



T
624.1834
A668



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

“HORMIGONES LIVIANOS”



TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

AUTOR:

XAVIER ARCE PEZO

GUAYAQUIL - ECUADOR

1997

AGRADECIMIENTO



Al Ing. Hugo Eguez Director de
Tesis, Ing. Leonardo Carrión jefe del
Centro Técnico del Hormigón, por la
ayuda y colaboración en éste trabajo.

DEDICATORIA

A MIS PADRES.

Guayaquil, 22 de Mayo de 1997

Sr. Ing.

Hernan Gutierrez

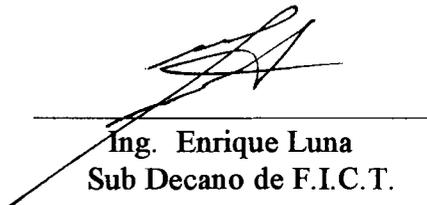
Ciudad

De mis consideraciones

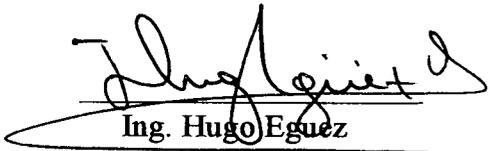
Por medio de la presente le comunicamos que el estudiante egresado de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra Sr. Xavier Isaías Arce Pezo Matrícula #0880344 ha concluido satisfactoriamente la elaboración de su tesis y se encuentra listo para la exposición de la misma.



Ing. Miguel Angel Chávez.
Decano de F.I.C.T.

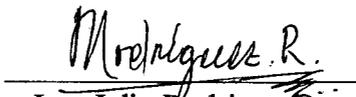


Ing. Enrique Luna
Sub Decano de F.I.C.T.



Ing. Hugo Eguez

Director de Tesis



Ing. Julio Rodriguez

Miembro del Tribunal



Ing. Julian Coronel

Miembro del Tribunal

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en ésta tesis, corresponden exclusivamente al autor, y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado corresponderá a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.”

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL).

Xavier Arce Pezo

RESUMEN

Este trabajo presenta información cualitativa y cuantitativa sobre los diferentes elementos que se pueden utilizar como agregados para hormigones livianos. Aporta experiencia e información sobre el comportamiento del agregado en la mezcla y la caracterización del hormigón resultante. La utilización de agregados livianos como piedra pómez, ceniza de cascarilla de arroz, lava volcánica, poliestireno expandido, dan propiedades físicas que distan del hormigón convencional. La variedad de agregados resulta en una diversidad de características conseguidas en los diferentes diseños efectuados. Se ha conseguido densidades dentro del 80% al 40% del hormigón convencional. Se ha obtenido resistencia de 3.5 MPa hasta 24.5 MPa, módulos de elasticidad que van del 50% al 10% del hormigón convencional. La conductividad térmica también tiene cambios llegando a ser hasta el 50% del valor del hormigón convencional. Estas cualidades físicas originan otros beneficios como aumento de rendimiento en obra debido a la reducción de peso en el hormigón, disminución de la carga muerta en la estructura, disminución en el costo de transporte de los materiales, mejor aislación acústica que la brindada por el hormigón convencional, entre otras ventajas. Si balanceamos favorablemente las bondades de las limitaciones que puede presentar ésta variedad de hormigón y la usamos dependiendo de nuestra necesidad podremos conseguir buenos resultados. Es recomendable hacer diseños previos en el laboratorio y ensayar las muestras antes de su uso en obra.

HORMIGONES LIVIANOS

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes	3
1.2	Hormigones livianos. Definición y clasificación	4
1.3	Bondades y limitaciones en su uso	6
1.4	Tipos de hormigones livianos	9
2	Usos	10
2.1	Aislante térmico. Concepto y definición	11
2.2	Hormigón estructural	12
2.3	Estructuras resistentes al fuego	18
2.4	Prefabricados	22
3	<u>Caracterización de los agregados</u>	24
3.1	Piedra pómez	24
3.2	Poliestireno	25
3.3	Perlita	27
3.4	Viruta de madera	29
3.5	Cascarilla de arroz	30
3.6	Incorporación de aire	31

4	Diseño y ensayo en el hormigón	34
4.1	Dosificación	34
4.2	Resultados	37
4.2.1	Resistencia: compresión, tracción y flexión pura	37
4.2.2	Módulo de elasticidad	41
4.2.3	Conductividad térmica	41
4.2.4	Resistencia al fuego	45
4.2.5	Contracción por secado	45
4.2.6	Dilatación térmica	46

Conclusiones y recomendaciones

INTRODUCCION

El objetivo de éste proyecto es obtener información de los ensayos realizados con agregados livianos para hormigón. La utilización de agregados livianos no es muy frecuente en nuestro medio lo que justifica la limitada existencia de datos referentes al tema. Este trabajo aportara con información específica de cuatro tipos de agregados: piedra pómez, ceniza de cascarilla de arroz, poliestireno y lava volcánica. Se presentará generalidades sobre diferentes tipos de hormigones livianos, las bondades y limitaciones de los agregados utilizados así como de su mezcla resultante, las dosificaciones empleadas y datos sobre los ensayos realizados a cilindros, probetas y vigas de hormigón. Se espera que el trabajo de investigación aquí presentado colabore con el conocimiento de nuestras materias primas y aporte alternativas en el área de la construcción.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Sin duda alguna tenemos una idea general sobre lo que es el Hormigón Liviano, un término que no había sido definido con precisión a mediados de éste siglo. Se ha dicho razonablemente que el Hormigón Liviano, es un tipo de hormigón con características propias, que por algún medio o por el otro se ha hecho más ligero que el hormigón convencional de cemento, arena y grava, que por tanto tiempo ha sido el principal material empleado en la construcción.

.En vista de la dificultad que había en definirlo, el hormigón Liviano fue clasificado durante muchos años, como aquel cuya densidad no fuese mayor a 1600 kg/m^3 . Tiempo después, con la introducción de miembros estructurales de hormigón reforzado con agregados de peso ligero, la densidad limite tuvo que ser revisada, ya que algunas mezclas de hormigón hechas para este propósito, a menudo producían hormigones de densidad seca de 1840 kg/m^3 o mayores. Este hormigón es aun considerado liviano, dado que

todavía resulta más liviano que el hormigón convencional, el que usualmente fluctúa al rededor de los 2400 kg/m³. La característica más evidente del Hormigón Liviano es, por su puesto, su densidad, la cual es siempre considerablemente menor que la del hormigón normal y con frecuencia, una fracción de la misma (1).

Las ventajas de tener materiales de baja densidad son numerosas, por ejemplo la reducción de la carga muerta, mayor rapidez de construcción, menores costos de transporte y acarreo. El peso que gravita sobre la cimentación de un edificio es un factor importante en el diseño del mismo, especialmente hoy en día, en que la tendencia es la de construir edificios cada vez más altos. El uso del Hormigón Ligero ha hecho posible, en algunas ocasiones, llevar a cabo diseños que de otra manera hubiera tenido que abandonarse por razones de peso. Se ha demostrado experimentalmente y prácticamente en la industria, que utilizando hormigón liviano en la construcción se logra menos tiempo de ejecución en la obra, que si se utilizaran materiales tradicionales, por ésto, muchos constructores en la actualidad están dispuesto a pagar relativamente más por elementos de hormigón liviano que por ladrillos ordinarios como cuando se construyen muros. Para la mayoría de los materiales de construcción, tales como para el ladrillo de arcilla, el acarreo, queda limitado no por su volumen sino por el peso de los mismos. Con dispositivos y sistemas de acarreo diseñados convenientemente se puede manejar en forma económica volúmenes mucho mayores de hormigón liviano.

Una característica menos obvia, pero no menos importante del hormigón liviano, es que posee una relativamente baja conductividad térmica, propiedad que se mejora conforme se

reduce su densidad. En los últimos años, se ha dado mayor importancia a la necesidad de reducir el consumo de energía de los sistemas de acondicionadores de aire de los edificios, el hormigón liviano por su baja conductividad térmica mejora el ambiente y mantiene una temperatura confortable dentro de ellos (1).

Además de sus ventajas desde el punto de vista técnico en la construcción, algunos tipos de hormigón ligero tienen el gran mérito de proporcionar una salida a ciertos desechos agrícolas tales como la ceniza de cascarilla de arroz, ceniza de materiales combustibles utilizados para alimentar el fuego en los calderos, etc.

1.1 Antecedentes

El hormigón liviano tiene su origen natural en el Imperio Romano, donde empleando materiales de construcción más livianos, se desarrollaron mezclas de argamasas, con piedra pómez y materiales cementantes formados a partir de limos quemados, un ejemplo de ésta práctica la representa la Cúpula del Panteón de Agripa en Roma (1).

Nunca hubo una ejecución técnica para la producción de agregado para hormigón hasta 1950 en que se desarrollo la técnica del hormigón liviano basado en partículas de combustible pulverizado resultado del consumo, generalmente proveniente de estaciones termoeléctricas, que utilizan productos de la combustión de elementos bituminosos.

Para la década del 50 y del 60, ya se instalaban en el mundo plantas de agregados livianos. En Latinoamérica, en Charallave Venezuela, para el año de 1969 se instala también una planta sobre un yacimiento de 50 has. de arcilla que aun constituyen su materia prima. Ecuador posee actualmente en su mercado, poliestireno expandido, con el nombre comercial de Perlita. Piedra Pómez es otro de los productos que podemos encontrar en el mercado ecuatoriano, se encuentra bajo la firma de Productos Rocafuerte, obteniendo el material de sus canteras ubicadas en Latacunga. Además la cascarilla de arroz es un desecho vegetal de fácil obtención en nuestro país (2).

Para cualquier agregado liviano, la investigación de sus características físicas, la adición de aditivos químicos, dosificación en el laboratorio, la metodología para efectuar la mezcla y el tipo de curado, es primordial. Además se debe tener suficientes y apropiados resultados de las cualidades del hormigón resultante, es importante considerar que también va a influir los diferentes procesos que intervinieron en la fabricación del agregado.

1.2 Hormigones livianos. Definición y clasificación

Aunque el hormigón liviano se ha hecho muy conocido en los últimos años, no representa en ningún caso una nueva clase de material para la construcción, considerando además que tiene una gran aceptación mundial.

La concepción de hormigón liviano ha tomado forma en éstas dos últimas décadas y en la actualidad se lo puede definir por medio de una de sus características físicas, la densidad o peso específico del hormigón que fluctúa en un rango entre los 300 kg/m^3 y 1840 kg/m^3 .

Por su aplicabilidad el hormigón liviano se clasifica en (2):

1. Hormigón de relleno.- Aquel cuya densidad esta comprendida entre los 300 kg/m^3 y los 1000 kg/m^3 . Estos hormigones son buenos aislantes térmicos, pero poseen bajas resistencias por lo cual no son utilizados en elementos estructurales.

2. Hormigones aislantes.- Aquel cuya densidad es menor a los 800 kg/m^3 , su resistencia a la compresión esta comprendida entre 0.7 MPa y 7 MPa y la conductividad térmica no supera los $0.3 \text{ J/ms}^\circ\text{C}$.

3. Hormigón estructural.- Este tipo de hormigón es definido por la norma ASTM C 330 - 89:

A.- Aquel realizado utilizando solo agregados livianos y cuyo peso unitario seco está entre 1760 kg/m^3 y 1600 kg/m^3 y su esfuerzo mínimo a la compresión a los 28 días es de 17 MPa .

B.- Hormigones confeccionados con arena natural y agregado grueso liviano, cuyo peso unitario seco está entre los 1840 kg/m^3 y los 1680 kg/m^3 y su esfuerzo mínimo a la compresión a los 28 días es de 17 MPa .

1.3 Bondades y limitaciones en su uso

Las características físicas y químicas generadas por la manera de producir los agregados y por el tipo de mezcla escogido, van a introducir una serie de ventajas en el hormigón que el ingeniero deberá considerar al momento de mentalizar un proyecto (1, 2).

Baja densidad.- Los hormigones livianos presentan densidades que varían desde los 300 kg/m³ hasta los 1800 kg/m³, dando facilidad para realizar obras que a igual volumen de hormigón normal produzcan menor peso.

Buena aislación térmica.- El coeficiente de conductividad térmica, disminuye al decrecer la densidad aparente de los hormigones, por la utilización de agregados de baja densidad o la generación de burbujas de gas, incorporado durante el mezclado.

Resistencia al fuego.- Por su elevada aislación térmica, su bajo coeficiente de dilatación, los hormigones tienen una buena resistencia al fuego.

Trabajabilidad.- Su bajo peso influye en el transporte y en las condiciones de trabajo, logrando mayor rapidez y menor agotamiento físico del trabajador.

Transporte.- El costo de movilización de los agregados de peso ligero es considerablemente menor que el de los agregados de peso normal, y además son más fáciles de explotarlos de sus canteras.

Absorción.- Con determinados agregados, regulan la humedad del ambiente e impiden la condensación superficial por su capacidad de absorción.

Bajo módulo de elasticidad.- Resiste mejor las cargas de impacto por su bajo módulo de elasticidad.

Se debe considerar que el hormigón liviano tiene sus limitaciones, las que dependen del tipo de agregado que se use, éstas pueden ser manejables si se toman las precauciones adecuadas.

Problemas de proyecto:

- El agregado ligero, dependiendo de su tipo, podría ser más caro que la grava común, ésta diferencia podría ser compensada con menores costos de transporte e influirá a favor en el tipo de cimentación.
- Por su poca utilización no existen normas específicas, a más de las que se encuentran en el A.C.I., para el cálculo de estructuras con este tipo de hormigón.
- El módulo de elasticidad es bajo, ésto da como resultado mayores deformaciones que las esperadas en el hormigón de peso normal.
- Debido a su gran absorción es difícil poder determinar el grado de incidencia en la relación agua-cemento, ésto también es influenciado por la variación de la porosidad de los agregados.
- Baja notablemente la resistencia al corte y a la tracción.

- La contracción de secado es mayor que la del hormigón de peso normal y por lo tanto se debe de considerar éste inconveniente, en el proyecto y en el dimensionamiento de elementos constructivos, y sus juntas.

Problemas constructivos.

- La mayoría de los agregados ligeros son relativamente más ásperos que la grava y arena común y tienden a dar mezclas menos manejables y acabados más ásperos, pero eso se puede solucionar con la incorporación de un aditivo.

- La falta de experiencia en el uso de hormigón liviano genera inconvenientes en su elaboración y uso.

- Varían los parámetros en cuanto a frecuencia de vibrado, métodos de compactación, etc.

- Cuando se usan químicos inclusores de aire, debe tomarse cuidado en cuanto a la homogeneidad del hormigón para pastones diferentes.

- Se tiene problemas de corrosión del hierro debido a la porosidad y a la gran absorción de humedad del hormigón liviano, problema que se reduce conforme aumenta el recubrimiento del hierro.

- Se reduce la adherencia del hierro en el hormigón siendo el principal motivo la disminución del área de contacto hormigón-hierro y la resistencia del hormigón, también influirá el tipo de agregado y el grado de compactación de la mezcla.

1.4 Tipos de hormigones livianos

Para construir hormigón liviano, básicamente existe una forma de hacerlo, por la inclusión de aire en su estructura, lo que nos permitirá tipificar al hormigón liviano de tres maneras de acuerdo a su tipo de producción (1):

1. Hormigón sin finos.- Omitiendo los finos en la mezcla, quedando por tal motivo una gran cantidad de espacios vacíos entre el agregado grueso.
2. Hormigones de agregados livianos.- Sustituyendo los agregados naturales que tienen una densidad promedio de 2600 kg/m^3 por agregados de baja densidad aparente que pueden llegar a valores de 10 kg/m^3 como en el caso del poliestireno expandido, o 1250 kg/m^3 , como por ejemplo la escoria de alto horno.
3. Hormigones gaseosos o de espuma.- Esta variedad se logra produciendo burbujas de aire en gran cantidad dentro de un mortero de hormigón, de manera que al fraguar quede con una estructura celular esponjosa. Se tiene que considerar la diferencia de éstas grandes burbujas de aire con el aire incorporado de la mezcla que son burbujas extremadamente pequeñas.

CAPITULO II

USOS

La aplicación que le daremos al hormigón liviano determina el tipo de diseño de hormigón que escojamos y la selección de los agregados a utilizar. Entre las aplicaciones que se pueden dar al hormigón liviano están la construcción de bloques para manpostería, ductos de ventilación, vigas y paneles prefabricados, morteros aislantes, hormigón estructural, puentes, sobrelosas, edificios en zonas sísmicas, estructuras resistentes al fuego entre otras.

No siempre se pueden aplicar las mismas consideraciones de resistencia y trabajabilidad a los diferentes tipos de hormigón ligero. Por ejemplo, el bajo peso es de primordial importancia si se lo requiere para aislamiento térmico. Si se lo requiere para la fabricación de bloques, uno de los factores que influyen en la selección de las proporciones de la mezcla es la facilidad para poder sacarlo del molde inmediatamente.

2.1 Aislante térmico. Conceptos y definiciones

Una diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de un muro ocasiona una transmisión de calor de la zona más caliente a la zona más fría, de manera que se produce una diferencia progresiva de la temperatura a través del espesor del mismo. En una gráfica de cambio de temperatura vs. distancia, la pendiente se llama gradiente de temperatura. Cualquier muro que separe dos espacios con diferente temperatura, ofrecerá cierta resistencia al flujo de calor a través de ella, pero no lo impide por completo. El aislamiento térmico puede considerarse como el coeficiente de resistencia a la transmisión de calor.

Una de las características singulares del hormigón liviano es el valor relativamente alto del aislamiento térmico, aislamiento que se hace mayor o menor en relación inversa con la densidad del material.

Recordaremos algunos conceptos que se involucran en esta área, para poder representar matemáticamente el fenómeno de la conductividad (3).

La conductividad es la característica por la cual el calor pasa a través de un material sólido o fluye de un material a otro cuando se encuentra, en contacto íntimo con él. El aire es un mal conductor del calor, de suerte para los hormigones ligeros, porosos por excelencia y que por consiguiente encierran cantidades considerables de aire, convirtiendolos en buenos aislantes térmicos. Otra de las formas de transmisión de calor es la radiación, ésta se produce cuando la superficie

de un material emite calor transmitiéndose en forma de energía a través del espacio, por medio de ondas cuyas longitudes van a depender de la temperatura del cuerpo radiante.

Conductividad térmica (k) es la cantidad de calor expresada en J (joule) que pasa a través de un metro cuadrado de un material homogéneo, de un metro de espesor, en un segundo, cuando la diferencia de temperatura entre cara y cara es de un grado centígrado.

Corriente calorífica (H) es la cantidad de calor que fluye a través de una sección por unidad de tiempo, su unidad es vatio (W).

Si definimos los siguientes parámetros:

1. H Corriente calorífica, W
2. k Conductividad térmica, $J/(s\ m\ ^\circ C)$
3. A Area transversal al flujo de calor, m^2
4. $T_2 - T_1$ Diferencia de temperatura en $^\circ C$, y
5. L Longitud en metros, en la que se produce la diferencia de temperatura,

podremos relacionarlos en la siguiente ecuación:

$$H = - k A (T_2 - T_1) / L.$$

2.2 Hormigón estructural

Hasta la década del 60, el hormigón con agregado de peso ligero, se había asociado exclusivamente a un material de carácter poroso, no compacto. Una de

sus variedades son los bloques para paredes. No obstante para la década del 70, son usados como elementos de carga, originalmente los muros hechos con hormigón liviano, eran en general, muros divisorios sin carga. Sin embargo el desarrollo y producción de nuevos tipos de agregados artificiales de peso ligero hicieron posible la fabricación de un hormigón de resistencia adecuada para trabajo estructural. Estos avances alentaron el uso del hormigón con agregados de peso ligero, en lugar del común, en especial cuando la reducción del peso era un elemento gravitante en el diseño y la economía de una estructura (4).

Existe un beneficio financiero directo capaz de cuantificarse con bastante aproximación, al reducirse el consumo de acero y el peso de la estructura en sí, conduciendo un ahorro en el diseño de la cimentación y de la estructura de soporte, además ofrece una libertad relativa de planeación al arquitecto e ingeniero debido a un mayor espaciamiento entre columnas y mayores luces. Hay otros beneficios que por el momento no se cuantifican fácilmente, por ejemplo, la reducción en peso es seguida de un ahorro en el transporte y se facilitan las operaciones en el sitio de la construcción, hay menos fatiga humana y al mismo tiempo podría aumentar los rendimientos. Conjuntamente esto conduce a una edificación más rápida y así a una reducción en el costo, lo cual es un poderoso estímulo para que los nuevos edificios sean útiles y productivos en el menor tiempo posible.

El agregado usado para hormigón reforzado, debe proporcionar las resistencias necesarias de diseño y densidad estipuladas en ASTM C 330, capaz de proporcionar una compactación satisfactoria, debe ser durable, estar libre de impurezas orgánicas, las pérdidas por ignición no deben superar el 5 %, no contener arcilla mayor al 2 % de su peso seco, seguir una especificación granulométrica, adicionalmente la colocación de armadura le dará ciertas restricciones químicas, por ejemplo se conoce que la escoria de caldera contiene cantidades variables de azufre, impidiendo su uso en el hormigón reforzado. Esta especificación, admite en términos generales, a los agregados compuestos predominantemente de materiales inorgánicos celulares o granulares. Esto incluye agregados artificiales que se obtiene por expansión, calcinación ceniza muy fina, esquistos o pizarras, y a los agregados preparados, procesando materiales naturales como la piedra pómez, la escoria volcánica o las tobas.

La *piedra pómez* es usada en Alemania, para losas reforzadas de azotea, principalmente para techados industriales, en donde éstos componentes deben ajustarse a las Normas Alemanas de Especificaciones DIN 4028. El hormigón de piedra pómez no es en general apropiado para trabajos colados in situ a causa de la tendencia de este a flotar hacia la superficie, conduciendo así la segregación de la mezcla. En su estado natural contiene usualmente impurezas y si se usa con refuerzo debe lavarse antes de mezclarse. En algunos países tropicales se usa ampliamente los corales, que son agregados calcáreos de origen marino. La



principal dificultad que se ha encontrado con éste tipo de material es su origen salino.

La *escoria espumosa* fue el primer agregado de peso ligero apropiado para el hormigón armado que se produjo en el Reino Unido en grandes cantidades.

Los *esquistos* y *arcilla* expandida producen un hormigón de alta calidad, capaz de obtener una resistencia lo suficientemente alta hasta como para usarse en hormigón preesforzado. Ya para fines de la década del 70 en el Reino Unido su uso para la construcción estaba bien establecido bajo los nombres comerciales de AGLITE y LECA. En USA se vendían agregados similares con nombres comerciales como HAYDITE, ROCKLITE, GRAVELITE, AGLITE, etc. En Europa Oriental se hacían uso considerable de KERAMZIT, para trabajos de hormigón reforzado. Ejemplos actuales ARLITA en España, CARLITA en México, ALIVEN en Venezuela cuya producción data de hace 27 años, etc.

La *pizarra*, al ser sometida al calor, se expande y forma un agregado inerte químicamente, y su resistencia es apropiada para hormigón armado, de ésta manera se lo ha usado en USA y en Alemania Oriental (1).

El agregado de cenizas sinterizadas de combustible en polvo se usa en el Reino Unido para una variedad de propósitos estructurales y se vende bajo el nombre de LYTAG. También se lo ha usado en hormigón reforzado.

La resistencia a la tensión parece ser un factor importante en la posibilidad de agrietamientos en diferentes tipos de hormigón. Puesto que se trata de un material heterogéneo, su resistencia a la tensión tenderá a variar considerablemente y su composición afectará no solo al esfuerzo de tensión al momento en que se agriete sino también al mecanismo del proceso en sí.

En el hormigón común, por ejemplo, la resistencia y rigidez del agregado es generalmente muy grande, tanto en compresión como en tensión. Las fallas de tensión ocurrirán, por lo tanto, invariablemente como un resultado de un rompimiento de la unión entre la matriz y la superficie del agregado, o por fractura de la misma matriz, pero no como resultado de la fractura del agregado.

Por lo contrario, la aparición de grietas en el hormigón ligero es muy diferente a la del hormigón común, mostrándose que es producto del fracturamiento del agregado en conjunto con la matriz, ya que la resistencia a la tensión del agregado es usualmente menor que la de la matriz endurecida (1).

Para la misma resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad del hormigón ligero, es en general considerablemente menor, que el del hormigón común.

Es práctica común reemplazar una parte del agregado fino de peso ligero por arena de río en las mezcla de hormigón ligero, con el objeto de aumentar la resistencia a la compresión y de mejorar la adherencia del hormigón resultante, también sirve para mejorar la durabilidad y la protección contra la corrosión que pueda

proporcionar al refuerzo, para aumentar su trabajabilidad , para reducir la cantidad de cemento y la retracción del hormigón. La desventaja está en que aumenta la densidad de la mezcla, pero ésta desventaja puede ser balanceada con los beneficios anteriormente citados.

El hormigón no es un material dimensionalmente estable, aun donde no haya cambios de temperatura. Debido a la pérdida de humedad está sujeto a encogimiento, se expande si se moja, y se deforma permanentemente o fluye plásticamente cuando se somete a esfuerzos permanentes de compresión o tensión. Aunque los movimientos por humedad y por flujo plástico varían fundamentalmente por su naturaleza, se afectan uno al otro y ambos son afectados por una variedad de circunstancias, tales como el tipo de exposición a que se somete el hormigón, la mezcla que se utilice, el tipo de agregado usado, las dimensiones del miembro y otros factores.

Para la misma resistencia a la compresión, tanto el encogimiento como el flujo plástico de la mayor parte de los hormigones de peso ligero, son generalmente mayores que aquellos que se producen en el hormigón común. En el ensayo de resistencia al cortante de las vigas de hormigón liviano, se produce un mecanismo diferente a la de los hormigones normales. Cuando se somete una viga de hormigón ligero para que falle por cortante, el agrietamiento ocurre como resultado de una fisura a través del agregado, debido a que las partículas del agregado son usualmente más suaves y débiles que la matriz. Por lo tanto no se

puede presentar la resistencia adicional contra la falla por cortante debido a la interacción de las partículas del agregado normal fuertemente entrelazadas, por lo cual la falla ocurre antes (1).

Tradicionalmente la construcción y la manufactura de los agregados ligeros ha tenido ciertos contrastes en que a más del criterio científico también interviene la parte económica. Al procesar los agregados utilizando expansión térmica, el nivel de expansión de los mismos estará controlado por el incremento de temperatura y por el tiempo de reacción, éstos parámetros serán ajustados acorde a las texturas y grado de expansión deseado, dependiendo del uso final del hormigón acorde a las necesidades del mercado, ya que el puede requerir materiales que sean buenos aislantes térmicos pero sin fines estructurales ni arquitectónicos. Hay que destacar que la baja densidad final de las partículas del agregado aunque con un pobre acabado, pero con una mayor facilidad para la construcción y el transporte, involucrarán un ahorro en tiempo para un mismo volumen de obra (5).

2.3 Estructuras resistentes al fuego

Hasta el momento hemos discutido el aislamiento térmico del hormigón ligero, principalmente en términos de la retención de calor. Otra aplicación importante del aislamiento es la protección de las estructuras contra el daño causado por el fuego. Con el objeto de poder apreciar éste aspecto del aislamiento térmico, resulta

provechoso considerar brevemente el tema general de la protección contra el fuego.

El hormigón liviano tiene la característica de resistir mucho mejor y de conservar sus cualidades en presencia del fuego comparado con el hormigón de peso normal. Esta cualidad que caracteriza el comportamiento del hormigón liviano es debido a dos factores (1):

- Durante el proceso de creación o fabricación de los agregados livianos, la pómez, la escoria volcánica, la arcilla expandida, etc. pasan por altas temperaturas que es un exceso comparado con la experiencia que puede tener dicho material en presencia de un incendio, a la vez lo convierten en un material muy estable comparado con la gran mayoría de agregados.
- El hormigón de agregado ligero tiene un bajo coeficiente de expansión y un bajo módulo de elasticidad comparado con el hormigón de peso normal.

Si clasificamos los materiales en combustibles y no combustibles, los primeros son aquellos que una vez encendidos contribuyen a la intensidad del fuego, produciendo calor, mientras que el segundo no lo hace. Los materiales inorgánicos tales como la piedra, el ladrillo y el hormigón no son combustibles y los materiales orgánicos tales como la madera, si lo son.

Al considerar la combustibilidad en relación con la protección contra el fuego, debe tenerse en mente dos puntos importantes:

- La combustibilidad de un material de construcción es muy importante, y el diseñador debe considerar ésta propiedad al seleccionar los agregados, tomando en cuenta que la intensidad de un fuego proviene no solamente del material empleado en la construcción, sino también del contenido del edificio.
- Aunque un material de construcción sea incombustible, podría sufrir un cambio tal en presencia de fuego que lo hiciera inadecuado para desarrollar la función principal para la cual fue diseñado. Esto generalmente significa pérdida de resistencia como consecuencia de cambios físicos y químicos.

El objeto principal en el diseño de protección contra el fuego consiste en asegurar que una vez que el incendio se haya iniciado, la rapidez con la cual se extienda y la dirección de propagación sean tan limitadas que permitan dar tiempo para que los ocupantes puedan escapar y para que el equipo de extinción de incendio actúe efectivamente. Un miembro estructural en un edificio es un miembro definido tal como un muro, columna o viga. La columna trabaja solamente como elemento de soporte, mientras que un muro de carga sirve para el doble propósito de soportar carga y como barrera contra la propagación del fuego. Entonces el mayor o menor grado con el que el fuego afecte a un elemento también depende del área que esté en contacto con el fuego y de la intensidad del mismo.

El efecto del fuego en un elemento estructural de un edificio, depende de la temperatura alcanzada, de la maduración del fuego y por su puesto de la naturaleza de las unidades y de su resistencia intrínseca al fuego.

En las estructuras reticulares, el acero estructural y las aleaciones de aluminio no resisten mucho tiempo la acción del fuego, ya que cuando la temperatura alcanza 550 °C en el acero o bien 200 a 250 °C en el aluminio, la resistencia de éstos materiales se torna tan reducida que ya no puede seguir soportando las cargas de diseño. Esto sucede en los primeros minutos de un incendio. Sin embargo, con una protección adecuada contra el fuego, se les podrá dar virtualmente una resistencia al fuego (6).

El enlucido de yeso no es combustible y gran parte de su resistencia a los efectos del fuego se atribuyen a la fuerte proporción de agua que contiene en su estructura, la cual tiene que ser primeramente eliminada para que pueda fallar el enlucido. Los enlucidos de yeso que contengan además agregados de peso ligero tales como la vermiculita exfoliada o perlita expandida, aumentan muy considerablemente la resistencia al fuego del elemento estructural al cual se apliquen, siempre y cuando dichos enlucidos queden firmemente adheridos a su superficie. Esto sucede en virtud del alto aislamiento térmico de tales agregados.

El hecho que los miembros de acero estructural se recubran de hormigón, generalmente con una capa no menor a 2,5 cm, da origen a un relativo grado de

resistencia al fuego. Sin embargo, el descostramiento del hormigón de recubrimiento reduce la resistencia potencial al fuego de tales miembros, razón por la cual, para evitar esto, se suele colocar una maya ligera de acero como refuerzo en el hormigón de recubrimiento. Hoy en día existe una gran variedad de tipos de recubrimiento de hormigón ligero, los cuales por sus buenas propiedades de aislamiento térmico proporcionan una protección eficiente para el acero. Tal es el caso de los bloques y losas de hormigón, que emplean agregados como la escoria espumosa, las arcillas expandidas, las cenizas sinterizadas de combustible en polvo o bien, losas de hormigón aireado.

2.4 Prefabricados

El uso más antiguo y aun el más común, del hormigón con agregado de peso ligero y del hormigón aireado es en forma de bloques de mampostería utilizados para la construcción de muros de carga y sin carga. En muchos países éstos bloques han sido utilizados desde hace mucho tiempo, principalmente, en las áreas donde los materiales más convencionales como los ladrillos de arcilla y la madera no son fáciles de conseguir, ni son baratos. Sin embargo, ésto no quiere decir que los bloques de peso ligero sean un sustituto de éstos materiales. Tienen sus propias cualidades importantes, principalmente porque combinan la ligereza y la baja conductividad térmica con propiedades funcionales normales.

Los tamaños y las propiedades generales de los bloques de hormigón pueden ser para variados usos y de diferentes características. Así encontramos bloques con agregado normal para muros de carga, bloques de hormigón liviano para muros de carga y para muros sin carga o muros divisorios. Con el objeto de aligerar más el peso de los bloques en la construcción, se les permite extraer parte de su núcleo.

La producción en fábrica de los elementos precolados, tuvo éxito al eliminar de la obra una buena parte de las complejas operaciones de construcción, ya que en la obra las condiciones de trabajo no son siempre fáciles de controlar, en la fábrica se pueden evitar problemas tan serios como las condiciones climáticas y baja eficiencia de la mano de obra especializada. Además se puede efectuar un estricto control de la calidad del hormigón y de los métodos de producción. La fabricación de elementos con hormigón aireado o mezclas con piedra pómez como agregado, curados al vapor, no hubiera sido posible desarrollarlas, bajo ningún concepto, en el lugar de trabajo (7).

CAPITULO III

CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

3.1 Piedra pómez

Esta es una roca que se origina de erupciones volcánicas. Existe al momento en Guayaquil la firma Productos Rocafuerte que utiliza el producto originario de canteras ubicadas en Latacunga, obteniendo un material lo suficientemente fuerte y ligero como para utilizarse como agregado de bajo peso, la muestra utilizada en el desarrollo de éste trabajo fue obtenida de la empresa antes mencionada. Su bajo peso se debe al hecho de ser lavas esponjosas, cuyas celdas se formaron por los gases que escapaban cuando el material estaba fundido, en una lava silícica tal como la riolita o dacita, de hecho también se las conoce como espumas sólidas. La piedra pómez es generalmente de color crema, casi blanco, y tiene una textura bastante uniforme de pequeñas celdas interconectadas.



La piedra pómez de las minas está a menudo contaminado con polvo volcánico, arcillas y esquistos, de modo que después de triturarse hay la necesidad de lavarlo para remover esas partículas extrañas. La porosidad que presenta éste material limita que su resistencia se compare con agregados convencionales, dando por tal motivo valores no tan bondadosos como los agregados convencionales en los ensayos de Valor de Trituración y Abrasión de los Angeles, por eso no se debe utilizar piedra pómez como agregado en un hormigón que va a estar sujeto a algún tipo de abrasión. Las características cualitativas de éste material que radican en importancia es su peso volumétrico suelto y compactado con valores de 540 kg/m^3 y de 600 kg/m^3 respectivamente.

3.2 Poliestireno

Se lo fabrica en forma de perlas de 0.2 mm a 3 mm de diámetro. Incrementando la temperatura, éstas perlas pueden dar lugar a expandirse libremente o a ser soldadas unas con otras y producir piezas moldeadas de células cerradas.

Para la expansión del poliestireno se consideran tres pasos (2):

Preexpansión.- La perla se la somete inicialmente a la acción del vapor de agua aproximadamente a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ en dispositivos de preexpansión. La temperatura ablanda la materia prima y aumenta la presión de vapor del agente expandible. Esto hace que el material aumente en volumen, hasta aproximadamente 50 veces su

tamaño original. El material resultante tiene una densidad aparente que puede hallarse entre 10 kg/m^3 y 30 kg/m^3 .

Reposo intermedio.- Las perlas preexpandidas se colocan en silos ventilados para enfriamiento. En ésta etapa las partículas condensan el agente expansivo y el vapor de agua, y la perla adquiere la estabilidad mecánica que necesitara en la etapa posterior.

Disposición final.- Las piezas preexpandidas y enfriadas son convertidas en piezas moldeadas para bloques, planchas, embalajes, etc.

En el hormigón liviano, se utilizan las perlas de poliestireno expandido que han completado la segunda etapa. Pueden reemplazar totalmente al agregado grueso, y parcialmente al agregado fino. Son áridos que no absorben agua, no tienen impurezas, no reaccionan con el cemento y tienen muy buena adherencia con él.

En el proceso de mezclado mecánico, se coloca el poliestireno previamente mojado para aumentar su peso, en el recipiente de mezcla, luego vertimos el agregado fino que se va a adherir a la superficie del poliestireno, luego de la mezcla se coloca el cemento y al final el agua de mezclado. El material obtenido forma una masa consistente, que se coloca en el sitio por apisonamiento manual o vibrado.

Para la elaboración del hormigón liviano, con poliestireno expandido, debe tenerse en cuenta la exacta dosificación de agua. Un exceso de agua en el diseño puede ocasionar una mezcla no cohesiva, y segregación del material en la superficie. Si la dosis de agua es correcta, la mezcla es homogénea.

Se puede usar éste tipo de hormigón liviano en rellenos de pisos y tabiques, en paneles y bloques para mampostería, en casetones entre viguetas pretensadas, fundamentos aislantes de estanques, morteros aislantes, capas estabilizadoras en carreteras, sobrelosas, etc.

Curiosamente el nombre comercial como se conoce a este material en el Ecuador es Perlita y lo distribuye la empresa Plastex.

3.3 Perlita

El hormigón confeccionado con perlita y vermiculita expandidas pertenecen a la categoría del hormigón ultra liviano, ya que poseen un peso unitario menor a 1100 kg/m³ y una resistencia a la compresión inferior a 7 MPa. Para su uso los requerimientos de resistencia deben de ser mínimos, y se emplean mayormente por sus otras características, principalmente aislamiento y baja densidad. Estos hormigones se usan para rellenos aislantes, líneas subterráneas de conductos, rellenos no portantes sobre hormigón estructural, y demás usos en que su resistencia a la compresión no sea de valores significativos.

La perlita es un vidrio volcánico originado por hidratación, producto de la erupción de los volcanes ácidos. El nombre de perlita se aplica tanto al vidrio volcánico hidratado como al agregado ligero producido por la expansión del vidrio, luego de triturarlo. Petrológicamente, la perlita se define como una riolita vítrea que tiene un aspecto perlado y particiones concéntricas que asemejan la *piel de cebolla*. Su estructura tiene forma de perlas diminutas, compactadas y colocadas juntas. El uso principal de la perlita expandida es en agregado ligero aislante, enlucidos, hormigón y en rellenos aislantes. Además luego de molida y clasificada, puede usarse como medio filtrante (1).

En su estado natural, la perlita es un vidrio riolítico que contiene un 2 % a 5 % de agua combinada. Lo que proporciona un valor comercial a la perlita es el hecho de que sometida a condiciones apropiadas de trituración y dimensionamiento, y calentada rápidamente a una temperatura de 900 °C a 1100 °C, llega a su punto de fusión incipiente y se expande con fuerza disruptiva, debido a la evolución del vapor, formando pequeñas partículas expandidas de un material celular cuyo peso volumétrico va de 30 hasta 240 kg/m³. Este material se seca rápidamente, y se le puede dar un acabado rápido. Usualmente la perlita expandida se produce tan solo en tamaños como de la arena.

Algunas perlitas son duras, y tienen alta resistencia a la compactación, por lo cual son utilizados como agregados de hormigón liviano y para enlucidos. En tanto que

otras son suaves y tienen bajas resistencia a la compactación y molidas se las utiliza como medio filtrante.

Debido a su estructura celular interna, la perlita ofrece varias ventajas como material aislante, en la industria de la construcción. La perlita como agregado, al ser combinado con cemento portland y agua produce un hormigón ligero que es usado para pisos livianos, y relleno de techos, para techos estructurales livianos, y en aplicaciones de aislamiento. En la construcción de tejados, además de su capacidad de aislamiento, es más fuerte, más rígido y más seguro contra el fuego que otros aislantes de techos. En techos planos, puede ser aplicado para proveer la inclinación necesaria para su drenaje, y además es un buen material para un techo sobre el cual se podrá volver a construir en lo posterior.

3.4 Viruta de madera

El aserrín consiste en gran parte de celulosa, también contiene azúcares solubles, ácidos, resinas, aceites, ceras y otras sustancias orgánicas en distintos grados, de acuerdo con la naturaleza de la madera del cual se obtuvo. Algunos de éstos aserrines tienen un efecto determinado sobre el fraguado y en el endurecimiento del cemento. En el mejor de los casos esto conduce a una incertidumbre sobre las propiedades del producto, pero en el peor de ellos se pueden obtener propiedades tan pobres como para ser virtualmente inservibles. Por ésta razón, se ha registrado

muchas patentes a través de los años sobre los métodos de pretratamiento del aserrín, a fin de evitar tales problemas.

La mayoría de los aserrines de maderas suaves se vuelven compatibles con el cemento, si se usa como aglutinante una mezcla de cemento y cal, éste tratamiento se lo utiliza a menudo en la práctica (1).

3.5 Cascarilla de arroz

Cada tonelada de arroz produce aproximadamente de 200 kg de cascarilla, que luego de la combustión se convierten en 40 kg de ceniza. La ceniza obtenida para el diseño en éste trabajo fueron obtenidas de las piladoras de Daule, en donde se encuentran cantidades considerables sin costo alguno. La combustión puede realizarse descontroladamente a campo abierto o al contrario, controladamente en hornos industriales, obteniéndose valores de 90 % al 95 % de sílice. Si es descontroladamente, su producto final contiene una gran cantidad de sílice cristalina no reactiva, tales como la cristobalita y la tridimita que deben de ser llevados a un tamaño muy pequeño para que puedan desarrollar su actividad puzolánica. Una ceniza altamente puzolánica puede ser producida por combustión controlada generando que la sílica, sea producida en forma no cristalina y en estructura celular, para esto se necesita una incineración controlada de 500 °C a 700 °C, a fin de obtener una ceniza altamente puzolánica (2).

De hecho hay patrones de aceptación de variación de valores de resistencia para hormigones normales, los cuales en determinadas condiciones, mejoran con el aumento de contenido de humedad, temperatura y presión del ambiente donde se efectúa el curado. No obstante muchos desconocen los efectos del hormigón que ha sido elaborado con cenizas de cascarilla de arroz, debido a su característica puzolánica, posee lentitud en ganar resistencia a edades tempranas.

Para un diseño del mismo, se tendrá que hacer las correspondientes pruebas físicas y mecánicas, donde la arena es reemplazado por la ceniza de cascarilla de arroz, en diferentes proporciones, determinando el valor óptimo de la razón agua-cemento con diferentes proporciones de ceniza de cascara de arroz para esfuerzos máximos de compresión.

3.6 Incorporación de aire

Lo que se ha denominado hormigón aireado, se puede definir como una mezcla con estructura más o menos homogénea de silicatos de granos finos, que contienen pequeñas celdas de aire no comunicadas entre sí.

Hay varios métodos para que las celdas de aire u otros vacíos se puedan formar en el interior de la lechada, de los cuales los principales se pueden describir así:

- Por la formación de gas por medio de una reacción química dentro de la masa durante su estado líquido o plástico, en forma muy semejante a la que el bióxido de carbono se forma y se usa en la aireación del pan y otros productos horneados.
- Por medio de la introducción de aire, ya sea agregando a la lechada en la mezcladora una espuma estable preformada semejante a la usada para combatir el fuego, o incorporando aire por medio de batido (con la ayuda de un agente inclusor de aire) en la misma forma en que la clara del huevo puede ser batida para formar una crema ligera o espumosa.

En el método de gasificación, interior, se agrega a la lechada un metal finamente pulverizado (usualmente aluminio), el cual reacciona con la cal que ha sido usada como agente cementante o que se ha formado en la matriz durante el fraguado del cemento (1).

De los diversos métodos para generar gas, el que tiene mayor importancia práctica actualmente en la manufactura de unidades precoladas y bloques es el proceso del polvo de aluminio. Los métodos de aireación por medio de espuma se usan únicamente hasta cierto límite en la fabricación de productos precolados curados al vapor, pero son eminentemente apropiados para hacer hormigón aireado *in situ*, y son muy usados para este propósito.

Aunque es un producto homogéneo, el hormigón aireado, curado al vapor, puede hacerse con una gran variedad de densidades por medio de ajustes apropiados en las condiciones de fabricación. Densidad baja se usa para aislamiento, para lo cual es eminentemente apropiado, aunque tenga solamente una resistencia moderada. Densidades altas tienen menor capacidad de aislamiento, pero mayor resistencia desde el punto de vista de capacidad de carga. La baja densidad del hormigón aireado conduce no solamente a lograr una reducción substancial del peso muerto en los edificios en que se usa, sino también en las cargas que deban transportarse y manejarse durante la construcción (1).



CAPITULO IV

DISEÑO Y ENSAYO EN EL HORMIGÓN

4.1 Dosificación

No existe proceso definido para el diseño de hormigón liviano como el que da el Método del ACI para Diseño de Hormigón convencional. Las proporciones empleadas en los diferentes ensayos nos van a dar referencia sobre las características finales del hormigón liviano resultante en éste proyecto.

Para el presente proyecto hemos escogido tres materiales que son de fácil obtención en el medio: Piedra Pómez, Ceniza de Cascarilla de Arroz y Poliestireno Expandido y un caso especial Lava Volcánica de la provincia de Galápagos. Las dosificaciones que se ensayaron son las que se muestran a continuación:

Los valores que se muestran a continuación están dados en kg/m³ de hormigón.

PIEDRA PÓMEZ - ARENA 40:60 Rel. aprox. por vol.				
MUESTRA	CEMENTO	AGUA	PIEDRA PÓMEZ	ARENA
1	505	355	245	820
2	290	385	260	885

CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ - ARENA 50:50 Rel. aprox. por vol				
MUESTRA	CEMENTO	AGUA	CENIZA DE C. ARROZ	ARENA
3	495	510	230	425

POLIESTIRENO EXPANDIDO - ARENA 80/20 Rel. aprox. por vol				
MUESTRA	CEMENTO	AGUA	POLIESTIRENO	ARENA
4	525	250	9.795	330
5	350	280	11.225	380

POLIESTIRENO EXPANDIDO - ARENA 60/40 Rel. aprox. por vol				
MUESTRA	CEMENTO	AGUA	POLIESTIRENO	ARENA
6	350	200	8.535	770

AGREGADOS DE GALÁPAGOS				
MUESTRA	CEMENTO	AGUA	AGREGADO GRUESO	ARENA
7	465	260	590	650
8	300	260	645	725

Para el diseño 7 se uso 68% de piedra basáltica triturada y 32% de granillo rojo;

50% de arena triturada y 50% de arena roja. Para el diseño 8 se uso 68% de piedra

basáltica triturada y 32% de granillo rojo; 20% de arena triturada y 80% de arena roja.

El código ACI 3.3 indica que “Los agregados que no cumplan especificaciones pero que hayan demostrado por pruebas especiales o por experiencias prácticas que producen un hormigón de resistencia y durabilidad adecuada, pueden utilizarse cuando lo autorice el Oficial de Construcciones”.

Los materiales provenientes de Galápagos fueron dos tipos de grava, gris y roja y una arena roja y una arena gris triturada, todo esto de origen volcánico.

La ceniza de cascarilla de arroz proviene de las piladoras de Daule. La arena utilizada en todos los diseños, a excepción del que se uso material de la provincia de Galápagos, fue arena común de río tal como se la encuentra en las canteras de Guayaquil.

Producto del ensayo de las dosificaciones mostradas anteriormente se moldearon 6 cilindros de hormigón de 300 mm de alto por 150 mm de diámetro. Para los ensayos de compresión los cilindros se distribuyeron así: un cilindro para ser ensayado a los 7 y 14 días y dos cilindros para los 28 días. Para el ensayo de tensión por compresión diametral o ensayo brasilero se utilizaron dos cilindros y para el ensayo de flexión pura se confeccionó una viga de 155 * 155 * 500 mm.

4.2 Resultados.

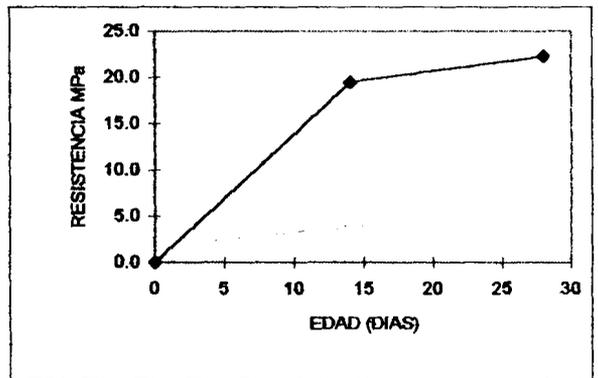
4.2.1 Resistencia: Compresión, Tracción y flexión pura.

Para el ensayo a compresión se cumplió con las normas ASTM C 33 e INEN 1573. En el ensayo de tensión por compresión diametral se cumplió con las normas ASTM C 496 - 90. Para el ensayo a flexión se cumplió con la norma ASTM C 78 - 84. Para el ensayo de revenimiento se cumplió con la norma ASTM C 143 - 90a.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

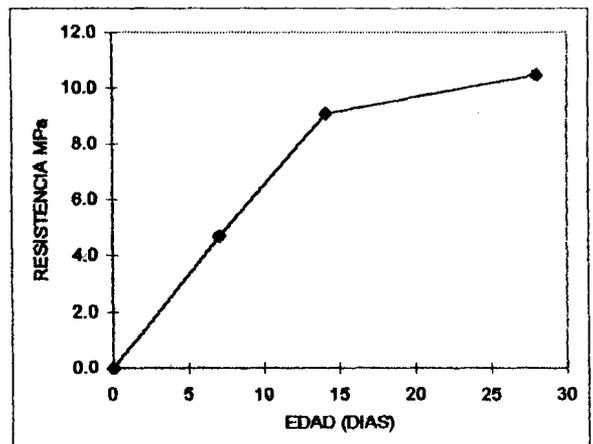
MUESTRA No.	REV cm	EDAD DIAS	DENSIDAD kg/m ³	f _c MPa
7	10	14	2026	19.5
		28	2031	22.3
DENSIDAD PROMEDIO			2029	

HORMIGON CON AGREGADOS DE GALAPAGOS.



MUESTRA No.	REV cm	EDAD DIAS	DENSIDAD kg/m ³	f _c MPa
8	10	7	1977	4.7
		14	2001	9.1
		28	1988	10.5
DENSIDAD PROMEDIO			1989	

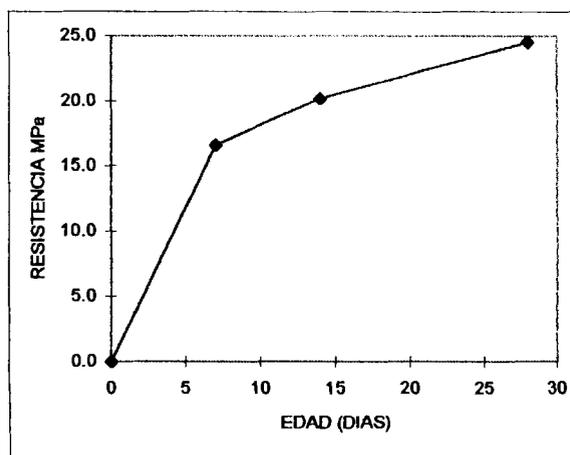
HORMIGON CON AGREGADOS DE GALAPAGOS



DENSIDAD CON RESPECTO AL CILINDRO EN ESTADO SATURADO

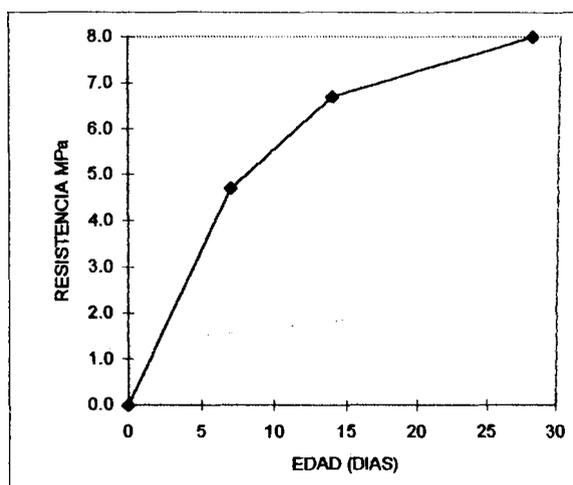
MUESTRA No.	REV cm	EDAD DIAS	DENSIDAD kg/m ³	f _c MPa
1	10	7	2007	16.6
		14	1974	20.2
		28	2005	24.5
DENSIDAD PROMEDIO			1995	

HORMIGON CON PIEDRA POMEZ



MUESTRA No.	REV cm	EDAD DIAS	DENSIDAD kg/m ³	f _c MPa
2	10	7	1868	4.7
		14	1918	6.7
		28	1864	8.0
DENSIDAD PROMEDIO			1883	

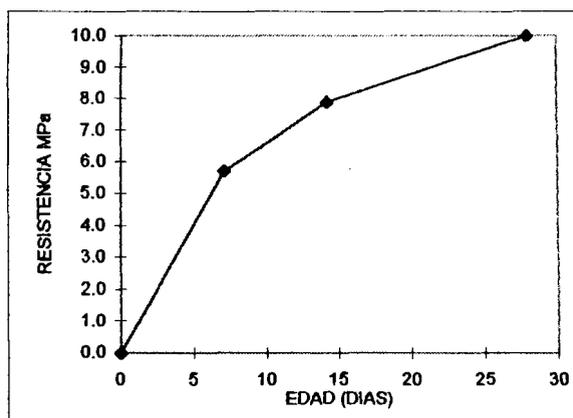
HORMIGON CON PIEDRA POMEZ



MUESTRA No.	REV cm	EDAD DIAS	DENSIDAD kg/m ³	f _c MPa
3	3	7	1700	5.7
		14	1711	7.9
		28	1717	10.0
DENSIDAD PROMEDIO			1709	

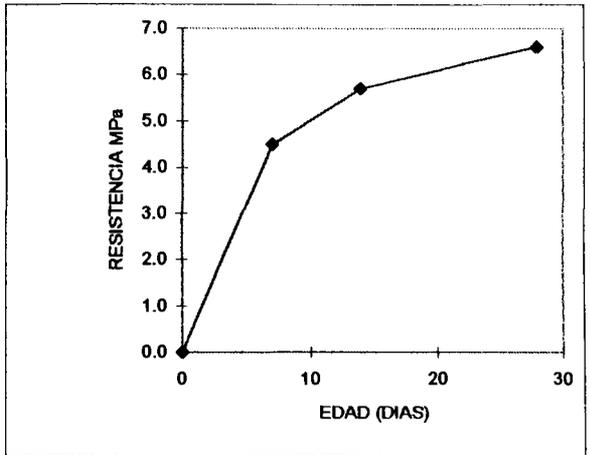
HORMIGON CON CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ

DENSIDAD CON RESPECTO AL CILINDRO EN ESTADO SATURADO



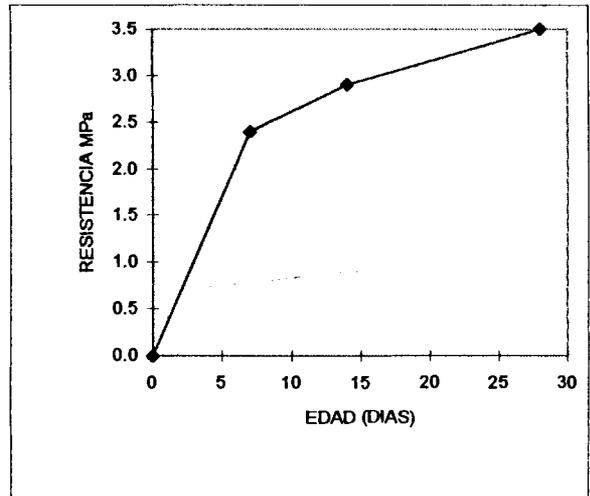
MUESTRA No.	REV cm	EDAD DIAS	DENSIDAD kg/m3	f _c MPa
4	10	7	1152	4.5
		14	1159	5.7
		28	1164	6.6
DENSIDAD PROMEDIO			1158	

HORMIGON CON POLIESTIRENO EXPANDIDO



MUESTRA No.	REV cm	EDAD DIAS	DENSIDAD kg/m3	f _c MPa
5	3	7	1025	2.4
		14	1032	2.9
		28	998	3.5
DENSIDAD PROMEDIO			1018	

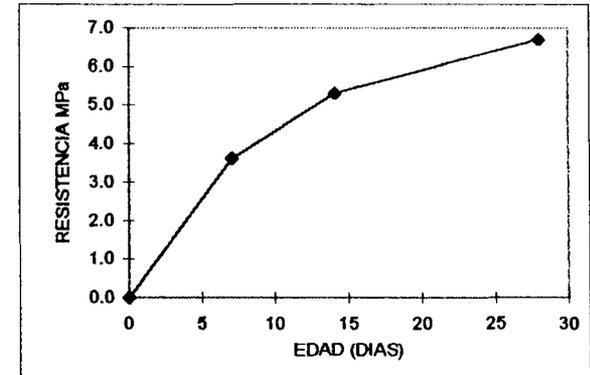
HORMIGON CON POLIESTIRENO EXPANDIDO



MUESTRA No.	REV cm	EDAD DIAS	DENSIDAD kg/m3	f _c MPa
6	3	7	1310	3.6
		14	1312	5.3
		28	1372	6.7
DENSIDAD PROMEDIO			1331	

HORMIGON CON POLIESTIRENO EXPANDIDO

DENSIDAD CON RESPECTO AL CILINDRO EN ESTADO SATURADO



TRACCIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL

MUESTRA No.	DIA. (mm)	LONGI (mm)	FUER (kN)	T (MPa)	PROM (MPa)
1	149	295	154	2.23	2.10
	151	295	139	1.98	
2	152	304	51	0.70	0.67
	152	301	46	0.63	
3	150	296	65	0.93	0.88
	150	296	59	0.84	
4	152	306	46	0.63	0.62
	151	306	45	0.61	
5	151	300	35	0.49	0.52
	151	302	40	0.56	
6	150	302	37	0.52	0.53
	150	301	38	0.54	
7	150	300	183	2.58	2.48
	150	301	168	2.37	
8	153	304	105	1.44	1.40
	150	305	98	1.36	

MODULO DE ROTURA EN VIGAS

MUESTRA No.	ANCHO (mm)	PROF (mm)	FUER (kN)	LONGI (mm)	FLEX. (MPa)	PROM (MPa)
1	154	154	28	436	3.32	3.32
2	157	155	14	456	1.66	1.66
3	152	152	18	456	2.28	2.28
4	154	155	12	457	1.43	1.43
5	158	154	9	458	1.09	1.09
6	155	154	10	457	1.21	1.21
7	157	157	27	456	3.13	3.12
	155	156	26	456	3.12	
8	156	155	14	435	1.57	1.70
	154	154	15	437	1.83	

4.2.2 Módulo de elasticidad

Para éste ensayo se cumplió con la norma ASTM C 469 - 87a. Los resultados fueron los siguientes:

MÓDULO DE ELASTICIDAD	
PIEDRA PÓMEZ Muestra 1	12.4 GPa
PIEDRA PÓMEZ Muestra 2	10.8 GPa
CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ Muestra 3	7.4 GPa
POLIESTIRENO EXPANDIDO Muestra 4	5.4 GPa
POLIESTIRENO EXPANDIDO Muestra 5	3.6 GPa
POLIESTIRENO EXPANDIDO Muestra 6	8.1 GPa
AGREGADOS DE GALAPAGOS Muestra 7	16.6 GPa

4.2.3 Conductividad térmica

La norma ASTM E 1225 - 87, presenta un modelo de transferencia de calor para conseguir el coeficiente de conductividad térmica de materiales.

Los equipos y materiales de ensayo se esquematizan en la fig No. 1.

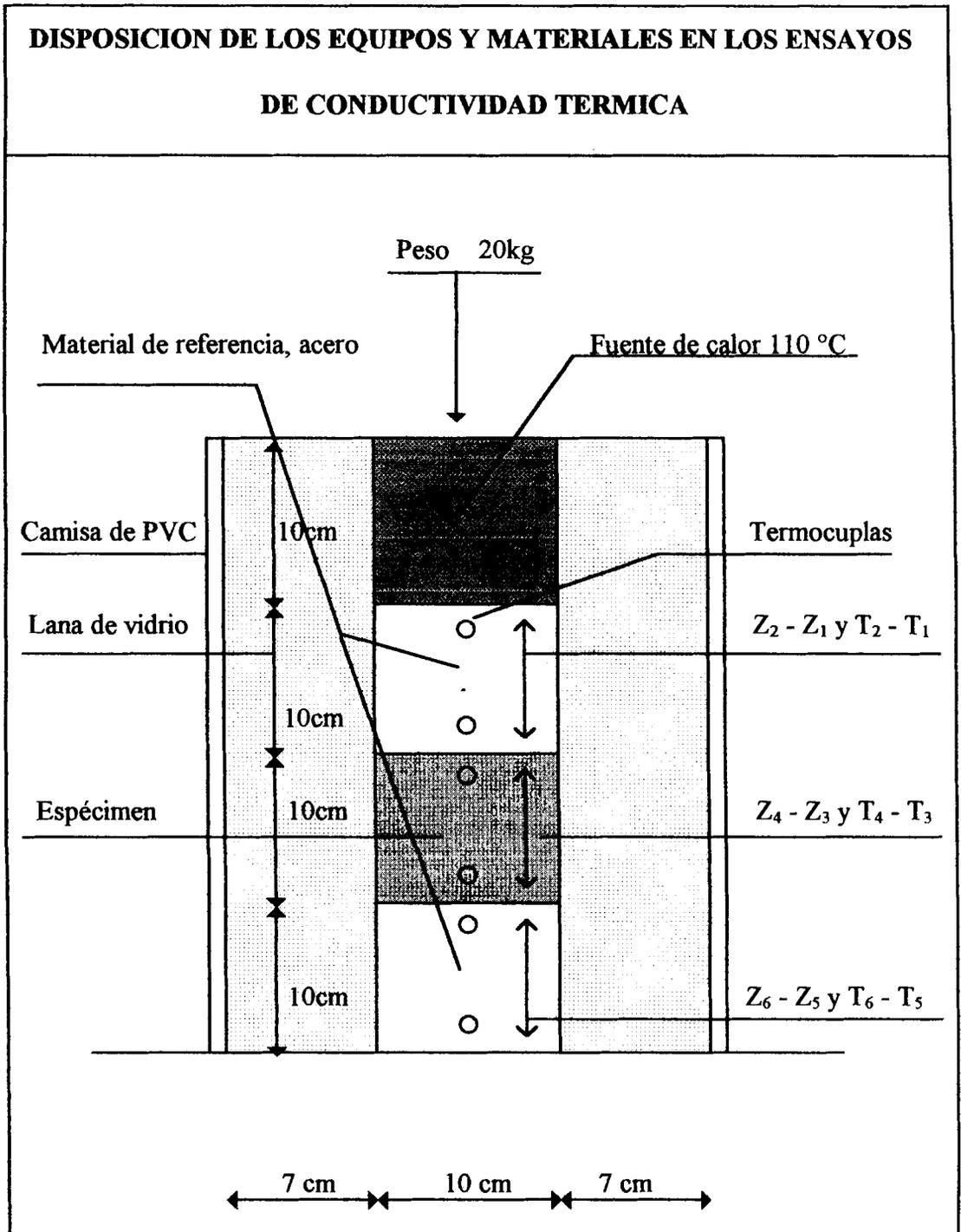


Fig. No. 1

Este modelo es el que se usó para obtener el dato de conductividad térmica. El espécimen es el elemento de hormigón liviano, del cual vamos a determinar la conductividad térmica. Los materiales de referencia serán de acero de transmisión, de conductividad térmica conocida. Tanto el espécimen como el material de referencia tendrán la misma forma y dimensiones, 100 mm de altura y 100 mm de diámetro. El material aislante que utilizaremos es lana de vidrio, con una conductividad térmica muy inferior a la del hormigón liviano, lo cual no sugiere corrección por fuga radial de calor. La camisa utilizada fue un tubo de PVC de 250 mm de diámetro, espesor de 5 mm y altura de 380 mm. La fuente de calor fue un vaso de acero de transmisión con un foco de 100 W en el interior con un regulador para 110 voltios y corregir las posibles variaciones de voltaje y a su vez de temperatura del foco. Se colocó 6 termocuplas con un lector de temperatura que rastreaba información cada 15 minutos. Los datos de temperatura que nos interesan son los que en una hora ya no presentan variaciones ya que la condición para aplicar las fórmulas de conductividad térmica citadas en la sección 2.1 es que exista flujo de calor en estado estacionario y en un solo sentido. Para lograr que se tenga un buen contacto entre las caras de los cuerpos, colocamos un peso de 10 kg.

$$\lambda = \frac{\lambda_M (Z_4 - Z_3)}{2 (T_4 - T_3)} \left[\frac{(T_2 - T_1)}{(Z_2 - Z_1)} + \frac{(T_6 - T_5)}{(Z_6 - Z_5)} \right]$$

Donde $(Z_n - Z_{(n-1)})$ y $(T_n - T_{(n-1)})$ representan las separaciones en m y las diferencias de temperatura en °C entre dos termocuplas de un mismo elemento. λ_M es la constante de conductividad térmica del material de referencia dada en $J / (s m °C)$. Esta fórmula proviene del concepto en que teniendo tres cilindros de formas iguales, el flujo de calor del cilindro central es igual al promedio del flujo de calor que recorre a través de los dos cilindros extremos. Los datos de conductividad térmica encontrados para los siguientes materiales fueron:

CONSTANTE DE CONDUCTIVIDAD TERMICA

PIEDRA PÓMEZ Muestra 1	0.70 J/ (s m °C)
PIEDRA PÓMEZ Muestra 2	0.44 J/ (s m °C)
CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ Muestra 3	0.66 J/ (s m °C)
POLIESTIRENO EXPANDIDO Muestra 4	0.45 J/ (s m °C)
POLIESTIRENO EXPANDIDO Muestra 5	0.37 J/ (s m °C)
POLIESTIRENO EXPANDIDO Muestra 6	0.44 J/ (s m °C)
AGREGADOS DE GALAPAGOS Muestra 7	0.74 J/ (s m °C)
AGREGADOS DE GALAPAGOS Muestra 8	0.52 J/ (s m °C)

4.2.4 Resistencia al fuego

Se sometieron las muestras de hormigón liviano al contacto con fuego directo proveniente de una estufa a gas y de un horno eléctrico. Se obtuvieron las siguientes observaciones:

Piedra pómez, muestra 1. Desprende compuestos de azufre desde 110 °C.

Piedra pómez, muestra 2. Desprende compuestos de azufre desde los 110°C. No presentan alteraciones.

Ceniza de cascarilla de arroz, muestra 3. No presenta alteración.

Poliestireno expandido, muestra 4. Mortero sin alteración. Poliestireno se desintegra desde 90 °C.

Poliestireno expandido, muestra 5. Mortero sin alteración. Poliestireno se desintegra desde 90 °C.

Poliestireno expandido, muestra 6. Mortero sin alteración. Poliestireno se desintegra desde 90 °C.

Agregados de Galápagos, muestra 7. No presenta alteración.

Agregados de Galápagos, muestra 8. No presenta alteración.

4.2.5 Contracción por secado

Se observó contracción por secado durante el fraguado de las muestras cilíndricas de hormigón, en sus moldes metálicos de 150 mm * 300 mm, se concluye lo siguiente:

Piedra pómez, muestra 1. No se dio contracción apreciable.

Piedra pómez, muestra 2. No se dio contracción apreciable.

Ceniza de cascarilla de arroz, muestra 3. Se dio una contracción de 1.5%.

Poliestireno expandido, muestra 4. No se dio contracción apreciable.

Poliestireno expandido, muestra 5. No se dio contracción apreciable.

Poliestireno expandido, muestra 6. No se dio contracción apreciable.

Agregados de Galápagos, muestra 7. No se dio contracción apreciable.

Agregados de Galápagos, muestra 8. No se dio contracción apreciable.

4.2.6 Dilatación térmica

El hormigón liviano posee la particularidad de tener bajo coeficiente de conductividad térmica, característica que permitirá resguardarlo de variaciones de temperatura que son los que producen el fenómeno de dilatación térmica. La dilatación térmica es directamente proporcional a la longitud del elemento, la diferencia de temperatura y afectado por un factor de dilatación que es propiedad de cada material. En este proyecto de tesis no se han incluido ensayos de dilatación térmica, dejando camino abierto a futuros trabajos de investigación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Los resultados que se han obtenido a partir de ocho diferentes diseños con hormigón liviano son:

RESUMEN DE RESULTADOS						
MUESTRA No.	DENSIDAD kg/m³	f_c MPa	T. C. D. MPa	M. R. V. MPa	MOD. ELAS. EST. GPa	C. TERMICA J / (s m C)
1	1925	24.5	3.32	2.10	12.4	0.70
2	1820	8.0	1.66	0.67	10.8	0.44
3	1660	10.0	2.28	0.88	7.4	0.66
4	1115	6.6	1.43	0.62	5.4	0.45
5	1020	3.5	1.09	0.52	3.6	0.37
6	1330	6.7	1.21	0.53	8.1	0.44
7	1965	22.3	3.12	2.48	16.6	0.74
8	1930	9.3	1.70	1.40	—	0.5

T. C. D. TRACCION POR COMPRESION DIAMETRAL

M. R. V. MODULO DE ROTURA EN VIGAS

2. En la dosificación utilizada para la mezcla de cemento con piedra pómez se obtuvo 24.5 MPa, aunque para ello se utilizó 505 kg de cemento por m^3 de hormigón. Se consiguió 8.0 MPa cuando se lo combinó con 290 kg de cemento por m^3 . Las densidades fluctúan entre 1925 y 1820 kg/m^3 , respectivamente.
3. El fuego afecta a los hormigones confeccionados con piedra pómez, a los que hace desprender compuestos de azufre, al igual que es perjudicial para los hormigones de poliestireno expandido.
4. Los agregados volcánicos de Galápagos presentaron una resistencia de 22.3 MPa, en una mezcla de 465 kg de cemento por m^3 de hormigón. Cuando se usó 300 kg de cemento por m^3 de hormigón, se consiguió una resistencia de 9.3 MPa. La densidad estuvo en 1965 y 1930 kg/m^3 , respectivamente.
5. En el diseño efectuado con ceniza de cascarilla de arroz se consiguió 10.0 MPa, con 495 kg de cemento por m^3 de hormigón, para tener una densidad de 1660 kg/m^3 . Tiene similitud con la resistencia del diseño de piedra pómez con 290 kg de cemento por m^3 de hormigón, aunque éste tiene la desventaja de que desprende compuestos de azufre al elevarlo sobre los 110 °C.
6. En el diseño que usó 525 kg de cemento por m^3 de hormigón y una relación poliestireno arena de 80:20 (vol.), se obtuvo 6.6 MPa, con densidad de 1115 kg/m^3 . Tiene similitud a la resistencia obtenida en el diseño con 350 kg de cemento por m^3 de hormigón y con una relación poliestireno arena de 60:40 (vol.), en que se consiguió 6.7 MPa de resistencia, pero su densidad aumentó a 1330 kg/m^3 . Otro diseño de 350 kg de cemento por m^3 de hormigón con una relación poliestireno arena de 80:20 (vol.), consiguió una resistencia de 3.5 MPa, y una densidad de 1020 kg/m^3 .

7. Hubo descascaramiento superficial en los cilindros de hormigón al ser retirados del molde metálico, en el diseño que usó una relación de poliestireno arena 80:20 con 350 kg de cemento por m^3 de hormigón y lo mismo ocurrió en el diseño que usó relación poliestireno arena de 60:40 con 350 kg de cemento por m^3 de hormigón. En el diseño con relación poliestireno arena 80:20 y 525 kg de cemento por m^3 de hormigón no se dio descascaramiento superficial. El descascaramiento superficial se justifica dada la casi nula resistencia a la tensión del hormigón liviano con poliestireno en su masa (relaciones con respecto al volumen).
8. El módulo de elasticidad de los hormigones livianos está por debajo de la mitad comparado con el hormigón convencional.
9. Las densidades mas bajas fueron alcanzadas con la mezcla de relación poliestireno arena 80:20 con 525 y 350 kg de cemento por m^3 de hormigón, con 1115 y 1020 kg/m^3 , con resistencias de 6.6 y 3.5 Mpa, respectivamente.
10. El porcentaje de aire incorporado en las mezclas con piedra pómez fue del 7,3% para el diseño 1 y 2. El porcentaje de aire incorporado en las mezclas con poliestireno expandido fue del 6,8% para el diseño 4 y de 7.2% para el diseño 5.
11. Se adiciona una tabla de características de los agregados en la siguiente página.

CARACTERIZACION DE AGREGADOS

AGREGADO	D.s.s.s.	M.U.S.	M.U.C.	Po %	M.F.	ABRASION	
	kg/m3	kg/m3	kg/m3			% PERDIDA	GRADACION
POLIESTIRENO EXPANDIDO	21	13.2	13.2	1.2	---	---	---
CENIZA DE CASCARILLA ARROZ	1480	150	203	66.8	---	---	---
PIEDRA POMEZ	1235	540	590	68.3	6.3	---	---
ARENA NATURAL	2660	1415	1567	2.5	2.6	---	---
GRANILLO ROJO	1930	740	865	10.5	5.8	33.8	"C"
PIEDRA TRITURADA	2245	980	1150	4.5	8.0	27.6	"3"
ARENA TRITURADA	2620	1590	1700	4.3	2.8	---	---
ARENA ROJA	2175	1070	1125	8.6	3.0	---	---

ANEXOS

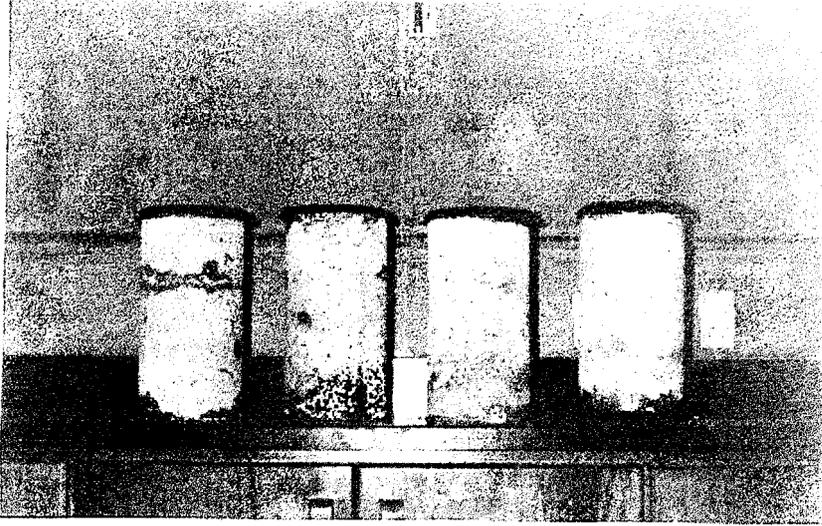


Figura No 1. Desde la izquierda, primer cilindro compactado con varilla normalizada, el segundo y tercero produjo un descascaramiento superficial, los tres con poliestireno expandido. El cuarto cilindro es de hormigón normal.

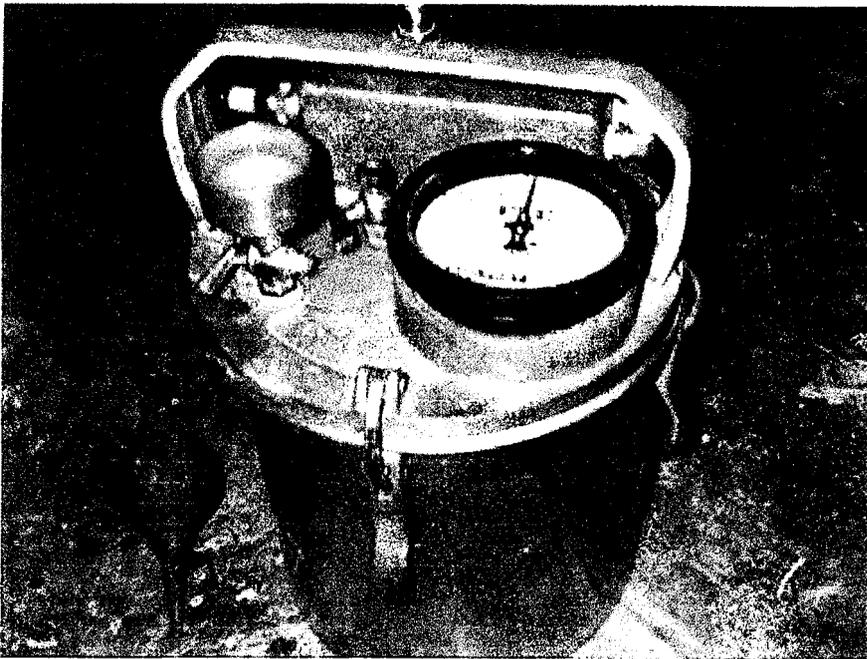


Figura No 2 La Olla de Washington da el valor del aire incorporado en porcentaje, en la mezcla de hormigón.



Figura No 3 Prensa para el ensayo de resistencia a la compresión de cilindros

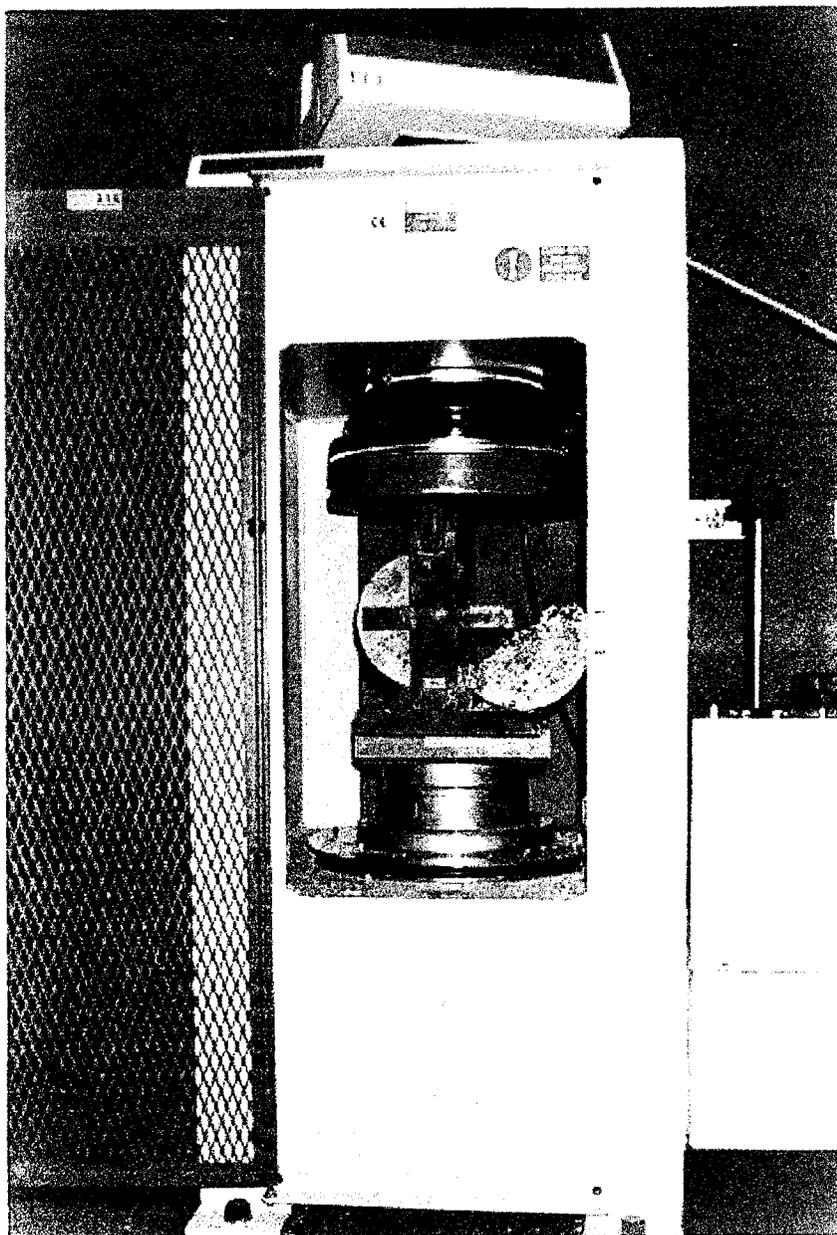


Figura No 4 Prensa de compresión de cilindros finalizando el ensayo brasifeño

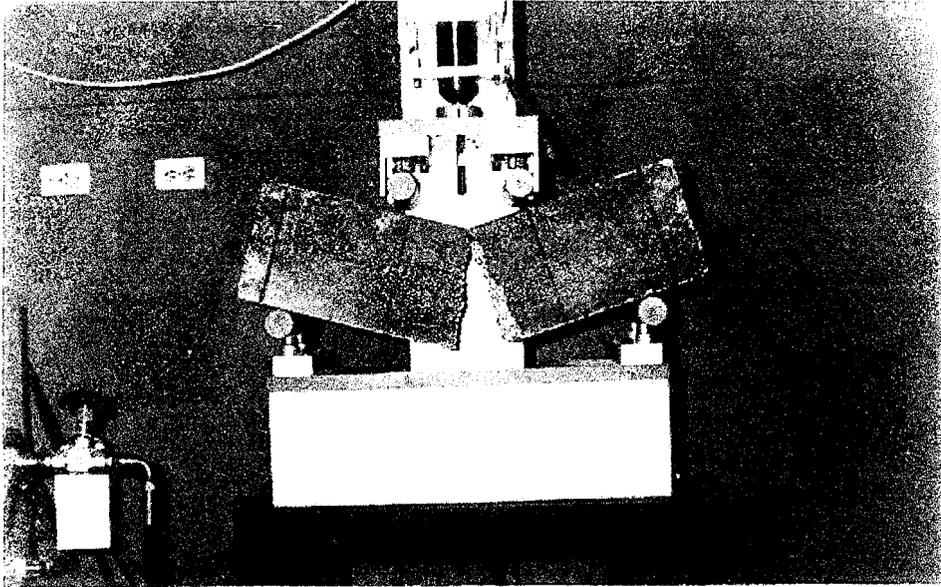


Figura No 5. Ensayo de flexión pura, en el instante en que la viga falla

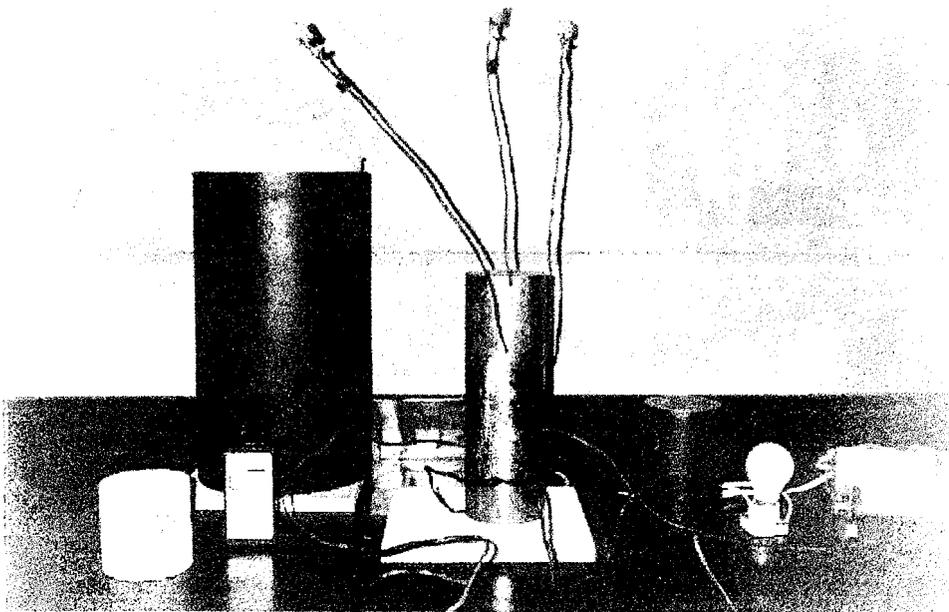


Figura No 6. Equipos utilizados en el ensayo de conductividad térmica. Las dimensiones se encuentran en la pag. -12

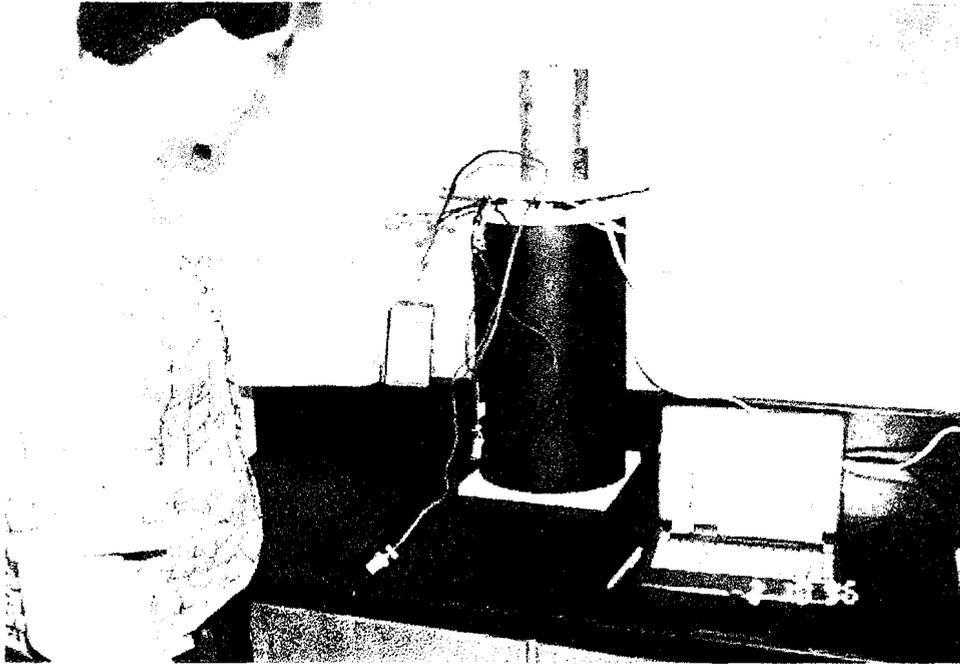


Figura No 7 Ensayo de conductividad térmica, disposición de equipos y sensores de temperatura.

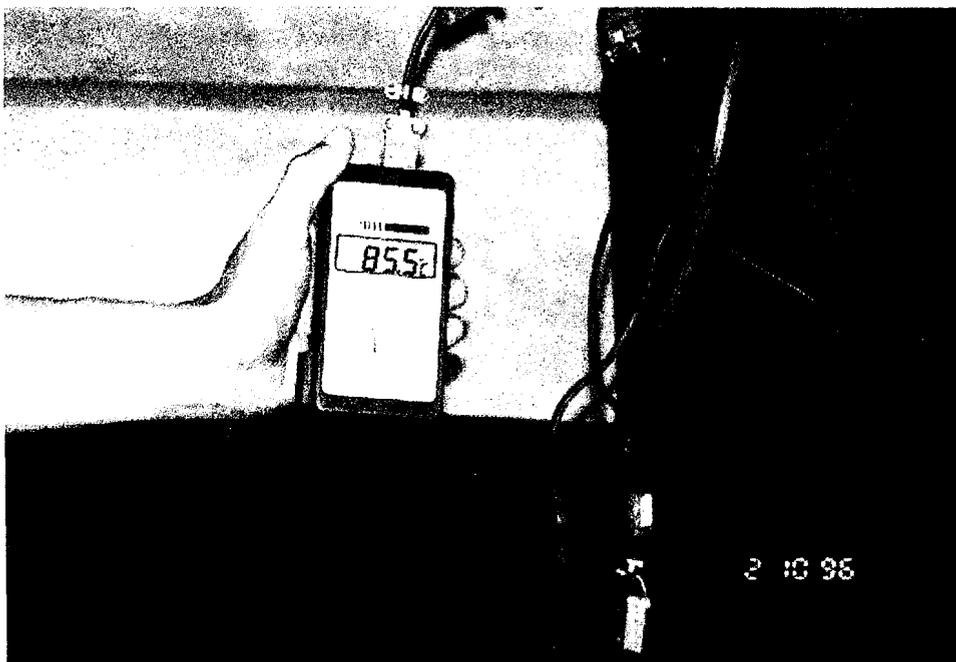


Figura No 8. Lector de termocupla para el ensayo de conductividad térmica.

BIBLIOGRAFIA

1. **SHORT, K.** Hormigón Ligeró, Limusa, México, 1980, pag. 17, 18, 49, 59, 115, 171, 276, 308, 331.
2. **NANCY VARELA.** Monografía Hormigones livianos. Guayaquil. Universidad Católica de Guayaquil, 1995, Pag. 1, 3, 7, 14, 27, 29, 31.
3. **Z. S. YOUNG.** Física Universitaria, Fondo Educativo Interamericano, México 1986, pag. 370 - 379.
4. **KOSMATKA.** Design and control of concrete mixtures. CPCA, EE. UU. 1991, pag. 184 - 190.
5. **GUTIERREZ.** Area de materiales, ICC, España, 1988. Pag. 352 - 374.
6. **CLARKE.** Estructural lightweighth aggregate concrete. B. A. P. Great Britain, 1996, pag. 156.
7. **WILEY.** Concrete manual, Wiley J EE. UU. 1981. Pag. 439 - 442.