ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingenierías en Ciencias de la Tierra

"HORMIGONES LIVIANOS DE ALTO DESEMPEÑO"

TESINA DE GRADO

Previo la obtención de Título de:

INGENIERO CIVIL

Presentado por:

Diana Elizabeth Hou Huang

José Luis Caicedo Chica

Alberto Augusto Falconí Pincay

Guayaquil – Ecuador

2009

TRIBUNAL DE GRADUACION

Ing. José Camposano Luque

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral".

Diana Elizabeth Hou Huang

José Luis Caicedo Chica

Alberto Augusto Falconí Pincay

RESUMEN

El presente trabajo trata sobre los hormigones livianos de alto desempeño, y en este se muestran las bondades de este tipo de hormigones, los distintos materiales que lo componen y sus propiedades singulares que lo diferencian de los hormigones convencionales y que además lo hacen un material de altas prestaciones en la construcción de obras civiles. Su peso ligero depende en gran parte del tipo de agregado que se utilice, generalmente su densidad volumétrica se aproxima a los 1900 kg/m^3, la cual representa un disminución del 25% en comparación con los hormigones de densidad normal de 2400 kg/m^3. Indicamos cuales son los procesos de elaboración de los agregados livianos artificiales más utilizados para hacer hormigones livianos de alto desempeño como la arcilla expandida o arlita, la escoria expandida o escoria siderúrgica y la pizarra expandida. También se presenta una breve reseña histórica de los primeros usos de los hormigones livianos y mostramos las diversas obras que han sido construidas exitosamente con los hormigones livianos de alto desempeño en los últimos años.

INDICE GENERAL

ABREVIATURAS

ACI: American Concrete Institute
ASTM: American Society for Testing Materials
a.C.: Antes de Cristo
CO_2: Dióxido de Carbono
d.C.: Después de Cristo
E: Módulo de Elasticidad
EE.UU.: Estados Unidos
f´c: Resistencia del hormigón a la compresión
GPa: Giga Pascales
HAD: Hormigones de Alto Desempeño
HLAD: Hormigones Livianos de Alto Desempeño
HLE: Hormigón Liviano Estructural
kg/m^3: Kilogramos por metros cúbicos
km: Kilómetros
kN/m^3: Kilo-Newtons por metros cúbicos
m: Metros
mm: Milímetros
MPa: Mega Pascales
m/s: Metros por segundo
USA: United States of America
°C: Grados centígrados

INDICE DE FIGURAS

INDICE DE TABLAS

Capítulo I

INTRODUCCION

Debido al gran desarrollo que ha tenido la industria de la construcción, hoy en día existe en el mercado una gran variedad de hormigones destinados a mejorar la calidad, productividad y disminuir costos en las obras construidas con este material. Dentro de ese grupo, el que más está destacando es el correspondiente al de los hormigones de alto desempeño o también conocido como hormigones de altas prestaciones. En este trabajo trataremos de uno en particular, el Hormigón Liviano de Alto Desempeño.

En el campo de las obras civiles el peso de las estructuras ha sido siempre un factor muy influyente tanto en el diseño como en la construcción. El hormigón convencional, cuyo peso volumétrico fluctúa entre los 2200 y 2400 kg/m³, constituye un porcentaje considerable del peso que una estructura debe soportar; por tanto, si logramos disminuir este peso sin alterar la resistencia del hormigón obtendremos una mejora significativa en todos los aspectos de la obra. Con los hormigones livianos de alto desempeño podemos lograr aun más, puesto que la resistencia de este hormigón puede sobrepasar los 60 MPa, lo cual es una gran ventaja si lo comparamos con los hormigones convencionales de 28 MPa con los que se construyen muchas de las obras de nuestro país.

1.1 Antecedentes de hormigones livianos convencionales

Los primeros hormigones livianos utilizados para construir edificaciones surgieron en el Imperio Romano en los años 20 a.C. Estos primeros hormigones eran resultado de la mezcla de cementos puzolánicos con materiales de baja densidad como lo es la piedra pómez. Entre las obras realizadas con este tipo de hormigón destacan: La cúpula del Panteón de Agripa (25 a.C.), los arcos del Coliseo Romano (70 d.C.), las bóvedas de las Termas de Caracalla (212 d.C.), los nervios de la bóveda de la Basílica de Majencio (306 d.C.), con luces mayores a 25 metros (1,2).

Con los avances en la tecnología se experimentaron con nuevos tipos de agregados livianos como las arcillas, pizarras y escorias expandidas procedentes de plantas industriales, también se ha experimentado con agregados artificiales plásticos como el poliestireno, y agregados ricos en sílice como la cascarilla de arroz (1).

Los primeros edificios construidos con hormigones estructurales livianos aparecieron luego de la primera Guerra Mundial. En el año 1922 se construyó la ampliación del Gimnasio de la escuela de deportes acuáticos de la ciudad de Kansas y fue este el primer edificio construido con hormigón liviano estructural en la historia. El suelo donde se cimentó este edificio tenía una capacidad portante muy baja, por esta razón se optó por utilizar un hormigón liviano y poder así aligerar el peso que se descargaba al suelo (3).

Para el año 1928 se realizó un estudio para incrementar el número de pisos del edificio de oficinas de la compañía de teléfono Southwestern Bell en la ciudad de Kansas. Originalmente el edificio constaba con 14 pisos, se realizaron estudios en la cimentación y se determinó que a la estructura se le podía adicionar 8 pisos más utilizando hormigón convencional. Pero debido a que se utilizó hormigón liviano fabricado con arcillas expandidas se pudo aumentar la estructura hasta 14 pisos más. Al final la estructura quedo con un total de 28 pisos, el doble de lo que fue construido originalmente (3).

En nuestro país se han llevado a cabo estudios sobre hormigones livianos elaborados con materiales locales y en éstos se ha concluido que el potencial de este tipo de hormigones para construcciones de obras civiles es muy amplio y con mayor razón lo serán los hormigones livianos de alto desempeño.

1.2 Conceptualización de los Hormigones Livianos de Alto Desempeño

Los Hormigones Livianos de Alto Desempeño son también conocidos como HLDA (por sus siglas en español) o HPLC (por sus siglas en inglés). Estos hormigones pueden ser conceptualizados como un hormigón de alta resistencia que a su vez posee las características de un hormigón liviano estructural (HLE) (4).

Según el código ACI-318, para que un hormigón entre en el grupo de los hormigones livianos estructurales, este debe tener como máximo una densidad de 1840 kg/m^3 y una resistencia mínima a la compresión de 17 MPa a los 28 días. Un hormigón de alta resistencia es considerado como tal cuando su resistencia a la compresión es mayor que 50 MPa.

Los HLAD mostrados en este trabajo presentan densidades un poco mayores al límite máximo del ACI para hormigones livianos. Sin embargo son considerados como hormigones livianos, debido que su densidad sigue estando por debajo de las densidades de hormigones convencionales (densidad normal = 2400 Kg/m^3).

El uso de hormigones livianos convencionales como hormigones estructurales estaba limitado por la resistencia del hormigón. Actualmente, con los avances en los estudios de la tecnología del hormigón se pueden elaborar hormigones livianos con resistencias a la compresión de 69 MPa a los 28 días según los estudios realizados por Mauricio López y Lawrence F. Kahn. El poder realizar hormigones con este tipo de características representa varias ventajas en el área de las construcciones civiles (4).

Capítulo 2

PROPIEDADES DE LOS HORMIGONES LIVIANOS DE ALTO DESEMPEÑO

Las propiedades que más destacan en los hormigones livianos de alto desempeño son su baja densidad y su alta resistencia a la compresión. Sin embargo, es importante conocer que este tipo de hormigones posee otras propiedades que amplían su uso más allá de un hormigón estructural.

2.1 Propiedades físicas

Peso Volumétrico: Esta propiedad depende en gran parte del tipo de agregado utilizado. Para hormigones livianos estructurales fabricados con agregados livianos como la arcilla o pizarra expandida, el peso volumétrico aproximado es de 1900 kg/m^3 (1).

Conductividad Térmica: La capacidad de conducción de energía térmica de un material está dada por su densidad, mientras más denso es un elemento mayor es su conductividad térmica. Por tanto los hormigones livianos son de baja conductividad térmica y por ende buenos aislantes del calor (1).

Aislamiento acústico: Las cavidades dentro de los agregados livianos permiten amortiguar las vibraciones.

Trabajabilidad: Debido a la baja densidad de los agregados, es más fácil para los obreros manipularlo cuando está en estado fresco en comparación con los hormigones convencionales (1).

Porosidad: Los hormigones livianos de alta desempeño se fabrican con tamaños máximos de agregados inferiores a los tamaños de los hormigones convencionales, lo cual se manifiesta en una menor presencia de vacíos en la pasta y por ende menor porosidad de la misma.

Resistencia al fuego: Debido al uso de agregados livianos manufacturados en procesos de elevadas temperaturas los hormigones livianos de alto desempeño poseen gran resistencia a temperaturas elevadas y al fuego (1).

Curado interno: Debido al agua contenida dentro de los agregados livianos, las partículas de cemento experimentan un curado interno cuando esta agua es liberada. Este efecto particular de los hormigones con agregados livianos permite una mejor hidratación de las partículas cementicias que se encuentran en la zona de transición interfacial (5).

Adherencia: Debido a la rugosidad de la superficie de los agregados livianos, la adherencia entre la pasta y el agregado es mayor que en los hormigones con agregados normales.

Retracción: El agua contenida dentro de los agregados livianos compensa los cambios volumétricos debido al consumo de agua en las reacciones químicas del cemento y a la evaporación (4).

Resistencia a la compresión: El uso de tamaños máximo de agregados menores a los convencionales y de adiciones cementicias hace que estos hormigones sean de altas resistencias.

Durabilidad: Debido a la baja porosidad de la pasta, los agentes atmosféricos no penetran en el hormigón; lo cual permite que las estructuras sean más resistentes al intemperismo.

Módulo de elasticidad: El módulo de elasticidad está relacionado con el tipo de agregado del hormigón. Los hormigones con agregados livianos presentan módulos de elasticidad relativamente bajos (1).

2.2 Materiales cementantes

Hoy en día, es común el uso de adiciones minerales como el humo de sílice o micro sílice y cenizas volantes para elaborar hormigones de alto desempeño. Debido a estas adiciones de extrema finura y químicamente reactivas, se logra mejorar la compacidad del material ya que los vacios de empaquetamiento granular son llenados (6).

La ventaja de utilizar estas adiciones es que poseen efectos a mediano y largo plazo. Cuando el cemento portland se hidrata produce gel de silicato hidratado e hidróxido de calcio, las adiciones reaccionan con el hidróxido de calcio y producen más compuestos que le dan al hormigón mucha más resistencia (6).

Es de gran importancia tomar en cuenta que las variaciones de las propiedades físicas o químicas de estas adiciones minerales pueden causar cambios apreciables en las propiedades de los HAD. Es por esto que antes de fundir un elemento con un hormigón que contenga estas adiciones es necesario que se les realice ensayos de aceptación y uniformidad, y además se debe investigar minuciosamente sus propiedades en el desarrollo de resistencias y su compatibilidad con los otros materiales de la mezcla de hormigón. Para determinar si las adiciones cumplen con los requisitos de aceptación se puede verificar las normas ASTM C1240 cuando se trate de humo de sílice y la norma ASTM C618 cuando se trate de ceniza volante.

2.3 Agregados livianos

Los agregados cumplen un papel de gran importancia en el hormigón, y en el caso de los hormigones livianos de alto desempeño la baja densidad de éstos es la que permite elaborar los hormigones livianos.

Actualmente, a nivel internacional existen muchas industrias que elaboran diferentes tipos de agregados livianos. Para elaborar hormigones livianos convencionales, es frecuente el uso de materiales como la piedra pómez, el poliestiereno, las arcillas, escorias y pizarras expandidas. En este trabajo hablaremos de los tres últimos materiales mencionados, ya que éstos son los que aportan más resistencia al hormigón y por ende son los utilizados para realizar hormigones livianos de alto desempeño.

Arcilla expandida: También conocida como Arlita, es un material de origen cerámico que tiene propiedades aislantes y es producido industrialmente. La materia prima para fabricar este producto es la arcilla pura extraída de canteras a cielo abierto. Luego de la explotación en la cantera, ésta pasa por un proceso de refinamiento para obtener un producto más puro. Esta arcilla pura se almacena en silos cerrados herméticamente donde son homogeneizados y secados (7).

Cuando la arcilla ya está seca, ésta pasa al proceso de molienda donde se obtiene un polvo impalpable denominado crudo. Este crudo es aglomerado con agua en los platos granuladores, y por efecto de la rotación de los platos, éste se redondea hasta formar unas esferas de barro de tamaño controlado cuya granulometría varia de 0 a 4 mm de diámetro (7).

La expansión de la arcilla se lleva a cabo en hornos rotativos gracias a un choque térmico a 1200 ºC. A esta temperatura, la arcilla empieza a fundir y al mismo tiempo la materia orgánica que se encuentra en el interior de la arcilla empieza a hacer combustión. Los gases de la combustión tienden a escapar de la esfera y expanden la bola de barro hasta alcanzar 5 veces su tamaño original (7,8).

La arcilla expandida es un agregado duro, redondeado de alta porosidad, de color marrón claro y con un peso específico que puede variar entre 270 y 600 kg/m³ aproximadamente. Posee una superficie rugosa y pueden ser fabricadas en granulometrías variables entre 0 y 40 mm. No es un agregado corrosivo, tiene propiedades aislantes y son capaces de resistir el fuego. Además, no se deteriora al estar expuesto al sol (7).

Fig 01. Arcila expandida.

Fig 01. Obtenida de la referencia (8)

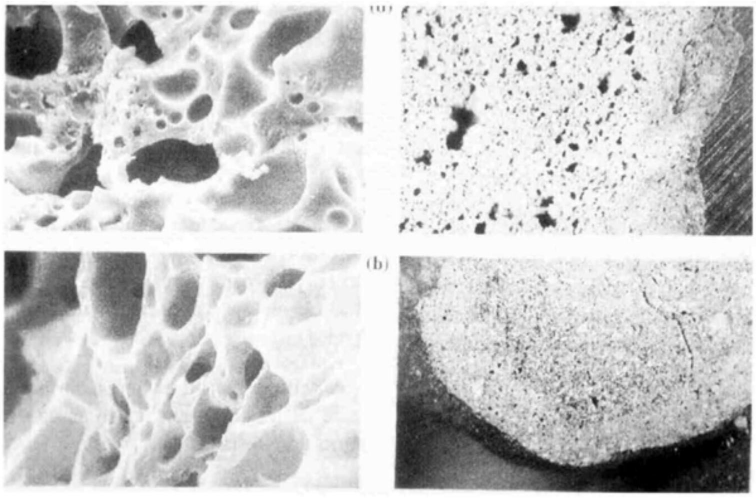

Fig 02. Arcilla expandida vista en microscopio

Observada en el microscopio, la arcilla expandida presenta una estructura de poros no comunicados.

<u>Pizarra expandida</u>: Similar a la arcilla expandida, presenta un tono más oscuro, el proceso de fabricación es muy similar, el producto final es algo más pesado pero suele verse compensado por una resistencia algo mayor (7).

Fig 03. Muestra de pizarra expandida

Fig 02. Obtenida de *www.firstrays.com/PrimeAgra/compare2.htm*

Fig 03. Obtenida de la referencia (8)

<u>Escoria expandida</u>: A este agregado se lo conoce por varios nombres, como son: escoria espumosa, escoria esponjosa, pómez artificial o pómez siderúrgica. Es un residuo impuro, compuesto principalmente de calcio, hierro, aluminio y silicato de magnesio, que se forma en el proceso de producción de arrabio, acero y en la fundición de metales como el cobre, el plomo o el níquel (7).

Para producir escorias expandidas, el producto que sale del horno debe de ser sometido a un proceso de enfriamiento moderado. En algunos métodos, esta expansión se puede lograr utilizando agua en pequeñas cantidades a la escoria fundida. El agua se convierte en vapor y produce el hinchamiento de la escoria, luego pasa a ser enfriado en tambores rotativos.

Presenta una estructura muy porosa, su forma depende del tipo de sistema de enfriamiento, pero por lo general, tiene formas más o menos esféricas y son de color naranja claro (7).

Hasta el momento, hemos observado que el agregado liviano manufacturado cumple uno de los papeles más importantes del HLAD. Por esta razón, es de suma importancia que todas sus características sean garantizadas y controladas por sus fabricantes. La norma ASTM-C330 establece todos los requerimientos que deben de tener los agregados de peso ligero para ser utilizados en hormigones livianos.

Capítulo 3

APLICACIONES

Actualmente en América Latina el uso de HLAD no es notorio, aunque países como Chile ya están empezando a invertir en el desarrollo de este nuevo material. Sin embargo, en países como Noruega y EE.UU. el uso de HLAD en obras civiles lleva años. Se lo ha utilizado en diferentes tipos de obras como edificios, puentes, obras marinas y elementos prefabricados.

3.1 Uso de HLAD como hormigón estructural

El uso del HLAD busca reducir la carga muerta de una estructura y aprovechar sus altas resistencias con el fin de que las dimensiones de los distintos elementos estructurales se reduzcan para abaratar costos y reducir tiempos de ejecución. Los HLAD poseen densidades entre 1850 y 2000 kg/m^3, lo cual es aproximadamente un 25% más ligero que los hormigones convencionales con densidades entre 2200 y 2400 kg/m^3.

Para el diseño de hormigones livianos estructurales, se debe seguir los reglamentos y recomendaciones del código ACI 318. Durante la etapa del diseño de HLAD, es necesario considerar ciertas particularidades de este hormigón; si bien es cierto, su resistencia es mayor que la de los hormigones convencionales, su módulo de elasticidad (E) es un poco menor.

El valor del módulo de elasticidad de los hormigones aumenta conforme su resistencia aumenta, pero el factor que más influencia en este valor es el tipo de agregado que se utilice. En hormigones convencionales entre 21 y 47 MPa, es común tener valores entre 30 y 39 GPa de módulo de elasticidad. Según los resultados de la investigación Mauricio López y Lawrence F. Kahn el valor de E para los HLAD está entre los 27 y 28 GPa aproximadamente. Un módulo de elasticidad más bajo se refleja en una estructura menos rígida y más susceptible a las deformaciones (4).

Cuando utilizamos HLAD para elementos pretensados, debemos considerar los cambios volumétricos que sufre el hormigón puesto que éstos influyen en la fuerza de precompresión que se le aplica al elemento. Si el hormigón cede ante la fuerza de compresión que le ejerce el acero de presfuerzo, el acero se relaja produciendo así perdidas en la fuerza de tensado.

Las deformaciones que se dan en el hormigón son de dos tipos:

Flujo plástico: Es la deformación que sufre el hormigón continuamente en el tiempo cuando a éste se le aplica un carga o un esfuerzo constante. La deformación del concreto por flujo plástico es proporcional a la magnitud del esfuerzo que actúa en éste. Los concretos de alta resistencia presentan menor flujo plástico que los convencionales. La tasa de deformación de flujo plástico disminuye conforme avanza el tiempo (9).

Retracción: La retracción es una pérdida de volumen del hormigón y puede ser por secado, química o por carbonatación.

La retracción por secado se produce por la pérdida de agua en el hormigón. Las mezclas de hormigones convencionales sin aditivos poseen más agua que la requerida para la hidratación del cemento con el fin de que ésta sea más trabajable. Cuando el hormigón se lo expone al aire gran parte del agua libre se evapora, la cantidad que se evapore dependerá de los factores ambientales. A medida que el hormigón pierde agua, éste se retrae en volumen. La retracción genera esfuerzos de compresión y tensión en el hormigón; si los esfuerzos de tracción son muy grandes pueden presentarse grietas poco agradables y perjudiciales (9).

La retracción autógena se debe a la reacción química del cemento con el agua. Cuando el cemento se hidrata, éste consume las partículas de agua ocasionando una disminución en el volumen de la pasta ya que los productos de la reacción ocupan menos volumen que los reactantes. La retracción de carbonatación es también una retracción química y se da por la reacción del CO_2 del aire y los constituyentes hidratados. El hidróxido de calcio de la pasta hidratada se combina con el dióxido de carbono que se encuentra en el aire para formar carbonato de calcio. Debido a que el carbonato de calcio tiene menor volumen que el hidróxido de calcio, se produce una disminución en el volumen del hormigón (10).

Si el elemento se encuentra en zonas de elevada evaporación, la pérdida de agua es más crítica. Cuando se trata de HLAD fabricados con agregados livianos porosos, éstos cambios volumétricos son amortiguados por la liberación de agua atrapada en los poros de los agregados.

3.2 Obras Civiles construidas

Raftsundet Bridge Project

El puente Raftsundet tiene una longitud total de 711 m con un tramo principal de 298 m. Fue el tramo de hormigón tipo cantiléver más largo del mundo cuando éstos fueron unidos en Junio 24 de 1998. El puente fue abierto al tráfico el 6 de Noviembre de ese mismo año (11).

El puente cruza una de las principales rutas de transporte marítimo entre dos islas de Lofoten, al norte de Noruega. La estructura está expuesta a un severo clima de viento con un diseño de velocidad de las ráfagas de viento de casi 60 m/s. Le rodea una topografía de altas montañas superando los 1000 m sobre el nivel del mar y las fluctuaciones de viento crea fuerzas de gran magnitud en el puente, afectando sobre todo a las columnas y vigas. Debido a esto, en el tramo principal, se usó hormigón liviano con alto desempeño con una densidad endurecida de 1975 kg/m³ y resistencia a la compresión a los 28 días de 60 MPa. El resto de la superestructura y columnas fueron construidas con hormigón de densidad de 2400 kg/m³ (densidad normal) y resistencia a los 28 días superior a 65 MPa (11).

Fig 04. Vista panorámica de puente Raftsundet.

Fig 04. Obtenida de *http://bridgepros.com/projects/Raftsundet/*

El puente fue construido con elementos post-tensados, colados en sitio. La sección del cajón está apoyada en tres filas de columnas rectangulares que proporcionan una altura libre de 46 m. Los cuatro tramos tienen 86, 202, 298 y 125 m de longitud, respectivamente. El HLAD se utilizó en los 298 m centrales del tercer tramo como se indica en la figura (11).

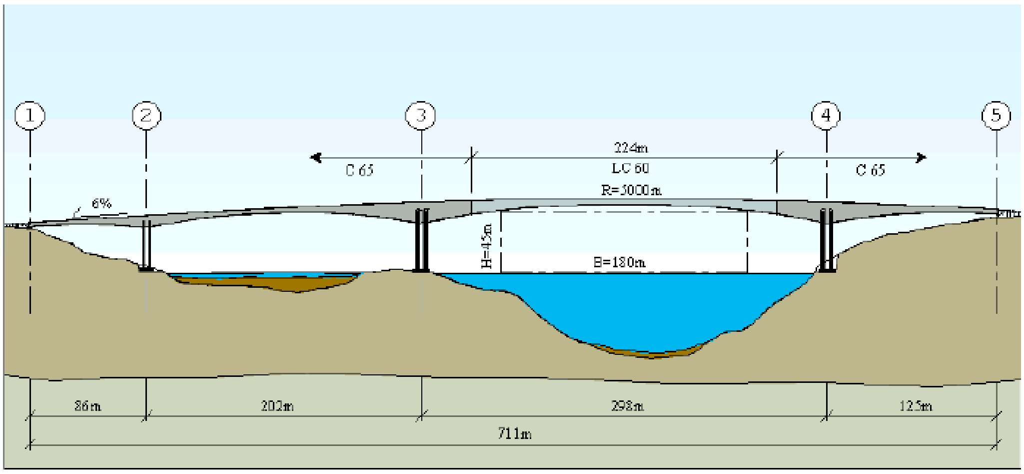

Fig 05. Esquema de ubicación de secciones postensadas de HLAD

Fig 06. Construcción del tramo con HLAD

Fig 05 y 06. Obtenidas de referencia 11

Todo hormigón para el proyecto fue elaborado en plantas situadas en una pequeña aldea a unos 20 km al oeste del puente, y fueron transportados en camiones mezcladores al sitio (11).

A continuación se muestran resultados de los ensayo en el hormigón del período de noviembre de 1997 a febrero de 1998.

Tabla I. Resultados de ensayos del hormigón

Resistencia a compresión (28 días)	**Hormigón de 65 MPa (densidad normal)**	**Hormigón liviano de 60 MPa**
Número de muestras Promedio estándar Desviación estándar	68 71,9 MPa 5,8 MPa	68 65,9 MPa 3,7 MPa
Módulo de Elasticidad (28 días)	**Hormigón de 65 MPa (densidad normal)**	**Hormigón liviano de 60 MPa**
Número de muestras Promedio estándar Desviación estándar	4 27,5 GPa 4,1 GPa	4 23,5 GPa 1,1 GPa
Densidad (28 días)	**Hormigón de 65 MPa (densidad normal)**	**Hormigón liviano de 60 MPa**
Número de muestras Promedio estándar Desviación estándar	36 24,63 kN/m^3 0,28 kN/m^3	36 19,32 kN/m^3 0,30 kN/m^3
Contenido de aire (28 días)	**Hormigón de 65 MPa (densidad normal)**	**Hormigón liviano de 60 MPa**
Número de muestras Promedio estándar Desviación estándar	70 4,0 0,6	65 4,4 0,7

Tabla I. Obtenida de referencia 11

Ruta 33, puente sobre el rio Mattaponi

A mediados de los años 90, el Departamento de Transporte en Virginia en cooperación con la Administración Federal de Carreteras inició un programa en el desarrollo e implementación del Concreto de Alto Desempeño. En un inicio, el programa trabajó en hormigones con densidades normales, alta resistencia, baja permeabilidad y control en temperatura. Luego, en el avance en los diseños se utilizó agregados livianos dando lugar a los hormigones livianos de alto desempeño y baja permeabilidad (12).

En la Ruta 33 sobre el río Mattaponi se construyó un puente con una longitud total de 1052 m. Para este puente, la resistencia especificada para las vigas de hormigón fue de 56 MPa con una densidad de 2000 kg/m^3, 24 GPa de módulo de elasticidad y un contenido de aire de $4{,}5 \pm 1{,}5\%$ (12).

Fig 07. Ruta 33, puente sobre el río Mattaponi

Fig 07. Obtenida de referencia 12

Plataforma de petróleo Hibernia

El campo petrolero de Hibernia se encuentra a unos 315 km al sureste de St. John's, Terranova, Canadá. Una plataforma mar adentro se consideró necesario para aprovechar el recurso petrolero por lo que los ingenieros se enfrentaron a este gran reto. La obra fue puesta en servicio en el año 1997 (13).

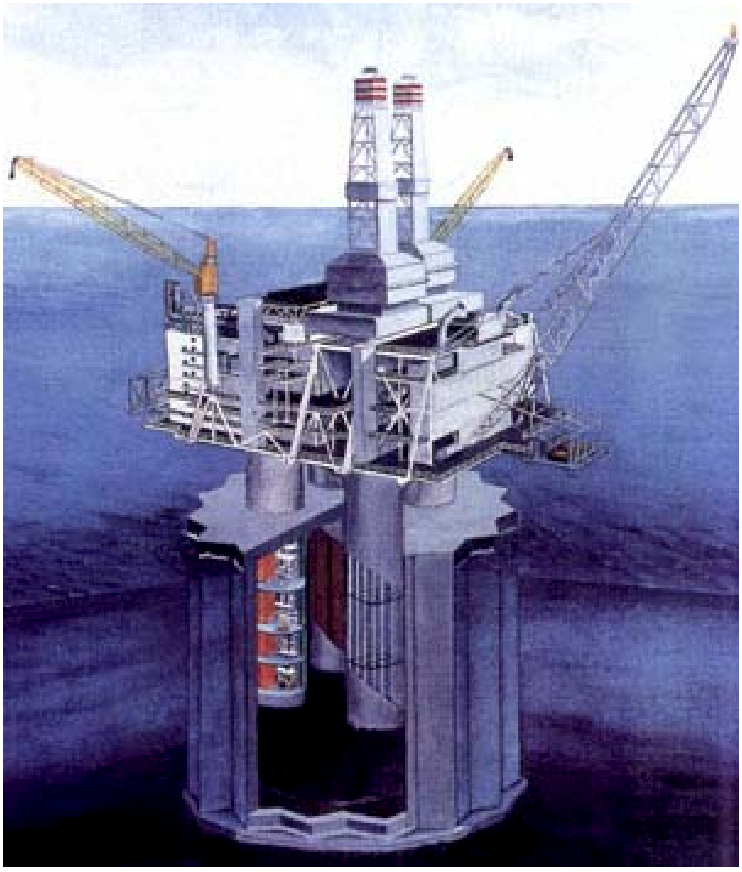

Fig 08. Representación artística de la Plataforma del proyecto Hibernia

Fig 08. Obtenida de referencia (13)

El proyecto tenía que cumplir una apretada programación de las obras lidiando con condiciones extremas de temperatura. La base estructural de la plataforma tenía que soportar el hielo y deshielo, la abrasión, la acción del viento y las olas, y al ataque químico. Además, la gigantesca estructura estaba obligada a flotar, ser remolcado al sitio, y después de ser colocado, debía resistir el impacto de 5,5 millones de toneladas de témpano de hielo. Pesando más de 1,2 millones de toneladas, Hibernia Offshore Platform es la estructura flotante más grande que se ha construido en Norteamerica (13).

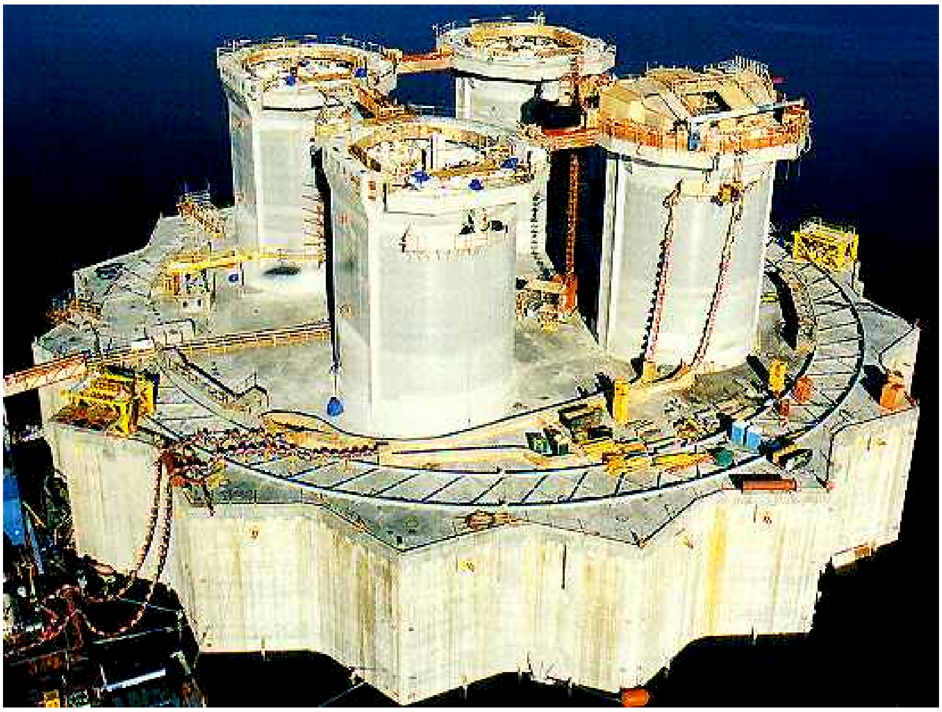

Fig 09. Base estructural de la plataforma Hibernia parcialmente sumergida

Fig 09. Obtenida de *http://www.offshore-technology.com/projects/hibernia/hibernia6.html*

Para satisfacer los requisitos de construcción, producción y colocación del hormigón, durabilidad, una densidad normal fue originalmente especificado para este proyecto, además de las características listadas a continuación:

- Alta resistencia
- Alto módulo de elasticidad
- Alta resistencia a la tracción
- Alta resistencia a la congelación y descongelación
- Alta trabajabilidad y revenimiento sin segregación
- Baja permeabilidad
- Bombeable

Para mejorar la capacidad de flotar de la estructura, posteriormente se determinó que una reducción de aproximadamente el 10% en la densidad del hormigón sería una ventaja. Se buscaba reducir el peso sin afectar la resistencia, durabilidad y procesos constructivos del diseño original. Para lograr estos objetivos, se vio necesario sustituir aproximadamente el 50% (en volumen) de los agregados de densidad normal por agregados livianos de alta calidad (13).

El hormigón liviano utilizado presentó las propiedades descritas en la siguiente tabla.

Tabla II. Resultados de ensayos del hormigón

Peso	2170 kg/m³
Contenido de aire	2,1%
Revenimiento	210 mm
Relación a/c	0,33
Resistencia a la compresión	79,9 MPa
Resistencia a la tracción por compresión diametral	5,87 MPa
Módulo de elasticidad	30,5 MPa
Coeficiente de Poisson	0,22

Tabla II. Obtenida de referencia 13

Condominios Sand Key Fase II

Fig 10. Vista de los condominos Sand Key Fase II

El hormigón liviano de alto desempeño es utilizado cada vez más en edificios para oficinas y residenciales para así lograr luces mayores. Los Condominios Sand Key se encuentran cerca de Tampa, Florida, USA. Este proyecto de 14 niveles de altura está construido en un marco de concreto postensado (14).

Las especificaciones del proyecto piden resistencias a compresión a los 28 días de 62 MPa con un peso unitario de 1760 kg/m^3 para las losas. Los resultados en los ensayos arrojan resistencias promedio mayores a 82,75 MPa (14).

Fig 10. Obtenida de referencia 14

Todo el hormigón liviano de alto desempeño fue colocado mediante bombeo con un tubo de 5 pulgadas (125 mm). El hormigón presentó las siguientes propiedades:

- Contenido de aire 4±1,5%
- Relación a/c 0,32
- Densidad 1817 kg/m³

Puente Benicia-Martinez, San Francisco

El puente Benicia-Martinez está ubicada en la bahía de San Francisco, tiene una longitud de 2,5 km. Es un puente sismoresistente diseñando con dovelas tipo cajón en voladizo postensadas fundidas en sitio. Cada dovela tiene 4.8m de largo con alturas variables desde los 4,5 a 11,4 m de alto (15).

Fig 11. Estructura del puente de San Francisco Benicia-Martinez

Fig 11. Obtenida de referencia 15

Son 22 tramos entre pilas y cada tramo tiene una longitud de 127 y 200 m. A lado de cada pila se fundieron como máximo 19 dovelas, dando un total de 38 dovelas por tramo (15).

Fig 12. Proceso de construcción de dovelas

Fig 13. Proceso de construcción de dovelas

Fig 12 y 13. Obtenidas de referencia 15

Para la construcción de las dovelas se utilizó hormigón liviano de alto desempeño. Las propiedades del hormigón especificadas fueron las siguientes:

Tabla III. Requisitos del hormigón de las dovelas del puente Benicia-Martinez

Densidad (kg/m³)	2000
f'c (MPa)	46 a los 28 días
E (GPa)	24
Retracción %	0,05
Flujo Plástico %	0,48

Para cumplir con el módulo de elasticidad especificado fue necesario incrementar la cantidad de materiales cementicios. Debido a la gran cantidad de calor generado por la hidratación del cemento fue necesario disminuir la temperatura del hormigón utilizando hielo y nitrógeno líquido para poder así llegar a la temperatura especificada durante el curado de 71ºC. La dosificación utilizada fue la siguiente:

Tabla IV. Dosificación de HLAD utilizado

	kg/m³
Cemento	495
Ceniza Volante	29
Metacaolin	58,3
Agua	180
Arena	733
Agregado liviano	510
a/mc	0,31

Tabla III y IV. Obtenidas de referencia 15

Con la dosificación anterior se fundieron todas las dovelas el puente, el hormigón fue bombeado a más de 55 m de altura (15).

Fig 14. Bombeado de hormigón para fundición de dovelas

Se obtuvieron los resultados mostrados en la siguiente tabla.

Tabla V. Resultados promedios de las muestras ensayadas

Densidad (kg/m³)	2001
f'c (MPa)	74 a los 35 días
E (GPa)	27
Retracción (%)	0,042
Flujo Plástico (%)	0,22

Fig 05 y Tabla V. Obtenidas de referencia 15

Capítulo 4

CONCLUSIONES

1. Utilizar hormigones livianos de alto desempeño permite aligerar el peso de las estructuras.
2. Las fuerzas sísmicas que soporta una estructura construida con hormigón liviano de alto desempeño serán menores debido a la disminución del peso.
3. El tamaño de las secciones en las estructuras construidas con hormigón liviano de alto desempeño son menores que las construidas con hormigones convencionales debido a la disminución de carga muerta y mayor resistencia.
4. Las cantidades de acero necesarias para reforzar los elementos de hormigón serán menores debido a la disminución de cargas.
5. El efecto que puede tener un mal curado es menor en los hormigones livianos de alto desempeño que en los hormigones convencionales, ya que la liberación del agua atrapada dentro de los agregados porosos

ayuda a curar internamente el hormigón y a mejorar la hidratación de las partículas cementicias en la zona de transición interfacial.

6. Las deformaciones plásticas y cambios volumétricos son menores que en los hormigones convencionales debido al agua dentro de los agregados.
7. Realizar cimentaciones para estructuras de hormigón liviano de alto desempeño resultan más económicas debido a la disminución de cargas.
8. El proceso de montaje y transportación de elementos prefabricados resulta menos complicada debido a la disminución del peso.
9. La alta durabilidad del hormigón liviano de alto desempeño lo hace ideal para estructuras marinas.
10. Es un hormigón ideal para estructuras flotantes que requieren altas resistencias.
11. Los poros de los agregados favorecen a la durabilidad del hormigón ante condiciones de hielo y deshielo.

BIBLIOGRAFIA

1. **Arce Pezo Xavier.** Hormigones livianos .Tesis. Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior del Litoral, 1997. Pág. 1-3, 5-7, 10-13.
2. **Galli Agustina Patricia.** Las inmigraciones italianas y su aporte técnico ornamental a la arquitectura y Urbanismo. Universidad de Belgrano, 2007. Pág. 22.
3. **Expanded Shale, Clay and Slate Institute.** Light weight concrete: History, applications and economics, 1971 Pág. 10
4. ***Mauricio Lopez y **Lawrence F.Kahn**. Hormigón liviano de alto desempeño -una comparación entre perdida de pretensado reales y estimadas por los códigos de diseño.*Pontificia Universidad Católica de Chile.**Georgia Institute of Technology EE.UU. 2006. Pág. 59, 61, 64, 67.
5. **Lura Pietro.** Autogenous deformation and internal curing of concrete. Phd. Tesis. Delf institute of technology, 2003. Pág. 5.
6. **Centro de Investigaciones Avanzadas en Tecnología del Hormigón**. Hormigón de alto desempeño para estructuras. Universidad Nacional de Córdoba – Argentina, 2002. Pág. 5.

7. **Navarrete Arnoldo, Aramayo Gabriel, Buncuga Verónica, Cahuapé Maria, Forgione Fabricio**. Hormigones con agregados livianos. Departamento de mecánica aplicada y estructuras Facultad de ciencias exactas. Universidad Nacional de Rosario. Argentina 2003. Pág. 3 – 6.
8. **Martinez David P**. Hormigón de altas Prestaciones-hormigón ligero. Pág. 239.
9. **Nilson Arthur H**. Diseño de estructuras de concreto. McGrawHill. Duodecima Edición, 2001.
10. **ACI 224.1R-93.** Causas, evaluación y reparación de fisuras en estrucutras de hormigón. Informe del comité de ACI 224, 1993. Pág. 1-6.
11. **Ingeniería, historia y construcción de puentes** http://bridgepros.com/projects/Raftsundet
12. **Ozyildirim Celik H.** Virginia's Developments in the Use of Concrete in Bridges.
13. ESCSI. Hibernia Offshore Platform.2003. Pág. 1-5.
14. STALITE, Rotary kiln expanded slate lightweight aggregate. http://www.stalite.com/projects_SandKeyCondo.html
15. **ESCSI Aspire Magazine**. benicia-martinez bridge. *www.escsi.org/pdfdoc1/Aspire%20Magazine%20benicia-martinez_summmer%202007.pdf*