrado por debajo de la superficie, consecuentemente cualquier cimbra de acero suministrada se puede cerrar por arriba, el uso de aditivos como la microsilica inhibe el arrastre y la segregación, se debe de considerar que existen en el mercado otro tipo de aditivos reductores de segregación los cuales incorporan materiales como éter de celulosa, oxido de polietileno y goma natural, esto es muy efectivo para prevenir la segregación del concreto directamente expuesto al agua durante el vaciado.

3.5. Inspección

Este inciso nos ayudará a comprender por que se ha mencionado varias veces que es notable como las estructuras de concreto tienen un buen comportamiento en el Mar del Norte, ya que no han mostrado signos de deterioración, corrosión del acero de refuerzo o deficiencias en otros materiales en la zona sumergida y que la integridad de las plataformas nunca han estado en peligro ^(3.31). Los daños comunes observados son debido a impactos de barcos y objetos que ocasionan grietas de tipo local en el concreto, pero en general el número de reparaciones son muy pocas. Las manifestaciones por deterioro en los últimos años a disminuido significativamente debido al mejoramiento de los procedimientos administrativos, prácticas de diseño y construcción las cuales están dentro de la experiencia operacional para las plataformas recientes.

En los más de 20 años de experiencia en la inspección de las plataformas, el monitoreo se dirige hacia las condiciones que tienen mayor influencia a la deterioración. En las áreas extensas de la plataforma como los muros, la mayoría de las manifestaciones tienen su origen en las fases de diseño y construcción, dichas imperfecciones se han observado después de frecuentes inspecciones en la misma área.

Las plataformas diseñadas para 20 años de operación hoy se acercan al final de su vida útil, las inspecciones y las investigaciones teóricas se encaminan para confirmar la posibilidad de prolongar su vida útil más allá de la original, para algunas de estas estructuras una vida útil de 60 años es factible si

se realizan adecuaciones, como por ejemplo: la reestructuración de los ánodos sobre estructuras de acero secundarias, cuerpos estructurales, tuberías ascendentes conectadas a la estructura y reprogramar la inspección y el mantenimiento.

3.5.1. Recomendaciones Prácticas

En las referencias 3.27, 3.32 y 3.33 se mencionan los principales puntos que se deben considerar en la inspección de las estructuras de concreto costafuera. Después de más de 20 años de experiencia se puede argumentar que ya existen mejores prácticas que se llevan a cabo en la inspección costafuera y que se busca que sea formal en base a la experiencia adquirida.

La reglamentación oficial, establece estándares mínimos basados en el ambiente y consideraciones de seguridad del personal. Los propietarios y los operadores pueden adoptar prácticas de inspección que sean más rígidas que las impuestas por las autoridades gubernamentales para el control y prolongación de la vida útil de la instalación. De hecho las autoridades no especifican tal o cual medio para realizar la inspección sino nada más mencionan que la estructura debe de ser funcional y que garantice la seguridad, en resumen es el propietario y el operador el que establece la flexibilidad o rigidez de la inspección y los medios para poder realizar los programas, filosofía, control y sobre todo la tecnología que aplicará.

Existe una clasificación de los programas que se emplean en las instalaciones, planeados y no planeados. Las actividades planeadas se dirigen sobre bases periódicas y usualmente se requieren para mantener la certificación de la plataforma, estas actividades son normalmente definidas en programas de periodo largo implantadas por los propietarios y los organismos reglamentarios, estos programas describen la filosofía del propietario, objetivos y procedimientos donde se expresan la estrategia de la inspección, frecuencia, métodos y el plan preventivo de mantenimiento, estos datos requieren de la actualización durante la vida de la instalación e incluyen planes de contingencia para el manejo de situaciones de emergencia y actividades no planeadas.

Las actividades no planeadas se pueden requerir cuando se presenta un accidente, daño, deterioración no esperada, sobrecarga, condiciones de operación alterada o grandes modificaciones de la instalación, los procedimientos detallados para el manejo de las actividades no planeadas son de desarrollo necesario después del descubrimiento de un accidente y generalmente tiene que ser aprobado por las autoridades apropiadas, estas actividades pueden ser críticas si son dirigidas en respuesta a una situación de emergencia y pueden, sin embargo tener un impacto sobre el mantenimiento de la certificación y seguridad de la plataforma.

Los propietarios requieren mantener registros exactos de las actividades planeadas y no planeadas, una ayuda para esto es la adquisición de instrumentos que puedan monitorear las condiciones ambientales, cargas, presión de fluidos, condiciones de operación críticas, respuesta estructural y deterioración en general, la información en tiempo real es provechosa en la decisión de la realización de los procesos y en la detección de las incidencia de sobre cargas y condiciones para impedir sobrecargas Situaciones de emergencia que requieren respuestas no planeadas se benefician más

por datos cuantitativos sobre cargas y respuestas, registros de cargas fijas, peso de equipo, diseño significativo de acontecimientos, daño mayor y variaciones operacionales que pueden ser útiles en la regulación de requerimientos.

La inspección en servicio requiere del desarrollo de una estrategia de inspección que asegure oportunidades razonables de condiciones de detección que puedan afectar adversamente la seguridad estructural y proporcionar información necesaria para implementar un programa de mantenimiento preventivo, realizar una evaluación estructural y vigilancia de reparaciones existentes, la planeación de la estrategia de inspección se debe hacer durante la fase de diseño, una inspección estratégica se dirige a la identificación de áreas críticas susceptibles de deterioración y falla, condiciones ambientales críticas y cargas que requieren de atención, frecuencia de inspección, calidad, métodos y equipos. Se deben tener consideraciones especiales durante la fase de diseño, para la instrumentación y acceso a las áreas críticas que requieren inspección, el diseñador debe preparar un manual de inspección, que no sirva únicamente de guía sobre que, como y cuando inspeccionar, sino mencionar los diversos tipos de deterioro que se pueden presentar como el agrietamiento de áreas específicas de la estructura.

Con fines de certificación existen dos tipos de inspección una es la anual y la otra es la principal o general, como su nombre lo especifica el levantamiento anual se realiza cada año y consiste de una inspección visual de la estructura sobre el agua y una revisión de la información relevante para un ingeniero competente, en el segundo año la inspección se puede extender a las áreas bajo el agua.

La inspección principal se lleva durante el periodo de certificación y se desarrolla durante un año o se puede realizar en varios periodos por ejemplo un 20% cada año, en esta inspección se examina más detalladamente la estructura y se pueden utilizar pruebas no destructivas en áreas críticas, sin lugar a dudas esta inspección se puede realizar en un año dependiendo de la capacidad que tenga la compañía que lo realiza.

3.5.2. Técnicas de Inspección

3.5.2.1. Visual

Los ojos y la inteligencia humana son la herramienta más útil y versátil disponible para la inspección estructural y forman una parte esencial de cualquier programa, sin embargo las consideraciones de seguridad y costo se dirigen al esfuerzo de reducir o eliminar la necesidad de utilizar el ojo humano bajo el agua, aparte de las limitaciones del hombre en el agua, la inspección visual tiene limitaciones particulares en la búsqueda de grietas por fatiga, donde se requiere de alguna forma de incremento en la evidencia para ayudar a los ojos humanos. El examen visual por si mismo no produce una copia pero con la ayuda de registros fotográficos con la observaciones de puntos y comentarios se pueden obtener resultados excelentes^(3,34).

Fuera del agua la inspección visual es relativamente sencilla pero bajo el agua el costo y el riesgo aumentan radicalmente, para la inspección en el agua se puede emplear un buzo o las observaciones

se pueden hacer desde un submarino compacto, esta última forma es muy efectiva en si por el área de inspección ya que los buzos no pueden cubrir grande áreas y donde los Vehículos de Operación Remota (VOR) lo facilitan. En las grandes superficies, la ventaja de un submarino tripulado es que puede cubrir rápidamente grandes áreas y el observador esta relativamente en un ambiente seguro y confortable, el buzo es sin embargo necesario cuando se requiere una inspección detallada.

3.5.2.2. Vídeo

Los buzos utilizan más las cámaras de vídeo gracias a los adelantos en la pequeña intensidades de luz que necesitan para trabajar, los VOR o el submarino obtienen buenos registros permanentes de la inspección visual general particularmente en las grandes áreas, el movimiento de la cámara puede dar una impresión grande del espacio comparado con las fotografías, las vídeo cámaras empleadas en los pequeños VOR también son utilizadas para las observaciones de los buzos, esto incrementa la seguridad de los buzos, los ayuda a comunicarse con la superficie y verifican que el buzo este en el procedimiento correcto de inspección.

3.5.2.3. Fotografía

De una forma similar al vídeo la fotografía ha tenido avances en calidad y confianza, se utiliza el formato de 70 mm que tiene una mayor interpretación que el formato de 35 mm, la introducción del proceso de impresión de positivo a positivo ha permitido un cambio en el uso de la película positiva, con impresión de contacto en la fotografía que permite la revisión rápida de los reportes con la facilidad de una ampliación inmediata por el proyector si se requiere. Un importante adelanto a sido la utilización de los sistemas estéreo fotogramétricos los cuales proporcionan una mejor interpretación de una imagen estéreo pero también da información dimensional exacta. El pequeño costo extra de este tipo de cámaras es absorbido por el ahorro en la reinspección de los buzos para obtener una mayor claridad o información dimensional, esta posibilidad de obtener información dimensional por estas fotografías incrementa la eficacia de los submarinos tripulados o no tripulados.

3.5.3. Programa

La preparación de los programas de inspección para las estructuras costa fuera deben considerar los siguientes factores: Una estructura de concreto costafuera tiene una superficie externa muy amplia de miles de metros cuadrados, las temporadas factibles para realizar los trabajos debajo del agua se limitan a determinados meses durante el año, un programa estándar para el mantenimiento se debe llevar después de la inspección, la inspección en servicio se debe de restringir a un limitado número de detalles donde exista un riesgo real de daños y donde los posibles daños pongan en peligro la seguridad de la instalación, el propósito fundamental de la inspección es observar realmente eventos y efectos imprevistos ^(3 35)

Los programas de inspección se tienen que basar en conocimientos a fondo de los detalles de diseño y construcción de las áreas susceptibles de daños, en general estas áreas son: la zona de splash, áreas de concentraciones de esfuerzos, base de cimentación, áreas donde existen cambios bruscos de dimensiones, juntas de construcción, áreas reparadas o de calidad inferior, suelo marino adyacente a la plataforma, placas de acero o accesorios empotrados.

Para preparar un programa de inspección es necesario contar con una filosofía en la cual se base el plan, esto no es tan simple como se piensa, por ejemplo se puede argumentar que las instalaciones son diseñadas y construidas con especificaciones prácticas conservadoras que proporciona la investigación continua que confirman la adecuación de los reglamentos, donde existe la falta de razón para imaginarse fallas y que en base a esto se puede plantear que no se necesita inspección.

La experiencia confirma que los diseños comunes y las prácticas de construcción son buenos, la inspección de rutina es necesaria para verificar el diseño, sin embargo la inspección requiere asegurar que cualquier riesgo complicado que se presente es aceptable, la dificultad se presenta por el hecho de que no son claras las bases científicas y técnicas probadas sobre las cuales se determina un apropiado nivel de inspección. Con base a lo que se ha mencionado de forma general en esta investigación se considera que la filosofía de inspección se encamina a conceptos muy sencillos de aplicar principalmente por el gran desempeño que tiene el concreto en estas estructuras. Las áreas de interés son: la socavación, crecimiento marino, escombros, impacto de embarcaciones, corrosión, grietas por fatiga y falla de juntas.

En los puntos mencionados las características de la falla se pueden observar fácilmente a excepción de la grieta por fatiga que es difícil de descubrir a simple vista, también se nota que la mayoría de los puntos son poco probables de cambiar rápido con el tiempo.

Teniendo la lista de los principales puntos que se inspeccionarán la siguiente pregunta para contestar es donde y cuando inspeccionar, conscientemente no existen bases técnicas para contestar esta pregunta, aquí lo que se aplica son los juicios de los ingenieros competentes, hasta que las bases pueden ser desarrolladas con la ayuda de estos juicios, los caminos de investigación de los planes de inspección son menos subjetivos particularmente en el área de inspección debido al agrietamiento por fatiga el cual tienen un número mayor de inspección y esfuerzo.

La inspección de una plataforma de concreto es similar a la de acero, pero en este caso los problemas se reducen al mínimo en el caso de fatiga, el crecimiento marino tiene un efecto pequeño y la corrosión es poco probable que ocurra, entonces la inspección de una plataforma de concreto se limitará a checar la erosión, el daño por impacto, escombros y la deterioración en general.

La cotización del tiempo y el costo es importante que sea claro, explicando como se divide, efectivamente el costo verdadero de la inspección no es fácil de determinar su tamaño, es difícil aislar la inspección de otras actividades relativa como la construcción y la reparación, un factor significativo son las condiciones atmosféricas y los recursos con que se cuentan para realizar la inspección, en nuestro caso no existen temperaturas frías extremosas en nuestro litoral sin embargo si tenemos una época del año en que se presentan fuertes tormentas y huracanes bajo esta condición es mejor no

realizar los trabajos de inspección por seguridad, otro factor que se debe considerar es el vehículo submarino que se necesita para la realización de los trabajos de inspección, considerando los días y tiempos sin actividad que estará el vehículo submarino y el personal durante esta época mencionada de espera, la dificultad de las maniobras y las averías que se puedan presentar.

3.5.4. Métodos de Inspección

Todas las fuentes susceptibles de daño para las estructuras de concreto serán observadas por medio de una inspección visual, las cuales se registran y se reportan antes de que alcancen un mayor peligro y pongan en riesgo la integridad de la estructura: agrietamiento excesivo por sobrecargas, corrosión superficial del refuerzo, manchas, agrietamiento y desprendimiento, deterioración concreto vulnerable a la fractura, ataque de sulfatos superficiales.

En general la inspección preliminar es preferible realizarla por medio de vehículos sumergibles de este modo, la inspección con buzos deberá ser complementaria también con este tipo de vehículos y evaluarla donde se juzgue necesario para realizar la inspección detallada costafuera. El equipo estándar para los buzos son las herramientas mecánicas simples como: martillo, pinzas y cinta métrica, en las investigaciones más detalladas se utilizará el cincel neumático. Para la efectiva realización de la inspección se enfatiza la importancia del personal involucrado con las actividades que se desarrollan, el personal debe estar familiarizado y capacitado en los trabajos de inspección, por lo general este personal es de ingeniería que además se le entrena para bucear, deben de tener experiencia en inspección de estructuras similares durante su construcción, por lo tanto están en la posición de ejecutar la inspección con buceo cuando sea necesario.

Hay que reforzar la importancia del uso de una terminología común, documentación fotográfica y un muestreo. En los casos de apariencia dudosa, las muestras de corazones se prueban en laboratorio, obteniendo bases más reales de las condiciones en que se encuentra la plataforma, también se puede aplicar el equipo para Pruebas No Destructivas (PND) bajo el agua en las condiciones más difíciles.

Los métodos para PND se pueden usar con buen éxito en el agua, donde exista agua cristalina o al lado de la estructura, las pruebas que más se usan: medición del recubrimiento, ultra sonido y las medidas de potencial eléctrico.

Para el suelo de cimentación, la inspección visual o la medición superficial dan una muy limitada información excepto en la socavación, sin embargo la instrumentación es necesaria para checar el comportamiento de la cimentación, estas mediciones serán de gran valor en el funcionamiento que tiene la cimentación durante la aplicación de las cargas extremas y se pueden usar para predecir el comportamiento de la cimentación bajo condiciones más severas.

Las estructuras con base de gravedad que están bajo una certificación tienen la siguiente instrumentación geotécnica:

- ♦ Altas condiciones de asentamientos Los métodos de observación permiten registrar asentamientos continuos desde la instalación y hasta la operación después de varios años

- ◆ Movimientos de la base y nivel de la cubierta. Es conveniente realizar el estudio de interacción suelo – estructura, aceleración lineal y angular, los instrumentos debe ser capaces de gravar los movimientos dinámicos ocasionados por el sismo, definiendo los movimientos de las plataformas considerando cinco mediciones en el nivel de la base, tres lineales y dos angulares y tres mas a nivel de la cubierta, dos lineales y uno angular teniendo un total de ocho mediciones.
- ◆ Presión de poro en el suelo. Dependiendo de las condiciones del suelo la presión de poro del agua se debe medir en cinco o diez sitios en la masa del suelo bajo la estructura.
- ◆ El Monitoreo de la socavación. La socavación es difícil de predecir basándose en consideraciones teóricas, el costo de la instalación para protegerse de la socavación eliminaría cualquier riesgo teórico que sea grande, pero como su desarrollo puede poner en peligro la estabilidad de la cimentación requiere un tiempo considerable, las prácticas normales posponen la instalación de la protección de socavación de acuerdo a las observaciones en práctica, estas observaciones se realizan por una inspección visual submarina, como referencia se usa la penetración dentro del fondo del mar de barras verticales a distancias apropiadas desde la plataforma.

3.5.5. Anomalías

En la referencia 3.31 se realizó un estudio de los puntos más relevantes que se han encontrado durante la inspección de 22 plataformas del tipo GBS. Los resultados de la inspección referidos en este documento son los hallazgos de la inspección submarina. Que son áreas con acceso difícil como los interiores de los tanques de almacenamiento de petróleo y compartimentos de lastre que no han sido sujetos de inspección. Se menciona los puntos principales donde se encontraron deterioros en la estructura:

3.5.5.1. Filtración de agua

Durante las principales fases de construcción las plataformas normalmente flotan en sitios sobre la costa, en esta fase por lo regular tardan un año, por consiguiente las partes bajas de la estructura son expuestas a un ambiente de presión hidrostática, el interior de la estructura tiene un nivel bajo de agua por eso se proporciona la flotación necesaria. Por lo regular no se presentan filtraciones pequeñas en las primeras etapas de construcción, si se presentan se cierran por medio de la inyección de epóxico, antes de que la plataforma se instale todas las filtraciones se deberán sellar, si existe penetración de agua residual, se debe evaporar esta agua para que el interior del muro este seco, la manifestación de en las filtraciones previas son los depósitos calcáreos sobre la superficie del concreto.

Algunas partes de la plataforma son lugares que están secos en la etapa de operación, los signos de la filtración se pueden identificar inmediatamente por la humedad que se presenta en la superficie del concreto, esto simplifica la inspección de filtraciones.

La humedad interior o las pequeñas filtraciones se encuentran en las juntas de construcción y en el paso de tuberías por los muros de concreto, fuera de estos problemas concreto nunca se presentan signos de humedad.

La humedad y las pequeñas filtraciones nunca han afectado la operación de las plataformas, en la mayoría de los casos las filtraciones se han reducido con el tiempo y se han rehabilitado ellas mismas por la combinación producida por las reacciones entre el cemento hidratado y el agua de mar aragonito.

3.5.5.2. Filtraciones de Petróleo

La mayoría de las plataformas almacenan petróleo en compartimientos o en los huecos de la estructura, es importante mencionar que no existen filtraciones de petróleo en las plataformas con sobre presión externa que se hayan observado bajo condiciones de operación normal.

Únicamente se han observado en una sola estructura huellas de petróleo, en las juntas frías, en la intersección del muro con losa, la cantidad de petróleo que se filtro fue despreciable y no se observo contaminación visible en el mar, esto ocurrió por que la presión interna excedió a la presión hidrostática ejercida por el agua de mar, los otros almacenamientos son diseñados normalmente para permanecer con una sobre presión por eso efectivamente previenen la filtración del petróleo.

En los almacenamientos con sobre presión interna se tiene poca experiencia con menores filtración de agua dentro de las celdas de almacenamiento, estas filtraciones son fácilmente controladas, principalmente en los sistemas de lastre, además la penetración de agua dentro de los poros se disminuirá con el proceso que se menciona anteriormente. Las filtraciones de petróleo a través del concreto no reaccionarán con el cemento hidratado como con el agua de mar, las grietas penetradas por petróleo no se pueden esperar ha que cierren por si solas, se tendrán que sellar lo más pronto posible.

3.5.5.3. Permeabilidad

La permeabilidad debe ser lo suficientemente baja para evitar la penetración de sustancias las cuales tienen un fuerte efecto dañino sobre el concreto o el acero de refuerzo. La máxima permeabilidad aceptada para el concreto costafuera en Noruega es de 10^{-12} m/seg que es considerado como un requerimiento riguroso, los resultados indican que las plataformas del Mar del Norte efectivamente tienen una baja permeabilidad que previene el ingreso de agua, oxígeno, cloruros y otras sustancias las cuales podrían afectar la durabilidad del concreto.

3.5.5.4. Membranas

A pocas plataformas se les han colocado membranas que sirven para protección; previniendo daños al concreto y acero de refuerzo por la penetración del cloro y oxígeno, la segunda es para la reparación de grietas observadas durante la construcción y para el curado que evita el secado del concreto fresco.

Las observaciones después de 15 años en las membranas de protección y reparación es que están intactas, flexibles y sin grietas. Las deficiencias son limitadas, los desprendimientos son de tipo local y los agujeros del tamaño de alfiler.

Los recubrimientos epóxicos han actuado como una barrera contra la penetración de cloruros dentro del concreto, sin embargo pocas plataformas han utilizado este tipo de membranas. Las plataformas que no la han utilizados muestran una excelente protección en el concreto.

3.5.5.5. Durabilidad del Concreto

No hay signos de reacciones perjudiciales en ninguna plataforma de concreto, las investigaciones químicas, microbiológicas y microscópicas del concreto expuesto al agua con alto contenido de sulfatos no ha mostrado ningún ingreso de calcio, sílica, hierro, sulfato o actividad orgánica.

3.5.5.6. Refuerzo

La inspección en las plataformas en servicio tienen varias propiedades de los materiales los cuales pueden influenciar el montaje de barreras las cuales previenen la corrosión, es importante hacer notar que los resultados de la inspección no muestran daños en las estructuras, si una barrera de corrosión prevé un poco de debilitamiento, otras barreras prevén que el proceso de corrosión continúe.

La depasivación causada por la carbonatación o la penetración de cloruros normalmente no inicia un ataque por corrosión, la celda electrolítica se puede establecer y conservar si solamente esta tiene una adecuada cantidad de oxígeno, este oxígeno tiene que penetrar al concreto para alcanzar al acero de refuerzo, para el concreto costafuera esta penetración será obstaculizada por la baja difusión del oxígeno y la permeabilidad. Finalmente las plataformas están habilitadas con un sistema de protección catódica diseñada para cubrir la corriente de drenaje para el refuerzo y el cual consecuentemente podrá prevenir la corrosión del acero en la zona sumergida.

La capacidad de distribución de esfuerzos que se ha observado en estructuras costafuera de diseño común normalmente permitirá una mejora en la etapa de corrosión exhibida por el desprendimiento y agrietamiento sin pérdida en la resistencia, sin embargo podemos mencionar que no existen signos de corrosión en el refuerzo observado en el concreto estructural de las estructuras costafuera.

Las placas de acero empotradas y accesorios, son en ciertos casos cortadas y son expuestas al agua de mar en uno de sus lados, sin un tratamiento superficial estos detalles se observan que son corroídos aun cuando están protegidos catódicamente, esta corrosión es más severa en la zona de splash.

3.5.5.7. Depasivación

La penetración de cloruros no ha sido estrechamente examinado en las plataformas, sin embargo varias si han sido examinadas cuidadosamente por esta razón asumimos que estos resultados son semejantes para otras plataformas, los resultados de las pruebas realizadas están dispersas y no son

consistentes, una explicación a esto puede ser la utilización de diferentes métodos de análisis que han sido utilizados para la determinación del contenido de cloruros.

Las pruebas que se llevaron a cabo dieron como resultado cantidades menores que las especificadas para los puentes de noruega, esto quiere decir que el concreto fabricado en las plataformas tiene una mayor calidad que las estructuras aun construidas sobre la costa.

3.5.5.8. Grietas

El refuerzo puede estar expuesto directamente a los cloruros y al oxígeno debido al agrietamiento de la superficie. Las grietas delgadas en las estructuras de concreto son normales y no causarán complicaciones, los anchos máximos de grietas permitidos por los reglamentos de diseño son del orden de 0.5 mm para la parte sumergida dependiendo del tipo de refuerzo, las grietas observadas en las plataformas son menores que las especificadas, las grietas observadas durante la inspección normalmente están rellenas con sedimentos de magnesio y componentes de calcio. En las plataformas de concreto no se han encontrado grietas de importancia, sin embargo se han generado algunas durante el impacto de embarcaciones las cuales han sido restauradas con epóxicos.

3.5.5.9. Protección Catódica

Todas las plataformas de concreto tienen protección catódica o están protegidas por ánodos en estructuras secundarias. Su objetivo básico es la protección de los componentes del acero como los raisers, las placas de acero fijas y otras estructuras, estos componentes están en contacto con el acero de refuerzo, una corriente dentro del acero de refuerzo no se puede evitar, por eso el refuerzo será protegido por los ánodos. Se aplican prácticas comunes para el diseño de la protección catódica en la protección de accesorios externos de acero y al acero de refuerzo.

El consumo de los ánodos es más bien variable, de plataforma a plataforma, de localización a localización en una plataforma y de durabilidad variable, esto se puede explicar por las diferentes cantidades de exposición, la cantidad de acero y los ánodos que protegen al acero, después del consumo significativo de los ánodos durante la construcción a flote y del primer año de operación, los otros ánodos que se utilizan para consumo se estabilizan a un muy limitado nivel de corriente en el refuerzo menor de 1 mA/m².

3.5.5.10. Cargas y Resistencia

Por la importancia que tiene este inciso únicamente se mencionan las características que muestran algunos problemas, por que la resistencia, las cargas estáticas y las cargas cíclicas no presentan ningún problema hasta la fecha en las plataformas inspeccionadas. La resistencia del concreto en las plataformas es mayor que el valor que se especifico en la construcción.

3.5.5.11. Cargas de Impacto

Los cuerpos estructurales de las plataformas han sufrido impactos de barcos sin control, en pocos casos los daños se repararon aun cuando estos no aparentan disminuir la seguridad, la mayoría de los impactos no tienen una razón para una reparación, por lo regular los trabajos se limitan a la limpieza de pequeñas marcas de pocos centímetros de profundidad.

3.5.5.12. Asentamientos

Las plataformas con configuración de torre y cajón, con estructura de cimentación en forma de caja cerrada son muy rígidas y resistentes, tal que los efectos por asentamientos diferenciales no causan mayores problemas. Otras plataformas son empotradas con placas tipo delantal en el subsuelo y la interface entre la losa base y el subsuelo es rellena con mortero de cemento, de esta forma la erosión se evita y se realiza una completa interacción suelo estructura, algunos cajones son empotrados por medio de una extensión de su base, los sistemas estructurales de estos voladizos varían según el diseño de la plataforma, otras tienen una estructura de cimentación abierta sin cajones rígidos cerrados.

Varios cajones en voladizo están empotrados con esfuerzos medidos, todas estas medidas confirman el diseño supuesto y no se afectan por los asentamientos diferenciales que se observan.

3.5.5.13. Fuego

Dos incendios de hidrocarburos dentro del cajón estructural de concreto se presentaron con un desprendimiento del concreto en promedio de 10 a 20 mm sobre una superficie de con altura de 5 a 10 m, la profundidad máxima de desprendimiento fue de 50 mm, aquí no fue necesaria una reparación importante.

3.5.6. Densidad de Corriente

La evaluación de las condiciones de los muros de concreto es de las mayores tareas que se tienen que realizar en las plataformas de concreto, sin embargo hoy la inspección visual se realiza con buzos o submarinos, la detección y evaluación de grietas requiere de limpieza en los muros antes de su inspección, la inspección no se puede realizar a través de las mediciones de sensores debido a su baja eficiencia en el sistema de posicionamiento en las operaciones de los grandes muros de concreto^(3,36). Para proporcionar a los operadores de la plataforma una información más objetiva y precisa, se ha desarrollado un sistema que permite la detección y localización de corrosión y corrientes de protección catódica, especialmente la densidad de corriente (DC) debido al contacto entre el agua de mar y las varillas de refuerzo, esta DC descubre grietas peligrosas y porosidad anormal que conduce al concreto a un agrietamiento con el tiempo.

La operación se realiza con un sensor estándar de densidad de corriente y un navegador giroscopio – doppler instalado en un vehículo sumergible a control remoto, los datos son gravados o transmitidos a

la superficie, mientras el vehículo continua formando una malla que cubre toda la superficie para inspeccionarla, el proceso de los datos se realiza en un barco a través de una computadora y produce gráficas de las mediciones de la densidad de corriente en función de la posición, los picos anormales son interpretados como daños significantes, una inspección detallada de las zonas sospechosas se pueden disponer después del levantamiento general, pero solamente las localizaciones específicas de esta manera ahorran tiempo y dinero.

Estimar el tamaño de la grieta en algunos casos se puede obtener, debido a la exactitud del sistema de navegación utilizado, la integración de los registros de la densidad de corriente también proporciona una estimación de la cantidad de acero perdido cada año.

El principio fundamental de detección de grietas, permite la descubrir grietas sobre grandes áreas descubiertas durante los primeros experimentos y levantamientos comerciales en líneas de tubería bajo el agua. Cuando el sensor de densidad de corriente se utilizó sobre varios metales corroídos, en el mar sobre placas de acero, tambores de acero viejos, fueron observados picos de densidades de corriente fluyendo desde los escombros los cuales se detectaron a grandes distancias como de un metro. Este fenómeno se confirmó después durante pruebas de laboratorio donde se observo que el metal corroído define un mínimo de polos localizados a distancia significativa a lo largo de la superficie del metal, esta corriente hacia fuera pudo detectarse desde el metal corroído pero el nivel de corriente fue impredecible. La identificación de grietas en grandes áreas es sobre la suposición de que una grieta significativa alcanzará al refuerzo metálico y creará alguna corrosión dentro del concreto, como el concreto masivo es completamente resistente, la densidad de corriente debida al proceso de corrosión se concentrará dentro de las grietas y proporcionará una medio para identificarlas, si estas no son visibles a través de una medición eléctrica, la mayor de las corrientes, la más severa es el nivel de corrosión y la consecuencias de los daños en la integridad del concreto.

El sensor utiliza dos persianas circulares una fija y otra rotatoria, cuando la persiana se abre la densidad de corriente fluye a través de esta y cuando se dispara fluye a través alrededor de este. El impulso de la densidad de corriente induce a una Corriente Alterna (CA) en el campo magnético en el núcleo, el cual produce un giro a la bobina detectora de una CA proporcional al voltaje del flujo de corriente, figura 3.6 a y b.

Consecuentemente un vehículo debajo del agua llevando el sensor de densidad de corriente con suficiente acercamiento al concreto debe ser capaz de detectar grietas significantes que llegan hasta el refuerzo incluso si se encuentra obstruida o cubierta la salida de la grieta, de este modo evitando la limpieza de la superficie del concreto.

Cuando el refuerzo se interconecta, la sensibilidad del método se puede incrementar con el uso de un generador de CA el cual induce la corriente en el refuerzo a través del muro, en este caso el sensor se debe modificar para llevar la CA.

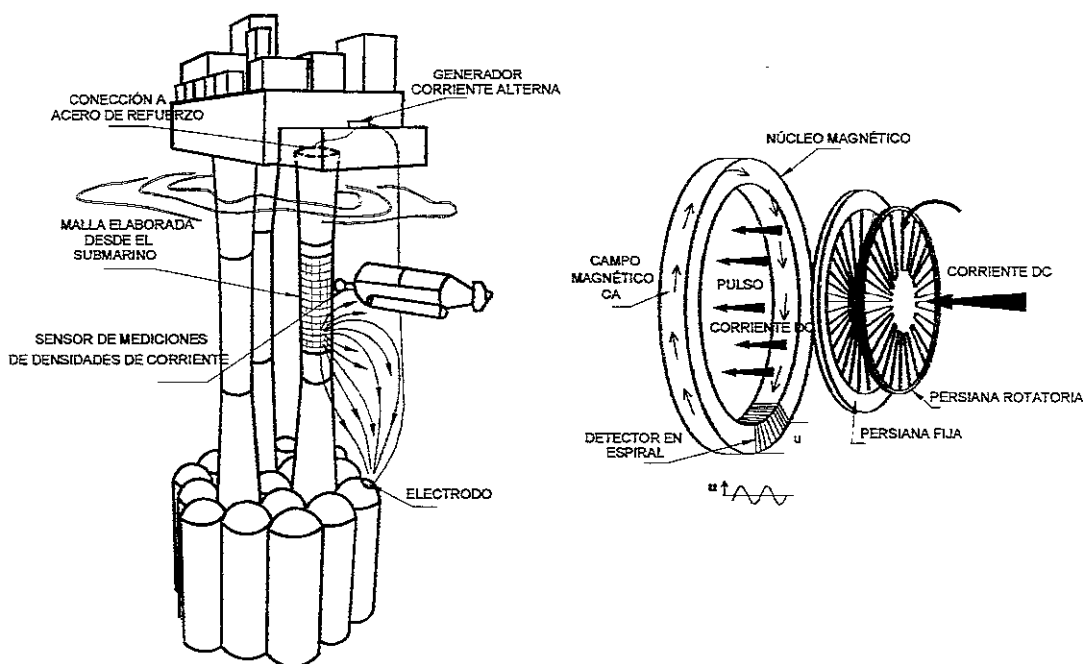


Fig. 3.6 a y b Vehículo y Sensor de Densidad de Corriente. (3.36)

La eficiencia de este levantamiento dependerá principalmente de la habilidad del vehículo para hacer una malla regular a lo largo de las grandes áreas del concreto, con la ayuda de sistemas de navegación más precisos que sean capaces de posicionar al vehículo sobre la superficie del concreto en tiempo real, en coordenadas relativas dentro del área levantada.

Del mismo modo en las piernas de la plataforma se desarrollará un modelo cónico, la distancia vertical y el apoyo son llevados por el modelo a la superficie real, el cual permite un fácil posicionamiento de los vehículos.

Los sistemas de navegación estándar como los sistemas de base grande o corta y los sistemas de navegación inercial no son útiles sobre grandes superficies de concreto, los nuevos sistemas que se han desarrollado utilizan un sonar doppler con sensor de velocidad y una brújula para su orientación, la posición en que se localizan la registra una computadora en tiempo real.

Los sentidos de la cabeza del doppler corren su velocidad en cuatro direcciones, su principal característica es que se monta horizontalmente sobre el submarino para que el haz ultrasónico sea reflejado por el muro de concreto, dos mediciones de velocidades son en un plano vertical, las otras dos son horizontales, las cuales se corrigen por los hundimientos y arroyos para una posición del sistema de referencia.

Este método es solo sensitivo a los daños realmente peligrosos para la integridad del concreto, las grietas que alcanzan a la red del refuerzo y llevan a la ruptura del concreto, este método de inspección es muy eficiente igual y se puede utilizar aun con crecimiento marino en la superficie del concreto, evitando los programas de limpieza caros antes de la inspección visual.

3.5.7. Mantenimiento

La mayoría de las plataformas tienen por lo menos un periodo de vida de 20 años, su localización costafuera hace que el acceso de los trabajos de mantenimiento sea costoso, cuando se presenta algún problema en la estructura ^(3.20). Para eliminar el alto costo de mantenimiento los materiales usados y el concreto deben tener una alta calidad que es aplicable a un alto desempeño en las estructuras que las hará virtualmente libres de mantenimiento durante su vida de servicio.

Las actividades que se definen principalmente como mantenimiento se llevan ocasionalmente a cabo si se basan en la inspección normal, la extensión de estas actividades son muy limitadas, estas actividades abarcan.

- ◆ Eliminación de desperdicios, todos los objetos que ocasionalmente se caen desde las partes altas pueden acumularse en las partes bajas de la estructura, los desperdicios metálicos pueden incrementar la corriente en los ánodos, estos desperdicios no perjudican, sin embargo, para seguir una limpieza y realizar una inspección segura los desperdicios se tiran a la basura.
- ◆ Los ánodos se consumen gradualmente y según determinado tiempo son reemplazados, la amplitud de las actividades es pequeña pero se incrementa cuando la plataforma es más vieja.
- ◆ En ciertas estructuras las inspecciones regulares revelan desprendimientos y deficiencias pequeñas las cuales formalmente rompen con los requisitos del recubrimiento del refuerzo, dichos defectos provienen de la fase de construcción, los cuales se pasaron por alto en la inspección y que por razones formales se decidirá cubrir el defecto con epóxico.
- ◆ Mantenimiento preventivo de estructuras de acero secundarias, accesorios, soportes, etc.

La eliminación general del crecimiento marino, chorro de arena, pintura y otro tipo de actividades para algunas áreas de estructuras de acero no se realizan en las plataformas de concreto.

3.6. Bibliografía

- 3.1 ACI Committee 363, "State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete", ACI 363R-84, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1984.
- 3.2 Ronneberg, H., Sandvik, M., "High Strength Concrete North Sea Platforms", Concrete International, USA, January 1990, pp 29-34.
- 3.3 Moksnes, J., Jakobsen, B., "High-Strength Concrete Development and Potentials for Platform Design", Proceedings, Offshore Technology Conference, OTC 5073, Houston, Texas, 1985.
- 3.4 Haug, A. K., Sandvik, M., "Mix Design and Strength Data for Concrete Platforms in the North Sea", Proceedings, ACI SP 109, Concrete in Marine Environment, Second International Conference St. Andrews by-the-Sea, Editor V. M. Malhotra, Canada, 1988
- 3.5 Zia, P., Ahmad, S., Leming, M., "High-Performance Concretes, A State-of-Art Report (1989-1994)", FHWA-RD-97-030, Noruega, 1997.

- 3.6 Neville, A., Aitcin, P. C., "High Performance Concrete – An Overview", *Material and Structures / Matériaux et Constructions*, Vol. 31, Mars 1998, pp 111–117.
- 3.7 Aitcin, P. C., PEng, PhD, "The Use of High-Performance Concrete in Bridge Construction", *Network of Centres of Excellence on High Performance Concrete*, Omaha, November 1996.
- 3.8 Ferraris, F. Ch., Lobo, C. L., "Processing of HPC", *Concrete International*, USA, April 1998, pp 61-64.
- 3.9 Phelan W. S., "Admixtures and HPC: A Happy Marriage", *Concrete International*, USA, April 1998.
- 3.10 Woodhead, H. R., "Hibernia Offshore Oil Platform", *Concrete International*, USA, December 1993.
- 3.11 Hoff, G. C., "High Strength Lightweight Aggregate Concrete – Current Status and Future Needs", *Proceedings, ACI SP 121, Utilization of High-Strength Concrete – Second International Symposium*, 1990.
- 3.12 Zhang, M. H., Gjrv, O. E., "Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete", *ACI Materials Journal*, V. 88, No 3, May-June 1991.
- 3.13 Zhang, M. H., Gjrv, O. E., "Characteristics of Lightweight Aggregates for High-Strength Concrete", *ACI Materials Journal*, V88, No 2, March-April 1991.
- 3.14 Walum, R., Weng, J. K., Hoff, G. C., Nunez, R. A., "The Use of High-Strength Modified Normal Density Concrete in Offshore Structures", *Concrete Under Severe Conditions: Environment and loading (Vol. II)*, Edition K. Sakai, 1995.
- 3.15 ACI Committee 213, "Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete", ACI-213 R-87, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1987.
- 3.16 Zhang, M. H., Gjrv, O. E., "Development of High-Strength Lightweight Concrete", *Proceedings, ACI SP 121, Utilization of High-Strength Concrete – Second International Symposium*, 1990, pp 667-681.
- 3.17 Hang A. K., "Concrete Technology, the Key to Current Concrete Platform Concepts", *Proceeding, ACI SP 149, International Conference on High Performance Concrete*, Editor V. M. Malhotra, , Singapore, 1994, pp 63-80.
- 3.18 Zhang, M. H., Gjrv, O. E., "Permeability of High-Strength Lightweight Concrete", *ACI Materials Journal*, V. 88, No 5, September-October 1991.
- 3.19 Sandvik, M., Hovda, T., Smeplass, S., "Modified Normal Density (MND) Concrete for the Troll GBS Platform", *Proceeding, ACI SP 149, International Conference on High Performance Concrete*, Editor V. M. Malhotra, , Singapore, 1994, pp 81-102.
- 3.20 Hoff, G.C., "Considerations in the Use of Concrete for Offshore Structures", *Evaluation and Rehabilitation of Concrete Structures and Innovations*, ACI SP 128, Hong Kong, 1991.
- 3.21 Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., "Diseo y Control de Mezclas de Concreto", *Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto*, Mxico, 1992.

- 3.22 Niura, N., Takeda, N., Chikamatsu, R., Sogo, S., "Application of Super Workable Concrete to Reinforced Concrete Structures with Difficult Construction Conditions", *Proceeding, ACI SP 140, High Performance Concrete in Severe Environments*, 1993, pp 163-186.
- 3.23 Woodhead, H. R., Haug A. K., Chapdelaine, L., "Hibernia Gravity Base Structure: Completion of the Dry Dock Phase", *Concrete International, USA*, September 1995.
- 3.24 Svensvik, B., Kepp, B., "The Concrete Gravity Base Structure of the Gullfaks C Platform: Examples of Applied Technical Development", *Proceedings, Offshore Technology Conference, OTC 5908, Houston, Texas*, 1989.
- 3.25 Gerwick, B. C., "T Headed Stirrup Bars", Gerwick Inc., <http://www.gerwick.com>, USA, 1991.
- 3.26 ACI Committee 311, "ACI Manual of Concrete Inspection", ACI 311 - 92, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1992.
- 3.27 ACI Committee 357, "Guide for The Design and Construction of Fixed Offshore Concrete Structures", ACI - 357R-84, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1984.
- 3.28 Risser, Bob, "Advances in Vertical Slipform Construction", *Concrete Construction, USA*, October 1995.
- 3.29 Strunge, C., "Submarine Placing of Concrete by the Tremie – Method", *Proceedings, Offshore Technology Conference, OTC 1311, Houston, Texas*, 1970.
- 3.30 Berner, D. E., Haggerty, B., Gerwick, B. C., "260 Meter Deep Tremie Concrete Placement for Belled Foundation Rehabilitation of the North Rankin A", *Proceedings, Offshore Technology Conference, OTC 6145, Houston, Texas*, 1989.
- 3.31 Fjeld, S., Hall, M.E., Hoff, G.C., Michel, D., Robberstad, L., Vegge, A., Warland, T.A., "The North Sea Concrete Platforms: 20 Years of Experience", *Proceedings, Offshore Technology Conference, OTC 7462, Houston, Texas*, 1994.
- 3.32 ACI Committee 357, "State-of-the-Art Report on Barge-Like Concrete Structures", ACI 357.2R – 88, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1988.
- 3.33 ACI Committee 357, "State-of-the-Art Report on Offshore Concrete Structures for the Arctic", ACI 357.R-85, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1985.
- 3.34 Charters, E., "Structural Inspection and Maintenance in a North Sea Environment", *Proceedings, Offshore Technology Conference, OTC 4360, Houston, Texas*, 1982.
- 3.35 Fjeld, S., Røland, B., "In-Service Experiences With Eleven Offshore Concrete Structures", *Proceedings, Offshore Technology Conference, OTC 4358, Houston, Texas*, 1982.
- 3.36 Bournat, J-P., Stankoff, A., Auboiroux, M., "Inspection of Concrete Platforms: Crack Detection by Current Density Measurements", *Proceedings, Offshore Technology Conference, OTC 3765, Houston, Texas*, 1980

4. TENDENCIAS

Para poder mencionar que existe la tendencia en desarrollar o implementar alguna tecnología, tenemos que estudiar el entorno que esa tecnología involucra. En la Tecnología del Concreto en las Estructuras Costafuera, su entorno incluye como parte fundamental la necesidad de explotación de hidrocarburos mar adentro, pues si se agotara definitivamente esta fuente ya no existiría esta industria. Como proyecto de inversión, la construcción de estas estructuras es muy factible, aunque se pueda pensar que es muy costosa, los altos beneficios para la economía de un país son muy importantes.

La construcción de estas estructuras ha encontrado grandes desafíos, los cuales no se pueden comparar con las de explotación en tierra firme, esto ha permitido su desarrollo y modificación para obtener mayor adaptación a las necesidades planteadas. La búsqueda de nuevos campos de explotación marca la dirección hacia mayores profundidades y a lugares muy extremos poco explorados como el Ártico.

Para poder garantizar el proyecto de construcción tenemos que considerar la participación de un departamento de calidad y un programa del tipo Garantía de Calidad / Control de Calidad, quedando la participación integral en tres grupos dentro de un proyecto, ingeniería, construcción y calidad.

La Tecnología del Concreto presenta una nueva fuerza para su desarrollo, la cual se dirige a los materiales de ambiente amigable, los cuales se integran a la protección del ambiente y permanecen en armonía con el ecosistema del planeta.

4.1. Hidrocarburos

Actualmente los yacimientos del petróleo localizados costafuera juegan un lugar importante a nivel estratégico con un gran peso político. En términos de reserva ^(4 1), el petróleo costafuera representan una cuarta parte de las reservas mundiales y esta proporción es aproximadamente la misma para el gas. De acuerdo con la International Energy Agency, cerca del 40% de las reservas del petróleo costafuera se concentran en Oriente Medio, el 17% en Latino América, en Europa Oriental el 15.5 % seguido por África con 14%.

A pesar de la importancia del Golfo de México en términos históricos y técnicos en la actividad costafuera, Norte América ocupa el tercer lugar en reservas de petróleo costafuera.

La producción de hidrocarburos líquidos de los yacimientos costafuera en 1995 representaban 21.5 millones de barriles al día, o aproximadamente el 30% del volumen total de petróleo producido en el mundo y se espera que se incremente en un 30% en el periodo de 1995 al 2000, esta tendencia es particularmente importante en Europa Oriental donde la producción del Mar del Norte ha incrementado sus niveles año con año. Los campos gigantes de explotación de la primera generación gradualmente han pasado a ser de la segunda generación de depósitos.

Observando las tendencias en el crecimiento de la demanda y la madurez de las reservas del Mar del Norte y del Golfo de México, es de vital importancia encontrar una nueva área de explotación, dirigiéndose en las próximas décadas a la zona del Ártico, siendo la próxima frontera a conquistar. Esta zona esta prácticamente inexplorada y tiene la posibilidad de contar con grandes campos de hidrocarburos.

4.2. Estructuras

Ya existe una tendencia en considerar la fabricación de estructuras de concreto costafuera en todo su concepto, incluyendo las instalaciones de la cubierta, en base a un prototipo que consideraría un juego único de especificaciones de diseño ^(4.2). Los costos de arranque por primera vez han sido el mayor obstáculo para un sólido desarrollo de la tecnología del concreto en las plataformas, si el propietario no cuenta con la infraestructura para la construcción de una estructura de este tipo, los costos se incrementan bastante sin embargo, a largo plazo estos se amortizan considerablemente con la construcción de otras plataformas.

La comercialización internacional y nacional del petróleo se mueve rápidamente buscando yacimientos que se encuentran cada vez a mayores profundidades. Por ejemplo, en el Golfo de México y en la costa de Brasil, la producción del petróleo a profundidades mayores de 500 m es una realidad, la producción a dichas profundidades se observa que también se desarrollará en el Norte de Europa. Bajo estas condiciones las estructuras flotantes de concreto tendrán una aplicación muy importante, las estructuras con grandes pesos en la cubierta y los grandes volúmenes de almacenamiento de petróleo que se requieren mejorarán en su funcionamiento debido a la excelente operación de los flotadores de concreto.

Se han construido grandes plataformas de concreto pero, esto no quiere decir que las plataformas pequeñas no sean competitivas. Estas pequeñas plataformas se han construido constantemente desde 1955 en el Golfo de México. En el Norte de Europa existe una tendencia para desarrollar pequeñas reservas en aguas poco profundas, sin embargo en este mercado no se ha incorporado la industria del concreto, principalmente porque los patios de construcción y la infraestructura inherente tienen que ser de grandes dimensiones para las grandes plataformas, existiendo menor efectividad en la construcción de plataformas pequeñas.

Los conceptos como las monotorres y las plataformas de poca profundidad son muy competitivas, tanto como si fueran fabricadas de acero, también estas estructuras se pueden utilizar para plataformas con cabezales de pozos y estaciones de compresión.

Las plataformas de concreto ayudan a la producción doméstica en áreas con menor desarrollo de equipo industrial de petróleo y contribuyen al desarrollo de dicha industria.

Las plataformas de concreto han tenido un impulso en el desarrollo de la alta calidad del concreto y en los métodos de construcción modernos. Los equipos y piezas mecánicas se han integrado totalmente

a la estructura de concreto, además estas estructuras se pueden diseñar para utilizarse en diversos sitios.

4.3. ISO 13819

La tendencia de utilizar un juego de especificaciones a nivel internacional para el diseño de plataformas, se percibe aún más por los trabajos que realizan la ISO y el API, los cuales se han unido para desarrollar un estándar de ingeniería en la industria costafuera ^(4.3). La Parte 3 de este estándar abarcará el diseño de plataformas fijas de concreto costafuera. La primera parte de este estándar ISO 13819-1 Parte 1 Requerimientos Generales ya se publicó, la Parte 2 Estructuras Fijas de Acero se encuentra en revisión y la Parte 3 esta en elaboración.

El alcance del estándar ISO para estructuras de concreto fijas que corresponde a la parte 3, es el desarrollo de un documento básico que presente los requerimientos para el proceso de ingeniería incluidos en la construcción de plataformas de concreto. En este contexto existen varias disciplinas de ingeniería que son importantes dentro de la tecnología del concreto, el estándar intenta cubrir todas estas disciplinas relacionadas con el diseño, así como su cumplimiento.

La intención del desarrollo de este estándar internacional en la industria costafuera, es eliminar la necesidad de los propietarios en la utilización de especificaciones generales, que por lo regular son diferentes en todas las compañías y que contienen además características particulares innecesarias, que dificultan las actividades del personal de ingeniería y la contratista en todo momento.

La tendencia en el futuro es reducir el número de especificaciones dejando únicamente aquellas áreas muy particulares del proyecto, las cuales contendrán los datos específicos y las características de las opciones que este estándar deje abiertas.

El estándar para las estructuras de concreto costafuera que se encuentra en preparación es en realidad único. Actualmente no existe un estándar que cubra todos los aspectos que se deben de cubrir por ejemplo, la aplicación de los capítulos sobre Sistemas Mecánicos y Operaciones Marítimas no se cubren en ningún estándar publicado a la fecha y aunque existen algunos conceptos ya elaborados en otras áreas de este documento, estas se deberán escribir originalmente para marcarlas más bien como una ISO – Certificación, dentro de este estándar.

El contenido de la Parte 3 ha cambiado varias veces y al parecer todavía tendrá cambios, sin embargo se mencionarán los capítulos que actualmente considera.

1 Introducción. Describe en breves palabras la relación entre este estándar, las reglas y regulaciones en diferentes disciplinas. Mencionará algunos requerimientos como los sistemas de calidad, competencia, documentación, definiciones y terminología.

2 Bases Principales En este capítulo se mencionan los requerimientos generales de diseño, los principios de diseño para el estado límite, los principios para el establecimiento de las acciones de diseño y la resistencia de diseño Intenta incluir una cláusula que permita a las estructuras simples,

reducir los requerimientos sin afectar la seguridad en el personal y al ambiente además, que puedan desempeñarse óptimamente.

3 Cargas y Efectos de Carga. Cubre las cargas ambientales y funcionales, se consideran los factores de carga y la combinación de las cargas. Los factores y combinaciones se rigen por el Consejo Noruego del Petróleo, esto es en parte para no cambiar los niveles de seguridad en los diseños.

4 Análisis Estructural. Guía y requerimientos del análisis lineal, no lineal y dinámico. Una parte de este capítulo considera al análisis sísmico.

5 Trabajos de Concreto. Cubre los requerimientos del diseño, materiales y construcción de las estructuras de concreto, especifica las reglas aplicables en el sitio de construcción y deja un número de opciones abiertas, para aplicarse únicamente en el proyecto individual.

5.1 Diseño. Permite la aplicación de cualquier estándar reconocido que cubra las condiciones apropiadas de diseño. Presenta una lista de condiciones que se deberán cubrir de acuerdo con el estándar elegido. El estándar noruego de diseño del concreto NS3473 cubre todos los puntos especificados de este capítulo, pero su uso está abierto a otros estándares.

5.2 Materiales del Concreto. Especifica los requerimientos con respecto al concreto como un material de construcción, sus constituyentes y también el acero de refuerzo y presfuerzo. No existe una referencia directa para el diseño, sin embargo el capítulo permite el uso de estándares nacionales reconocidos en el sitio de construcción.

5.3 Fabricación del Concreto. Se cubre con estándares y especificaciones, estos trabajos se están coordinando con el CEN europeo.

6 Diseño de Cimentación. Existen diferencias muy significativas entre los diseños geotécnicos de la cimentación con pilote en las plataformas jacket y las de base de gravedad, sin embargo se mencionarán brevemente los detalles de los principios básicos de ingeniería.

7 Sistemas Mecánicos. Existe muy poca gente con experiencia y habilidad sobre este tema de gran utilidad. Este capítulo cubre los sistemas permanentes y temporales utilizados para operar la plataforma durante su vida útil, construcción, remolque, instalación, etc..

8 Operaciones Marinas. Disciplina que ha estado totalmente fuera del campo de la normalización, por eso su concepción es nueva en un estándar. Se cubren las operaciones marítimas involucradas en la construcción, amarre, remolque e instalación de las plataformas de concreto.

9 Protección Corrosiva. Se refiere a los conceptos básicos para la protección del acero expuesto y recubierto y también a la protección de sistemas mecánicos.

10 Diseño de la Interface con la Cubierta. Describe brevemente las consideraciones y el diseño de la interface entre la estructura y la cubierta.

11 Inspección y Consideraciones de Monitoreo. Se establecen los principios y rutinas para la inspección de la estructura en servicio.

4.4. Garantía de Calidad / Control de Calidad

La plataforma Hibernia GBS es una de las estructuras más complejas de su tipo que se ha construido, los materiales y los procedimientos de construcción utilizados fueron los últimos dentro del conocimiento de la Tecnología del Concreto.

Los retos para construir esta estructura entre otros fueron, el fabricar y colocar 165,000 m³ de concreto bombeable con resistencia de 69 MPa en un año, la colocación de 110,000 ton de acero de refuerzo, 2.2 millones de varillas con cabeza "T", el uso extensivo por primera vez de la inyección de lechada por conductos de 175 m de largo, el uso de formas complejas en el slipforming con grandes densidades de acero de refuerzo.

Para poder hacer frente al desafío de su construcción se implemento un programa llamado Garantía de Calidad/Control de Calidad (GC/CC) ^(4.4), el cual tuvo el control en todos los aspectos del diseño, construcción de la estructura y la cubierta, en este programa se diseñaron los controles para asegurar la integridad estructural y el funcionamiento total de la plataforma.

El implementar el programa GC/CC fue un nuevo capítulo en los requerimientos de construcción en Canadá el cual, nunca antes se había realizado.

Garantía de Calidad (GC) son los métodos que aseguran la concordancia con las especificaciones y el Control de Calidad (CC) es la medición de los requerimientos físicos por medio de la inspección, pruebas y auditorías. Ambos son de vital importancia para asegurar los intereses del diseñador, el constructor y el propietario.

4.4.1. Organización del GC/CC

La organización del GC/CC se estructuró por áreas, disciplinas y tiempos.

- ◆ CC en Concreto. Recepción y control de materiales, prefabricación y colocación de varillas de refuerzo, postensado, concreto incluyendo mezclas de diseño, laboratorio de pruebas, registros.
- ◆ CC en Equipo Mecánico. Estructural, tubería, risers, electricidad/instrumentación, equipo marino, soldadura, pruebas no destructivas, protección corrosiva, registros.
- ◆ CC en Control Dimensional. Control dimensional basado en reportes de control de avance en la construcción.
- ◆ GC en Equipo Mecánico. Ingeniería, procedimientos, compras, auditorías.

Para la construcción de la plataforma se requería de personal calificado principalmente para las funciones de GC/CC. En la región donde se construyó no se habían realizado grandes proyectos ni construcciones tan complejas, para poder resolver esta falta de experiencia no solamente se consideró contratar personal con curriculum excepcional, sino implantar un programa de capacitación de modo continuo antes y durante la construcción.

4.4.2. Programa GC/CC

Todas las etapas del proyecto incluyendo el diseño, adquisición de materiales y construcción fueron controladas por el programa GC, una parte importante de este programa fue el desarrollo de los métodos de trabajo y los manuales de procedimientos de construcción. En la GBS se aplicaron consideraciones únicas de diseño establecidas por el desarrollo reciente de la tecnología del concreto y fue primordial que los procedimientos de trabajo se ejecutaran y fueran hechos a la medida con los requerimientos específicos de construcción.

Se invirtieron millones de dólares en estudios de ensaye, los cuales formaron las bases para varios procedimientos de construcción, estos ensayes incluyeron el desarrollo y técnicas de colocación de lechada en los conductos del postensado, secciones de slipforming, gradientes térmicos, evaluación de materiales de reparación, evaluación de sistemas de poro-aire y determinación de resistencia en sitio del concreto bombeado, efectos del clima frío en el concreto, trabajabilidad y consolidación del concreto en secciones densamente reforzadas y la colocación del acero de refuerzo en las áreas congestionadas, entre otras.

La GC es todo lo planeado y las acciones sistemáticas necesarias para proporcionar confianza en que el producto o servicio satisface los requerimientos del proyecto. La selección del programa de calidad es responsabilidad del cliente, así como el nivel que se desea alcanzar en la complejidad del diseño, criterio de diseño, complejidad del proceso de producción, economía y seguridad.

El CC son las actividades de carácter operacional que son utilizadas para satisfacer los requerimientos de calidad, es el proceso regulatorio a través del cual el desempeño actual de la calidad se mide y compara con los estándares establecidos.

En general los supervisores del CC son responsables de la preparación de los procedimientos, los cuales tendrán el perfil de varios testimonios y mantener las líneas establecidas durante el proceso, los métodos de prueba, los criterios de aceptación para la aprobación y al mismo tiempo reportar los resultados obtenidos.

La función y la interacción entre los grupos de ingeniería, construcción y GC/CC se deben describir apropiadamente para aplicar los sistemas necesarios y dirigir apropiadamente la tecnología durante las fases de construcción de un mega proyecto. Las funciones de los grupos mencionados deben estar cuidadosamente orquestadas y estar íntegramente dentro de sistemas de cooperación y consulta.

- ◆ El departamento de Ingeniería genera los requerimientos básicos y las especificaciones de los materiales. Estos requerimientos se basan en documentos de diseño apropiados que posteriormente son editados por este departamento.
- ◆ Los requerimientos de construcción se generan en las reuniones que llevan acabo los tres departamentos. Por medio de acuerdos detallados y en documentos formales se basan las técnicas deseadas que se implementan después de un estudio cuidadoso.

- ◆ El departamento de GC/CC basado en los dos puntos anteriores, prepara el programa formal y lo pública para comentarios y validación de los departamentos de ingeniería, construcción y certificación.
- ◆ Aceptado el programa se implementan las pruebas particulares y se desarrolla el diseño. Por ejemplo, después de que se han realizado las pruebas de laboratorio en el diseño de la mezcla, continuarán las pruebas en la planta como son el mezclado, la fluidez, bombeo, pérdida de trabajabilidad, etc. Concluidas las pruebas se obtendrá finalmente la mezcla de diseño.
- ◆ El reporte del desarrollo es preparado por GC/CC que se entregará a ingeniería, construcción y GC para comentarios y aceptación.
- ◆ Todos los comentarios se discutirán entre los departamentos y si es necesario se implementará en el reporte aceptado por todos, después GC/CC lo publicará en edición "Para Construcción".

La aplicación del programa GC/CC es costoso, sin embargo al final obtenemos excepcionales dividendos. El diseño de la plataforma evita la posibilidad de realizar mantenimiento y reparaciones en la estructura, porque considerar detener la producción por problemas en la estructura sería extremadamente costoso, esto significaría que sería necesario proporcionar una estructura óptima en su construcción, lo cual definitivamente se puede lograr con la aplicación del programa GC/CC, que en el futuro se implementará no solamente a estructuras complejas o de grandes dimensiones, sino a todo tipo de estructuras.

4.5. Tecnología del Concreto

El concreto elaborado con cemento portland es claramente el principal material utilizado en un gran número y variedad de estructuras en el mundo, esto es atribuido principalmente al bajo costo de los materiales y construcción para las estructuras de concreto, también como el bajo costo de mantenimiento. Por lo tanto, no es sorpresa que varios avances en la Tecnología del Concreto hayan ocurrido como el resultado de dos fuerzas principales, la velocidad de construcción y la durabilidad del concreto ^(4,5).

Durante el periodo de 1940 a 1970, la disponibilidad de la alta resistencia temprana del cemento portland permitió el uso de alto contenido de agua en la mezcla para que fuera más fácil su manejo. Este manejo sin embargo, originó serios problemas en la durabilidad de las estructuras, especialmente las sujetas a la exposición de ambientes severos

Entre los recientes adelantos, el más notable es el desarrollo de los superplastificantes en las mezclas de concreto, los cuales dan una gran fluidez con bajo contenido de agua. La dureza del concreto debido a su baja porosidad está caracterizado generalmente por su alta resistencia y alta durabilidad. Los cementos "macro libres de defectos" y los "cerámicos químicamente garantizados" son ejemplos de tecnología alterna para obtener productos de baja porosidad y alta resistencia. Para el propósito

específico de aumentar la vida útil de las estructuras de concreto reforzadas expuestas a ambientes corrosivos, el uso de aditivos inhibidores de corrosión, recubrimientos epóxicos de acero de refuerzo y protección catódica son entre otros los mejores avances tecnológicos conocidos en la actualidad.

La presencia de los materiales amigables con el ambiente es una nueva fuerza en la Tecnología del Concreto, los cuales han incrementando su participación en la tecnología para el futuro. Estos son los materiales que durante su fabricación no generan contaminación ambiental, además de que en su elaboración se podrían utilizar materiales reciclados, como agua tratada. Durante su vida útil no degradan al ambiente y posteriormente se podrían utilizar como materiales de reciclaje, dentro de este concepto también, se encuentran los materiales que surgen de otros procesos industriales, como son las cenizas y escorias de alto horno utilizadas en la industria del concreto.

Cualquier esfuerzo por estimar el impacto de los avances recientes de la tecnología del concreto en la industria del concreto es totalmente subjetiva. Por otro lado Mehta, diseñó un sistema para evaluar los avances considerando las siguientes categorías: tecnología compleja, costo de materiales y construcción, costo del ciclo de vida útil, producto amigable ambientalmente e impacto futuro en la industria del concreto, llegando a las siguientes conclusiones:

- ◆ Debido al proceso complejo de la tecnología, alto costo y bajo ambiente amigable del producto, parecen que el cemento "macro libre de defecto", los "cerámicos químicamente garantizados" y los morteros de polvo reactivo tendrán un insignificante impacto en la industria del concreto.
- ◆ Los concretos con aditivos superplastificantes con o sin silica fume y los compactables, continuarán teniendo buena aceptación en la industria.
- ◆ Debido a su tecnología simple, costo bajo, alta durabilidad y alto ambiente amigable del producto, los concretos superplastificantes con alto contenido de volumen de fly ash o escoria, tendrán un alto impacto en la industria. Considerables investigaciones y desarrollos se dirigen hacia el área de mezclas ternarias conteniendo cemento portland, silica fume, ceniza de cáscara de arroz y grandes volúmenes de fly ash o escoria.
- ◆ Es muy difícil predecir el futuro de los inhibidores de corrosión, los recubrimientos epóxicos del refuerzo, los recubrimientos superficiales y la protección catódica. Cuando estos se comparan con los concreto que contienen fly ash y escorias, tienen un alto costo y ambiente amigable bajo lo que marca una clara desventaja.

Finalmente podemos considerar que existe la tendencia de utilizar concreto de alta resistencia con agregado de peso ligero, sin embargo para la utilización de estos concretos existe poca información disponible sobre las propiedades mecánicas con resistencias superiores a los 100 MPa.

4.6. Bibliografía

- 4.1 Appert, O., Burger, J., "France's Forty Years of Experience in Offshore Technology", Proceeding, Offshore Technology Conference, OTC 8555, Houston, Texas, 1997.
- 4.2 Moksnes, J., Hoff, G.C., Gudmestad, O. T., Fjeld, S., "Concrete Platforms: History, Technological, Breakthroughs, and Future", Proceeding, Offshore Technology Conference, OTC 7630, Houston, Texas, 1994.
- 4.3 Leivestad, S., Stromme, B., "ISO Standard for Fixed Concrete Structures", Proceeding, Offshore Technology Conference, OTC 8422, Houston, Texas, 1997.
- 4.4 Sodha, N. A., Hoff, G. C., "Hibernia GBS Quality Challenges", Proceeding, Offshore Technology Conference, OTC 8400, Houston, Texas, 1997.
- 4.5 Mehta, P. K., "Advancements in Concrete Technology", Concrete International, USA, June 1999, pp 69-76.

5. VENTAJAS

En México se han realizado estudios de factibilidad para la construcción de plataformas de tipo gravitacional de concreto, para la explotación de hidrocarburos en el Golfo de México. Aquí se presentaron alternativas en la configuración de las plataformas, los sitios de construcción y los costos, la conclusión final fue que si era viable la construcción de este tipo de plataformas, pero los costos por construir el dique y la infraestructura necesaria eran elevados. Es comprensible esta situación porque el costo de construir una primer plataforma involucra directamente el sitio y la infraestructura, pero posteriormente con la construcción de otras plataformas se amortiza considerablemente porque ya existen los medios para la construcción.

Para poder construir cualquier estructura tenemos que realizar un estudio de que tipo de material podemos utilizar, considerando sus características, propiedades, fabricación y costo. Cambiar la costumbre de utilizar un material en la construcción de estructuras, es muy difícil si no tenemos los argumentos necesarios para realizar el cambio, ya se mencionó por ejemplo, la fabricación de barcos con concreto que han dado muy buenos resultados, este mismo punto se ha planteado a lo largo de este trabajo en las estructuras costafuera, sin embargo para poder concluir se menciona las ventajas que tiene el concreto sobre el acero, costos y mercado potencial, haciendo énfasis en el costo de vida útil de la estructura que ayuda amortizar la inversión considerablemente debido al incremento de la vida de servicio y al bajo mantenimiento que requieren las estructuras de concreto.

5.1. Concreto vs Acero

Los productores de hidrocarburos y los diseñadores de estructuras buscan formas innovadoras para reducir el costo de operación en los campos de explotación costafuera^(5.1). En el Mar del Norte se ha desarrollado más la tecnología para la fabricación de plataformas, sin embargo sin lugar a dudas esta tecnología se puede adaptar en otros lugares.

En el Golfo de México existen varios sitios de construcción potenciales, por ejemplo para fabricar estructuras de tipo TLP de concreto o acero, pero en realidad no se tiene experiencia en la fabricación de grandes volúmenes de concreto en la costa de USA y México, sin embargo esta tecnología se puede adaptar en estos lugares, debido a que existe experiencia en otras áreas similares. La fabricación de plantas nucleares, puentes y grandes edificios utilizan la técnica de la cimbra deslizante y la construcción de paneles prefabricados. Existe mano de obra en el área que puede ser fácilmente capacitada para utilizar estas técnicas nuevas. La tecnología también involucra el suministro y uso de agregados de peso ligero, este tipo proporciona mejoramiento en el bajo contenido de agua, resistencia a la fatiga y a la corrosión, comparada con los agregados de piedras naturales.

Estados Unidos realizó un estudio "Joint Industry Project" encaminado a buscar la factibilidad de construir estructuras flotantes en el Golfo de México en 1991, los objetivos principales fueron,

establecer los requisitos del sitio de construcción, manos de obra y una estimación de costos. Este estudio incluyó la construcción de dos cilindros de concreto, aplicando la técnica del slipform en diferentes épocas del año. El estudio determinó que se dispone de un sitio y un contratista para las operaciones de construcción en la costa garantizando un acceso en el agua de 14 m de profundidad, también que se pueden obtener una alta calidad en los concretos con agregados de peso ligero con materiales locales que se han desarrollado y buscado para satisfacer los requerimientos en las propiedades mecánicas y la trabajabilidad. Slipforming como método de construcción se puede utilizar en forma total en clima cálido y con el diseño de mezclas desarrollado. En resumen se concluyó que las plataformas flotantes de concreto se pueden construir en el Golfo de México considerando un sitio de construcción, materiales y mano de obra locales a un costo equivalente o menor que el de los noruegos.

El proyecto de la Heidrun TLP a demostrado que la construcción con concreto proporciona una gran flexibilidad y que las técnicas y métodos empleados en construcción y la programación son muy eficientes.

Basados en el contrato de construcción, donde los términos contractuales son idénticos para ambas alternativas concreto y acero, la diferencia en el costo es a favor del concreto. Los costos por ingeniería y dirección para el proyecto en total serán en la mayoría de los casos similares y no influye en ninguna alternativa. El programa de construcción para un almacén TLP es considerablemente menor que una para acero. La construcción de una armazón está lista para recibir las instalaciones de la cubierta aproximadamente en 15 meses. Este tiempo si se requiere podrá ser reducido significativamente. Los trabajos de concreto de la armazón de la Heidrun TLP, que tiene un tamaño considerable se construyó en 11 meses.

5.2. Ventajas del Concreto

Técnicamente el diseño de los detalles estructurales es muy importante para evitar la concentración de esfuerzo y tener baja resistencia a la fatiga ^(5,2). Los cascarones de concreto con grandes espesores tienen una gran resistencia inherente a la presión del agua, similar a la que tiene una pared delgada de acero. Los cambios graduales en los espesores de pared y en el acero de refuerzo se pueden realizar fácilmente, para alcanzar bajas concentraciones de esfuerzos y buena resistencia a la fatiga.

Las grandes cargas muertas de concreto en el casco dan como resultado grandes desplazamientos como el acero en el casco, generalmente alrededor de un 50 % mayor que los mismos equipos. Sin embargo, el casco de concreto tiene una mayor vida de servicio entre un 50 a 100 % mayor. La tendencia que se estima, es a reducir las fuerzas hidrodinámicas actuantes sobre el casco y la baja aplicación de las fuerzas, puesto que esto reduce la aplicación de momentos sobre los tendones.

Las estructuras flotantes se puedan diseñar con concreto aprovechando la densidad del concreto y el grosor de sus elementos. Las grandes estructuras de acero no tienen esta capacidad, por lo tanto requieren de grandes cantidades de lastre para sumergir la estructura. Con el concreto, el espesor de las paredes se incrementa para cubrir el exceso de lastre que se requiere, también este excesivo espesor aparente es usado para resistir el esfuerzo de la estructura.

Ventajas del concreto con respecto al acero.

- ◆ Técnicas comunes de construcción utilizando trabajadores no especializados, como los soldadores e inspectores en acero.
- ◆ Facilidad de construcción en estructuras estrechas e inclinadas, con técnica de cimbra deslizante.
- ◆ Eliminación de elementos rigidizantes en estructuras complejas.
- ◆ Grandes espacios abiertos.
- ◆ Incremento de la vida útil en la plataforma.
- ◆ Mayor resistencia a la corrosión y como consecuencia una menor inspección y mantenimiento.
- ◆ Mejores procesos para el diseño de cargas y el mejoramiento en el funcionamiento hidrodinámico en la estructura.
- ◆ El programa de construcción es más corto y proporciona flexibilidad.
- ◆ El concreto es resistente y capaz de soportar grandes cargas por impacto como el acero.
- ◆ El uso de concreto reduce sustancialmente el costo por mantenimiento dentro de la vida útil de la plataforma.

5.3. Costos de Construcción

Para el propietario es difícil elegir entre una plataforma de concreto y una de acero desde el punto de vista de costos, porque los criterios de comparación que muchas veces se le presentan no están bien definidos y tampoco las bases que se deben considerar para poder determinar su evaluación.

El costo estimado depende de los datos confiables de los materiales en el sitio, la ingeniería, programación, productividad y todos aquellos factores que se involucran y apoyan a un proyecto de construcción.

El costo para el diseño y construcción para plataformas con base gravitacional de concreto (GBS) se puede dividir en los siguientes grupos: Diseño y dirección, sitio de construcción, equipo mecánico y las operaciones marinas.

En general, el costo total está en función de los requerimientos: operacionales de la plataforma, los efectos ambientales y la profundidad de la plataforma, estos determinan el tamaño de la plataforma y su complejidad. Los requerimientos operacionales determinan cuanto peso puede soportar la plataforma, cuanta área es necesaria para los trabajos de operación, la cantidad de espacio necesario dentro de la plataforma, distribución de equipo, materiales y personal. Los efectos ambientales: aire, oleaje, corrientes, hielo, más las consideraciones geotécnicas para la cimentación de las estructuras,

en combinación con los requerimientos operacionales y las operaciones marinas influyen directamente sobre el tamaño de la estructura y los elementos estructurales que la formarán, también afecta la cantidad de lastre que pueda ser requerido para el peso de la cimentación. La profundidad del agua influye directamente sobre la altura de una estructura de base cimentada.

Los análisis que se realizan con las plataformas de acero por medio de factores, no se pueden aplicar a las plataformas de concreto. En este caso, se deben realizar costos que serán aprobados por los propietarios con conceptos bien definidos y de fácil interpretación. Los costos de fabricación del concreto construido hace más de 5 a 6 años no son iguales a los actuales porque el desarrollo de la tecnología del concreto se ha incrementado a lo largo del tiempo. Los ejemplos de esos desarrollos incluyen al concreto de alta resistencia, los agregados de peso ligero, la construcción de barcos y el uso del slipforming por ejemplo para formas complejas.

El costo de construcción total es la suma de varios aspectos y la mayoría de estos es afectado por el tamaño y la complejidad de la estructura. Los programas de construcción de más de 3 o 4 años no son comunes para las grandes plataformas del Mar del Norte. Para esas grandes plataformas, el sitio de construcción y las operaciones marinas son una pequeña parte del costo total. Para las pequeñas estructuras del Golfo de México, el tiempo de construcción es de 3 a 6 meses, porque los diseños son simples, en este caso el sitio de construcción y las operaciones marinas ocupan una gran parte del costo total pero no en el costo de construcción. Cuando los sitios de construcción ya están establecidos, el porcentaje por estos conceptos son significativamente pequeños y hacen que el costo total de las estructuras sea más económico.

5.4. Costo de Vida Útil

Cuando los propietarios comparan los costos de las plataformas de concreto contra las de acero, la inclusión del costo de vida útil de las plataformas en el análisis económico global se puede considerar o ignorar, en el caso de que este concepto no sea considerado, el concreto se ve afectado porque el costo del ciclo de vida de una plataforma de concreto será casi siempre mucho menor comparada con el acero. La experiencia con las plataformas de concreto existentes es que son virtualmente libres de mantenimiento. Esta característica se puede confirmar porque los problemas de mantenimiento en muchas de las plataformas en el Mar del Norte son principalmente en el equipo mecánico y partes de acero. Los reportes que frecuentemente se presentan a los propietarios, indican grandes cantidades de dinero empleado en plataformas de concreto para su rehabilitación y reparación, lamentablemente en estos reportes no se hace distinción alguna de que fue utilizado en instalaciones o equipo de acero, el dinero casi nunca es empleado en las partes de concreto de la estructura, afectando la reputación del concreto.

En años recientes se invirtió para la reparación y la rehabilitación en la estructura de varias plataformas de concreto en el Golfo de México, estas estructuras ya habían rebasado su vida útil de 20 años y no habían recibido mantenimiento durante este periodo. El costo de reparación fue menor

comparado con el costo total de una nueva estructura y además permitió la ampliación de su vida útil para usarlas otros 10 o 20 años más.

Las plataformas de concreto no tienen los mismos requerimientos de inspección que las plataformas de acero, las amplias superficies expuestas de la estructura de concreto permiten una inspección rápida y fácil para el personal y para las unidades de inspección remota. Las estructuras de acero, requieren de una inspección detallada de toda la soldadura en intervalos periódicos definidos por la certificación de autoridades. Una práctica común es inspeccionar todas las soldaduras por lo menos una vez cada cinco años, usualmente una quinta parte de la estructura es inspeccionada cada año mientras que una estructura de concreto se puede realizar totalmente. El costo de la inspección de la estructura de concreto puede ser menor hasta en un 10% del costo de la estructura de acero.

Varias certificadoras han aprobado una clasificación especial para las estructuras de concreto por que estas tienen un excelente registro de no necesitar mantenimiento. Esta clasificación especial, es también porque una estructura con armazón de concreto no se remueve de su sitio de producción para ser llevada a un puerto, donde se realizará una inspección en los mismos intervalos que una armazón de acero. Esta estructura puede permanecer en el sitio por largos períodos de tiempo y no interrumpir la producción de hidrocarburos que es la generación de ingresos económicos.

Sin embargo, el costo de la vida útil en el proceso de decisión para la selección del material a utilizar en una plataforma, no se aplica en el corto plazo. En los grandes desarrollos costafuera con grandes producciones de gas o petróleo, el costo de la inspección y mantenimiento, es una fracción muy pequeña del costo de producción de un barril de petróleo o de un metro cúbico de gas.

5.5. Mercado Potencial

Un ejemplo del uso potencial del concreto en las instalaciones costafuera, es la construcción de un total de 275 plataformas entre 1990 y 1995, en Asia y otras 24 plataformas en Australia. Las estructuras de acero costafuera tiene una inercia debido a que frecuentemente se usan y el factor principal es que los propietarios lo deciden. La decisión del propietario de usar una estructura de acero, es sin duda por no tener el conocimiento o los antecedentes necesarios para tomar una decisión en favor del concreto. El propietario usualmente tiene una información del costo presente para la fabricación e instalación de una estructura de acero y no de una de concreto. Por lo antes mencionado, el concreto tiene su mercado muy restringido y esto se debe a falta de conocimiento de sus propiedades y difusión.

Masubuchi and Terai realizaron un modelo simple para los factores que afectan la introducción total de un material o técnica nueva de construcción dentro de la industria marítima. Este modelo fue desarrollado para soldar y no para concreto pero también es aplicable para el concreto. Paradójicamente el concreto no es un material nuevo sino que es un material que es muy usado en la construcción en todo el mundo, pero este es nuevo para los propietarios de plataformas costafuera.

El factor inicial en el modelo se compone de tres puntos: político, económico y tecnológico. Dentro de un punto de vista político, ¿por qué usar concreto si hay acero?, ¿Que ventaja política tiene el propietario si el concreto se usa en lugar del acero?. Se ha mencionado que el concreto es un material del sitio, ya que se puede fabricar utilizando los materiales y al personal de la localidad donde se encuentre y no tiene que ser fabricado en lugares lejanos, lo que perjudicaría a la economía de la región. Políticamente, si este es fabricado localmente se crea una buena voluntad en la localidad y con las autoridades gubernamentales. Este tipo de política y otro tipo de razones se pueden argumentar para el uso del concreto a pesar de las preferencias y prejuicios de los propietarios.

Desde el punto de vista económico, el concreto usa personal menos calificado comparado con la construcción de estructuras de acero, lo cual lo deja en una proporción favorable. La fabricación del acero atrae grandes inversiones que se reflejan en instalaciones las cuales no existen para las estructura de concreto. Cuando el proyecto tiene que iniciar con la construcción del sitio se requieren grandes inversiones para la primer plataforma que se construya en una región, en este caso la primer estructura no podrá competir en costo con aquellas que ya tienen un sitio de construcción. Los propietarios no querrán incurrir en estos costos para un proyecto, cuando ellos podrán ir a otros sitios donde existan instalaciones para estructuras de acero, a menos que el margen entre las ofertas del acero y concreto sean entre el 20 y el 30 %, el riesgo adicional asignado por el propietario a las ofertas alivia su incertidumbre acerca del concreto, probablemente negará lo económico y escogerá la opción del acero. Esta práctica cambiará con el tiempo conforme existan más construcciones de plataformas de concreto y entonces su uso será más aceptado.

El último punto dentro del primer factor son los requerimientos tecnológicos unido a las decisiones económicas. Un ejemplo, es la plataforma GBS Troll, su programa de construcción empezó en Noruega en 1992 teniendo un período de vida de útil de 70 años y una profundidad de 305 m. Para el ambiente donde la plataforma sería localizada, una estructura de acero no tendría la suficiente resistencia a la fatiga, además no resistiría la deterioración debido al agua de mar en el período de vida que se propuso, el concreto si puede satisfacer estos requerimientos. Algunos otros factores tecnológicos pueden influenciar el proceso de decisión cuando el concreto pueda realizar algo que el acero no, estos factores son la prolongación de la vida a la fatiga, evitar problemas de soldadura, mejoramiento de la resistencia con el tiempo, mantenimiento, etc.

Una vez que el factor inicial en el modelo es satisfecho, el resto de los factores caen dentro de las características del concreto como material que da presencia a la tecnología del concreto, permitiendo de este modo satisfacerlos ya que la tecnología esta bien documentada y desarrollada y sigue su investigación para encontrar la calidad que se requiere dentro de este tipo de estructuras.

Los propietarios piensan que el concreto es un material novedoso y esta es una idea errónea acerca del material y de su uso. Algunos de los conceptos técnicos que se debe dar a conocer a los propietarios en el uso de concreto son: la calidad del concreto, la necesidad de materiales baratos con características especiales, prácticas de construcción comunes, consideraciones de diseño especiales, sitios de construcción y costos de mantenimiento mínimos.

5.6. Bibliografía

- 5.1 Rajabi, F., Tuturea, D.P., Mangiavacchi, A., "Economic and Performance Evaluation of Concrete vs. Steel TLP's for the Gulf of Mexico", Proceedings, Offshore Technology Conference, OTC 6348, Houston, Texas, 1990.
- 5.2 Lokken, R. T., Gunderson, R. H., Davenport, G. F., "Concrete Tension Leg Platforms for the Gulf of Mexico", Proceedings, Offshore Technology Conference, OTC 6349, Houston, Texas, 1982.

CONCLUSIONES

Uno de los principales problemas que afronta el concreto paradójicamente es que es el material más común que se utiliza en la construcción, lo es porque después de mucho tiempo comprobado el buen desempeño y economía comparado con otros materiales de construcción, sin embargo este punto se ha vuelto en su contra ya que la mayoría de las personas involucradas en la construcción consideran que es un material "común" y que no ha tenido avances tecnológicos de importancia. Esta consideración en parte ha frenado la aplicación de los adelantos en la Tecnología del Concreto en nuestro país, si existen organismos y empresas nacionales que se dedican al desarrollo del concreto pero aún falta mucho por hacer en este renglón ya que a nivel académico las universidades no tiene planes de estudios que muestren las partes principales de la Tecnología del Concreto.

Se tiene que reconocer que esta falta de academia, ha hecho que los problemas estructurales que presentan las estructuras se estudien frecuentemente desde el punto de vista del análisis estructural y no que se estudie la patología del concreto que tiene la estructura, que muchas veces es la causa de los problemas que se presentan.

Para dar impulso al conocimiento de la tecnología es necesaria la formación de comités y organismos de investigación y difusión, de esta forma se aplicarían los avances tecnológicos del concreto en los proyectos de infraestructura que se desarrollen en el país.

Los centros de investigación son muy importantes porque entre otros puntos se dedicarían a realizar pruebas con los bancos de materiales y materias primas existentes en nuestro nación.

El proceso de diseño del concreto debe abarcar la identificación de las propiedades y características que necesita adquirir para poder desempeñar apropiadamente la colocación y funcionamiento interno y externo en la estructura que se construya. Esta actividad ayudará a adquirir datos para diseñar la mezcla y las características de los materiales que la forman, hasta aquí ya no podemos pensar en la creación de un concreto común sino apropiado al medio y a la función que desempeñe, en la etapa posterior que es la fabricación se tiene que tener mucho cuidado y es aquí donde el constructor debe tener los mecanismos que garanticen la calidad de las actividades de mezclado, colocación, compactación y curado del concreto, actividades muy comunes y de gran importancia para obtener un buen concreto. Si estas etapas se garantizan en la fabricación del concreto, no existirán problemas en el desempeño del concreto y obtendremos un mantenimiento casi nulo durante su vida útil.

Indudablemente hoy en día el ingeniero estructurista debe tener conocimientos en la Tecnología del Concreto, para poder especificar las características que debe tener el concreto de acuerdo al medio ambiente y función de la estructura y no considerar únicamente las cargas a las que estará sometida, para estimar el valor de la resistencia del concreto que es el único parámetro de diseño que considera. A nivel nacional ya existe la norma, NMX-C-403-ONNCCE-1999 "Industria de la Construcción – Concreto Hidráulico para uso Estructural", que podemos considerar que es la guía más reciente en la fabricación de concreto hidráulico, aquí se mencionan puntos muy importantes como la inspección y la durabilidad, temas que ya no se deben de omitir en cualquier construcción que utilice concreto

Las estructuras costafuera en nuestro país únicamente se han construido con acero estructural, sin embargo la investigación realizada nos permitió mostrar el gran potencial que tiene el concreto en esta área, para que se pueda considerar la fabricación de plataformas de concreto en la explotación de hidrocarburos en nuestros litorales, considerando principalmente entre otros puntos de importancia el aumento de la vida útil, los grandes ahorros de mantenimiento y la reutilización de la estructura. Además, los avances de la tecnología del concreto en las estructuras costafuera no son de aplicación única, sino que son también aplicables a otro tipo de estructuras como son: la edificación, puentes, pavimentos, etc.

En la fabricación de las estructuras costafuera, se ha utilizado el Concreto de Alta Resistencia y desde su primera aplicación a principios de los 70's, con resistencias de 300 kg/cm^2 a llegado recientemente a los 700 kg/cm^2 y su densidad de $2,400$ a los $1,950 \text{ kg/m}^3$, aquí se observa dos tendencias que son el aumentar la resistencia y disminuir el peso y la otra característica es la durabilidad, a este concreto que se ha desarrollado en esta área es el Concreto de Alta Resistencia de Alto Desempeño con Agregados de Peso Liger o de Baja Densidad. Las investigaciones tienden al desarrollo de concretos con mayor resistencia y menor densidad.

En México ya existen aplicaciones de concreto de alta resistencia, sin embargo todavía no son de aplicación común. El principal problema que la investigación menciona en este tipo de concretos son sus propiedades, las fórmulas que emplean; por ejemplo para el módulo de elasticidad los comités americanos y europeos varían. Estas fórmulas se pueden utilizar porque sirven de referencia sin embargo, para encontrar un dato preciso se tienen que realizar pruebas de laboratorio previas a la construcción de la estructura.

Los agregados de peso ligero ya se han estudiado con anterioridad, el comité del ACI hace mención de la utilización de este tipo de agregados en concretos estructurales, pero tiene una limitación en su resistencia a la compresión, la cual no llega a considerar a los concretos de alta resistencia, por lo que este tipo de concretos son relativamente nuevos en su empleo. Los planes futuros en las investigaciones del concreto y en la industria de los agregados ligeros incluyen esfuerzos substanciales en la evaluación de la conducta estructural de este tipo de concreto con agregados de peso ligero.

La utilización de concretos de alta resistencia con agregados de peso ligero disminuye el costo de construcción de una estructura. Mientras este concreto cuesta más por m^3 que el de peso normal, la estructura construida finalmente cuesta menos como resultado de la reducción de peso y por consiguiente el costo bajo de la cimentación, esta es la razón básica en la mayoría de los casos. La economía entonces depende de alcanzar un balance apropiado entre el costo del concreto por volumen, unidad de peso y propiedades estructurales. El concreto de peso normal de menor costo por metro cúbico, será muy pesado dando como resultado grandes cargas muertas, incrementando los tamaños de las secciones de elementos estructurales, requiriendo más concreto y acero de refuerzo. Los concretos de alta resistencia con agregados de peso ligero serán tal vez igual de caros, pero más

ligeros permitiendo reducir las cargas muertas, reducen las dimensiones de la sección, utilizan menos acero de refuerzo y cimbra a bajos costos.

La baja permeabilidad es la propiedad más importante del concreto expuesto al agua de mar, esta propiedad determina directamente el grado de durabilidad de la estructura. Para obtener un concreto con buenas condiciones de durabilidad se requiere de los siguientes factores: proporción del C₃A en el cemento, relación agua/cementante bajas, agregados, materiales finamente divididos puzolanas escoria de altos hornos, mezclado, transportación, vaciado, compactación, acabado superficial, curado y prevenir la presencia de agrietamientos.

Varios países del mundo realizan investigaciones en la Tecnología del Concreto. Algunas de estas investigaciones utilizan herramientas muy avanzadas ya que tiene más adelantos, pero el problema principal para los investigadores es que no todos pueden utilizar estas herramientas tan sofisticadas, esto limita su aplicación en otros países. Otro problema que se presenta en la investigación es que se estudia un tema específico con dos variantes muy directas pero no existe información precisa, en el estudio del comportamiento de la resistencia al fuego del concreto, en Europa se investigó con fuego de hidrocarburos y en USA con fuego de celulosa, existen variantes en estos dos estándares y por lo tanto los resultados variaban, bajo este esquema en los experimentos se deben mencionar las condiciones de prueba que se apliquen, por ejemplo el tipo de fuego, el contenido de humedad, la permeabilidad, etc. También la esencia de los problemas de investigación en la Tecnología del Concreto es la demora o fragmentación de información y los datos de investigaciones, la excesiva confidencialidad en los métodos de prueba y estándares.

La calidad de las obras es el requisito que hay que cumplir con el cliente, esta se puede lograr en las grandes obras por medio del equipo de calidad que se relaciona directamente con el de ingeniería y el de construcción. Con la incorporación de este grupo de calidad en toda obra, deben operar tres departamentos que garanticen la calidad. La calidad de las obras empieza en la etapa del desarrollo del proyecto, la construcción y operación. En nuestro país las empresas constructoras empiezan a obtener su certificación ISO, como el caso de ICA que ya tiene su manual de procedimientos, lo que nos hace pensar en una buena calidad de sus obras, sin embargo aún falta implementar programas que garanticen la calidad de las obras.

pound = 0.454 kg

inche = 2.54 cm

1 psi = 7.04×10^{-2} kg/cm²

1 MPa = 145 psi

1 MPa = 10.208 kg/cm²

1 GPa = 1.45×10^5 psi

1 GPa = 10.208×10^3 kg/cm²