



**UNIVERSIDAD POPULAR AUTÓNOMA  
DEL ESTADO DE PUEBLA**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
Especialidad en Construcción**

TESINA:

**CONCRETOS LIGEROS**

Presenta:

**TIZIANO PEREA OLVERA**

Puebla, Pue., México

Octubre de 2003



**UPAEP – Secretaría General**

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyła**

**Tesis Digitales Restricciones de uso:**

**DERECHOS RESERVADOS ©**

**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Í N D I C E

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1	DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN .....	1
1.2	ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	3
1.3	FUNDAMENTOS DEL CONCRETO LIGERO.....	5
1.4	TIPOS DE CONCRETO LIGERO.....	5
<b>2</b>	<b>PROPIEDADES FUNCIONALES DEL CONCRETO LIGERO.....</b>	<b>8</b>
2.1	INTRODUCCIÓN .....	8
2.2	AISLAMIENTO TÉRMICO .....	8
2.3	CALCULO DE LA TRANSMITANCIA TÉRMICA DE MUROS Y TECHOS .....	12
2.4	PROTECCIÓN CONTRA EL FUEGO.....	14
2.5	DURABILIDAD.....	16
2.6	ABSORCIÓN DE AGUA .....	17
2.7	PENETRACIÓN DE LA LLUVIA.....	17
2.8	PROPIEDADES ACÚSTICAS.....	18
<b>3</b>	<b>ASPECTOS QUÍMICOS DEL CONCRETO LIGERO .....</b>	<b>20</b>
3.1	INTRODUCCIÓN .....	20
3.2	TIPOS Y NATURALEZA DE LOS CEMENTOS.....	21
3.3	EL FRAGUADO DEL CEMENTO.....	22
3.4	CARBONATACIÓN.....	23
3.5	LA CAL COMO AGLUTINANTE EN EL CONCRETO AIREADO.....	23
3.6	RESISTENCIA A LOS SULFATOS .....	23
3.7	ADITIVOS.....	24
<b>4</b>	<b>DISEÑO DE LA MEZCLA .....</b>	<b>25</b>
4.1	INTRODUCCIÓN .....	25
4.2	CONCRETO SIN FINOS.....	29
4.3	CONCRETO PARCIALMENTE COMPACTADO CON AGREGADOS LIGEROS .....	30
4.4	CONCRETO PARA ESTRUCTURAS CON AGREGADOS LIGEROS .....	31
4.5	CONCRETO AIREADO .....	34
4.6	DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA PROPUESTO POR RAMOS .....	34
4.7	MÉTODO DE DOSIFICACIÓN PROPUESTO POR VIDELA Y LÓPEZ .....	42
<b>5</b>	<b>CURADO DEL CONCRETO .....</b>	<b>51</b>
5.1	INTRODUCCIÓN .....	51
5.2	FUNDAMENTOS.....	51
5.3	TRABAJO EXPERIMENTAL .....	52
5.4	MÉTODOS PRÁCTICOS DE CURADO.....	54
<b>6</b>	<b>CONCRETO CON AGREGADO LIGERO.....</b>	<b>57</b>
6.1	PROPIEDADES GENERALES .....	57
6.2	OTRAS PROPIEDADES .....	60
6.3	AGREGADOS LIGEROS .....	67
6.4	APLICACIONES.....	86
<b>7</b>	<b>CONCRETO CELULAR .....</b>	<b>90</b>
7.1	DEFINICIÓN.....	90
7.2	MÉTODOS DE PRODUCCIÓN .....	90
7.3	PROPIEDADES.....	91

<b>8</b>	<b>CONCRETO SIN FINOS</b> .....	<b>92</b>
8.1	<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	92
8.2	<i>GENERALIDADES</i> .....	93
8.3	<i>HISTORIA Y DESARROLLO</i> .....	94
8.4	<i>RESISTENCIA</i> .....	94
8.5	<i>CONTRACCIÓN POR SECADO</i> .....	95
8.6	<i>CONDUCTIVIDAD TÉRMICA</i> .....	96
8.7	<i>PENETRACIÓN DE LA HUMEDAD</i> .....	96
8.8	<i>OTRAS PROPIEDADES</i> .....	97
8.9	<i>FABRICACIÓN DEL CONCRETO SIN FINOS</i> .....	97
<b>9</b>	<b>CONCRETOS CON ALTO GRADO DE AISLAMIENTO TÉRMICO</b> .....	<b>99</b>
9.1	<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	99
9.2	<i>AGREGADOS CON ALTO GRADO DE AISLAMIENTO TÉRMICO</i> .....	99
<b>10</b>	<b>CONCRETO ESTRUCTURAL LIGERO</b> .....	<b>102</b>
10.1	<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	102
10.2	<i>TIPOS DE AGREGADOS</i> .....	103
10.3	<i>PROPIEDADES FÍSICAS</i> .....	105
10.4	<i>PROPIEDADES MECÁNICAS</i> .....	107
10.5	<i>DISEÑO DE ELEMENTOS DE CONCRETO ESTRUCTURAL LIGERO</i> .....	120
<b>11</b>	<b>CONCRETO LIGERO PRESFORZADO</b> .....	<b>125</b>
11.1	<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	125
11.2	<i>PROPIEDADES DEL CONCRETO PRESFORZADO DE AGREGADO LIGERO</i> .....	127
11.3	<i>CONCRETOS DE AGREGADOS LIGEROS DE ALTA RESISTENCIA</i> .....	135
11.4	<i>CONCRETO CELULAR (O AIREADO) PRESFORZADO</i> .....	139
11.5	<i>COMENTARIOS FINALES</i> .....	142
<b>12</b>	<b>BLOQUES DE CONCRETO LIGERO</b> .....	<b>144</b>
12.1	<i>RESISTENCIA A LA INTEMPERIE</i> .....	145
12.2	<i>COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL</i> .....	146
12.3	<i>AISLAMIENTO ACÚSTICO</i> .....	146
12.4	<i>AISLAMIENTO TÉRMICO</i> .....	147
12.5	<i>RESISTENCIA AL FUEGO</i> .....	148
12.6	<i>ACABADOS</i> .....	148
12.7	<i>APLICACIONES</i> .....	148
<b>13</b>	<b>APLICACIONES CON CONCRETOS LIGEROS</b> .....	<b>150</b>
13.1	<i>EDIFICIOS</i> .....	150
13.2	<i>OTRAS CONSTRUCCIONES</i> .....	159
<b>14</b>	<b>CONSIDERACIONES REGLAMENTARIAS</b> .....	<b>169</b>
14.1	<i>PROPUESTA DE NTCC-RCDF, 2001</i> .....	169
14.2	<i>REGLAMENTO ACI-318, 1999</i> .....	170
<b>15</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>172</b>
	<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>174</b>
	<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	<b>175</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN

Aun cuando la mayoría de los profesionales de la construcción entienden de una manera general lo que significa “concreto ligero”, el término, de hecho, no ha sido nunca definido con precisión. Se ha dicho, no sin razón, que el concreto ligero es un concreto de características propias que por un medio o por otro se ha hecho más ligero que el concreto convencional de cemento, arena y grava (Figura 1.1), y que por tanto tiempo ha sido el principal material empleado en las construcciones; esto último, sin embargo, es más bien una descripción cualitativa que una definición. Asimismo, se ha sugerido definirlo como un concreto hecho a base de agregados de peso ligero, descripción que es incompleta, ya como se comentará más adelante, algunos tipos de concreto ligero ni siquiera contienen agregados.

En vista de la dificultad para definirlo, el concreto ligero fue conocido durante muchos años como un concreto cuya densidad superficialmente seca no fuese mayor de  $1600 \text{ kg/m}^3$  (Short y Kinniburgh, 1967). Por otra parte, con la introducción de miembros estructurales de concreto reforzado con agregados de peso ligero, la densidad límite tuvo que ser revisada, ya que algunas mezclas de concreto hechas para ese propósito, a menudo daban concretos de densidad (superficialmente secos) de  $1840 \text{ kg/m}^3$  o mayores. Esto, sin embargo, es aún concreto ligero, dado que resulta todavía bastante más ligero que el concreto común, que usualmente pesa entre los  $2400$  y  $2560 \text{ kg/m}^3$ .

En un principio, el término “concreto con agregados de peso ligero” era asociado casi exclusivamente a un material de carácter poroso, no compactado, y su uso estaba destinado sólo a la construcción de muros, principalmente del tipo hecho con bloques de mampostería. No obstante que ahora son usados como elementos de carga, originalmente los muros hechos con concreto ligero 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 concreto de gran resistencia, adecuado para trabajo estructural. Estos avances alentaron el uso del concreto con agregado de peso ligero, en lugar del concreto común, especialmente cuando la reducción de peso era una consideración importante para el diseño y la economía de una estructura.

El concreto ligero se utiliza principalmente para la construcción de elementos estructurales en edificaciones como columnas, travesaños, muros de contención, losas y zapatas, donde sea deseable reducir el peso del concreto para disminuir la carga de la cimentación. También es apropiado para colar elementos de relleno, que no soporten cargas estructurales. Se le reconoce como de gran utilidad en obras tales como teatros, cines y museos, donde las especificaciones de comportamiento acústico de las construcciones terminales son muy estrictas. Además, es de gran utilidad en todo tipo de edificaciones en zonas con temperaturas extremas debido a sus propiedades térmicas. Este tipo de concreto permite el diseño más esbelto de estructuras, haciéndolas más estéticas y con un mejor aprovechamiento de los espacios interiores de la construcción. Asimismo, permite variar su rango de revenimiento y resistencia a la compresión, aunque por lo general es difícil que alcance resistencias altas debido a las propiedades en su dosificación.

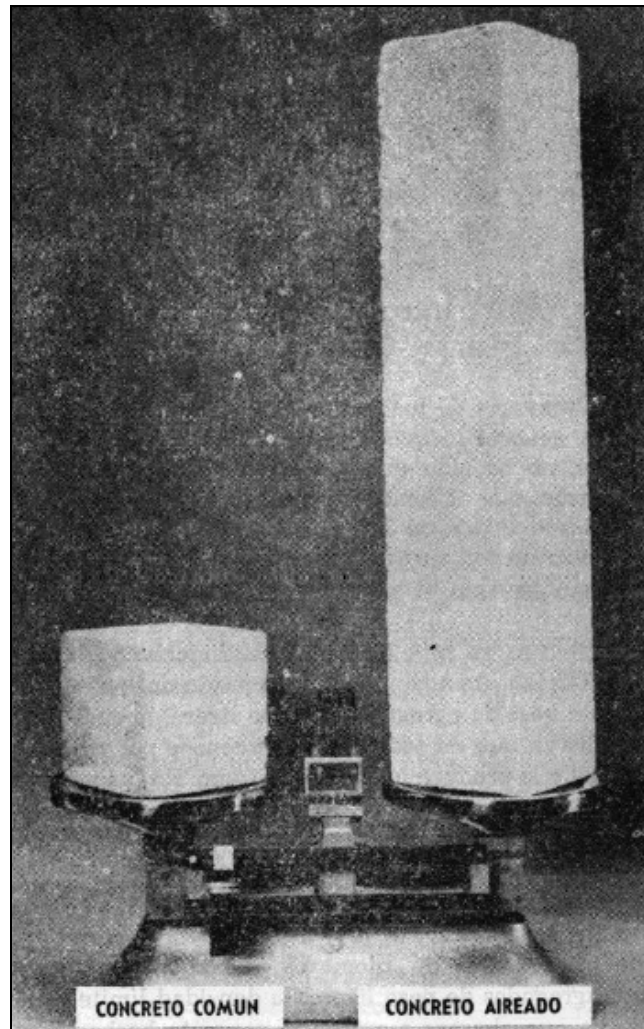


Figura 1.1. Comparación en volumen de bloques del mismo peso hechos con (izquierda) concreto convencional y (derecha) con concreto ligero del tipo aireado (Short y Kinniburgh, 1967).

Como se comentará durante el desarrollo del presente trabajo, entre los años 50's y 80's, se dio mundialmente un auge por desarrollar conocimiento relacionado con la tecnología del concreto ligero, sin embargo, en apreciación del autor, en los últimos años ha perdido interés el estudio de dicho material. No obstante, en el presente trabajo se intenta documentar el estado del arte del conocimiento en las propiedades y características de los concretos ligeros con relación a las de aquellos concretos tradicionales.

En este sentido, la característica más evidente del concreto ligero es, por supuesto, su densidad, la cual es siempre considerablemente menor que la del concreto ordinario y una fracción de la misma. Las ventajas de tener materiales con baja densidad son muy numerosas, por ejemplo: reducción de las cargas muertas, mayor rapidez de construcción, menores costos de transporte y acarreo, etc. 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 hacia la construcción de edificios cada vez más altos; para lograr dicho objetivo en estructuras reticulares, los marcos deben llevar las cargas de pisos y muros, y en ellos se pueden lograr considerables ahorros en su costo si se utilizan losas de entepiso, muros divisorios y acabados exteriores a base de concreto ligero.

Se ha demostrado experimental y prácticamente en la industria de bloques vibrocomprimidos, que utilizando concreto ligero en dichos elementos se logran menores tiempos de ejecución en la construcción de muros que si se utilizaran materiales tradicionales; por ello, algunos constructores prefieren usar unidades de concreto ligero que ladrillos ordinarios para ejecutar una misma área de muro. Para la mayoría de los materiales de construcción, tales como el ladrillo de barro recocido, el acarreo de los mismos queda limitado no por su volumen sino por su peso; con dispositivos o sistemas de acarreo diseñados convenientemente se pueden manejar en forma económica volúmenes mucho mayores de concreto ligero.

Una característica menos clara, pero no menos importante del concreto ligero, es la conductividad térmica relativamente baja que posee, propiedad que mejora conforme se reduce su densidad. En los últimos años, más que en los anteriores, se ha dado mayor importancia a la necesidad de reducir el consumo de combustible de los sistemas de calefacción de las construcciones, mientras se mantenga o de ser posible se mejore, el ambiente a una temperatura confortable dentro de ellas. Lo anterior se podrá entender con mayor claridad, si se sintiera como un muro sólido de concreto ligero aireado de 15 cm de espesor proporciona un aislamiento térmico de aproximadamente cuatro veces mayor que el de una pared de ladrillo de 23 cm de espesor.

Además de sus ventajas desde el punto de vista técnico en la construcción, algunos tipos de concreto ligero tienen el gran merito de proporcionar una salida a ciertos desechos de plantas industriales, tales como las escorias de hulla, las cenizas de combustibles pulverizados y las escorias de altos hornos. La construcción, además de la agricultura, es la industria que por si sola puede absorber los millones de toneladas de desechos industriales que anualmente se producen; en capítulos posteriores, se hablará de la forma en que dichos desperdicios se utilizan en materiales de construcción. Dichos desechos industriales, así como las cenizas volantes (naturales), son imprescindibles para la fabricación de concretos de alto desempeño, los cuales tienen intrínsecas mejoras sustanciales en cuanto a su resistencia y durabilidad; para conocer mayores detalles del estado del arte en la tecnología de los concretos de alta resistencia, se sugiere consultar la investigación hecha por Perea E. (2002).

En algunas regiones han comenzado a escasear, en estos últimos años, los agregados tradicionales del concreto común: la arena y la grava; es entonces cuando el concreto ligero, aun sin tener en cuenta ninguna otra de sus cualidades, podría, por lo menos, suplir las deficiencias de dichos materiales en tales regiones.

Básicamente, existe una forma para hacer el concreto de menor peso; es por la inclusión de aire en su estructura. Esto, sin embargo, puede lograrse de tres diferentes maneras:

- 1) Omitiendo los finos y los granos de diámetros pequeños del agregado pétreo, con lo cual se logra el llamado “concreto sin finos”.
- 2) Substituyendo los agregados de grava o piedra triturada por agregados con estructura porosa, con lo cual se logra el llamado “concreto con agregados de peso ligero”.
- 3) Haciendo que se produzcan burbujas de aire en una lechada de cemento, de manera que al fraguar quede con una estructura celular esponjosa llamada “concreto aireado o celular”.

Los tres tipos de concreto ligero se ilustran esquemáticamente en la Tabla 1.1. Sin embargo, como se comentará más adelante, aunque básicamente son tres los tipos distintos se pueden tener también unas combinaciones de los mismos para formar otros concretos más ligeros aún; por ejemplo, se puede tener un concreto sin finos cuyo agregado sea de peso ligero, al igual que un concreto aireado o celular que contenga agregado de peso ligero.

## 1.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Cabe mencionar que el concreto ligero no representa en ningún caso una nueva clase de material para la construcción. A fines del siglo XIX se le utilizó en los Estados Unidos de Norteamérica, Inglaterra y en muchos otros lugares, en la forma de concreto con agregado de escoria de hulla. Su empleo no se limitó a viviendas y habitaciones populares de bajo costo, sino que también se utilizó en ciertas partes de edificios y monumentos, tales como el Museo Británico terminado en 1907. También se sabe que los Romanos usaron

frecuentemente una forma de concreto ligero en sus construcciones: tal es el caso de la cúpula de 44 m. de diámetro del Partenón, en Roma, construida en el siglo II D.C., la cual se compone en gran parte de un concreto colado “in situ”, a base de agregado de pómez.

En los Estados Unidos de Norteamérica se utilizó un concreto con agregados de arcilla expansiva en la construcción de barcos durante la Primera Guerra Mundial, así como también en la fabricación de bloques del mismo material, los cuales han sido empleados continuamente en ese país desde los primeros años de la década de los veinte, hasta la fecha. Sin embargo, aparte de algunas actividades aisladas durante la guerra en la construcción de barcos, no fue sino hasta 1950 cuando por primera vez en la Gran Bretaña se utilizó formalmente el concreto de arcilla expansiva (Short y Kinniburgh, 1967).

A mediados de la década de los treinta, la escoria espumosa de los altos hornos se introdujo en Inglaterra y, desde entonces, se ha usado mucho como agregado de peso ligero. Antes de esto, se había utilizado en algunas ocasiones en Gran Bretaña la piedra pómez natural, pero su uso se discontinuó a partir de la Segunda Guerra Mundial (Short y Kinniburgh, 1967).

En los Estados Unidos de Norteamérica, se iniciaron algunos trabajos experimentales sobre las cenizas sinterizadas de combustibles en los años 40; sin embargo es en Europa, y principalmente en Inglaterra, donde se desarrollaron estudios formales y sus desarrollos comerciales subsecuentes; desde el Reino Unido, el interés en este material se propagó a Holanda, Francia, Alemania, y Rusia, entre otros lugares.

De acuerdo con Short y Kinniburgh (1967), el concreto a base de agregados ligeros se utilizaba antes de la Segunda Guerra Mundial en el Reino Unido, y principalmente en la fabricación de bloques para muros que no fueran de carga. Más tarde, debido en gran parte a la mejor calidad del concreto obtenido con el uso de las escorias espumosas como agregado, el concreto ligero se pudo utilizar también para elementos de carga. Con la experiencia obtenida posteriormente, el concreto de agregados ligeros ha sido utilizado más recientemente para elementos estructurales de concreto reforzado y en algunos casos también para elementos de concreto presforzado.

También de acuerdo Short y Kinniburgh (1967), paralelamente al desarrollo del concreto de agregado de peso ligero, se fue efectuando un progreso similar en el concreto aireado. Por primera vez se produjo el concreto aireado en Suecia en 1929, y su empleo durante los primeros años se destinó exclusivamente a la fabricación de bloques. Las mejoras de sus propiedades condujeron al desarrollo de unidades reforzadas. No fue sino por el año de 1950 que se introdujo en Inglaterra el concreto aireado para elementos de carga, y por casi 10 años no se tuvo más que una sola fábrica dedicada técnicamente a la producción de bloques (Short y Kinniburgh, 1967).

Uno de los estímulos más importantes para el desarrollo de nuevos tipos de agregados ligeros, ha sido la merma del abastecimiento de escoria de hulla a la industria establecida. La fuente principal de escoria de hulla es el gran número de plantas generadoras de electricidad. Al adoptar instalaciones automáticas que queman carbón pulverizado en lugar de las plantas de calderas con cargadores a parrillas articuladas que consumían carbón granulado, la naturaleza del producto de desecho ha cambiado. En lugar de las escorias de hulla provenientes de las calderas, ahora se obtienen cenizas sinterizadas de combustibles en polvo, agregado de peso ligero adecuado para la fabricación de bloques que se produce en cantidades cada vez mayores. La eliminación general de la escoria de hulla proveniente de calderas que fue el agregado de peso ligero más barato y más abundante, dejó un vacío que no podría ser llenado todavía en forma adecuada por la presente producción de agregados de peso ligero o concreto aireado.

En Dinamarca, la falta de agregado natural de peso ligero originó el desarrollo de la “Leca”, agregado de arcilla expansiva que se produce en hornos rotatorios.

En los Estados Unidos de Norteamérica, el desarrollo en gran escala del concreto ligero fue más rápido que en ninguna otra parte, debido principalmente a que el enorme tamaño del país origina altos costos de transporte para mover materiales pesados a través de grandes distancias para llegar a los sitios de las obras; este factor también debe ser aunado al de los costos de la mano de obra relativamente altos. Aunque no existe una escasez general de los agregados comunes, éstos se encuentran a veces a distancias considerables de los centros industriales y de población; es entonces cuando resulta económico el uso de agregados de peso ligero producidos en la localidad. Altos factores han conducido al desenvolvimiento y amplio uso de una gran variedad de agregados de peso ligero de diferentes calidades que han tenido usos muy diversos, desde la construcción de barcos y traveses presforzados para puentes hasta la fabricación de bloques y aplicaciones de

colados in situ. De acuerdo con Short y Kinniburgh (1967), en los últimos años de la década de los 60's, la producción de agregados de peso ligero en los Estados Unidos de Norteamérica había alcanzado unos 12 millones de metros cúbicos al año; sin embargo, el establecimiento de la industria productora de concreto aireado se mantuvo abajo de la de otros países. En cierta forma, el desarrollo de todos los tipos de concretos ligeros en algunos de los países de la Europa Oriental y Asia están supeditado a los mismos factores que en los Estados Unidos de Norteamérica; en ellos también se tienen grandes distancias de transporte, grandes necesidades por satisfacer en tiempos relativamente cortos, y una gran variedad de materias primas tanto naturales como artificiales.

### 1.3 FUNDAMENTOS DEL CONCRETO LIGERO

#### 1.3.1 Reducción de peso

El concreto de peso ligero puede ser ventajoso cuando se utiliza en conjunción con el concreto de peso denso, donde se requiere resistencia estructural. El concreto de peso ligero se puede utilizar para componentes que no requieren resistencia máxima, por ejemplo, fachadas y divisiones que no soportan carga, cerramientos de balcones, parapetos y enrasados de piso.

#### 1.3.2 Ahorros de material

Cuando se emplea concreto ligero para los elementos superiores, da como resultado reducciones considerables de peso y cargas muertas para la estructura y, consecuentemente, reducción del tamaño y del volumen del acero empleado en cimentaciones. También se reducen los costos de transporte de paneles precolados de peso ligero, lo que permite transportar más volumen. Se reducen el manejo de grúa y el manejo manual a causa de la reducción de gran cantidad de peso.

#### 1.3.3 Protección contra incendio

La clasificación en relación con la resistencia al fuego del concreto celular de peso ligero es significativamente mejor que la del concreto de peso denso. Un muro de 10 cm de espesor de concreto de peso ligero y densidad de  $1,200 \text{ kg/m}^3$ , ofrece una resistencia de tres horas al fuego. No hay emanaciones tóxicas del material. El desconchamiento superficial del concreto de peso normal, que puede ocurrir después de un fuego severo, se elimina virtualmente cuando se emplea concreto ligero.

#### 1.3.4 Aislamiento térmico

El aire atrapado en el concreto ligero hace aumentar considerablemente el aislamiento térmico. Un muro de 20 cm de espesor de concreto ligero de densidad de  $1,200 \text{ kg/m}^3$  permitirá que pase  $1^\circ\text{C}$  de temperatura a través del muro en 10 u 11 horas, por lo que actúa como un acondicionador de aire natural. El calor del día se almacena en el muro y se expone al Interior en la noche. La frialdad de la noche alcanza entonces el Interior durante el día. El muro equivalente de concreto de peso normal tendría que tener un espesor más de cinco veces mayor para alcanzar el mismo resultado.

### 1.4 TIPOS DE CONCRETO LIGERO

Existen varios tipos de concreto ligero y, para evitar ambigüedades, resulta necesario insistir en su tipología, y hacer una presentación más clara y detallada de ellos. Como previamente se comentó, para reducir el peso volumétrico del concreto normal, que varía entre  $2250$  y  $2500 \text{ kg/m}^3$  aproximadamente, sin la incorporación de materiales tales como aserrín o resinas, el contenido de aire debe ser incrementado. Usualmente esto se lleva a cabo utilizando uno o más de los siguientes métodos de producción (Neville, 1999):

1. Al omitir el agregado fino de la mezcla, de modo que un gran número de vacíos intersticiales estén presentes; se usa por lo general agregado grueso de peso normal. Este concreto se conoce como concreto sin finos (Figura 1.2, inciso a).

2. Al usar agregado ligero poroso de baja gravedad específica aparente, por ejemplo, más baja que 2.6. Este tipo de concreto se conoce como concreto de agregado ligero (Figura 1.2, incisos b y d).
3. Al introducir grandes vacíos dentro del concreto o masa de mortero; estos vacíos se deben distinguir de los huecos extremadamente finos producidos por arrastre de aire. A este tipo de concretos se les llama concreto aireado, concreto celular, concreto espumoso o concreto gaseoso (Figura 1.2 incisos c y e).

Se dispone de muchas posibilidades para lograr este fin, por ejemplo, la inclusión de agregados gruesos ligeros en un mortero aireado o la producción de concreto sin finos, ya sea con agregados normales o ligeros, o la producción de concreto de agregado ligero compactado en forma parcial o total u otras posibles combinaciones.

En esencia, la disminución de la densidad del concreto en cada método se obtienen por la presencia de vacíos, ya sea en el mortero o en los intersticios existentes entre las partículas de agregado grueso. Es claro que la presencia de vacíos reduce la resistencia del concreto ligero comparado con el concreto común de peso normal, pero en muchas aplicaciones la alta resistencia no es esencial y en otras hay compensaciones.

Debido a que contiene vacíos llenos de aire, el concreto ligero proporciona buen aislamiento térmico y tiene una durabilidad satisfactoria, pero no es altamente resistente a la abrasión. En general, el concreto ligero es más caro que el ordinario, y el mezclado, el manejo y el colado requieren mayor cuidado y atención que el concreto ordinario, sin embargo, para muchos propósitos las ventajas del concreto ligero compensan sus desventajas, y existe una tendencia mundial hacia el concreto ligero en aplicaciones tales como el concreto presforzado, edificios altos y cascarones.

El concreto ligero también se puede clasificar de acuerdo con el propósito para el cual se va a usar: concreto ligero estructural (ASTM C330), concreto usado en mampostería (ASTM C331), y el concreto aislante (ASTM C332). Esta clasificación del concreto ligero estructural se basa en una resistencia mínima; de acuerdo con la ASTM C330, la resistencia compresiva del cilindro a los 28 días no debe ser menor que 170 kg/cm<sup>2</sup>, la densidad (peso unitario) de dicho concreto (determinada en estado seco) no ha de exceder 1840 kg/m<sup>3</sup>, y por lo general está entre 1400 y 1800 kg/m<sup>3</sup>. Por otro lado, el concreto usado en mampostería o ciclópeo tiene una densidad entre 500 y 800 kg/m<sup>3</sup> y una resistencia entre 70 y 140 kg/cm<sup>2</sup>. Finalmente, la característica principal del concreto aislante es su coeficiente de conductividad térmica, el cual debe estar por debajo de 0.3 j/m<sup>2</sup>s°C/m (0.2 btu/ft<sup>2</sup>h°F/ft), mientras que la densidad suele ser más baja que 800 kg/m<sup>3</sup> y la resistencia está entre 10 y 70 kg/cm<sup>2</sup> (Neville, 1999).

Es posible hacer una división de clases entre los concretos de textura abierta y cerrada, siendo los primeros incompatibles con el concepto de concreto reforzado estructural; existe una división más entre los concretos que pueden soportar cargas y aquellos que no pueden hacerlo; los primeros no implican la necesidad de refuerzo. Por otro lado, la durabilidad y la capacidad de carga no pueden ser satisfechas por todos los materiales.

En construcciones de concreto, el propio peso por lo común representa una proporción muy grande de la carga total de la estructura, y una ventaja considerada al reducir la densidad del concreto. Lo principal de esto es una reducción en la carga muerta y, en consecuencia, en la carga total en los diversos miembros y la reducción correspondiente en el tamaño de los cimientos. Además, con concreto más ligero la cimbra necesita soportar una presión más baja, como sería el caso con el concreto ordinario, y la masa total de materiales para manejar también se reduce con un consecuente incremento en la productividad, por tanto, el caso para el uso de concreto ligero estructural descansa primordialmente sobre consideraciones económicas.

Los tres tipos principales de concreto ligero se resumen en la Tabla 1.1. Sin embargo, aunque básicamente son tres los tipos distintos se pueden tener también combinaciones de los mismos para formar otros concretos más ligeros aún; por ejemplo, se puede tener un concreto sin finos cuyo agregado sea de peso ligero, al igual que un concreto aireado o celular que contenga agregado de peso ligero.

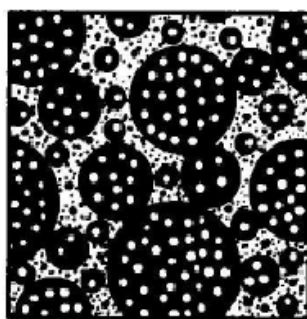
La gama completa de los tipos de concretos ligeros se trata en los capítulos subsiguientes, pero quizás sea conveniente en este punto revisar las relaciones que existen entre unos y otros. El propósito de esto se podrá apreciar de inmediato con la sola inspección el anterior diagrama (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Grupos de concreto ligero

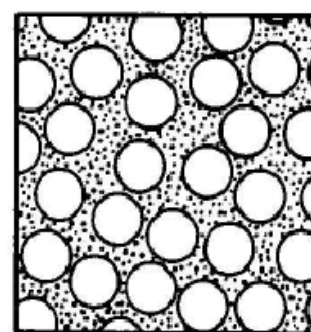
<i>Concreto sin finos</i>		
Gravas		Piedra triturada
Escoria gruesa de hulla		Escorias espumosas
Arcillas o esquistos expansivos		Pizarras expansivas
Cenizas sinterizadas de combustibles en polvo		
<i>Concreto con agregados de peso ligero</i>		
Escoria de hulla		Escoria espumosa
Arcilla expansiva		Esquistos expansivos
Pizarras expansivas		Cenizas sinterizadas de combustibles en polvo
Vermiculita exfoliada		Perlita expansiva
Pómez		Agregados orgánicos.
<i>Concreto aireado o celular</i>		
Aeración química:	Método del polvo de aluminio	Método del peróxido de hidrogeno y cloruro de cal
Mezclas espumosas:	Espuma preformada	Espuma producida por la inclusión de aire



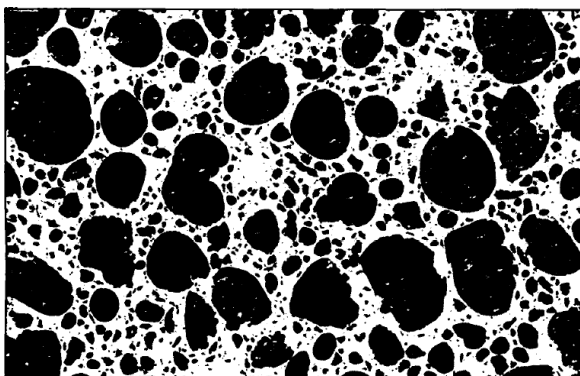
a) Concreto sin finos



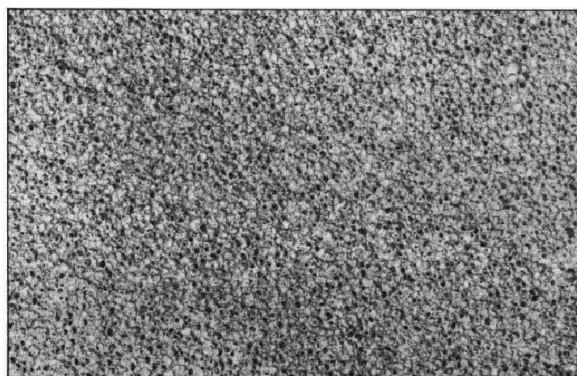
b) Concreto de agregado ligero



c) Concreto aireado



d) Concreto de agregado ligero con arcilla expansiva (Leca)



e) Concreto aireado

Figura 1.2. Microestructura esquemática de los tipos de concretos ligeros.

## 2 PROPIEDADES FUNCIONALES DEL CONCRETO LIGERO

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Las propiedades del concreto ligero que se consideran en este capítulo son: aislamiento térmico, protección contra el fuego, durabilidad, absorción de agua, penetración de la lluvia y propiedades acústicas. En este capítulo se definen las propiedades, se describen las pruebas y se proporcionan los valores típicos.

### 2.2 AISLAMIENTO TÉRMICO

Una diferencia en la temperatura del interior y del exterior de un edificio 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 muro; la inclinación de la gráfica de cambio de temperatura se denomina gradiente de temperatura. Cualquier muro que separe estas zonas ofrecerá una cierta resistencia al flujo de calor a través de ellos, pero no lo impide por completo. El aislamiento térmico puede considerarse como el coeficiente de resistencia a la transmisión del calor.

En los últimos años, se ha dado una mayor atención que antes a la reducción del consumo de combustible, manteniendo, o de ser posible, mejorando las condiciones de comodidad en los edificios. Con este fin se ha concentrado el esfuerzo para mejorar la eficiencia de los medios de calefacción y el aislamiento térmico de los edificios. En este capítulo no se refiere a los equipos de calefacción, sino solamente a las propiedades de los materiales de construcción, y de modo particular, a la conductividad del concreto de peso ligero.

Una de las características más sensacionales del concreto ligero es el valor relativamente alto del aislamiento térmico que posee, aislamiento que se hace mayor o menor en razón inversa a la densidad del material. La mayor parte de los materiales inorgánicos que se utilizan en la construcción tienen una composición química muy semejante, la cual consiste principalmente en una mezcla de silicatos, razón por la que su densidad real y su conductividad térmica son también muy parecidas. Las diferencias, tanto en la densidad aparente de los concretos, como en su conductividad térmica efectiva, provienen de sus respectivas porosidades. En otras palabras, las oquedades llenas de aire no aumentan el peso del concreto, mientras que la conductividad total de un concreto poroso es la resultante de la conductividad térmica de la estructura de silicatos más la del aire contenido en ellos. Es por esta razón que la conductividad térmica se relaciona con la densidad aparente.

Siendo el aislamiento térmico una importante característica del concreto ligero, es esencial que los arquitectos e ingenieros, cuando diseñen y especifiquen, estén en condiciones de poder juzgar el valor de estos materiales en este importante aspecto. Por esta razón se considera que un párrafo corto sobre aislamiento térmico ayuda a interpretar los valores que se proporcionan para las distintas clases de concreto de peso ligero.

Debemos referirnos a textos de física para entender las consideraciones fundamentales de la conductividad térmica; de los primeros autores que realizaron una exposición adecuada para ingenieros, arquitectos, y constructores en dicho tema, se encuentran Nash, Comrie y Broughton (1955). En este capítulo, se discutirá lo necesario para poder aplicar la información cuantitativa de los materiales del concreto ligero que se da en otras partes de este documento.

Las siguientes son las definiciones de algunos de los términos empleados en estudios térmicos y que se mencionan en la literatura especializada:

*Kilocaloría* (kcal): Es la cantidad de calor necesaria para elevar un grado centígrado la temperatura de un kilogramo de agua.

*Conducción*: Este es el método por el cual el calor pasa a través de un material sólido, o fluye de un material a otro en contacto íntimo con él. El aire es un mal conductor del calor, de suerte que los concretos ligeros, porosos por excelencia y que por consiguiente encierran cantidades considerables de aire, son buenos aislantes. Resulta sencillo entender porque el aislamiento térmico se encuentra íntimamente relacionado con la densidad del material, ya que a mayor contenido de aire en el material, menor peso.

*Convección*: Contrariamente a lo que sucede en los sólidos, los gases cambian notoriamente su densidad con los cambios de temperatura. En esta forma, los gases más ligeros tienden a subir sobre los gases más pesados estableciéndose así unas corrientes de gases llamadas corrientes de convección. El gas que sube, por estar más caliente, transporta su calor sensible hacia las zonas altas del espacio en el cual circula. Esta forma de transmisión del calor se llama convección. En la definición anterior quedo implicado que la conducción era una característica de los cuerpos sólidos. En efecto, en vista de que la convección es predominantemente la forma de transmisión de calor en los gases, excepto en espacios muy reducidos, para todos los fines prácticos es conveniente considerar a la conducción como una propiedad de los sólidos.

*Radiación*: Cuando la superficie de un material emite calor y este se transmite en forma de energía a través del espacio, al proceso se le denomina radiación. La energía radiada es considerada como un movimiento de ondas, cuya longitud de onda depende de la temperatura de la superficie radiante. El calor se conduce a través del material, y se disipa al llegar a la superficie exterior, parte por radiación y parte por convección.

*Conductividad térmica* ( $k$ ): Es la cantidad de calor expresada en kilocalorías, que pasa a través de un metro cuadrado de un material homogéneo, de un metro de espesor, en una hora, con una diferencia en temperaturas de un grado centígrado entre cara y cara. Es por tanto, la cantidad de calor que fluye a través de una área unitaria en la unidad de tiempo, cuando la diferencia de temperaturas existente entre las caras es unitaria y el espesor del material es también unitario. El contenido de humedad de un material tiene un marcado efecto en el valor de la  $k$  del material; mientras mayor es el contenido de humedad, mayor será el valor de  $k$ . Por eso, es importante que cuando se especifiquen los valores de la conductividad, se conozca el contenido de humedad del cual se obtuvieron estos valores de prueba. En conclusión, puede afirmarse que la penetración de la lluvia y la condensación pueden ser las causas de una seria reducción en el valor del aislamiento de un material de construcción, de modo que su valor efectivo cuando está en servicio resulta bastante menor que el nominal.

*Resistividad térmica*: A menudo es más conveniente emplear en los cálculos el recíproco de la conductividad térmica ( $1/k$ ), cantidad conocida como la resistividad térmica y que bien puede considerarse como:

- 1) La diferencia de temperaturas en grados centígrados entre la superficie de un material de un metro de espesor cuando fluye una kilocaloría a través de un metro cuadrado de superficie en una hora, o
- 2) El número de horas requeridas para la transmisión de una kilocaloría, a través de un metro cuadrado de superficie en un material de un metro de espesor, cuando la diferencia de temperaturas entre las caras externas es de un grado centígrado.

*Resistencia térmica* ( $R$ ): Es una medida de la resistencia que se opone al flujo de calor ya sea en un material simple o en una combinación de distintos materiales de cualquier espesor. Se le puede considerar como:

- 1) el número de horas necesario para la transmisión de una kilocaloría, a través de un metro cuadrado de material, cuando entre las superficies que limitan a éste existe una diferencia de temperaturas de un grado centígrado, o
- 2) el número de grados centígrados de diferencia de temperatura entre las superficies, cuando fluye una kilocaloría a través de un metro cuadrado, en una hora.

Un incremento en el espesor del material va acompañado por un incremento correspondiente en su resistencia térmica; así, si el espesor del material se reduce a la mitad, la resistencia térmica del mismo también se reduce a la mitad. En un muro compuesto de varios materiales, la resistencia total del muro es igual a la suma de las resistencias de cada uno de los materiales con sus respectivos espesores.

*Conductancia térmica (C):* Es la cantidad de calor que fluye a través de un material o de una combinación de materiales de un determinado espesor. Es, por tanto, el recíproco de la resistencia térmica, es decir,  $C = 1/R$ . Así, si el espesor del material disminuye a la mitad, la conductancia se duplica.

*Transmitancia térmica (U):* El calor “U” de un muro o un techado (que puede o no ser homogéneo) es la cantidad de calor, expresada en kilocalorías, transmitida a través de un metro cuadrado de muro o techo, en una hora, cuando la temperatura del aire en ambos lados difiere un grado centígrado.

Mientras que el valor  $k$  es un coeficiente para un material simple y definido, y que por lo mismo tiene una aplicación y un significado general, el valor “U” se refiere a la transmisión de calor a través de algún sistema específico de muro, generalmente se trata con sistemas compuestos, tales como tabiques con aplanado y enyesado, tabiques enyesados solamente, tabiques y concreto emplastado con o sin aplanados. El valor “U” de un muro representa, pues, la resistencia de la pared entre sus caras exteriores, tomando en cuenta la resistencia de las superficies de acabados, los efectos de las cavidades interiores y otros factores similares. Sin embargo, básicamente el valor “U” se integra con los valores  $k$  de cada uno de los materiales que forman parte del espesor del muro y por tanto la línea de resistencia al flujo del calor.

La Tabla 2.1 proporciona algunos valores típicos de  $k$  para los materiales de construcción. La Tabla 2.2 muestra los valores de “U” para algunos sistemas de muros.

La conductividad, resistividad, resistencia y conductancia involucran la temperatura en la superficie de los materiales. Para cálculos en edificios, donde la temperatura superficial de los materiales no se conoce normalmente, se utilizan las temperaturas del medio ambiente del interior y del exterior. Es por esta razón que el valor “U” debe incluir la resistencia de la superficie. Los valores de “U” se pueden considerar como la conductancia total entre las caras de un muro, el cual es, en efecto, el recíproco de la resistencia entre caras exteriores, esto es:

$$U = 1 / \text{resistencia total entre caras exteriores}$$

La transmitancia térmica o valor “U” tiene una gran importancia práctica ya que proporciona las bases para comparar los valores efectivos de aislamiento de distintos sistemas de techos y muros usando diferentes materiales, así como también para calcular las pérdidas de calor en los edificios.

Los valores de “U” en la mayoría de las construcciones a base de muros y losas pueden calcularse a partir del conocimiento de la conductancia térmica y del espesor de los diversos materiales, así como de las resistencias térmicas que ofrecen las superficies expuestas, y de las cavidades que haya en la línea del flujo térmica.

En esta breve exposición sobre aislamiento térmico, no es posible tratar con detalle el mecanismo de la transmisión de calor. Basta ahora con decir que las resistencias de las superficies expuestas se expresan en los mismos términos que las resistencias térmicas del material, y que ciertos valores se aceptan nominalmente para el cálculo de los valores “U”. Estos se proporcionan en la Tabla 2.3.

Las cavidades en los muros son muy comunes en la construcción moderna, y su efecto sobre el aislamiento térmico es muy significativo, al igual que sucede con las resistencias de las superficies en la contribución que las cavidades proporcionan a la resistencia térmica  $R$ . El flujo de calor a través de una cavidad es bastante complejo y se relaciona con la radiación, convección y conducción combinadas, de manera que no resulta conveniente medir individualmente todos estos factores para cada caso. Se ha encontrado, sin embargo, que cuando la cavidad o hueco tiene un ancho mayor que 19 mm., la resistencia queda más o menos independiente del ancho, de manera que para las oquedades convencionales de 51 mm de ancho la resistencia se puede tomar constante, siendo su valor aceptado el de 1.0.

Tabla 2.1. Valores de conductividad y resistividad térmica del concreto ligero y de sus materiales asociados

Tipo de concreto	Densidad $\delta$ (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad k (kcal/mh°C)	Resistividad 1/k (mh°C/kcal)
Escoria de hulla (clinker)	1200	0.31	3.23
	1520	0.50	2.00
	1680	0.56	1.78
Escoria espumosa	1000	0.25	4.00
	1280	0.30	3.33
Arcilla expansiva	720	0.17	5.89
	960	0.24	4.16
	1200	0.29	3.45
Cenizas sinterizadas de combustibles en polvo	1200	0.29	3.45
Pómez	720	0.16	6.25
	1120	0.25	4.00
	1200	0.29	3.45
Vermiculita	576	0.14	7.15
	770	0.19	5.26
Perlita	480	0.10	10.00
	800	0.19	5.26
Concreto aireado	320	0.07	13.88
	480	0.09	10.75
	640	0.12	8.06
	800	0.17	5.89
	960	0.22	4.55
Concreto sin finos (con grava)	1760	0.72	1.39
	1840	0.81	1.24
Concreto sin finos (con escoria de hulla)	1280	0.40	2.50
	1440	0.48	2.07
Concreto compacto	2320	1.24	0.81
Tabique de barro cocido	1600	1.12	0.89
Material de peso ligero para aplanados	448	0.10	10.00
	480	0.11	9.09
	640	0.16	6.25
	770	0.17	5.89
	900	0.22	4.55
Yeso compacto para aplanados	1600	1.00	1.00

Tabla 2.2. Transmitancia térmica "U" (kcal/m<sup>2</sup>h°C) de algunos tipos de muros

Tipo de muro	U
Muro de concreto compacto de 20 cm de espesor 1:2:4	2.68
Muro de tabique macizo de 22.5 cm de ancho enyesado por el lado interior	2.10
Muro de tabique hueco de 28 cm de espesor enyesado por el lado interior	1.46
Muro de concreto sin finos (con grava) de 25 cm de espesor con aplanado y enyesado	1.66
Muro de concreto sin finos (con escoria de hulla) de 25 cm de espesor con aplanado y enyesado	1.12
Muro de concreto aireado de 15 cm de espesor ( $\delta=880$ kg/m <sup>3</sup> ) con aplanado exterior y enyesado interior	0.98
Muro hueco; cara externa de tabique de 11 cm; cara interna de concreto aireado de 8 cm (880 kg/m <sup>3</sup> ), enyesado	1.07
Muro hueco como el anterior, pero con la cara interna hecha de concreto aireado con densidad de 880 kg/m <sup>3</sup>	0.78
Muro de bloques de concreto aireado ( $\delta=480$ kg/m <sup>3</sup> ) de 20 cm con aplanado exterior y enyesado interior	0.39

Tabla 2.3. Resistencias térmicas de superficies

Resistencias de superficies internas (m <sup>2</sup> h°C/kcal):			
Muros			0.123
Azoteas			0.143
Resistencias de superficies externas (m <sup>2</sup> h°C/kcal)			
	Cubierto	Normal	Severo
Muro 1	0.150	0.117	0.088
Muro 2	0.117	0.088	0.062
Muro 3	0.088	0.062	0.037
Muro 4	0.088	0.062	0.014
Azoteas	0.082	0.051	0.020

NOTA: “Cubierto” significa los dos primeros pisos sobre el nivel del suelo en edificios en el interior de poblaciones. “Normal” significa el tercero, cuarto y quinto pisos de edificios en el interior de poblaciones, y la mayoría de construcciones suburbanas y en despoblado. “Severo” significa los pisos del sexto en adelante de edificios en el interior de poblaciones, así como construcciones expuestas en las cimas de las colinas, en las costas o en las riberas de los ríos.

### 2.3 CALCULO DE LA TRANSMITANCIA TÉRMICA DE MUROS Y TECHOS

Ejemplo 1: Techado de azotea de concreto aireado con cubierta asfáltica (losa de concreto aireado de 561 kg/m<sup>3</sup> de densidad y de 15.2 cm de espesor).

Valor k para el concreto aireado	0.109 kcal/mh°C
Valor l/k para el concreto aireado	9.18 mh°C/kcal
Resistencia del concreto	0.152x9.18 = 1400 m <sup>2</sup> h°C/kcal
Resistencia de la superficie interior	0.123 m <sup>2</sup> h°C/kcal
Resistencia de la superficie exterior	0.051 m <sup>2</sup> h°C/kcal
Resistencia del asfalto	0.021 m <sup>2</sup> h°C/kcal
Resistencia total de cara a cara	1.595 m <sup>2</sup> h°C/kcal
U = 1 / resistencia total	0.627 kcal/m <sup>2</sup> h°C

Ejemplo 2: Muro hueco de 25.4 cm de espesor, formado por dos sub-muros de bloques de concreto ligero de 10.2 cm de espesor. El muro hueco lleva aplanado de yeso interiormente y un aplanado de mezcla de cal y arena exteriormente, ambos con un promedio de 1.6 cm de espesor.

Valor l/k de los bloques	4.03 mh°C/kcal
Resistencia de dos sub-muros de bloques de 10.2 cm de espesor	2x0.102x4.038 = 0.818 m <sup>2</sup> h°C/kcal
Valor l/k del aplanado de yeso	2.420 mh°C/kcal
Resistencia de 1.6 cm de yeso	0.016x2.420 = 0.0387 m <sup>2</sup> h°C/kcal
Valor l/k del aplanado de mezcla	0.993 mh°C/kcal
Resistencia de 1.6 cm de aplanado	0.016x0.993 = 0.0159 m <sup>2</sup> h°C/kcal
Resistencia de la superficie exterior del muro	0.0615 m <sup>2</sup> h°C/kcal
Resistencia de la superficie interior del muro	0.1434 m <sup>2</sup> h°C/kcal
Resistencia del hueco de 5 cm. (sin ventilas)	0.2050 m <sup>2</sup> h°C/kcal
Resistencia total entre superficies interior y exterior	1.2825 m <sup>2</sup> h°C/kcal
Valor k de los bloques	0.248 kcal/mh°C.
U = 1 / resistencia total	0.780 kcal/m <sup>2</sup> h°C

Este procedimiento para estimar el valor U de un muro o techo está bastante simplificado, pues presupone una pared sin ventanas ni puertas; más aún, supone un muro uniforme. Sin embargo, algunos muros se construyen de manera tal que la rapidez con la cual el calor fluye a través de ellos no es la misma en todas sus partes; un ejemplo de este caso es el de la construcción de muros a base de tableros enmarcados en postes guías. En tales casos se calcula un valor neto de U para el conjunto utilizando la fórmula general :

$$U_p = \sum_{i=1}^n p_i U_i \quad (2.1)$$

Donde : U<sub>p</sub> es el valor neto de U; U<sub>i</sub> es el valor de U para el componente “i”; p<sub>i</sub> es la proporción del área expuesta del componente “i”.

Esta fórmula se conoce como la regla de proporcionalidad de las áreas expuestas para el caso del sistema de paredes a base de tableros enmarcados en postes guías.

Ejemplo 3: Un muro consiste en tableros huecos de 76.3 cm de ancho y postes guías sólidos de 15.2 cm de ancho.

Valor U para el tablero hueco                    2.050  
 Valor U para el poste sólido                    3.075  
 Entonces  $U_p = 5/6 \times 2.050 + 1/6 \times 3.075 = 2.222$   
 Esto es, el valor neto de U para la pared es 2.222 kcal/m<sup>2</sup>h°C.

Había quedado implícito al principio de este capítulo que el objeto de tener un aislamiento térmico mejorado era el de economizar combustible y mantener el calor. El hecho de proveer aislamiento no es sólo una cuestión de comodidad; siempre se presentará una condensación sobre las caras internas de los techos y en el cuerpo de materiales absorbentes de construcción durante la época de frío, a menos que se cuente con un aislamiento adecuado. Esto puede originar la corrosión del refuerzo, donde éste exista; por otra parte, la humedad reduce aún más la capacidad natural de aislamiento de los materiales.

Ya se ha visto antes que la baja conductividad del concreto ligero se debe a la cantidad de poros llenos de aire que contiene, ya que el aire es un mal conductor del calor. Puesto que el agua tiene una conductividad de cerca de 25 veces la del aire, es claro que cuando el aire de los poros ha sido parcialmente desplazado por el agua, el concreto tendría una mayor conductividad. Los valores de la conductividad (k) obtenidos para materiales secos en su interior debería multiplicarse por un factor que depende del contenido de humedad del material (Tabla 2.4).

Tabla 2.4. Valores del factor F por el cual deberá multiplicarse k para materiales secos y obtener el valor de la conductividad (k) de materiales con un cierto contenido de humedad W, en porcentaje de volumen.

Contenido de humedad (W)	1	2.5	5	10	15	20	25
Factor (F)	1.30	1.55	1.75	2.10	2.35	2.55	2.75

Lo ideal sería medir los valores de conductividad térmica (k) con el contenido de humedad con que se vayan a emplear, o, alternativamente, corregir estos valores por el efecto de la humedad, si el material se ensaya a otro grado de humedad.

La conductividad térmica de los materiales de construcción se determina generalmente por un método de estado estable en el cual se emplea un aparato con planchas calientes.

Esencialmente este aparato consiste en unas “planchas protegidas” cuadradas, de 30.5 cm. por lado, que se calientan con electricidad, y dos placas de la misma forma y dimensión enfriadas por medio de un líquido. Dos losas del material que se va a probar, también de 30.5 cm por lado, y de un espesor no mayor de 5.1 cm se colocan a cada lado de las planchas calientes y el conjunto de losas y placas calientes se coloca entre las placas frías a manera de emparedado. Las planchas calientes en si tienen 20.3 cm por lado, y están rodeadas por un “anillo protector” consistente de una franja de 5.1 cm de ancho que bordea la plancha, y quedando así un conjunto cuadrado de 30.5 cm por lado.

Es esencial que todo el calor generado por la plancha caliente pase directamente a través del área de prueba de los dos especímenes, sin pérdida de calor por los lados; es con este objeto que se utilizan los anillos protectores. Más aún, para eliminar el intercambio de calor entre las planchas calientes y el anillo protector, este último se calienta con electricidad hasta igualar la temperatura de las planchas calientes.

Cuando se alcanza el equilibrio térmico, se calcula la conductividad midiendo la cantidad de calor que pasa a través del área de la losa en un tiempo unitario, y de la diferencia de temperaturas entre las dos caras de la losa y el espesor de la misma. Esto puede expresarse por la ecuación:

$$k = \frac{q \cdot l}{A(\theta_1 - \theta_2)} \quad \text{kcal/mh}^\circ\text{C} \tag{2.2}$$

Donde: A es el área del material que se prueba, perpendicular al flujo de calor; q es la cantidad de flujo de calor sobre esta área y perpendicular a ella; l es el espesor medio del espécimen;  $\theta_1 - \theta_2$  es la diferencia de temperatura entre las dos caras; k es la conductividad térmica del espécimen probado.

#### 2.4 PROTECCIÓN CONTRA EL FUEGO

Hasta el momento se ha discutido el aislamiento térmico del concreto ligero principalmente en términos de la retención de calor dentro de los edificios. Otra aplicación importante del aislamiento térmico es en la protección de las estructuras contra el daño causado por el fuego. Con objeto de poder apreciar este aspecto del aislamiento térmico, resultara provechoso considerar brevemente el tema general de la protección contra el fuego.

Los materiales se clasifican en combustibles y no combustibles, siendo los primeros aquellos materiales que una vez encendidos contribuyen a la intensidad del fuego produciendo calor, mientras que los segundos no lo hacen. Los materiales inorgánicos tales como la piedra, los ladrillos y el concreto son no combustibles; los materiales orgánicos tales como la madera, son combustibles.

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

1) Aunque la combustibilidad de un material de construcción sea muy importante, y el diseñador deba tomar en consideración esta propiedad al seleccionar los materiales, la intensidad de un fuego proviene no solamente del material empleado en la construcción del edificio, sino de su contenido.

2) No obstante que un material de construcción sea incombustible, podría sufrir un cambio tal con el fuego que lo hiciera inadecuado para desarrollar la función principal para la cual fue seleccionado. Esto generalmente significa pérdida de resistencia como consecuencia de cambios físicos o químicos.

El objeto principal del diseño con protección contra el fuego consiste en asegurar que una vez que un incendio se haya iniciado, la rapidez con la cual se extienda y la dirección de propagación sean tan limitadas que permitan dar tiempo suficiente para que los ocupantes puedan escapar y para que el equipo de extinción de incendios actúe efectivamente evitando que el fuego alcance una magnitud que ocasione daños irreparables o que se extienda a las propiedades vecinas. Un miembro estructural en un edificio es un miembro definido tal como un muro, columna o viga. La columna trabaja solamente como un elemento de soporte, mientras que un muro de carga sirve para el doble propósito de soportar la carga encima de él y como una barrera contra la propagación del fuego.

Por otra parte, una columna no obstante que por si sola no detiene el fuego, puede tener, además, la función de soportar un muro que si sea una barrera contra el fuego. De esto queda claro, pues, que no tiene sentido el hablar de la resistencia al fuego de un material como tal, ya que según se acaba de ver esta es una propiedad no del material en si, sino del conjunto de materiales que forman un elemento estructural, de funciones y dimensiones específicas.

El efecto del fuego en un elemento estructural de un edificio depende de la temperatura alcanzada, de la duración del fuego y, por supuesto, de la naturaleza de las unidades y de su resistencia intrínseca al fuego. En las pruebas de resistencia al fuego prescritas en las normas británicas B. S. 476," el elemento estructural se coloca en un horno que reproduce condiciones similares a las de un incendio real, y la duración del tiempo (medido en horas) que la unidad pueda permanecer sometida a un fuego de magnitud normal, sin que sufra una falla de consecuencias funcionales, se utiliza como un índice de su resistencia al fuego. Luego entonces, se dice que un elemento tiene una resistencia al fuego de 1 hora, 2 horas, etc.

Los edificios se clasifican de acuerdo con el carácter potencial de producción de calor que poseen sus materiales constitutivos y su contenido normal. Este termino se denomina "carga de fuego" y se define como la cantidad de calor en kcal que se produciría con una combustión completa de cada metro cuadrado de piso, suponiendo un valor calorífico para los materiales en general de 4444 kcal/kg. Las cargas de fuego varían de 135,800 a más de 542,000 kcal/m<sup>2</sup>.

La resistencia al fuego de los elementos estructurales pueden igualarse con las cargas de fuego de los edificios, tal y como lo muestran las relaciones dadas en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Intensidad del fuego y resistencia al mismo

Intensidad del fuego (kcal/m <sup>2</sup> )	Resistencia al fuego en prueba estándar (hrs.)
135,800	0.5
271,500	1.0
467,300	1.5
543,000	2.0

Si la resistencia al fuego de un elemento corresponde a la carga de fuego del edificio en el cual va a usarse, se dice entonces que el elemento está “completamente protegido”. Esto, por supuesto, es verdad solamente si todos los elementos de carga están protegidos en forma similar.

Un elemento estructural que tenga una resistencia baja al fuego, puede, en muchas ocasiones, mejorarse en este aspecto con protecciones adecuadas. Por ejemplo, la resistencia al fuego de 2 horas para un muro de tabique de 11.4 cm. de espesor, puede elevarse a 6 horas con la aplicación de un aplanado especial.

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 de 200 a 250°C. en el aluminio, la resistencia de estos metales se torna tan reducida que ya no pueden seguir soportando las cargas de diseño. Esto sucede generalmente en los primeros minutos de un incendio. Sin embargo, con una protección adecuada contra el fuego, se les podrá dar virtualmente cualquier cantidad de resistencia al fuego.

El aplanado de yeso es no-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 eliminada de él antes de que se presente la falla del aplanado. Los aplanados de yeso que contengan agregados de peso ligero tales como la vermiculita exfoliada o perlita expansiva, aumentarán muy considerablemente la resistencia al fuego del elemento estructural al cual se apliquen, siempre y cuando dichos aplanados queden firmemente adheridos a su superficie. Esto sucede en virtud del alto aislamiento térmico de tales agregados.

Es común que los miembros de acero estructural se recubran de concreto (generalmente con una capa no menor de 5 cm. de espesor) dándoles así un grado considerable de resistencia al fuego. Sin embargo, el descostramiento del concreto de recubrimiento reduce la resistencia potencial al fuego de tales miembros, razón por la cual, para evitar esto, se suele colocar una malla ligera de acero como refuerzo del concreto de recubrimiento. Hoy en día existe una gran variedad de tipos de recubrimiento de concreto 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 concreto que emplean agregados como la escoria espumosa, las arcillas expansivas, las cenizas sinterizadas de combustibles en polvo o bien, losas de concreto aireado. El uso de tales agregados de peso ligero en lugar de la grava ordinaria en el concreto, incrementa su resistencia al fuego de un 30 a un 40%.

Como ejemplos de algunas pruebas de resistencia al fuego de concretos de peso ligero, se citan las siguientes, tomadas Ashton y Smart (1960).

### 1) Muro de carga de bloques de escoria de hulla

#### Descripción

Muro de 7.6 cm. de espesor, de bloques de escoria de hulla, recubiertos en ambas caras por un aplanado de yeso y vermiculita de 2.5 cm. de espesor.

#### Materiales

Bloques de escoria de hulla: Dimensiones nominales de 45 x 22.5 cm. x 7.6 cm. de espesor. Aplanado base: mezcla en proporción 1:2 en volumen de semi-hidrato de yeso con retardante y gravillas medianas de vermiculita exfoliada. Aplanado de acabado: mezcla en proporción 1:1 en volumen de semi-hidrato de yeso con retardante y gravillas finas de vermiculita exfoliada.

#### Método de construcción

Hiladas de bloques junteados con mortero de cemento, cal y arena.

Base del aplanado de 2.2 cm. de espesor, y aplanado de acabado de 0.3 cm. de espesor.

#### Datos de la prueba

Duración de la prueba: 6 horas.

Temperatura media alcanzada en la cara no expuesta a las 6 horas: 72°C.

Grado de resistencia al fuego; 6 horas.

### **2) Muro de carga de bloques de “Thermalite Ytong”**

#### Descripción

Muro de bloques de “Thermalite Ytong”, nominalmente de 10 cm. de espesor, sin aplanados.

#### Materiales

El “Thermalite Ytong” es un material de construcción de concreto ligero aireado en forma de bloques, el cual no es combustible.

#### Método de construcción

Hiladas de bloques sin humedecer juntados con mortero de cemento, cal y arena en proporción 1:2:9 en volumen.

#### Datos de la prueba

Duración de la prueba: 4 horas 36 minutos.

Temperatura media alcanzada en la cara no expuesta, a las 4 horas 30 min.: 129°C.

Modo de falla: Incremento máximo de temperatura permisible medido en un punto a las: 4 hrs. 22 min.

Grado de resistencia al fuego: 4 hrs.

### **3) Muro de carga de bloques de “Siporex”**

#### Descripción.

Muro de carga de bloques de “Siporex” nominalmente de 10 cm. de espesor.

#### Material

El “Siporex” es un material de construcción de concreto ligero aireado, en este caso, en forma de bloques. No es combustible.

#### Método de construcción

Hiladas de bloques humedecidos ~610 en sus bordes y juntados con mortero de cemento, cal y arena en proporción 1:2:9 en volumen. No se dio al muro ningún acabado adicional.

La prueba de resistencia contra el fuego se realizó 6 semanas después de que el muro se terminó de construir.

#### Resultados de la prueba

Cuando se probó por el método indicado en la norma Británica, el muro de especímenes satisfizo todos los requisitos para el grado de resistencia al fuego de dos horas.

## **2.5 DURABILIDAD**

Se puede definir como la habilidad de un material para resistir los efectos de todos los agentes del medio que lo rodean. En un material de construcción éstos se pueden interpretar como los ataques químicos, los esfuerzos físicos y las acometidas mecánicas.

El ataque químico generalmente se presenta como agua freática corrosiva, particularmente sulfato, un ambiente contaminado y escurrimientos de líquidos reactivos. El concreto ligero no posee una resistencia especial a estos agentes, sino que, por el contrario, por el hecho de ser en general más poroso que los concretos convencionales, es acaso más vulnerable. Por esta razón, los concretos ligeros no se recomiendan para usarse debajo del nivel natural del terreno. El ataque químico del aire no es significativo a excepción de que se produce en medios sumamente contaminados; de cualquier manera, se acostumbra proteger al concreto ligero con aplanados o en alguna otra forma, por distintas razones. Un aspecto químico de la durabilidad es la estabilidad del mismo material, particularmente ante la presencia de humedad. Las escorias de hornos son probablemente los únicos materiales utilizados en la elaboración del concreto ligero, que en la práctica pueden ocasionar el colapso, aunque este tipo de fallas no son muy comunes.

Los esfuerzos físicos a los cuales el concreto ligero queda expuesto son principalmente la congelación, la contracción y los esfuerzos de temperatura.

Especímenes de concreto ligero sin protección, expuestos a la acción del frío en pequeñas tinas de agua por algunos años, experimentando por tanto varios ciclos de congelación y descongelación, no muestran en

general daños significativos; por otra parte, se sabe que en Suecia (Short y Kinniburgh, 1967) los concretos aireados sin recubrimientos han soportado varios inviernos muy crudos sin sufrir gran cosa.

Los esfuerzos pueden también deberse a la contracción por secado del concreto, o a movimientos térmicos diferenciales entre materiales de distinta clase, o bien a otros fenómenos de naturaleza semejante. La contracción por secado origina por lo común el agrietamiento del concreto ligero, si no se toman las precauciones adecuadas.

Los daños mecánicos pueden resultar de la abrasión o de los impactos, pero pueden también provenir de una carga excesiva en miembros de flexión.

Los grados más livianos del concreto aireado son relativamente suaves y por ello quedaran sometidos a alguna abrasión o desgaste si por alguna otra causa no han sido protegidos con aplanados. Esto mismo puede conducir a daños por impactos en edificios terminados, aunque el riesgo principal en este tipo de daños se tiene cuando se manejan las unidades antes o durante la erección del edificio.

Evitar el daño por sobrecarga, no es un hecho específico en el concreto ligero; en todo caso seria un problema de diseño.

Un aspecto de la durabilidad, que sin llegar a ser una propiedad del material en si, es sin embargo de gran importancia, es el descostramiento del concreto ligero como resultado de la corrosión del acero en las unidades reforzadas.

## 2.6 ABSORCIÓN DE AGUA

Los concretos ligeros, especialmente aquellos utilizados en bloques, son algo porosos y, por lo tanto, tienen una mayor absorción de agua que los concretos ordinarios. Esto no se considera de gran importancia en la práctica, puesto que el concreto ligero que se expone a la intemperie generalmente no se usa sin una capa protectora adecuada. El tema de la protección del refuerzo en el concreto poroso se discute en otra parte de este documento.

Los agregados de peso ligero por si solos, son más porosos que las gravas ordinarias, razón por la cual absorben una cantidad bastante mayor de agua durante la elaboración, del concreto. Esto tampoco suele ser de gran importancia práctica en la fabricación del concreto en si, pero en donde el concreto ligero se utiliza en plantillas aislantes en las azoteas, y en lugares donde se pretende tener un secado relativamente rápido, la absorción alta de agua por el agregado puede ser una desventaja. Se conocen métodos para impermeabilizar agregados de peso ligero, pero no se ha demostrado todavía su aceptabilidad económica.

## 2.7 PENETRACIÓN DE LA LLUVIA

Una función esencial de las paredes es su habilidad para excluir el agua de lluvia. Donde se utilicen muros huecos, el problema de la penetración de la lluvia dificilmente surge, pero existen diversas formas de construcción donde se emplean muros simples y es entonces cuando la resistencia a dejar pasar el agua de lluvia adquiere una gran importancia. La experiencia adquirida hasta el momento con el trabajo efectuado en laboratorios ha sido muy limitada; esta se ha realizado midiendo la resistencia de especimenes de concreto ligero a la penetración de la lluvia, pruebas que en general han sido satisfactorias, principalmente cuando los muros han sido protegidos por un recubrimiento exterior. Es importante anotar que cuando una pared permite el paso del agua de lluvia a través de ella, la penetración ocurre raramente a través del cuerpo de concreto, sino que se produce a través de las grietas capilares que se tienen en las juntas. Mientras más impermeable es un concreto, mayor es el riesgo de que la penetración de la humedad se efectúe por estas grietas. Siendo el concreto ligero más poroso en general, si se le usa con el espesor necesario y si se le protege con un aplanado también poroso, producirá buenos resultados a la penetración de la lluvia, aun y cuando se utilice en una sola capa.

En Inglaterra, la construcción a base de muros huecos es lo más común, y por lo tanto se cuenta con poca experiencia práctica a la penetración de la lluvia, excepto en casos donde se tengan detalles mal diseñados o una mano de obra defectuosa. Por otra parte, el concreto sin finos, utilizado en bastante escala en la Gran Bretaña, se emplea normalmente en una sola capa en muros y aparentemente no se tiene un gran problema con la penetración de la lluvia. En muchos países, la construcción de muros sencillos de concreto aireado es muy común y parece ser bastante satisfactoria.

En algunas regiones es común la construcción con muros simples de concreto aireado. Con objeto de limitar la probabilidad de que la lluvia penetre a través de cualquier sistema particular de muros, se ejecutan pruebas estándar. Estas varían un poco de país en país, pero en esencia, ellas incluyen en el rociado de agua sobre una de las caras del muro a un gasto predeterminado ya sea continua o intermitente, con o sin simulador artificial de presiones de aire. La habilidad para soportar este tratamiento por algún espacio de tiempo sin que se muestren manchas de humedad en la cara posterior de la pared estima lo satisfactorio de esta pared como resistente a la penetración de la lluvia.

## 2.8 PROPIEDADES ACÚSTICAS

Los ruidos molestos se pueden evitar por la represión del sonido en su fuente de origen o aislándolo donde se ha creado. Los cada vez más usados equipos productores de ruidos, tales como el radio y la televisión, a menudo excluyen la supresión del ruido como medida contra el aturdimiento, mientras que la tendencia a un acercamiento más próximo de las habitaciones separadas en las zonas más populosas hacen no sólo más necesario el aislamiento del ruido, sino también más difícil. El aislamiento del ruido es más que el simple hecho de prever una barrera aislante tal como una pared divisoria, por el hecho de que el ruido se transmite en muchas formas distintas a la transferencia a través de una membrana. Sin embargo, será conveniente en este breve repaso, concretar nuestra atención a los muros, como aislamiento principal del sonido que se transmite.

El sonido es una forma de energía y como tal se le puede medir objetivamente con instrumentos físicos. El factor de reducción de sonido es la relación de la energía del sonido en su origen a la energía del mismo en cualquier otro lugar, y se expresa en decibeles (dB). Es de hacerse notar que la escala de decibeles es logarítmica, esto es, un incremento de 10 dB significa una reducción del sonido a un décimo, de 20 dB una reducción a un centésimo, y de 30 dB, a un milésimo. El factor de reducción del sonido es un medio de fijar las eficiencias relativas de las distintas formas de materiales y construcciones, como aislantes de sonido de diferentes frecuencias.

Al considerar el abatimiento del sonido dentro de los edificios, lo importante versa sobre la reducción de los niveles de sonido, para lo cual se requiere tener un criterio determinado, ya sea en términos de niveles de ruido residuales o de reducción de ruido simplemente.

Al tratar sobre las propiedades acústicas de los materiales de construcción, debe anotarse que no existe un sólo valor de aislamiento que sea válido para todo el límite de frecuencia audible.

La transmisión del sonido a través de un muro puede ser tolerable a una cierta frecuencia pero intolerable a otra. Casi todas las estructuras proporcionan un mejor aislamiento a las frecuencias altas, que a las bajas, y los mayores huecos son generalmente mejores para altas frecuencias, que los muros sólidos de mismo peso, pero no son mejores para frecuencias bajas. El sistema que se usa actualmente para clasificar las barreras contra el sonido especifica valores de aislamiento en todas las frecuencias. La efectividad de los muros sólidos para reducir el sonido transmitido es proporcional al peso del muro.

Los concretos ligeros, tal y como se podría esperar, no tienen propiedades especiales de aislamiento del sonido. Puede esperarse que los muros divisorios sólidos de concreto ligero sigan la curva masa-aislamiento establecida, en tanto ellos no muestren ser “porosos” al sonido (en otras palabras, herméticos). Para ser herméticos, los bloques de concreto ligero deberán estar aplanados, no solamente por el hecho de que a menudo ellos mismos sean porosos, sino porque con frecuencia ellos permiten filtraciones del sonido través de la formación imperfecta de las juntas. El aplanado por un sólo lado puede bien ser suficiente, pero en cambio una capa densa tal como un tablero de yeso fijado con barras de anclaje puede no proporcionar una alternativa satisfactoria a la de tener un aplanado de yeso íntimamente ligado con el concreto ligero del muro.

La absorción del sonido es una propiedad bastante distinta a la del aislamiento acústico. Los materiales que absorben el sonido reducen la reflexión del sonido de una superficie, mientras que los materiales que aíslan el sonido reducen el sonido que pasa a través de ellas.

La mayoría de los concretos ligeros, excepto aquellos que tengan superficies selladas, muestran una cantidad de absorción de sonido moderadamente buena. Se han observado los siguientes ejemplos de absorción del sonido sobre un rango muy elevado de frecuencias para un concreto de escoria de hulla de 7.6 cm sin aplanar.

Frecuencia en ciclos/segundo:	125	500	2,000	4,000
Coefficiente de absorción.	0.2	0.6	0.5	0.5

Una de las ventajas de tal concreto ligero absorbente, sobre materiales más densos, cuando se usa en la construcción de muros huecos, es la absorción inherente que se proporciona en la cavidad, dando así el efecto de un colchón de absorción del sonido, o sea un atenuante oportuno del sonido utilizado algunas veces en los muros huecos.

De acuerdo con el B.R.S. Digest No. 89, existe una construcción para pisos en la cual se demuestra que una plantilla de concreto ligero proporciona un aislamiento de primer grado. La plantilla no debe tener una densidad de más de  $1120 \text{ kg/m}^3$  y no menos de 5 cm de espesor; debe, además, tener un acabado de capa hermética. La mejoría es aplicable para el sonido transmitido por aire y no para sonidos de impactos; para combatir éste último se necesita tener una cubierta de piso suave.

Sin oponerse a los ejemplos anteriores, donde el concreto ligero pueda usarse con ventaja, es verdad admitir que el factor principal en el aislamiento del sonido es la densidad del material, de modo que para el aislamiento acústico, el concreto ligero, como tal, está en desventaja.

### 3 ASPECTOS QUÍMICOS DEL CONCRETO LIGERO

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

El cemento Pórtland está hecho de una mezcla calcinada de piedra caliza y arcilla. Con las altas temperaturas del horno, los minerales se combinan para formar una escoria compuesta principalmente de silicatos de calcio y aluminatos. Entonces el producto se muele finamente. La adición de agua al cemento Pórtland origina dos tipos de reacciones; la hidrólisis y la hidratación, formándose nuevos minerales, algunos de los cuales poseen cualidades cementantes. La cal libre, como hidróxido, es uno de los productos formados por el fraguado del cemento, y es el factor que mantiene la alcalinidad en el concreto, evitando por lo tanto la corrosión del acero de refuerzo. Los productos de cemento son atacados por los sulfatos solubles, a los cuales quedan expuestos en los suelos. El aluminato tricálcico es el componente mineral del cemento que resulta más vulnerable al ataque de los sulfatos. Los cementos hechos con un contenido muy bajo de aluminato tricálcico se conocen en el mercado como cementos resistentes a los sulfatos. Muchas sustancias químicas tienen un efecto pronunciado en la rapidez de fraguado del concreto recién mezclado; se les conoce como aceleradores o retardadores, dependiendo esto de si aumentan o disminuyen la rapidez de endurecimiento del concreto.

Todos los concretos son productos obtenidos con base en el cemento. Por lo tanto, no sorprende que muchas de las propiedades afines del concreto ligero, tales como el desarrollo de la resistencia, contracciones por secado, carbonatación y resistencia al ataque de los productos químicos, sean bastante influidas por las propiedades del cemento en sí. Aun cuando la cal sea utilizada como el material base en vez del cemento Pórtland, lo que algunas veces sucede en el concreto aireado, los tratamientos subsecuentes de curado son tales que el material ya fraguado, a fin de cuentas, queda substancialmente igual como si se hubiera usado el propio cemento Pórtland.

El fraguado del cemento, el desarrollo de la resistencia en el concreto y la subsecuente durabilidad del mismo son factores químicos. Parece razonable, por lo tanto, que en esta parte se revisa brevemente las reacciones químicas comunes que ocurren durante la manufactura y uso del concreto ligero, no sólo para tener una apreciación más clara de procesos tales como la manufactura del concreto aireado, sino también para entender mejor el comportamiento del concreto. Para un tratamiento más extenso y detallado del tema, Short y

Kinniburgh (1967) sugieren consultar una publicación de Lea y Desch: "The Chemistry of Cement and Concrete".

### 3.2 TIPOS Y NATURALEZA DE LOS CEMENTOS

Los cementos hidráulicos de hoy en día pueden ser divididos en dos grandes grupos, que son:

a) Cementos Pórtland, los cuales incluyen al cemento Pórtland Ordinario (CPO), el cemento Pórtland Compuesto (CPC), el cemento Pórtland Puzolánico (CPP) y el cemento Pórtland blanco.

b) Cementos no Pórtland, los cuales incluyen los varios tipos de cementos de altos hornos, cemento con alto contenido de alumina, y varios otros cementos especiales que por sus propiedades tan particulares tienen usos especializados.

El cemento Pórtland se hace calcinando una mezcla de carbonato de calcio en forma de yeso, o de piedra caliza con silicatos de aluminio en forma de arcilla. A muy altas temperaturas del horno rotatorio (cerca de los 1400°C), los minerales se combinan y forman una escoria compuesta principalmente de silicatos de calcio y aluminatos de calcio.

Como se comentará más adelante, el efecto del agua sobre estos compuestos una vez finamente molidos, es el de crear una serie de aspectos químicos que al quedar completamente formados dan la resistencia por aglutinación al fraguado del cemento Pórtland.

La composición química de los minerales se expresa normalmente en términos de óxidos. Esto es una convención y por ningún motivo implica que los minerales en realidad estén formados enteramente, o aún principalmente, de éstos óxidos. Como ejemplo de este acuerdo, la composición de un cemento Pórtland típico quedaría expresada entonces por: 64.1% de CaO (óxido cálcico), 0.8% de MgO (óxido de magnesio), 4.5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (trióxido de aluminio), 3.1% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (trióxido férrico), 22.9% de SiO<sub>2</sub> (bióxido de silicio), 0.6% de K<sub>2</sub>O (óxido de potasio), 0.5% de Na<sub>2</sub>O (óxido de sodio), 2.4% de SO<sub>3</sub> (trióxido de azufre) y 1.1% de otros materiales.

Los compuestos reales presentes en el cemento, pueden calcularse a base de este análisis y tendrían la siguiente composición: 42% de 3CaO.SiO<sub>2</sub> (silicato tricálcico, SC<sub>3</sub>), 34% de 2CaO.SiO<sub>2</sub> (silicato dicálcico, SC<sub>2</sub>), 9.5% de 4CaO.AlO<sub>2</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (aluminio-ferrita tetracálcica, FeAC<sub>4</sub>), 6.7 % de 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (aluminato tricálcico, AC<sub>3</sub>), y 7.8% de otros compuestos.

De acuerdo con el Comité ACI-225, el desarrollo de resistencia de la mezcla de cemento está en función, principalmente, de su contenido de Silicato Tricálcico (SC<sub>3</sub>), Silicato Bicálcico (SC<sub>2</sub>), y Aluminato Tricálcico (AC<sub>3</sub>). El SC<sub>3</sub> contribuye a la resistencia a tempranas edades y en su resistencia final, el SC<sub>2</sub> tiene menor incidencia al principio, pero su importancia después es primordial; por el contrario, el AC<sub>3</sub> tiene una particular influencia en las primeras edades.

De acuerdo con González-Isabel (1993), la hidratación de dichos constituyentes puede verse afectada por la finura del cemento. Una alta superficie específica favorece la velocidad de reacción, pero puede reducir el desarrollo posterior de la resistencia. Si no es precisa una alta resistencia inicial, la reducción en el contenido de AC<sub>3</sub> y el incremento de los contenidos de SC<sub>3</sub> y, especialmente de SC<sub>2</sub>, tendrán efectos muy favorables en la resistencia final del concreto; paralelamente, el calor de hidratación desprendido será inferior. La influencia de otros componentes del cemento en los procesos de resistencia y calor de hidratación en el cemento, es menor que la de los anteriormente mencionados; no obstante, resulta necesario destacar que un elevado contenido de álcalis (Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O) incrementa la resistencia a edades tempranas en decremento de la final.

Perenchio y Klieger (1978), afirman que cementos con bajos contenidos de C<sub>3</sub>A y molidos a alta finura además aumentan la efectividad de los aditivos reductores de agua.

Malhotra (1981), menciona que concretos hechos con cementos con contenidos bajos (<5%) de aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) previenen la pérdida rápida del revenimiento. Efecto contrario se presenta para contenidos moderados a altos (>9%).

Hanna *et al* (1989), establece que el contenido de AC<sub>3</sub> es determinante en la velocidad de reacción, destacando además que valores superiores al 8%, junto a elevados contenidos de álcalis, sulfatos y/o excesiva finura del cemento, son la causa fundamental de la pérdida de fluidez del cemento. A partir de ello se puede

establecer la conveniencia de emplear cementos finamente molidos, con contenido de  $AC_3$  superiores al 8%, cuando se desee obtener fraguados y endurecimientos rápidos; cementos con contenido muy bajo o nulo de  $AC_3$ , pero de alto contenido en  $FeAC_4$ , implican tiempos de fraguado y endurecimiento excesivamente prolongados.

### 3.3 EL FRAGUADO DEL CEMENTO

La adición de agua al cemento Pórtland origina dos tipos de reacciones; una llamada “hidrólisis” y la otra “hidratación”. En la hidrólisis, el agua reacciona con un compuesto y lo separa en dos o más componentes más sencillos; a su vez, el agua se descompone en el proceso, de manera que sus componentes se incorporan a los nuevos productos. La hidratación, por otra parte, es un proceso en el cual una o más moléculas de agua se unen a una molécula del compuesto principal. La atención que un compuesto tiene por el “agua de hidratación” y la fuerza con que dicho enlace mantiene unida al agua, es una propiedad característica de su estructura molecular y en lo particular de su configuración de electrones. Para algunos de éstos compuestos el agua adherida, aunque estrictamente “química” en su naturaleza, está suelta y puede ser fácilmente removida, por ejemplo, con una reducción en la presión del vapor de la atmósfera ambiente. Otros compuestos tienen tal avidez para el agua que la asociación resultante es tan íntima que aparece la formación de lo que virtualmente es un nuevo compuesto.

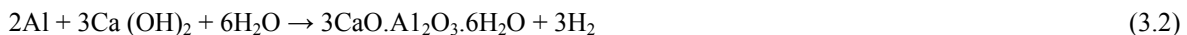
No obstante que la hidrólisis y la hidratación son, de modo fundamental, reacciones distintas y que evidentemente ocurren en forma independiente, en la práctica se efectúan con simultaneidad aunque no necesariamente a la misma velocidad. La siguiente ecuación nos ilustra el efecto combinado de la hidrólisis y la hidratación sobre el silicato tricálcico.



Donde,  $3CaO.SiO_2$  es un Silicato tricálcico anhidro;  $xCaO.y.SiO_2aq$  es un silicato de calcio menos básico (hidratado); y  $Ca(OH)_2$  es un hidróxido de cal (hidratado de  $CaO$ ).

El hecho de que la reacción entre el cemento y el agua ocurre en determinadas etapas y que no todas las reacciones se efectúan a la misma velocidad, queda demostrado por los fraguados iniciales y finales, así como por el subsecuente endurecimiento. Generalmente se sostiene que el fraguado inicial se debe a la rápida solución de los componentes más activos, tales como el aluminato tricálcico y el silicato tricálcico. La solubilidad de tales compuestos es muy baja y se disuelven con alguna descomposición, de manera que les sigue una rápida precipitación; esto, combinado con la pérdida de agua ocasionada por la formación de los hidratos, origina un endurecimiento de la pasta. El fraguado final y el endurecimiento progresivo se deben a una compleja serie de reacciones simultáneas. Se cree que una vez que ha ocurrido el fraguado final, los granos de cemento sin hidratar se cubren con una capa de los productos hidratados ya formados, y para el endurecimiento continuo el agua debe difundirse a través de esta capa para poder alcanzar el cemento que no ha reaccionado todavía. Al considerar la hidratación del cemento Pórtland, se demostró que los silicatos cálcicos más básicos se hidrolizan para formar silicatos menos básicos con la formación de hidróxido de cal o “cal viva”, como producto intermedio del proceso.

Esta cal es la que reacciona con el polvo de aluminio para formar hidrogeno en la fabricación del concreto aireado a partir del cemento Pórtland, en la forma siguiente:



Es decir, polvo de aluminio, más hidróxido de calcio, más agua resulta aluminato tricálcico hidratado, más hidrógeno. En la práctica, pueden ocurrir otros aluminatos y grados de hidratación.

La cal “libre” del cemento fraguado mantiene la alcalinidad en el concreto, evitando así la corrosión del acero de refuerzo; al mismo tiempo, resulta ser el componente del concreto más susceptible al ataque de ácidos, azúcar y el agua muy pura.

Las puzolanas se definen como materiales que, sin ser cementantes por si solas, contienen constituyentes que, al combinarse con la cal a temperaturas ordinarias y en presencia del agua, forman compuestos estables e insolubles que poseen propiedades cementantes.

Algunos materiales con poderosas características puzolánicas, se presentan con frecuencia en los agregados finos, principalmente en los agregados de peso ligero, y éstos reaccionan con la cal libre del cemento fraguado, y por tanto aumentan la resistencia del concreto.

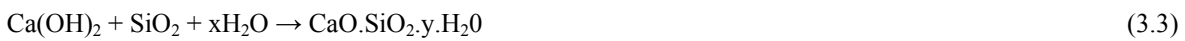
### 3.4 CARBONATACIÓN

Todos los compuestos que juntos forman el cemento Pórtland, principalmente el hidróxido de cal o cal libre, al quedar expuestos al bióxido de carbono de la atmósfera sufrirán una última descomposición formando carbonato de calcio, sílice hidratada, alumina y óxido férrico. En realidad, bajo condiciones ordinarias, la penetración de aire en un concreto común bien compactado es tan lenta que la cantidad de carbonatación que se origina por este motivo es inmensurablemente pequeña. Sin embargo, tratándose de concretos ligeros, especialmente de productos de textura abierta, hechos con mezclas semi-secas, y de concretos aireados, la penetración de bióxido de carbono es bastante considerable. Esto resulta importante pues la descomposición de los silicatos de calcio hidratados por el bióxido de carbono, siempre está acompañada por una contracción que aumenta la contracción por secado natural de estos concretos.

Se ha dicho en algunas ocasiones que el concreto aireado experimenta una carbonatación considerable durante su curado en autoclave, y que esto puede demostrarse por la ausencia de la cal libre en tales productos; la carbonatación debe ser especialmente activa durante el curado en autoclave, ya que es bastante más probable que la ausencia de la cal libre se deba a que ésta fue eliminada al reaccionar con las partículas más finas de los agregados silicosos y con la reacción del polvo de aluminio, durante la etapa de aeración en su manufactura.

### 3.5 LA CAL COMO AGLUTINANTE EN EL CONCRETO AIREADO

Puede demostrarse que un concreto aireado, ya sea hecho a base de cemento y arena o a base de cal y arena, después de haber sido curado en autoclave, esta compuesto principalmente de tobermorita (silicato monocálcico hidratado). Las siguientes ecuaciones muestran que el mismo producto puede obtenerse por hidrólisis del silicato bicálcico; y por síntesis de la cal y la arena.



cal apagada + sílice + agua  $\rightarrow$  silicato monocálcico hidratado



silicato bicálcico + agua  $\rightarrow$  cal apagada + silicato monocálcico hidratado

La reacción cal-sílice ocurre, a menudo como efecto secundario, cuando el concreto se cura en autoclave, si el agregado contiene sílice fina. El producto así formado mejora la resistencia del concreto.

### 3.6 RESISTENCIA A LOS SULFATOS

Los productos del cemento son atacados en cierto grado por los sulfatos solubles a los cuales quedan expuestos, lo cual ocurre comúnmente cuando se utilizan en obras bajo el nivel del piso o subterráneas.

Todos los cementos Pórtland tienen substancialmente los mismos componentes, sólo que sus proporciones varían considerablemente; es bien sabido que los bajos contenidos del aluminato tricálcico incrementan su resistencia al ataque de los sulfatos. En esta forma, aquellos cementos que tienen un bajo contenido de aluminato tricálcico son conocidos en el mercado como: "cementos resistentes a los sulfatos".

Los cementos súper sulfatados se hacen a base de las escorias granuladas de los altos hornos, activadas por medio del sulfato de calcio. El concreto hecho con este tipo de cemento tiene una gran resistencia al ataque de los sulfatos, como lo tiene también el concreto a base de cemento con un alto contenido de alumina.

Los concretos ligeros no son, por razones de su composición, más vulnerables al ataque de los sulfatos que los demás concretos, por supuesto que la defensa más efectiva contra los sulfatos o cualquier otro agente agresivo es la impermeabilidad, y ésta no es una característica básica de algunos tipos de concretos ligeros, principalmente el usado en los bloques, éstos no se recomiendan para ser utilizados bajo impermeabilización.

### 3.7 ADITIVOS

Muchas son las sustancias químicas conocidas que tienen un efecto pronunciado en el fraguado del cemento, y puesto que ellas aumentan o disminuyen la rapidez de endurecimiento del mismo, se les conoce como “aceleradores” o “retardadores”, respectivamente. El azúcar, por ejemplo, tiene un marcado efecto retardante en el fraguado del cemento, mientras que el cloruro de calcio (sal) es muy utilizado como acelerador, usualmente, a razón del 2% del peso del cemento. Esta cantidad del 2% es recomendable, pues se ha visto que a concentraciones menores del 1% el cloruro de calcio puede retardar el fraguado, mientras que con más del 3% puede causar “fraguados instantáneos”. En concretos de “textura abierta”, o mal compactados, el cloruro de calcio tiende a acelerar la corrosión del acero de refuerzo.

Los agregados de peso ligero son a menudo ásperos, de manera que los concretos hechos a base de estos tienen una trabajabilidad menor que la de los concretos a base de agregados de grava. Sin embargo, la adición de ciertos materiales al concreto pueden mejorar su trabajabilidad. Los polvos muy finos, tales como las cenizas crudas de combustibles pulverizados, tierra diatomea, pueden agregarse hasta llegar a un pequeño porcentaje, con resultados provechosos en cuanto a su trabajabilidad, pero esta suele ser mejorada con más frecuencia por medio de agentes de acción superficial, principalmente sales de compuestos alifáticos sulfatados o los derivados solubles de resinas naturales. Se utilizan en concentraciones de 0.01% por peso del cemento, o menores. Los concretos con inclusiones de aire contienen de 1 a 5% de aire por volumen y no deben confundirse con los concretos aireados, en los cuales puede haber hasta un 80% de aire por volumen en el producto. La inclusión de aire, que puede lograrse con algunas de las sustancias químicas antes mencionadas, no sólo mejora la trabajabilidad del concreto y reduce la segregación, sino que también, principalmente en el caso del concreto común, mejora la resistencia a la congelación.

A los aditivos auxiliares usados para el mejoramiento de la trabajabilidad de los concretos se les conoce también como “plastificadores”.

## 4 DISEÑO DE LA MEZCLA

### 4.1 INTRODUCCIÓN

El diseño de las mezclas de los concretos ligeros difiere considerablemente del utilizado para las mezclas de concretos densos comunes. En muchas ocasiones los requisitos de funcionalidad de una mezcla no son meramente los especificados para el concreto estructural común, es decir, resistencia y trabajabilidad, sino que se hace necesario considerar, por separado, a cada uno de los agregados de peso ligero.

La graduación y algunas otras propiedades de los agregados influyen considerablemente en las propiedades del concreto hecho con ellos.

El diseño de la mezcla para cuatro tipos diferentes de concretos ligeros se considera a continuación:

1. Concreto sin finos.
2. Concreto parcialmente compactado con agregados ligeros.
3. Concreto para estructuras con agregados ligeros.
4. Concreto aireado.

Las propiedades más importantes de cada uno de estos tipos de concreto están relacionadas con la selección de los agregados más adecuados, y aquí se describe la forma en que estas propiedades son afectadas al cambiar las proporciones de la mezcla.

El diseño de una mezcla de concreto puede definirse como la selección de los materiales más adecuados, esto es, cemento y agregados; las proporciones más económicas de cemento y agua; y los diferentes tamaños de agregados, para producir un concreto que tenga las propiedades físicas requeridas. Las dos propiedades principales para las cuales se diseñan los concretos ordinarios hechos con agregados naturales que cumplen con los requisitos de las normas, son el grado de trabajabilidad y la resistencia a la compresión de cilindros cúbicos o cilíndricos a los 28 días, aunque recientemente la durabilidad es una tercera variable a la que se le a dado, no sin razón, gran importancia. La trabajabilidad es de gran importancia, puesto que en concretos normales para estructuras resulta esencial que el concreto quede perfectamente compactado, mientras que en algunos tipos de concreto ligero, por ejemplo, en concreto ligero sin finos o concreto con agregados de peso

ligero usados para fabricar bloques, se obliga deliberadamente a que su estructura quede parcialmente compactada o porosa.

El concreto común hecho con agregados pétreos de peso normal se ha usado cada vez en mayor proporción como un material estructural desde principios de siglo, y se han realizado numerosas investigaciones sobre sus propiedades. Se debe, ahora, como los cambios en las propiedades de los materiales constitutivos así como sus proporciones de mezcla relativas afectan la resistencia al corte y a la compresión, al módulo de elasticidad, movimientos térmicos y contracciones, resistencia al agrietamiento, capacidad de resistir fuerzas de desgaste y condiciones climatológicas, y otras propiedades.

El efecto de los cambios en las proporciones de las mezclas sobre algunos de estos factores es semejante a su efecto sobre la resistencia a la compresión. El concreto común para estructuras es, por lo tanto, diseñado para desarrollar una cierta resistencia a la compresión a los 28 días. En 1918 Abrams estableció que la resistencia a la compresión de concretos perfectamente compactados depende principalmente de su relación agua/cemento, esto es, el peso del agua en la mezcla entre el peso del cemento en la mezcla (Short y Kinniburgh, 1967).

El término relación agua/cemento es utilizado como la relación agua total cemento, esto es, se supone que el peso del agua en la mezcla incluye el peso del agua que ha sido absorbida por los agregados. Existen varios métodos de diseño de mezcla para concreto ordinario de grava o piedra triturada basados en esta relación.

Uno de los factores de gran importancia para decidir sobre las proporciones de la mezcla que deberán usarse, es la granulometría del agregado, particularmente la del agregado fino. Hay también diferencias en la granulometría requerida para distintos tipos de concretos ligeros (Tabla 4.1). La graduación de la mayor parte de los agregados finos de peso ligero es más tosca que la de los agregados finos naturales, así como también la gama de granulometría es menos amplia que en estos últimos.

Con distintos tipos de concretos de peso ligero no siempre se pueden aplicar las mismas consideraciones de resistencia y trabajabilidad. Por ejemplo, la ligereza en peso es de primordial importancia si el concreto se requiere para aislamiento térmico; si el concreto se requiere para la fabricación de bloques, uno de los factores que influye en la selección de las proporciones de la mezcla es la facilidad para poderse sacar del molde inmediatamente.

Aun con el diseño de mezclas para concreto normal a base de grava o piedra triturada, los métodos utilizados tienen como fin el producir una mezcla provisional, que pueda o no llenar completamente los requisitos especificados, pero si dar un punto de partida del cual se puedan hacer modificaciones que vayan produciendo la calidad deseada para el concreto. Esto es aún más aplicable en los concretos de peso ligero, en vista de que para ciertos requisitos funcionales dados, habrá siempre un buen número de mezclas igualmente adecuadas, que dependen de los agregados utilizados y de los métodos usados en la manufactura del concreto. No obstante, como se indicó anteriormente, la granulometría de los agregados ligeros es más restringida, y sus otras propiedades físicas varían considerablemente para distintos tipos de agregados. Estas propiedades incluyen forma de las partículas, textura superficial, densidad a granel, absorción y dureza o resistencia inherente. Uno de los métodos para comparar la resistencia de un agregado es la prueba del "10% de finos", descrita en los normas británicas B.S.812, Sección 6. Una complicación más se origina por el hecho de que algunos tipos de concretos ligeros no son completamente compactados y puede ser difícil reproducir el mismo grado de compactación parcial. Por ejemplo, si el contenido de cemento de una mezcla se incrementa, la resistencia de la misma, por lo general, también se incrementa, pero si el concreto de contenido de cemento más alto se compacta menos que el concreto más pobre, entonces su resistencia puede ser más baja que la de este último.

No es posible en este punto describir métodos específicos para diseñar mezclas de concreto hechas con diferentes tipos de agregados de peso ligero, pero si es posible dar una idea sobre la manera en que la selección de los agregados y las proporciones de la mezcla afectan las propiedades del concreto producido. En vista de que los requisitos funcionales para diferentes tipos de concretos ligeros varían, es necesario considerar por separado cada uno de los cuatro tipos de concreto siguientes:

- 1) Concreto sin finos.
- 2) Concreto parcialmente compactado con agregados ligeros.
- 3) Concreto para estructuras con agregados ligeros.
- 4) Concreto aireado.

Tabla 4.1. Tipos y granulometrías de los agregados que pueden ser utilizados en la fabricación de diferentes tipos de concretos ligeros

Tipo de concreto ligero	Tipo de agregado	Granulometría del agregado; límite del tamaño de sus partículas
Concreto sin finos	Agregado natural que cumpla con las especificaciones B.S.882. Escoria de alto horno que cumpla con las especificaciones B.S.1047. Escoria de hulla que cumpla con las especificaciones B.S.1165. Otros agregados ligeros pueden también ser adecuados.	El tamaño nominal de los granos del material debe estar comprendido entre mallas B.S.10 y 19 mm.
Concreto parcialmente compactado con agregados ligeros	Escoria de hulla que cumpla con las especificaciones B.S.1165. Escoria espumosa que cumpla con las especificaciones B.S.877. Arcillas, esquistos y pizarras expansivas. Cenizas sinterizadas de combustibles en polvo. Vermiculita y perlita expansivas.	Pueden tenerse agregados cuyos granos sean de menor tamaño nominal, o bien, que sean de material grueso y fino (de 5 mm. y menores) combinados, que tenga una granulometría continua pero tosca, que produzca un concreto poroso.
Concreto estructural con agregados ligeros (completamente compactado)	Escoria espumosa que cumpla con la especificación B.S.877. Arcillas, esquistos y pizarras expansivas. Cenizas sinterizadas de combustibles en polvo.	Material con granulometría continua desde 13 a 19 mm. hasta polvo, con un número aumentado de finos (menores de 5 mm), para que produzcan una mezcla de concreto densa y trabajable.
Concreto aireado	Agregado natural fino. Agregado fino ligero. Cenizas crudas de combustibles en polvo. Escoria molida y esquistos quemados, etc.	Los agregados generalmente se muelen hasta convertirlos en polvo fino, que pase la criba número 200 B.S. (0.125 mm.), aunque en algunas ocasiones se le añada agregado fino menor de 5 mm.

El concreto parcialmente compactado con agregados ligeros puede ser considerado como de tipo estructural, en vista de que en muchos casos se usa para soportar cargas. La diferencia esencial entre los dos tipos de concreto a base de agregados de peso ligero consiste básicamente en el grado de compactación del concreto.

Un método de dosificación tiene por objeto ser una guía para determinar las proporciones de los materiales componentes del concreto, de manera que sus propiedades cumplan con ciertos requisitos.

En los concretos normales, son dos las propiedades principales que interesa definir para un método de dosificación: trabajabilidad y resistencia a compresión. La primera queda determinada por los requisitos de construcción y la segunda es una propiedad de diseño. La trabajabilidad depende principalmente de la dosis de agua y granulometría de los agregados, y la resistencia de la razón agua/cemento.

En los concretos livianos aparece una tercera variable que interesa controlar, una nueva propiedad objetivo, la densidad del concreto. Esta propiedad a su vez influye en otras propiedades como: resistencia, módulo de elasticidad, conductividad térmica, etc.

En la bibliografía sobre concretos livianos es posible encontrar gran cantidad de investigaciones orientadas a la obtención de una dosificación para ciertos objetivos específicos (López, 1999). Estas investigaciones no tienen por meta proponer un método de dosificación, sino más bien dar a conocer ciertos agregados y sus posibilidades de uso. Se transforman así, en una guía preliminar al momento de fabricar un concreto con un agregado en particular.

También es posible encontrar investigaciones que proponen relaciones entre variables de dosificación y propiedades del concreto. Aquí es posible diferenciar dos grupos: el primero formado por investigaciones que especifican un agregado en particular, para el cual presentan, por ejemplo, relaciones entre contenido de cemento y resistencia; estas relaciones tienen el inconveniente de ser aplicables sólo a dicho material. En el segundo grupo se distinguen investigaciones que presentan relaciones generales, sin limitarse a un agregado en particular. Dichos estudios no consideran de manera alguna las propiedades específicas del agregado utilizado, por lo tanto, dan resultados dentro de rangos muy amplios y que muchas veces se contraponen con las recomendaciones particulares (López, 1999).

En resumen, se encuentran muy pocos investigadores que apunten a sistematizar un procedimiento de dosificación para concretos livianos y que sea utilizable en una gran gama de agregados y aplicaciones.

Un método de dosificación para concretos livianos debe determinar las cantidades de cada material base, de manera que se obtengan las propiedades objetivo buscadas en el concreto (densidad, trabajabilidad y resistencia). Además, las propiedades del agregado liviano utilizado impondrán ciertos límites en el concreto. Por esto, un método de dosificación de concretos con agregados livianos debe ser capaz de determinar si el agregado seleccionado es apto o no para los requerimientos del concreto.

#### a) Densidad

La densidad del concreto puede ser considerada como la propiedad fundamental, ya que, además de definir el peso que tendrá el material por unidad de volumen, influye directamente en una serie de otras propiedades como resistencia, rigidez, conductividad térmica y acústica, trabajabilidad, etc.

La humedad juega un importante papel en la densidad que presenta el concreto liviano, ya que tienen una capacidad importante de absorción de agua. Este efecto debe ser considerado al especificar y medir la densidad del concreto. La norma ASTM 367 establece un procedimiento de medición de la densidad en estado endurecido, que define un estado de humedad estándar para su cálculo. Así surge el concepto de “densidad seca al aire” (“air dry density”).

La elevada absorción que presentan los agregados livianos plantea también un desafío desde el punto de vista de la fabricación y manejo del concreto. Por una parte, un error en la estimación de la humedad del agregado puede producir grandes variaciones en la dosis de agua libre y con ello variaciones en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido. Por otra parte, el empleo de agregados en estado seco puede traer como consecuencia una rápida pérdida de trabajabilidad durante el transporte, colocación y compactación del concreto, ya que el agregado liviano absorberá rápidamente el agua de amasado.

#### b) Trabajabilidad

La trabajabilidad de un concreto puede ser definida como la facilidad que presenta, en estado fresco, para ser mezclado, transportado, colocado y compactado sin perder homogeneidad (sin segregarse). Dicha trabajabilidad está representada por dos variables, fluidez y consistencia.

En el caso de los concretos livianos se puede decir que el concepto de trabajabilidad seguirá siendo el mismo, pero se presentan diferencias considerables en la forma de medir e interpretar la trabajabilidad.

En la literatura se encuentran diferentes opiniones con respecto al uso de métodos convencionales para medir trabajabilidad en concretos livianos (López, 1999).

El American Concrete Institute (ACI) recomienda utilizar el método del asentamiento de cono de Abrams para determinar la dosis de agua requerida para concretos normales y livianos (ACI 211.1; ACI 211.2). Cabe destacar que las tablas recomendadas en ambos documentos son idénticas, de lo que se infiere que no habría ninguna diferencia entre la trabajabilidad de concretos livianos y normales. Además, las tablas entregan datos muy generales, con amplios rangos de asentamiento para una dosis particular de agua.

Por otra parte, de acuerdo con Short y Kinniburgh (1967), es posible encontrar diversos autores que resaltan diferencias entre los resultados con el asentamiento de cono de Abrams para cada tipo de concreto.

En síntesis, en la definición de la trabajabilidad de concretos livianos la densidad del concreto fresco sería un factor importante. Sin embargo, hasta la fecha no habría un método universalmente aceptado para caracterizar la trabajabilidad del concreto liviano.

### c) Resistencia

La resistencia a compresión en un concreto convencional depende fundamentalmente de la resistencia de la pasta de cemento y de la interfase pasta - agregado. La resistencia de la pasta de cemento, a su vez, está determinada por la razón agua/cemento (W/C) y la clase o tipo de cemento utilizado. En este tipo de concretos las propiedades del agregado no interesan desde el punto de vista mecánico, ya que por lo general su resistencia y rigidez son superiores a los de la pasta.

Las propiedades mecánicas de los concretos con agregados livianos, a diferencia de los convencionales, dependen, entre otras variables, de las propiedades y cantidad de los agregados utilizados en su fabricación. Los agregados livianos tienen un peso específico, resistencia intrínseca y rigidez menor que los agregados normales. Esta diferencia, sin lugar a dudas, tenderá a disminuir la magnitud de la resistencia y rigidez del concreto.

Es así como Holm (1995) plantea la existencia de una resistencia límite o techo (“ceiling strength”), la que define como aquella resistencia a partir de la cual un aumento en la cantidad de cemento no trae consigo un aumento significativo de resistencia. Esta resistencia límite es diferente para cada agregado liviano y depende tanto del tamaño y distribución de los poros, como también de las características resistentes del material.

Por lo anteriormente indicado, el concreto con agregados livianos puede ser modelado como un material de dos fases, una soportante constituida por mortero de peso normal (cemento, agua y arena normal) y otra fase liviana formada por el agregado de baja densidad. La resistencia mecánica del concreto dependerá entonces de la resistencia y proporción de cada una de las fases. Como el módulo de elasticidad real de los agregados livianos es por lo general menor que el módulo de la fase soportante, las partículas del agregado liviano actúan como puntos débiles, aun teniendo una elevada resistencia propia. El concepto de las dos fases puede ser aplicado porque la interfase no sería un factor limitante de la resistencia de este tipo de concretos.

Además, los sistemas tradicionales de dosificación, en los cuales se relaciona la resistencia del concreto con su razón agua/cemento (W/C), pierden validez para el concreto liviano ya que no consideran las particularidades mecánicas del agregado utilizado.

Para caracterizar la resistencia intrínseca del agregado se cuenta con diversas alternativas. Existen metodologías directas, como ensayo a compresión o hundimiento en una probeta del material. Para ellos se requieren probetas de ciertas dimensiones mínimas, las que no siempre son posibles de obtener (Weigler, 1974). Otras formas indirectas de medir dicha resistencia son propuestas en la tercera parte de la norma británica BS-812, donde es posible encontrar diferentes ensayos que entregan como resultado un índice que representa la resistencia del agregado.

## 4.2 CONCRETO SIN FINOS

El concreto sin finos es principalmente usado para muros exteriores e interiores, de carga o solamente divisorios, en casas y edificios. Los requisitos para el diseño de la mezcla son tales que deben hacer que el concreto a los 28 días tenga una resistencia a la compresión por lo menos de  $28 \text{ kg/cm}^2$ , para satisfacer las especificaciones británicas B.S.111, y que además, al quedar colocado en el muro conserve sus grandes vacíos y no se segregue formando capas de lechada (natas) o películas de cemento. Tales capas destruirían el carácter impermeable del material al dejar ductos capilares en su estructura que proporcionan a la humedad una trayectoria para pasar a través del interior del muro.

El agregado que se utiliza para el concreto sin finos deberá ser clasificado de manera tal que cumpla con los siguientes requisitos: por lo menos un 95% deberá pasar la criba de 19 mm; no más de un 10% pasará la criba de 10 mm; y nada del material pasará la criba de 5 mm. De acuerdo con Short y Kinniburgh (1967), los agregados naturales que cumplan con las normas B.S.882, la escoria de alto horno que cumpla con las normas B.S.1047, la escoria de hulla que satisfaga las normas B.S.1165, o la escoria espumosa de acuerdo con las normas B.S.877, pueden usarse en un concreto sin finos; otros tipos de agregados, tales como la arcilla expansiva o los esquistos expansivos, y las cenizas sinterizadas de combustibles en polvo son también adecuadas para este propósito.

La resistencia de los concretos sin finos dependen de los agregados que vayan a ser usados, así como también del contenido de cemento de la mezcla; igual que en el caso del concreto ordinario, la resistencia de un concreto sin finos aumenta a medida que el contenido de cemento también aumenta. La mayor parte de los

concretos sin finos se hacen con una relación cemento/agregados entre 1:6 y 1:10 en volumen, lo que depende del agregado que se utilice y de la resistencia a la compresión deseada. En construcción de edificios de varios pisos, se pueden lograr economías si se varía el contenido de cemento en los diferentes pisos.

A diferencia del concreto común, el concreto sin finos es sumamente sensible al contenido de agua. Por lo tanto, no podría ser utilizada una sola proporción de contenido de agua para una mezcla dada de concreto sin finos; deberá determinarse el contenido de agua más conveniente para cada tipo de agregado haciendo cada vez mezclas tentativas. La cantidad de agua correcta para una mezcla de concreto sin finos en particular, se juzga por la apariencia de la misma. Cada partícula de agregado deberá quedar cubierta por una película brillante de lechada de cemento, de manera que produzca una especie de “destellos metálicos”. En el caso de que se use una cantidad insuficiente de agua, se experimenta una pérdida de cohesión entre las partículas y por lo tanto una consecuente pérdida de resistencia; por otra parte, si se utiliza demasiada agua, las películas de cemento se escurrirán de los agregados y se segregarán formando capas de lechada, que dejan a la estructura del concreto deficiente en cemento y consecuentemente más débil.

Como punto de partida para iniciar los intentos de las mezclas se puede recomendar el uso de una mezcla de proporción 1:8 en volumen, de agregados naturales a densos, con una relación agua/cemento de aproximadamente 0.45; para el caso de agregados de peso ligero se puede considerar más adecuada una mezcla más rica de 1:6 en volumen con una relación agua/cemento entre 0.40 y 0.60, según el grado de absorción de agua de los agregados. Los agregados deberán estar mojados siempre antes de agregarles la lechada de cemento. La colocación del cemento deberá ser lo más pronto posible después de mezclarse, preferentemente dentro de los siguientes cinco minutos.

#### 4.3 CONCRETO PARCIALMENTE COMPACTADO CON AGREGADOS LIGEROS

Hay dos usos principales para este tipo de concreto:

- 1) En bloques precolados de concreto o tableros.
- 2) Para techos y muros colados in situ con fines de aislamiento.

La característica más importante de cada tipo de agregado y las propiedades del concreto hecho con ellos serán discutidos con detalle en capítulo próximos. Los requisitos primordiales para este tipo de concreto son tales que deberá tener una resistencia adecuada, una baja densidad (para obtener el mejor aislamiento térmico), y una baja contracción por secado para evitar agrietamientos.

Estos factores quedan supeditados al tipo de agregado que se usa, a las proporciones de la mezcla, al grado de compactación, y al procedimiento de curado que se utilice.

Para una mezcla dada, estas propiedades varían según el tipo y calidad del agregado usado y del método de elaboración; así, un concreto parcialmente compactado a base de agregado de escoria de hulla, en proporción 1:6, puede tener una resistencia a la compresión en cubos, a los 28 días, que varíe entre 45.5 y más de 70 kg/cm<sup>2</sup> dependiendo esto exclusivamente de su calidad. Igualmente, para las mismas proporciones de la mezcla, pero utilizando distintos tipos de agregados, la resistencia puede variar de 21 a 140 kg/cm<sup>2</sup>, de acuerdo con el agregado que se utilice y la forma como se fabrique. La densidad de este tipo de concreto es el factor más importante, ya que mientras más pesado es un concreto, mayor es su resistencia y menor su poder de aislamiento.

Para fines de aislamiento, los agregados más débiles y ligeros, tales como la vermiculita expansiva y la perlita, o bien mezclas pobres con agregados ligeros un poco más pesados que los anteriores, son las que se utilizan mayormente. Se sugiere que el concreto destinado a soportar carga, deba tener una resistencia a la compresión en cubos, a los 28 días, de cerca de los 28 kg/cm<sup>2</sup>. El concreto parcialmente compactado con agregados ligeros, es usado extensamente en la fabricación de bloques precolados de concreto, y en general, dichos bloques se clasifican de acuerdo con su uso en:

- Tipo A: Bloques de concreto con agregados densos.
- Tipo B: Bloques de concreto con agregado de peso ligero para muros de carga.
- Tipo C: Bloques de concreto con agregado de peso ligero para muros que no sean de carga.

Los requerimientos de resistencia y de contracción por secado para cada uno de estos tipos de bloques, difieren entre sí; así, por ejemplo, para los bloques tipo A, se sugiere una resistencia a la compresión promedio de 35 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que para los bloques tipo B se sugiere solamente de 28 kg/cm<sup>2</sup>. Los bloques tipo C no son adecuados para soportar cargas, pero no obstante eso, deberán poseer una resistencia suficiente para evitar que se rompan durante su manejo, y para estos bloques se sugiere una cierta resistencia transversal mínima. Otro factor importante, en cuanto a bloques se refiere, es que las proporciones de la mezcla y la granulometría del agregado deberá ser tal que permita a los bloques ser sacados de los moldes inmediatamente y transportarlos después en charolas sin sufrir desmoronamientos. Proporciones adecuadas de las mezclas deberán ser desarrolladas por el productor de bloques para el tipo particular de agregado y el proceso de manufactura que utilice, por medio de mezclas tentativas.

#### 4.4 CONCRETO PARA ESTRUCTURAS CON AGREGADOS LIGEROS

Este tipo de concreto ligero difiere de los otros tres tipos considerados anteriormente, en que se hace en un estado completamente compactado similar al del concreto reforzado común que se produce con agregados naturales densos. Esto es necesario por el hecho de que se va a usar con el acero de refuerzo y es indispensable que exista una buena adherencia entre el acero de refuerzo y el concreto, y que, al mismo tiempo, éste lo proteja en forma adecuada contra la corrosión.

Un comité del Instituto Americano del Concreto (ACI) publicó algunas proposiciones respecto a la práctica recomendada para el concreto ligero para estructuras, las cuales dan una idea general sobre el límite en que deben estar los contenidos de cemento para producir concretos de este tipo con resistencias a la compresión específica. Este documento reconoce, sin embargo, las dificultades que existen para diseñar mezclas de concreto siguiendo algunos métodos ya establecidos, particularmente utilizando la relación agua/cemento, y recomienda un método que se basa en una serie de mezclas tentativas de la consistencia requerida medida por la prueba de revenimiento.

##### 4.4.1 Agregados y su granulometría

Como se indica en la Tabla 4.1, solamente las variedades más duras de los agregados de peso ligero son adecuadas para utilizarse en los concretos ligeros de tipo estructural. Las normas americanas C330-60T para los concretos con agregados de peso ligero tipo estructural, sugieren que la granulometría de la mayoría de los agregados finos de peso ligero tiendan a ser más bien gruesos y parecidos a los agregados naturales triturados.

Casi todos los agregados finos de peso ligero tienen una granulometría que cae dentro de las zonas 1 y 2 de las normas B.S. 882, siempre y cuando se permita a estos agregados tener más de un 20% de material que pase la malla No.100, tal y como se hace para la arena de piedra triturada. La “envolvente” de la granulometría típica de los agregados finos de peso ligero se muestra en la Figura 4.1, junto con algunos límites importantes que fijan las normas B.S. 882. Resulta interesante comparar la granulometría del material dentro de esta envolvente con los requisitos de granulometría que especifican las normas ASTM C330-60T, y no obstante que las normas norteamericanas son similares a las B.S.882, no permiten que se usen granulometrías tan gruesas.

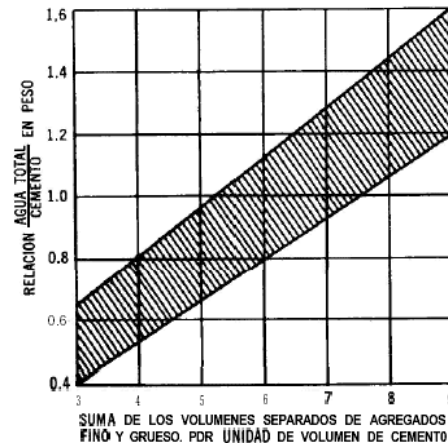


Figura 4.1. Relaciones aproximadas entre la relación agua-cemento y la relación agregado-cemento, para mezclas de concreto ligero para estructuras, de trabajabilidad similar (la amplitud de las relaciones agua-cemento generalmente quedan comprendidas en la zona sombreada).

#### 4.4.2 Trabajabilidad de la mezcla y contenido de agua

Puesto que el concreto con agregados ligeros para estructuras debe estar completamente compactado, uno de los requisitos esenciales para seleccionar las proporciones de la mezcla es el de producir una mezcla trabajable que puede ser fácilmente compactada en el lugar. La granulometría esencialmente gruesa del agregado fino, así como la forma y la textura de sus partículas tienden, sin embargo, a producir un concreto áspero, a menos que se hayan seleccionado previamente las proporciones adecuadas para la mezcla.

Una proporción alta de agregado fino (5 mm. y menor) es conveniente para mejorar la trabajabilidad de la mezcla y en la mayoría de los trabajos realizados por la "Building Research Station", la proporción total de los agregados fue de 50% de finos y 50% de gruesos. Sin embargo, cuando la granulometría del agregado fino es principalmente gruesa o cuando las mezclas son más pobres que las de proporción 1:6 en volumen, puede resultar ventajoso utilizar una cantidad mayor aún de finos, o bien usar un agente inclusor de aire, o por último, reemplazar parte de los finos del agregado de peso ligero por arena natural.

La prueba de revenimiento aparentemente no es una manera adecuada para medir la trabajabilidad de este tipo de concreto. La mayor parte de las mezclas utilizadas por la "Building Research Station" mostraron revenimientos entre 0 y 25 mm. y aun así, muchas de estas mezclas fueron aptas para compactarse con facilidad. Una prueba mejor ha resultado ser la del "factor de compactación", pero el rango de estos factores para el concreto con agregados de peso ligero para estructuras es menor que el de aquellos para el concreto común, e implica distintos grados de trabajabilidad. Un concreto con agregados de peso ligero para estructuras posee un factor de compactación que oscila entre 0.80 y 0.85; si estos mismos valores fuesen aplicados al concreto común se obtendrían concretos con un grado muy bajo o simplemente bajo la trabajabilidad. Otra prueba para medir la trabajabilidad del concreto, es la prueba sueca V.B. Si esta prueba se usa como guía para obtener una mezcla de concreto tipo estructural con agregados ligeros que sea trabajable, se utilizaría un valor V.B. de aproximadamente 15 grados, el cual se ha encontrado adecuado. Las mezclas a base de agregados de grava común o de piedra triturada pueden admitir un porcentaje de contenidos de agua lo bastante amplio como para producir concretos con distintos grados de trabajabilidad, capaces de ser completamente compactados si se hacen en plantas mecanizadas con técnicas apropiadas. Sin embargo, dado un determinado tipo de agregado de peso ligero y con determinadas proporciones de la mezcla, el porcentaje adecuado del contenido de agua queda más restringido. Si es muy bajo, la mezcla sería muy difícil de compactar por completo. Por ser el agregado sumamente ligero, la vibración del concreto no es siempre benéfica ya que el concreto no fluye tan fácilmente como lo hace cuando contiene grava natural y las partículas gruesas pueden segregarse formando una capa en la parte superior del concreto compactado. Si, por el contrario, la mezcla es demasiado húmeda, está segregación es también susceptible de presentarse en la mezcla y después de la compactación se escurrirá el agua y se asentará en el molde.

La Figura 4.2 muestra una franja donde caen las relaciones agua/cemento adecuadas para distintas proporciones de la relación agregado/cemento, cuando se utiliza como agregado a la escoria espumosa, al agregado "Aglita", a las cenizas sinterizadas de combustibles en polvo y al agregado "Lytag".

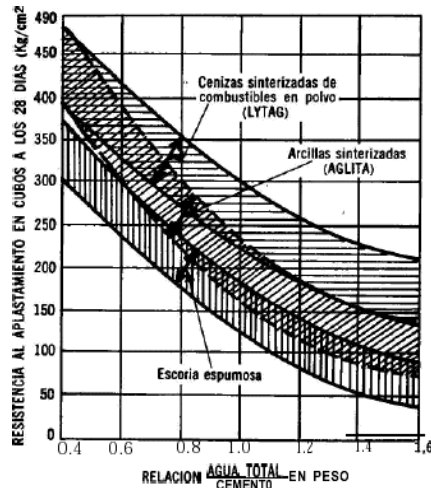


Figura 4.2. Relaciones aproximadas entre la relación agua-total-cemento y la resistencia a la compresión en cubos de concretos ligeros para estructuras hechos con distintos agregados.

Se puede notar que para una relación dada agregado/cemento, los valores de la relación agua/cemento son considerablemente más altos que aquellos requeridos para los agregados naturales de grava y piedra triturada, debido a la gran absorción de agua de los agregados de peso ligero. Para una mezcla de proporciones dadas y un determinado tipo de agregado, la relación agua/cemento que de una cierta trabajabilidad deseada para la mezcla podrá ser encontrada a partir de una mezcla tentativa. La relación agua/cemento requerida para cualquiera otra proporción de la mezcla se podrá estimar considerando una relación aproximadamente paralela. Las relaciones agua/cemento trazadas en las Figura 4.1 y Figura 4.2, están basadas en que los agregados se encuentran secos; en la práctica, los agregados pueden estar mojados, debiéndose entonces tomar en cuenta el agua que contienen. Si en realidad los agregados se encuentran secos, deberán mojarse antes de agregar el cemento con una parte del agua requerida para la mezcla, y dejarlo reposar para que la absorción del agua pueda ocurrir.

#### 4.4.3 Resistencia a la compresión y proporciones de la mezcla

De las pruebas realizadas hasta la fecha se ha podido observar que la resistencia a la compresión del concreto con agregados de peso ligero para estructuras depende aparentemente de las proporciones de la mezcla en una forma bastante similar a como sucede en el concreto común. así, incrementando el contenido de cemento, pero manteniendo la trabajabilidad de la mezcla se obtendrá un concreto más resistente, en vista que dicha mezcla tendrá una relación agua/cemento más baja. Las relaciones aproximadas que existen entre la resistencia a la compresión en cubos, a los 28 días, y la relación agua/cemento, se muestran en la Figura 4.2. No obstante que el concreto ligero tipo estructural se comporta de una manera semejante al concreto común, no es posible establecer una regla general para todos los casos, sino que, por el contrario, cada tipo de agregado de peso ligero deberá tratarse por separado.

De la Figura 4.2 se puede observar que las franjas trazadas para cada tipo de agregado se superponen unas con otras y no siguen la misma ley, las relaciones agua/cemento necesarias para menores resistencias varían en un porcentaje más amplio según el agregado usado, requerido para resistencias mayores. La Figura 4.1 y Figura 4.2, pueden utilizarse como guía en el ajuste de las proporciones de la mezcla después de observar los resultados de la mezcla de prueba.

La relación agua/cemento que deba emplearse para lograr una resistencia determinada puede estimarse utilizando la franja apropiada en la Figura 4.2 para el tipo de agregado que se use, y la relación agregado/cemento se obtendrá utilizando la línea que pasa a través de la relación agua/cemento y el punto de la relación agregado/cemento apropiado para la mezcla de prueba de la Figura 4.1.

El uso de la arena natural como un material para sustituir parcialmente los finos del agregado de peso ligero, se trata en el capítulo 10. La adición de agentes inclusores de aire para mejorar la trabajabilidad de la mezcla no es muy común en la práctica desarrollada en el Reino Unido, pero la permiten las recomendaciones prácticas para el concreto ligero tipo estructural propuestas por el ACI.

#### 4.5 CONCRETO AIREADO

El proceso de manufactura y las propiedades de este tipo de concreto ligero se describen con detalle en el capítulo 17. Consiste básicamente en un mortero que ha sido aireado en forma adecuada.

Existen dos métodos diferentes para lograr esta aeración; el primero, consiste en que, por medio de una reacción química, se puede generar un gas dentro de la mezcla cuando ésta se encuentra todavía en un estado plástico; y el segundo, en que se pueden introducir burbujas de aire mezclado el concreto con una espuma estable, o bien, injertando partículas de aire por medio de un agente inclusor de aire. El primero de estos métodos es el que se usa principalmente en las fabricas de elementos precolados, en las cuales las unidades precoladas pasan a curarse en autoclaves con objeto de producir concretos que tengan una resistencia relativamente alta y una contracción por secado un tanto baja. El segundo método se utiliza principalmente para colados de concreto in situ, como en el caso de plantillas o acabados aislantes para azoteas o para empaques aislantes de tubería.

Las propiedades de los concretos curados en autoclave y al aire difieren considerablemente, como se verá en el capítulo 17. Las propiedades de cualquiera de estos tipos de concreto aireado varían de acuerdo con las proporciones de mezcla del cemento y del material silicoso que sirva como complemento de la cantidad de aeración y del método usado en la fabricación. El material complementario que generalmente se usa, consiste ya sea de un arena finamente molida, o de esquistos quemados, escorias o cenizas de combustibles pulverizados aunque en algunos casos se utiliza un poco de agregado fino (menor de 5 mm.) en la mezcla. Las propiedades físicas del concreto aireado están íntimamente relacionadas con su densidad, la cual puede, en consecuencia, ser la referencia básica para los criterios de diseño. La Tabla 4.2 muestra como se relacionan algunas de las propiedades del concreto aireado curado en autoclave con su densidad.

Tabla 4.2. Densidad y otras propiedades del concreto aireado

$\delta$	$f_c'$	E	k
320	--	--	0.072
480	21	0148	0.093
640	35	0.232	0.124
800	49	0.316	0.174

$\delta$ : Densidad del concreto superficialmente seco ( $\text{kg/m}^3$ );  $f_c'$ : Resistencia a la compresión en cubos probada en húmedo ( $\text{kg/cm}^2$ ); E: Módulo de elasticidad ( $\text{kg/cm}^2 \times 10^6$ ). k: Conductividad térmica ( $\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ ).

#### 4.6 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA PROPUESTO POR RAMOS

##### 4.6.1 Introducción

Para determinar la resistencia del agregado liviano y para establecer relaciones entre la resistencia del concreto liviano y la de sus componentes, Ramos (1972) ensayó partículas de agregado liviano en tensión y en corte-compresión. Adicionalmente, ensayó en compresión y tensión indirecta muestras de concreto liviano elaborado con diferentes tipos de agregados y diferentes concentraciones de agregado.

Utilizando criterios similares a los ya existentes en el campo de materiales compuestos, obtuvo una expresión analítica que permite evaluar el aporte resistente del agregado en el concreto, y bajo ciertas condiciones predecir la resistencia de concretos livianos elaborados con estos agregados.

En general se admite, que la resistencia del concreto elaborado con agregados normales dependerá de la resistencia de sus componentes: agregados y mortero, así como de la adherencia entre ellos. Numerosos ensayos han demostrado que el eslabón débil en la cadena resistente de un concreto ordinario está constituido por la adherencia entre los agregados y la pasta de cemento. Es allí donde se inician las grietas las cuales se propagaran posteriormente a través del mortero hasta producir una desintegración del material.

En el caso de los concretos livianos, la resistencia del agregado es un factor de gran importancia ya que su valor es del mismo orden o a veces inferior al del mortero que lo rodea. Adicionalmente, la adherencia entre los agregados livianos y la pasta de cemento es en general bastante buena debido a la estructura porosa características de la mayoría de estos agregados; todo ello da lugar a que en muchas oportunidades la rotura del material ocurra a través del agregado liviano que sería en este caso el eslabón débil de la cadena resistente. Si se admite entonces, la importancia que la resistencia del agregado liviano debe tener en la resistencia del

concreto liviano, se debe concluir que la selección de la proporción óptima de los componentes para obtener un concreto liviano de determinada resistencia deberá basarse en el conocimiento previo del mecanismo resistente de dicho material.

Diversos autores han intentado establecer relaciones entre la resistencia del agregado liviano y la resistencia del concreto con el elaborado. El problema fundamental es la ausencia de un método apropiado para la evaluación de la resistencia de dicho agregado y de una teoría general que permita predecir la resistencia del concreto liviano en función de las características resistentes de sus componentes: agregados y mortero. El propósito fundamental del trabajo que a continuación se desarrolla, fue el de estudiar un método para evaluar la resistencia del agregado liviano en forma reproducible y sistemática y adicionalmente desarrollar una teoría que permitiese correlacionar dicha resistencia con la resistencia del concreto liviano elaborado con estos agregados.

#### 4.6.2 *Determinación de la resistencia de los agregados livianos*

La resistencia de los agregados livianos puede determinarse siguiendo procedimientos que se pueden clasificar en dos grupos: ensayos directos y ensayos indirectos.

Ensayos directos.- Son aquellos en los cuales la resistencia del agregado se determina mediante el ensayo de partículas aisladas o grupos de partículas bajo distintas sollicitaciones.

Entre los ensayos directos uno de los más utilizados es el señalado en las Normas Rusas, el cual consiste en llenar un cilindro de dimensiones estándar con una cierta cantidad del agregado por ensayar. La evaluación se realiza definiendo como resistencia en compresión del agregado la presión por unidad de área que es necesario aplicar al material para producir una deformación dada.

En este tipo de ensayo, la forma y granulometría del agregado tienen una gran influencia en los resultados. Su aceptación como método de control de calidad es bastante amplia, sin embargo ensayos realizados por Ramos (1972), mostraron que no existe correlación alguna entre la resistencia del agregado determinada mediante este ensayo y la resistencia de los concretos con ellos elaborados.

Otro tipo de ensayo consiste en aplicar una sollicitación en tensión directa sobre una partícula del agregado liviano. Ello presupone que la falla del agregado como componente del concreto liviano es fundamentalmente una falla en tensión independientemente de la carga exterior aplicada al concreto. Ensayos realizados por Wagner y Ledbetter condujeron a resultados con gran dispersión y en ningún caso se intentó correlacionar estos valores con la resistencia del concreto liviano.

Ensayos Indirectos.- Son aquellos en los cuales el “aporte resistente del agregado” se determina a partir de ensayos sobre muestras de concreto elaborados con el agregado en estudio. En este caso, la resistencia del agregado se evaluaría en función de diversos parámetros tales como: resistencia del concreto, resistencia del mortero, porcentaje de agregados en la mezcla, etc.

#### 4.6.3 *Ensayos realizados*

En la totalidad de los ensayos efectuados se utilizaron dos tipos distintos de agregados livianos con las siguientes características:

- Esquisto expansivo obtenido por procesos de sinterización cuyas partículas tienen forma redondeada y estructura porosa abierta. El peso unitario suelto es de  $435 \text{ kg/m}^3$ , el peso específico saturado con superficie seca es de 1.51 y el porcentaje de absorción de 12% para el tamaño de  $3/4''$  - # 4.
- Pizarra expansiva producida por procesos de expansión en horno rotatorio, triturada, cernida y graduada en distintos tamaños. El peso unitario suelto es de  $450 \text{ kg/m}^3$ , el peso específico saturado con superficie seca es de 1.67 y el porcentaje de absorción 11% para el tamaño de  $3/4''$  - # 4.

Ensayos Directos Sobre Agregados.- Los ensayos de tensión directa fueron realizados por el autor utilizando un modelo de ensayo, donde partículas seleccionadas de agregado liviano eran colocadas en la zona del cuello de la briqueta. Con el objeto de asegurar la transmisión de cargas únicamente a través del agregado, se utilizaron separadores de cartón de  $2.5 \times 2.5 \text{ cm}$  con un agujero circular en el medio. El tamaño del agujero fue siempre ligeramente menor que el del agregado, el cual se empujaba a través de él y finalmente la pieza

agregado más cartón se colocaba en la zona del cuello de la briqueta. Antes de vaciar el mortero, el cartón se pintaba con aceite con objeto de impedir la continuidad del mortero en la zona del cuello.

Como resultados de ensayo se anotaron las cargas máximas y el área de la superficie de fractura. En todos los casos la rotura ocurrió a través del agregado y con una superficie de fractura relativamente plana.

Como complemento a estos ensayos de tensión directa se han ejecutado ensayos de corte - comprensión sobre los agregados livianos antes mencionados. Este tipo de ensayo permitirá, conocer la resistencia del agregado bajo distintos estados de esfuerzo.

De cada tipo de agregado se ensayaron 15 muestras. La carga fue aplicada en forma continua hasta que se produjo la rotura del agregado. Una vez que la muestra había fallado, se mide el área de la superficie de fractura y el ángulo entre el plano de fractura y el plano horizontal. Este ángulo fue en general igual al ángulo de inclinación de la grieta. Del análisis de lo anterior, puede afirmarse que la resistencia de los agregados cumple con el comportamiento pronosticado por la teoría de Coulomb-Mohr; es decir existe una relación lineal entre los esfuerzos normales máximos y los esfuerzos cortantes máximos.

La resistencia en compresión del agregado obtenida a partir de esta envolvente fue comparada con la resistencia de materiales naturales y artificiales de porosidad similar. Así por ejemplo se encontró que concretos celulares y concretos sin finos con densidades similares a los esquistos y pizarra expansivos tenían resistencias en compresión entre 40 y 70 kg/cm<sup>2</sup> valores que concuerdan con los de 35 - 60 kg/cm<sup>2</sup> obtenidos en nuestros ensayos. La comparación entre la resistencia en tensión directa obtenida en los ensayos anteriores y la calculada a partir de la envolvente conducen a resultados del mismo orden de magnitud; sin embargo, la técnica del ensayo de corte - compresión debe ser mejorada para disminuir la dispersión en los resultados.

Ensayos Sobre Concretos Livianos.- La validez de los ensayos anteriormente señalados debe comprobarse y correlacionarse mediante ensayos en concreto. En este sentido se han efectuado una serie de ensayos con objeto de analizar las propiedades mecánicas y el mecanismo de fractura de concretos livianos fabricados con los agregados livianos antes mencionados y con distintos tipos de mortero. La influencia del agregado liviano se analiza, también, variando la concentración volumétrica de agregado en la mezcla.

El mortero empleado en todas las mezclas consistió en una combinación de arena natural y cemento Pórtland Tipo I en relación 1:2.5 y agua cemento = 0.5. Las concentraciones volumétricas de agregado en la mezcla fueron variables con valores de 0, 0.30 y 0.40. De cada mezcla se obtuvieron 30 cilindros de 10 x 20 cm los que fueron ensayados en compresión y tensión indirecta a edades de 30 horas, 50 horas, 7 días, 14 días y 28 días. Estas edades fueron seleccionadas con objeto de analizar dos tipos diferentes de fractura que se suponía debían existir. El primero, a edades jóvenes donde el mortero fuese débil en comparación con el agregado y donde la falla debería ocurrir fundamentalmente en la interfase entre el mortero y el agregado. El Segundo ocurriría a edades mayores cuando el mortero fuese más resistente y la falla se produjese fundamentalmente a través del agregado.

En las muestras sometidas a compresión se determine, además la capacidad máxima, el módulo de elasticidad. En los ensayos de tensión indirecta, una vez ocurrida la falla se estudio la superficie de fractura determinándose en cada caso el porcentaje de partículas rotas con respecto a la cantidad de partículas presentes en la sección de falla.

En el caso de concretos elaborados con esquistos expansivos, al incrementar la resistencia del mortero, se obtuvo un incremento lineal de la resistencia en tensión del concreto. Sin embargo, cuando el mortero alcanza una cierta resistencia, la rata de incremento tiende a disminuir. En el caso de los concretos elaborados con agregado de pizarra expansiva, el incremento lineal de la resistencia en tensión del concreto al incrementar la resistencia del mortero, se observe en todo el rango ensayado.

El incremento de la resistencia del mortero conduce, a la rotura de un mayor numero de partículas del agregado en la sección de falla. En el caso de los concretos a base de agregados de esquisto expansivo, este aumento se observa hasta que el mortero alcanza resistencias en compresión del orden de 350 kg/cm<sup>2</sup>. Una vez alcanzada esta resistencia, todos los agregados en la sección de falla aparecen rotos. Esto nos indica que a partir de ese punto, incrementos en la resistencia en tensión del concreto solo serán posibles por medio de incrementos en la resistencia del mortero.

En el caso de los concretos livianos elaborados con agregados de esquisto expansivo el incremento lineal de la resistencia en tensión del concreto, producido al incrementar la resistencia en compresión del mortero, coincidió con un incremento en el número de partículas rotas presentes en la sección de falla.

En los concretos elaborados con agregado de pizarra expansiva, la cantidad de partículas rotas correspondientes a una determinada resistencia del mortero fue menor que el observado en el caso de agregado de esquisto expansivo. En este caso, aún para la máxima resistencia del mortero utilizado en estos experimentos, no fue lograda la rotura de la totalidad del agregado en la sección de falla.

#### 4.6.4 Mecanismo de fractura en concretos livianos

En general, el mecanismo de fractura de los concretos livianos presenta dos aspectos:

Para morteros débiles o agregados muy resistentes, el mecanismo de falla es similar al observado en concretos normales; es de suponer la formación de muchas grietas pequeñas en la interfase entre agregados y mortero, y propagación de estas grietas a través del mortero. En este caso el agregado constituye un obstáculo para la libre propagación de la grieta y por ello contribuye a aumentar la resistencia del material.

Al incrementarse la resistencia de la matriz de mortero, el mecanismo de falla comienza en el agregado. Finalmente, cuando se alcanza una cierta resistencia en el mortero, la falla del material muestra la rotura de todas las partículas de agregado presentes en la sección. De acuerdo con algunos resultados experimentales, parece posible identificar esta última condición de falla. La resistencia mínima de mortero requerida para alcanzar esta condición depende de la resistencia del agregado utilizado, y de la concentración volumétrica del mismo en la mezcla.

En el caso de agregados más resistentes, se observa que la pendiente inicial de la curva es mayor y el cambio de pendiente ocurre para valores de resistencia en compresión del mortero mayores que en el caso anterior. Cuando se aumenta la concentración volumétrica del agregado, el cambio de pendiente ocurre para valores menores de la resistencia en el mortero.

Esta investigación experimental demuestra que para un agregado y una determinada concentración volumétrica de este agregado en la mezcla, existe un valor mínimo de la resistencia del mortero capaz de producir una falla del concreto en la cual todas las partículas presentes en la sección de falla se rompan. En este momento, se puede decir que el agregado ha desarrollado su máximo aporte resistente, y por lo tanto de allí en adelante y para morteros de mayor resistencia, la resistencia del concreto liviano será función fundamentalmente de la cantidad y resistencia de ese mortero ya que la contribución del agregado puede considerarse como constante. Un modelo analítico que describe este comportamiento se describe a continuación.

En resumen se puede afirmar lo siguiente:

- a) El mecanismo de fractura de los concretos livianos depende fundamentalmente de la relación entre la resistencia del agregado y la resistencia de la matriz mortero.
- b) Una disminución en la pendiente de la curva que correlaciona la resistencia de la matriz mortero con la resistencia en compresión o en tensión indirecta del concreto liviano fue identificada con una superficie de falla en la cual casi todas las partículas de agregado estaban rotas.
- c) El valor mínimo de la resistencia del mortero requerido para producir la condición de falla antes mencionada, depende de la resistencia del agregado y de la concentración volumétrica de este agregado en la mezcla.
- d) Una vez esta condición es alcanzada, el agregado ha desarrollado su máximo aporte resistente y mayores resistencias en el concreto solo serán posibles incrementando la cantidad y resistencias del mortero.
- e) Los valores de deformación correspondientes a valores del 90% de la carga de rotura, revelaron que tanto el mortero como el concreto liviano tienen deformaciones últimas similares cuando la fractura del concreto liviano conlleva a la rotura de todos los agregados en la sección de falla.

#### 4.6.5 Determinación analítica de la resistencia del agregado liviano

Como se mencionó anteriormente, la resistencia del agregado puede determinarse en forma indirecta. Esta determinación requiere de la definición previa de una función que correlacione las principales variables que influyen en las características resistentes de los concretos livianos.

Los concretos livianos en general pueden considerarse como materiales compuestos, con dos fases, constituidas por una matriz mortero y la otra por partículas (agregado liviano) dispersas en esa matriz.

Como primera aproximación, la resistencia del concreto liviano puede expresarse en función de tres parámetros: la resistencia del mortero, la resistencia del agregado y la concentración volumétrica de agregados en la mezcla.

Con objeto de derivar una función que cumpliera estos requerimientos, se aplicaron criterios similares a los ya desarrollados en la predicción del módulo de elasticidad de materiales compuestos.

Una relación muy simple puede obtenerse asumiendo que la matriz y las partículas dispersas contribuyen a la rigidez del material compuesto por ellas, en forma proporcional a sus propias rigideces y concentración en el material. Con estas consideraciones se pueden establecer la siguiente función:

$$E_c = E_m(1 - n) + E_a \cdot n \quad (4.1)$$

donde:  $E_c$  = Módulo de elasticidad del material compuesto;  $E_m$  = Módulo de elasticidad de la matriz;  $E_a$  = Módulo de elasticidad de las partículas dispersas;  $n$  = concentración volumétrica de partículas.

Con este mismo enfoque, MacDonald y Ransley (Ramos, 1972) definieron la relación entre la rigidez del material compuesto y la rigidez de sus componentes en términos del inverso del módulo de elasticidad, en la siguiente forma:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1 - n}{E_m} + \frac{n}{E_a} \quad (4.2)$$

Utilizando los teoremas de elasticidad energética y asumiendo que las dos fases están sometidas a iguales deformaciones y tienen coeficientes de Poisson similares, demostró que la ecuación 4.1 constituye un límite superior del módulo de elasticidad ( $E$ ) del material compuesto. En forma similar logró demostrar también, que asumiendo igualdad de esfuerzos en ambas fases, la ecuación 4.2 constituye un límite inferior del módulo de elasticidad ( $E$ ) del material compuesto.

Estas dos expresiones han sido ampliamente utilizadas en la predicción del módulo de elasticidad de materiales metálicos compuestos y se denominan "Ley de las Mezclas de Paul".

A continuación se aplicarán los criterios mencionados para obtener una relación que permita predecir la resistencia de los concretos livianos. En primer término, se asumió que el concreto liviano es un material continuo en el cual la matriz (mortero) y las partículas dispersas (agregado liviano) son linealmente elásticas e isotrópicas. Asimismo se asumió que bajo carga cercana a la falla, mortero y agregados están sometidos a iguales deformaciones.

Con estas dos condiciones, la ecuación 4.1, puede expresarse en términos de esfuerzos en lugar de en términos de módulo de elasticidad en la siguiente forma:

$$\sigma_c = \sigma_m(1 - n) + \sigma_a \cdot n \quad (4.3)$$

De acuerdo con esta relación, la resistencia del concreto incrementaría en forma continua al incrementar la resistencia del mortero o la del agregado.

La serie de ensayos presentados por Ramos (1972), demuestran que este tipo de comportamiento sólo se observa cuando la resistencia del concreto es baja; sin embargo una vez que el mortero adquiere suficiente resistencia y la falla del concreto se produce a través del agregado, la relación entre la resistencia del concreto y la resistencia del mortero deja de ser lineal.

La ecuación 4.2 fue también analizada bajo las mismas hipótesis y expresada en términos de esfuerzo de la siguiente forma:

$$\sigma_c = \frac{\sigma_a \cdot \sigma_m}{n \cdot \sigma_m + \sigma_a (1 - n)} \quad (4.4)$$

En este caso, el comportamiento pronosticado por la aplicación de esta relación coincide en principio con la evidencia experimental observada ya que cuando el mortero alcance un valor hipotético de infinita resistencia, la resistencia del material compuesto alcanza un valor finito igual  $\sigma_a/n$ . Esta relación fue analizada en detalle y aplicada a distintos casos como se comentará a continuación.

**Aporte Resistente del Agregado Liviano.**- La predicción de la resistencia del concreto liviano por medio de la ecuación 4.4 exige del conocimiento previo de la resistencia del agregado. A pesar de que la resistencia del agregado ha sido obtenida en ensayos de tensión directa y ensayos de corte - compresión, estos resultados corresponden a estados de esfuerzo que no necesariamente coinciden con el estado de esfuerzos el cual se encuentra sometido el agregado dentro del concreto. Por lo tanto, el término  $\sigma_a$  de ahora en adelante se denominará “aporte resistente del agregado” y será considerado como una de las variables desconocidas.

La determinación de  $\sigma_a$  será realizada en forma indirecta utilizando la ecuación 4.4 en la siguiente forma:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_c \cdot \sigma_m \cdot n}{\sigma_m - \sigma_c (1 - n)} \quad (4.5)$$

Ramos (1972) aplicó la ecuación 4.5 en algunos datos experimentales donde se conocían los valores de  $\sigma_a$ ,  $\sigma_m$  y  $n$ . Adicionalmente los aplicó en una serie completa de resultados experimentales encontrados en la literatura, y en los cuales se han considerado diferentes tipos de agregados y diferentes resistencias de mortero. Antes de analizar estos resultados, es importante señalar que todos los datos utilizados para la verificación de la ecuación 4.5 corresponden a resistencias en compresión, y por lo tanto el valor de  $\sigma_a$  dependerá del tipo y tamaño de especímenes utilizados para la determinación de la resistencia en compresión de concretos y morteros. Este hecho deberá ser considerado en el momento de realizar un análisis comparativo entre resultados de distintas series experimentales.

Finalmente y una vez que el mortero ha alcanzado una resistencia tal que es capaz de inducir la fractura de todos los agregados en la sección de falla, el valor pronosticado del aporte resistente del agregado alcanza un valor máximo. Cuando esta situación es alcanzada resulta evidente que mayores aumentos en la resistencia del mortero no modificarán el aporte resistente del agregado.

Aunque la ecuación propuesta por Ramos (1972) ha sido verificada utilizando distintos grupos de datos, el autor comenta que existen todavía algunos aspectos que requieren un análisis más detallado.

La hipótesis de que la matriz mortero y las partículas de agregado están sometidas en el momento de falla a iguales deformaciones, no ha sido totalmente demostrada. Como se mencionó anteriormente, la deformación máxima medida en muestras de mortero y muestras de concreto liviano resultaron muy similares siempre y cuando la falla del concreto ocurriese fundamentalmente a través del agregado. Adicionalmente el comportamiento observado en los ensayos de corte - compresión ejecutados sobre partículas de agregado demostraron que en la mayoría de los casos la falla del agregado no es de carácter frágil. Por lo tanto, se puede suponer que si existe un confinamiento lateral como el provisto por el mortero en el concreto; la hipótesis de un cierto comportamiento elastoplástico del agregado no parecería totalmente descabellada. Si se admite este comportamiento elastoplástico se puede obtener que en el momento de falla ambas fases (mortero y partículas del agregado liviano) tuvieran la misma deformación. Sin embargo deberá hacerse una demostración más amplia de esta hipótesis.

El modelo analítico propuesto Ramos (1972) ha sido utilizado en la determinación del aporte resistente del agregado. Sin embargo, el hecho de que el aporte resistente del agregado alcance un valor máximo constante, valor que puede considerarse como un parámetro característico del agregado, nos indica que este valor podría utilizarse en la predicción de la resistencia del concreto liviano aplicando la ecuación 4.4. El uso de la ecuación para la predicción de la resistencia del concreto liviano presenta algunas restricciones que se analizarán a continuación.

Teniendo en cuenta que el valor de  $\sigma_a$  (aporte resistente del agregado) alcanzará un valor máximo y constante cuando la matriz mortero tenga suficiente resistencia como para inducir una falla del concreto que ocurriese a través del agregado; la ecuación 4.4 será únicamente válida para predecir la resistencia del concreto liviano en

aquellos casos en los cuales las resistencias del mortero sean mayores que la mínima requerida para que el agregado desarrolle su máximo aporte resistente.

Los resultados analizados indican que el valor mínimo requerido de la resistencia del mortero resultó en muchos casos menor que el normalmente utilizado en el diseño de mezcla del concreto liviano. Por lo tanto, en esos casos es posible obtener un diseño óptimo utilizando la ecuación 4.4 para la predicción de resistencias. Aunque nuestro propósito fundamental fue el de determinar el aporte resistente del agregado en compresión, el modelo analítico desarrollado no presenta ninguna restricción en el sentido de que podría aplicarse a otros estados de esfuerzos, por ejemplo el de tensión.

En este sentido, la ecuación 4.5 fue aplicada a una serie de experimentos en los cuales la resistencia en tensión del mortero fue obtenida a través de ensayos indirectos (ensayo brasileño) y solamente a la edad de 28 días. Los valores obtenidos por la aplicación de la fórmula mencionada, pueden ser considerados como el máximo aporte resistente del agregado en tensión; estos valores son:

Esquisto expansivo	n = 0.30	$\sigma_a = 18.9 \text{ kg/cm}^2$
Esquisto expansivo	n = 0.40	$\sigma_a = 20.2 \text{ kg/cm}^2$
Pizarra expansiva	n = 0.30	$\sigma_a = 31.5 \text{ kg/cm}^2$
Pizarra expansiva	n = 0.40	$\sigma_a = 33.0 \text{ kg/cm}^2$

Como puede observarse en estos resultados, el aporte resistente del agregado en tensión es también independiente de los valores de "n" (concentración volumétrica del agregado). Aún más este valor debería considerarse como el aporte resistente del agregado en tensión indirecta, ya que en los ensayos en tensión directa o en flexión, los valores obtenidos serían diferentes. Al igual que en el caso de la resistencia en compresión la resistencia en tensión del concreto liviano puede predecirse utilizando la ecuación 4.4 siempre y cuando la resistencia en tensión del mortero a utilizar sea mayor que el mínimo requerido para que el agregado desarrolle su máximo aporte resistente.

#### 4.6.6 Influencia del mortero

Aunque la influencia de este factor no fue investigada durante la presente serie de ensayos, los resultados obtenidos por otros investigadores fueron analizados.

Petkov (Ramos, 1972) realizó una serie de ensayos utilizando un solo tipo de agregado liviano grueso embebido en morteros elaborados con distintos tipos de agregado fino. En este análisis se asumió que en todos los casos la resistencia del mortero fue lo suficientemente alta como para inducir la fractura total del agregado en la sección de falla. Esta hipótesis resultó justificada en vista del hecho de haber obtenido valores  $\sigma_a$  (aporte resistente del agregado) constantes en cada una de las series analizadas.

Los resultados obtenidos indican que el aporte resistente del agregado depende del tipo de agregado fino utilizado en la elaboración del mortero. La utilización de agregado fino liviano en lugar de arena normal, produjo una disminución en el aporte resistente del agregado.

En otra serie de ensayos realizados por Zielinski (Ramos, 1972), se mantuvo constante el agregado grueso (arcilla expansiva) y el agregado fino (arena natural), y la variación de las características del mortero se obtuvo por medio de variaciones en la relación arena/cemento utilizadas.

Al igual que en el caso anterior, el aporte resistente del agregado fue calculado por medio de la ecuación 4.5. Estos resultados señalan que en el rango ensayado, el aporte resistente del agregado permanece constante e independiente de variaciones en las relaciones arena/cemento y concentración volumétrica del agregado.

Los resultados de este análisis, aunque positivos, no pueden considerarse como definitivos y se recomienda la realización de una investigación más detallada sobre este particular.

#### 4.6.7 Comparación de procedimientos

A continuación se presentará un análisis comparativo de los valores de resistencia en compresión y tensión del agregado liviano, obtenidos a través de los diferentes procedimientos.

Este análisis será realizado únicamente en dos tipos de agregados: esquisto expansivo y pizarra expansiva.

4.6.7.1 Resistencia en tensión

Los valores del aporte resistente del agregado en tensión obtenidos a partir de la aplicación de la ecuación 4.5 fueron comparados con aquellos obtenidos en ensayos de tensión directa ejecutados sobre partículas de agregado.

Con objeto de que esta comparación fuese valida y sabiendo que la resistencia en tensión directa del concreto es del orden de 0.5 a 0.7 veces su resistencia en tensión indirecta) se aplico este mismo criterio para el caso de la resistencia de los agregados livianos. Se asumió, que la resistencia en tensión directa del agregado es del orden de 0.6 veces su resistencia en tensión indirecta. Los valores obtenidos fueron los siguientes:

Agregado	ft	ta
Esquisto expansivo	9.6	11.8
Pizarra expansiva	15.5	18.9

ft: Resistencia en tensión directa, kg/cm<sup>2</sup>

ta: Valores modificados del aporte resistente del agregado en tensión, kg/cm<sup>2</sup>

Como puede observarse estas dos series de valores concuerdan bastante bien, esta comparación tiene además un significado muy importante ya que provee de una interpretación física a los valores numéricos del aporte resistente del agregado derivados en forma analítica.

Esto también significa, que los valores obtenidos analíticamente y definidos como el aporte resistente del agregado representaran un índice de la resistencia del agregado cuando dentro del concreto se encuentre sometido a estados de esfuerzos que no pueden ser considerados como uniaxiales.

Desafortunadamente la dispersión de resultados obtenidos en el ensayo de corte-compresión y el hecho de que pequeñas variaciones en la envolvente de falla definida produjeran variaciones relativamente grandes en la resistencia en tensión, no nos permiten utilizar los resultados de estos ensayos para reforzar la verificación de la hipótesis antes mencionada.

4.6.7.2 Resistencia en compresión

En este caso los valores de resistencia en compresión del agregado obtenidos en el ensayo de corte-compresión fueron comparados con aquellos definidos analíticamente como aporte resistente del agregado en compresión. Con el objeto de hacer esta comparación valida, se asumió que el agregado cuando se encuentra dentro del concreto posee un confinamiento lateral; este confinamiento aportado por el mortero tendría un valor máximo igual a la resistencia en tensión de dicho mortero. Por lo tanto a partir de las envolventes de falla del agregado obtenidas con anterioridad, se estimaron los valores de la resistencia en compresión del agregado sometido a estado de esfuerzos biaxiales.

Estos valores y aquellos obtenidos analíticamente y definidos como el aporte resistente del agregado en compresión fueron:

Agregado	fc	ca
Esquisto Expansivo	115.5	140
Pizarra Expansiva	178.5	196

fc: Resistencia del agregado en compresión biaxial, kg/cm<sup>2</sup>

ca: Aporte resistente del agregado en compresión, kg/cm<sup>2</sup>

Aunque como se mencionó anteriormente, la dispersión de resultados en el ensayo de corte-compresión es relativamente grande, pequeñas variaciones en la envolvente de falla definida producen únicamente pequeñas variaciones en la resistencia en compresión del agregado. Asumiendo las mencionadas envolventes como una primera aproximación, y solo con fines comparativos, se encontró que si se considera que en el momento de falla el mortero es capaz de aportar un confinamiento lateral al agregado, confinamiento que tendría un valor máximo igual a la resistencia en tensión de dicho mortero, la resistencia en compresión biaxial del agregado obtenida a partir de esas envolventes alcanza valores muy similares a aquellos definidos en forma analítica.

Este análisis no intenta una conclusión definitiva y solo trata de demostrar que los valores del aporte resistente del agregado en compresión tiene un significado físico y que ellos pueden ser explicados como la resistencia del agregado bajo un estado complejo de esfuerzos.

#### 4.6.8 Consideraciones finales

El modelo analítico propuesto para la determinación indirecta de la resistencia del agregado, permite la evaluación de esta característica en forma sistemática y repetible. Adicionalmente este mismo modelo permite, bajo ciertas condiciones, la predicción de la resistencia de los concretos livianos elaborados cuya resistencia ha sido determinada previamente.

Este modelo nos indica la existencia de un límite superior de resistencias que pueden obtenerse con un concreto liviano. Este límite superior depende fundamentalmente de la resistencia del agregado. La existencia de este límite superior también fue demostrada en forma experimental por Ramos (1972).

Los valores numéricos del máximo aporte resistente del agregado tanto en compresión como en tensión, representan la resistencia de ese agregado sometido a un estado de esfuerzos distinto de la simple compresión a tensión. Como quiera que ese estado de esfuerzo no es posible determinarlo con exactitud resultó necesario admitir ciertas hipótesis con objeto de verificar si los valores de resistencia obtenidos analíticamente podrían resultar factibles asumiendo estados de esfuerzos complejos.

Finalmente y resumiendo, el procedimiento propuesto para la determinación del aporte resistente del agregado liviano como constituyente del concreto liviano, y los factores que influyen sobre este aporte se sintetizan en lo siguiente:

- Para un agregado dado y un mortero de composición conocida, es posible determinar en forma experimental la mínima resistencia que debe poseer ese mortero con objeto de que el agregado desarrolle su máximo aporte resistente.
- Este máximo aporte es desarrollado cuando la falla del concreto provoca la fractura de todo el agregado en la sección de falla.
- Este máximo aporte del agregado y la mínima resistencia requerida en el mortero, varían al cambiar el tipo de agregado fino utilizado en la preparación del mortero.
- Dentro del rango analizado, variaciones en la relación arena/cemento y concentración volumétrica del agregado en la mezcla no producen variaciones en el valor obtenido como aporte resistente del agregado.
- Cuando el agregado ha desarrollado su máximo aporte resistente, ese valor permanece constante e independiente de futuros incrementos en la resistencia del mortero que lo rodea.
- Para resistencia en el mortero superiores a la mínima requerida para que el agregado desarrolle su máximo aporte resistente; la resistencia del concreto liviano elaborado con ese agregado puede ser predicha por medio de la ecuación 4.4.

### 4.7 MÉTODO DE DOSIFICACIÓN PROPUESTO POR VIDELA Y LÓPEZ

#### 4.7.1 Introducción

Videla y López (1999), desarrollaron una metodología general de dosificación para concretos livianos, que considere las variables objetivo: densidad, trabajabilidad y resistencia especificadas. El procedimiento experimental consistió en cuantificar el efecto de las variables de dosificación en las propiedades de interés del concreto liviano. Además, el método no se circunscribe a un agregado en particular, por el contrario, tiene el objetivo de ser aplicable a cualquier tipo de agregado liviano, ya que utiliza parámetros generales que describen física y mecánicamente el agregado en uso.

Se propuso un diseño de experimento, basado en el concepto de las dos fases, para determinar la influencia de las variables de dosificación en las variables objetivo del concreto liviano (densidad, trabajabilidad y resistencia). El programa contempló seis tipos de fase soportante, en las que se varió su resistencia a compresión y trabajabilidad. Además tres tipos de fase liviana fueron considerados, dos de piedra pómez de diferentes características y procedencia, y un tercer tipo de fase liviana constituida de arcilla expansiva (Leca).

En la elaboración de las amasadas de prueba se utilizó una mezcla en iguales proporciones de dos marcas de cemento Pórtland Puzolánico corriente. La Tabla 4.3 muestra las propiedades del cemento obtenido.

Tabla 4.3. Propiedades del cemento utilizado en las mezclas de prueba.

Propiedad	Valor
Agua de consistencia normal (cm <sup>3</sup> )	32.00
Tiempo de fraguado inicial (hr)	4:00
Tiempo de fraguado final (hr)	6:00
Contenido Puzolana (%)	28.90
Contenido Yeso (%)	5.30
Densidad real (kg/m <sup>3</sup> )	2.92
Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4.37
Resistencia flexión 7 días (kg/cm <sup>2</sup> )	45.00
Resistencia flexión 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )	63.00
Resistencia compresión 7 días (kg/cm <sup>2</sup> )	239.00
Resistencia a compresión 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )	332.00

Las propiedades de los agregados considerados se presentan en la Tabla 4.4. Para caracterizar los agregados se realizaron los ensayos rutinarios que incluyen densidad real y aparente, absorción y granulometría (representada por el módulo de finura) y dos ensayos especiales de resistencia intrínseca propuestos por la norma inglesa BS812: Parte 3, denominados valor del 10% de finos (TPFV) y valor de trituración del agregado (ACV).

Tabla 4.4. Propiedades de los agregados utilizados en las mezclas de prueba.

Propiedad	Pómez 1	Pómez 2	Leca	Arena normal
Densidad real SSS: D <sub>RSSS</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1245	1228	1120	2556
Densidad real seca: D <sub>RS</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	887	573	982	2483
Densidad aparente compacta seca: D <sub>ACS</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	564	314	640	1549
Absorción (%)	40	85	17	2.90
Módulo de finura (Mf)	5.96	5.42	5.96	1.74
Valor del 10% de finos: TPFV (kN)	35	24	69	--
Valor de trituración: ACV(%)	79	97	52	--

Las dosificaciones de las mezclas fueron efectuadas a partir del reemplazo de la fase soportante por la liviana de manera de analizar su efecto en las propiedades del concreto. La nomenclatura usada consiste en una letra "M" de mortero y en caso de ser concreto un signo "P1", "P2" o "L", que corresponde a la identificación del agregado liviano, Piedra Pómez 1, Piedra Pómez 2 y Leca, respectivamente. A continuación un número que corresponde a la razón agua/cemento de la fase soportante multiplicada por 100 (35, 40, 45, 50, 55 y 60) y finalmente un número que representa la densidad del concreto con valores de 1.8, 1.7, 1.6 y 1.5 Ton/m<sup>3</sup>, respectivamente.

A cada mezcla se le realizó diferentes ensayos en estado fresco, entre los que destacan medición de trabajabilidad con el método del asentamiento del cono de Abrams (ASTM C143), medición de la densidad en estado fresco (ASTM C138), medición del contenido de aire con el método volumétrico (ASTM C173). En estado endurecido se realizó el ensayo de resistencia a compresión a 3 probetas cilíndricas (ASTM C39) y a probetas cúbicas a 3, 7 y 28 días (NCh-1037), módulo de elasticidad a 7 y 28 días (ASTM C169). Finalmente, a probetas en estado seco al aire se les realizó la medición de la densidad (ASTM C567), resistencia a compresión y módulo de elasticidad.

4.7.2 Análisis de resultados

Con respecto al contenido de aire en el concreto liviano, los resultados indican que en los concretos livianos la dosis de aire atrapado no es significativamente mayor que la medida en los morteros de densidad normal. Se debe tener en cuenta que la medición de aire se realizó con el método volumétrico recomendado para concretos livianos. El método convencional utiliza aire a presión y sobrestima dicho valor en los concretos con agregados livianos, ya que además del contenido de aire de la mezcla mide el aire contenido en el agregado liviano. Los contenidos de aire se encuentran en un 90% bajo los 20 lt/m<sup>3</sup>. Además se aprecia que el contenido de aire está muy relacionado con la trabajabilidad que presenta el concreto liviano; mezclas más secas presentan mayor volumen de aire debido a que a la muestra se le realiza una compactación estándar, que puede ser insuficiente en algunos casos.

Como era previsible, tanto la densidad fresca como seca al aire disminuyen al aumentar la fase liviana. Los seis morteros presentan en promedio una densidad fresca y seca al aire de 2088 kg/m<sup>3</sup> y 2021 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, mientras que la serie de concretos más liviana presenta un valor promedio de 1519 kg/m<sup>3</sup> en estado fresco.

También se puede observar que la densidad del concreto liviano en estado fresco es mayor que la densidad en estado seco al aire para todas las mezclas de prueba, dicha diferencia es mayor al aumentar el contenido de agregado liviano. Este fenómeno se explica porque la diferencia en peso entre ambos estados está dada por la pérdida de agua que experimenta el concreto durante el proceso de secado. Mientras mayor es la cantidad de agregado liviano, mayor es el agua contenida en sus poros.

Los concretos con Piedra Pómez y con arcilla expansiva presentan la mayor y menor diferencia entre densidades, respectivamente, y corresponden a los agregados de mayor y menor absorción.

Al realizar una regresión entre ambas densidades, considerando la cantidad de cada fase y la absorción del agregado liviano, se obtiene la ecuación 5.1 y los parámetros estadísticos mostrados:

$$D_F = D_S + 0.766 \cdot \left( \frac{\frac{L}{1000} \cdot D_{RSSSL}}{1 + \frac{A_{BL}}{100}} \right) \cdot \frac{A_{BL}}{100} + 75.3 \left( 1 - \frac{L}{1000} \right) \quad (5.1)$$

Coefficiente de determinación: 0.9691

Límite 95 % confianza: +/- 65.0 kg/m<sup>3</sup>

Asimismo, se puede obtener una relación teórica para la densidad del concreto liviano en estado fresco en función de la densidad de cada una de las fases componentes. La ecuación 5.2 presenta dicha relación y los parámetros estadísticos relevantes. Se ha despreciado la dosis de aire, dado que está incluida implícitamente en la densidad del mortero o fase soportante.

$$D_F = \frac{L}{1000} \cdot D_{RSSSL} + \left( 1 - \frac{L}{1000} \right) \cdot D_M \quad (5.2)$$

Coefficiente de determinación: 0.9615

Límite 95 % confianza: +/- 71.9 kg/m<sup>3</sup>

Donde:

D<sub>F</sub> Densidad fresca concreto liviano (kg/m<sup>3</sup>)

D<sub>S</sub> Densidad seca al aire concreto liviano (kg/m<sup>3</sup>)

L Volumen absoluto agregado liviano (lt/m<sup>3</sup>)

D<sub>RSSSL</sub> Densidad real del agregado liviano en condición SSS (kg/m<sup>3</sup>)

A<sub>BL</sub> Absorción del agregado liviano (%)

D<sub>M</sub> Densidad fresca del mortero o fase soportante (kg/m<sup>3</sup>)

Al igualar las ecuaciones 5.1 y 5.2, se obtiene una relación entre la densidad del concreto liviano en estado seco al aire especificada y la dosis de agregado liviano en términos de volumen absoluto, en la que interviene la densidad de cada fase y la absorción del agregado liviano. Esta relación permite la determinación de la dosis de agregado liviano que satisface la condición de densidad especificada.

Al analizar la trabajabilidad de las mezclas, se puede observar que al aumentar la dosis de agua la trabajabilidad aumenta. A igual dosis de agregado liviano, las series que consideran una fase soportante con mayor cantidad de agua presentan un asentamiento de cono de Abrams mayor que las series con menor cantidad de agua libre.

Al realizar una regresión entre ambas variables se obtiene una relación del tipo exponencial. Su coeficiente de determinación es bajo, debido a que en dicha relación afectan otras variables de importancia como la granulometría del agregado combinado y la densidad del concreto.

Ahora si se analiza la relación entre dosis de agua y trabajabilidad para cada una de las series presentadas, se observa una disminución en la variabilidad. Así, al considerar la serie de morteros, se tiene que demandan mayor cantidad de agua, para una trabajabilidad dada, en comparación con las otras series, lo que se debería a que la granulometría del agregado es más fina en este caso. Además, al realizar una regresión entre trabajabilidad y dosis de agua para esta serie, se obtiene un coeficiente de determinación superior a 0,915. De la misma manera, a medida que disminuye la densidad del concreto (aumenta el contenido de agregado grueso liviano), baja la demanda de agua para una trabajabilidad determinada.

Para explicar adecuadamente la relación trabajabilidad dosis de agua se debe considerar la granulometría del agregado combinado, representada por su módulo de finura, y la densidad del concreto en estado fresco.

La ecuación 5.3 presenta la regresión obtenida de los datos y los parámetros estadísticos relevantes.

$$W = 375.6 + 5e^{0.111S} - 91.225 \cdot M_{FC} + 0.0245 \cdot D_F \cdot M_{FC} \quad (5.3)$$

con:

Coefficiente de determinación: 0.9305

Límite 90 % confianza: +/-37.1 kg/m<sup>3</sup>

donde:

W Dosis de agua (kg/m<sup>3</sup>)

M<sub>FC</sub> Módulo finura agregado combinado

S asentamiento cono de Abrams (cm)

D<sub>F</sub> Densidad fresca concreto liviano (kg/m<sup>3</sup>)

Con el uso de esta relación es posible una primera estimación de la dosis de agua libre que requeriría un concreto liviano de cierta densidad en estado fresco, con un agregado de módulo de finura dado y una trabajabilidad especificada.

El cálculo del módulo de finura del agregado combinado se realiza a partir de la ecuación 5.4. Dada la gran diferencia de densidad entre ambos agregados, no es posible realizar el cálculo de granulometría en base a los pesos de cada fracción, por lo cual la fórmula 5.4 basa su cálculo en el volumen absoluto de cada agregado considerado: grueso, liviano y fino normal (López, 1999).

$$M_{FC} = \alpha \cdot M_{FL} + (1 - \alpha) \cdot M_{FN} \quad (5.4)$$

Donde:

$$\alpha = \frac{\frac{A_L}{(1 + A_{BL}) \cdot D_{RSSSL}}}{\frac{A_L}{(1 + A_{BL}) \cdot D_{RSSSL}} + \frac{A_N}{(1 + A_{BN}) \cdot D_{RSSN}}} \quad (5.5)$$

$M_{FC}$	Módulo finura agregado combinado
$M_{FL}$	Módulo finura agregado liviano
$M_{FN}$	Módulo finura arena normal
$\alpha$	ponderador $M_{FL}$ % en volumen absoluto seco de agregado liviano
$A_L$	Peso agregado liviano en condición SSS ( $\text{kg/m}^3$ )
$A_N$	Peso arena normal en condición SSS ( $\text{kg/m}^3$ )
$A_{BT}$	Absorción agregado liviano
$A_{BN}$	Absorción arena normal
$D_{RSSSL}$	Densidad real agregado liviano en condición SSS ( $\text{kg/m}^3$ )
$D_{RSSN}$	Densidad real arena normal en condición SSS ( $\text{kg/m}^3$ )

Los resultados indican que la resistencia a compresión cúbica del concreto disminuye al aumentar la proporción de la fase liviana y disminuir su resistencia intrínseca. El agregado liviano tiene una resistencia menor que la fase soportante, por lo que al aumentar la dosis del primero, la resistencia del concreto, que combina el comportamiento de ambas fases, disminuye.

Existe una caída en la resistencia a compresión del concreto liviano a medida que aumenta el volumen absoluto de agregado liviano. Se debe destacar que las tres regresiones propuestas explican más de un 95 % de la variabilidad en la resistencia del concreto. Así, para dosis absoluta de agregado liviano de aproximadamente  $500 \text{ lt/m}^3$ , se tienen resistencias en el concreto de un 64.0, 40.5 y 35.5 % de la resistencia de la fase soportante, para los concretos con arcilla expansiva, Piedra Pómez 1 y Piedra Pómez 2, respectivamente.

Por otra parte, a medida que la resistencia intrínseca del agregado disminuye (representada por el valor del 10 % de finos, TPFV), menor es la resistencia del concreto a igual contenido de agregado liviano. La Piedra Pómez 2 que presenta un valor en su TPFV de 24 kN, coincide con la recta de regresión más inclinada.

A partir de estos resultados se dedujo la ecuación 5.5, que permite estimar la resistencia a compresión cúbica del concreto liviano en función de la resistencia a compresión de la fase soportante y del TPFV y dosis de la fase liviana. Se han incluido además el coeficiente de determinación y los límites para un 95 % de confianza.

$$R = f(L, R_m, \text{TPFV}) \quad (5.6)$$

Coefficiente de determinación: 0.9783  
 95 % confianza Límite: +/- 33  $\text{kg/cm}^2$

donde:

$R_{CU28}$	Resistencia a compresión cúbica a la edad de 28 días con curado húmedo (MPa)
$R_M$	Resistencia a compresión cúbica a la edad de 28 días con curado húmedo del mortero o fase soportante (MPa)
L	Volumen absoluto agregado liviano ( $\text{lt/m}^3$ )
TPFV	Valor del 10% de finos (kN)

Con esta última relación es posible estimar la resistencia de la fase soportante requerida, para que al combinarse con un contenido dado de agregado liviano de resistencia intrínseca determinada, se obtenga la resistencia a compresión especificada en el concreto.

La última expresión que se requiere para implementar una metodología de dosificación es una que relacione la razón cemento/agua de la fase soportante con su resistencia a compresión. A partir de la fórmula de Bolomey se obtiene la expresión 5.7 y los parámetros estadísticos mostrados.

$$R_M = 21.5 \left( \frac{C}{W} - 0.488 \right) \quad (5.7)$$

Coefficiente de determinación: 0.9814

Límite 95 % confianza: +/- 3.57 MPa

Donde:  $R_M$  es la resistencia a compresión cúbica a la edad de 28 días con curado húmedo del mortero o fase soportante (MPa);  $C/W$  es la razón cemento/agua, en peso.

Se debe hacer notar que esta última ecuación es propia o característica de los cementos usados en la investigación, por lo que para otros cementos se debe deducir o adoptar valores recomendados en normas.

Se tiene entonces que con las fórmulas 5.5 y 5.6 es posible estimar la dosis de cemento requerida en el concreto para satisfacer la condición de resistencia a compresión del concreto liviano.

#### 4.7.3 Metodología de dosificación

La metodología de dosificación que se propone utiliza cinco hipótesis base, las que se presentan a continuación:

- a) Hipótesis de densidad: La magnitud de la densidad del concreto depende de la cantidad y densidad de los materiales constituyentes del concreto y del contenido de aire atrapado.
- b) Hipótesis de trabajabilidad: La trabajabilidad del concreto en función de la dosis de agua, de la granulometría del agregado combinado y de la densidad del concreto en estado fresco.
- c) Hipótesis de resistencia: La resistencia a compresión del concreto depende de la resistencia y cantidad relativa de cada una de sus fases componentes.
- d) Hipótesis de resistencia de la fase soportante: La resistencia a compresión de la fase soportante depende fundamentalmente de su razón agua/cemento ( $W/C$ ).
- e) Hipótesis suma de volúmenes absolutos: La suma de los volúmenes absolutos de cemento, agua, agregado liviano y normal y contenido de aire debe ser  $1 \text{ m}^3$ .

##### 4.7.3.1 Datos de Entrada

La metodología de dosificación se basa en el empleo de relaciones teórico empíricas entre las variables de dosificación (dosis de cemento, agua y agregados) y las variables objetivo (densidad en estado seco, trabajabilidad medida con el método del asentamiento del cono de Abrams y resistencia característica a compresión cúbica del concreto a la edad de 28 días con curado húmedo).

La metodología de dosificación de las dos fases requiere como datos iniciales las variables objetivo y las propiedades básicas de los agregados a utilizar como: densidad real en condición SSS, absorción, granulometría y el valor del 10 % de finos de agregado liviano (TPFV) como índice resistente.

##### 4.7.3.2 Procedimiento

###### a) Paso 1 - Determinación de dosis de agregado liviano

La dosis de agregado liviano está determinada por los requisitos de densidad especificados para el concreto liviano. Con la densidad real del agregado liviano ( $D_{RSSSL}$ ), su absorción ( $Ab$ ), la densidad de la fase soportante supuesta ( $D$ ) y la densidad del concreto en estado seco al aire ( $D$ ) y el uso de las ecuaciones 5.1 y 5.2, se calcula la dosis de agregado liviano requerida en términos de volumen absoluto ( $L$ ). La dosis de agregado liviano en  $\text{kg/m}^3$  de concreto ( $Al$ ), se obtiene multiplicando el volumen absoluto por la densidad real del agregado liviano en condición SSS y dividiendo por 1000. De los resultados obtenidos en la etapa experimental se recomienda suponer una densidad de partida del mortero de  $2020 \text{ kg/m}^3$ , que corresponde al promedio de densidad medida en los morteros en estado fresco.

b) Paso 2 - Determinación de dosis de agua

La dosis de agua del concreto esta determinada por la trabajabilidad especificada para el concreto como asentamiento el cono de Abrams. las características granulométricas del agregado combinado, representadas por su módulo de finura, y por la densidad del concreto en estado fresco.

Con la dosis de agregado liviano determinada en el 1 ó 2, se conoce la densidad del concreto en estado fresco. Con el uso de la fórmula 5.4 y la suposición de una dosis de arena normal, se conoce el módulo de finura del agregado combinado. Finalmente, con la ecuación 5.3 se estima la dosis de agua (W) requerida en 1 m<sup>3</sup> de concreto para cumplir con la trabajabilidad especificada. Para el supuesto de la dosis de arena (A<sub>N</sub>), se recomienda considerar inicialmente el valor de 550 kg/m<sup>3</sup>, que es aproximadamente el promedio de los concretos utilizados en esta investigación.

c) Paso 3 - Determinación de dosis de cemento

La dosis de cemento está determinada por los requisitos de resistencia media a compresión de la fase soportante (R<sub>m</sub>), la que a su vez está determinada por la resistencia característica a compresión del concreto especificada (R<sub>k</sub>) y la resistencia propia la fase liviana representada por el valor del 10 % de finos (TPFV).

A partir de la resistencia a compresión característica, la desviación estándar y el porcentaje de defectuosos especificado, se calcula la resistencia media de dosificación a compresión cúbica (R<sub>CU28</sub>), con la siguiente expresión:

$$R_{CU28} = R_k + t_s \cdot \sigma \tag{5.8}$$

Donde:

- R<sub>CU28</sub> Resistencia a compresión cúbica a la edad de 28 días con curado húmedo (MPa)
- R<sub>k</sub> Resistencia característica especificada a compresión a la edad de 28 días con curado húmedo (MPa)
- t<sub>s</sub> Coeficiente de Student determinado para la fracción defectuosa especificada  
1.282 y 1.036 para un 10 y 15% de defectuosos
- σ Desviación estándar de los valores de resistencia (MPa).  
Se recomienda el valor de 4.0 MPa para concretos livianos (López, 1999)

Con el valor de R<sub>CU28</sub> conocido, el TPFV del agregado liviano y la dosis de agregado liviano determinada en el paso 1, es posible estimar la resistencia a compresión requerida de la fase soportante. Con la resistencia a compresión de la fase soportante y la fórmula 5.6 se determina la relación cemento/agua (C/W), la que al ser multiplicada por la dosis de agua determinada en el Paso 2, entrega la dosis de cemento requerida en 1 m<sup>3</sup> de concreto (C).

d) Paso 1- Determinación de dosis de arena

La dosis de arena normal se obtiene a partir de la hipótesis que la suma de los volúmenes absolutos de todos los componentes del concreto debe ser igual a 1 m<sup>3</sup>, es decir:

$$\frac{C}{D_{RC}} + \frac{W}{D_{RW}} + \frac{A_L}{D_{RSSL}} + \frac{A_N}{D_{RSSN}} + \frac{V_{AIRE}}{1000} = 1 \tag{5.9}$$

Donde:

- C Dosis de cemento (kg/m<sup>3</sup>)
- W Dosis de agua (kg/m<sup>3</sup>)
- A<sub>L</sub> Dosis de agregado liviano (kg/m<sup>3</sup>)
- A<sub>N</sub> Dosis de arena normal (kg/m<sup>3</sup>)
- D<sub>RC</sub> Densidad real del cemento (kg/m<sup>3</sup>)
- D<sub>RW</sub> Densidad real del agua (kg/m<sup>3</sup>)
- D<sub>RSSSL</sub> Densidad real agregado liviano en condición SSS (kg/m<sup>3</sup>)
- D<sub>RSSSN</sub> Densidad real arena normal en condición SSS (kg/m<sup>3</sup>)
- V<sub>AIRE</sub> Volumen de aire atrapado (lt/m<sup>3</sup>)

Conocidas las dosis de agregado liviano, agua, cemento y aire atrapado y usando la fórmula 5.8. se puede calcular la dosis de arena normal requerida para completar un m<sup>3</sup> de concreto. Considerando que el contenido de aire atrapado en el concreto no se conoce, debe ser supuesto. Basándose en los resultados obtenidos, se recomienda lt/m<sup>3</sup> (2%), ya que más de un 90% de los casos está bajo dicho valor.

e) Paso 5 - Verificación Supuestos

En este paso se realiza una verificación de los supuestos efectuados durante los pasos 1 y 2, con respecto a la densidad de la fase soportante y dosis de arena, respectivamente.

La ecuación 5.9 entrega el valor de la densidad de la fase soportante (D), en función de las dosis de cemento (C), agua (W), arena (A<sub>N</sub>) y aire atrapado (V<sub>AIRE</sub>), resultado que debe contrastarse con el supuesto adoptado en el Paso 1. Si difieren en más de 2 9, se recomienda comenzar una D (límite basado en nueva iteración con el nuevo valor de la recomendación de NCh-170).

Como se ha dicho, el contenido de aire en el mortero no difiere de manera importante del medido en el concreto, por lo cual y a modo de aproximación se considera que el mortero contiene todo el aire atrapado.

$$D_M = \frac{C + W + A_N}{\frac{C}{D_{RC}} + \frac{W}{D_{RW}} + \frac{A_N}{D_{RSSN}} + \frac{V_{AIRE}}{1000}} \quad (5.10)$$

Donde:

- D<sub>M</sub> Densidad fresca del mortero o fase soportante ( kg/m<sup>3</sup>)
- C Dosis de cemento (kg/m<sup>3</sup>)
- W Dosis de agua (kg/m<sup>3</sup>)
- A<sub>N</sub> Dosis de arena normal (kg/m<sup>3</sup>)
- D<sub>RC</sub> Densidad real del cemento (kg/m<sup>3</sup>)
- D<sub>RW</sub> Densidad real del agua (kg/m<sup>3</sup>)
- D<sub>RSSN</sub> Densidad real arena normal en condición SSS (kg/m<sup>3</sup>)
- V<sub>AIRE</sub> Volumen de aire atrapado (lt/m<sup>3</sup>)

En el Paso 2 se realizó el cálculo del módulo de finura del agregado combinado (M<sub>FC</sub>) con base a una dosis de arena normal supuesta. Si el valor del módulo de finura calculado con A<sub>N</sub> del Paso 4, difiere en más de un 1% del utilizado en el Paso 2, con la dosis de arena supuesta, se debe realizar otra iteración con el valor corregido.

Una vez que los valores utilizados en los pasos 1 y 2 no difieran de los obtenidos en el paso 5 más allá de los límites propuestos, se tendrá completa la dosificación del concreto liviano. A partir de esta dosificación se recomienda elaborar un concreto de prueba en laboratorio con el fin de ajustar la dosificación. Videla y López (1999) realizan comparaciones de sus resultados con otras propuestas (Videla y López, 1997; Pfeiffer, 1968), a fin de validar sus ecuaciones propuestas; concluyen que se obtienen buenos resultados en las estimaciones de resistencia y trabajabilidad.

4.7.4 Comentarios finales

De los resultados obtenidos por Videla y López (1999), los autores concluyen que es factible la elaboración de concretos livianos estructurales con cualquiera de los tres agregados considerados. Sin embargo, la arcilla expansiva presenta ventajas sobre la piedra pómez. A dosificaciones similares, los concretos con arcilla expansiva siempre superan la resistencia a compresión medida en los concretos con piedra pómez. En promedio, los concretos con piedra pómez presentaron una resistencia a compresión de un 57% de los valores obtenidos con arcilla expansiva.

En resumen, los concretos que pueden ser clasificados como concretos livianos estructurales son P1/35/1.8, P1/40/1.8, P1/45/1.8 y P1/50/1.8 para la Piedra Pómez 1, P2/35/1.8 y P2/55/1.8, para la Piedra Pómez 2 y, L/35/1.8, L/35/1.7, L/35/1.5, L/45/1.8, L/45/1.5, L/55/1.8 y L/55/1.7 para la arcilla expansiva.

Como conclusión general se puede decir que los concretos livianos estructurales con piedra pómez se plantean como una alternativa técnicamente viable para su utilización en la construcción, dado el valor de la resistencia a compresión que son capaces de desarrollar y la ventaja de presentar un peso propio considerablemente menor que un concreto convencional. Se puede sostener que a partir de la “Metodología de Dosificación de las Dos Fases” es posible obtener una dosificación para un concreto con agregados gruesos livianos y fino normal que satisfaga las necesidades del proyecto especificadas, en caso que el agregado liviano escogido cumpla con ciertos requisitos de resistencia y densidad. Se trata de un método rápido que estima los valores de densidad, trabajabilidad y resistencia de un concreto con agregados livianos en función de las propiedades de las fases componentes.

Es importante tener en cuenta el rango de aplicación de la metodología de dosificación. Si esta es aplicada fuera de los rangos definidos en la etapa experimental, las ecuaciones y relaciones propuestas no aseguran una buena estimación de las propiedades del concreto. Los rangos más importantes para el agregado liviano son: TPFV del agregado liviano entre 24 y 69 kN y un contenido entre 200 y 700  $\text{lt/m}^3$ . Para la fase soportante una razón W/C entre 0.35 y 0.60.

Se debe decir, además, que la modelación del concreto con agregados livianos como un material de dos fases (una fase soportante y otra liviana), resulta altamente conveniente para explicar y describir las propiedades del concreto con agregados livianos en estado fresco y endurecido y se presenta como una buena herramienta para incentivar el desarrollo y uso del concreto con agregados livianos. Se trata de concretos que poseen una fase liviana débil que determina las propiedades mecánicas, por lo que la interfase o zona de transición podría no ser considerada.

Si bien la metodología de las dos fases considera el uso de agregado liviano grueso y fino normal, los conceptos considerados en ella son aplicables a concretos con agregado grueso y fino livianos. Para realizar esta aplicación se debe considerar como fase soportante la pasta de cemento como fase liviana al agregado. No obstante, no se asegura una buena estimación de las propiedades, puesto que la base de datos utilizada en la investigación no considera dicho caso.

Cabe mencionar que si bien la metodología de dosificación propuesta no considera el uso de aditivo para el concreto, no presenta dificultades para considerar su uso. Se debe comenzar con una mezcla de prueba, para determinar el efecto del aditivo en las propiedades del concreto, por ejemplo ahorro de agua de amasado o aumento de la velocidad de desarrollo de resistencia. Su consideración, para efectos de dosificación, debe realizarse previo a la dosificación de la dosis de arena normal, de manera de calcular está última para completar un  $\text{m}^3$  de concreto.

En resumen, el método de dosificación no se contrapone con la utilización de aditivos y al igual que los métodos del ACI 211.1 y NCh-170, que tampoco lo consideran en forma específica, se debe ajustar la dosificación según el efecto del aditivo en particular.

## 5 CURADO DEL CONCRETO

### 5.1 INTRODUCCIÓN

La resistencia desarrollada por el concreto proviene del fraguado del cemento, un proceso complejo que incluye hidrólisis e hidratación. La exposición del concreto recién hecho a condiciones de temperatura y humedad que favorezcan las reacciones de hidrólisis e hidratación se denomina curado. Las formas de curado que se practican en la industria son: curado al aire, en el cual los elementos se conservan húmedos generalmente por un periodo de 28 días a temperatura ambiente; curado a baja presión de vapor, en el cual el concreto es expuesto a vapor a la presión atmosférica; y curado a alta presión de vapor o autoclave, en el cual las unidades de concreto se someten por algunas horas a vapor a una presión que generalmente es de 8.5 kg/cm<sup>2</sup>.

La velocidad de desarrollo de la resistencia en el concreto se mejora mucho por medio de temperaturas elevadas, especialmente cuando el concreto esta fresco.

Con el curado a baja presión de vapor se obtiene rápidamente una alta resistencia; sin embargo, el curado a alta presión de vapor no sólo da rápidamente una alta resistencia sino que por lo común dará una mayor resistencia que la que se obtendría con el curado al aire. Por otra parte, generalmente este proceso de curado conduce a la reducción de la contracción por secado y a mejorar la resistencia al ataque de los sulfatos.

### 5.2 FUNDAMENTOS

Antes de discutir el curado del concreto, sería conveniente recordar la breve consideración de la química del fraguado del cemento y la mecánica del desarrollo de la resistencia.

El cemento Pórtland se compone de un gran número de elementos, la mayoría de los cuales son de estructura compleja. Los más importantes, y con mucho los más abundantes de estos compuestos son los silicatos, aluminatos y ferroaluminatos de calcio. Cuando estos reaccionan con el agua, tienen lugar dos reacciones químicas: la primera llamada "hidrólisis" y la segunda "hidratación". Estas reacciones se efectúan simultáneamente de tal forma que los componentes del cemento se descomponen y el agua se combina progresivamente. Por ejemplo, cuando el agua reacciona con el silicato tricálcico, se forma un hidróxido de

calcio y un silicato de calcio. Este último es el compuesto que da al cemento fraguado la mayor parte de su resistencia de adherencia y por lo tanto da la resistencia funcional de los productos de concreto formados con el cemento. Está claro, por lo tanto, que los procesos de hidrólisis e hidratación son sumamente importantes. El “curado” es el procedimiento que se sigue para asegurar que el concreto en proceso de endurecimiento se mantiene en condiciones de temperatura y humedad tales que permiten que prosigan eficientemente las reacciones químicas. Los silicatos cálcicos hidratados son compuestos relativamente estables y se forman a través de un amplio límite de condiciones de temperatura, mientras que algunos de los otros hidratos, tales como los sulfoaluminatos de calcio son menos estables y se descomponen a temperaturas más altas. Esto aunado con algunos cambios físicos, da lugar a diferencias entre el concreto curado a temperatura ambiente y el curado a vapor.

El hecho de que la reacción entre cemento y agua se efectúe en cierto número de etapas y que no todas las reacciones se efectúen a la misma velocidad, da lugar a que los resultados prácticos de tales reacciones también se manifiesten en etapas. Por ejemplo, hay un “fraguado inicial” que tiene lugar inmediatamente después de la adición del agua. Este, generalmente es causado por una rápida solución de los componentes más reactivos del cemento. Sin embargo, la solubilidad de tales compuestos es muy baja y generalmente se disuelven con alguna descomposición. Por lo tanto, a ello sigue una rápida precipitación, la cual combinada con la extracción del agua y su combinación como hidrato, origina un endurecimiento de la pasta de cemento. Se cree que cuando se ha efectuado el fraguado final, los granos de cemento no hidratados son cubiertos por el producto hidratado ya formado y que el endurecimiento subsecuente debe, por lo tanto, efectuarse por la difusión del agua que penetra a través de esta cubierta con objeto de alcanzar el cemento no fraguado. Es por lo mismo importante, con objeto de obtener las mejores condiciones para el endurecimiento posterior, que las condiciones de curado se mantengan por un tiempo suficiente.

### 5.3 TRABAJO EXPERIMENTAL

Hemos visto ahora que el desarrollo de la resistencia del concreto, es consecuencia de una serie de reacciones químicas y del progreso de tales reacciones, siendo estas principalmente hidrólisis e hidratación, y que deben depender del exceso de agua y de las condiciones favorables de temperatura. Lea *et al* (Short y Kinniburgh, 1967) han demostrado que la velocidad de desarrollo de la resistencia del concreto se ve muy afectada por las variaciones de temperatura, particularmente cuando el concreto es reciente. Esto se aprecia en la Tabla 5.1, debida a Lea y tomada de Short y Kinniburgh (1967).

Tabla 5.1. Efecto de la temperatura durante el desarrollo de la resistencia

Cemento	Temp. de curado	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> ) a distintas edades*			
		1 días	3 días	7 días	28 días
Pórtland común	2°C	-----	14.0	56.2	134.7
	11°C	-----	39.6	81.4	158.1
	17°C	26.2	65.0	103.5	184.6
	25°C	34.5	76.8	111.5	207.1
	35°C	43.6	94.5	137.5	213.5
Alta resistencia rápida	2°C	3.5	32.3	137.9	270.4
	11°C	15.8	101.5	173.6	253.4
	17°C	40.3	137.2	199.0	286.6
	25°C	77.6	156.2	201.4	299.7
	35°C	118.5	189.7	211.2	284.1

Elevando la temperatura no sólo se incrementa la velocidad de las reacciones que ya se están efectuando, sino que de hecho pueden iniciarse ciertas reacciones que de otra manera no ocurrirían.

Hay, por lo tanto, un fuerte argumento en favor del curado a altas temperaturas, particularmente en el caso de productos precolados. Evidentemente existen dificultades para curar el concreto colado in situ con calor, pero el calentamiento por electricidad es usado algunas veces para concreto colado en invierno; en tales casos el acero de refuerzo es usado frecuentemente como conductor. La experiencia ha demostrado que manteniendo el concreto a temperatura ambiente interior por unas cuantas horas antes de someterlo a calentamiento, da lugar a una mejor resistencia. Como explicación de esto, se ha dicho que en las etapas iniciales la principal

reacción es la hidrólisis la que tiende a disminuir debido a una considerable cantidad de hidratación; como esta reacción es favorecida por elevadas temperaturas, resulta ventajoso mantener el producto a temperaturas relativamente bajas en las etapas iniciales. Durante el periodo siguiente, ya sean 28 días a temperatura ambiente, o unas pocas horas de curado a vapor, la reacción predominante es la hidratación.

Habiendo considerado brevemente las bases teóricas del curado, podemos resumir esto diciendo que la resistencia del concreto se desarrolla al mantenerlo por algún tiempo en condiciones húmedas. Tal tratamiento puede ser por un periodo prolongado a temperatura ordinaria en aire húmedo o en agua, o por un lapso más corto a temperatura elevada.

Se mencionó anteriormente que el curado a vapor puede iniciar reacciones que no ocurrirían a una velocidad no perceptible a temperatura ambiente. Por ejemplo, en el curado a alta presión de vapor, la arena de cuarzo reaccionan con la cal formada por el fraguado del cemento para constituir un material cementante que contribuye al incremento de la resistencia del producto. Si existen materiales puzolánicos, entonces la reacción con la cal es muy favorecida aún a temperaturas inferiores a 100°C.

No es difícil reconocer las ventajas que se obtienen de acelerar el proceso de curado. La cimbra y los polines pueden ser removidos rápidamente, con lo que se reduce su acarreo y mantenimiento. Se evita la gran inversión de capital involucrado, no sólo en el almacenamiento, sino en el mantenimiento fuera del mercado de la producción de 28 días, y en ciertas circunstancias se obtienen productos de mejor calidad. Por otra parte, el costo y mantenimiento de un equipo de curado a vapor puede ser considerable.

Mientras que, por una parte al curar a 100°C. se obtiene rápidamente una alta resistencia, el incremento posterior de la misma se ve un tanto reducida, de tal manera que la resistencia que se obtiene finalmente es de hecho un poco menor que la que se hubiera obtenido con un curado a temperatura ambiente; sin embargo, dicho fenómeno es menos notable en el caso del concreto ligero. Cuando el beneficio obtenido por el rápido desarrollo de la resistencia es tal que valga la pena sacrificar la resistencia final, como en la manufactura de bloques precolados, se usa frecuentemente el curado a baja presión de vapor.

Mientras que el efecto del curado a vapor puede ser influido por muchos factores, Nurse hizo notar en 1949 (Short y Kinniburgh, 1967) que la resistencia puede ser burdamente expresada como una función del producto de la temperatura y la duración del curado a vapor. Esto lo ha demostrado al expresar las resistencias de un concreto curado a vapor como un porcentaje de la resistencia alcanzada a los tres días con curado normal (18°C.). La relación dada anteriormente se aplica en forma general a concretos hechos con agregados que no son reactivos a temperaturas de curado a baja presión (50-100°C.), pero algunos agregados poseen propiedades puzolánicas y mostrarán un mejoramiento en la resistencia, aún a temperaturas menores de 100°C. En condiciones de curado a alta presión de vapor, se efectúan frecuentemente reacciones considerables entre la cal y el cuarzo, como se ha dicho anteriormente, y el curado dentro de estas ultimas condiciones puede proporcionar en unas cuantas horas, resistencias mayores a las que podrían esperarse después de 28 días de curado a temperatura ambiente. Algunos resultados en un concreto cuyas proporciones son de 1:1.9:2.8 han sido dados por Pearson y Brickett; sus resultados están resumidos en la Tabla 5.2, tomada de Short y Kinniburgh (1967).

Tabla 5.2. Efecto de la presión y duración del vapor en la resistencia a compresión

Presión **	4.78 kg/cm <sup>2</sup>		7.25 kg/cm <sup>2</sup>		13.85 kg/cm <sup>2</sup>		7 días	28 días
	16 hr.	42 hr.	16 hr.	42 hr.	16 hr.	42 hr.		
Tiempo de curado *	Resistencia a la compresión en kg/cm <sup>2</sup> .							
Cemento A	187.1	385.3	376.2	501.5	490.1	534.4	371.2	445.6
B	234.1	354.4	360.0	364.6	421.9	494.3	365.3	435.9
C	249.6	384.6	334.7	469.0	473.2	477.4	192.6	357.2
D	243.3	405.0	390.7	503.4	429.6	475.3	160.0	357.2

\* Tiempo de curado: en horas con autoclave; en días con aire húmedo.

\*\* Presión manométrica de vapor en kg/cm<sup>2</sup>.

De acuerdo con Lea, no se obtiene un considerable aumento en la resistencia al curar a vapor a presiones manométricas mayores de 10.5 kg/cm<sup>2</sup>, excepto quizá, en los casos en que el periodo de curado sea menor de 12 horas (Short y Kinniburgh, 1967); con presiones manométricas inferiores a 7 kg/cm<sup>2</sup>, excepto donde son

empleados largos periodos de curado, no se obtienen resistencias tan altas como las que se hubieran tenido al curar por medio de aire húmedo.

El curado a baja presión de vapor tiene poco efecto sobre la contracción por secado, pero el curado a alta presión de vapor (autoclave) reduce la contracción a la mitad o aún menos, de la que podría obtenerse después de un curado por aire húmedo. Esta reducción de la contracción por secado de los productos de cemento, cuando son curados a alta presión de vapor, pueden explicarse brevemente como sigue:

La masilla de cemento, que está compuesta principalmente de silicatos hidratados es técnicamente un gel y como tal, manifiesta la propiedad característica de los materiales tipo gel, de dilatarse al absorber agua y contraerse al perderla. En un concreto compacto del tipo convencional, en el que la grava o piedra triturada es usada como agregado, éste, debido a su rigidez, limita considerablemente las expansiones y contracciones alternadas a las que está propensa la masilla de cemento, cuando es expuesta a cambios de humedad. Un concreto como éste posee las características típicas de una baja contracción por secado y una baja expansión por humedad.

Cuando se usa agregado de peso ligero, siendo éste menos rígido, imparte menos limitación a los movimientos de la matriz de cemento y los concretos hechos con tales agregados se caracterizan por tener una contracción por secado ligeramente mayor.

En el caso de concreto aireado donde se usa muy poco o nada de agregado, aparte de un agregado fino de relleno, se tiene una muy alta contracción por secado, a menos que se efectúe el curado a presión de vapor. Durante el proceso de tal curado, ya sea en concreto aireado o en concreto con agregado, se efectúan cambios minerales en la matriz de cemento los cuales transforman su estructura de tipo gel a una de carácter más cristalino; esta última tiene una mayor estabilidad dimensional, propiedad que se refleja en el concreto del cual forma parte. Esto se verá más ampliamente en el capítulo 5.

Además de los efectos que produce en la resistencia y en la contracción por secado, el curado a alta presión de vapor mejora la resistencia del concreto al ataque del agua sulfatada, haciéndolo casi totalmente resistente a la acción del sulfato de sodio y del sulfato de calcio e incrementando muy considerablemente su resistencia al sulfato de magnesio. Lo anterior está bien ilustrado en la siguiente tabla debida a Lea y tomada de Short y Kinniburgh (1967).

Tabla 5.3. Tiempo requerido para la expansión de morteros de cemento y arena en proporción 1:10 en soluciones sulfatada

Solución	Expansión lineal %	Temperatura de curado con vapor saturado (24 hr.)				
		21°C	100°C	125°C	150°C	175°C
2.1% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.02	3 días	10 días	1 año	1 año	1 año
CaSO <sub>4</sub> Saturado	0.02	7 días	18 días	1 año	1 año	1 año
1.8% MgSO <sub>4</sub>	0.10	5 días	13 días	25 días	25 días	65 días
	0.20	6 días	32 días	75 días	130 días	1 año

#### 5.4 MÉTODOS PRÁCTICOS DE CURADO

Habiendo considerado algo de la teoría sobre los efectos de la temperatura en el curado del concreto y algunos de los resultados que han sido obtenidos por investigación, podemos ahora estudiar la manera general y comercial de efectuar el mismo.

##### 5.4.1 Curado al aire

Cuando el concreto es curado al aire, se almacena la mayoría de las veces en un patio sin ninguna cubierta. Esto, desde luego, es el modo más fácil de lograr el objetivo, porque el concreto de todas maneras tendría que estar apilado. Pero las condiciones de curado no son más ciertas que las condiciones climáticas. En periodos de sequía las unidades deben ser repetidamente regadas con objeto de mantener la humedad requerida para el curado. Algunas veces los montones son cubiertos con mantas enceradas que ayudan a estabilizar las condiciones de curado. Los pliegos de polietileno que ahora son asequibles resultan ideales para este propósito. Una medida mucho más satisfactoria es almacenar las unidades bajo techo, en depósitos mantenidos con alto índice de humedad, método que debido a su alto costo es raramente usado. De cualquier

manera, los productos deben ser mantenidos en condiciones húmedas durante 28 días y después de ese periodo dejarlos secar. Este periodo de secado es de valor considerable, aunque rara vez se emplea, ya que los bloques secados ocasionan menos problemas subsecuentes de agrietamiento. En otras palabras, es mejor que los bloques se sequen en el patio de almacenamiento, que cuando ya están formando parte del muro.

#### 5.4.2 Curado con vapor a baja presión

Como vimos en la primera parte de este capítulo, hay mucha ventaja en curar el concreto a elevadas temperaturas. El método del curado a vapor más ampliamente usado en Inglaterra actualmente, es el que llamamos curado a baja presión, esto es, curado a vapor a la presión atmosférica, siendo la temperatura de 60°C a 80°C. Este tipo de curado puede llevarse a cabo como proceso continuo o más comúnmente como intermitente. En el proceso continuo, la planta consiste en un túnel a través del cual los bloques u otros artículos de concreto son transportados en vagonetas. Se introduce vapor saturado aproximadamente entre 1.4 y 3.5 kg/cm<sup>2</sup> de presión manométrica y la condensación, así como el calor sensible del vapor, mantienen una alta temperatura. Con objeto de minimizar la pérdida de vapor, y de hecho para evitar la pérdida de calor, generalmente los extremos del túnel son cerrados con compuertas de bisagra que permiten la entrada de la vagoneta por un extremo y su salida por el otro. La velocidad de recorrido de las vagonetas a través del túnel es regulada para dar a las piezas el tiempo requerido de exposición al vapor. El curado así descrito tiene el mérito de mantener la temperatura dentro del túnel más o menos constante, y una vez que la estructura del túnel se ha calentado, la entrada de calor está virtualmente limitada a la requerida para reemplazar el calor sensible sacado en el concreto y reintegrar el calor perdido por radiación. Como la capacidad térmica del túnel es bastante considerable, resulta una ventaja importante el hecho de que la temperatura pueda mantenerse constante, lo cual no sucede en los hornos intermitentes.

En el proceso intermitente de curado a vapor, las piezas son apiladas en cámaras u hornos en los que se introduce vapor. Estos pueden resultar algo reducidos, aunque algunas veces lleguen a ser de 3.60 m de ancho por 6.10 m de profundidad o más, de tal modo que pueden alojar varias toneladas de concreto. En unas plantas modernas los elementos de concreto son depositados en las cámaras por medio de montacargas de elevador frontal. Algunas de esas cámaras son utilizadas y operadas como una batería en la cual, mientras una cámara está siendo llenada, otra esta siendo vaciada, estando el resto en diversas etapas del ciclo. La duración del ciclo de cada cámara de la batería puede ser controlado por interruptores de tiempo prefijado que operan las válvulas de vapor por medio de relays. Como se mencionó anteriormente, la principal desventaja de este método es que las cámaras descienden a la temperatura ambiente entre una descarga y una carga, y se pierde el calor representado por la capacidad térmica de los hornos. El proceso intermitente posee, sin embargo, la ventaja de la flexibilidad en que según fluctúen las necesidades de producción pueden ponerse en servicio solamente los hornos que se requieran en cualquier momento. Por otra parte, el uso de cámaras separadas permite un control más estricto del patrón de temperatura que debe mantenerse. Esto es de considerable importancia dado que la velocidad de ascenso y descenso de la temperatura tiene un efecto significativo en la calidad del concreto.

Es necesario tener un gran cuidado para el diseño de hornos de curado, particularmente respecto al tipo y posición de los chorros de vapor, si han de obtenerse los mejores resultados y la más alta eficiencia. Por ejemplo, se cree actualmente que el vapor introducido al nivel del techo, proporciona más uniforme distribución de humedad que cuando se introduce al nivel del piso, además de que una velocidad muy alta del chorro puede dañar las piezas, particularmente si hay agua arrastrada por el vapor. Para obtener mejor eficiencia, el vapor debería ser introducido, saturado y seco o ligeramente sobre-calentado.

Como se dijo anteriormente, es costumbre mantener el concreto a temperatura ambiente por un periodo de unas cuantas horas después del colado, antes de iniciar el calentamiento a vapor. La duración de tal periodo varía considerablemente, aunque lo más frecuente es que sea de aproximadamente 3 horas.

El aumento de la temperatura del concreto se retarda respecto a la del horno en las etapas iniciales, pero gradualmente se va incrementando sobre la del horno hasta que finalmente se equilibran entre 70°C y 80°C. En este punto se cierra la entrada del vapor y la temperatura comienza a descender lentamente, preferentemente de 3°C a 5°C por hora. En esta forma el periodo de "remojado" durará cerca de 16 horas.

### 5.4.3 Curado con vapor a alta presión

El curado a alta presión de vapor significa un curado en autoclave a presiones entre 7 y 11.2 kg/cm<sup>2</sup>. Los autoclaves son cilindros de acero de un diámetro de: 1.8 a 3.6 m y de 15 a 30 m de longitud. Estos pueden tener puertas en ambos extremos lo que representa una gran conveniencia, pero como las puertas deben ser muy elaboradas con objeto de combinar su fácil apertura y completa seguridad son, en consecuencia, muy caras; por eso los autoclaves la mayor parte de las veces tienen puerta en un sólo extremo y esas son del tipo de cuarto de vuelta, o de cerradura de obturador.

Es obvio que como los autoclaves trabajan a altas presiones no pueden ser operadas continuamente. Antes de que el concreto sea colocado en el autoclave, se acostumbra a darle un periodo de endurecimiento de unas cuantas horas a temperatura ambiente, aunque para algunos productos, los fabricantes someten los elementos a un curado a baja presión de 3 a 6 horas, antes de transferirlos al autoclave. Un curado prematuro a alta presión ocasiona mayor deficiencia de la resistencia y en muchos casos un agrietamiento capilar.

Cuando el concreto ha sido colocado dentro del autoclave y la puerta se cierra herméticamente, el vapor se introduce y se aumenta la presión lentamente; por lo común, se requieren de 3 a 6 horas para obtener la presión máxima. El tiempo que se mantiene a máxima presión fluctúa de 4 a 18 horas, según la naturaleza de los elementos, correspondiendo los periodos mayores a los concretos aireados.

Una rápida liberación de presión usualmente se emplea en la práctica comercial, con objeto de proporcionar un rápido secado del concreto. Se dice que un rápido descenso de presión, desde 8.4 a 10.5 kg/cm<sup>2</sup> a la presión atmosférica, en el caso del concreto ligero, es frecuentemente suficiente para secar los bloques a una condición cercana a la de secado al aire. Por otra parte, algunos opinan que una rápida liberación de presión, particularmente con el concreto aireado, puede causar daños debido a las fisuras que se ocasionan.

En Inglaterra, el curado a alta presión se usa principalmente para al concreto aireado, pero en América el curado por autoclave es ampliamente empleado por fabricantes de bloques de concreto común. Una modificación en plantas de autoclave, recientemente introducida en América, es la de autoclave sin caldera. Esto es semejante a una estufa casera de presión, que un equipo convencional de autoclave, en virtud de que los elementos se meten en la cámara con cierta cantidad de agua y el calor es suministrado desde fuera. En la práctica, el calentamiento del agua se efectúa al hacer circular aceite a través de un serpentín interior del autoclave, siendo el aceite calentado exteriormente. Algunos autoclaves son operados como una batería y el aceite caliente puede ser desviado de un autoclave a otro, según el estado de los respectivos recipientes dentro del ciclo de calentamiento. Además, el agua caliente (182°C) es recuperada de cada ciclo operante y almacenada en un tanque de recuperación por condensación para usarse en el próximo autoclave que se vaya a cargar. Una planta de este tipo se presta para usar control automático.

Resumiendo, podemos decir que, con objeto de desarrollar la resistencia y otras propiedades convenientes, el concreto después del fraguado debe ser mantenido en condiciones tales que sean propicias para continuar ciertas reacciones químicas esenciales. El mantenimiento en tales condiciones se denomina curado. El curado puede ser: un simple almacenamiento en condiciones húmedas, tratamiento a baja presión de vapor, o curado a alta presión de vapor en autoclave. El curado en autoclave proporciona muy alta resistencia en un periodo muy corto y en algunos casos da una resistencia más alta que la que podría haberse alcanzado con un curado al aire. Además, en la mayor parte de los casos, la contracción por secado se reduce considerablemente. El curado a baja presión de vapor no afecta a la contracción por secado, pero proporciona rápidamente una alta resistencia, aunque esta sea generalmente menor que la que se obtendría finalmente con un curado al aire en ambiente húmedo.

## 6 CONCRETO CON AGREGADO LIGERO

El concreto de agregado ligero, completamente compactado y adecuadamente proporcionado, es un medio estructural sano, básicamente similar al concreto normal, aunque algunas de sus propiedades se diferencian en los valores típicos y en los intervalos que abarcan.

Los diferentes tipos de agregados ligeros disponibles, permiten que el concreto tenga un rango de densidad y un poco más de 300 a 1850 kg/m<sup>3</sup> con un rango correspondiente de resistente de 3 a 400 kg/cm<sup>2</sup>, algunas veces más alto. La resistencias hasta de 600 kg/cm<sup>2</sup>, se obtiene con un contenido de cemento muy alto (560 kg/m<sup>3</sup>), o bien, incorporando aditivos superplastificantes o adiciones minerales. Por lo general, con agregado ligero, el contenido de cemento, varía desde lo mismo que con agregado de peso normal, al 70% más para la misma resistencias del concreto (Neville, 1999).

### 6.1 PROPIEDADES GENERALES

Los agregados ligeros, aunque similares en apariencia, tienen propiedades que varían considerablemente, por lo que se requiere un control cuidadoso en el desempeño de cada nuevo agregado. Es difícil clasificar el concreto de acuerdo con el tipo de agregado usado, ya que las propiedades del concreto se afectan también por la graduación del agregado, el contenido de cemento, la relación de agua/cemento, el grado de compactación; las propiedades típicas se enlistan en la Tabla 6.1 y la conductividad térmica se muestra como una función de la densidad en la Figura 6.1; los requerimientos de graduación para el agregado fino y grueso se presentan de la Tabla 6.2 a la Tabla 6.4 (Neville, 1999).

La adaptabilidad de un concreto ligero está regida por las propiedades deseadas: la densidad, el costo, la resistencia, y la conductividad térmica. La baja conductividad térmica del concreto de agregado ligero es ventajosa cuando se requiere un muy buen aislamiento pero la misma propiedad causa una elevación de temperatura en las condiciones de curado en masa, por lo que es importante por la posibilidad de agrietamiento térmico temprano.

Tabla 6.1. Propiedades típicas del concreto de agregado ligero

Tipo de concreto	DMA		C:A	DSC		fc'	fc'	CS	K	K	
	kg/m3	lb/ft3		kg/m3	lb/ft3						MPa
Gaseoso	CCP	950	60	01:03	750	47	3	500	700	0.19	0.11
	Arena	1600	100	01:03	900	55	6	800		0.22	0.13
Gaseoso en autoclave	-	-	-		800	55	4	600	800	0.25	0.14
Escoria expandida				01:08	1700	105	7	1000	400	0.45	0.26
	Fina	900	50	01:06	1850	115	21	3000	500	0.69	0.4
	Gruesa	650	40	01:03.5	2100	130	41	6000	600	0.76	0.44
				01:11	650-1000	42-62	3-4	400-600		0.17	0.1
Barro expandido en horno rotatorio	Fino	700	45	01:06	1100	70	14	2000	550	0.31	0.18
	Grueso	400	25	01:05	1200	75	17	2500	600	0.38	0.22
				01:04	1300	80	19	2800	700	0.4	0.23
BEHRAN	Grueso	400	25	01:05	1350-1500	85-95	17	2500	-	0.57	0.33
Barro expandido en toba aglomerada	Fino	1050	65	01:05	1500	95	24	3500	600	0.55	0.32
	Grueso	650	40	01:04	1600	100	31	4500	750	0.61	0.35
Pizarra expandida en horno rotatorio	Fina	950	60	01:06	1700	105	28	4000	400	0.61	0.35
	Gruesa	700	45	01:04.5	1750	110	35	5000	450	0.69	0.40
				01:05.9	1490	93	20	2900	300	-	-
Ceniza de toba pulverizada aglomerada	Fina	1050	65	01:05.3	1500	95	25	3600	300	-	-
	Gruesa	800	50	01:04.5	1540	96	30	4400	350	-	-
				01:03.1	1570	98	40	5800	400	-	-
				01:06.1	1670	104	20	2900	300	-	-
Ceniza de toba con arena pulverizada natural				01:05.5	1700	106	25	3600	300	-	-
	Gruesa	800	50	01:05.0	1750	109	30	4400	350	-	-
				01:03.6	1790	112	40	5800	400	-	-
				01:06	1200	74	14	2000	1200	-	-
Pómez	500-800	30-50	01:04	1250	77	19	2800	1000	0.14	0.08	
			01:02	1450	90	29	4200	-	-	-	
Vermiculita exfoliada	65-130	4-8	01:06	300-500	20-30	2	300	3000	0.10	0.06	
Perlita	95-130	6-8	-	-	-	-	-	2000	0.05	0.03	

CCP = Ceniza de combustible pulverizada (ceniza volátil). C:A = Proporción volumen cemento:agregado CS = Contracción por secado  
 BEHRAN = Barro expandido en horno rotatorio con arena natural DSC = Densidad seca del concreto K = Conductividad térmica  
 DMA = Densidad de masa de agregado fc' = Resistencia a compresión

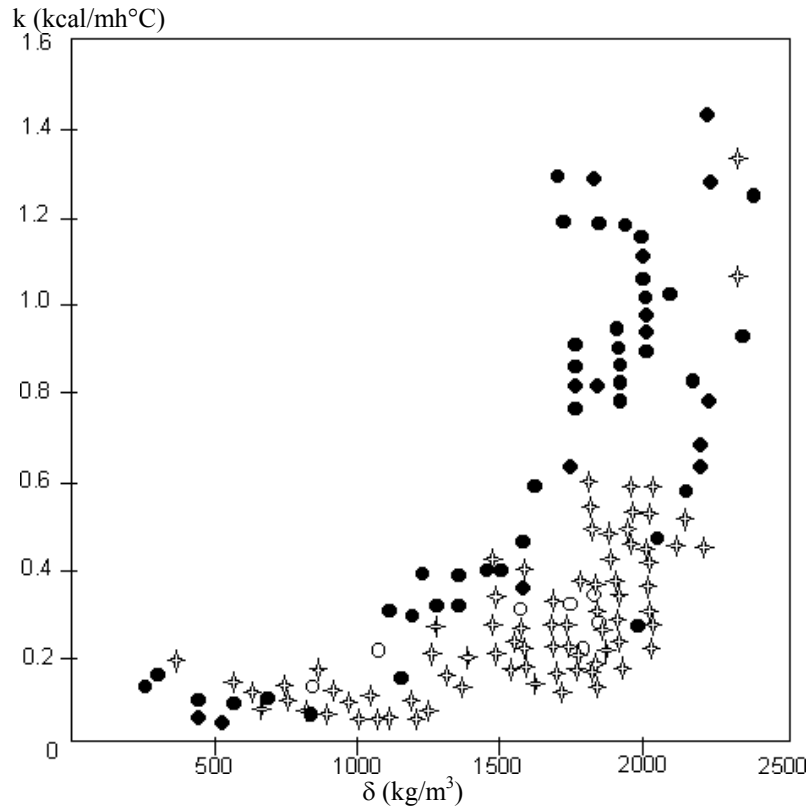


Figura 6.1. Conductividad térmica (k) de concretos hechos con agregados de baja densidad (δ).

Tabla 6.2. Requerimientos de graduación para agregados gruesos de peso ligero, de acuerdo con la norma BS3797: Parte 2

Tamaño de la malla mm	Porcentaje por masa que pasa por la malla BS						
	Tamaño nominal del agregado graduado, mm.			Tamaño nominal del agregado simple, mm			
	20 a 5	14 a 5	10 a 2.36	20	14	10	6
37.5	100	-	-	100	-	-	-
20.0	95 - 100	100	-	85-100	100	-	-
14.0	-	95-100	100	-	90-100	100	-
10.0	30-60	50-90	85-100	5.25	20-45	85-100	100
6.3	-	-	-	-	-	-	70-100
5.0	0-10	0-15	15-50	0-5	0-10	15-35	0-35
2.36	-	-	0-15	-	-	0-5	0-10

Tabla 6.3. Requerimientos de graduación para agregados finos de peso ligero, de acuerdo con la norma BS3797: Parte 2

Tamaño de la Malla	Porcentaje por masa que pasa por la malla BS	
	Zona de graduación L1	Zona de graduación L2
10.00 mm	100	100
5.00 mm	90-100	90-100
2.36 mm	55-95	60-100
1.18 mm	35-70	40-80
600 um	20-50	30-60
300 um	10-30	25-40
150 um	5-19	20-35

NOTA: Se permite ciertas salidas desde una zona, excepto para el porcentaje máximo que pasa por la malla 150, en el caso de la zona de graduación L1, y el mínimo en el caso de la zona de graduación L2.

Tabla 6.4. Requerimientos de graduación para agregados ligeros para concretos estructurales dados por ASTM C330-82a

Malla ASTM	Porcentaje por peso que pasa por las mallas ASTM						
	Tamaño nominal del agregado grueso graduado (mm)				Agregado Fino (mm)	Tamaño nominal del agregado combinado fino y grueso (mm)	
	25 a 4.75	19 a 4.75	12.5 a 4.75	9.5 a 2.36		12.5	9.5
1 in (25.0mm)	95-100	100	-	-	-	-	-
3/4 in (19.0mm)	-	90-100	100	-	-	100	-
1/2 in (12.5mm)	25-60	-	90-100	100	-	95-100	100
4 (4.75mm)	0-10	0-15	0-20	May-40	85-100	50-80	65-90
8 (2.36mm)	-	-	0-10	0-20	-	-	35-65
16 (1.18mm)	-	-	-	0-10	40-80	-	-
50 (300um)	-	-	-	-	10-35	5-20	10-25
100 (150um)	-	-	-	-	5-25	2-15	5-15

Otras propiedades que se consideran son la manejabilidad, la absorción, la contracción por secado y el movimiento de la humedad. Para una manejabilidad igual (fácil compactación), el concreto de agregado ligero registra menor revenimiento y un factor de compactación más bajo que el concreto de peso normal por la acción de la gravedad es menor en el caso de material ligero. Un riesgo consecuente es que si se usa una manejabilidad mayor, hay mayor tendencia a la segregación.

La naturaleza porosa de los agregados ligeros significa que tienen una absorción de agua más alta y rápida, así como cuando el agregado esta seco en el momento de mezclar, absorbe agua rápidamente y la manejabilidad disminuye de inmediato. Una solución consiste en mezclar el agregado con al menos la mitad del agua de la mezcla antes de agregar el cemento, sabiendo que puede calcularse la absorción de agua y la relación agua/cemento efectiva. Sin embargo, tal procedimiento causará que se eleve la densidad del concreto y que falle al aislamiento térmico. Para subsanar estas desventajas se puede hacer el agregado resistente al agua mediante un recubrimiento de betumen, usando un proceso especial, aunque esto raras veces se hace.

Las mezclas de agregado ligero son propensas a la porosidad, pero esta se puede reducir con arrastre de aire; el requerimiento de agua se reduce así como la tendencia a la segregación y al drenado. Por lo común, los contenidos totales de aire por volumen son: de 4 a 8 % por 20 mm (3/4 in), tamaño máximo del agregado, y 5 a 9% x 10 mm (3/8 in) tamaño máximo del agregado. Los contenidos de aire en exceso de estos valores reducen la resistencia compresiva alrededor de 10 kg/cm<sup>2</sup> por cada punto de porcentaje adicional de aire.

El uso de agregados finos de peso ligero, así como el agregado grueso de peso ligero, agrava el problema de manejabilidad baja. Por tanto, es preferible emplear agregados finos de peso normal con agregado grueso de peso ligero. A tal concreto se le llama concreto de peso semiligero (o concreto de arena de peso ligero) y, por supuesto, su densidad y conductividad térmica son más altas cuando se usa agregado completamente de peso ligero. Generalmente, para una misma manejabilidad en concreto de peso semiligero requiere de 12 a 14% menos de agua de mezcla que el concreto de agregado de peso ligero. El módulo de elasticidad del concreto de peso semiligero es más alto y su contracción por fraguado más baja que cuando se usa agregado de peso completamente ligero.

Debemos notar que la situación parcial del agregado fino por agregados finos de peso normal también es posible; en cualquier caso la sustitución debe hacerse en volúmenes iguales.

Cuando se usa agregado ligero en concreto reforzado, se debe tener especial cuidado en proteger el refuerzo de la colusión por la profundidad de carbonatación, es decir, la profundidad dentro de la cual puede ocurrir la colusión en condiciones adecuadas, puede ser hasta dos veces más que con el agregado normal. El comportamiento de agregados diferentes varían pero generalmente, con agregado ligero, es deseable un recubrimiento adicional de 10 mm al refuerzo.

Alternativamente el uso de una capa de aplanado para el refuerzo con mortero rico es útil; en el caso del agregado escoria vítrea hay un peligro adicional debido a la presencia de azufre en el agregado, por lo que es necesaria la protección del acero; aunque el uso de este agregado no es común.

Todos los concretos hechos con agregados ligeros exhiben un movimiento de humedad más alto en el caso del concreto de peso normal.

## 6.2 OTRAS PROPIEDADES

Algunas otras propiedades de los concretos de agregado ligero al ser comparados con concreto de peso normal pueden resultar interesantes:

- a) Para la misma resistencia, el módulo de elasticidad es más bajo de 24 a 50% por tanto, las deflexiones son mayores.
- b) La resistencia al congelamiento y al deshielo es mayor debido a la mayor porosidad del agregado ligero, siempre que el agregado no este saturado antes de mezclar.
- c) La resistencia al fuego es mayor, ya que los agregados ligeros son menos propensos a astillarse ; el concreto también pierde menor resistencia con una elevación en la temperatura.
- d) El concreto ligero es más fácil de cortar o de tener adminículos agregados.
- e) Para la misma resistencia compresiva, la resistencia al corte disminuye de 15 a 25%, y la resistencia a la adherencia es menor de 20 a 50%. Estas diferencias deben tenerse en cuenta en el diseño de vigas de concreto reforzado.
- f) La capacidad de deformación a la tensión es de aproximadamente 50% que en el concreto de peso normal así, la capacidad de resistir al movimiento, por ejemplo: el debido a gradientes de temperatura interna, es mayor para el concreto ligero.
- g) Para la misma resistencia, el flujo plástico del concreto de agregado ligero es casi el mismo que el de concreto de peso normal.

A continuación, se comentan con mayor detalle propiedades adicionales e inherentes en el concreto de agregado ligero.

6.2.1 Densidad

La densidad, naturalmente, es una propiedad muy importante en el contexto del concreto ligero. Es, sin embargo, un parámetro ambiguo, porque el valor que se obtiene es afectado profundamente por el régimen de curado y de fabricación para cualquier concreto en particular. Dos valores extremos cubren el intervalo normal para el concreto colocado en la estructura: el peso volumétrico del concreto húmedo recién compactado y el peso volumétrico del secado en horno. Por lo general, el concreto cambia progresivamente de la primera condición hacia un valor estable (o casi estable), que es significativamente mayor que aquél del concreto secado en horno y el cual es llamado peso volumétrico secado al aire o simplemente seco; la magnitud del cambio de valores depende, naturalmente, de la interacción concreto/ambiente. Es más recomendable, por lo tanto, usar como dato primordial la condición más realista, fácilmente definible y sin ambigüedades, que es el peso volumétrico húmedo del concreto recién compactado, y determinar el valor aproximado del secado al aire de acuerdo con el grado de secado probable. La Tabla 6.5 presenta algunos datos típicos de pesos volumétricos.

Tabla 6.5. Datos de pesos volumétricos característicos (húmedos y nominalmente secos al aire) para una gama de concretos de agregado ligero

Agregado	Peso volumétrico del concreto húmedo (kg/m <sup>3</sup> )		Peso volumétrico nominal seco al aire (kg/m <sup>3</sup> )	
	finos ligeros	finos naturales	finos ligeros	finos naturales
Aglite	1630-1790	1800-1950	1450-1650	1700-1860
Escoria espumosa	1820-2100	1880-2150	1660-1920	1780-2050
Leca	1230-1470	1500-1760	1100-1360	1400-1660
Lyttag	1700-1840	1880-2020	1500-1700	1760-1920
Solite	1650-1800	1820-1960	1480-1650	1730-1680
Agregado natural		2250-2500		2200-2400

Si se usará el agregado saturado (esto es, el agregado sumergido en agua por varias semanas), los datos del peso volumétrico húmedo de todos los concretos de agregados ligeros se aumentarían; por ejemplo, para el Lytag, el incremento sería de alrededor de 60 a 80 kg/m<sup>3</sup>.

El valor del peso volumétrico que se utilice en un determinado proyecto dependerá obviamente de las circunstancias: para estimar las cargas que serían soportadas por las cimbras, sería relevante usar el peso volumétrico del concreto fresco; para estimar los pesos de elementos de concreto precolado, sería relevante emplear un cierto valor del peso volumétrico secado al aire.

No siempre se toma en cuenta el hecho elemental de que el proporcionamiento por peso puede ser engañoso para cualquier persona que no esté acostumbrada a trabajar con el material, a causa de los pesos volumétricos bajos. Una mezcla de agregado ligero proporcionada, tal como 1:3:3 (cemento : finos : agregado grueso) por volumen, puede equivaler, dependiendo de los pesos volumétricos, a 1:2.3:1.7 por peso, es decir, a una razón agregado/cemento de 6:1 por volumen (lo que significa cerca de 300 kg de cemento por m<sup>3</sup> de concreto), o de 1:4 por peso (el cual, con agregados normales, significaría un contenido de cemento de alrededor de 450 kg/m<sup>3</sup>). Una guía mejor es usar el contenido de cemento en lugar de la razón agregado/cemento. La Tabla 6.6 muestra algunos valores típicos basados en datos previamente publicados.

Tabla 6.6. Valores característicos del contenido de cemento (kg/m<sup>3</sup>) para diferentes relaciones agregado/cemento por volumen

Tipo de agregado	Contenido de cemento (kg/m <sup>3</sup> ) para varias relaciones agregado/cemento por volumen		
	7:1	6:1	5:1
Aglite	270	360	540
Escoria espumosa	340	460	680
Leca	270	360	540
Lyttag	260	350	510
Solite	290	370	540

### 6.2.2 Resistencia

A causa del reducido peso volumétrico, sería de esperarse que la resistencia del concreto ligero siempre se comparara desfavorablemente con la del concreto normal. Sin embargo, en general esto no sucede así, en parte porque existe una mayor compatibilidad de dureza entre el agregado ligero y el mortero, y también porque usualmente se utilizan contenidos de cemento moderadamente altos. El resultado depende del agregado empleado. El más ligero y menos resistente de los aquí considerados es el Leca, el cual tiene el efecto más débil en el concreto. Al contrario de las propiedades del concreto normal, en donde, para una resistencia dada de la pasta de cemento, se observa un aumento en la resistencia del concreto si la concentración de volumen de agregado aumenta (siempre y cuando se obtenga la completa compactación), el aumento en la concentración de volumen del Leca ocasiona una disminución en la resistencia del concreto. Por otro lado, se ha encontrado evidencia experimental de que la resistencia de los concretos con Lytag y Solite parece ser independiente de la cantidad de agregados que contienen, por lo menos hasta resistencias de 500 kg/cm<sup>2</sup>.

Con frecuencia las resistencias muy altas no son demasiado importantes, excepto cuando los materiales en sí mismos manifiestan valores ligeramente bajos o cuando se usan cargas de diseño mayores de las usuales. El concreto con Leca es un ejemplo de los primeros, con una resistencia máxima de alrededor de 300 a 350 kg/cm<sup>2</sup>, obtenida con mezclas muy ricas y con arena natural. Las resistencias superiores de los concretos con Lytag y con Solite parecen ser de aproximadamente 600 a 650 kg/cm<sup>2</sup>, usando también mezclas ricas y arena natural.

A causa de las características de absorción de agua de los concretos, podría suponerse que, como sucede con algunos agregados naturales, la resistencia del concreto podría verse afectada por el estado que tienen los agregados al ser mezclados. Hace algunos años, varios investigadores concluyeron que lo anterior sí sucede; sin embargo, una investigación sistemática llevó a varias conclusiones, incluyendo las siguientes:

- 1) Si la relación agua/cemento total se usa como parámetro, entonces, para una determinada relación agua/cemento, la resistencia dependerá de la relación agregado/cemento y de la condición de humedad inicial del agregado.
- 2) Si se usa la relación agua/cemento neta estimada, entonces ni la relación agregado/cemento ni la condición de humedad del agregado afectarán la resistencia (para un material como el Lytag).
- 3) Una aproximación más realista fue la de comparar las resistencias (utilizando agregados húmedos y secos) de concretos con similar contenido de cemento y similar manejabilidad, encontrándose que la condición de humedad del agregado no tiene influencia alguna sobre las resistencias.

De este modo, importa poco si se emplean inicialmente agregados húmedos o secos; si son estos últimos, entonces se requiere un poco de práctica para juzgar la manejabilidad del concreto, la cual tiende a cambiar más rápidamente de lo normal en los primeros quince o veinte minutos. Los materiales húmedos pueden ser más susceptibles a la congelación, como se hizo notar previamente; esto plantea la cuestión del aire incluido, ya que efectivamente la mayor parte de los concretos de agregados ligeros se benefician con la inclusión de aire, no sólo por la resistencia al congelamiento, sino también porque de este modo resulta más fácil producir concreto fresco de una manera satisfactoria; es decir, se obtiene una mejor consistencia con un reducido contenido de agua. En lo relativo a especificaciones, es difícil determinar adecuadamente el contenido de aire en estos concretos; para el control de calidad no es tan difícil. La mejor solución para medirlo puede ser la de usar el método de presión y hacer la corrección de acuerdo con el contenido de aire en el agregado.

La Tabla 6.7 presenta algunos datos típicos de las resistencias a 28 días. Estos datos son aplicables a concretos con agregados ligeros finos y gruesos. La sustitución parcial o total de los finos por arena natural permite una pronunciada reducción del contenido de agua, especialmente con los materiales más ásperos, como la escoria espumosa y el Solite; de esta manera puede lograrse una notable mejoría en la resistencia, con cierto aumento en el peso volumétrico. La resistencia a tensión se relaciona con la resistencia a compresión de igual modo que en el concreto normal, aunque la prueba de tensión indirecta en cilindros ha demostrado fallas en algunos concretos ligeros. Esto, sin embargo, pareció restringirse a los concretos más débiles en condiciones limitadas y existe evidencia de haber encontrado un comportamiento como el esperado en los concretos más resistentes.

Tabla 6.7. Datos característicos de resistencias a 28 días y contenidos de cemento de diversos concretos de agregado ligero de mediana trabajabilidad

	Contenido de cemento (kg/m <sup>3</sup> )			
	300	400	500	600
AGREGADO		Resistencia a 28 días en cubos (kg/cm <sup>2</sup> )		
Aglite	200	330	470	550
Escoria espumosa	--	150	250	420
Leca	150	230	300	
Lyttag	280	400	500	600
Solite	200	320	430	520

### 6.2.3 Módulo de elasticidad y deformación

Existen diversos modelos de comportamiento disponibles, los cuales predicen un módulo de elasticidad más bajo para el concreto de agregado ligero; esto se confirma en la práctica. Para una determinada resistencia a compresión, el valor del módulo E para el concreto de agregado ligero es de entre la mitad y los dos tercios del correspondiente al concreto normal. Una de las mejores estimaciones ha sido dada por Short y Lewis, quienes aplicaron la aproximación de Pauw con resultados bastante favorables. Su fórmula, tomada de Short y Kinniburgh (1967), y convertida a unidades del Sistema Internacional es:

$$E = \frac{\gamma^2 \cdot \sqrt{f'_c}}{10,000} \tag{6.1}$$

Donde, para especímenes almacenados al aire, E es el módulo de elasticidad (MPa),  $\gamma$  es la densidad (kg/m<sup>3</sup>) y  $f'_c$  es la resistencia en especímenes cúbicos (MPa).

Esta relación también parece ser bastante útil para especímenes almacenados en agua; sin embargo, donde se requieren valores precisos de E, deben hacerse pruebas con muestras de los materiales requeridos, bajo condiciones razonablemente realistas.

Los valores más bajos de E pueden tener varias implicaciones, por ejemplo, deflexiones más altas a corto plazo por flexión (aunque el número depende, también, del grado de agrietamiento, la cantidad y disposición del refuerzo y el peso propio del elemento), pérdidas incrementadas de presfuerzo, reducción de la capacidad de carga de columnas largas de concreto reforzado cargadas axial y excéntricamente, pero también deberían reducir los esfuerzos (calculados) que se derivan de una deformación impuesta.

El fenómeno de la deformación a largo plazo es más problemático que el de a corto plazo y, para cualquier concreto, representa un asunto complejo. El contenido de humedad más elevado del concreto de agregado ligero probablemente agrava la situación, al retrasar el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio higrométrico entre la pasta y los agregados. De este modo, el desempeño a edad temprana puede ser engañoso, ya que puede ocurrir una mayor pérdida de humedad en comparación con el concreto normal antes de que la contracción por secado sea aparente. De cualquier modo, a causa de la baja rigidez del agregado, hay menos restricción interna y cualquier esfuerzo impuesto deberá resultar en una mayor deformación. Las mediciones de laboratorio confirman lo anterior, dependiendo del tipo de agregado y de los contenidos de cemento y agua. Dichas mediciones muestran, por lo general, valores comprendidos aproximadamente entre el equivalente y el doble de los correspondientes a un concreto de arena y grava. Tales datos, usados frecuentemente con propósitos comparativos, necesitan interpretarse con cuidado cuando se trata de evaluar los efectos prácticos en estructuras a escala natural.

La contracción por secado rara vez aparenta ser un problema en la práctica, debido al valor más bajo de E del concreto, al uso de secciones más o menos amplias (comparadas con los especímenes de laboratorio), que son expuestas frecuentemente a humedades relativas altas o fluctuantes, así como a la presencia del acero de refuerzo.

La deformación total del concreto es lo que realmente tiene importancia, pero el flujo plástico, que es uno de sus principales componentes, normalmente se trata en forma separada por conveniencia, aunque esto no significa hacer un modelo del comportamiento a escala natural. Aun cuando la evidencia es conflictiva, generalmente se acepta que el flujo plástico es mayor para el concreto ligero y que la deformación total en

flexión de vigas almacenadas a temperatura y humedad relativa constantes, después de cuatro o cinco años presenta valores de entre 1.1 y 1.4 veces los correspondientes al concreto de grava y arenas.

Se ha encontrado también que las deflexiones de vigas de concreto de agregado ligero son mucho más sensibles a las condiciones del ambiente que las de concretos que contienen agregados naturales de baja absorción, de manera que puede haber una considerable recuperación en la deformación durante los períodos de humedad elevada.

Algunas veces se cita evidencia para demostrar que la deformación del concreto de agregado ligero es menor que la del concreto de agregado natural como, por ejemplo, en algunos trabajos americanos; sin embargo, debe recordarse que las técnicas de prueba y los materiales específicos afectan fundamentalmente el trabajo experimental y que esto no quiere decir que los resultados en otros sitios deban mostrar un comportamiento similar. Para obtener un diseño realista, se obtiene mejor experiencia con estructuras a escala natural; algunas de estas experiencias indican que, para el concreto ligero de mayor resistencia, que contiene arena (con resistencia a 28 días mayor de 500 kg/cm<sup>2</sup>, aproximadamente), los valores apropiados de flujo plástico y de contracción para diseño son de alrededor de 87E-5 y de 600E-5 por kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente.

6.2.4 Aislamiento térmico

En años recientes ha tenido lugar un resurgimiento del interés hacia todo lo relacionado con el aislamiento térmico. Lo anterior ha sido impulsado por diversos factores, incluyendo la necesidad de conservar la energía, el conocimiento más amplio del problema de la contaminación del aire, el aumento en el uso de calefacción central doméstica y la creciente demanda por mejores normas de aislamiento. El concreto ligero no es primordialmente un aislante térmico, pero su bajo peso volumétrico sugiere estudiar brevemente esa propiedad tan útil. La conductividad térmica, k, está considerada normalmente como una medida de comparación entre diferentes materiales, ya que es una propiedad del material determinada bajo condiciones estándar, aunque los resultados se prestan a ciertas ambigüedades y discrepancias. En este respecto resulta importante conceder una cierta tolerancia, debido a la presencia de humedad en el material; se ha establecido una justa y útil correlación entre la conductividad térmica y el peso volumétrico para una serie de materiales de mampostería, corrigiendo su contenido de humedad a 1% en volumen. A partir de estos valores de k, se consideraría alrededor de 0.25 a 0.60 kcal/mh°C para el concreto de agregado ligero estructural, con 1% de humedad en volumen, pero el material con mayor resistencia estaría en el límite superior de esta escala. Lo anterior es comparable con alrededor de 0.5 a 0.8 kcal/mh°C para ladrillos y aproximadamente 1.2 para concreto de grava. Por ejemplo, la capacidad térmica en muros exteriores hechos a base de ese tipo de concreto es mayor y constituye una propiedad muy útil para el amortiguamiento de fluctuaciones de temperatura y para retrasar su valor máximo, especialmente en lo referente a problemas de sobrecalentamiento debido a la absorción de calor solar. Este principio ha sido utilizado para reducir los costos de instalación y de funcionamiento de los servicios de medio ambiente en el diseño de una construcción bastante grande.

En la Tabla 6.8 se muestra que el coeficiente de expansión térmica del concreto con agregado ligero es por lo general más bajo que el de concreto de peso normal. Esto puede crear algunos problemas cuando los concretos de agregado ligero y los concretos ordinarios se usan uno a lado de otro pero, por otra parte, los miembros del concreto de agregado ligero tienen una tendencia más baja a alabearse o a combarse debido a gradientes diferenciales de temperatura.

Tabla 6.8. Coeficiente de expansión térmica del concreto con agregado ligero

Coeficiente lineal de expansión térmica [Determinado sobre un rango de - 22°C a 52°C (- 7 °F a 125 °F)]		
Tipo de agregado usad	1E-6 °C	1E-6 °F
Pómez	9.4 a 10.8	5.2 a 6.0
Perlita	7.6 a 11.0	4.2 a 6.1
Vermiculita	8.3 a 14.2	4.6 a 7.9
Cenizas	cerca de 3.8	cerca de 2.1
Pizarra expandida	6.5 a 8.1	3.6 a 4.5
Escoria Expandida	7.0 a 11.2	3.9 a 6.2

### 6.2.5 *Acabado superficial*

Las superficies de concreto ligero sin tratar, esto es, obtenidas directamente de la cimbra, o las superficies que no necesitan un tratamiento regular previo a la decoración han hecho del concreto ligero un material más competitivo en la construcción tradicional, en donde el suministro de acabados así como sus efectos sobre los procesos globales de construcción resultan tan costosos. Realmente, con el elevado costo actual del trabajo con tabique, las circunstancias favorecen al concreto de agregado ligero y es presumible que la situación continúe siendo así en forma creciente.

### 6.2.6 *Resistencia al fuego*

A causa del mejor aislamiento térmico del concreto y de la mayor estabilidad térmica de los agregados ligeros (exceptuando, tal vez, a la caliza), es de esperarse que este material demuestre un comportamiento más favorable al retrasar la elevación de temperatura del acero de refuerzo y mantener la integridad estructural en períodos más largos de exposición al calor. Sin embargo, debe tomarse en cuenta el mayor contenido de humedad de este concreto; por lo tanto, no debe ser sometido a pruebas de resistencia al fuego antes de que haya secado razonablemente. De otra manera, la posibilidad de una falla explosiva no puede ser excluida.

Existen algunas reservas acerca del medio correcto para ensayar la resistencia al fuego de elementos estructurales, no obstante, existe evidencia de que el uso del concreto ligero proporciona ventajas considerables para lograr una mejor resistencia al fuego.

### 6.2.7 *Adherencia entre concreto y acero*

No parece existir una razón fundamental para que la adherencia del concreto de agregado ligero deba ser muy diferente a la del concreto normal, pero ciertamente existe evidencia contradictoria con respecto a esta importante propiedad. De nuevo, las técnicas de prueba afectan los resultados profundamente, de manera que los datos deben ser interpretados con precaución; pero el fenómeno de falta de compacidad en algunos concretos realmente podría ocasionar una reducción en la adherencia. Ya sea éste un asunto de diseño de mezclas y/o de técnicas de colocación o de compactación, tiene que ser resuelto todavía, aunque alguna recomendación en la práctica consiste en castigar la resistencia de adherencia.

### 6.2.8 *Resistencia al cortante*

Generalmente se reconoce que todavía existe la necesidad de un examen crítico de toda la cuestión relativa a la resistencia al cortante y, nuevamente, no resulta demasiado sorprendente que entre países existan diferentes requisitos de diseño. De cualquier modo, parece que se ha creado un amplio interés para llevar a cabo ciertas reducciones necesarias en los factores de reducción de resistencia por tensión diagonal del concreto de agregado ligero, comparado con el concreto normal de resistencia equivalente. Lo anterior se debe a la diferencia en el mecanismo de falla, que casi siempre se manifiesta en el primero, en el cual hay una muy alta proporción de rotura en el agregado en lugar de fallas de adherencia agregado/pasta, y, en consecuencia, existe poca o ninguna trabazón. Un trabajo experimental en vigas de concreto reforzado ha mostrado que las cargas para rotura diagonal de las vigas hechas de concreto de agregado ligero variaron aproximadamente entre 80 y 90% de los valores promedio determinados para vigas de concreto de gravas; parece haber una buena razón para adoptar una aproximación crítica a este parámetro.

### 6.2.9 *Durabilidad*

La durabilidad es una función tanto del medio ambiente como del material; consecuentemente, en la práctica se procura asegurar un adecuado contenido de cemento y una cantidad suficiente de recubrimiento de concreto para el refuerzo, que sea compatible con el medio ambiente al que probablemente será expuesto el concreto.

### 6.2.10 *Economía*

Generalmente se supone, en forma casi automática, que el concreto estructural de agregado ligero es mucho más caro que el concreto normal, simplemente porque los agregados por lo general son más caros y porque el contenido de cemento probablemente es más alto. Normalmente los agregados cuestan más en los puntos de entrega pero, con el aumento de costo de los agregados naturales y del transporte así como con el crecimiento

de la producción de los agregados manufacturados, las diferencias deberían disminuir, especialmente por el hecho de que el costo de transporte por m<sup>3</sup> del último es considerablemente menor que el del primero.

También es cierto que el concreto premezclado de agregado ligero a veces se cotiza a tarifas aparentemente excesivas, pero esto probablemente se deriva de los volúmenes relativamente pequeños que se utilizan; por lo tanto, existen grandes posibilidades de que, si la demanda fuera suficientemente grande, serviría para cotizar precios más favorables. De cualquier modo, lo anterior representa únicamente una parte del panorama, porque el costo final del concreto ligero en la estructura terminada está, por supuesto, solo parcialmente gobernado por los costos de los materiales. Debido a esto y a la escasez de información sobre los costos verdaderos, se constituyó un grupo de trabajo de la "Concrete Society" para examinar la situación y su reporte resultó de mucha utilidad para aclarar la posición. En resumen, se concluyó que, en lo que respecta a losas de entrepiso de concreto (a las cuales el grupo de trabajo limitó su examen), el concreto ligero es un medio que compite con formas alternativas de construcción; que, conforme los costos de mano de obra aumentan, los costos relativos del concreto ligero disminuyen y que, cuando se toman en cuenta otros efectos mayores como, por ejemplo, la reducción de costos en la cimentación, son evidentes otras reducciones adicionales en los costos.

No se tomaron en consideración otros factores, tales como los rendimientos más elevados, los volúmenes transportables más grandes, las propiedades de manejo más favorables, la mayor facilidad de corte y barrenación del concreto endurecido, el mejor aislamiento térmico, etc., los cuales representan las grandes ventajas del concreto ligero, pero cuyos beneficios sobre los costos no son posibles de cuantificar. Parece ser entonces que, contrariamente a la opinión ampliamente mantenida, el concreto ligero puede al menos competir con el concreto estructural normal equivalente y, si continúan las tendencias actuales, puede resultar significativamente más barato para utilizarse en losas de entrepiso.

Por otro lado, cuando la estructura de conjunto se diseña con el concreto ligero en mente, las derivaciones bien pueden conducir a una disminución significativa en los costos totales de construcción.

#### 6.2.11 Aplicaciones

Si alguna propiedad es fundamental para el uso del concreto ligero, ésta es, por supuesto, el peso volumétrico. Existen muchos casos en los cuales se escogió un concreto estructural de agregado ligero de buena calidad, debido a su peso volumétrico reducido en comparación con el del concreto normal, ya sea por la capacidad de las grúas disponibles en el sitio o en el tránsito o por la reducción en el peso de la superestructura, lo que contribuye a una cierta solución en el diseño de la cimentación. Sin embargo, este tipo de concreto también se ha usado para la construcción de conjuntos habitacionales de muchos niveles a causa de su mejor aislamiento térmico y de la alta calidad del acabado obtenido con el concreto ligero, el cual elimina la necesidad de aplanado y, por lo tanto, reduce el período de construcción. Otro ejemplo es aquél de una gran viga de cajón de 190 m de largo para un hangar, en donde el peso volumétrico reducido y la mejor resistencia al fuego, fueron los principales motivos para la selección del concreto a ligero.

Los puentes constituyen la clase de estructuras en donde las cargas muertas adquieren mayor importancia debido a los grandes claros. Existen muchas aplicaciones en puentes de los Estados Unidos, en Europa Occidental, y algunas en México. Cuando el aislamiento térmico es un factor primordial como, por ejemplo, en tableros de revestimiento, parecen existir pocos motivos para seleccionar un concreto estructural de una gran resistencia y resulta adecuado uno que pertenezca a la clase de resistencia y peso volumétrico más bajos, especialmente si puede hacerse algún uso de la resistencia que éste proporcione con el fin de soportar cargas. Pueden utilizarse entonces tableros bastante grandes que son izados con grúas de modesta capacidad y que poseen resistencia mecánica suficiente para soportar esfuerzos de manejo y transporte, y que aún así, proporcionan un aislamiento térmico razonable.

#### 6.2.12 Incremento de su uso

Una causa adicional para el evidente incremento del uso de agregado artificial para trabajo estructural, ha sido el gran aumento en la construcción en general, particularmente en el campo del concreto reforzado. Por otra parte, resulta natural que la industria en general, y en particular las industrias de la construcción, además de la ingeniería civil, deban forzosamente considerar las posibilidades de una utilización económica de las vastas e inadvertidas acumulaciones ociosas de material de desperdicio, relegadas por la actividad industrial.

En la misma forma, también el uso acrecentado de los agregados de peso ligero para concreto reforzado se ha debido al hecho de que ingenieros, arquitectos y propietarios de edificios, han notado que en construcciones de varios pisos una reducción apreciable del peso de los materiales usados puede tener ventajas considerables. Hay 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 a un ahorro en el diseño de la cimentación y de la estructura de soporte; también se realiza la libertad de planeación del arquitecto y del ingeniero debido al mayor espaciamiento entre columnas y mayores claros. Hay otros beneficios que por el momento no se cuantifican fácilmente; por ejemplo, a la reducción en peso sigue un ahorro en el transporte y se facilitan las operaciones en el sitio de la construcción; hay menor fatiga humana y al mismo tiempo un incentivo mayor hacia la mecanización de los procesos de trabajo. Conjuntamente, estos factores conducen a una erección 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.

Por otro lado, las ventajas del concreto ligero reforzado deben ser comparadas con las desventajas, al hacer frente a una posible selección de agregados para una empresa particular. La mayoría de los agregados de peso ligero son más ásperos en textura que la grava y la arena, y tienden a dar concretos más ásperos, a menos de que se utilicen aditivos para mejorar la trabajabilidad; las mezclas de concreto hechas con ellos, por lo tanto, son menos trabajables que el concreto común. Por la misma razón, si no hay otra, necesitan más cemento para obtener la resistencia requerida. Algunos de los agregados sinterizados desarrollados más recientemente son, sin embargo, más redondos y menos ásperos y los fabricantes aseguran que los requisitos necesarios para obtener la misma resistencia en el concreto, no son mayores que en el caso del concreto común. Se asegura, también, que en el caso de los agregados de cenizas sinterizadas de combustible en polvo que debido a las propiedades cementantes de los agregados finos en sí, la resistencia del concreto aumenta con el tiempo, a un grado mayor que con el concreto de agregado común. Esto puede conducir a un consumo menor de concreto.

Los agregados de peso ligero son usualmente más caros que el agregado de grava; esta diferencia puede ser compensada en algunos casos por menores costos en el transporte. Más aún, el costo en sí del agregado es relativamente una pequeña proporción del costo total de una estructura de varios pisos. Finalmente, hasta que se haya obtenido más experiencia en la práctica, se necesitará mayor cuidado en el diseño y una supervisión más exigente en comparación con las construcciones de concreto reforzado más convencionales.

Al encontrar considerables dificultades iniciales, se originaron estudios que produjeron avances significativos y en muchos países, particularmente en Estados Unidos, Alemania, Rusia e Inglaterra, donde se adquirió mucha experiencia práctica en el uso del concreto ligero para construcciones importantes de concreto reforzado. Antes de discutir estos desarrollos en detalle, sería útil considerar, otra vez, brevemente la naturaleza y propiedades de los agregados que son adecuados para usarse en la construcción de concreto reforzado.

### 6.2.13 *Perspectivas a futuro*

Diversas innovaciones técnicas ya ofrecen posibilidades para incrementar el uso de este material, por ejemplo: los cementos expansivos, los cuales son admirablemente adecuados para los agregados ligeros; el uso del refuerzo con fibras para reducir las deflexiones por flexión y el ancho de las grietas; el uso de concretos de agregado ligero polímeros para mejorar considerablemente las relaciones resistencia / peso volumétrico y así sucesivamente. Sin embargo, cualquiera que sea el papel de estas innovaciones, aún tiene que ser demostrado. No obstante, no existe duda alguna sobre el interés por el uso y abastecimiento de agregados para la industria de la construcción; esto aunado a la preocupación por el uso ineficiente y el daño causado al medio ambiente por los materiales de desperdicio, son motivos para un uso mayor de los agregados manufacturados básicamente similares a aquellos que están disponibles hoy en día. Todo lo expuesto anteriormente parece indicar que el concreto ligero, como material de construcción, será visto con mucha mayor frecuencia en diversas estructuras en el futuro cercano, no obstante, tendrá que competir y convencer con otros nuevos y novedosos materiales que empiezan a usarse en la industria de la construcción.

## 6.3 *AGREGADOS LIGEROS*

La experiencia norteamericana data de 1918 aproximadamente, cuando se utilizó concreto de agregado ligero reforzado para la construcción de barcos empleando Haydite, un material similar al Aglite; desde entonces tuvo lugar un aumento enorme en la utilización de este tipo de concreto (Short y Kinniburgh, 1967). La Leca

se produjo en Dinamarca desde 1939, con una densidad similar a la que se manufacturaba en el Reino Unido, pero teniendo disponible una clase más pesada y más resistente (Short y Kinniburgh, 1967). La pizarra expansiva se ha usado por décadas en los Estados Unidos y en algunos de los países de la Ex-Unión Soviética se ha producido por muchos años numerosos agregados. Todo esto ha debido producir un cierto grado de confianza en el material y el desarrollo reciente de materiales similares en algunos países europeos es señal de ello. En términos generales, resulta interesante notar el número de conocimientos sobre el comportamiento y las propiedades del material que ha surgido de las observaciones y datos colectados. De cualquier modo, debe entenderse claramente que las diferencias entre materiales, técnicas de fabricación, régimen de curado y procedimientos de ensayo pueden afectar profundamente el desempeño individual del concreto, ocasionando un comportamiento bastante distinto del general. Cada agregado produce un concreto estrictamente único, aunque pueda parecerse a otro de una manera general; consecuentemente, para establecer datos cuantitativos verdaderos, deben efectuarse pruebas en cada tipo diferente de concreto. Es conveniente, aunque bastante inexacto, agrupar a todos los concretos de agregados ligeros en una clase aparentemente racional.

Sin embargo, no todos los agregados disponibles son adecuados para usarse en concreto ligero. Algunos tales como la perlita expansiva, la piedra pómez y la vermiculita exfoliada se encuentran entre los más ligeros y son excelentes para el aislamiento térmico; el poliestireno expansivo es otro agregado comercialmente disponible; el clinker ha dado un extenso servicio, pero su suministro está disminuyendo.

Otros agregados ligeros que resultan sobresalientes (Figura 6.2), son:

- Escoria: escoria espumosa fundida de alto horno, tratada con una cantidad de agua controlada
- Aglite: pizarra expansiva, producida en un cordón sinterizado
- Leca: arcilla expansiva, producida en un horno rotatorio
- Lytag: ceniza de combustible pulverizada y sinterizada
- Solite: esquistos expansivos, producido en un horno rotatorio.

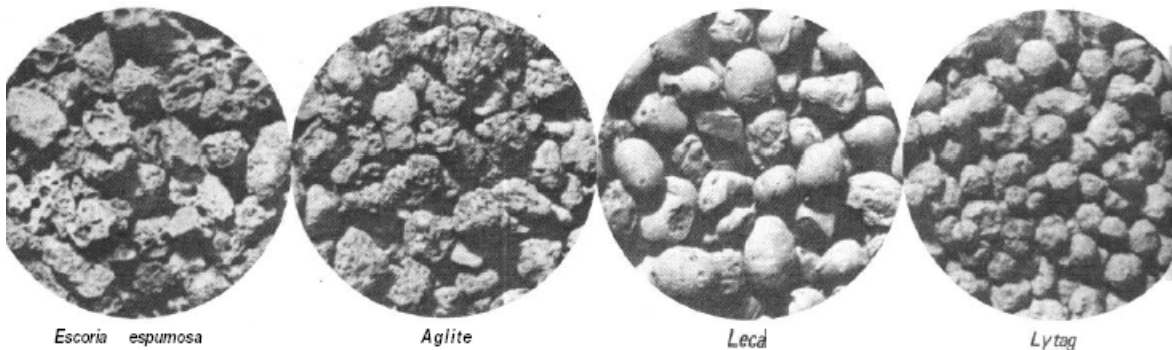


Figura 6.2. Ilustración esquemática de algunos agregados ligeros.

Excepto por la escoria espumosa, la producción de todos estos materiales ha aumentado en los años recientes; otros, en esencia similares, probablemente se manufacturen en diferentes localidades en un futuro inmediato o próximo. Cada uno es adecuado para el concreto estructural, pero no para todos los niveles de resistencia; existe mucha experiencia en su utilización, siendo la más amplia la de la escoria espumosa y la más reducida la del Solite, el cual ha estado disponible comercialmente desde los años 50's, no obstante que su tecnología fue demostrada desde 1936 (Short y Kinniburgh, 1967).

### 6.3.1 Tipos de agregados ligeros

La primera distinción puede establecerse entre agregados naturales y manufacturados. Los principales agregados naturales son: diatomita, piedra pómez, excoria, cenizas volcánicas y toba; excepto la diatomita, todos ellos son de origen volcánico.

La piedra pómez es la más empleada, pero debido a que se encuentra sólo en algunos lugares, el uso de los agregados ligeros naturales no se ha generalizado. La piedra pómez, es un vidrio volcánico de color claro parecido a la espuma con una densidad de volumen de 500 a 900 kg/m<sup>3</sup>. Estas variedades en la piedra pómez que no son demasiado débiles estructuralmente, proporcionan un concreto satisfactorio con una densidad de 700 a 1400 kg/m<sup>3</sup> y con buenas características aislantes, pero gran absorción y contracción la escoria, que es

una roca vidriosa vesicular, parecida a las cenizas industriales, forma un concreto de propiedades similares (Neville, 1999).

Los agregados artificiales se conocen con una variedad de nombres de marca, pero se clasifica mejor sobre la base del material crudo usado y el método de manufactura.

En el primer tipo se incluyen los agregados producidos por la aplicación de calor a fin de extender la arcilla, la pizarra, el esquisto, la piedra diatomácea, la perlita, la obsidiana y la vermiculita.

El segundo tipo se obtiene por procesos de enfriamiento especiales, los cuales proporcionan una expansión de la escoria de alto horno. Las cenizas industriales forman el tercero y último tipo.

La arcilla, la pizarra y el esquisto expansivo, se obtienen al calentar materiales crudos adecuados en un horno giratorio a fusión incipiente (temperatura de 1000 a 1200°C), cuando se produce la expansión del material debido a la generación de gases que quedan atrapados en una masa pirolástica viscosa. Esta estructura porosa, se retiene con el enfriamiento, de modo que la gravedad específica aparente del material expansivo es más baja que antes de calentar. Con frecuencia, el material crudo se reduce al tamaño deseado antes de calentar, pero también puede triturarse después de la expansión. La expansión también se logra mediante el uso de un cable aglutinado. En este caso, el material humedecido se lleva por una criba viajera bajo quemadores, de modo que el calor penetre gradualmente la profundidad completa de la cama del material. Su viscosidad es tal, que tal gases expansivos quedan atrapados. Como sucede con el horno giratorio, la masa enfriada se comprime o se usa material peletizado inicialmente.

El empleo de material peletizado produce partículas con una concha suave o capa (50 a 100 micras) en el interior celular. Estas partículas, casi esféricas y con una capa vidriosa semi-impermeable, tienen una absorción de agua más baja que las partículas descubiertas, cuyo rango de absorción es de 12 a 30%. Las partículas cubiertas son más fáciles de manejar y de mezclar, y producen concreto de alta manejabilidad, pero resultan más costosas que el agregado descubierto (Neville, 1999).

Los agregados de pizarra y arcilla expansivos hechos por el proceso de cable aglutinado, tienen una densidad de 650 a 900 kg/m<sup>3</sup> y 300 a 650 kg/m<sup>3</sup> cuando se hacen en el horno giratorio, y producen concreto con una densidad dentro del rango de 1400 a 1800 kg/m<sup>3</sup>, aunque se han obtenido valores y tan bajos como 800 kg/m<sup>3</sup>. El concreto hecho con agregados expansivos de arcilla y pizarra, por lo general, tiene una resistencia más alta que cuando se usa cualquier otro agregado ligero (Neville, 1999).

La perlita es una roca volcánica vidriosa que se encuentra en América, Irlanda, Italia y otros lugares. Cuando se calienta rápidamente al punto de fusión incipiente (900 a 1100°C), se expande debido a la evolución del vapor y forma un material celular con una densidad de la masa tan baja como de 30 a 240 kg/m<sup>3</sup>. El concreto hecho con perlita tiene una resistencia muy baja, un secado rápido, una contracción muy alta debido al bajo módulo de elasticidad, y se usa principalmente para propósitos de aislamiento.

La vermiculita es un material con una estructura enchapada similar a la de la mica, y se encuentra en América y África. Cuando se calienta a una temperatura de 650 a 1000 °C, la vermiculita se expande varias veces, o incluso hasta 30 veces a su volumen original por la exfoliación de sus láminas delgadas. Como resultado, la densidad bruta de la vermiculita exfoliada es de sólo 60 a 130 kg/m<sup>3</sup>; el concreto hecho con este material, es de muy baja resistencia y muestra alta contracción, pero es un excelente aislante del calor.

La escoria de alto horno expansiva se produce de dos formas. En una de ellas, cierta cantidad limitada de agua en forma de rocío se pone en contacto con la escoria fundida al ser descargada del horno (en la producción de hierro en bruto). Se genera vapor y éste hincha la escoria todavía plástica, por lo que la escoria se endurece en forma porosa, muy parecida a la piedra pómez. Este es el proceso de surtidor de agua. En el proceso de maquina, la escoria fundida se agita rápidamente con una cantidad controlada de agua. El vapor queda atrapado y también hay formación de gases debido a las reacciones químicas de algunos de los constituyentes de escoria con vapor de agua.

Expansiva o esponjosa, la escoria se ha utilizado durante muchos años y se produce con una densidad de masa que varía de 300 a 1100 kg/m<sup>3</sup>, dependiendo de los detalles del proceso de enfriamiento, y en buena medida, del tamaño de la partícula y la graduación. El concreto hecho con escoria expansiva tiene una densidad de 950 a 1750 kg/m<sup>3</sup> (Neville, 1999).

También se encuentra disponible la escoria con pelotas. Ésta se hace expandiendo la escoria derretida bajo agua y rompiéndola en partículas que se impulsan al aire para formar pelotas suaves.

El agregado de escoria de hierro vítreo, conocido como ceniza, se obtiene de residuos bien quemados de hornos industriales de alta temperatura, funcionados o aglutinados en grumos. Es importante que la escoria esté libre de variedades dañinas de carbón sin quemar, que pueden sufrir expansión en el concreto, lo que ocasiona falta de solidez. No se recomienda el uso de agregado de escoria vítrea en concreto reforzado o en concreto que requiera una durabilidad especialmente alta.

El hierro o las piritas en la escoria pueden dar por resultado el manchado de superficies y, por tanto, deben retirarse. La falta de solidez debida a la cal muy quemada puede evitarse al dejar a la escoria que permanezca mojada por varias semanas; la cal se apagará y no se expandirá en el concreto.

Carbonilla es el nombre dado a un material similar a la escoria vítrea pero aglutinado más ligeramente y menos quemada. No hay una clara demarcación entre la carbonilla y la escoria vítrea.

Cuando las cenizas se usan como agregado fino y grueso, se obtiene concreto con una densidad de cerca de 1100 a 1400 kg/m<sup>3</sup>, pero con frecuencia se usa arena natural para mejorar la manejabilidad de la mezcla del concreto resultante es entonces de 1750 a 1850 kg/m<sup>3</sup> (Neville, 1999).

Se debe notar que, en contraste con el agregado de peso normal, las partículas más finas del agregado ligero por lo regular tienen una gravedad específica aparente más alta que en los más gruesos. Esto se debe al procedimiento de trituración: la fractura ocurre a través de los poros más grandes, y mientras más pequeñas sean las partículas más pequeños serán los poros.

Una característica general de los agregados artificiales, es que las partículas son hechas en fabricas en condiciones muy controladas, y en consecuencia, resultan tener menos variaciones que muchos agregados naturales.

A continuación, se da una descripción de las propiedades y sistemas de fabricación de los agregados de peso ligero, adecuados para hacer concretos ligeros capaces de resistir cargas. Se proporcionan valores típicos de las propiedades del concreto con agregados de peso ligero.

#### 6.3.1.1 Escoria de hulla de los hornos

La norma Británica, "Agregados de escorias de hulla para concretos comunes y precolados", define la escoria de hulla como residuos bien quemados de hornos que han sido fundidos o sinterizados para formar gravillas. Esto tiene por objeto expreso excluir a las cenizas de carbón mineral provenientes de instalaciones domésticas en vista de que estas no han sido calentadas a temperaturas suficientemente altas, y son, por lo tanto, demasiado finas y demasiado suaves, para ser utilizadas como agregado. Esto, en efecto, está limitando el material circunscribiéndolo solamente a aquel producido por calderas de altas temperaturas como son las empleadas en las plantas termoeléctricas, aunque también en ocasiones pueden usarse las cenizas de las calderas de algunas locomotoras. El término "cisco" se usa frecuentemente cuando se habla de "escoria de hulla de los hornos"; este término se aplica con más propiedad a las fracciones finas del coque, y utilizarlo indistintamente lleva a confusiones, principalmente en vista de que hace algunos años el cisco de coque era muy usado en la fabricación de bloques de concreto ligero.

La escoria de hulla se forma de materias minerales, principalmente de calcita, caolinita y piritas, que invariablemente se encuentran presentes en la hulla, la cual después de quemada tiene una composición química que es aproximadamente como sigue:

	Porcentaje
Dióxido de silicio, SiO <sub>2</sub>	25-50
Trióxido de aluminio, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20-40
Trióxido férrico, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-30
Óxido de calcio, CaO	1-10
Óxido de magnesio, MgO	0.5-5
Bióxido de titanio, TiO <sub>2</sub>	0-3
Alcali, NaK <sub>2</sub> O	1-6
Trióxido de azufre, SO <sub>3</sub>	1-12

La lista anterior indica los elementos presentes y las proporciones en que éstos se encuentran. Es sólo una forma convencional de expresarlos, más no pretende implicar que dichos minerales se encuentran principalmente en forma de óxidos; sin duda ellos se presentan en gran parte como silicatos de aluminio, aun cuando los óxidos de calcio y hierro normalmente también están presentes.

La mayoría de la escoria de hulla utilizada como agregado se deriva de los cargadores de parrillas articuladas. En este tipo de planta, el combustible se enciende sobre la superficie del hogar, y si la temperatura es lo suficientemente alta como para fundir las cenizas, éstas se escurrirá a través del hogar, solidificándose en forma de glóbulos vitrificados en una zona más fría, en la parte inferior del hogar, sin embargo, si las cenizas suavizadas permanecen plásticas por largo tiempo, pueden conglutinarse en escorias grandes de hulla. El comportamiento de la ceniza se complica por el hecho de que la ceniza de hulla no es homogénea, sino que está formada de dos componentes, una porción muy refractaria, derivada de la caolinita y materiales similares, y otra, formada por piritas más fácilmente fusibles, junto con calcita, como agente fundente. Consecuentemente, la escoria de hulla consiste en pequeñas masas vitrificadas con inclusiones de fragmentos de material refractario junto con pequeños núcleos de combustibles sin quemar, los cuales quedan en esta forma protegidos contra la combustión.

El significado de esta breve exposición sobre la composición química de la escoria de hulla y su proceso de formación, se podrá apreciar más al referimos más adelante a los defectos de la escoria de hulla como agregado, y las precauciones necesarias que deben tenerse para utilizarlo en el concreto.

La escoria de hulla ha sido usada como agregado en el concreto por lo menos durante 60 años, y en Inglaterra sigue siendo aún el agregado de peso ligero más importante, en cuanto a cantidad se refiere. La popularidad de la escoria de hulla como agregado se ha debido a su muy bajo precio y a las cantidades tan grandes de las que se ha dispuesto hasta la fecha. Su disponibilidad, sin embargo, se ha visto afectada notablemente por el creciente uso del combustible pulverizado, al grado de que en muchas partes ya ha dejado de ser barato. Más aun, su uso tan extenso se ve amenazado ahora por la producción de las cenizas de combustibles en polvo como agregados sinterizados.

La escoria de hulla de primera calidad hace un agregado muy bueno, aunque un tanto alto en la escala de densidades, pero varía grandemente en calidad, y las calidades más malas pueden conducir fácilmente a fallas en las construcciones; consecuentemente, este material ha ganado una mala reputación a pesar de la cual se ha seguido usando ampliamente por los motivos antes mencionados. La escoria de hulla que contiene alta proporción de materia combustible, es de mala calidad y produce concretos de baja resistencia y altas contracciones por secado. Por ejemplo, Lea demostró que, en general, la calidad del concreto de escoria de hulla disminuía al aumentar el contenido de materia combustible en el agregado; treinta años más tarde, la Building Research Station hizo un estudio de la escoria de hulla que se produce y obtuvo resultados muy similares a los anteriores (Short y Kinniburgh, 1967). Estos resultados están condensados en la Tabla 6.9.

La materia combustible en una escoria de hulla bien fundida puede encontrarse en porcentajes tan bajos como el 1 ó el 2%, sin embargo, contenidos de esta materia del orden de 15 a 25% son comunes; en algunos casos se han encontrado hasta del orden de 60%. Una estimación del contenido de materia combustible en la escoria de hulla puede hacerse con suficiente aproximación mediante la prueba de "pérdida por ignición", descrita en la norma Británica, la cual estipula que al hacerse la prueba por este método, la pérdida de ignición no debe exceder los valores dados en la Tabla 6.10.

Tabla 6.9. Efecto del contenido de combustibles en las propiedades del concreto con escoria de hulla

%CC	c/agr	$f_c'$	%C	%E
5.4	1:6	75.6	0.045	0.039
	1:10	32.4	0.036	0.034
18.4	1:6	55.5	0.066	0.060
	1:10	19.0	0.052	0.053
31.4	1:6	45.7	0.082	0.076
	1:10	12.3	0.065	0.071

%CC: Contenido de combustible en el agregado (%); c/agr: Propiedades de la mezcla cemento:agregado en volumen;  $f_c'$ : Resistencia a la compresión a los 28 días en kg/cm<sup>2</sup>; %C: Contracción por secado, en porcentaje; %E: Expansión por humedecimiento en porcentaje.

Tabla 6.10. Límites permisibles para la pérdida por ignición en la escoria de hulla (clinker)

Clase	Uso	Pérdida por ignición (%)
A1	Agregado para uso en concreto simple, para propósitos generales	No mayor de 10
A2	Agregado para uso en colados interiores sin estar expuestos a condiciones húmedas	No mayor de 20
B	Agregado para bloques precolados de concreto	No mayor de 25

Cuando se utiliza un concreto con altas contracciones potenciales por secado, en forma de bloques para muros, los movimientos considerables que ocurren al continuar el secado del muro después de haberlos aplanado, originan a menudo el agrietamiento de los aplanados. Otro problema más serio que en ocasiones acompaña el uso del concreto de la escoria de hulla, es una expansión progresiva del concreto endurecido. Esto puede originar agrietamientos tan severos en el concreto colado in situ que los muros se vuelven fisurados y a menudo bastante inseguros. Dilataciones semejantes en plantillas de pisos y azoteas han causado desplazamientos en paredes y pretilas a tal grado que han hecho necesaria su reconstrucción. Todas las escorias de hulla que originan tales dilataciones son llamadas “impuras”.

Lea ha demostrado que la “insanidad” se debe a la presencia de ciertos tipos de carbón que han quedado sin quemar, o que han sido quemados muy ligeramente (Short y Kinniburgh, 1967). No todos los tipos de carbón se comportan de esta manera, inclusive los tipos de carbones que él mismo clasifica como “peligrosos” pueden no causar expansiones si han sido bien carbonizados. La cantidad total de materia combustible en una escoria de hulla no es, por lo tanto, una indicación de la posibilidad de insanidad de la misma, puesto que tal materia combustible puede variar desde un carbón sin quemar hasta un material completamente carbonizado, y en cualquiera de los casos el carbón mismo puede pertenecer a la clase peligrosa o no peligrosa. La norma Británica, menciona un método para llevar a cabo las pruebas de sanidad, que consiste esencialmente en observar la estabilidad de una pequeña probeta endurecida hecha de mortero con cemento Pórtland, yeso de París y polvo de escoria de hulla, colado sobre un platito de vidrio. Las grietas radiales y el levantamiento de las orillas son muestras inequívocas de la insanidad del agregado.

El descostramiento del concreto de escoria de hulla es originado por el hinchamiento que acompaña la hidratación de la cal quemada y dura, magnesio o sulfato de calcio, que pueden presentarse como partículas en la escoria de hulla. A pesar de que este tipo de defecto no conduce a ningún riesgo estructural, se presenta a menudo después de que las paredes hechas de concreto de escoria de hulla han sido enyesadas y decoradas, y de aquí las inconveniencias y gastos en que se incurre al hacerse descostramientos de yeso y pintura. También las oxidaciones de los compuestos de hierro tales como piritas pueden causar manchas en el concreto de escoria de hulla. Para evitar estos problemas, se recomienda que la escoria de hulla sea expuesta a la intemperie por algunos meses. Esto ayuda a hidratar la cal, magnesio, y anhídridos, y a oxidar los compuestos de hierro, para que antes de que sean incorporados a la mezcla de concreto, hayan alcanzado un nivel estable.

Siempre y cuando el contenido de azufre no exceda de aproximadamente 1%, expresado como trióxido de azufre, se pueden esperar muy pocos problemas de este elemento, y las Normas Británicas para la escoria de hulla limitan el contenido ácido de azufre soluble a esta cantidad. Sin embargo, en combinación con otros factores, los compuestos de azufre aceleran la corrosión del refuerzo de acero, y en la Gran Bretaña, por este motivo no se permite la escoria de hulla para el concreto reforzado; tampoco se permite su uso en ninguna parte donde quede en contacto con partes de acero.

Ya se ha afirmado que una escoria de hulla de la mejor calidad es un agregado ampliamente satisfactorio, pero que gran cantidad de este agregado que se ofrece a la industria del concreto, dista mucho de ser satisfactorio, particularmente a causa de la gran proporción de combustible que contiene. Como el abastecimiento de la escoria de hulla está disminuyendo, muchos usuarios se ven forzados a ser menos discriminativos, y la escoria de hulla que antes hubiera sido descartada ahora está siendo usada, de manera que la calidad general del material está tendiendo a empeorar. De acuerdo con la Building Research Station la mayor parte del contenido de combustible está presente en los finos del material, y se ha demostrado que el contenido de combustible de la escoria de hulla puede ser reducido a menudo de 30% a 5%, cribando o descartando los finos. Alternativamente, se pueden separar los finos por medio de mesas de flotación, neumáticas o de concentración. Se ha explorado también la posibilidad de remover el combustible excedente por un requemado. El trabajo experimental donde el contenido de combustible fue reducido de esta manera, de 57% a 39%, dio un mejoramiento en la calidad de la escoria de hulla, tal como se muestra en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11. Efecto de la escoria de la hulla quemada

Agregado	Proporción <sup>(1)</sup>	f <sub>c</sub> '	%C	%E	δ
Escoria de hulla cruda (57% de combustible)	1:6	53.6	0.061	0.056	1040
Escoria de hulla quemada (3% de combustible)	1:6	71.0	0.026	0.021	1350

<sup>(1)</sup> Proporción de la mezcla cemento : agregado en volumen; f<sub>c</sub>': Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm<sup>2</sup>); %C: Contracción por secado en porcentaje; %E: Expansión por humedecimiento en porcentaje; δ: Densidad de concreto seco (kg/m<sup>3</sup>).

Se ha discutido en ocasiones que la limpieza de la escoria de hulla sería antieconómica, a causa de que un artículo de tan bajo precio no podría sostener ese costo; es, sin embargo, este precio inicial de compra tan bajo el que hacía que el precio del proceso fuera tolerable. Aunque la escoria de hulla antes tenía poca competencia entre los otros agregados de peso ligero de mejores cualidades técnicas, esta situación está cambiando rápidamente, y mientras este disponible tarde o temprano tendrá que ser comparada favorablemente en calidad con los nuevos agregados o cesara su uso en el concreto. Es poco probable, que el costo de la limpieza o de los procesos de mejoramiento en la calidad de la escoria de hulla, aumenten su precio más allá de los precios reglamentarios de los otros agregados procesados que poseen las cualidades deseadas. Las propiedades típicas del concreto hecho con escoria de hulla están resumidas en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12. Propiedades del concreto con escoria de hulla

Densidad del concreto superficialmente seco (kg/m <sup>3</sup> ):	1040-1520
Resistencia, a la compresión a los 28 días (kg/cm <sup>2</sup> ):	21.1-70.3
Conductividad térmica (kcal/mh°C):	0.04-0.08
Contracción por. secado (%):	0.30-0.50

### 6.3.1.2 Escoria espumosa de alto horno

En la operación de un alto horno, el mineral de óxido de hierro es reducido a hierro metálico por medio del coque, mientras que los constituyentes de sílice y aluminio se combinan con la cal (incluida en la carga del horno), para formar una escoria derretida que se deposita sobre el hierro fundido. Esta escoria tiene una composición más o menos como sigue:

	Porcentaje
Óxido de calcio, CaO	30-50
Bióxido de silicio, SiO <sub>2</sub>	28-38
Trióxido de aluminio, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8-24
Óxido de magnesio, MgO	1-18
Trióxido férrico, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5-1
Trióxido de azufre, SO <sub>3</sub>	2-8

Las escorias salen del alto horno en forma de corriente derretida a 1400-1600°C. Si esta se deja enfriar lentamente, se solidifica en forma de un material gris y cristalino como piedra, conocido como "escoria enfriada al aire", la cual se usa como piedra para carreteras y como agregado para concretos pesados. El enfriamiento de la escoria con un gran exceso de agua produce una "escoria granulada", que es un material más desmenuzable. El enfriamiento con una cantidad controlada de agua, aplicada de tal manera que origine un entrapamiento del vapor dentro de la masa, origina un producto poroso de un carácter semejante al pómez, llamado "escoria espumosa" o "escoria expansiva", la cual, al enfriarse, se usa como agregado de peso ligero. Este proceso básico con varias modificaciones ha sido usado por muchos años. Los procesos iniciales de fabricación emplearon algunos medios mecánicos simples tales como el de ruedas rotatorias o de cangilones basculantes, pero en la Gran Bretaña, estos han conducido a métodos estáticos; el más usual, una Patente Británica debida al finado M. Gallai Hatchard, emplea un gran estanque o lecho de espumación a los que tiene chiflones de agua al fondo y a los lados, dentro de el se vierte el contenido total de un carro cargador de escoria en una operación. El periodo de espumación es cuestión de unos momentos y la masa de escoria espumosa puede ser removida por una retroexcavadora casi inmediatamente, vaciando así el estanque para la siguiente carga. Una modificación del método del lecho de espumación ha sido desarrollada en Alemania; de acuerdo con ella, el estanque estático es reemplazado por una gran charola de acero provista con rociadoras, la cual descarga su contenido girando sobre un eje tan pronto como la espumación se ha completado; luego, regresa la charola a su lugar para la siguiente operación de espumación. Otro medio estático, el Proceso Kinney-Osborne, emplea una serie de chiflones que dirigen una mezcla de aire comprimido, vapor y rocío de

agua, contra una corriente descendente de escoria derretida. El final de la expansión se efectúa en una banda transportadora. Los “Métodos Mecánicos” que emplean maquinas centrifugas tienen gran aceptación en América, y éstos han sido descritos por Whitaker (1953). Se dice que estos métodos mecánicos dan un mejor control del producto, pero el mantenimiento, así como los gastos iniciales, son mucho más altos que para los métodos estáticos.

Después de cualquiera de los métodos de espumación empleados, el producto se tritura y se criba separándolo en tamaños apropiados para agregados de peso ligero. Los tamaños con las densidades correspondientes a granel, son las siguientes:

Tamaño	Densidad en masa
1.90 cm. a 1.27 cm.	320 a 480 kg/m <sup>3</sup>
1.27 cm. a 0.32 cm.	400 a 560 kg/m <sup>3</sup>
0.32 cm. a polvo	560 a 880 kg/m <sup>3</sup>

El análisis químico de la escoria espumosa difiere muy poco del de la escoria derretida original, excepto en que el contenido de azufre es algo menor y esta reducción se debe a las reacciones de los sulfuros con el agua y a la liberación de los gases de azufre. La composición mineralógica puede, sin embargo, sufrir un cambio considerable durante la transición de líquido a sólido, estando dichos cambios relacionados con las condiciones de enfriamiento: por ejemplo, Parker (Short y Kinniburgh, 1967) demostró que la espumación quita la “insanidad” en casi todas las escorias, y que una escoria que es enfriada por aire puede “caer” o hacerse polvo por la inversión del silicato de dicálcico. La Norma Británica 877, “Escoria espumosa de Alto Horno para agregado del concreto”, limita el contenido de óxido de calcio (CaO) a 50%, y también limita a 0.5% el sulfato disponible para ser extraído, bajo ciertas condiciones que son especificadas.

La única propiedad química significativa de la escoria espumosa cuando se usa como agregado de concreto es su hidraulicidad. No es tan activa como la escoria granulada, pero muchas escorias espumosas exhiben actividad hidráulica, y cuando se mezclan con la cal o con el cemento Pórtland, desarrollan una acción cementante que aumenta la resistencia de los concretos en los que han sido usadas.

El proceso de espumación de la escoria fue empleado por primera vez en 1911 por Carl Schol en Alemania, pero no fue sino hasta 1935 que se introdujo el proceso a Inglaterra (Short y Kinniburgh, 1967). La producción actual es de aproximadamente 382,000 m<sup>3</sup>. por año, lo cual hace que la escoria espumosa en Inglaterra sea superada solamente por la escoria de hulla en términos de producción.

En la Building Research Station y en otros lugares, se han llevado a cabo bastantes investigaciones sobre la escoria espumosa, y esto, junto con los 25 años de experiencia practica que se tienen, han dado al material una reputación de agregado bueno y seguro. La Tabla 6.13 proporciona algunos resultados típicos de las pruebas realizadas sobre escoria espumosa.

Tabla 6.13. Propiedades del concreto con escoria espumosa

Proporción <sup>(1)</sup>	δ (kg/m <sup>3</sup> )	f <sub>c</sub> ' <sup>(2)</sup>	f <sub>c</sub> ' <sup>(3)</sup>	%C	k
1:4	960 - 1760	--	232	0.07	--
1:5	960 - 1760	--	176	0.06	0.37
1:6	960 - 1760	63.2	113	0.05 - 0.055	0.30
1:8	960 - 1760	49.1	78	--	--
1:10	960 - 1760	35.2	--	0.045 - 0.05	0.25
1:12	960 - 1760	21.1	--	0.03 - 0.04	--
1:15	960 - 1760	17.6	--	--	--
1:20	960 - 1760	14.1	--	--	0.21
1:24	960 - 1760	12.7	--	--	--

<sup>(1)</sup> Proporciones en volumen de la mezcla cemento:agregado. δ: Densidad del concreto superficialmente seco (kg/m<sup>3</sup>). Resistencia a compresión a los 28 días (kg/cm<sup>2</sup>) con: <sup>(2)</sup> mezcla semi-seca para la fabricación de bloques; <sup>(3)</sup> mezcla completamente compactada. %C: Contracción por secado (%). k: Conductividad térmica (kcal/mh°C)

En la Gran Bretaña, en los 70's, la escoria espumosa era usada como agregado en bloques de concreto para la construcción y en las plantillas aislantes de las azoteas. Los dos usos tienen más o menos el mismo consumo de este agregado. Sin embargo, una aplicación interesante del concreto de escoria espumosa se hizo en Glasgow en los años 60's, con la producción de grandes unidades reforzadas incluyendo ventanas y aberturas para puertas. Estos eran paneles de un piso de alto, de 3 metros de ancho y 15 cm de espesor. El concreto era fabricado por mezclas continuas, y era alimentado verticalmente dentro de los moldes sin apisonamientos ni vibraciones. Los moldes eran contruidos de laminas perforadas reforzadas por perfiles angulares, y dentro de estos moldes los paneles se curaban a vapor con baja presión. Después de mover los moldes desarmables, las losas ya endurecidas eran transportadas al lugar de la obra.

Como se menciona con anterioridad, aproximadamente la mitad del consumo de la escoria espumosa se tiene en bloques de concreto para la construcción, de los cuales la mayoría son de forma normal conforme a las dimensiones establecidas en la Norma Británica (Short y Kinniburgh, 1967). Una interesante derivación de esto fue empleada anteriormente cerca de Glasgow, en donde las unidades de muros consistían de dos capas de 7.6 cm. de espesor de concreto de escoria espumosa con una cavidad de 5 cm. entre ambas y atirantadas por travesaños galvanizados insertados en el muro durante su fabricación. Las dimensiones básicas del bloque, que producía un muro de 20 cm. de espesor en construcción de cavidad continua, eran de 81.3 cm. de largo y 20 cm. de alto. Las piezas especiales tales como unidades de esquina y de bordes eran naturalmente necesarias. Las unidades se curaban a vapor con baja presión.

El concreto de escoria espumosa también ha sido usado en muros de carga colados in situ para casas de dos pisos. Este concreto no ha sido reforzado en el sentido convencional, aunque una pequeña cantidad de acero ha sido usado en los puntos esencialmente vulnerables. Un gran interés surgió en la Gran Bretaña por el uso de la escoria espumosa para concreto reforzado de tipo estructural; sin embargo, como se tiene una experiencia limitada del uso del concreto de escoria espumosa en esta forma, se están realizando investigaciones sobre los problemas inherentes con los concretos reforzados de agregados de peso ligero.

### 6.3.1.3 Arcilla expansiva y esquistos expansivos

Cuando ciertas arcillas y esquistos son calentados hasta un estado semiplástico, a veces llamado "el punto de vitrificación incipiente", se expanden o "hinchán" hasta siete veces su volumen original, debido a la formación de gases dentro de la masa a la temperatura de fusión. La estructura celular así formada se conserva al enfriarse, y el producto en esas condiciones puede ser usado como un agregado de peso ligero. Para la producción de tal agregado, la arcilla debe ser ablandada a una temperatura que pueda alcanzarse y mantenerse económicamente, y al mismo tiempo debe contener componentes minerales que produzcan gases a esa temperatura. Si tales componentes minerales no se encuentran presentes en forma natural en la arcilla, pueden ser incorporados a ella durante la fabricación.

La relación entre la composición química y la habilidad de hincharse ha sido estudiada por muchos investigadores. Riley (1951) concluyó una investigación muy comprensible, pero para fines prácticos la determinación empírica en las arcillas acerca de su facultad para hincharse es más expedita y por lo común más explícita que los costosos análisis mineralógicos.

La primera indicación de las características de "hinchabilidad" de las arcillas y esquistos puede obtenerse al calentar individualmente granos del material a varias temperaturas superiores a la escala en el cual los cambios pueden ocurrir. Es indispensable que la arcilla se caliente muy rápidamente en la temperatura de operación y es muy conveniente que tal grado de temperatura requerido se pueda lograr en un sólo horno. Un horno de esas características ha sido diseñado y construido en la Building Research Station. Consiste en un túnel de 11.5 cm. de ancho y de 43.2 cm. de largo, calentado por seis barras de "crucillite". Hay 12 zonas de temperatura entre 120 y 1350°C. Una muestra separada para cada zona de temperatura (que consta de dos granos gruesos) se quema durante cinco minutos y después es removida rápidamente del horno. Cuando se enfría, uno de los dos granos del material se pega completamente a una tarjeta impresa y el otro se rompe diametralmente para exponer su interior, y entonces también se pega al espacio apropiado de la tarjeta. De esta forma, se puede determinar la temperatura óptima para 'hinchar un determinado material.

Los esquistos y arcillas expansivas han sido usados en América y en el Continente Europeo durante muchos años. En los Estados Unidos de Norteamérica, las arcillas expansivas se utilizaron como agregados de concreto en la construcción de barcos para la Primera Guerra Mundial. El conocido producto americano "Haydite" fue producido en la década de los veinte, y aún se sigue produciendo utilizando para ello los

esquistos o arcillas trituradas en hornos rotatorios alimentados por combustible pulverizado, petróleo crudo o gas. El agregado es producido alimentando el mineral crudo tal como viene, triturándose después el producto para graduarse según se necesite. Es por consiguiente un agregado angular y fragmentado.

Otro agregado bien conocido, “Rocklite” es producido también de esquistos, pero cada uno de los materiales del mismo tamaño de la fracción se quema por separado en un horno rotatorio, produciendo así partículas más o menos redondas y bien formadas que no requieren trituración. Un agregado similar “Gravelite”, fue hecho especialmente para la cubierta de concreto ligero del Puente de la Bahía de San Francisco-Oakland.

Las arcillas y los esquistos expansivos son también producidos en crisoles sinterizadores, y se han hecho así por muchos años; el primer producto se obtuvo en 1931 bajo el nombre de “Lytag” (no se confunda con el producto actual del mismo nombre hecho en Inglaterra, que es un agregado de cenizas sinterizadas de combustible en polvo). Un agregado más reciente y satisfactorio fabricado en los Estados Unidos de Norteamérica, y hecho de arcilla expansiva en crisoles sinterizadores es el “Aglite”.

Hoy en día se tienen cerca de 50 hornos rotatorios y 20 plantas de sinterización en los EE.UU. En Europa, el producto Danés “Leca” se ha fabricado durante cerca de 20 años. Es un material ligero, redondeado, y de acabado liso producido en un horno rotatorio. El “Keramzit” es un producto semejante hecho en Europa Oriental.

Sin duda, a causa de las grandes provisiones de escoria de hulla de los hornos, y de escoria espumosa, que por largo tiempo han estado disponibles, existía en Inglaterra hasta años recientes, un interés limitado en la arcilla expansiva aunque hubo alguna producción de esta durante la Segunda Guerra Mundial, para la construcción de barcos. Sin embargo, al principio de la década de los cincuentas, comenzó la producción de arcilla expansiva del tipo Danés que, aunque descontinuada por algún tiempo, ha sido nuevamente reiniciada. Durante muchos años el “Aglite” ha sido producido tanto en Inglaterra como en América, por un método de hornos de sinterización continua. En Inglaterra, este agregado se ha producido a base de la arcilla mezclada con coque molido, pero también de los desperdicios de esquistos de las plantas lavadoras de carbón.

Así como con otros agregados de peso ligero, el concreto hecho con arcilla o con esquistos expansivos depende para su resistencia no sólo de la resistencia inherente del agregado, sino también del grado de compactación, que a su vez depende de la forma y graduación del agregado. Se dice a veces que un agregado fragmentado es capaz de dar la mayor resistencia al concreto, pero que un material redondeado da mejor trabajabilidad, lo cual a menudo puede conducir indirectamente un concreto más resistente, sólo si se le permite tener una menor relación de agua/cemento. La experiencia práctica, sin embargo, parece indicar que es la forma de la fracción fina y su graduación las que influyen la trabajabilidad de la mezcla, y los finos que se obtienen de los llamados agregados redondos pueden ser tan ásperos e irregulares como los de un agregado fragmentado. La trabajabilidad de un agregado áspero puede mejorarse generalmente con el use de agentes inclusores de aire en el agua de la mezcla.

Con una graduación cuidadosa y una buena compactación, los tipos más ligeros de agregado de arcilla expansiva pueden producir un concreto de una resistencia notable con una densidad moderada (Tabla 6.14). En efecto, la resistencia que se espera de una mezcla depende en gran parte de la graduación, de la relación agua/cemento y del grado de compactación.

Las mezclas semisecas compactadas parcialmente, apropiadas para hacer bloques, dan resistencias mucho menores. Se dan algunos ejemplos típicos en la Tabla 6.15.

Tabla 6.14 Propiedades probables de concretos con agregados de arcilla expansiva completamente compactados y de diferentes densidades

$\delta$	$f_c'$	%C	k
960	91.4	0.04-0.07	0.19-0.50
1120	112.5	0.04-0.07	0.19-0.50
1280	140.6	0.04-0.07	0.19-0.50
1440	225.0	0.04-0.07	0.19-0.50
1600	497.8	0.04-0.07	0.19-0.50
1760	632.8	0.04-0.07	0.19-0.50

$\delta$ : Densidad del concreto superficialmente seco  $kg/m^3$ .  $f_c'$ : Resistencia a la compresión a los 28 días (las muestras probadas húmedas,  $kg/cm^2$ ). %C: Contracción por secado en porcentaje. k: Conductividad térmica en  $kcal/mh^\circ C$ .

Tabla 6.15 Propiedades de mezclas semisecas de concreto con arcilla expansiva

Tipo de agregado	$\delta$	$f_c'$	%C	k
Agregado ligero de arcilla, mezcla en proporción 1:6	721	24.6	0.045	
Agregado de esquistos expansivos, mezcla en proporción 1:6	1365	137.1	0.050	0.42
Agregado de esquistos expansivos, mezcla en proporción 1:9	1200	65.2	0.050	0.35

$\delta$ : Densidad del concreto superficialmente seco ( $\text{kg/m}^3$ ).  $f_c'$ : Resistencia a compresión a los 28 días ( $\text{kg/cm}^2$ ). %C: Conductividad térmica ( $\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ ). k: Contracción por secado (%).

6.3.1.4 Cenizas sinterizadas de combustible en polvo

Las cenizas de combustible en polvo se pueden describir como el residuo obtenido de la combustión de carbón pulverizado en los hornos modernos, tales como los que se usan actualmente en muchas de nuestras estaciones generadoras de fuerza motriz. Es un polvo gris muy semejante al cemento Pórtland en finura y en apariencia general. Siendo tan fino, la ceniza se adhiere a los gases de combustión y sólo puede ser removida de ellos con precipitadores electrostáticos, con ciclones separadores o con lavado en húmedo, o bien con alguna combinación de éstos; la ceniza consiste principalmente en diminutas partículas esféricas. Con un tratamiento térmico se puede hacer que estas pequeñas partículas se peguen entre sí, formando granos o nódulos porosos de resistencia considerable. El proceso que causa esta cohesión se llama “sinterización”.

La producción de cenizas de combustible en polvo en el Reino Unido es por ahora de más de cuatro millones de toneladas anuales y está aumentando año tras año, en vista de que el carbón pulverizado se hace más y más común como combustible en las calderas. Esto necesariamente ha reducido la producción de las escorias de hulla de los hornos, hasta ahora el principal agregado de peso ligero, que es el producto de quemadores a parrillas anticuadas y quemadores similares, y parece adecuado que una salida principal para la ceniza de combustible en polvo sería la fabricación de un agregado de peso ligero.

La primera descripción de un proceso empleado para hacer un agregado de cenizas pulverizadas de combustible, parece ser que la dio Leftwich. Este proceso, sin embargo, empleaba una mezcla de escoria de hulla, escoria de horno y cenizas de combustible en polvo como materia prima cruda. Unas referencias de los experimentos en América fueron proporcionados por Whitaker (1953), y el Reporte Anual del Building Research Board, mostró que ya se habían hecho investigaciones en el Reino Unido, en el Building Research Station, sobre las sinterizaciones de estas cenizas, trabajo que fue continuado en los años siguientes como se reportó en las subsecuentes publicaciones. Un estudio hecho por Hobbs (1959) muestra, sin embargo, que otros investigadores habían trabajado independientemente sobre esto, y que posteriormente dos compañías empezaron la producción de este agregado, en Inglaterra, bajo los nombres registrados de “Terlite” y “Lytag” respectivamente.

La sinterización de las cenizas de combustible en polvo se puede efectuar de varias maneras. Los métodos que han recibido la mayor atención hasta ahora, son aquellos que emplean la banda de sinterización y el horno de tipo vertical, aunque también se han hecho ciertos trabajos experimentales en hornos rotatorios. La ceniza inevitablemente contiene algún combustible no quemado, y esto puede variar de 2% a 15% o más, en diferentes plantas generadoras de energía. El propósito ha sido siempre efectuar la sinterización (1100 a 1200°C de temperatura) por medio del combustible sin quemar en la ceniza y evitar hasta donde sea posible el uso de combustible adicional. A causa de su buena eficiencia térmica, el horno de flecha vertical puede operar con 45% de combustible, así que usualmente es posible sinterizar en este tipo de planta sin combustible suplementario. El horno de sinterización continua, por otra parte, siendo de hogar abierto con una baja eficiencia térmica, requiere 7-8% de combustible para trabajar provechosamente, así que a menudo requiere combustible adicional en la forma de carbón o coque molido que se agregue a la materia prima. Siendo una parrilla en movimiento, la banda de sinterización necesita una ignición continua de la superficie superior del hogar por medio de gas o petróleo crudo: en el horno vertical, un recipiente interior mantiene una gran cantidad de calor sensible, el cual origina la auto ignición de la materia prima que va llegando, evitando así la necesidad de combustible adicional para la ignición. En lo que respecta a la economía del combustible, por lo tanto, el horno vertical muestra mayor eficiencia térmica. En contra de esto, el horno de sinterización continua puede tolerar una amplia variación en el contenido de combustible, mientras que el horno vertical opera sólo dentro de un límite de aproximadamente 2% de combustible; un límite menor del contenido de combustible conduce a una falla en la ignición, y un límite mayor, a escoriaciones. Esto es de gran importancia, a causa de que en todas las plantas generadoras excepto las más nuevas, es considerable la variación en la calidad de la

ceniza, particularmente con respecto al contenido residual de combustible. Así es que el horno de sinterización continua, es mucho más fácil de operar, y la ventaja económica de la producción interrumpida tiene que argumentarse contra el gasto extra de combustible. que requiere.

Antes de que la ceniza pueda ser sinterizada, cualquiera que sea el método que se emplee, las cenizas deben formarse primero en granos o nódulos, para dar un lecho encendido permeable. Esto puede lograrse simplemente alimentando la ceniza a una artesa basculante sometida a un rocío fino de agua. El movimiento rotatorio del recipiente, hace que el material caiga en forma de cascada, y con esto se forman los granos, siendo estos lo suficientemente fuertes como para soportar el manejo subsecuente.

Aunque la ceniza sinterizada de combustible en polvo es un residuo de carbón y tiene la misma composición mineral básica que la escoria del horno, difiere de esta última en aspectos importantes:

- a) El contenido de combustible de la ceniza sinterizada de combustible en polvo no vale la pena tomarla en cuenta (con cualquiera que hubiera sido el contenido en el material crudo), mientras que el residuo de combustible que queda en la escoria de hulla puede ser muy alto, y en ocasiones de un carácter químico inestable.
- b) A causa de la finura de la ceniza; de combustible en polvo los minerales tales como las piritas y la cal, que son sustancias potencialmente dañinas, no pueden estar presentes en altas concentraciones locales como sucede con la escoria de hulla, sino que están distribuidas uniformemente y son por lo tanto inofensivas. Más aún, a causa de esta misma finura, cualquier mineral inestable, si estuviera presente, sería sumamente reactivo, y llegaría rápidamente a su estado último con lo que se evitarían problemas como “brincoteos de la cal”, y manchas de óxido que en otra forma surgirían de una reacción tardía.

El concreto hecho de cenizas sinterizadas de combustible en polvo tiene una relación resistencia/densidad notablemente alta y un encogimiento al secarse relativamente bajo. La Tabla 6.16 muestra los resultados reportados por la Building Research Station.

Tabla 6.16. Propiedades del concreto hecho con agregado de cenizas sinterizadas de combustible en polvo, en la “building research station”.

Tipo de concreto	Proporción <sup>(1)</sup>	$\delta$	$f_c'$	%C
Mezcla semiseca para bloques hechos a máquina	1:8	1220	70.3	0.045
	1:9	1140	45.7	0.035
Concreto completamente compactado	1:6	1480	105.5	-----
	1:5	1510	130.1	-----
	1:4	1560	193.3	-----

<sup>(1)</sup> Proporciones de la mezcla en volumen.  $\delta$ : Densidad del concreto superficialmente seco ( $\text{kg/m}^3$ ).  $f_c'$ : Resistencia a la compresión ( $\text{kg/cm}^2$ ). %C: Contracción por secado en porcentaje.

Hobbs (1959) hizo un informe reciente sobre las propiedades del concreto hecho con cenizas sinterizadas de combustible en polvo. Estos resultados aparecen en la Tabla 6.17.

Las propiedades del concreto completamente compactado hecho con agregado de cenizas de combustibles en polvo producido comercialmente, han sido publicadas por Lytag Ltd. Se muestran estas en la Tabla 6.18.

De estas tablas se deduce claramente que el concreto hecho con cenizas de combustible en polvo, es muy apropiado para hacer bloques de concreto ligero, y que cuando está completamente compactado, su resistencia es mayor que la adecuada para concreto reforzado de tipo estructural y aun para concreto presforzado.

Al ser fabricada en la forma de granos esféricos, la ceniza sinterizada de combustible en polvo es especialmente apropiada para hacer concreto sin finos, puesto que con gran facilidad se puede verter en las cimbras, y es igualmente apropiado para la construcción de muros colados in situ y para plantillas de piso y de azotea.

Tabla 6.17. Relación densidad/resistencia, para varias mezclas de concreto con cenizas sinterizadas de combustible en polvo.

Clasif. <sup>(1)</sup>	Proporción <sup>(2)</sup>	$\delta$	$f_c'$	%C	%E
No. 1	1:14	945	32.0	0.05	0.04
No. 2	1:14	945	31.6	0.06	0.04
No. 3	1:14	960	31.3	0.06	0.05
No. 2	1:10	1010	46.7	0.05	0.05
No. 1	1:10	1020	46.9	0.04	0.04
No. 4	1:14	1060	39.6	0.06	0.05
No. 5	1:14	1060	51.4	0.06	0.04
No. 3	1:10	1060	57.3	0.06	0.06
No. 3	1:14	1140	50.5	0.06	0.05
No. 4	1:10	1140	73.1	0.05	0.04
No. 3	1:10	1140	67.7	0.06	0.06
No. 1	1:6	1156	61.9	0.05	0.05
No. 2	1:6	1156	85.4	0.05	0.05
No. 3	1:6	1174	88.7	0.06	0.06
No. 5	1:10	1182	70.4	0.05	0.04
No. 4	1:6	1182	117.6	0.06	0.06
No. 3	1:6	1263	104.2	0.06	0.06
No. 5	1:6	1395	135.2	0.06	0.06
No. 6	1:14	1460	166.8	-----	-----
No. 6	1:10	1510	193.6	-----	-----
No. 6	1:6	1554	295.5	-----	-----

Notas: <sup>(1)</sup> Clasificación del agregado. <sup>(2)</sup> Proporciones en volumen de la mezcla cemento:agregado.  $\delta$ : Densidad del concreto superficialmente seco ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).  $f_c'$ : Resistencia a la compresión a los 28 días ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ). %C: Contracción por secado en porcentaje. %E: Expansión por humedecimiento en porcentaje.

Mezcla No. 1. Concreto sin finos; agregado de 1.9 a 1.0 cm.

Mezcla No. 2. Concreto sin finos; agregado de 1.0 a 0.5 cm.

Mezcla No. 3. Concreto con agregados en la siguiente proporción: 80% de 1.0 a 0.5 cm. y 20% de 0.5 cm. y menores.

Mezcla No. 4. Concreto con agregados igual que la mezcla No. 3, pero con un agente humedecedor.

Mezcla No. 5. Concreto con agregados en la siguiente proporción: 80% de 1.0 a 0.5 cm. y 20% de arena natural.

Mezcla No. 6. Concreto con agregados en la siguiente proporción: 47% de 1.9 a 1 cm, 20% de 1 a 0.5 cm y 33% de 0.5 cm y menores.

Tabla 6.18. Propiedades del concreto con agregados de cenizas de combustibles pulverizados

Proporciones de la mezcla en volumen cemento:agregado grueso	Densidad del concreto superficialmente seco ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Resistencia a la compresión a los 28 días ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
1:1.4:3.3	1480	302.3
1:1.7:3.3	1720	337.5
1:1.2:2.4	1730	421.9

La conductividad térmica (k) de los bloques de peso ligero hechos con agregado de cenizas pulverizadas de combustible en polvo muestra, como otros materiales, una relación aproximada con la densidad. Las pruebas han mostrado que bloques de  $1170 \text{ kg}/\text{m}^3$  de densidad tienen un valor de conductividad térmica (k) de aproximadamente  $0.279 \text{ kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}$ .

Las cenizas de combustibles en polvo tienen una ventaja sobre otros tipos de agregados de peso ligero, y es que se producen generalmente cerca de los lugares populosos donde se requieren como agregado. Por ejemplo, las grandes poblaciones de Merseyside y Lancashire, las zonas industriales de Midlands, el Gran Londres y la ribera del Támesis, tienen cada una aproximadamente 16 estaciones generadoras de energía. La ceniza de combustible pulverizada evita así el gran costo del acarreo en que se incurre con agregados que dependen de industrias regionalizadas o de depósitos naturales distantes.

#### 6.3.1.5 Cenizas de combustible en polvo

El origen y la naturaleza de la ceniza de combustible en polvo y su uso como material crudo para un agregado sinterizado de peso ligero ya ha sido discutido. Pero en Inglaterra la ceniza cruda en sí, ha sido usada en una cantidad limitada como agregado, y puesto que ella es capaz de producir un bloque de concreto con densidad menor de  $1600 \text{ kg/m}^3$  cuando se usa sola, puede ser considerada también como un agregado de peso ligero. Cuando se usa como un sustituto parcial de agregados más convencionales, por ejemplo, en lugar de la porción fina de la graduación (del tamaño de la arena), mejora la trabajabilidad de la mezcla y a causa de su posible actividad puzolánica puede aumentar la resistencia del producto. Sin embargo, el uso de la ceniza de combustible en polvo crudo como agregado completo conduce a ciertas dificultades. Por ejemplo, en las Islas Británicas, la ceniza de combustible en polvo tiene un porcentaje nacional de 1,570 de trióxido de azufre y puede en ocasiones ser tan alta como el 2.5% en promedio para una planta.

A causa de la reacción entre el sulfato y el cemento Pórtland, la Norma Británica para agregados no permite que el contenido de trióxido de azufre exceda al 1%. Sin embargo, donde se usa la ceniza de combustible en polvo como agregado completo, o como relleno en el concreto aireado, el contenido de azufre no es tan importante, puesto que el peso del agregado es normalmente pequeño en relación al contenido de cemento y al volumen del concreto producido. Más aun, en el concreto aireado, a causa de su método de fabricación, el efecto del azufre en el cemento no es de interés tan importante para el usuario y en todo caso sólo importaría al fabricante.

#### 6.3.1.6 Pizarra expansiva

En la misma forma que el tratamiento de calor de ciertas arcillas y esquistos causa su expansión con la cual dan un producto apropiado como agregado para el concreto ligero, se ha encontrado que algunas pizarras se portan de la misma manera. Cuando se calientan rápidamente a una temperatura suficientemente alta, estas pizarras pierden sus características de estructuras laminares cerradas (lajillas) y se expanden a varias veces su grosor original, resultando así un producto que contiene una gran cantidad de cavidades diminutas, lo suficientemente ligero como para flotar en el agua. La expansión se debe a la generación de gases producidos de la descomposición de ciertos constituyentes de la pizarra, la evolución de estos gases se presenta cuando la pizarra calentada está en un estado plástico.

Sólo una pequeña parte de la pizarra producida en las canteras se convierte en lajillas para techados y otros productos comerciales; el resto es dejado en tiraderos escondidos. El uso provechoso de este desperdicio de pizarras puede cambiar substancialmente la situación económica de la industria de la laja. Esto se ha venido observando desde hace muchos años, y desde 1932 se han llevado a cabo investigaciones sobre la fabricación de la pizarra expansiva como agregado, en la Building Research Station. Coleman en 1935 (Short y Kinniburgh, 1967) hizo un informe sobre el empleo de las arcillas expansivas como agregado de peso ligero.

Para una expansión satisfactoria, la pizarra debe ser de una composición tal que se comience a fundir precisamente antes de la evolución del gas. La rapidez de calentamiento debe ser grande, pues de otro modo los gases se generarán tan lentamente, que se disiparán sin expandir la lajilla. Un examen de las pizarras Galesas mostró que aquéllas que pertenecen a las formaciones Ordovicianas y Silúricas se expandían más pronto. Las pizarras apropiadas muestran expansiones de tres a siete veces su volumen original. Cualquier expansión menor a tres veces su volumen original no dará un agregado que pueda considerarse satisfactorio desde el punto de vista de ligereza.

Cuando se rompe de través un nódulo de pizarra expansiva se ve que está compuesto de pequeñas células separadas por paredes vitrificadas, todas ellas cubiertas por una cubierta vitrificada, en virtud de la cual es impermeable al agua, a pesar de su interior poroso.

En la fabricación de un agregado de peso ligero del desperdicio de pizarra, el material crudo primero se tritura y luego se calienta en un horno rotatorio. Seleccionando en forma debida la graduación del material triturado antes del horneado, es posible producir un agregado de la graduación requerida, consistiendo solamente en nódulos de cubierta vitrificada. Por estos métodos, se obtiene un agregado más impermeable del que se podría obtener al triturar los granules más grandes después de quemados, puesto que la trituración rompe la cubierta fundida, exponiendo así el interior más poroso. No obstante esto, el agregado que ha sido triturado después de quemar no es especialmente absorbente; por ejemplo, los nódulos rotos sumergidos en agua durante una semana pueden, después de soltarlos, flotar por 2 meses o más, antes de que hayan absorbido agua suficiente

para causar su hundimiento. Las pizarras trituradas después de su expansión tienden a romperse a lo largo de sus planos laminares que quedan retenidos en el material.

La resistencia obtenida de los concretos con agregados de pizarras expansivas es comparable a la de otros concretos ligeros de densidad semejante, mientras que la contracción por secado es mejor que para la mayoría de los concretos ligeros. En Inglaterra, la localización de los depósitos de pizarras en relación a los centros de población, es desfavorable para la explotación económica del desperdicio de pizarras expansivas como agregado de peso ligero. La Tabla 6.19 da un resumen de los resultados que deben esperarse del concreto con agregado de pizarras expansivas.

Tabla 6.19. Propiedades del concreto de pizarras expansivas

Proporción <sup>(1)</sup>	$\delta$	$f_c'$	%C	k
Mezclas semisecas:				
1:6	640-1280	32-63	0.04	0.1240-0.2480
1:11	560-960	14-21	0-0.03	-----
Mezclas compactadas, reportadas por el U.S. National Bureau of Standards.				
1:2.8	1360	281	0.078	0.424
1:3.7	1300	242	0.078	0.374
1:5.2	1190	162	0.086	0.349
1:9.0	1170	92	0.094	0.349

<sup>(1)</sup> Proporciones en volumen de la mezcla cemento:agregado.  $\delta$ : Densidad del concreto superficialmente seco ( $\text{kg/m}^3$ ).  $f_c'$ : Resistencia a la compresión a los 28 días ( $\text{kg/cm}^2$ ). %C: Contracción del secado (%). k: Conductividad térmica ( $\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ ).

### 6.3.1.7 Pómez y escorias volcánicas

Estas son rocas comunes de origen volcánico que existen en muchas partes del mundo y que son lo suficientemente fuertes y ligeras como para utilizarse como agregado de peso ligero. Su ligereza se debe al hecho de ser lavas esponjosas, cuyas celdas se formaron por los gases que escapaban cuando se encontraban aun en estado derretido; de hecho se les ha llamado con mucha propiedad “espumas sólidas”. El pómez es generalmente de color tenue o casi blanco, y tiene una textura bastante uniforme de pequeñas celdas interconectadas, mientras que la escoria es en general de color oscuro y contiene celdas más grandes y de forma irregular que no están conectadas.

Los principales yacimientos de pómez son; en Europa: Sicilia, Grecia y las regiones del Rin en Alemania; en los EE.UU.: California, Oregon, Washington, Nevada y Nuevo México. Existen también vastos depósitos en Nueva Zelanda y en varias partes de África.

El pómez es el agregado de peso ligero más antiguo que se conoce, ya que desde aproximadamente 100 años A.C. era frecuentemente usado como agregado en los techos y muros de los edificios romanos y templos notables, de los cuales el mejor ejemplo que aún perdura es el Partenón en Roma, en donde se utilizó concreto de pómez en la cúpula. A mediados del siglo XIX se revivió el uso del pómez como agregado en Alemania, donde existen grandes depósitos de esta roca, y posteriormente se hizo extensivo a otras partes de Europa. Su uso en el Reino Unido, que nunca ha sido muy grande, se interrumpió por la Segunda Guerra Mundial y no ha sido continuado nuevamente, principalmente a causa de los costos de transporte.

El pómez de las minas esta a menudo contaminado con polvo volcánico, arcilla y esquistos, de modo que después de triturarse hay necesidad de lavarlo para remover esas materias extrañas.

La Tabla 6.20 muestra las propiedades que deben esperarse del concreto de pómez. El pómez puede sinterizarse hasta el punto de fusión incipiente, cuando se requiera obtener un agregado mucho más fuerte.

Tabla 6.20. Propiedades del concreto de pómez

Tipo de concreto	Proporción <sup>(1)</sup>	$\delta$	$f_c'$	%C	k
Mezcla semiseca para bloques	1:6	770	39	0.04	0.136
	1:10	656	21	0.06	0.174
Concreto completamente compactadas	1:3	1480	104	0.80	0.298
	1:4.5	1430	140	0.10	0.323

<sup>(1)</sup> Proporciones de la mezcla en volumen.  $\delta$ : Densidad del concreto superficialmente seco ( $\text{kg/m}^3$ ).  $f_c'$ : Resistencia a la compresión ( $\text{kg/cm}^2$ ). %C: Contracción por secado en porcentaje. k: Conductividad térmica ( $\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ ).

6.3.1.8 Diatomita

Esta es esencialmente una sílice amorfa hidratada, derivada de los esqueletos remanentes de las plantas acuáticas microscópicas llamadas diatomeas. También se le conoce con el nombre de “Kieselguhr”. Cuando se encuentra pura, la diatomita tiene un peso volumétrico promedio de 450 kg/m<sup>3</sup>, pero, debido a impurezas tales como la arena y la arcilla, puede ser bastante más pesada que esa cifra. Se le obtiene de depósitos en muchas partes del mundo. En la Gran Bretaña se obtiene de la Isla de Skye.

La diatomita tiene una multitud de usos; por ejemplo, como un coadyuvante en la filtración en la industria refinadora de azúcar, y como aditivo del concreto para mejorar su trabajabilidad. Se ha utilizado también como la base de un agregado de peso ligero para el concreto. En los EE.UU. dicho agregado es el “Sil-o-cel”, el cual se usa en el concreto para aislamiento de hornos de altas temperaturas.

En los Estados Unidos, las diatomitas de bajo grado y las tierras diatomeas se sinterizan en hornos rotatorios a temperaturas del orden de los 1100°C, para producir agregados de peso ligero. Ejemplos de tales agregados son el “Discrete”, el “Raylite” y el “Airox”.

La Tabla 6.21 muestra las propiedades que se pueden esperar del concreto con diatomita sinterizada, de acuerdo con la National Bureau of Standard.

Tabla 6.21. Propiedades del concreto de diatomita

Proporción <sup>(1)</sup>	δ	f <sub>c</sub> '	%C	k
1:9.0	690	22	0.263	0.144
1:6.0	770	46	0.263	0.158
1:3.7	930	85	0.259	0.193
1:2.4	1000	115	0.346	0.223

<sup>(1)</sup> Proporciones en volumen de la mezcla cemento:agregado. δ: Densidad del concreto superficialmente seco (kg/m<sup>3</sup>). f<sub>c</sub>': Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm<sup>2</sup>). %C: Contracción del secado (%). k: Conductividad térmica (kcal/mh°C).

6.3.1.9 Agregados orgánicos

Un examen de los agregados de peso ligero para el concreto sería incompleto si no se hiciera referencia a los agregados orgánicos. En estos se incluyen tanto los de origen natural como los productos sintéticos.

Los materiales orgánicos naturales que se han utilizado como agregados incluyen desperdicios de varios tipos de cosechas, principalmente las cáscaras del arroz, pero y en mucho mayor grado, el producto vegetal más importante que se utiliza en esta forma es el aserrín. (Las virutas de madera sin duda excederían el uso del aserrín si las placas de virutas y tablas de madera comprimidas se consideraran como una forma de concreto).

El aserrín se ha venido usando como agregado por muchos años, habiendo sido estudiado por la Building Research Station desde 1924 (Short y Kinniburgh, 1967). Un estudio conciso, pero informativo sobre el uso del aserrín como agregado fue publicado por Parker en 1947 (Short y Kinniburgh, 1967).

Al aserrín aglutinado con cemento no se le conoce como un concreto sino que por alguna razón se le llama “cemento de aserrín”. Las mezclas varían de 1:1 a 1: 4 (cemento: aserrín) en volumen, de acuerdo con el propósito para el cual se requiera el producto.

No obstante que 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 del tronco del cual se obtuvo. Algunos de estos aserrines tienen un efecto determinado sobre el fraguado y 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 inservible. Por esta razón, se han registrado muchas patentes a través de los años sobre los métodos de pre-tratamiento del aserrín, a fin de evitar tales problemas. Parker en 1947 (Short y Kinniburgh, 1967) enumera las formas de tratamiento que se han propuesto intentar resolver el carácter incierto del aserrín. Estas pueden agruparse como sigue:

- 1) Tratamientos en donde intervenga una oxidación parcial de la madera (incluyendo una carbonización parcial).
- 2) Tratamientos diseñados para impermeabilizar la madera y prevenir así la acción solvente.
- 3) Tratamientos diseñados para neutralizar con álcali para precipitar o para tratar con sulfatos.

4) Como adjunto de cualquiera de los anteriores, hay un tratamiento del cemento para acelerar el fraguado, esto es, para originar que el mecanismo del fraguado se inicie antes de que la solución de ingredientes dañinos en la madera haya alcanzado una etapa en la cual el cemento se afecte.

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; este tratamiento se utiliza a menudo en la práctica.

Parker da los valores aproximados que deben esperarse de una mezcla de aserrín de maderas suaves, en variadas proporciones con el cemento, cuando se usa un pre-tratamiento de cal combinada con la adición de cloruro de calcio. Estos resultados se muestran en la Tabla 6.22.

Esta tabla muestra que la resistencia que puede obtenerse del cemento de aserrín no es alta en relación a lo rico de la mezcla, pero que la conductividad térmica es en cambio muy satisfactoria aunque no tan buena como la de otros tipos de concretos de densidad semejante. La contracción por secado, sin embargo, es muy alta; casi 10 veces mayor que la de la mayoría de los otros tipos de concretos ligeros, lo cual limita grandemente el uso de este material.

El cemento de aserrín se ha utilizado para acabados de pisos sin juntas y para ladrillos precolados para pisos; su uso en unidades de muros y techos ha tenido gran éxito en los diseños donde es posible tener una libertad de movimientos, tal como las estructuras prefabricadas a base de tableros colados entre postes. Los bloques de cemento de aserrín para la construcción que contienen cierta proporción de arena son ahora utilizados comúnmente y dan buenos resultados cuando se les usa en ciertas posiciones adecuadas. La arena tiene el efecto de aumentar el peso del tabique y de reducirá su valor de aislamiento térmico, pero limita efectivamente las contracciones por secado.

Un buen número de agregados orgánicos sintéticos se ha introducido recientemente como agregados de peso ligero. Los principales entre ellos son los formados por resinas espumosas de poliéster y de substancias semejantes. Un producto llamado “Styropor” es ofrecido por su fabricante Badische Anilin-und Soda-Fabrik de Alemania, y un material un tanto semejante se produce en este país (Inglaterra) por las Imperial Chemical Industries Limited. Todavía otro ejemplo de estos materiales es el “Thermacole”, vendido por Cole & Co. de Bombay.

Estos materiales sintéticos son generalmente caros y consecuentemente encuentran su aplicación sólo en trabajos muy especializados tales como en almacenamientos refrigerados, donde la necesidad de una alta eficiencia en el aislamiento justifica el costo de un material caro.

Tabla 6.22. Propiedades del concreto de aserrín

Proporción <sup>(1)</sup>	$\delta$	$f_c'$	$f_t$	k	%C	%E
1:1	1600	352	70	-----	0.25	0.15
1:2	1200	123	39	0.248	0.35	0.22
1:3	880	49	18	0.248	0.50	0.28
1:4	640	18	11	0.174	0.50	0.30

<sup>(1)</sup> Proporciones en volumen de la mezcla cemento:agregado.  $\delta$ : Densidad del concreto superficialmente seco ( $\text{kg/m}^3$ ).  $f_c'$ : Resistencia a la compresión a los 28 días ( $\text{kg/cm}^2$ ).  $f_t$ : Resistencia transversal a los 28 días ( $\text{kg/cm}^2$ ). %C: Contracción del secado (%). k: Conductividad térmica ( $\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ ). %E: Expansión por humedad (%).

6.3.2 Propiedades de los agregados ligeros

Todos los agregados ligeros tienen alta porosidad, algunos tan alta que alcanza el 70%; otros la tienen mucho más baja. Esta alta porosidad se traduce en valores bajos de peso específico lo cual, con una graduación normal, significa un peso volumétrico bajo del agregado y del concreto.

A causa de las dificultades para verificar la absorción de agua en los agregados ligeros, los valores de absorción y de peso específico mostrados en la Tabla 6.23 son nominales, es decir, son valores meramente aproximados con probabilidades de encontrarse en el material y que demuestran claramente el efecto de la porosidad. No se indican las velocidades de absorción ni tampoco los efectos del tamaño de las partículas en el peso específico. Un material con una finura mayor de 150 micras puede tener una densidad específica aproximada de 2.2 a 2.514, esto es, cercana a la de muchas gravas silíceas. El peso volumétrico, el peso específico y la absorción de agua son todos afectados por la distribución de tamaños de partículas y deberían ser verificados para agregados particulares en que se requieran valores más precisos. El agregado natural incluido en la Tabla 6.23 es un material irreal utilizado con propósitos de comparación.

Tabla 6.23. Valores característicos de algunas propiedades de los agregados

Agregado	Peso Volumétrico Seco Suelto PVSS (kg/m <sup>3</sup> )		Peso específico nominal (secado en horno)		Absorción nominal (% del peso seco)	
	Fino	Grueso	Fino	Grueso	Fino	Grueso
Aglite	1000-1070	650-720	1.6-1.8	1.3-1.4	1-3	5-7
Escoria espumosa	850-950	650-750	1.3-1.6*	1.1-1.6*	2-5*	10-15*
Leca	700-750	380-580	0.8-1.0	0.5-0.6	15-18	12-14
Btag	1000-1200	750-870	1.6-1.7	1.5-1.6	12-14	9-11
Solite	880-1000	560-720	1.6-1.8	1.3-1.5	1-3	5-7
Agregado natural	1450-1750	1300-1500	2.6-2.7	2.5-2.7	0.2-1	0.2-2

\* Datos aproximados a causa de la superficie de poro abierto

Puede suponerse que, ya que los agregados naturales son más densos que los ligeros, son de mejor “calidad”, más durables y más sanos. Esto no es así; los últimos son manufacturados a temperaturas entre 1100 y 1200°C y son probablemente más sanos que muchos de los primeros, los cuales pueden haber sufrido intemperización por exposición prolongada. Es probable que su comportamiento en el concreto a altas temperaturas también sea mejor. La porosidad del concreto puede asociarse con la corrosión del refuerzo embebido y con el daño por congelación; cuando el concreto contiene suficiente pasta de buena calidad y está debidamente compactado, la corrosión es difícilmente influenciada por los agregados porosos; lo anterior no depende solamente de la porosidad sino también del tamaño del poro, del espesor y la permeabilidad del mortero circundante y del módulo de elasticidad del agregado. Esto último asegura una mayor compatibilidad entre el agregado ligero y el mortero que entre el agregado natural y el mortero, ya que la alta porosidad se traduce en un bajo módulo de Young. No obstante, donde se estime que la resistencia a la congelación puede ser un problema, debe usarse la inclusión de aire, especialmente donde exista un riesgo real de que el agua absorbida en los agregados alcance hasta cerca del 85 al 90% de su volumen de vacíos.

Los rangos típicos de densidad de concretos hechos con diferentes agregados ligeros, basados sobre todo en la clasificación ACI, se muestran en la Figura 6.3; en las normas ASTM C330-82a, C331-81, C332-83 y en IBS3797, se prescriben algunos requerimientos generales para los agregados ligeros (Neville, 1999).

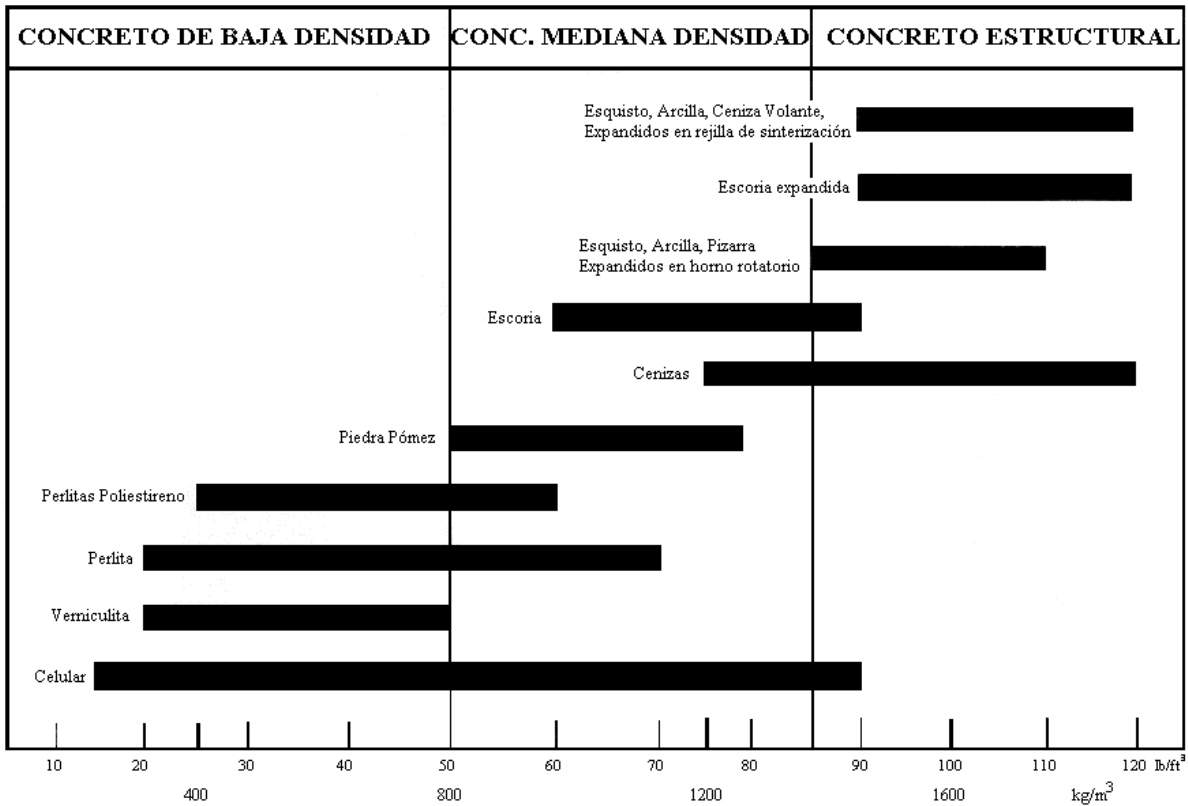
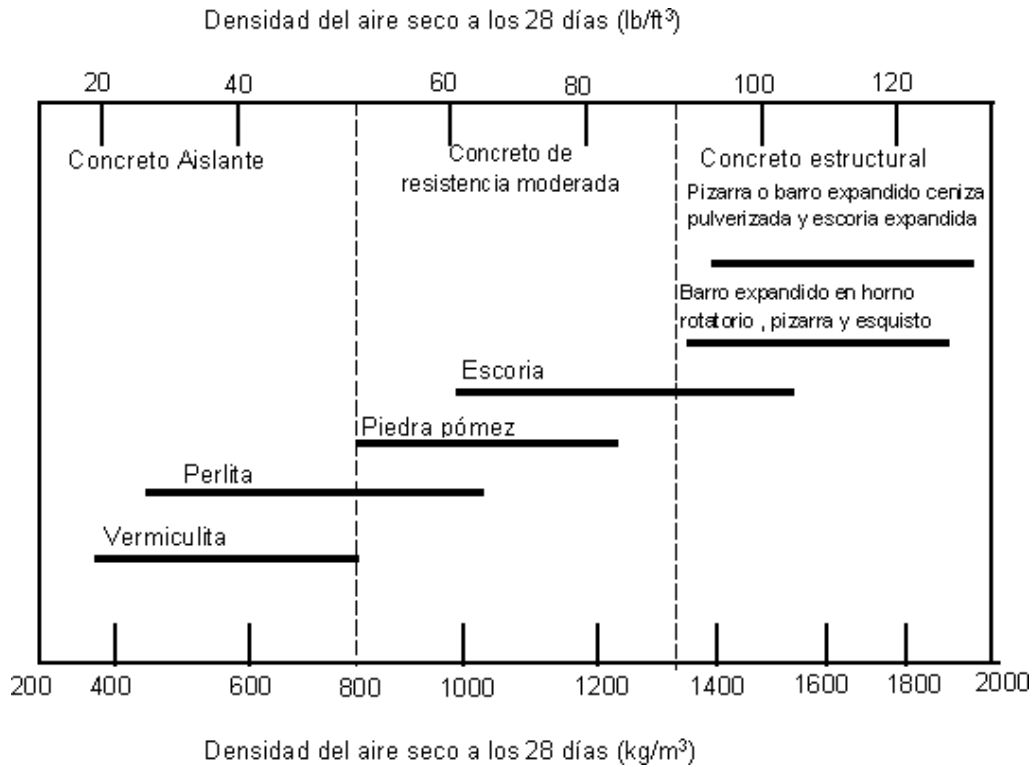


Figura 6.3. Rangos característicos de densidad de concretos con agregados ligeros (Neville, 1999).

#### 6.4 APLICACIONES

El concreto con agregados de peso ligero puede usarse ventajosamente para reemplazar al concreto común; por ejemplo, para miembros estructurales de carga, ya sean precolados o colados in situ. Más aún, en muchos casos, el concreto con agregados de peso ligero no se usa como sustituto del concreto común, sino como un material específicamente apropiado para propósitos particulares. Tales casos suceden, por ejemplo, cuando uno de los requisitos importantes es el aislamiento térmico.

Con muy pocas excepciones, cualquiera de los diferentes tipos de agregados de peso ligero disponibles pueden ser utilizados para cualquiera de los propósitos para los cuales se necesita el concreto ligero; sin embargo, algunos agregados son menos o más apropiados que otros para ciertas aplicaciones particulares.

El agregado de pómez, por ejemplo, generalmente no se utiliza para construcciones con colados in situ, debido a su tendencia a flotar hacia la superficie causando segregación en la mezcla. No obstante esto, se sabe que esta dificultad ha sido resuelta satisfactoriamente en algunos casos, y que una gran cantidad de unidades habitacionales se han construido en Nairobi, Kenia, con losas de entresijos y azotea, de concreto de pómez, colado in situ.

Otro ejemplo es el caso de agregados de pesos sumamente ligeros. En general, estos materiales, tales como la vermiculita y la perlita, sólo se utilizan como materiales aislantes, por ejemplo, en los rellenos de las azoteas. Sin embargo, también se han utilizado como agregados en cascarones de concreto reforzado obteniéndose así resistencias a la compresión en cubos de  $70 \text{ kg/cm}^2$  o mayores. Por otro lado, al concreto con escoria espumosa, al ser utilizado como un concreto compactado en construcciones de concreto reforzado, se ha encontrado que tiene una relación densidad/resistencia mayor que otros tipos de concretos ligeros a base, por ejemplo, de agregados de arcilla sinterizada, esquistos, o cenizas de combustibles en polvo. No obstante esto, cuando se tienen mezclas apropiadas, el concreto con agregados de escoria espumosa puede llegar a poseer resistencias muy altas, y puede asimismo ser usado económicamente para fines estructurales, dependiendo en cada caso particular del costo del material y del transporte. Con todo, el peso de la estructura resultante, es mayor con concreto de escoria espumosa que con algunos otros tipos de agregado.

Además, la mayoría de los agregados de peso ligero que actualmente se producen en el Reino Unido, cuando se usan con una mezcla porosa sin finos, son igualmente apropiados para construcciones con o sin elementos de carga. No obstante que el suministro de escoria de hulla ha disminuido últimamente, se asegura que todavía estará disponible en muchas áreas y por muchos años. Teniendo en cuenta que la escoria de hulla llena todos los requisitos, resulta el material para fabricar bloques precolados pero no debe ser usado para trabajos de concreto reforzado.

Con el uso de concreto con agregados de peso ligero, los diseñadores logran dos ventajas muy importantes, que son, un peso reducido y un aislamiento térmico alto; éstas también se pueden combinar con una alta resistencia, donde el concreto se utilice para fines estructurales. Por otra parte, en frecuentes ocasiones se recomienda utilizar el concreto ligero, aunque el precio inicial del material pueda parecer aparentemente más alto que el precio del concreto común.

Los muros de mampostería de bloques fueron los elementos de carga estructurales de concreto ligero que primero usaron en gran escala. En ciertos países de Europa y América las paredes sólidas empezaron a ser de uso general. En la Gran Bretaña fueron más usuales las paredes huecas con un núcleo laminar interno como elemento de carga y capas exteriores de acabado con o sin capacidad de carga; el núcleo interior era construido de bloques de concreto ligero o de concreto ligero colado in situ, y las capas exteriores de baldosas, de acabado o mampostería de recubrimiento con aplanados, o también de bloques de mampostería sin aplanado. Hasta hace poco tiempo la mayor parte de los bloques de mampostería en el Reino Unido estaban hechos con agregados de escoria de hulla; en Europa Occidental éstos se hacen principalmente de agregados ligeros como el pómez y la escoria espumosa.

Generalmente, los bloques de mampostería son de tal tamaño que pueden ser levantados por un hombre, siendo su principal ventaja que debido a su baja densidad y a las cavidades contenidas frecuentemente en el núcleo, la velocidad de construcción puede aumentarse grandemente y reducirse los costos de transporte. Un paso más hacia la mecanización, fue el uso en Alemania Oriental de bloques grandes de aproximadamente  $91 \times 91 \times 30 \text{ cm}$  de espesor, colocados por medio de grúas ligeras. Los edificios hechos con tales bloques cumplen difícilmente con el punto de vista arquitectónico, y, por el contrario, tienden a ser monótonos. Los

bloques son hechos en el lugar de la obra o cerca de ésta con concreto poroso no compactado, a base de agregados de escoria espumosa o esquistos expansivos.

A medida que se incrementaron las capacidades de carga de las grúas Torre, la experiencia con macizos precolados motivó el desarrollo de tableros de un piso de altura, hechos de concreto ligero, con refuerzo ahogado. Estos métodos de construcción fueron comenzados originalmente en el Reino Unido, principalmente en Glasgow, donde se construyeron grandes edificios municipales de vivienda con tableros precolados de concreto con escoria espumosa. El desarrollo posterior con este método de construcción tuvo lugar en los países de Europa Occidental donde se hizo un progreso considerable en los métodos automáticos de precolado en las grandes fabricas, con la introducción de elementos móviles de precolado erigidos en el centro de las unidades vecinas y después movidos al siguiente sitio cuando su trabajo en este lugar había sido terminado. En Alemania Oriental tres tipos de tableros grandes fueron establecidos como norma, teniendo pesos máximos de: 762 kg, 2032 kg y 5080 kg, respectivamente, según el tamaño de la unidad y el material usado. Unas grúas con capacidades de elevación adecuadas fueron diseñadas inmediatamente para cada tipo de tablero.

La construcción a base de muros de carga perpendiculares entre si es la que se emplea usualmente, sirviendo el muro exterior únicamente como aislamiento. Los marcos de las puertas y las ventanas son colados en las mismas unidades y están listas para ser decoradas después de la erección. Los tableros se mantienen unidos, soldando las barras de refuerzo sobresalientes al nivel del techo. Se colocan barras adicionales en los muros externos. Los tableros están hechos de escoria espumosa o esquistos expansivos, usando mezclas porosas no compactadas. Seis hombres, incluyendo el operador de la grúa pueden ensamblar la estructura básica de un conjunto de 40 unidades habitacionales en, aproximadamente, cinco semanas.

Muchos tipos diferentes de estructuras a base de tableros grandes similares a los descritos anteriormente, han sido desarrollados en diferentes países. En Rusia se ha usado principalmente la arcilla expansiva para la producción de dichos tableros.

En general, tanto las losas de pisos como las de muros han sido precoladas, pero mientras que las unidades para muros están hechas con mezclas de concreto de peso ligero, poroso y no compactado, las unidades de entrepisos y azoteas, están hechas con concreto compactado. La práctica reciente ha sido la de curar a vapor las unidades terminadas.

Los precolados tienen como una ventaja considerable el que algunas de las operaciones de construcción usualmente llevadas a cabo en sitios abiertos, expuestos a la intemperie, son convertidas en verdaderas operaciones de fabricación, capaces de ser controladas estrictamente en una fábrica. La gran inversión requerida para esa línea de producción, vale la pena únicamente, si es muy grande el número de unidades necesarias de cualquiera de los tipos a producir. Sin embargo, en la mayoría de los casos el costo del transporte de los materiales desde sus yacimientos hasta la fábrica y después el costo del movimiento de los artículos terminados al sitio de la construcción, excede los ahorros que podrán tenerse con la producción en fábrica. Las fábricas móviles de precolados dieron una solución intermedia, quizá no tan eficiente como los grandes trabajos realizados bajo techo, pero si evitando la multiplicidad de las operaciones de manejo que necesariamente se tienen en estas últimas. Tal método de producción ha sido adoptado para la construcción de un gran centro habitacional cerca de Metz, Francia, donde se produjeron en el sitio de la obra unidades de paredes para soporte de carga tipo "sándwich", consistentes en un núcleo de concreto de escoria espumosa y capas exteriores de concreto común. Las unidades de un piso de altura se conectaban con un marco ligero de acero, erigido piso por piso, y con juntas coladas in situ.

Unidades precoladas de menor tamaño con claros hasta de 3 m. han sido hechas en Alemania durante mucho tiempo, como componentes ordinarios de construcción, hechas de concretos de pómez o de escoria espumosa. Debido a su peso ligero y alto aislamiento térmico, estas unidades son particularmente apropiadas para techos industriales; para reducir, las formaciones de éstas, se colocan in situ sobre los apoyos, refuerzos de tensión en ranuras dejadas en la parte de arriba de las losas.

En Checoslovaquia, para la construcción de edificios de varios pisos, se usan ampliamente unas losas angostas precoladas de concreto de escoria espumosa de un piso de altura.

Para tales tipos de unidades, generalmente de aplicación común, el precolado en grandes piezas ha demostrado tener ventajas tanto técnicas como económicas. Donde se requieren cantidades muy grandes de estas unidades se pueden hacer económicamente tableros de un piso de alto y que comprendan un cuarto entero, por medio de precolados con sistemas de producción semiautomáticos.

En el Reino Unido se hacen losas precoladas para pisos y azoteas, con concretos presforzados a base de arcillas expansivas. La sección transversal de estas losas ha sido ahuecada; su máximo claro es de 6 m. Estas unidades se fabrican en forma similar a las llamadas losas Shafer que son unidades del tipo “sándwich”, en las cuales las capas inferiores y superiores se hacen de concreto común de alta resistencia a base de grava, donde las varillas de preesfuerzo y otros refuerzos quedan ahogados, mientras que la capa intermedia está hecha de concreto de escoria espumosa no compactada. Tales losas son fabricadas en franjas continuas de poco más de un centenar de metros de longitud; el material se prepara en una torre móvil y después es cortado a su tamaño. Los núcleos metálicos son retirados automáticamente a medida que la torre pasa a lo largo de las losas. La máxima longitud de las losas Shafer es de aproximadamente 3.60 m.

En los Estados Unidos de Norteamérica se han usado cada vez más las vigas preesforzadas precoladas con refuerzo postensado para sistemas de piso en los puentes. El uso de vigas de concreto presforzado que excede de ciertos claros está limitado no sólo por el incremento del peso muerto, que absorbe gran parte de la capacidad de carga de las vigas, sino también por las dificultades que presenta el transporte de tales vigas al sitio donde serán colocadas. El uso de concreto ligero con barras de refuerzo de acero de alta resistencia, esforzados al 80% o más de su resistencia última, para tomar en cuenta los efectos del flujo plástico y la contracción del concreto, condujo a una reducción considerable en el peso propio de las vigas. En estas condiciones, los aparatos de levantamiento y transporte disponibles se pueden también utilizar para claros mayores. La ventaja que un menor peso representa para el transporte y el montaje también se manifiesta en el caso de secciones precoladas de pilas, las cuales pueden ser transportadas al sitio de la obra por medio de vehículos ordinarios, por carretera o ferrocarril, en unidades sencillas mucho más grandes que las que sería posible transportar en el caso de concreto común de grava. Análogamente, el peso de las trabes de alma llena con patines inferiores ahogados en el concreto, cuando estos trabajen como respaldos para soportar arcos planos colados in situ, puede ser reducido notablemente mediante el uso de concreto ligero.

Se han usado extensamente métodos de construcción compuesta para puentes y sistemas de piso, combinando trabes de acero y losas de concreto reforzado o trabes preesforzadas precoladas y losas coladas in situ. En la Gran Bretaña se han usado trabes preesforzadas de concreto común, con un relleno de concreto de peso ligero entre ellas reduciendo así considerablemente el peso del sistema de piso, así como también mejorando sus características al impacto debido al menor valor del “E” del concreto con agregados de peso ligero. El uso del concreto de peso ligero compactado en un sistema de trabes de acero y losa de concreto trabajando en construcción compuesta, puede incrementar la capacidad de carga útil de la estructura. Las trabes de acero y la losa de concreto reforzado se combinan por medio de diferentes tipos de conectores de cortante en el patín de compresión. Por lo tanto, la rigidez y la capacidad de carga última se incrementan considerablemente, y puesto que las deflexiones son pequeñas, el uso de concreto ligero tiene muy poco efecto sobre la rigidez. El eje neutro de un sistema de trabes y losas en construcción compuesta está usualmente cerca del patín superior de la trabe de acero, llevando, por lo tanto, a un uso inadecuado la sección de acero, principalmente bajo las cargas de trabajo. Debido al menor módulo de elasticidad del concreto con agregados de peso ligero en relación al del concreto común de grava, el eje neutro de los miembros de flexión de concreto ligero tiende a ser más bajo y por lo tanto permite alcanzar esfuerzos ligeramente mayores en el patín superior de la trabe de acero. Debido al uso más eficiente del patín de compresión, se pueden lograr algunas economías.

El diseño de miembros de concreto ligero en construcción compuesta deberá hacerse de acuerdo con las reglas dadas por el Código de Práctica editado por el American Concrete Institute (ACI).

Tal vez la primera aplicación experimental del concreto reforzado fue en la construcción de barcos. Durante la Segunda Guerra Mundial, el concreto ligero fue usado tanto en la Gran Bretaña como en los Estados Unidos de Norteamérica para la construcción de barcos transoceánicos y barcasas para ahorrar acero y otros materiales escasos entonces. El agregado usado en los cascos de los barcos fue principalmente arcilla expansiva, protegiéndose después, usualmente, con una capa exterior bituminosa.

El agregado de escoria espumosa fue usado para partes de las instalaciones del Puerto móvil conocido con el nombre de “Mulberry Harbour”.

El desarrollo de nuevos agregados ligeros en alto grado, hicieron posible el uso del concreto ligero en la construcción de grandes estructuras reticuladas. Los ahorros en peso que resultaron, no sólo condujeron a ahorros en el diseño al permitir claros mayores, sino también a ahorros en los costos de transporte y erección. Los agregados de arcilla expansiva fueron usados para elaborar la mayoría de los concretos ligeros en las

obras a base de concreto reforzado en los Estados Unidos de Norteamérica, pero también se ha ido acrecentando con el tiempo el uso de otros tipos de agregados de peso ligero.

Las losas de pisos y azoteas de concreto ligero reforzado se han utilizado en una gran cantidad de estructuras en varios sitios, siendo éstas hechas principalmente de concreto de Aglita y otros tipos de concretos ligeros.

En Orpington se utilizó agregado de cenizas sinterizadas de combustibles en polvo para la construcción del muro de carga y la losa en el voladizo del coro de la nueva Iglesia del lugar y debido al menor peso propio de los materiales se obtuvo un diseño más esbelto y atrevido que el que se hubiera tenido con concreto común con agregado de grava.

Se han construido azoteas de concreto presforzado para edificios industriales hechos con concreto ligero, lográndose así ahorros considerables en materiales, y claros mayores; tal es el caso de la azotea de la fábrica de pintura en Chadwell Heath, en la que se usó una estructura de losas plegadas precoladas y posteriormente preesforzadas por medio de cables postensados.

Se ha observado que debido a la gran avidez de absorción de humedad del concreto ligero estructural, los acabados internos tienden a desprenderse, a menos que la superficie del muro se haga áspera antes de colocar el material de acabado. Esta dificultad no se presenta cuando se usan muros de carga de concreto de peso ligero no compactado colados in situ. Edificios hasta de 21 pisos de altura han sido erigidos con este sistema de construcción usando diferentes tipos de patentes para los cimbrados. Es usual colar los primeros pisos con concreto común de grava o con "Thermocrete" (concreto de peso ligero con finos de escoria triturada) para dar una base suficientemente rígida sobre la cual se puedan construir los pisos superiores con concreto ligero poroso no compactado.

La construcción a base de muros de carga perpendiculares entre sí es usado frecuentemente uniéndolos por losas rectangulares en edificios de un sólo piso o en construcciones tipo torre de varios pisos de altura, con diferentes distribuciones de sus plantas. En general este último tipo de construcción es más económico.

La cara externa de los muros colados in situ generalmente es recubierta con un relucido, pero recientemente se han usado varios tipos de baldosas cerámicas para acabados. En la Gran Bretaña la arcilla expansiva, la escoria espumosa y las cenizas sinterizadas de combustibles en polvo así como los agregados de grava se han usado tanto para edificios de dos pisos como para edificios de varios pisos en construcciones de este tipo a base de concretos sin finos.

Debido a su gran aislamiento térmico, con frecuencia se usa un concreto con agregado de peso ligero, o un relleno flojo de agregado de peso ligero para plantillas de azotea. Donde es particularmente importante tener un peso reducido, el concreto ligero puede usarse como plantilla en los pisos. Los pisos de concreto ligero son de más fácil y rápida colocación y son menos fríos al tacto que los concretos comunes de grava. Se usan proporciones 1:10 y 1:11 con agregados de 10 a 5 mm ( $3/8''$ - $3/16''$ ), cubiertos con un acabado de mortero de cemento con finos de peso ligero, en proporción 1:3. Esto produce una superficie que puede recibir un acabado final de madera, loseta o mosaico.

Debido a su bajo módulo de elasticidad, la resistencia del concreto ligero a cargas de impacto y a vibraciones es mayor que la del concreto común a base de grava. Puede ser usado con gran ventaja para cimentaciones de maquinaria.

Cuando se ha usado en superficies de rodamiento en carreteras se ha encontrado que tiene una menor tendencia a volverse liso y resbaloso.

A los bloques huecos de concreto ligero precolado se les ha dado un uso especial, como elementos de relleno, en algunos tipos de sistemas de pisos de poco peso. Por ejemplo, en el conocido sistema Stahlton para pisos, se usan bloques huecos de concreto a base de escoria espumosa, los cuales se colocan entre dos miembros presforzados "Stahlton", para formar una base sobre la cual se cuele in situ el concreto que viene a formar la zona de compresión en la losa.

Algunos elementos decorativos de apariencia agradable se han hecho ya con unidades precoladas de concreto ligero unidas entre sí, para formar un muro pantalla de 24 m. de altura y 90 m. de ancho, para lograrlo, el cemento de algunas de las unidades ha sido adecuadamente pigmentado. Unidades individuales de mayor tamaño se pueden lograr, simplemente por el hecho de utilizar concreto ligero.

## 7 CONCRETO CELULAR

### 7.1 DEFINICIÓN

El concreto celular o gaseoso de peso ligero se forma al atrapar una multitud de burbujas de aire homogéneas en una mezcla con base cemento que permanece estable durante el proceso de colado y fraguado. La espuma misma se crea al mezclar un agente de espumación con agua en una proporción diseñada y bombearlo a través de una manguera múltiple para lanzar. Antes del lanzamiento se agrega aire comprimido y juntos crean una espuma blanca y espesa. Se agrega un volumen predeterminado de espuma a una pasta de cemento y agua, o de cemento, arena y agua, para crear una mezcla uniforme. Después de una agitación adicional, se vierte la mezcla; lo ideal es hacerlo mediante una bomba.

Protección contra el fuego, aislamiento térmico y reducción de peso estructural son tres resultados del empleo del concreto de peso ligero con espuma que deben hacer considerar la conveniencia de incluirlo entre las formas alternativas de construcción.

Como hemos señalado, una forma de tener concreto ligero consiste en introducir burbujas de gas en la mezcla plástico de mortero (cemento y arena) y a fin de producir un material con una estructura celular que contenga vacíos de tamaño entre 0.1 y 1 mm.

La “piel” de los vacíos o celular debe poder soportar el mezclado y la compactación; el concreto resultante se conoce como concreto gaseoso o celular, aunque de acuerdo con Neville (1999), el termino concreto es inadecuado al no estar presente el agregado grueso.

### 7.2 MÉTODOS DE PRODUCCIÓN

Hay dos métodos básicos para producir aireación, y cada producto final recibe un nombre adecuado:

- a) El concreto gaseoso se obtiene por reacción química generando un gas en el mortero fresco, de modo de que cuando se asienta, contiene un gran numero de burbujas de gas. La consistencia de mortero debe ser la correcta para que el gas se expanda pero no se escape. Por tanto, deben combinarse la velocidad de evolución del gas, la consistencia del mortero y el tiempo de fraguado. El más usado es el polvo de aluminio dividido finamente en una proporción de 0.02% de la masa del cemento. La reacción del polvo

activo con el hidróxido de calcio al caliz libera burbujas de hidrógeno. También pueden ser usados polvo de zinc o una aleación de aluminio. Algunas veces se emplea peróxido de hidrógeno para arrastrar las burbujas de oxígeno.

b) El concreto espumoso se produce al añadir un agente espumoso (por lo común alguna forma de proteína hidrolizada o jabón de resina) a la mezcla. El agente introduce y estabiliza burbujas de aire durante el mezclado a alta velocidad. En algunos procesos, al mortero se le agrega una espuma estable preformada durante el mezclado en una mezcladora ordinaria.

El concreto gaseoso se puede hacer sin arena, pero sólo para propósitos no estructurales, tales como el aislamiento del calor cuando se puede obtener un rango de densidad de 200 a 300 kg/m<sup>3</sup>; las mezclas más usuales (con arena), tiene densidad entre 50 y 1100 kg/m<sup>3</sup> cuando se usa una mezcla de cemento y arena muy fina (Neville, 1999).

### 7.3 PROPIEDADES

Como en otros concretos ligeros, la resistencia varía en proporción a la densidad, e igual con la conductividad térmica. Un concreto con densidad de 500 kg/m<sup>3</sup>, tiene una resistencia en la región de 30 a 40 kg/cm<sup>2</sup> y una conductividad térmica de aproximadamente 0.1 J/m<sup>2</sup>s°C/m; para un concreto con densidad de 1400 kg/m<sup>3</sup>, los valores correspondientes son de 120 a 140 kg/cm<sup>2</sup>, y 0.4 J/m<sup>2</sup>s°C/m. En comparación, la conductividad de concreto común es unas 10 veces mayor. Cabe destacar que la conductividad térmica aumenta linealmente con el contenido de humedad: cuando es de 20%, la conductividad es típicamente de casi el doble que cuando el contenido de humedad es cero.

El módulo de elasticidad del concreto gaseoso está entre 17000 y 35000 kg/cm<sup>2</sup>; el flujo plástico, expresado con base en la relación de esfuerzo/resistencia, es sensiblemente el mismo que para concreto ordinario. Sin embargo, con esfuerzo igual, el flujo plástico específico del concreto gaseoso es mayor. Comparado con el concreto de agregado ligero de la misma resistencia, el concreto gaseoso tiene mayor movimiento térmico, mayor contracción de fraguado y mayor movimiento humedad, pero estos pueden ser reducidos con autoclave (curado de vapor a alta presión), que también mejora la resistencia compresiva.

El concreto gaseoso se utiliza principalmente para propósitos de aislamiento de calor debido a su baja conductividad térmica e incombustibilidad, ya que tiene mayor resistencia al fuego que el concreto normal. Estructuralmente, el concreto se usa más para formar bloques en autoclave o miembros precolados, pero también se utiliza para la construcción de pisos en vez de un embolsamiento hueco. Para mamparas ligeras aislantes se puede obtener el concreto gaseoso usando un superplastificador.

Otras ventajas del concreto gaseoso son que puede aserrarse, sostiene clavos, y es razonablemente durable, aunque su absorción de agua es alta, el índice de penetración de ésta es bajo al no llenarse los poros más grandes por su succión. Por esta razón, el concreto tiene una resistencia comparativamente buena al congelamiento, y como aplanado, puede usarse en la construcción de muros.

El refuerzo desprotegido en el concreto gaseoso sería vulnerable a la corrosión, aun cuando el ataque externo no sea muy severo. El acero de refuerzo se debe sumergir en un líquido anticorrosivo adecuado; se ha encontrado que las soluciones bituminosas y las resinas epóxicas son satisfactorias y no tiene efectos adversos sobre la adherencia.

El concreto de peso ligero sigue siendo un concepto poco utilizado, a pesar de su potencial para reducir masa de edificación. La causa principal de esto es que poca gente reconoce su variedad de usos. La experiencia de ultramar indica el empleo de agregado fabricado de peso ligero a partir de ceniza volante o arcillas para aplicaciones estructurales. Las densidades que se obtienen son del rango de 1,600 a 1,800 kg/m<sup>3</sup>, al mismo tiempo que se alcanzan resistencias de 200 a 300 kg/cm<sup>2</sup>. Se ha reunido cierta experiencia acerca de la durabilidad y la contracción al usar estos materiales estructurales.

El principal problema que tiene las materias primas para producir agregado de peso ligero, es el tamaño del mercado, su distribución en el país y la influencia de estos factores con el alto costo de capital de la fabricación y el transporte.

La contracción es siempre un resultado cuando se trata de materiales de peso ligero, ya que es inevitablemente más alta que en los concretos convencionales de peso normal.

## 8 CONCRETO SIN FINOS

### 8.1 INTRODUCCIÓN

El término concreto “sin finos”, generalmente se refiere a un concreto común de cemento y agregado grueso solamente (1.0 a 1.9 cm) y el producto que se forma de esa manera contiene muchos huecos uniformemente distribuidos en su masa. Desgraciadamente el termino también se usa algunas veces para denominar a un concreto que no se hace con agregados de 1.0 a 1.9 cm, sino con agregados de graduación ordinaria de los cuales han sido extraídos solamente los finos (de 0.0 a 0.5 cm). Este hecho es bastante propicio para ocasionar confusión. Estrictamente hablando, la última definición es bastante apropiada y entonces sería más correcto describir el concreto con agregados de 1.0 y 1.9 cm como un “concreto con agregados de un sólo tamaño”, pero en vista de que el termino “sin finos” esta ya tan firmemente asociado con el concreto con agregados de 1.0 a 1.9 cm, se le seguirá usando en lo sucesivo en este trabajo.

El término concreto sin finos, significa un concreto compuesto de cemento y agregado grueso solamente (1.0 a 1.9 cm), formando un producto que contiene muchos huecos uniformemente distribuidos. Se usa para muros exteriores e interiores de carga, para muros divisorios, para muros diafragma en estructuras reticuladas, para rellenos de pisos macizos y para plantillas de azotea.

La mezcla usada comúnmente está en proporción 1:8 en volumen y las resistencias de compresión adquiridas, varían de 49 a 84 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días. La contracción por secado del concreto sin finos es generalmente bastante menor que aquella del concreto hecha con los mismos materiales y con sus agregados completos. Un muro de concreto sin finos con agregado pesado tiene una conductividad térmica comparable a la de un muro del mismo espesor hecho con tabique sólido ordinario.

El concreto sin finos se usa para muros de carga exteriores e interiores colados in situ, muros divisorios, muros de carga, muros diafragma para estructuras reticulares, plantillas de relleno en pisos sólidos hechas sobre el terreno y plantillas de azotea. Cuando este tipo de concreto se utiliza para muros exteriores, se requiere (debido a su textura abierta) colocar un aplanado o acabado en sus caras, pero, también, por su propia estructura abierta, se elimina la absorción capilar de agua y el concreto forma una excelente base para los aplanados o los aplanados; generalmente basta con colocar dos capas de aplanado.

8.2 GENERALIDADES

El concreto sin finos, como su nombre lo indica, se obtiene al omitir el agregado fino de la mezcla, por lo que hay una aglomeración de partículas de agregado grueso nominalmente de un tamaño, cada una de ellas rodeadas de una capa de pasta de cemento hasta de 1.3 mm (0.05 in) de espesor. Por tanto, dentro del cuerpo del concreto existen grandes poros, de ahí su gran resistencia, sin embargo, como sucede con el concreto gaseoso, su gran tamaño significa que no puede haber movimiento capilar de agua y, por lo mismo es bajo nivel de penetración de esta.

Para cierto tipo de agregado, la densidad del concreto sin finos depende en primer instancia de la graduación de agregado. Con un agregado de un solo tamaño y de la misma gravedad específica de 10 a 20 mm (3/8 a 3/4 in), la densidad es 10% más baja que cuando se usa un agregado graduado; se admiten un 5% de más tamaño y un 10% de menos tamaño, pero ningún material debe de ser más pequeño que 5 mm (3/16 in).

De acuerdo con Neville (1999), usando agregado ligero puede obtenerse un concreto sin finos con una densidad tan baja como 640 kg/m<sup>3</sup>; el agregado grueso de borde filoso debe evitarse, ya que puede ocurrir trituración local bajo carga. Comparado con el concreto común, el concreto sin finos se compacta muy poco y, de hecho, se debe aplicar vibración solo por muy cortos periodos, porque de otro modo la pasta de cemento escaparía; no se recomienda el uso de varillas, porque puede conducir alta densidad local y se requiere cuidado para prevenir el arqueado a través de la forma. No hay pruebas de manejabilidad para concretos sin finos, por lo que conviene hacer una revisión visual para asegurar el recubrimiento parejo de todas las partículas. Puesto que el concreto sin finos no se segrega, puede hacerse caer desde una altura considerable y colocarse en altas hiladas. La resistencia comprensiva del concreto sin finos varía entre 14 y 140 kg/cm<sup>2</sup>, dependiendo principalmente de su densidad, la cual se controla a partir del contenido de cemento (Tabla 8.1); las mezclas varían mucho con un escaso limite para la relación de cemento/agregado por volumen entre 1:10 y 1:20; los contenidos correspondientes de cemento son de unos 130 kg/m<sup>3</sup> y 70 kg/m<sup>3</sup>. Para el concreto normal hecho con agregado bien graduado, la relación agua/cemento es el factor que controla la resistencia, pero en el concreto sin finos hay un valor óptimo estrecho de la relación agua/cemento para cualquier agregado; una relación agua/cemento más alta que la última, haría que la pasta de cemento se drenará de las partículas de agregado, mientras que con una relación demasiado baja, la pasta no sería la bastante adhesiva y no se lograría una composición uniforme del contenido. Típicamente, la relación óptima de agua/cemento varía entre 0.38 y 0.52, dependiendo del contenido de cemento necesario para el recubrimiento del agregado (Neville, 1999).

La resistencia real del concreto se determina por medio de pruebas, pero el aumento que se suscita con la edad es similar al que se observa en el concreto común. Sin embargo, el módulo de ruptura del concreto sin finos es de aproximadamente 30% de la resistencia comprensiva, una proporción más alta que en el concreto normal.

Debido a que el concreto sin finos tiene muy poca cohesión, la cimbra debe permanecer en el lugar hasta que se haya desarrollado suficiente resistencia. El curado por humedad es importante, especialmente en clima seco o en condiciones de viento, debido al pequeño espesor de la pasta de cemento involucrada.

La contracción por fraguado del concreto sin finos es considerablemente menor que la del concreto normal, por que la contracción es restringida por el gran volumen de agregado en la presente en la pasta. Sin embargo, el índice inicial de contracción es alto por que una gran área de la superficie de la pasta de cemento queda expuesta al aire. Los valores típicos de la contracción después de un mes de secado están entre 120E-6 y 200E-6.

Tabla 8.1. Datos típicos para concretos sin finos de 10 a 20 mm (3/8 a 3/4 in)

ag/c	a/c	δ (kg/m <sup>3</sup> )	δ (lb/ft <sup>3</sup> )	fc' (MPa)	fc' (lb/in <sup>2</sup> )
6	0.38	2020	126	14	2100
7	0.40	1970	123	12	1700
8	0.41	1940	121	10	1450
10	0.45	1870	117	7	1000

ag/c = Relación del agregado/ cemento por volumen  
a/c = Relación agua/ cemento por masa  
δ = Densidad  
fc' = Resistencia comprensiva a los 28 días

El movimiento térmico del concreto sin finos es de aproximadamente 70% del concreto normal, dependiendo el valor real del coeficiente de expansión térmica, y por su puesto del tipo de agregado usado; al igual que en el concreto gaseoso, una ventaja del concreto sin finos es su baja conductividad térmica: aproximadamente 0.22 kcal/mh°C con agregado de peso ligero y 0.80 kcal/mh°C con agregado de peso normal, sin embargo, un contenido alto de humedad del concreto aumenta sensiblemente la conductividad térmica. Debido a la ausencia de capilares, el concreto sin finos es muy resistente al congelamiento, siempre que los poros no estén saturados, en cuyo caso el congelamiento causaría una rápida desintegración. Sin embargo, la alta absorción de agua (hasta de 12% de masa) hace que el concreto sin finos resulte inadecuado para el uso en cimentaciones. Aunque en condiciones menos severas la absorción es menor, continua siendo necesario aplanar las paredes externas en ambos lados, una práctica que reduce la permeabilidad al aire, así como también las propiedades de absorción de ruido de concreto sin finos. En los casos en donde las propiedades acústicas se consideran de extrema importancia, un lado de la pared no debe ser aplanado.

Aunque la resistencia del concreto sin finos es considerable más baja que la de concreto de peso normal, esta resistencia, aunada a su peso más bajo, permite su uso en edificios, incluso de muchos niveles, y en muchas otras aplicaciones; el concreto sin finos no se emplea normalmente en concreto reforzado, pero si se requiere del refuerzo que se cubra con una delgada capa [de unos 3 mm(1/8 in)] de pasta de cemento, a fin de mejorar las características de adherencia y prevenir la corrosión (Neville, 1999). La manera más fácil de cubrir el refuerzo es con concreto lanzado.

### 8.3 HISTORIA Y DESARROLLO

El concreto sin finos aparentemente tuvo su origen en Holanda, y según Short y Kinniburgh (1967), se introdujo en la Gran Bretaña en 1923 cuando se construyeron 50 casas en Edimburgo, y unos cuantos años después, cerca de 800 o más casas en Liverpool, Manchester y Londres, todas ellas construidas con un concreto de escoria de hulla sin finos.

Un estudio extenso de esta forma de concreto y de su modo de utilización se estuvo realizando en la British Building Research Station desde el año de 1928, y a partir de entonces ha sido logrado un cúmulo de conocimientos bastante substanciales y una gran experiencia.

De acuerdo con Short y Kinniburgh (1967), en los años que precedieron a la Segunda Guerra Mundial, se construyeron muchos cientos de casas en Escocia utilizando concreto de grava natural o piedra triturada sin finos. Desde 1945 este material se ha vuelto de aceptación general y en la actualidad se usa extensamente en el mundo.

El concreto sin finos ha demostrado que puede competir con materiales más tradicionales y una firma constructora británica ha edificado por si sola 130,000 casas en el Reino Unido con este tipo de material, entre 1945 y 1961, además de otros grandes contratos en el extranjero (Short y Kinniburgh, 1967).

En la Gran Bretaña, hasta los años 50's (Short y Kinniburgh, 1967), el uso del concreto sin finos en estructuras de carga se limitaba en edificios de cuatro pisos, aunque se había usado ya como material de carga en muros de relleno y en losas reticulares de estructuras muy altas; También en Glasgow-UK., se construyeron durante los 60's edificios de hasta de 10 pisos de alto para centros habitacionales de concreto sin finos hechos con agregados de grava y para soportar cargas; en estos edificios, las paredes son de 30 cm. de espesor desde la base hasta la parte más alta, y la riqueza de las proporciones de la mezcla varía desde 1:6 (cemento:agregado) en los pisos bajos a 1:10 en los últimos pisos. Estructuras similares han sido construidas desde entonces en distintas partes del mundo.

### 8.4 RESISTENCIA

Para poder asegurar la resistencia requerida en las mezclas, el "estudio de la construcción de edificios de la posguerra no. 1 (Short y Kinniburgh, 1967), recomienda proporciones de 1:8 en volumen para agregados pesados, y de 1:6 para agregados de escoria de hulla, no obstante que la resistencia requerida puede a menudo obtenerse con mezclas un tanto más pobres que éstas. En el caso del agregado de escoria de hulla, sin embargo, debe tenerse cuidado en asegurar que el material sea puro, ya que debido a la variabilidad de este tipo de agregado sería poco aconsejable utilizar mezclas más pobres que 1:8 en volumen.

En la práctica actual, el concreto sin finos se proporciona principalmente con bachas pesadoras, y la mezcla más comúnmente usada es de 1:8 en peso con una relación agua/cemento de 0.40. Las resistencias obtenidas

de pruebas regulares de cubos en el laboratorio muestran los resultados promedio que se dan en la Tabla 8.2. El modulo de elasticidad del concreto sin finos tiende a disminuir con el tiempo.

Tabla 8.2. Resistencia a la compresión de concreto sin finos obtenida en cubos de 15 cm por lado

$f'_c$ a los 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )	$\delta$ en estado seco (kg/m <sup>3</sup> ).	Resistencia a la compresión de agregados
Grava de cuarcita redondeada	1845	87.9
Grava irregular de pedernal	1589	49.2
Piedra caliza triturada	1830	70.3
Granito triturado	1708	77.3

$\delta$ : Densidad.

### 8.5 CONTRACCIÓN POR SECADO

Contrariamente a otras formas de secado de concreto ligero, la contracción por secado de un concreto sin finos es particularmente baja; de hecho, resulta a menudo bastante más baja que la de un concreto hecho con los mismos materiales y los agregados completos (sin extraer finos). Esto se muestra claramente en la Tabla 8.3.

Tabla 8.3. Contracción por secado en concreto sin finos

Agregados	Proporción <sup>(1)</sup>	a/c <sup>(2)</sup>	%C <sup>(3)</sup>
Grava natural de río	1:8	0.40	0.018
	1:10	0.45	0.018
	1:12	0.50	0.018
	1:2:4	-----	0.035
Roca basáltica	1:8	0.35	0.022
	1:10	0.40	0.023
	1:12	0.45	0.028
	1:2:4	-----	0.049
Escoria enfriada por aire	1:8	0.40	0.025
	1:10	0.45	0.020
	1:12	0.50	0.022
	1:2:4	-----	0.038
Piedra caliza triturada	1:8	0.40	0.016
	1:10	0.45	0.019
	1:12	0.50	0.022
	1:2:4	-----	0.033
Escoria de hulla	1:6	0.375	0.033
	1:8	0.425	0.025
	1:10	0.475	0.040
	1:2:4	-----	0.038

<sup>1</sup>. Proporciones de la mezcla (cemento:agregado en volumen).

<sup>2</sup>. Relación agua a cemento en peso.

<sup>3</sup>. Porcentaje de contracción por secado a 50°C y 17% de humedad relativa.

La rapidez de la contracción por secado del concreto sin finos es bastante mayor que la del concreto común. Se ha demostrado que en un concreto sin finos, el 80% del movimiento de contracción total ocurre en los primeros 100 días, mientras que en el concreto común durante el mismo periodo se produce solamente el 60% de la contracción final. Cuando la menor contracción total del concreto sin finos se considera conjuntamente con su más rápido secado al ser expuesto a una humedad moderada, parece ser que la contracción efectiva que ocurriría después de aplanar con mezcla un muro sin finos, será mucho menor que la que ocurriría en un muro de concreto común.

La experiencia práctica que se tiene con concreto sin finos hecho con un agregado pesado muestra que la contracción por secado es lo suficientemente pequeña como para permitir que las casas prefabricadas se construyan sin incluir las juntas verticales de contracción. En vista de la mayor contracción por secado que

experimentan ciertos concretos hechos con otros tipos de agregados más ligeros, se recomienda que aun en el caso de las casas prefabricadas se utilicen dichas juntas de contracción cuando se usen estos materiales.

### 8.6 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

En general, un muro de concreto sin finos hecho con agregados pesados tiene una conductividad térmica (valor k) comparable a la de un muro de tabique sólido del mismo espesor, de modo que para obtener el aislamiento equivalente al de una pared hueca de 28 cm. de espesor, un muro de concreto sin finos de 20 cm de espesor hecho con agregado pesado, requerirá un aislamiento adicional, como por ejemplo, el de tableros de recubrimiento sobre las caras. Sin embargo, con el agregado de escoria de hulla, un muro de 20 cm. de espesor hecho con concreto sin finos, sin aislamientos suplementarios seria tan bueno como el muro hueco de 28 cm. hecho de tabique. La transmitancia térmica, o “valor U” de varias mezclas de concreto sin finos, con agregados diversos y de distinto espesor, se proporciona en la Tabla 8.4. Los términos “valor U” y “valor k”, se definieron previamente cuando se trato el aislamiento térmico.

Tabla 8.4. Valores calculados de “U” para diferentes espesores de muros de concreto sin finos

Material de construcción, espesor y acabados del muro	Proporción <sup>(1)</sup>	Valores de “U” en muros de concreto sin finos con diferentes agregados y variando las proporciones de la mezcla y el espesor del muro (kcal/m <sup>2</sup> h°C)				
		Grava	Roca basáltica	Escoria de alto horno	Piedra Caliza	Escoria de hulla
Concreto 20 cm.; aplanado y enyesado de 2.5 cm	1:6	--	--	--	--	1.47
	1:8	1.92	1.82	1.52	1.92	--
Concreto 25 cm.; aplanado y enyesado de 2.5 cm	1:6	--	--	--	--	1.28
	1:8	1.67	1.62	1.32	1.72	--
Concreto 30 cm.; aplanado y enyesado de 2.5 cm	1:6	--	--	--	--	1.13
	1:8	1.52	1.42	1.18	1.52	--
Bloques huecos 28 cm; aplanado y enyesado 2.5 cm	--	1.42	--	--	--	--
Bloques huecos 28 cm; sin acabados	--	1.47	--	--	--	--

<sup>(1)</sup> Proporciones de la mezcla cemento:agregado en volumen.

### 8.7 PENETRACIÓN DE LA HUMEDAD

Un muro de concreto sin finos, con aplanado adecuado y buen acabado es comparable en cuanto se refiere a resistencia a la penetración de la humedad, a un muro hueco construido con tabiques comunes de 28 cm. Debido a su estructura celular, no existe virtualmente una penetración capilar de la humedad en el concreto sin finos, y se ha estimado que el agua que penetra en el muro se introducirá a una distancia límite de aproximadamente igual al doble del diámetro del agregado de mayor tamaño. En esta forma, un muro exterior de concreto sin finos aplanado, se forma de un muro sin atracción capilar cubierto con un aplanado que si tiene una atracción capilar substancial, y por lo tanto, no hay tendencias del agua a introducirse dentro del muro más allá del aplanado. Hay, sin embargo, el peligro de una introducción del agua dentro del muro debido a los malos acabados en los detalles de las aberturas de ventanas y puertas o a la presencia de grietas en el aplanado; el riesgo de agrietamiento se aumenta con el uso de mezclas muy ricas para aplanar. Sin embargo, el agua que penetra en el muro a través de estas fallas no atravesará al mismo sino que se escurrirá hacia el pie del muro. Donde se usen linteles, deberá ser observadas las precauciones normales de insertar un empaque a prueba de humedad; de otra forma, el agua que escurre puede drenar hacia el interior de la pared o hacia el exterior. La zona impermeabilizada no debe drenar completamente hacia la cara exterior; por lo menos dos terceras partes del área deberán formar un nivel de apoyo. Deberán dejarse drenes por encima de la zona impermeabilizada.

Nótese que un muro de 30 cm. de ancho de concreto sin finos con agregados de grava o piedra triturada, tiene un valor de “U” que no es sustancialmente diferente al del muro de 28 cm. de ancho, hecho con bloques huecos.

Algunas pruebas realizadas en la Building Research Station han indicado que los tableros de muro de concreto sin finos de 23 cm. de espesor, aplanados con mezcla de cal y arena por el exterior no sufren penetración del agua de lluvia. La experiencia de muchos años obtenida a base de la construcción de casas hechas de concreto con escoria de hulla sin finos con muros de 23 cm. de espesor tratados exteriormente con cubiertas de mezcla sin aplanar, también confirman estos resultados. Igualmente, los muros de 20 cm. de

espesor hechos con agregados pesados y recubiertos exteriormente con mezcla sin aplanar han sido igualmente satisfactorios a través de varios años. Es verdad que se han presentado escurrimientos, pero la inspección ha mostrado que éstos resultan como consecuencia ya sea de una mano de obra defectuosa o de un mal diseño de los detalles de construcción.

8.8 OTRAS PROPIEDADES

El aislamiento del sonido de los muros divisorios de concreto sin finos no es mejor que el de los muros sólidos de tabique ordinario, y de espesor comparable, pero se le atribuye una alta absorción del sonido según lo indica la Tabla 8.5 publicada por Geo Wimpey & Co. Lt. (Short y Kinniburgh, 1967)

Tabla 8.5. Coeficientes de absorción de sonido del concreto sin finos

Materiales y métodos para fijarlos	Coeficientes de absorción		
	Baja Frecuencia 125c/s	Media frecuencia 500c/s	Alta frecuencia 2000c/s
Mampostería de ladrillo limpia o pintada	0.02	0.02	0.04
Concreto, piedra martelinada o acabados granolíticos	0.01	0.02	0.02
Placas de virutas de madera comprimidas de 7.6 cm. de espesor (sin enyesados), montados solidamente	0.20	0.80	0.80
Tableros de fibra (normal) de 1.3 cm de espesor, montados sobre trabes sólidas o de celosía, dejando espacios de aire, o con respaldos firmes	0.30	0.30	0.30
Fibra de vidrio o lana mineral de 5 cm. de espesor, sobre un respaldo firme	0.30	0.80	0.75
Concreto acústico sin finos de 15 cm. de espesor hecho con agregados de 0.5 a 1 cm	0.25	0.55	0.70
Concreto acústico sin finos de 15 cm. de espesor hecho con agregados de 1 a 2 cm	0.05	0.70	0.75

\* Los valores de los coeficientes de absorción se han tomado del B.R.S. Digest No. 36, "Sound Absorbent Treatments".

8.9 FABRICACIÓN DEL CONCRETO SIN FINOS

Los agregados adecuados son aquellos que cumplen con las normas británicas B.S. 882 para agregado natural, B.S. 1047 para escoria de alto horno, B.S. 1165 para escoria de hulla, y B.S. 877 para escoria espumosa. Los agregados más recientes para los cuales aun no se han escrito especificaciones, pero que serian igualmente adecuadas para la fabricación del concreto sin finos, son las cenizas sinterizadas de combustibles en polvo, las arcillas expansivas, los esquistos expansivos y las pizarras expansivas. El agregado no debe tener más de un 5% fijo de material retenido en la criba de 1.9 cm., y no más de 10% al material que pase la criba de 1.0 cm. Cualquier graduación dentro de estos limites se considera satisfactoria. El agregado debe estar libre de cualquier cubierta de arcilla o polvo y deberá ser redondo o tener aproximadamente la forma de cubos, más no en forma laminar como las pizarras.

La consistencia adecuada para un concreto sin finos al momento de colarse en las cimbras debe ser tal que la mezcla muestre un color uniforme con todas las gravas del agregado cubiertas por una capa de lechada de cemento. Esto no puede ocurrir si no se usa suficiente agua; mientras que cuando se usa demasiada agua, se originara que el cemento se escurra y se separe del agregado. Esto no solamente deja insuficiente lechada para lograr una adherencia satisfactoria entre el agregado, sino que redundo en depósitos de concreto denso en los niveles más bajos, así como también en una pérdida de elementos cementantes a lo largo de la cimbra.

El concreto sin finos hecho con grava se vierte tan fácilmente como un balasto suelto y por lo tanto es más o menos auto-empacable. No se recomienda "picar" el concreto después de colocado, puesto que esto puede originar la creación de zonas de alta densidad. El concreto seca rápidamente y por lo tanto es muy importante colarlo en forma continua. En la práctica se acostumbra colar los muros de una casa de tres pisos en un sólo día, evitando así juntas de construcción horizontales. El colado a profundidades desiguales debe evitarse, ya que en caso contrario se formarán juntas diagonales que en cierta forma son motivo de debilidad en los muros terminados.

Las varillas de refuerzos horizontales se colocan en ocasiones, encima y debajo de las aberturas, y los refuerzos diagonales para cortarlos a través de los ángulos de las mismas, pero más frecuentemente el refuerzo se concentra en anillos, a los niveles donde se inicia el techo. Cuando se utilizan refuerzos se reduce el riesgo de corrosión con la aplicación de una cubierta de lechada de cemento sobre el acero. El aplanado exterior debe, sin embargo, considerarse como la principal protección del acero contra la penetración del agua. Debido a su baja resistencia al cortante, no se puede confiar mucho en los linteles de concreto sin finos, realizados para claros mayores de 1.50 m.

La densidad de los concretos sin finos es aproximadamente de dos terceras a tres cuartas partes la densidad del concreto común hecho con el mismo agregado. La presión que ejerce el concreto sin finos sobre las cimbras es, por lo tanto, bastante menor que la que ejerce el concreto común. Por estas presiones reducidas y la ausencia de los “finos”, pueden ser usados sistemas de cimbras menos robustos y más baratos. Tales cimbras generalmente toman la forma de un tablero de madera contrachapada sobre una estructura ligera de madera con recubrimientos de lámina de acero.

Con el concreto sin finos la cantidad de mano de obra especializada que se requiere es mucho menor y la construcción es más rápida que para otros muchos tipos de construcción de muros. Sin embargo, debido al costo de las cimbras, el concreto sin finos sólo es económico en la construcción si existe una repetición frecuente de las plantas de los pisos.

## 9 CONCRETOS CON ALTO GRADO DE AISLAMIENTO TÉRMICO

### 9.1 INTRODUCCIÓN

Ciertos tipos de agregados son bastante apropiados para la elaboración de concretos de muy baja densidad y baja conductividad térmica. Estos agregados son la vermiculita exfoliada, la perlita expansiva y la escoria espumosa de peso pluma. En general, los concretos hechos con tales agregados no tienen suficiente resistencia como para empleárseles con el fin de soportar cargas, pero, en cambio, son particularmente apropiados como materiales para aislamientos térmicos.

En los capítulos anteriores, se han considerado los concretos que son particularmente apropiados para ser usados como materiales de carga, pero que al mismo tiempo, proporcionan un aislamiento térmico moderado. Este capítulo trata de los concretos muy ligeros con un alto aislamiento térmico pero con muy poca resistencia. Si bien es cierto que con los agregados que aquí se tratan se pueden obtener, en algunos casos, mezclas muy ricas que den resistencias suficientes para soportar cargas, el aislamiento térmico es: en estos casos, inferior y resultan generalmente antieconómicos, ya que un concreto de propiedades semejantes se puede lograr con agregados más baratos y mezclas más pobres.

### 9.2 AGREGADOS CON ALTO GRADO DE AISLAMIENTO TÉRMICO

#### 9.2.1 Vermiculita exfoliada

La vermiculita cruda es un mineral micáceo, y como tal, tiene una estructura laminar. Cuando se le calienta se expande debido a la deslaminación en forma muy semejante a como lo hace la pizarra. Sin embargo, no presenta una fusión notoria, como la que presenta la pizarra. Este tipo de expansión se llama “exfoliación” y durante este proceso la vermiculita puede expandirse a varias veces su volumen original. El producto así formado tiene un brillo áureo y posee una densidad de sólo unos cuantos kilogramos por metro cúbico.

Para obtener el producto exfoliado, el mineral crudo es secado hasta el 3% de humedad a una temperatura de 100-120°C, siendo después triturado y cribado. El material triturado se deja caer en un chorro de aire horizontal donde las partículas son transportadas a distancias variables de acuerdo con su tamaño, por un proceso llamado “winnowing”. En esta forma se separa en tres o cuatro diferentes tamaños, que son

exfoliados separadamente, al dejarlos caer a través de una llama intensa, manteniéndose así por unos cuantos segundos hasta que se dore superficialmente en temperaturas que se aproximan a los 2000°C.

La vermiculita fue exfoliada inicialmente durante la Primera Guerra Mundial, usándose un material obtenido de las minas de Colorado; ahora se obtiene de otras partes de los Estados Unidos de Norteamérica, principalmente de los Estados de Montana, y Carolina del Norte y del Sur; así mismo se obtiene en la actualidad en el África del Sur, Rusia y Australia.

Hasta 1940, la vermiculita exfoliada se usó principalmente como un relleno suelto para aislamiento en las azoteas de las casas (Short y Kinniburgh, 1967), propósitos para el cual se usa todavía, sin embargo, ahora ha tomado cierta importancia su uso como agregado para aplanados de muros y, en forma menos extensa, como agregado para el concreto.

La vermiculita exfoliada puede ser usada para fabricar bloques de concreto, y aun cascarones de techado, pero en Inglaterra se reserva casi exclusivamente para concretos de alto aislamiento, particularmente como plantilla en azoteas planas.

La densidad del agregado depende tanto de las condiciones de calentamiento como de su clasificación granulométrica, mientras que las propiedades del concreto reflejan no sólo la densidad de los agregados y las proporciones de la mezcla, sino también los métodos de mezclar los ingredientes. A este respecto se espera que un agente inclusor de aire se pueda utilizar con gran ventaja. Las propiedades del concreto de vermiculita se muestran en la Tabla 9.1.

Tabla 9.1. Propiedades del concreto de vermiculita

Densidad del concreto superficialmente (kg/m <sup>3</sup> )	368	464	576	673
Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )	8.8	20.4	33.0	41.0
Contracción por secado (%)	0.346	0.471	0.425	0.396
Conductividad térmica K (kcal/mh°C)	0.120	0.127	0.175	0.198

### 9.2.2 Perlita expansiva

La perlita es uno de los cristales volcánicos naturales, y por tanto, esta relacionada con el pómez. Sin embargo, no tiene una estructura física como la del pómez, sino que es una roca densa, cristalina, que, como su nombre implica, tiene cepas concéntricas semejantes a las de la cebolla. Cuando la roca triturada se calienta directamente sobre las llamas hasta su punto de fusión, o sea aproximadamente 1800°C, se expande en ocasiones con decrepitación, formando un material celular ligero que se ha encontrado útil como agregado, y cuya densidad oscila entre 64 y 180 kg/m<sup>3</sup>. En la práctica la roca se tritura a un tamaño graduado cuidadosamente, y después se le somete a un calentamiento rápido en un horno especialmente diseñado que permite tener un control cuidadoso de la temperatura y del tiempo de horneado. Este calentamiento produce cambios físicos y químicos que originan la formación de oquedades minúsculas, que a su vez crean la expansión y la estructura celular, dando así la ligereza y el gran poder de aislamiento del agregado.

A pesar de que desde 1836 se sabía que la perlita se expandía cuando se calentaba bajo ciertas condiciones, no fue sino hasta 1946 cuando se usó por primera vez como agregado (Short y Kinniburgh, 1967).

El material crudo se obtenía originalmente de Arizona, EE.UU., aunque en el Mediterráneo, Cerdeña es también una fuente importante de este material. Más recientemente se han procesado depósitos en Antrim, al Norte de Irlanda, y de este producto Irlandés se ha podido surtir el mercado Británico durante algunos años. En Inglaterra todavía no se le usa como agregado del concreto, pero ha encontrado aceptación como agregado para aplanados de muros. En América, sin embargo, se ha usado como agregado del concreto para bloques, tableros de muro y como protección del acero contra el fuego.

La Tabla 9.2 da los resultados que pueden esperarse del concreto de perlita, de acuerdo con el "Perlite Institute of America". En esta publicación no se da ninguna información acerca de la contracción, pero en una declaración proveniente de otras fuentes se podría sugerir que es del 0.1 al 0.3%.

Tabla 9.2. Propiedades del concreto de perlita expansiva

Densidad ( $\delta$ ) del agregado ( $\text{kg/m}^3$ )	80-320	80-320	80-320	80-320	80-320	80-320	80-320
$\delta$ del concreto superficialmente seco ( $\text{kg/m}^3$ )	320	400	480	560	640	720	800
Resistencia a la compresión ( $\text{kg/cm}^2$ )	7.0	14.1	21.8	34.4	48.5	64.6	85.8
Conductividad térmica K ( $\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ )	0.074	0.083	0.095	0.113	0.134	0.158	0.184

Se puede observar que la densidad, resistencia y conductividad térmica de estos concretos con agregados de peso muy ligero, se aproximan a aquellas del concreto aireado curado en autoclave. Cuando los concretos con agregados de perlita y vermiculita fueron primeramente establecidos en América, aún no se estaba elaborando allá el concreto aireado y es muy posible que estos tipos de concretos con agregados no hubieran sido tan bien aceptados para su propósito, si dicho concreto aireado hubiera estado disponible en ese tiempo. Por otro lado, en muchos países de Europa y de otros continentes, el concreto aireado ha sido usado con gran éxito durante muchos años, y, por lo mismo, no parece probable que en estos países la vermiculita y la perlita puedan tener la popularidad de que gozan en América.

### 9.2.3 Escoria espumosa de peso pluma

Ya se ha considerado la manufactura y uso como agregado de la escoria espumosa de altos hornos. Tal agregado produce concreto de una calidad capaz de soportar cargas, y sin duda, puede ser usado como concreto reforzado para las estructuras. Se ha demostrado que con una modificación apropiada en el proceso de espumación, la escoria espumosa puede producirse en una forma muy ligera, comparable en densidad con la perlita y la vermiculita. Hasta ahora este material se ha fabricado solamente en cantidades experimentales.

## 10 CONCRETO ESTRUCTURAL LIGERO

### 10.1 INTRODUCCIÓN

Los concretos livianos se definen en ACI 213R como aquellos que poseen una densidad en estado seco al aire menor a  $1900 \text{ kg/m}^3$ , y pueden dividirse en tres tipos: los concretos aireados que se fabrican con aditivos espumantes, los concretos sin finos, y los concretos con agregados livianos. Con el uso de agregados livianos de origen artificial, se ha logrado fabricar concretos con alta resistencia a compresión y baja densidad. De esta manera surge el concepto de concreto liviano estructural, el que se describe en ACI 213R, como aquellos concretos livianos con una resistencia a compresión cúbica superior a  $180 \text{ kg/cm}^2$ .

El concreto ligero es el que pesa sustancialmente menos que el preparado con agregados de grava o piedra triturada. Se acepta que esta definición somera, generalmente cubre un amplio rango de concretos con pesos que van desde  $190$  hasta  $1,900 \text{ kg/m}^3$ , y son muchos los tipos de concreto que se encuentran dentro de este campo. Algunos son concretos celulares preparados con espuma o agentes espumosos, otros, con agregados ligeros, y algunos otros concretos celulares contienen también agregados ligeros. También los hay que pueden contener algo de arena de peso normal. La resistencia a la compresión de estos concretos cubre una variedad aún más amplia con elementos estructurales ligeros de  $420 \text{ kg/cm}^2$  hasta concretos totalmente celulares de  $80 \text{ kg/m}^3$ .

El concreto de agregado ligero es el que generalmente se prefiere para propósitos estructurales, donde su uso conduce a un costo menor de la estructura del que podría esperarse con el concreto de peso normal. El costo unitario, generalmente más elevado, del concreto estructural ligero se compensa por la reducción de cargas muertas y menores costos de cimentación. Asimismo, existen ventajas especiales cuando se trata de modificar o de aumentar estructuras ya existentes; por ejemplo, se tiene la referencia de una tienda de departamentos en Cleveland, se le agregaron cuatro pisos sin que fuera necesario modificar la cimentación. Adicionalmente, el caso del Tacoma Narrows Bridge, en donde los pilotes originales pudieron soportar la carga de los carriles adicionales de tránsito gracias al uso de concreto estructural ligero en el piso del puente.

Los concretos livianos estructurales presentan, entre otras ventajas, estructuras de menor peso propio que requieren de cimentaciones de menor tamaño, permiten edificaciones de mayor altura y el desarrollo de tecnologías de prefabricación, disminuyen las fuerzas sísmicas, presentan un mejor comportamiento térmico

que se traduce en una menor deformabilidad ante cambios de temperatura y tienen mejores propiedades de aislamiento térmico y acústico.

Las propiedades del concretos con agregados livianos, dependen en gran medida de la cantidad y propiedades del agregado particular que se esté utilizando, así como también de los otros componentes del concretos (dosis de cemento, agua, granulometría, aditivos), por lo que es posible inferir que el uso de un determinado agregado liviano no define en sí las propiedades del concreto. Gran parte de su desarrollo se ha concentrado en la arcilla y pizarra expansivas, agregados con los que se han logrado las mejores propiedades mecánicas; al aplicar otros tipos de agregados a las dosificaciones propuestas, generalmente, se han observado grandes diferencias.

Como consecuencia de lo anterior, la tecnología de los concretos livianos no ha llegado a los mismos niveles de conocimiento y desarrollo que la tecnología del concreto tradicional. Se hace importante contar, por lo tanto, con una tecnología adecuada para el diseño y fabricación de concretos livianos. Para tal efecto es de gran importancia desarrollar, entre otras cosas, métodos de dosificación adecuados para concretos a base de agregados liveros disponibles en el país y procedimientos o métodos para predecir sus propiedades.

El concreto de agregado ligero ha demostrado en las pruebas y en la práctica un comportamiento estructural muy similar al del concreto de peso normal, aunque el diseñador debe comparar las ventajas del menor peso y el mejor aislamiento del concreto ligero con su costo adicional. También el constructor debe conocer las diferencias mínimas que existen entre los dos tipos de concreto respecto a la transportación, el colado y el acabado. Una mayor información puede obtenerse del fabricante de agregados liveros a través de su asesoría de campo y servicios técnicos.

*Tabla 10.1. Contenido de cemento para concretos liveros y diferentes resistencia a la compresión (ACI 213)*

Resistencia a la compresión $f_c'$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Contenido de cemento (kg/m <sup>3</sup> )	
	Ligero	Ligero con arena
175	237-303	237-303
210	251-332	249-332
280	314-392	291-392
350	374-445	365-445
420	439-408	415-498

## 10.2 TIPOS DE AGREGADOS

De acuerdo con el American Concrete Institute (ACI), los concretos estructurales con agregados liveros tienen una resistencia a la compresión a los 28 días de 180 kg/cm<sup>2</sup> o más, y un peso que no excede de 1,900 kg/m<sup>3</sup>. Las propiedades especiales de los concretos liveros para uso estructural provienen del uso de agregados de baja densidad, cuyas partículas tienen una estructura interna celular, la cual puede ser provocada, u ocurrir naturalmente en materiales no procesados.

Las especificaciones del ACI para concretos estructurales liveros están basadas en concretos preparados con agregados procesados que cumplen con los requisitos de la norma ASTM C-330. Entre estos se incluyen:

- Pizarras, esquistos y arcillas expansivas en horno rotatorio
- Arcillas y esquistos expansivos en rejilla de sinterización
- Ceniza volante extruida o granulada
- Escorias expansivas

Sin embargo, el concreto estructural ligero también puede elaborarse con otros tipos de agregados, como piedra pómez, escoria naturales, con cenizas adecuadas, entre otras.

Las propiedades de los agregados liveros, tales como: forma de la partícula, textura de la superficie, gravedad específica, peso unitario, diámetro de la partícula, resistencia, contenido de humedad y absorción, afectan las propiedades del concreto ligero fresco o endurecido, al igual que lo hacen las propiedades similares de los agregados de peso normal, pero la calidad de la pasta de cemento también ejerce una influencia importante sobre las propiedades del concreto.

### 10.2.1 Agregados ligeros para el concreto reforzado

El agregado usado para el trabajo de concreto reforzado debe producir un concreto que sea adecuadamente fuerte, y capaz de una compactación satisfactoria; debe de ser durable y estar libre de ingredientes dañinos. Como se ha mencionado antes, la presencia del refuerzo de acero en el concreto impone ciertas restricciones en la selección del agregado, cosa que en general no necesita aplicarse al concreto masivo o a concretos porosos usados para construcción de bloques de mampostería, para muros o tableros de pared colados in situ sin refuerzo.

Se sabe que la escoria de calderas contiene cantidades variables de azufre, y no debe ser usada, por lo tanto, para el concreto reforzado. Los agregados orgánicos tampoco son apropiados para el trabajo del concreto reforzado porque estos pueden carecer de estabilidad dimensional adecuada, esto es, se encogen o hinchan excesivamente al cambiar el contenido de humedad, y en muchos casos su durabilidad es imprecisa.

En principio, los reglamentos de construcción deberían servir de guía a ingenieros calificados en el diseño de concreto reforzado; por lo tanto les corresponde a ellos decidir con base en su experiencia y juicio, si un agregado particular puede juzgarse apropiado para usarse en las estructuras del concreto reforzado mayores o subsidiarias de las cuales ellos son responsables. Sin embargo, la autoridad de un ingeniero está restringida por reglas, por mandatos y por reglas de estatutos las cuales se basan generalmente en los códigos de práctica. Parece deseable, por lo tanto, que los códigos relevantes deban ser revisados a intervalos regulares para que puedan incluir todos los materiales disponibles, tales como los nuevos tipos de agregados de peso ligero, y que consideren cuales son las limitaciones que el uso del concreto ligero requiere aún.

El Código de Prácticas de las Normas Británicas para el concreto reforzado (CP-114), menciona cuatro tipos de agregados pesados y ligeros (naturales y artificiales) que se juzga son admisibles para miembros subsidiarios incluyendo tableros de pared, y losas de piso y azoteas. Estos agregados son: escoria de alto horno enfriada por aire y que llena los requisitos de la B.S. 1047; escoria espumosa de alto horno que llena los requisitos B.S. 877; ladrillo de arcilla triturada y baldosa que no contengan más de 1% de sulfato; y pómez natural libre de impurezas. Dicho código, sin embargo, no excluye a los demás agregados que no fueron mencionados explícitamente, siempre y cuando sean adecuados, teniendo en cuenta su resistencia, durabilidad, y que estén libres de elementos dañinos.

En los Estados Unidos, el Código de Requisitos para la Construcción A.C.I. con concreto reforzado (ACI-318) que son aplicables a ambos concretos, con agregados de peso ligero y común, usados para trabajo estructural, permite el uso de los agregados de peso ligero cuando cumplen con la especificación ASTM C 330. Ésta especificación admite, en términos generales, a los agregados compuestos predominantemente de materiales inorgánicos celulares o granulares. Éstos incluyen agregados artificiales que se obtienen por expansión, calcinación y productos sinterizados, tales como la escoria de alto horno, arcilla, diatomita, ceniza muy fina, esquistos o pizarras, y a los agregados preparados procesando materiales naturales como el pómez, la escoria volcánica o las tobas.

En Alemania, el Código de Prácticas para la Construcción con Concreto Reforzado DIN 1045, permite expresamente el uso del ladrillo triturado, la escoria de alto horno enfriada por aire o espumosa, la toba y el pómez como agregados para el concreto reforzado, pero no prohíbe explícitamente el uso de otros tipos de materiales. El pómez es usado en Alemania para las losas reforzadas de azotea, principalmente para techados industriales, en donde estos componentes deben ajustarse a las Normas Alemanas de Especificaciones DIN 4028. El concreto de pómez no es en general apropiado para trabajos colados in situ a causa de la tendencia de este agregado a flotar hacia la superficie, conduciendo así a la segregación de la mezcla. En su estado natural contiene usualmente impurezas, y si se usa con refuerzo debe ser lavado antes de mezclarse.

En algunos países tropicales se usan ampliamente los corales (agregados calcáreos de origen marino), para la construcción de concreto reforzado. La principal dificultad que se ha encontrado con este tipo de material parece ser su contenido salino. No se tiene hasta el presente bastante información sobre su resistencia, densidad y otras propiedades.

De acuerdo con Short y Kinniburgh (1967), la escorias espumosas fue el primer agregado de peso ligero apropiado para el concreto reforzado que se produjo en el Reino Unido en grandes cantidades.

En Alemania, la escoria espumosa compite con el pómez como agregado para miembros de concreto precolado, pero su principal uso es para el "Schiittbeton" o construcción de muros de carga colados in situ, así

como para bloques. En la Gran Bretaña y en los Estados Unidos su uso para concreto reforzado no es muy común, pero en Europa Oriental, particularmente en Checoslovaquia, Alemania Oriental y Rumania la escoria espumosa es usada ampliamente para la construcción de concreto reforzado colado in situ; y también para grandes estructuras con paneles precolados para casas y estructuras de varios pisos.

La arcilla y el esquisto expansivos producen un concreto de alta calidad capaz de obtener una resistencia lo suficientemente alta hasta como para usarse con concreto presforzado. En el Reino Unido (Short y Kinniburgh, 1967), su uso para la construcción de unidades estructurales tanto precoladas como coladas in situ está ahora bien establecido, bajo los nombres comerciales de "Aglite" y "Leca". En los Estados Unidos se venden agregados similares bajo varios nombres comerciales, por ejemplo: "Haydite" "Rocklite" "Gravelite" "Aglite", etc. En Europa Oriental se hace un uso considerable de "Keramzit" para trabajos de concreto reforzado. En Dinamarca, donde se originó el "Leca", éste es el único agregado artificial disponible para las unidades de concreto reforzado precoladas; se hace en hornos rotatorios.

La pizarra de desperdicio, al ser sometida al calor, se expande y forma un agregado inerte químicamente, y resistente apropiado para el concreto reforzado. En los Estados Unidos y en Alemania Oriental la pizarra expansiva ha sido usada para este propósito.

El agregado de cenizas sinterizadas de combustible en polvo se está usando en el mundo para una variedad de propósitos estructurales y en ocasiones se vende bajo el nombre de "Lytag". Este material es apropiado también para el concreto reforzado.

### 10.3 PROPIEDADES FÍSICAS

#### 10.3.1 Efecto de la relación agua-cemento

Las curvas de diseño correlacionando la resistencia a la compresión en cubos y la relación agua-cemento del concreto común no son aplicables al concreto con agregados de peso ligero. Debido probablemente a su porosidad y trabajabilidad inferior, este último necesita un contenido de agua mayor para adquirir la misma resistencia que el concreto común correspondiente.

El efecto de la relación agua-cemento sobre la trabajabilidad y la resistencia de compresión del concreto ligero ha sido considerado ya en detalle en el capítulo 3. Se ha mostrado que existe una amplia relación entre la resistencia a la compresión en cubos y la relación de agua-cemento, pero que esta relación es diferente para cada tipo de agregado ligero y se debe considerar por separado.

Las pruebas hechas en la Building Research Station, indican que puede ser deducida una relación lineal a partir de la relación agua-cemento y del módulo de ruptura para las mezclas de concreto ligero totalmente compactado.

#### 10.3.2 Efecto de la adición de arena

Es práctica común reemplazar una parte del agregado fino de peso ligero por arena de cuarzo de río en las mezclas de concreto ligero, con objeto de aumentar la resistencia a la compresión y de mejorar la adherencia del concreto resultante; también sirve para mejorar la durabilidad y la protección contra la corrosión que puede proporcionar al refuerzo, para aumentar su trabajabilidad, para reducir la cantidad de cemento y el encogimiento del concreto. Y que se ha demostrado que la adición de arena aumenta también la densidad del concreto, la duda surge en cuanto al grado en que esta desventaja pueda ser balanceada por las ventajas de añadir arena a la mezcla. El aumento de densidad es de menor importancia en el concreto de escoria espumosa, pero es relativamente más importante para los agregados más ligeros sinterizados.

No es muy grande el efecto de la adición de arena sobre la resistencia de adherencia en el concreto ligero, exceptuando, desde luego, que la resistencia de adherencia tiende a aumentar con la resistencia a la compresión. Para la misma resistencia a la compresión, sin embargo, la presencia de arena en la mezcla no causa un cambio substancial en la resistencia de adherencia. Tampoco es muy notable su efecto en la durabilidad. El encogimiento del concreto ligero se reduce por la adición de arena, la cual actúa como elemento estabilizador en la estructura de la matriz.

Para las mismas resistencias a la compresión y la misma trabajabilidad, la arena reemplaza algunas proporciones del cemento en el material aglutinante y puede reducir los requerimientos de cemento para

algunos tipos de agregados de peso ligero. Pruebas hechas en la Building Research Station muestran que para varios tipos de concretos ligeros y varias mezclas, los requerimientos de cemento se deducían en 13 a 25% en peso, si la mitad de los finos de peso ligero en volumen eran reemplazados por arena de río. La mayor economía de cemento debida a la adición de arena fue obtenida en concretos de escoria espumosa; el consume de cemento hecho con tipos de agregados sinterizados se afecto menos con la adición de la arena.

Aparentemente en el caso del concreto de escoria espumosa una parte substancial del cemento que de otra manera habría penetrado en los poros abiertos del agregado duro de escoria espumosa durante la mezcla, y se hubiera endurecido ahí, contribuyendo poco a la resistencia del concreto, se reemplazo con arena. Por otra parte, la adición de la arena tiene el efecto de mejorar substancialmente las propiedades del concreto, con menos cemento y sin aumentar mayormente el peso del material. Los finos de escoria espumosa de peso ligero no pueden penetrar en los poros abiertos porque ellos mismos consisten en partículas duras de una naturaleza porosa, aunque los poros sean mucho más pequeños que los del agregado grueso. Las partículas de arena son, frecuentemente, mucho menos duras y son capaces de entrar en los poros abiertos. Por la misma razón, generalmente se aumenta más la trabajabilidad con la escoria espumosa que con otros tipos de agregado, si se adiciona arena a la mezcla. La trabajabilidad al ser mejorada conduce a una reducción en el tiempo requerido para mezclar el concreto adecuadamente, preservando así la graduación de este tipo frágil de agregado. Una trabajabilidad mejor, redundo en una mejor compactación y en una mayor resistencia para la misma densidad.

En el caso de agregados sinterizados, los poros abiertos rotos en la superficie son generalmente más pequeños que los de la escoria espumosa y, por lo tanto, tienden en esta forma a absorber menos aglutinante. Como regla, por lo tanto, la adición de arena a mezclas de concreto ligero que no sean de escoria espumosa, tiene muy pocas ventajas, excepto en casos especiales. Estas circunstancias pueden surgir, por ejemplo, cuando es necesario aumentar la resistencia a la compresión del concreto ligero sin tomar mucho en cuenta la densidad, para una componente estructural particular.

El porcentaje de aumento en densidad, así como la reducción en el consumo de cemento, que pueden ser obtenidos con la adición de arena a la mezcla de concreto ligero, tiende a volverse menos importante al aumentar la resistencia a la compresión del concreto. Por lo general, las mezclas débiles son más sensibles a la adición de arena o de otros materiales. Particularmente en la construcción de muros de carga colados in situ (schlüt beton), la escoria granulada triturada ha sido usada con mezclas patentadas (construcción de termoconcreto). Puesto que la escoria granulada tiene marcadas características puzolánicas, su presencia en la mezcla en vez de arena puede conducir no sólo al ahorro de peso y de cemento, sino a mejorar su trabajabilidad y mejorar las características de envejecimiento.

### 10.3.3 Aire incluido y aditivos

Al igual que en concretos de peso normal, con frecuencia se usan aditivos reductores de agua o plastificantes, para aumentar la trabajabilidad y hacer más fácil el colado y el acabado del concreto ligero; el aire incluido también contribuye a mejorar la trabajabilidad y la durabilidad del concreto estructural ligero. Las recomendaciones del ACI para el total de aire incluido por volumen, en concretos estructurales ligeros, son las siguientes:

- 4 a 8 % para agregado de 2 cm de diámetro máximo
- 5 a 9 % para agregado de 1 cm de diámetro máximo

La resistencia a la compresión puede reducirse 10.5 kg/cm<sup>2</sup> o más, por cada porcentaje adicional de aire sobre los límites señalados y no conviene incrementar el contenido de aire más allá de los límites especificados, por tratar de reducir el peso unitario del concreto.

### 10.3.4 Mezclado y colado

Por lo general, los procedimientos para mezclar concreto estructural ligero son similares a los utilizados en concretos normales, pero algunos de los agregados más absorbentes pueden necesitar un humedecimiento previo a la adición de los otros ingredientes de la mezcla. El agua que se añade a la planta de premezclado debe ser suficiente para proporcionar el revenimiento especificado en la obra, probablemente el revenimiento en la planta sea más elevado.

Una trabajabilidad adecuada, observada por el revenimiento del concreto, es necesaria para que el concreto endurecido adquiera todas las propiedades deseadas. El revenimiento de los concretos para pisos, generalmente está limitado a 10 cm, pero un revenimiento de 7.5 cm puede ser mejor para mantener la cohesión de la mezcla y evitar que, durante el acabado, las partículas gruesas más ligeras suban a través del mortero hasta la superficie. Con ciertos agregados de tamaño menor a la malla núm. 30, puede facilitarse el acabado usando una porción de arena natural como complemento de los agregados finos ligeros.

Una mezcla ligera bien proporcionada, generalmente puede colarse y aplanarse con la llana con menos esfuerzo que el necesario para una mezcla de peso normal. La preparación de la superficie antes del aplanado, se hace mejor con talachas o llanas de aluminio o magnesio para reducir al mínimo la rotura de la superficie y el desprendimiento del agregado. El uso de llanas vibratorias puede ser conveniente, pero el trabajo excesivo de vibración puede causar problemas en el acabado: demasiado esfuerzo puede empujar al mortero más pesado lejos de la superficie, donde es necesario, y llevar un exceso de agregado grueso ligero hacia la superficie.

### 10.3.5 Bombeo

Cuando se trata de bombear mezclas de concreto con agregado ligero, debe consultarse con diseñadores, proveedores y contratistas, respecto a los ajustes que se deben hacer a la mezcla para determinar su punto óptimo de bombeo.

Además, se recomienda llevar a cabo una prueba de campo con la bomba y la mezcla que piensan usar en la obra. Generalmente, es importante humedecer el agregado ligero que va a usarse en la mezcla que se va a bombear. Esta saturación reduce la capacidad del agregado para absorber agua durante el proceso de bombeo y, de esta manera, se reduce al mínimo la pérdida de revenimiento. La humedad adicional absorbida, incrementa la densidad del agregado, lo que a su vez aumenta la densidad del concreto, pero este peso adicional finalmente se pierde en el aire y proporciona humedad adicional para el curado del concreto durante el periodo de secado. Este tipo de concreto debe dejarse secar adecuadamente antes de exponerlo a ciclos de congelación deshielo.

## 10.4 PROPIEDADES MECÁNICAS

### 10.4.1 Densidad y resistencia a la compresión

La densidad del concreto ligero seco compactado hecho con diferentes agregados varía de 1280 a 2020 kg/m<sup>3</sup> para resistencias en cubos que van de los 70 a los 350 kg/cm<sup>2</sup>. Sin embargo, la relación entre la resistencia en cubos y la densidad, varía considerablemente para concretos hechos con diferentes tipos de agregado.

Para el concreto de grava y arena, por ejemplo, la densidad media varía desde aproximadamente 2230 kg/m<sup>3</sup>, con una resistencia a la compresión en cubos a los 28 días de cerca de 70 kg/cm<sup>2</sup>, hasta aproximadamente 2310 kg/m<sup>3</sup> con resistencias en cubos de cerca de 281 kg/cm<sup>2</sup>. Para el mismo promedio de resistencia en cubos a los 28 días la densidad seca del concreto compactado de escoria espumosa varía de 1682 kg/m<sup>3</sup> a 1923 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, cuando la mezcla contiene solamente agregado de peso ligero en partes iguales, las densidades correspondientes varían entre 1860 y 1988 kg./m<sup>3</sup>, respectivamente. La densidad seca del concreto hecho con agregados de arcilla expansiva y con cenizas sinterizadas de combustible en polvo varía entre 1362 y 1602 kg/m<sup>3</sup> si está hecho sin arena, y entre 1602 y 1762 kg/m<sup>3</sup> cuando los finos incluyen arena; todo esto para el mismo límite de resistencias a la compresión compresión en cubos, a los 28 días.

Por lo tanto, mientras que para las mismas resistencias a la compresión en cubos, el peso de los concretos con agregados de arcilla expansiva y de cenizas sinterizadas de combustible en polvo, conteniendo sólo agregado ligero, es de 60 a 70% del peso del concreto común de grano, el peso del concreto de escoria espumosa es de 80 a 85% del peso del concreto de grava correspondiente. Si se agrega a las mezclas de concreto ligero, entonces su densidad resulta algo más alta; el efecto de la adición de arena sobre la densidad del concreto de escoria espumosa es menor que para los agregados de cenizas sinterizadas.

Aunque el concreto compactado hecho con agregado de escoria espumosa parece ser más pesado que el concreto hecho con otros tipos de agregado de peso ligero, esta diferencia en peso tiende a desaparecer en mezclas porosas no compactadas. Se ha encontrado, también, que para la misma resistencia a la compresión, el agregado de escoria más pesado y duro produce un concreto más ligero.

La mayor densidad del concreto de escoria espumosa se debe, en parte, a la mayor densidad en masa y también a la gravedad específica más alta que tiene el agregado en comparación con los otros tipos de agregados ligeros. Más importante aún, sin embargo, es el hecho de que la escoria espumosa tiene una textura superficial con los poros abiertos. Aunque usualmente se tomen precauciones para saturar el agregado con agua antes de usarlo, se puede acumular algo de cemento en los poros abiertos, aumentando así el peso del concreto. Debido al carácter frágil del material, la graduación del agregado puede cambiar durante el mezclado y la compactación debido al rompimiento del agregado grueso, reduciendo así su tamaño. Esto puede reducir el rendimiento del concreto compactado.

Al añadir arena a las mezclas de concreto ligero, se incrementa considerablemente su densidad y su resistencia a la compresión. Para el concreto de escoria espumosa de alta resistencia y densidad, la adición de arena tiene poco efecto, sobre estas propiedades. Para los agregados de cenizas de combustible en polvo y de arcilla expansiva, sin embargo, se incrementa considerablemente la densidad del concreto, y es generalmente de mayor importancia que cualquier aumento en la resistencia a la compresión lograda por la adición de arena a la mezcla. Por ejemplo, mientras que para el concreto de escoria espumosa el aumento en densidad debido a la adición de arena puede variar de 3.5% en resistencias bajas a menos de 1% en concretos de mayor resistencia, los aumentos correspondientes en densidad para concretos de arcilla sinterizadas y cenizas de combustible en polvo puede variar de 10 a 129%. El efecto de la adición de arena al concreto de escoria espumosa ha sido sujeto a un estudio detallado por Parker y Newman (Short y Kinniburgh, 1967).

La resistencia de las partículas de agregados ligeros varía de acuerdo con su tipo y origen, sin que exista una relación confiable entre la resistencia del agregado y la resistencia del concreto. Todos los agregados tienen un límite de resistencia, es decir, una resistencia máxima alcanzable con una cantidad razonable de cemento. La resistencia a la compresión de concretos con agregados ligeros a determinado revenimiento, generalmente esta más relacionada con el contenido de cemento que con la relación agua/cemento; en la tabla siguiente se muestran algunas relaciones aproximadas entre la resistencia promedio y el contenido de cemento. En algunos casos puede aumentarse la resistencia a la compresión, sustituyendo parte del agregado ligero fino con arena natural de buena calidad.

#### 10.4.2 *Módulo de elasticidad*

Para la misma resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad del concreto ligero es en general considerablemente menor, que el del concreto común de grava (Short y Kinniburgh, 1967). Para el concreto de alta resistencia la diferencia en porcentaje es un poco mayor que para mezclas más débiles, pero en general el valor E del concreto ligero varía entre 3% y 5% del valor E del concreto común correspondiente.

El módulo de elasticidad se incrementa con la resistencia en cubos y con la densidad del concreto; se han derivado varias expresiones empíricas por distintos investigadores para correlacionar estas propiedades. El módulo de elasticidad (E) del concreto ligero, de acuerdo con Short y Kinniburgh (1967), varía entre 70,000 y 210,000 kg/cm<sup>2</sup> para diferentes resistencias, diferentes agregados y bajo cargas de corta duración. Sin embargo, con el desarrollo de la tecnología de los concretos de alta resistencia, es posible superar el límite mencionado del módulo de elasticidad (E. Perea, 2002).

El módulo de elasticidad tiene especial importancia para la construcción con concreto ligero tipo estructural a causa de su efecto sobre las deformaciones en los miembros sometidos a flexión, sobre la distribución de los esfuerzos internos en la sección transversal de los miembros a compresión, y sobre la carga crítica en el caso de miembros con probabilidades de falla debido a inestabilidad elástica, donde el valor menor de E en el concreto ligero tiene una influencia desfavorable. Por otro lado, la resistencia de los miembros de concreto ligero a cargas de impacto puede ser aumentado por su módulo de elasticidad menor.

#### 10.4.3 *Rigidez y agrietamiento*

Todavía no se ha logrado un acuerdo general sobre cual deba ser el máximo valor aceptable para las deformaciones que no debe ser excedido en diferentes tipos de estructuras. 1/180 del claro es el límite de deformación establecido en algunos casos por el Código Americano. Esto no parece conservador según las prácticas Británicas en donde es más usual 1/300 del claro. En México, generalmente se limitan los desplazamientos a 1/240 del claro de las vigas.

La rigidez de los miembros de concreto reforzado debe ser tal que las deformaciones excesivas no obstaculicen sus funciones, es decir que no produzcan agrietamientos en los acabados o en los muros divisorios. En todos los casos normales esta condición puede considerarse satisfecha cuando las trabes y losas de concreto ligero, cumplen con las relaciones de claro a peralte total que no excedan los valores dados en la Tabla 10.2. Estas relaciones claro-peralte son un poco más bajas que aquellas permitidas en el Código para el concreto común, de manera que se tome en cuenta la propensión de los miembros de concreto agregado de peso ligero a deformarse un tanto más que los miembros de concreto común, a causa de su módulo de elasticidad menor. Las pruebas indican que las diferencias en deformaciones pueden variar entre 10 y 50%, dependiendo del porcentaje de refuerzo y del comportamiento al agrietarse, así como también del valor E.

*Tabla 10.2. Valores máximos sugeridos de la relación claro-peralte para miembros de flexión hechos de concreto con agregados ligeros*

Elemento	Relación del claro al peralte	Condiciones de apoyo
Vigas	Libremente apoyado	17
	Continua	21
	En voladizo	9
Losas trabajando en una sola dirección	Libremente apoyadas	26
	Continua	30
Losa trabajando en dos direcciones	Libremente apoyada	30
	Continua	34
	En voladizo	10

La simplicidad de este método de asegurar una rigidez adecuada para los miembros de flexión de concreto reforzado es, sin embargo, a menudo sobrevalorizada por su incertidumbre. En vista de las mayores deformaciones elásticas iniciales, y del mayor flujo plástico de la mayoría de los concretos con agregados de peso ligero, es aconsejable revisar las deformaciones por medio de cálculos, particularmente para el caso de acero de refuerzo de alta resistencia, y no confiarse enteramente a las relaciones claro-peralte permitidas para asegurar una rigidez adecuada.

En el caso de miembros precolados, en donde un gran número de unidades iguales se hacen con el mismo diseño, es preferible usar pruebas de cargas para revisar la rigidez de los miembros en cuestión. Una carga impuesta igual a 1.4 veces la carga impuesta especificada deberá mantenerse por un periodo de 24 horas por lo menos, y las deformaciones medidas no deberán exceder de 1/240 del claro. Al quitar la carga, el miembro deberá recobrar por lo menos el 75% de la máxima deformación medida durante la prueba.

Las trabes esbeltas de claros grandes expuestas a la intemperie tienden a desarrollar grandes deformaciones después de un tiempo, debido al flujo plástico del concreto. Estas deformaciones pueden perjudicar las funciones para las cuales fue diseñada la estructura. Por ejemplo, en el caso de un hangar con trabes de concreto reforzado de proporciones esbeltas, las deformaciones, después de unos cuantos meses de servicio se tomaron tan grandes que las puertas no se podían cerrar y tuvieron que ser realineadas. Debido a la mayor propensión a fluir plásticamente, las trabes de concreto con agregado de peso ligero son más susceptibles a desarrollar deformaciones permanentes excesivas, y esto debe tomarse en cuenta al diseñar.

Cuando el tramo sin soporte lateral de una trabe esbelta es grande, en relación al ancho de su sección transversal, por ejemplo cuando esta relación es mayor de 30, no puede ni debe ser ignorado el peligro de una falla debida a inestabilidad torsional. La propensión a tal tipo de falla es incrementada aún más por las imperfecciones iniciadas en el alineamiento de la viga.

Los agrietamientos son generalmente más severos en las trabes de concreto ligero que en las de concreto común. Esta tendencia se presenta independientemente del tipo de agregado ligero utilizado, del porcentaje de acero de refuerzo, y en gran parte también del tipo de acero empleado. Para barras de acero suave, redondas y lisas, la diferencia entre el concreto de grava y el concreto ligero en cuanto agrietamiento se acentúa con mayores cargas. Con barras deformadas la diferencia tiende a permanecer constante. El espaciamiento entre grietas disminuye ligeramente con el incremento de carga, pero es casi siempre mayor para las trabes de concreto ligero que para las de concreto común. Los mayores anchos de las grietas y su mayor espaciamiento

se explican por la menor resistencia de adherencia y de anclaje del concreto ligero, así como también por las deformaciones que son más grandes.

En condiciones normales, la seguridad y durabilidad de los miembros de concreto ligero no es en general grandemente afectada por esta tendencia a desarrollar mayores anchos de las grietas. Sin embargo, en donde sea posible encontrar condiciones corrosivas, puede ser necesario tomar medidas especiales de protección. El uso de una lechada de cemento cubriendo las barras de refuerzo antes del colado del concreto, aumenta su resistencia a la corrosión.

#### 10.4.4 Flujo plástico

El concreto no es un material dimensionalmente estable, aun donde no haya cambios de temperatura. Debido a la pérdida de humedad esta sujeto a encogimiento; se expande si se moja, y se deforma permanentemente o fluye plásticamente cuando se somete a esfuerzos sostenidos de compresión o de tensión. Aunque los movimientos de humedad y de flujo plástico varían fundamentalmente en cuanto a 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 concreto, la mezcla que se utilice, el tipo de agregado usado, las dimensiones del miembro, y otros factores.

El flujo plástico del concreto de peso ligero tipo estructural ha sido el tema de las investigaciones de Schideler Evans del Instituto de Investigaciones para la Industria del Cemento en Diisseldorf, y de otros. En la Building Research Station las investigaciones sobre el flujo plástico se han ocupado del comportamiento de los miembros de flexión de concreto reforzado sujetos a cargas bajo condiciones controladas de temperatura y humedad, sin la intención de medir el encogimiento y las deformaciones causadas por el flujo plástico por separado. La mayor parte de las pruebas hechas por otros investigadores se habían realizado con cilindros de concreto sujetos a cargas axiales o en contadas ocasiones, a cargas excéntricas.

Para la misma resistencia a la compresión, tanto el encogimiento como el flujo plástico de la mayor parte de los concretos de peso ligero son generalmente mayores que aquellos en el concreto común. El resultado de las pruebas de flujo plástico en agregados de concreto comunes y ligeros con una resistencia a la compresión en cubos de 210 a 350 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días, indican que para una duración menor de un año de carga, algunos agregados de arcilla, esquistos, y pizarras expansivas, pueden tener un flujo plástico menor que el del concreto común. Al aumentar la duración de la carga, sin embargo, el flujo plástico del concreto ligero tiende a aumentar a una velocidad mayor que el del concreto común. El flujo plástico último calculado era invariablemente mayor para el concreto con agregados de peso ligero que para el concreto de grava común, variando la diferencia entre 20 y 60% del flujo plástico de este último. El flujo plástico último puede ser calculado con la ecuación hiperbólica que se encontró razonablemente aplicable a los resultados de las pruebas (Short y Kinniburgh, 1967).

$$e_c = \frac{m_c \cdot t \cdot s}{n_c + t} \quad (10.6)$$

Donde: “ $e_c$ ” denota la deformación unitaria por el flujo plástico al tiempo “ $t$ ”; “ $m_c$ ” denota la deformación unitaria por flujo plástico último; “ $t$ ” denota el tiempo bajo carga (días); “ $s$ ” denota el esfuerzo (kg/cm<sup>2</sup>); y “ $n_c$ ” denota el tiempo en días, cuando  $e_c = m_c/2$ .

Para el concreto que tenga una resistencia a la compresión alta (490 a 630 kg/cm<sup>2</sup>) y el flujo plástico medido es generalmente menor para cada tipo de agregado que para concretos más hábiles, pero la reducción es generalmente algo mayor para los concretos ligeros que para los comunes. El flujo plástico del concreto ligero con resistencias a la compresión tan alta es de 0 a 20% mayor que para el concreto común correspondiente.

Para resistencias a la compresión de 210 a 280 kg/cm<sup>2</sup> el flujo plástico de los concretos ligeros hechos con diferentes agregados tiende a variar considerablemente. Se encontró en la Building Research Station que la deformación permanente de las trabes hechas con agregado de escoria espumosa bajo cargas es ligeramente mayor que la del concreto hecho con otros tipos de agregado de peso ligero y que la deflexión permanente de los miembros de concreto de grava común es menor.

#### 10.4.5 Adherencia

Los esfuerzos de adherencia permisibles están definidos en los códigos en relación a la resistencia a compresión. Una determinación experimental, confiable y directa sobre la resistencia de adherencia, no es posible actualmente. Aun como índices de comparación de la resistencia de adherencia para los diferentes tipos de concreto o de barras de acero, los resultados obtenidos en las pruebas de adherencia, no son siempre confiables, en particular los especímenes de extracción de barras ahogadas.

Los resultados de pruebas comparativas de adherencia hechas con traveses, indican que la resistencia de adherencia del concreto ligero con barras redondas ordinarias de refuerzo, es usualmente menor que la obtenida en concreto común de igual resistencia a la compresión. En el caso de barras deformadas, la resistencia de adherencia de anclajes es del mismo orden para todos los tipos de concreto que tengan la misma resistencia a la compresión, cualquiera que sea el agregado usado. Por otra parte, la fuerza requerida para producir un determinado deslizamiento crítico, digamos de 0.0025 cm entre el concreto y las barras deformadas ahogadas, es menor para el concreto ligero que para el concreto con agregado común.

En vista de los resultados obtenidos de las pruebas en traveses de adherencia, es necesario en los miembros de flexión de concreto ligero permitir un esfuerzo de adherencia que sea más o menos de la mitad del permitido para barras redondas simples ahogadas en concreto de agregado común que tengan la misma resistencia a la compresión.

Enseguida, se discutirá la interacción entre el acero y el concreto a través de las fuerzas de adherencia y de anclaje y se interpretan los resultados de las pruebas de adherencia hechas con traveses de concreto con agregados de peso ligero y especímenes de extracción usando diferentes tipos de barras de acero (lisas o corrugadas). Se describe el efecto de algunos factores importantes sobre la resistencia de adherencia en el concreto ligero, como, por ejemplo, el efecto de barras de diferentes diámetros, longitudes de anclajes, el grueso de los recubrimientos, el tipo de superficie de la barra, la "cavitación", el tipo de agregado usado, y otros.

Para barras redondas ordinarias colocadas horizontalmente, la resistencia de adherencia del concreto ligero es considerablemente menor que la del concreto común. Para barras corrugadas la resistencia de última adherencia es sensiblemente la misma para ambos tipos de concretos, ya sea el de agregados de peso ligero o el de agregados comunes; pero en el primero, el mismo deslizamiento ocurre a una carga menor.

Los métodos de construcción mixta, tales como el concreto reforzado, dependen para su seguridad y rigidez, de la transmisión adecuada de las fuerzas internas entre los materiales que constituyen su sección transversal. La transmisión de las fuerzas internas y el carácter mixto de la construcción se mantienen tanto por la resistencia de adherencia como a través de las fuerzas de anclaje.

Aun siendo de tanta importancia, la naturaleza fundamental de la adherencia entre acero y concreto en construcciones de concreto Resistencia de adherencia del concreto reforzado, no se comprende enteramente. Parece, sin embargo, que por lo menos tres distintos elementos pueden afectar la actuación de la adherencia en el concreto reforzado, y son: la adhesión coloidal, esto es pegajosidad; el encogimiento del concreto alrededor del refuerzo; y las fuerzas de fricción en las superficies de contacto del acero y del concreto.

La existencia de la adhesión coloidal entre el acero y el concreto esta respaldada por los resultados de los experimentos realizados con placas de acero plano muy lisas, en las cuales el concreto se ha colado sin ningún agarre o anclaje adicional (Short y Kinniburgh, 1967). Aunque no existía ninguna fricción, se pudo medir, no obstante ello, una cierta resistencia contra las fuerzas que tienden a mover las dos superficies, la una en relación a la otra. Esto puede deberse a entrelazamientos a través de las micro rugosidades de la superficie del acero (Short y Kinniburgh, 1967). No se pudieron encontrar evidencias químicas de valor para corroborar la existencia de la adhesión coloidal. Esto podría, en todo caso, sólo contribuir ligeramente a la resistencia total en la sección transversal y desaparecer después de un deslizamiento inicial entre las barras de acero y el concreto, igual al tamaño de las micro rugosidades.

La mayor parte de la adherencia entre el acero y el concreto se debe probablemente a las fuerzas de fricción gobernadas principalmente por las características de las superficies en sus partes de contacto. Las resistencias de fricción y adherencia son, por lo tanto, generalmente aumentadas por la oxidación, siempre y cuando a la superficie de las barras no se les desprendan las costras de óxido.

La contracción debido al secado del concreto tiende a producir fuerzas de compresión que se apoyan contra la superficie de la barra ahogada, aumentando así la resistencia friccional y también la adherencia. La resistencia friccional puede aumentar también como resultado de otros tipos de deformaciones radiales.

El aumento de los esfuerzos de adherencia producidos por las cargas ocasiona naturalmente un deslizamiento entre el acero y el concreto. Al soltarse la carga puede tener lugar un cierto movimiento inverso que conduce a la formación de pequeños elementos en forma de cuña que consisten en partículas trituradas de la matriz y agregado fino, entre el acero y el concreto (dilatancia). Cuando se somete a cargas repetidas esta acción de curia evita el incremento del deslizamiento y aumenta la resistencia de adherencia. En el concreto ligero las partículas rotas son relativamente suaves y flexibles comparadas con la arena de cuarzo; por lo tanto no es probable que mantenga su resistencia última de adherencia bajo cargas repetidas como resultado de la dilatancia, excepto en el caso y que contenga arena u otro agregado fino duro tal como las escorias trituradas enfriadas por aire o las escorias granuladas.

El mantenimiento de la adherencia en las estructuras de concreto reforzado es posible debido a que el acero y el concreto se expanden y se contraen en una proporción muy similar bajo condiciones variables de temperatura. Si esto no fuera así se tendrían esfuerzos de temperatura repetidos que podrían originar la falla por adherencia.

Cuando no hay una resistencia adecuada de adherencia se puede asegurar una acción mixta, por el anclaje de las barras de refuerzo en el concreto. Esto se puede lograr con elementos de anclaje en los extremos, tales como placas de anclaje soldadas o más comúnmente por la colocación de ganchos en los extremos de las barras. El anclaje mecánico a lo largo de las barras se produce alternativamente donde las corrugaciones u otros tipos de deformaciones en la superficie de las barras ahogadas causa la formación de “entrantes” en el concreto circundante a las corrugaciones de las varillas; las ondulaciones complementarias mutuas resultantes aseguran que las fuerzas internas son transmitidas a través de las presiones de apoyo, a lo largo de las barras.

Los esfuerzos de apoyo entre la superficie deformada de la barra y el concreto de su alrededor, al ocurrir la falla del anclaje, son considerablemente mayores que la resistencia a la compresión del concreto, debido a las complicadas condiciones de los esfuerzos triaxiales que se desarrollan en las superficies de contacto. De hecho, en donde se usan barras corrugadas la expulsión brusca del concreto a lo largo del refuerzo es una forma frecuente de falla en el laboratorio; esto es un resultado de los esfuerzos de tensión que se presentan en el concreto cuando el grueso del recubrimiento de concreto es insuficiente para distribuir las fuerzas de expulsión, o cuando los estribos provistos no sean adecuados para este fin.

Donde las condiciones de exposición son severas y el recubrimiento de concreto es insuficiente, las barras de refuerzo pueden ser cubiertas con una lechada de cemento antes o durante el colado del concreto para proteger las barras contra la corrosión; alternativamente, pueden usarse otros tratamientos de protección o tipos de recubrimiento. Más frecuentemente, sin embargo, las barras de refuerzo son colocadas sin ningún tratamiento preliminar, tal como se entregan a la construcción o a los trabajos de precolados. El tratamiento de la superficie de las barras puede influir en las propiedades de adherencia y debe tomarse en cuenta.

#### *10.4.5.1 Pruebas de adherencia*

Una cantidad considerable de cuidadosas investigaciones ha sido realizada con anterioridad por investigadores del ramo acerca de la resistencia de adherencia del concreto hecho con diferentes agregados y con diferentes tipos de refuerzo de acero, así como con distintos tratamientos de protección aplicados a las superficies de las barras. La mayor parte de estas investigaciones experimentales estaban principalmente interesadas en los detallados problemas prácticos de la adherencia, relacionados con los materiales usados y el tipo de estructura, pero no con los aspectos fundamentales. Una variedad de métodos y normas experimentales fueron adoptados, de manera que ahora resulta difícil deducir una comparación válida entre los resultados obtenidos por los diferentes investigadores en sus experimentos; es igualmente difícil comparar las condiciones experimentales del laboratorio con la práctica.

Para evaluar el comportamiento de los diversos tipos de acero y concreto, se realizaron en un principio mayormente pruebas de extracción e introducción de varillas ahogadas en concreto y variaciones sobre dichas pruebas. Después, siguiendo las iniciativas de los investigadores americanos, se introdujeron travesaños especialmente diseñadas para medir la adherencia, con objeto de comparar los esfuerzos de adherencia, anclaje y deslizamiento para diferentes tipos de barras ahogadas en el concreto.

Puede decirse que ninguno de estos métodos reproduce fielmente las condiciones de esfuerzos y deformaciones que probablemente se presentarían en los miembros a flexión sometidos a cargas de una estructura. Con todo, parece probable que los resultados de pruebas cuidadosamente efectuadas sobre “trabes de adherencia” especialmente diseñadas puedan dar una información más fiel del comportamiento de adherencia en los miembros a flexión, que cualquiera de las otras pruebas, algo más artificiales y realizadas en escalas más pequeñas. El diseño de las trabes podrá, sin embargo, afectar la respuesta y también el comportamiento comparativo de diferentes tipos de concreto o de acero.

Debido a cierta incertidumbre sobre su significado y su sentido, las pruebas de adherencia parecen haber causado un impacto relativamente pequeño sobre el diseño. Su objeto principal era ampliar el conocimiento del esfuerzo y de los procesos de agrietamiento en los miembros a flexión y, por lo tanto, capacitar a los ingenieros para diseñar más económicamente. Pero, en general, los códigos de prácticas no gobiernan los esfuerzos permisibles en adherencia con referencia a alguna fuerza de adherencia experimental obtenida con pruebas de aceptación normal, o de alguna otra manera. Los esfuerzos permisibles en la adherencia están generalmente establecidos en relación a la resistencia a la compresión del concreto a los 28 días, obtenida tanto a partir de pruebas de compresión en cubos, en cilindros, o en prismas. Las pruebas de adherencia, donde fueron adoptadas como pruebas estándar en el Reino Unido, en la forma de pruebas de extracción de barras ahogadas en el concreto, y en los EE.UU. en la forma de “trabes de adherencia” especialmente diseñadas, son usadas meramente como un índice de eficiencia para los diversos tipos producidos de barras de acero deformadas o de alta resistencia. De esta manera, las características de adherencia de las barras deformadas pueden ser comparadas con aquellas de las barras redondas ordinarias de acero suave, con el fin de asegurar que las primeras cumplen con las condiciones para el aumento del esfuerzo permisible especificado para las barras corrugadas. Estas pruebas están hechas con concreto de grava normal, para asegurar condiciones de prueba uniformes y comparables para el acero.

Al examinar la resistencia de adherencia del concreto ligero no existe, por lo tanto, una norma absoluta en la que nos podamos basar como un criterio para establecer un esfuerzo de adherencia permisible seguro y razonable para los métodos usuales de teoría ingenieril. La única comparación que puede hacerse con utilidad es comparar las características del esfuerzo de adherencia de los especímenes de concreto ligero, con los correspondientes de concreto normal. Si los resultados obtenidos no tienen una gran diferencia con desventaja para el primero, entonces el esfuerzo permisible admitido generalmente para los varios tipos de aceros y las diversas calidades del concreto común, también pueden considerarse seguros al usarse con concreto de agregado de peso ligero. Donde no sucede esto, es decir, donde la resistencia de adherencia del concreto ligero es substancialmente menor que la del concreto común, entonces los esfuerzos permisibles para la primera tendrían probablemente que ser reducidos para lograr un diseño seguro. El agregado de grava utilizado para hacer tal comparación con los diferentes tipos de concreto ligero usualmente es de excelente calidad. Al comparar el comportamiento de adherencia del concreto ligero con la del concreto común, también debería tomarse en cuenta, que gran parte del trabajo realizado en concreto reforzado común se ha hecho en la práctica con agregado pesado que puede ser inferior en muchos aspectos, incluyendo la adherencia, a casi todos los concretos ligeros estructurales.

En vista de que la resistencia de adherencia de los miembros estructurales de concreto ligero no puede ser determinada a priori, sino solamente por comparaciones con el comportamiento real de miembros similares de concreto reforzado hechos con concreto común, la Building Research Station llevó a cabo una investigación para comparar la resistencia de adherencia de los concretos con agregados de peso ligero y común de la misma resistencia a la compresión, siguiendo investigaciones realizadas principalmente en los Estados Unidos de Norteamérica sobre especímenes del tipo de extracción.

Para las pruebas hechas en la Building Research Station se utilizaron tanto especímenes de extracción del acero ahogado, como trabes especialmente diseñadas para medir la adherencia. Los especímenes de extracción del acero, estaban hechos con diferentes agregados, diámetros de las barras, tipos de barra y longitudes de anclaje. Las variables seleccionadas para las pruebas hechas con “trabes de adherencia” eran el tipo de agregado usado, el tipo de barra y la longitud de anclaje. Se utilizaron agregados de escoria espumosa, arcilla expansiva, y cenizas sinterizadas de combustibles en polvo, además de arena y grava. Cuatro tipos de barras fueron probadas, a saber: barras brillantes de acero suave, barras redondas ordinarias de acero suave, barras cuadradas de acero suave torcido en frío, y barras corrugadas de acero suave formadas en frío. Los dos últimos tipos de barras se clasifican como barras de acero deformado, de alta resistencia. Para las pruebas de extracción de barras, el diámetro de las barras de refuerzo redondas (brillantes u ordinarias) de acero suave,

variaba de 0.6 cm. a 2.5 cm. La longitud de anclaje variaba de 15 a 30 cm. para los especímenes de extracción, y de 23 a 84 cm. para las trabes.

Las trabes de adherencia eran de 1.52 m. y de 2.28 m. de largo. El refuerzo estaba colocado a la mitad del ancho de la trabe, con recubrimiento de 2.5 cm. medidos desde el fondo. A una distancia igual a la longitud de anclaje deseada, medida desde cada uno de los extremos de la trabe, la barra de refuerzo se hallaba desnuda en un tramo, y en estos puntos se medía la deformación en el acero encontrándose la carga colocada directamente arriba de estos puntos. Se pusieron estribos para prevenir fallas por cortante cerca de los extremos. Las deformaciones medidas en la barra de acero dieron una indicación de la magnitud (aunque no de la distribución a lo largo de las barras), de las fuerzas internas resistidas por la adherencia o el anclaje. También se midió el deslizamiento de las barras en los extremos.

Por lo tanto, las secciones extremas de las trabes de adherencia, comprendidas desde la cavidad en el alma en donde se midieron las deformaciones, hasta los extremos de las trabes, eran similares a las unidades de especímenes de extracción del acero. Difieren de estos especímenes, sin embargo, en que las condiciones de esfuerzo tanto en el concreto como en el acero son similares a las que se obtienen en un miembro ordinario a flexión, esto es, que tanto el concreto como el refuerzo de acero están sujetos a esfuerzos de tensión. Por otro lado, las condiciones de esfuerzo en especímenes ordinarios de extracción de acero son esencialmente diferentes; y mientras que la barra de acero se sujeta a tensión la distribución de esfuerzos del concreto es algo confusa. Cerca del borde donde la placa de la máquina de pruebas topa contra el concreto, se desarrollan esfuerzos de compresión, pero se desconoce la condición de los esfuerzos dentro del espécimen.

Los resultados obtenidos tanto con especímenes de extracción como con trabes, muestran una dispersión considerable, particularmente en el caso del concreto ligero. Sin embargo, algunas conclusiones valiosas para el desarrollo del diseño estructural con concreto ligero se pudieron obtener a partir de los resultados del trabajo experimental llevado a cabo en la Building Research Station y en otros lugares. Al comparar el comportamiento del concreto común de agregado de grava con el de diferentes tipos de concreto ligero, la interpretación de estas conclusiones varía algo; sin embargo, Shideler considera, por ejemplo, que la resistencia de adherencia del concreto estructural de agregado de peso ligero es muy buena, y que para resistencias a la compresión iguales, se deben esperar resistencias de adherencia comparables, aun cuando se admite que la resistencia de adherencia es menor para barras horizontales, que tengan una profundidad considerable de concreto debajo de ellas. Otros investigadores americanos llegaron a conclusiones similares. Todas las pruebas en las que se basan estas conclusiones se han realizado con barras deformadas. Algunos fabricantes de agregados de peso ligero del Reino Unido comparten los mismos puntos de vista.

El trabajo desarrollado en el Reino Unido fue ampliado tanto para barras redondas de acero suave como para barras de refuerzo deformadas. Para barras ordinarias redondas, la resistencia de adherencia medida en pruebas de extracción es generalmente un poco más baja para el concreto con agregados de peso ligero, que para el concreto con agregado común usado en particular, pero para algunos tipos de agregado, por ejemplo arcilla expansiva, la relación puede llegar a aproximarse a la unidad.

Por otro lado, para “trabes de adherencia” especiales, el efecto de usar diferentes tipos de agregado con barras redondas ordinarias es mucho mayor. La relación de las resistencias de adherencia últimas obtenidas con concreto de agregado de peso ligero y concreto de agregado común de la misma resistencia a la compresión varía de 0.5 a 0.7, siendo el valor promedio ligeramente más bajo que 0.6. En algunos casos excepcionales, particularmente para resistencias mayores a la compresión y especialmente para los agregados de cenizas sinterizadas de combustibles en polvo, se han logrado ocasionalmente altas resistencias de adherencia, que han alcanzado las obtenidas con agregados de concreto común.

En general, especialmente en donde se usa concreto ligero, la posición de las barras ahogadas al momento de colar parece tener una influencia considerable. Donde las barras se sostienen horizontalmente, como en casi todos los miembros a flexión, la resistencia de adherencia es menor que cuando las barras son sostenidas verticalmente. Esto también prevalece en diferentes grados para especímenes de extracción en donde las barras están sostenidas horizontalmente durante su colado. La formación de cavidades irregulares bajo las barras horizontales no es rara aun en los miembros de concreto común, y esta forma de “cavitación” aparentemente se presenta con más frecuencia en el caso del concreto de peso ligero. Esto se debe, probablemente, a la mayor tendencia del concreto fresco a perder agua, particularmente con los tipos de agregado de concreto ligero que producen mezclas ásperas. La formación de estas cavidades poco profundas y la pérdida de contacto entre el acero y el concreto tienden a causar una reducción de la resistencia de

adherencia, lo cual no ocurre con las barras verticales. Los fabricantes de algunos de los agregados más recientes, y menos ásperos, aseguran que si se mezcla apropiadamente, su material tiene menos tendencia a perder agua.

Los intentos para remediar esta tendencia por una revibración del concreto, no han conducido a ningún resultado importante. Se ha sugerido asimismo que debería permitirse a las barras de refuerzo hundirse junto con el concreto en lugar de quedar sostenidas rígidamente en la cimbra. Esto no parece ser un procedimiento muy práctico tanto en el lugar de la construcción como en la fábrica. La magnitud en la que la resistencia de adherencia del concreto se afecta por esta tendencia a perder agua, puede variar con diferentes mezclas y agregados, y no afecta a la resistencia de adherencia en las columnas.

Al evaluar el comportamiento de la adherencia, es necesario tomar en cuenta no sólo la carga estática última a la que se produce la falla por adherencia, sino también el desarrollo del movimiento relativo entre el concreto y el acero, es decir, el deslizamiento relativo entre ellos. Para el mismo esfuerzo de adherencia, el deslizamiento que ocurre en las puntas de las barras redondas ordinarias ahogadas en las trabes de concreto ligero, es generalmente mayor que en las de concreto común, pero el comienzo del deslizamiento ocurre en un límite de 40 a 80% de la carga última para todos los tipos de agregado. Un deslizamiento de 0.0025 cm. considerado a veces como criterio de falla en la adherencia, ocurre de 70 a 90% de la carga última para todos los agregados, pero como la carga de colapso es generalmente mucho menor para el concreto ligero, el esfuerzo de adherencia crítico para un deslizamiento dado, es también correspondientemente menor. Por lo tanto, aparentemente no hay una diferencia cualitativa fundamental de la relación entre el esfuerzo de adherencia y el deslizamiento para los agregados de concreto ligero y común, en el caso de barras redondas de acero suave, pero si hay una diferencia cuantitativa considerable.

Se ha considerado que el diámetro de las barras redondas ordinarias ahogadas ejerce cierta influencia sobre la resistencia de adherencia en el concreto común; una reducción en el diámetro de las barras aumenta generalmente la resistencia de adherencia. En el concreto ligero el efecto del diámetro de la barra sobre la fuerza de adherencia no es muy grande. En algunos casos una tendencia a disminuir la resistencia a la adherencia se puede encontrar en ciertos tipos de mezclas pobres de agregado de peso ligero, particularmente con escoria espumosa usada sin la adición de arena, cuando el diámetro de la barra ahogada se reduce a 0.6 cm o menos.

El efecto de la longitud de anclaje en el esfuerzo de adherencia al momento de ocurrir la falla, sólo es importante para el caso de que se trate de longitudes de anclaje pequeñas en barras redondas ordinarias. Dando la longitud de anclaje no excede aproximadamente 20 veces el diámetro de la barra, el esfuerzo a la adherencia en el momento de fallar tiende a volverse menor al aumentar la longitud de anclaje pero la reducción es mucho menor para el concreto ligero que para el concreto común. Para una mayor longitud de anclaje el esfuerzo de adherencia al fallar, tiende a permanecer sensiblemente constante, pero para el concreto ligero, puede ocurrir un pequeño aumento cuando las longitudes de anclaje exceden los 40 diámetros. Este ligero aumento puede ser originado por una distribución variable de las cavidades bajo las barras.

La correlación entre las resistencias a la compresión y la fuerza de adherencia del concreto ha sido notada por varios investigadores, tanto para concretos de agregado común como para concretos de agregados de peso ligero. Para ambos tipos de concreto, hay una tendencia a que la resistencia de adherencia se incremente al aumentar la resistencia a la compresión, pero aunque los resultados de las pruebas muestran una considerable dispersión, la correlación no es lineal en ninguno de los dos casos.

A menudo, los agregados de peso ligero se usan en combinación con arena natural. Al agregar arena a la mezcla de concreto ligero se aumenta tanto la densidad como la resistencia a la compresión del concreto resultante. Al mismo tiempo, también se aumenta la resistencia de adherencia. Además, sucede que en los concretos cuya resistencia a la compresión es comparable, frecuentemente el deslizamiento de las barras ahogadas sujetas a cargas tiende a volverse más pequeño con mezclas que contengan arena.

#### 10.4.5.2 Barras deformadas

El aumento actual del uso de las barras deformadas para la construcción de concreto reforzado se basa principalmente en la mayor resistencia de adherencia y la mejor distribución de grietas que corresponden a esas barras. Esto tiene principalmente importancia en el caso de barras de acero de alta resistencia donde los

mayores esfuerzos permisibles a la tensión, generalmente admitidos en el diseño, deberán ser seguidos también por altos esfuerzos de adherencia y mayores anchos de los agrietamientos o espaciamientos reducidos de las grietas. Además de la adherencia, que se presenta obviamente, las barras deformadas también agarran el concreto por medio de sujeciones mecánicas bien distribuidas en su longitud, como en el caso de las barras redondas lisas. Por simplicidad a esta acción combinada de adherencia-anclaje en las barras deformadas se le nombra “adherencia”.

Hay cierta variación en la efectividad relativa de los diferentes tipos de superficies de las barras deformadas; las barras corrugadas, por ejemplo, se han encontrado, en general, que son ligeramente más efectivas para aumentar la resistencia de adherencia y reducir el ancho de las grietas, que otros tipos de secciones transversales. Sin embargo, los resultados de las pruebas indican que para las mismas resistencias a la compresión, los últimos esfuerzos de adherencia obtenidos con barras deformadas ahogadas en concreto común y en concreto ligero son del mismo orden de magnitud. Difícilmente se puede describir la forma de falla, sin embargo, como la falla por adherencia de las barras redondas lisas, es decir el cese en la adherencia entre el acero y las superficies de concreto, ya que este debe primeramente romper el anclaje mecánico, que es indispensable para que la efectividad de las barras deformadas pueda volverse operante. Las fallas a cargas últimas, en el caso de barras deformadas, se deben probablemente a la compresión del concreto bajo presiones de contacto entre el concreto y el acero, en la superficie de las costillas troqueladas, seguidas por el corte directo del concreto paralelo a la barra.

En algunos casos, la falla ocurre en forma de expulsión brusca del concreto debido a los esfuerzos de tensión impuestos por las condiciones de esfuerzo triaxial cerca de las superficies de apoyo.

Entre el acero y la superficie del concreto debe ocurrir algún ligero movimiento antes que las troquelaciones de la superficie de las barras deformadas puedan agarrar al concreto lo suficientemente como para transmitir las fuerzas internas. En el concreto ligero este desplazamiento inicial tiende a ser mayor que en el concreto común, en gran parte debido a la mayor contracción por secado y la pérdida de agua de la lechada, que aumenta el pequeño hueco entre las superficies del acero y del concreto. Este retardo en la acción de las barras deformadas en el concreto ligero se demuestra por la comparación del deslizamiento medido en “trabes de adherencia” hechas con concreto común y con concreto ligero. Los resultados de las pruebas indican que la carga para un determinado deslizamiento medido es menor para el concreto con agregado de peso ligero que para los concretos pesados de resistencias comparables, pero esto no se puede aplicar a todos los tipos de concreto con agregado de peso ligero.

La forma en que actúan las barras deformadas en los miembros a flexión es tal que permite desplazamientos relativos muy grandes entre el acero y el concreto, antes de alcanzar la carga de falla. Es obvio, sin embargo, que desde el punto de vista del usuario se deba juzgar que la falla ha ocurrido antes de alcanzar la carga última, debido a las deformaciones excesivas inducidas en parte por los grandes deslizamientos entre los dos materiales. Las pruebas bajo cargas repetidas conducen a conclusiones similares. Las cargas repetidas introducen muchas condiciones arbitrarias variables. Sin embargo, parece razonable esperar que un deslizamiento será inofensivo si un gran número de repeticiones de la carga estática que lo causa, no conducen a una falla en la adherencia. Por otro lado, un deslizamiento puede considerarse crítico si la carga que lo causa, bajo cargas estáticas, provoca una falla por adherencia después de menos de un millón de repeticiones. Se ha demostrado que la resistencia de adherencia de las trabes reforzadas con barras deformadas y sujetas a cargas repetidas, no se afecta cuando el deslizamiento inicial debido a las cargas es menor que 0.00025 cm. Donde la carga era tal que causaba un deslizamiento inicial de 0.0025 cm. o mayor, la falla ocurría en algunos casos durante la prueba de repetición de cargas, independientemente del tipo de agregado que fuese usado. Por lo tanto, un deslizamiento de 0.0025 cm. bajo cargas estáticas, puede considerarse como criterio conveniente de falla. Con base en este criterio, la carga funcional de colapso por adherencia, tanto con barras deformadas como con barras redondas lisas ordinarias, parece ser menor en el concreto ligero que en el concreto común.

Las pruebas realizadas con barras deformadas ahogadas en especímenes de extracción de refuerzos, generalmente dieron resistencias de adherencia que eran de un 20 a 30% mayores que las obtenidas con trabes de adherencia, aunque la falla principal en los especímenes de extracción no ocurrió como consecuencia del deslizamiento de la barra, sino por el rompimiento longitudinal causado por las fuerzas de expulsión brusca del concreto, aun para los especímenes que contenían refuerzos en espiral.

Parece ser de bastante importancia el hecho de que para los miembros de flexión normales, la carga última de colapso debida a posibles fallas en la adherencia, es decir, la reserva final de resistencia, es aumentada considerablemente como resultado del uso de barras deformadas, cualquiera que sea el tipo de agregado usado para el concreto. El esfuerzo último de adherencia tiende a ser del mismo orden para el concreto común y para el concreto ligero que tengan la misma resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión del concreto se aumenta generalmente con el tiempo, debido a la continua hidratación lenta del concreto en la matriz. Este aumento de la resistencia del concreto se toma en cuenta en el diseño. El concreto ligero, al igual que el concreto con agregado de grava común, también aumenta su resistencia, pero aparentemente con una rapidez de desarrollo menor que el concreto con agregado común. Esta diferencia posiblemente se deba a la naturaleza de la prueba de compresión en cubos, en la cual el colapso es causado en gran parte por el corte. Por otro lado, la resistencia de adherencia del concreto ligero, parece aumentar con mayor rapidez que la de la resistencia a la compresión y es más alta que la permitida en el código. Parece probable, de acuerdo con las evidencias, que el aumento de la resistencia a la compresión real, con el transcurso del tiempo para un concreto ligero bien compactado colocado en miembros de flexión, no es menor que el de un concreto común correspondiente.

#### 10.4.6 *Contracción y agrietamiento por secado*

Todos los productos del cemento presentan algunos pequeños cambios en sus dimensiones debido a los cambios en las condiciones de humedad. Cuando el concreto se ha secado inicialmente, sufre una contracción, generalmente llamada contracción por secado inicial, y en las subsecuentes etapas de mojado y secado, muestra expansión y contracción alternas, usualmente llamado movimiento reversible de humedad.

Aunque pequeños en magnitud, dichos cambios son de considerable importancia. El tema de la contracción en el cemento y sus productos ha sido tratado con mucha amplitud por Lea, pero para los fines del presente trabajo será suficiente una presentación mucho más concisa publicada por Short y Kinniburgh (1967).

El resultado práctico de la contracción es el esfuerzo de tensión, que se genera en estructuras restringidas, que si sobrepasan la resistencia a la tensión del concreto pueden producir agrietamientos.

Deben tenerse precauciones en el diseño de las construcciones para disminuir los efectos de la contracción; así por ejemplo, la contracción del concreto puede reducirse cuando éstos son curados con vapor a alta presión.

Cuando el concreto es secado inicialmente, sufre una contracción llamada generalmente “contracción por secado inicial”, y en las subsecuentes etapas de mojado y secado presenta alternativamente expansión y contracción, lo cual es usualmente llamado “movimiento reversible de humedad”. Generalmente la expansión que ocurre al remojar el concreto no es tal que permita lograr las dimensiones originales, de tal manera que la contracción por secado inicial es generalmente mayor que la subsecuente expansión por humedad.

Las estadísticas de las respuestas al cambio de humedad han demostrado que para el concreto de peso ligero, el movimiento reversible por humedad es frecuentemente tan grande como la contracción por secado inicial.

La prueba dada para la contracción por secado, mide el acortamiento que tiene lugar en un espécimen hecho a mano o en un bloque durante el periodo de secado comprendido desde la completa saturación (cuatro días sumergido en agua) hasta el estado seco debido a horneado (17% de humedad relativa y 50°C). En la práctica, desde luego, el concreto rara vez experimentara este gran cambio de estado, pero la prueba no intenta reproducir condiciones practicas sino ser un índice del comportamiento.

El concreto de peso ligero puede ser dividido en dos grupos con respecto a su comportamiento durante el secado, aquellos que han sido curados en autoclave y los que han sido curados por aeración. Los productos curados en autoclave presentan una relación casi directa entre el nivel de humedad y la cantidad de contracción por secado, mientras que los productos curados por aeración, además de tener una mayor contracción por secado, presentan su contracción máxima con una humedad relativa comprendida entre 40 y 50%. Se cree que esto se debe a la carbonatación y se supone que tal diferencia de comportamiento proviene de dos causas complementarias.

1) El concreto curado por autoclave está ligado por tobermorita bien cristalizada, la cual es menos vulnerable al bióxido de carbono que la desorganizada forma de silicato y que es característica en el material curado al aire.

2) Las favorables condiciones para la carbonatación, resultantes de tener un 45% de humedad relativa y una temperatura de 25°C.

Resumiendo, puede decirse que los productos curados en autoclave presentan menor contracción cuando son secados a un 45% de humedad relativa, que cuando lo son a un 17%, mientras que los productos curados por aeración presentan mayor contracción a 45% que a 17% de humedad relativa.

Como quedo asentado al principio de este capítulo, la contracción por secado es una característica de todos los productos de cemento; la contracción antiguamente era atribuida sólo al cemento, pero trabajos recientes han demostrado que algunos agregados naturales poseen marcada tendencia a la contracción por secado y contribuyen así a la contracción total de concreto en que son usados. La pasta de cemento puro, sufre una alta contracción por secado, pero el concreto convencional de agregado duro y compacto generalmente presenta una contracción relativamente pequeña, estando los movimientos restringidos en gran parte por la rigidez del agregado. En el caso del concreto con agregados de peso ligero, sin embargo, donde son empleados agregados más débiles y menos rígidos, se restringe mucho menos la pasta de cemento, y esto se refleja en una contracción por secado mucho mayor en estos concretos, generalmente cerca del doble de la que se observa en el concreto pesado. El concreto aireado, que es en realidad un mortero rico aireado, posee una muy alta contracción por secado a menos que los productos sean curados en autoclave, tratamiento mediante el cual se efectúan cambios de naturaleza física-química en los minerales del cemento, que a su vez, conducen a una reducción de la contracción por secado. Esto es tratado posteriormente en los capítulos relacionados con el curado y con el concreto aireado.

El resultado práctico de la contracción es que se producen esfuerzos de tensión en el concreto que tienden a agrietarlo, particularmente si éste no está confinado. Esto ocurre especialmente en trabajos de concreto simple, tales como muros de bloque y colados in situ. Si el esfuerzo causado por la contracción sobrepasa la resistencia a la tensión del concreto, es probable que se produzca agrietamiento, sin embargo, algún alivio en los esfuerzos por contracción está dado por el flujo plástico y por la extensibilidad elástica de concreto, pero éstas son cantidades un poco inciertas. A menos que se tomen precauciones para limitar la cantidad de agrietamiento, o de distribuirlo en forma de finas e imprescindibles grietas, la apariencia de la construcción puede ser estropeada.

Los agrietamientos por contracción en muros generalmente ocurren más o menos verticalmente y aparecen la mayor parte de las veces como resultado de una concentración de esfuerzos donde la sección transversal del muro se reduce repentinamente. El agrietamiento puede tomar alguna de las dos formas siguientes: aquella que corre derecho a través de bloques y juntas en forma continua, o aquella que toma una trayectoria de zigzag siguiendo las juntas. El saber cual de estas dos formas de agrietamiento ocurre realmente en cualquier caso, depende mucho de la resistencia relativa de los bloques y el mortero con que son colocados, así como de la resistencia de adhesión entre bloque y mortero. Dado que la segunda forma de agrietamiento es más fácil de reparar, es mejor hacer la junta más débil a la tensión que el mismo bloque. Además, hay otra ventaja con el mortero más débil, y es que permite al bloque contraerse separadamente, dando por lo tanto, una relajación de esfuerzos por medio de una redistribución de las fuerzas internas en el muro. Así, hay una tendencia a la formación de grietas capilares alrededor de cada bloque, y no a la formación de grietas más amplias y perceptibles que ocurren a intervalos mayores.

Es interesante considerar la cantidad de contracción que podría esperarse que ocurriera en ciertas circunstancias. Los puntos débiles en un muro son las aperturas tales como ventanas y puertas. Estos en la construcción de casas se presentan aproximadamente a intervalos entre 3 y 3.6 m. Con una contracción máxima permisible de 0.06% la contracción total posible en 3.6 m es cerca de 2.4 mm., suponiendo un cambio en el índice de humedad, de la condición de saturado en seco por horneado. Si este movimiento total se manifestara como una sola grieta, podría desfigurar al muro, pero tal cambio de humedad es improbable que ocurra, y por ésta y otras condiciones atenuantes, el ancho total de la grieta rara vez excede de un cuarto del máximo posible, y así, en el ejemplo anterior podría ser de 0.64 mm.

La magnitud de la contracción por secado varía de acuerdo con la composición del concreto, con el tipo de curado que se le haya dado antes de la entrega y con los cambios de humedad a los que se le haya sometido.

Las Especificaciones Británicas para bloques de concreto, B.S.2028, dan los siguientes límites para movimientos en bloques de peso ligero.

Contracción por secado inicial:	Clase B 0.06%
	Clase C 0.08%
Movimiento de humedad reversible:	Clase B 0.05%

El hecho de acatar formalmente los requerimientos de las normas, no implica que con los bloques probados no habrá riesgo de agrietamiento por contracción. Sin embargo, ello significa que los bloques han sido hechos en tal forma que el coeficiente de contracción, a juzgar por las pruebas, ha sido reducido tanto como es práctico dentro del aspecto económico, de la producción comercial y con el entendimiento actual de causa y efecto. Se debe así mismo tomar precauciones para mantener una contracción baja y para distribuir los esfuerzos de tal manera que la incidencia de agrietamientos considerables se reduzca a un mínimo. Las siguientes precauciones deben considerarse:

a) Almacenamiento. Los bloques deben almacenarse en un lugar de tal manera que estén razonablemente secos cuando se requiera para usarlos. Si deben permanecer guardados por un tiempo considerable, la colocación deberá ser tal que permita circular el aire con objeto de facilitar un secado subsiguiente, debiéndose además cubrir los montones. Esto actualmente puede hacerse con facilidad gracias a la disponibilidad de la envoltura de polietileno.

b) Mojado. Algunos tipos de bloques tienen que ser mojados superficialmente con objeto de reducir su absorción, pues de otra manera su colocación se dificulta. Tal mojado debe ser ligero y sólo cuando realmente sea necesario; de ninguna forma debe saturarse con agua el cuerpo de los bloques.

c) Mortero. Como se menciona al principio, el mortero debe ser de un tipo relativamente débil. Una mezcla de una parte de cemento Pórtland, dos partes de cal hidratada y ocho a nueve partes de arena (por volumen) es generalmente apropiada. Una mezcla un poco más fuerte (1:1:5-6) puede ser la indicada cuando el trabajo se lleva a cabo en invierno o donde existan condiciones especiales. Existe la alternativa de usar una parte de cemento Pórtland por volumen y ocho partes de arena con un plastificante en lugar de la mezcla de proporción 1:2:8-9, o una parte de cemento Pórtland y cinco a seis partes de arena por volumen con un plastificante, en lugar de la mezcla 1:1:5-6. Las mezclas con proporción más baja de cemento, por ejemplo 1:3:10-12, son adecuadas para muros interiores levantados en verano. En la práctica hay una extensa gama en cuanto a la composición del mortero que puede usarse sin que afecte esto materialmente la resistencia del muro.

d) Refuerzo. Algunas veces se usa refuerzo en las juntas horizontales en hiladas cercanas a aberturas de ventanas y puertas, para controlar el agrietamiento por contracción. Tal refuerzo no previene por sí mismo la formación de grietas, pero puede impedir que se conviertan en amplias y deformes. Se sabe poco acerca de la cantidad óptima de refuerzo para tales casos, debido al amplio límite en la cantidad de contracción que puede ocurrir en el concreto. Debe ser mencionado, sin embargo, que la durabilidad del refuerzo es probable que sea deficiente en posiciones tan expuestas como lo son las juntas de mortero, particularmente cuando éstas pueden agrietarse frecuentemente y que los productos corrosivos de las barras de refuerzo pueden ser la causa de serios deterioros.

e) Diseño. Donde el diseño de la construcción lo permite, el dividir el muro en anchos adecuados o paneles sin sujeción en los extremos reducirá el riesgo de agrietamiento. Esto puede tomar la forma de juntas verticales de contracción hechas a intervalos convenientes a lo largo del muro. Las juntas pueden ser ventajosamente colocadas atrás de las bajadas de aguas pluviales o también como una forma divisoria entre las casas individuales que constituyen un conjunto. Con objeto de excluir viento y agua de la ranura que se forma, debe usarse algún tipo de barrera o tapa junta. La minuciosidad con que se haga tal exclusión dependerá del diseño del muro, por ejemplo, si éste es un muro hueco o sólido.

En trabajos de revestimiento la junta puede ser calafateada con un compuesto de mastique; éste es uno de los métodos más satisfactorios.

En trabajos de aplanado, una tira de fieltro a prueba de humedad puede ser colocada verticalmente en la hendidura a medida que se vaya construyendo el muro y llevando el aplanado hasta el fieltro protector en ambos lados de la junta. Como una alternativa que da absoluta exclusión de viento y lluvia, una tira de cobre con sección en V puede fijarse al muro a manera de puente en la hendidura, siendo posteriormente

empotradas en el aplanado las hojas de la lámina doblada. Este método da una apariencia limpia y agradable pero es algo caro y un poco difícil de colocar en su posición. Estos métodos son desde luego adecuados sólo para juntas rectas.

Otro método más, es el de hacer un rompimiento vertical a la mitad de las ventanas dejando juntas secas para llenarlas posteriormente de mortero una vez que la estructura haya cesado de contraerse. En la mayoría de los casos el agrietamiento en los trabajos de bloques solamente es importante debido a su efecto en la apariencia. En general no afecta materialmente la estabilidad de la estructura, ni en muros huecos facilita la penetración de la lluvia. Las grietas usualmente aparecen durante el primer verano después de la construcción.

#### *10.4.7 Resistencia al fuego y propiedades térmicas*

Además de las ventajas basadas en su poco peso, los concretos estructurales ligeros resisten el fuego mejor que los concretos comunes, debido a su menor conductividad térmica, menor coeficiente de expansión térmica y a la inherente estabilidad ante el fuego de sus agregados que son quemados previamente, a temperaturas superiores a 1,100°C.

En elementos expuestos al intemperismo, el concreto estructural ligero ofrece algunas ventajas sobre el concreto de peso normal. Su menor conductividad de calor prolonga el tiempo necesario para que elementos expuestos alcancen un estado de temperatura estable. Esta resistencia reduce también los cambios de temperatura interior bajo condiciones transitorias, y disminuye la acumulación de calor solar y el enfriamiento nocturno. En edificios elevados, el menor coeficiente de expansión térmica significa, en columnas ligeras expuestas, una reducción de cambios de volumen y de los esfuerzos consecuentes.

### *10.5 DISEÑO DE ELEMENTOS DE CONCRETO ESTRUCTURAL LIGERO*

Las investigaciones de laboratorio sobre las propiedades de los elementos de concreto ligero reforzado mostraron que, en general, las reglas establecidas para el concreto común también pueden ser aplicadas con seguridad al diseño y construcción de estructuras de concreto reforzado hechas con agregados de peso ligero; sin embargo, habrá que tomar muy en cuenta los casos en donde el comportamiento del concreto ligero puede variar con respecto al del concreto común. Dichas investigaciones y las experiencias en la práctica indican que, siempre y cuando se tomen en cuenta las diferentes propiedades de estos dos tipos de materiales, el concreto ligero tipo estructural puede llenar los mismos requisitos que el concreto de grava común que tenga semejante resistencia a la compresión, y por lo tanto, los principios de diseño y construcción que se consideran aceptables para este último son completamente aplicables también al concreto ligero tipo estructural.

Enseguida, sólo se mencionaran algunos aspectos del diseño, donde los miembros de concreto ligero reforzado puedan diferir de los de concreto común.

#### *10.5.1 Métodos de diseño*

Para la teoría de resistencia última, ha sido posible concluir, según los resultados de muchos experimentos, que las secciones planas permanecen planas, es decir, que las deformaciones varían linealmente a través de la sección transversal, y que la deformación unitaria última en la fibra más alejada de compresión en el concreto común, alcanza aproximadamente un valor de 0.003 al presentarse la falla incipiente ocasionada por el aplastamiento en el concreto. La compresibilidad última del concreto ligero será por lo menos, del mismo orden con tendencias a ser más alta.

Muchos de los códigos mundiales, entre ellos las NTC-RCDF y el del ACI-318, no especifica ninguna distribución particular de los esfuerzos de compresión; el diagrama de la distribución de esfuerzos puede suponerse rectangular, trapezoidal, parabólico o de cualquier otra forma, siempre y cuando la resistencia última a la que se llegue concuerde razonablemente con las pruebas.

Para una aproximación lógica y uniforme al diseño, se antoja que todas las clases de concreto reforzado, incluyendo el concreto ligero, deberían satisfacer el mismo criterio de rigidez y resistencia. Por ejemplo, el permitir mayores deformaciones o substancialmente mayores anchos de las grietas, en el caso de los elementos estructurales de concreto ligero tendientes a llenar los mismos requisitos funcionales que aquellos de concreto normal, sería tanto como un empeoramiento inexcusable de las normas de calidad.

Se ha sostenido que para el concreto ligero el valor límite de  $M_r/bd^2$  a partir del cual los métodos de diseño se tornan más económicos, es un poco más alto que para el concreto normal debido a la diferencia en el módulo de elasticidad.

Para las trabes de concreto común con refuerzo en el alma, que se supone se necesita de acuerdo con la teoría convencional, es generalmente mucho mayor del que se necesita para prevenir la falla por cortante, particularmente en trabes muy reforzadas donde se tiene una reserva de resistencia considerable. Existen pocas evidencias sobre el comportamiento de trabes de concreto ligero reforzado, provistas de estribos o de barras dobladas, pero es probable que, en este respecto, no se comporten en forma distinta a los miembros de flexión de concreto común.

#### 10.5.2 Resistencia a la tensión y módulo de ruptura

Es difícil determinar la resistencia del concreto debido a que las pruebas normales está sujetas necesariamente a la influencia de un gran número de variables que no se conocen o que no pueden ser controladas. Se adoptaron pruebas normales en cubos y cilindros para determinar un índice, y no como una medida absoluta, de la resistencia a la compresión del concreto. Se han probado varios métodos para obtener por lo menos un índice de la resistencia a la tensión del concreto, pero ninguno ha sido enteramente apropiado. Por ejemplo, el módulo de ruptura representa el esfuerzo de tensión al cual los prismas normales de concreto de 10 cm por 10 cm por 40 cm se rompen al someterse a una prueba de flexión. Aunque ésta es una medida útil de la resistencia a la tensión, el módulo de ruptura es generalmente más alto que esta última, puesto que el módulo de ruptura incluye el efecto del flujo plástico del concreto bajo esfuerzos de tensión, antes de que se presente la falla, aun cuando hayan sido sujetos a pruebas de carga de corta duración. Los momentos flexionantes que causan la falla, son, por lo tanto, algo mayores que el momento flexionante que hubieran podido resistir los prismas si la falla hubiera sido a la resistencia de tensión real del concreto. La prueba de partición de los cilindros (o "Prueba Brasileña") ha sido usada recientemente como una medida de la resistencia a la tensión. En esta prueba un cilindro normal de concreto, de 15 cm. de diámetro en la base y 30 cm. de alto, se somete a la compresión a lo largo de su lado.

Se han comparado los resultados de las pruebas obtenidas sobre el módulo de ruptura y de partición de los cilindros hechos con varios agregados de peso ligero, en Inglaterra, con el comportamiento del concreto de grava. Estos resultados indican que en general el módulo de ruptura, y la resistencia de partición de los concretos ligeros tienden a ser del mismo orden, o ligeramente más alto, que los obtenidos con un concreto de grava de la misma resistencia a la compresión.

Para resistencias compresivas que varían entre 70 y 350 kg/cm<sup>2</sup>, los módulos de ruptura tienden a variar de 17 a 38.7 kg/cm<sup>2</sup>. La relación entre el módulo de ruptura y la densidad varía considerablemente para diferentes tipos de concreto y resulta difícil establecer una relación consistente. La correlación aproximada de la resistencia a la compresión y el módulo de ruptura, tanto para concreto de grava como para concreto con agregados de peso ligero, se encontró que se representaba mejor por medio de una ecuación parabólica de la forma:

$$R = 2.1\sqrt{u} \quad (10.2)$$

donde la "R" representa el módulo de ruptura y "u" es la resistencia a la compresión en cubos, con excepción del concreto de escoria espumosa para el cual esta expresión parabólica asumió la siguiente forma para apegarse a los resultados experimentales:

$$R = 2.41\sqrt{u} \quad (10.3)$$

Así, para resistencias a la compresión baja la relación del módulo de ruptura y la resistencia a la compresión, es mayor que para mayores resistencias a la compresión.

Evans y Hardwick (1960) obtuvieron aproximadamente:

$$R = 2.11\sqrt{u} \quad (10.4)$$

para concreto de arcilla sinterizada (Aglita) con resistencias en cubos, variando de 316 a 526 kg/cm<sup>2</sup>. La relación de las resistencias de partición en los cilindros a las resistencias en cubos obtenidas de pruebas hechas en la Building Research Station pueden ser expresadas aproximadamente por la siguiente ecuación:

$$f_p = K\sqrt{u} \quad (10.5)$$

Para todos los tipos de concreto, “ $f_p$ ” representa la fuerza de participación en los cilindros y “ $u$ ” la resistencia a la compresión en cubos. El coeficiente  $K$  puede variar de 1.19 a 1.59 siendo el valor promedio aproximadamente 1.33.

Los resultados de las pruebas de partición en cilindros hechas por Hanson (1961), indican que la fuerza de partición de un cilindro de concreto ligero saturado es generalmente igual o menor que la del concreto de grava de la misma resistencia a la compresión de los cilindros y para un límite muy amplio de las resistencias compresivas. Estos descubrimientos no están en seria oposición con los resultados obtenidos por la Building Research Station, puesto que la resistencia a la compresión en cubos (que es la base del diseño del concreto) usado por este último no necesariamente forma una relación constante con la resistencia de los cilindros del mismo concreto de peso ligero.

Parece que los dos tipos de prueba, esto es, módulo de ruptura y partición de los cilindros, no representan la misma propiedad del concreto, aunque los dos pueden servir como índices de la resistencia a la tensión. En general, la fuerza de partición de los cilindros representa aproximadamente un 60% del módulo de ruptura.

Las pruebas de Hanson (1961) indican que la resistencia a la tensión del concreto se afecta grandemente por su contenido de humedad. La resistencia a la tensión en la prueba de partición de los cilindros de concreto ligero saturado es considerablemente mayor que la resistencia a la tensión promedio del mismo concreto probado en un estado seco al aire. Los resultados obtenidos en un estado saturado son también más uniformes.

Por otro lado, se encontró que en un concreto de agregado de grava más denso, la resistencia a la tensión es ligeramente mayor en el material seco que en el material saturado.

La resistencia a la tensión parece ser un factor importante en la posibilidad de agrietamientos en diferentes tipos de concretos. Puesto que se trata de un material heterogéneo, su resistencia a la tensión tenderá a variar considerablemente y su composición afectará no sólo al esfuerzo de tensión al momento en que se agrieta, sino también al mecanismo del proceso en sí. En el concreto común, por ejemplo, la resistencia y rigidez del agregado en sí es generalmente muy grande, tanto en compresión como en tensión. Las fallas a la 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. Las partículas del agregado en sí no son muy compresibles y en general no están sujetas a encogimientos considerables. Los esfuerzos de tensión inducidos en la matriz, a través del encogimiento de esta última debido a la pérdida de humedad son, por lo tanto, los más importantes y aumentan la posibilidad de agrietamientos en la matriz.

Por otra parte, la aparición de grietas en el concreto ligero es muy diferente a la del concreto común, e indica que la fractura se debe a los esfuerzos de tensión en las partículas del agregado en sí, como también a fracturas en la matriz, ya que la resistencia a la tensión del agregado es usualmente menor que la de la matriz endurecida. El encogimiento causaría menores esfuerzos de tensión en la matriz del concreto con agregados de peso ligero que en la de concreto común, porque es menor la resistencia de las partículas del agregado de peso ligero contra la deformación local.

La resistencia a la tensión de diferentes tipos de concretos con agregados comunes y de peso ligero y su posibilidad de agrietamiento es, pues, susceptible de variar considerablemente para diferentes tipos de materiales y mezclas.

### 10.5.3 Resistencia a corte de miembros con concreto de agregados ligeros

En este inciso, se examina la resistencia por corte de las traveses de concreto reforzado sin refuerzo en el alma. Para ello se comparan las pruebas Británicas y Americanas, y las teorías de carga última.

Como intuitivamente parece, la resistencia al cortante de las traveses de concreto con agregados de peso ligero es menor que el correspondiente a las de concreto común. Esto se atribuye a la forma típica de agrietarse que usualmente se presenta en los dos tipos diferentes de concreto.

En vista de un número de fallas por cortante que ocurrieron particularmente en América en los años 50's, la atención se dirigió a este problema y debido a ello se efectuó mucho trabajo de investigación. Se encontró que para traveses sin refuerzo en el alma, la capacidad de carga última puede considerarse idéntica a la carga de

agrietamiento diagonal, y que esta última es muy influida por la resistencia del concreto, por el porcentaje y tipo del refuerzo longitudinal, por las dimensiones de las trabes, por los momentos flexionantes aplicados y por el momento resistente de la sección transversal.

En los Estados Unidos, un comité formado del Instituto Americano del Concreto (ACI), ha tratado de dar una solución al problema del corte basándose en una fórmula empírica obtenida de la teoría de diseño al límite. Con base en pruebas experimentales, la ecuación para diseño propuesta por Bower y Viest (1960) es:

$$\frac{V}{bd\sqrt{f_c'}} = 0.054 + 178.5 \frac{\rho d}{\frac{M}{V}\sqrt{f_c'}} < 0.927 \quad (10.1)$$

En donde, V: es la fuerza cortante interna.  $f_c'$ : es la resistencia a la compresión de los cilindros de concreto. b: denota el ancho de la sección transversal. d: denota el peralte efectivo de la sección transversal.  $\rho$ : denota la proporción del refuerzo. M/V: es la relación del momento al cortante.

Esta fórmula parte del esfuerzo principal de tensión en un punto. Se supone que el esfuerzo principal es comparable a la resistencia a la tensión del concreto, que a su vez se toma como si fuera proporcional a la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión del concreto. Para comparar los valores teóricos con aquellos obtenidos en los experimentos, la resistencia a la tensión del concreto ha sido determinada con la prueba de partición de cilindros o compresión diametral.

De acuerdo con los resultados obtenidos en pruebas de módulos de ruptura, el promedio de la resistencia a la tensión del concreto de peso ligero resultaba ser, en algunos casos, más alto que el de los concretos comunes correspondientes. Los resultados obtenidos en las pruebas de partición de cilindros indican también que el concreto común y el concreto ligero, no difieren mucho en su resistencia a la tensión para curados húmedos; sin embargo, para ciertos agregados de peso ligero se han obtenido resistencias a la tensión menores para especímenes secos, particularmente para mezclas pobres, probablemente debido a esfuerzos inducidos de encogimiento.

Las principales fallas de tensión en el concreto de agregado común, ocurren generalmente como resultado del rompimiento de la adherencia entre la superficie del agregado y la matriz o, menos frecuentemente, debido a fallas por tensión de la matriz en sí. La partición (rompimiento) de un agregado en sí ocurre rara vez, excepto en el caso de algunos agregados de rocas trituradas más suaves. La grieta aparente que sigue a la falla de tensión del concreto común, por lo tanto, siempre es una línea dentada que sigue el contorno de los pedazos de agregado (de grava o de roca triturada) adyacentes a la grieta. En consecuencia, la grieta diagonal puede tardar considerable tiempo para desarrollarse debido a la resistencia al cortante y a la tensión, que presentan las piezas de agregado entrelazadas y adyacentes, contra el desplazamiento relativo entre ellas. Sin embargo, este desplazamiento debe ocurrir, ya que la falla del miembro al cortante no puede presentarse sin que exista un movimiento vertical relativo apreciable entre las caras de la grieta.

Por otro lado, en el caso del concreto con agregado de peso ligero, el agrietamiento ocurre como resultado de una fisura a través del agregado en sí, debido a que las partículas del agregado son usualmente más suaves y débiles que la matriz. Por lo tanto, no puede presentarse la resistencia adicional contra la falla por cortante debida a la interacción de las partículas del agregado fuertemente entrelazadas, y por lo cual la falla ocurre antes.

Obviamente, en vigas donde la resistencia del concreto al cortante se exceda bajo cargas de diseño, es necesario proveer de refuerzo transversal. No se tiene hasta el momento una evidencia segura sobre el comportamiento al corte de las trabes de concreto ligero provistas de estribos o barras longitudinales dobladas. Parece poco probable, sin embargo, que se deban comportar de manera distinta a los elementos de concreto común.

#### 10.5.4 Refuerzo transversal a la dirección de apoyo en losas

Cualquiera que sea el grado usado, las losas sólidas de concreto reforzado deben tener refuerzo por lo menos en dos direcciones, así estén sostenidas por dos, tres o cuatro lados. En cualquier dirección, se sugiere que el refuerzo de las losas de concreto normal debe de ser por lo menos de 0.15% del área total de la sección transversal del concreto. En el caso de losas sostenidas sólo por dos lados opuestos, se sugiere que el refuerzo

transversal no debe ser menor que el 10% del refuerzo longitudinal. También se sugiere que la separación de dichas barras no exceda cinco veces el peralte efectivo, ni de 45 cm.

Según el Código ACI, el refuerzo transversal se determina de acuerdo al tipo de acero usado, siendo este no menor que 0.18 y 0.25% del área total de la sección transversal del concreto.

La razón principal del refuerzo transversal es la de asegurar la distribución de los momentos de flexión causados por cargas concentradas o por cargas en franjas, para incrementar el ancho efectivo sobre el cual la carga pueda ser distribuida. Las losas sólidas son frecuentemente calculadas bajo la hipótesis de que su comportamiento bajo cargas es semejante al de las placas isotrópicas. La inclusión de refuerzo transversal asegura que el momento flexionado y la distribución de la fuerza de corte en la losa sea semejante bajo carga a la que se espera que ocurra en la placa. Además, el refuerzo transversal aumenta la resistencia de las losas a las incidencias del efecto de los impactos y del esfuerzo de perforación debido a las cargas concentradas. También ayuda a resistir los esfuerzos térmicos y de contracción.

El refuerzo transversal no puede evitar los agrietamientos debidos a esfuerzos de temperatura o de contracción, pero puede evitar la formación de grietas muy anchas, puede asegurar que el número de grietas sea mayor; que los agrietamientos estarán distribuidos uniformemente, y que el ancho de las grietas sea suficientemente pequeño como para propiciar la corrosión.

En algunos casos, el refuerzo transversal es también una ayuda útil en el montaje, pues, al estar unido con el refuerzo principal longitudinal, forma mallas que son más fáciles de manejar, colocar y transportar que las barras aisladas.

La presencia de refuerzos transversales adecuados es una característica importante en cualquier tipo de construcción de concreto reforzado, pero es especialmente importante para el concreto ligero, en vista de la tendencia que este tiene a desarrollar grietas más anchas cuando se somete a carga, que el concreto común. Las pruebas han mostrado que bajo cargas concentradas, las losas de concreto ligero tienden a fallar antes que las losas de concreto común, en la ausencia de un refuerzo transversal adecuado.

Los efectos de la temperatura en los concretos de peso ligero pueden tardar más en producirse que en el concreto común, debido a las mejores propiedades aislantes que tienen. El coeficiente de dilatación térmica del concreto ligero también es generalmente menor y debido a su menor módulo de elasticidad, los esfuerzos asociados con estos cambios térmicos son, por lo tanto, más pequeños. Por otro lado, el gradiente de temperatura a través de la sección transversal del concreto ligero tiende a ser más inclinado que en el concreto común, debido a sus mayores propiedades aislantes. En resumen, la resistencia del concreto ligero a esfuerzos debidos a cambios de temperatura es probable que sea mayor que la del concreto común, en casi todos los casos.

La deformación de casi todos los concretos ligeros debido a contracciones y movimientos por humedad, tiende a ser mayor que la de un concreto común de la misma resistencia; esto se debe a la mayor necesidad inicial de agua que requiere y generalmente al mayor contenido de cemento para la misma resistencia.

#### 10.5.5 Especificaciones

Muchos proveedores de agregados estructurales ligeros han propuesto especificaciones e información relativa al proporcionamiento de mezclas de sus materiales, y algunos ofrecen supervisión en el campo y servicio técnico, para asegurar que se use el concreto de la calidad especificada. Las especificaciones usuales para el concreto estructural ligero son: resistencia mínima a la compresión, revenimiento máximo, peso máximo y valores máximos y mínimos de contenido de aire; sin embargo, el contratista también debe estar al tanto de las propiedades del concreto recién mezclado, tales como el sangrado, la trabajabilidad y la facilidad de acabado.

## 11 CONCRETO LIGERO PRESFORZADO

Las ventajas de las construcciones de concreto presforzado, no son probablemente tantas para el concreto ligero como para el concreto de agregado común. Debido a la suavidad de los agregados de peso ligero, comparados con la grava o la mayoría de los agregados de roca triturados, la resistencia a la compresión requerida podrá ser lograda solamente usando una proporción grande de cemento en la mezcla, de manera que la matriz pueda ser más que un mero conglomerante provisto para la adhesión de los granos del agregado. Tampoco la reducción en peso es considerable comparada con la del concreto común. El concreto hecho con agregados de peso ligero, tal como las cenizas sinterizadas de combustibles en polvo o arcillas expansivas, y teniendo una resistencia de  $420 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días, puede variar en densidad de aproximadamente  $1682$  a  $2000 \text{ kg/cm}^2$ . El peso volumétrico del concreto común de la misma resistencia es de aproximadamente  $2323$  a  $2400 \text{ kg/cm}^3$ .

En el presente capítulo, se resume el informe de la Comisión de la Federación Internacional del Presfuerzo (FIP), publicado y presentado en el seno del V Congreso Internacional del Presfuerzo en 1986 en París (Gerwich *et al*, 1986). Dicha comisión especial de la FIP, estuvo integrado por: B. C. Gerwich (Presidente), K. F. ANTIA (India), K. H. BRITAIN (Gran Bretaña), W. P. BROWN (Australia), J. A. DERRINGTON (Gran Bretaña), F. ERSKINE (Estados Unidos), J. A. HANSON (Estados Unidos), J. J. DE HÉER (Países Bajos), G. LACOMBE (Francia), V. V. MAKARICHEV (Ex-Unión Soviética), F. G. RIESSAUW (Bélgica), P. SVOBODA (Checoslovaquia), G. S. RAMASWAMY (India), J. A. TORROJA (España), K. WESCHE (Dinamarca), S. ZORZI (Italia), F. D. LYDON (Secretario).

### 11.1 INTRODUCCIÓN

En general, Gerwich *et al* (1986) discuten dos tipos de concreto ligero presforzado. El primero, hecho con agregados ligeros estructurales de alta calidad tales como arcillas y pizarras expansivas, es capaz de desarrollar resistencias cúbicas de  $280$  a  $500 \text{ kg/cm}^2$  con un peso unitario de  $1,400$  a  $2,000 \text{ kg/m}^3$ . Se obtienen valores satisfactorios de contracción y flujo plástico. El módulo de elasticidad es aproximadamente la mitad del que se obtiene en los concretos hechos con agregados normales de la misma resistencia. La resistencia al fuego y el aislamiento térmico son notablemente mejores que los del concreto de peso normal. Se señalan aplicaciones específicas.

El segundo tipo lo forma el concreto celular, hecho con espuma o gas. Este tipo de concreto no es presforzado directamente; es usado en acción compuesta con nervaduras o losas de concreto presforzado. Se combinan las ventajas del bajo peso unitario y el alto aislamiento térmico con el comportamiento estructural y la economía del presfuerzo. Se utiliza para losas de techo de edificios industriales y de habitación.

El concreto ligero presforzado está surgiendo rápidamente como un sector importante en la industria del concreto estructural. Posee propiedades únicas, similares en muchos aspectos a las del concreto normal presforzado, pero diferentes en otros tantos aspectos significantes. La mayor parte de las veces es usado juiciosamente cuando se trata como un material nuevo y todas sus propiedades especiales son consideradas en el diseño y en la construcción, y utilizadas en su ejecución.

El Tema III del Cuarto Congreso de la FIP (Gerwich *et al*, 1986), despertó interés general en el concreto ligero presforzado, dando como resultado la creación de una comisión especial de la FIP a la que se le encargó preparar este informe.

En este capítulo se circunscribe al concreto ligero para saber si es adecuado para el presfuerzo. Para propósito de este capítulo se han adoptado las siguientes definiciones:

- Concreto estructural de agregado ligero. El concreto que contiene agregados expansivos o porosos con un peso unitario que varía de 1,400 a 2,000 kg/m<sup>3</sup> y que es capaz de desarrollar resistencias a la compresión que varían generalmente de 280 a 500 kg/cm<sup>2</sup>. Cuando se presfuerza, se le llama concreto presforzado de agregado ligero.
- Concreto celular (o aireado). Concreto de estructura porosa (celular) producido por gas o espuma y sin agregados gruesos. El peso unitario varía generalmente de 600 a 1,200 kg/m<sup>3</sup>.
- Concreto normal. Este es el concreto convencional hecho con arcilla y grava o arena y roca triturada, con un peso unitario que varía de 2,200 a 2,500 kg/m<sup>3</sup>, y para propósito de comparación en este capítulo, con una resistencia a la compresión que varía de 280 a 500 kg/cm<sup>2</sup>.

El concreto de agregado ligero presforzado ha sido usado en gran escala en los Estados Unidos y en Rusia, mientras que en Australia, Canadá e Inglaterra su uso es limitado pero significativo y en expansión. En 1964 se usaron aproximadamente 1,000,000 m<sup>3</sup> de concreto presforzado de agregado ligero en todo el mundo (Gerwich *et al*, 1986). Se ha usado con éxito tanto en la producción de elementos estructurales estandarizados, como en estructuras individuales más grandes en las que se requiere un control estricto de la calidad. Se ha usado con éxito en un amplio intervalo de aplicaciones, semejantes a las del concreto normal presforzado.

El diseño del concreto presforzado de agregado ligero está basado en los mismos principios que el del concreto normal presforzado. Es esencial, sin embargo, tomar en consideración todas las propiedades específicas y el comportamiento del concreto presforzado de agregado ligero.

La calidad del concreto presforzado de agregado ligero depende de la disponibilidad de agregados ligeros estructurales de alta calidad. Estos agregados, apropiados para usar en concreto presforzado, se producen en más de 60 plantas en los Estados Unidos, Canadá, Australia y Gran Bretaña. Cantidades suficientes de este tipo de agregado se producen en Rusia. Nuevas plantas de agregado ligero están promoviendo activamente en muchos países de Europa Occidental. Varias están programadas para entrar en operación en un futuro próximo. Existe un gran interés en las plantas de agregado ligero en un gran número de otros países.

El concreto celular presforzado hasta ha sido usado principalmente en Rusia. No es presforzado directamente; más bien se establece una acción compuesta entre el concreto celular y las nervaduras o losas presforzadas hechas con concreto de agregado ligero o normal.

Teniendo en cuenta que los agregados ligeros son por lo general un producto fabricado, como lo es el concreto celular, las propiedades y las calidades están sujetas a control estricto y a un mejoramiento constante. Por lo tanto, se puede anticipar que se podrá disponer de materiales para el concreto ligero presforzado de tan alta calidad como se desee. Al mismo tiempo, las mejoras en la economía relativa y la experiencia cada día mayor en su uso actual presagian un rápido crecimiento para el concreto ligero presforzado tanto en volumen como en importancia.

## 11.2 PROPIEDADES DEL CONCRETO PRESFORZADO DE AGREGADO LIGERO

### 11.2.1 Generalidades

Este resumen de las propiedades está restringido a los agregados de alta calidad y a las mezclas de alta resistencia apropiadas para usar con presfuerzo. Todas las propiedades del concreto de agregado ligero están afectadas en cierto grado por las condiciones de humedad del concreto. Los agregados del tipo de arcillas y pizarras expansivas, ya sean recubiertos o triturados, se consideran en un solo grupo sin que se pueda determinar un límite claro de demarcación en sus propiedades.

En el estudio de las propiedades de cuarenta agregados estructurales ligeros diferentes producidos en los Estados Unidos, Canadá y Australia, se encontró que estas propiedades caen dentro de un intervalo tan amplio que no existe un límite definido entre ellas. Como corolario resultante del programa de ensayos se concluye que los agregados, arena y grava normal, y arena y grava triturada también presenta un amplio intervalo de valores para cada propiedad.

(1) Peso unitario. El intervalo es de 1,400 a 2,000 kg/m<sup>3</sup>, el cual es 60 u 80% del peso del concreto normal de la misma resistencia. El peso unitario sumergido es aproximadamente 50% del peso del concreto normal.

(2) Resistencia a la compresión. Con un pequeño incremento en el contenido de cemento, esto es aproximadamente con la misma cantidad que para el concreto normal, se alcanzan resistencias máximas de aproximadamente 500 kg/cm<sup>2</sup>. Con algunos agregados ligeros no se necesita ningún incremento en el contenido de cemento, pero con otros este incremento se requiere necesariamente.

(3) Cortante (tensión diagonal). A esfuerzos normales de trabajo el esfuerzo cortante es aproximadamente del mismo orden que para el concreto normal, pero a la resistencia máxima el cortante en tensión diagonal para concreto estructural de agregado ligero está entre el 65 y el 100% del cortante para concreto normal. La resistencia a tensión diagonal del concreto estructural de agregado ligero está caracterizada por su resistencia a la tensión por prueba brasileña más que por su resistencia a la compresión.

(4) Resistencia a la tensión por prueba brasileña. Esta resistencia varía con los diferentes agregados, desde menos que hasta más que la del concreto normal en condiciones secas o parcialmente secas. Esto puede deberse a un contenido diferencial de humedad entre las partes externas e internas de los miembros de concreto. Sin embargo, en condiciones húmedas, es aproximadamente igual a la del concreto normal.

El uso de arenas naturales finas aumenta la resistencia a la tensión por la prueba brasileña del concreto ligero en condiciones secas. Las pruebas efectuadas en Rusia indicaron que la resistencia a la tensión uniaxial del concreto de agregados ligeros no es menor que la del concreto normal.

(5) Módulo de ruptura. Al igual que la resistencia a la tensión por prueba brasileña, el módulo de ruptura es aproximadamente igual al del concreto normal en condición húmeda, pero reducido cuando está parcialmente seco.

(6) Adherencia. Las pruebas de extracción por lo general muestran que la resistencia por adherencia es similar, pero ligeramente menor que la del concreto normal a la resistencia máxima.

(7) Longitud de transmisión del presfuerzo. Esta es aproximadamente igual a la del concreto normal, ya que la pasta de cemento es la que afecta a la adherencia. Puede haber un ligero incremento en la longitud de transmisión del presfuerzo debido al bajo módulo de elasticidad del concreto estructural de agregado ligero.

(8) Módulo de elasticidad. El intervalo para el concreto estructural de agregado ligero varía de 140,000 a 210,000 kg/cm<sup>2</sup> (intervalo extremo de 115,000 a 280,000 kg/cm<sup>2</sup>), el cual es aproximadamente la mitad o las dos terceras partes del módulo de elasticidad del concreto normal. Aunque el módulo de elasticidad del concreto de agregado ligero es mucho menor que el del concreto normal, la deflexión por carga muerta de una viga de concreto presforzado de agregado ligero será solamente del 15 al 25% mayor que la de una viga de concreto normal presforzada de las mismas dimensiones.

(9) Flujo plástico. Por simplicidad de los procedimientos de diseño, la relación deformación unitaria por flujo plástico a deformación unitaria instantánea ha sido considerada constante. Sin embargo, las investigaciones desarrolladas han indicado que ésta varía bastante aún en un solo tipo de concreto. Sin embargo, para propósitos de este artículo, el flujo plástico se ha definido como la deformación del concreto con el tiempo bajo carga de compresión sostenida.

El flujo plástico en el concreto estructural de agregado ligero de alta calidad, es ligeramente mayor que el del concreto normal. Las investigaciones sobre el comportamiento de columnas a largo plazo muestran que el acortamiento del concreto ligero es para todos los propósitos prácticos, igual al del concreto normal de la misma resistencia a la compresión. El flujo plástico del concreto estructural de agregado ligero es aproximadamente proporcional a la relación de esfuerzo aplicado a resistencia en el instante de aplicar la carga o el flujo plástico por esfuerzo unitario es aproximadamente proporcional al esfuerzo aplicado. Los informes de Rusia dicen que la mayor parte de la deformación por flujo plástico se presenta en los primeros meses; del 60 al 80% en los primeros dos meses. Similarmente, los informes de los Estados Unidos dicen que no se presentan deflexiones significantes por flujo plástico después de 90 días.

(10) Contracción. Las contracciones dependen de la calidad del concreto de agregado ligero. Para concreto estructural de agregado ligero de alta calidad, los ensayos realizados en los Estados Unidos presentaron valores de contracciones ligeramente mayores que las del concreto normal. El curado a vapor reduce las contracciones del concreto estructural de agregado ligero en 20% o más. Sin embargo, los informes de Rusia reportan contracciones considerablemente mayores (superiores a 190%) cuando todo el agregado utilizado es ligero; con arena silícica fina y agregado grueso ligero, la contracción se reduce a aproximadamente 140% de la del concreto normal.

(11) Pérdida total de presfuerzo. Esta varía aproximadamente de 110 a 115% de la pérdida total que se presenta en el concreto normal cuando ambos están sujetos a un curado normal; 124% de la pérdida total que se presenta en el concreto normal cuando ambos están sujetos a un curado a vapor. Sin embargo, la pérdida total del presfuerzo para concreto de agregado ligero curado a vapor es aproximadamente igual a la del concreto normal bajo curado normal. El curado a vapor reduce la pérdida total del presfuerzo del 30 al 40% en comparación con el curado normal.

(12) Aislamiento térmico. Esta es una propiedad básica del concreto de agregado ligero. El gran aislamiento térmico del concreto de agregado ligero tiene un efecto decisivo en las aplicaciones del presfuerzo, debido a los siguientes factores:

- a) en servicio, las grandes temperaturas diferenciales entre el lado expuesto al sol y la parte interna pueden causar contraflechas mayores.
- b) mejor respuesta al curado a vapor
- c) más apropiado para el colado en invierno.
- d) mejor resistencia al fuego.

La conductividad térmica del concreto estructural de agregado ligero es aproximadamente 40% de la del concreto normal; su transmisión térmica es aproximadamente del 50%.

(13) Propiedades acústicas. Esta también es una propiedad básica del concreto de agregado ligero que no se afecta por el presfuerzo pero que influye en su aplicación. El concreto de agregado ligero absorbe el sonido satisfactoriamente y es aislante a la transmisión del mismo desde un punto de vista práctico.

(14) Permeabilidad. El concreto estructural de agregado ligero es tan impermeable al agua como lo es el concreto normal debido a que esta propiedad depende de la calidad de la pasta de cemento y no está afectada por la porosidad interna de las partículas de agregado. Este material se ha usado con éxito en construcciones marinas en Rusia, en los Estados Unidos y en otros países.

(15) Absorción de agua. Para el concreto estructural de agregado ligero, la absorción del agua varía del 12 al 22% por volumen (promedio 17%) comparado con el 12% para el concreto normal.

(16) Resistencia a la abrasión. Esta es generalmente menor que la del concreto normal particularmente donde la abrasión es local y concentrada, como en las guarniciones de las carreteras. Para uso general, como en pavimentos, la obtención de un concreto bien proporcionado, la colocación, el acabado y el curado adecuados, darán como resultado un servicio satisfactorio.

(17) Resistencia a la congelación y al deshielo. Esta es por lo general igual a la que se obtiene en un concreto normal de buena calidad con aire incluido. El aire incluido es muy importante en todas las mezclas pero principalmente en las de alta densidad y alta resistencia. El concreto ligero es considerado como más apropiado para su colado en invierno debido a que tiene menos pérdidas de calor durante su transporte y mejor reacción al curado a vapor.

(18) Durabilidad marina. Esta por lo general se supone igual a la del concreto normal. Algunas autoridades en el tema inclusive piensan que puede presentarse un incremento en la durabilidad.

(19) Durabilidad atmosférica. Esta propiedad se cree que es aproximadamente igual a la del concreto normal.

(20) Corrosión. El recubrimiento del acero de refuerzo para el concreto estructural de agregado ligero se especifica por lo general igual al del concreto normal. No hay evidencia a cualquier diferencia material en la protección contra la corrosión que puede dar el concreto de agregado ligero y el concreto de agregado normal de la misma resistencia, por ejemplo con aproximadamente el mismo contenido de cemento y de agua en la mezcla.

Los informes de Rusia dicen que el uso del 2% de  $\text{NaNO}_3$  (por peso de cemento) en la mezcla, dará una protección adecuada contra la corrosión. Actualmente se están haciendo investigaciones en el Building Research Station de Inglaterra, sobre el recubrimiento de los tendones con zinc, recubrimientos de fosfato y el uso de sustancias anticorrosivas, tales como el nitrato de sodio y el benzoato de sodio para usarlo tanto en concreto normal como en concreto ligero.

(21) Resistencia al fuego. Esta es aproximadamente del 20 al 50% mejor que la del concreto normal; en parte debido a que el concreto de agregados ligeros presenta una mejor resistencia a la transmisión del calor. El aumento del espesor del recubrimiento aumenta la resistencia al fuego; dicho incremento guarda una relación de 2/3 con el aumento del espesor.

El concreto de agregado ligero provee un buen aislamiento térmico sobre los tendones y también resiste a la trasmisión de calor a través de la losa.

Los concretos estructurales de agregados ligeros se comportan de manera semejante hechos con diferentes tipos de agregados bajo idénticas condiciones de ensaye.

(22) Fatiga. Las pruebas que se han efectuado hasta la fecha en concreto estructural de agregados ligeros muestran un comportamiento igual o mejor al del concreto normal. Estas pruebas fueron realizadas por la American Association of Railroads sobre vigas en cajón de concreto de agregado ligero presforzado. La aplicación de 2,000,000 de ciclos de carga no redujo apreciablemente la capacidad estática. Las pruebas llevadas a cabo en Rusia han mostrado un coeficiente de endurecimiento aproximadamente igual al del concreto normal. Las fallas se presentan a lo largo de secciones inclinadas las cuales indican la necesidad de usar más refuerzo por cortante en las estructuras sujetas a cargas repetidas, que el que se obtiene cuando se diseña por carga estática.

La experiencia en el empleo de barcos de concreto estructural de agregados ligeros reforzado convencionalmente, ha demostrado su capacidad para resistir muchas inversiones de carga producidas por las tormentas del mar.

(23) Coeficiente de expansión térmica. Para concreto estructural de agregado ligero el intervalo varía de  $7\text{E}-6$  a  $9.5\text{E}-6$  por grado centígrado, que es un intervalo más pequeño que el que se presenta en el concreto normal. El promedio para un concreto hecho únicamente con agregado ligero es 8, mientras que con un reemplazo del 30% del agregado fino ligero por arena natural, el promedio es 9, comparado con 10 del concreto normal. Aunque el concreto estructural de agregado ligero se expande solamente un 85% de lo que se expande el concreto normal, no se han presentado dificultades al emplearlo, ya sea con refuerzo o en acción compuesta de concreto de agregado ligero con concreto normal.

(24) Relación de Poisson. Esta varía de 0.17 a 0.21 para la gran mayoría de los concretos estructurales de agregados ligeros. En el diseño se puede usar un valor de 0.2.

(25) Reacción álcali-agregado. En número limitado de pruebas no se ha observado ninguna reacción.

(26) Comportamiento dinámico bajo esfuerzos de impacto.

a) Esfuerzo por hincado de pilotes. El bajo módulo de elasticidad reduce el esfuerzo de compresión máximo en un 18% y el esfuerzo de tensión máximo en un 22%.

La velocidad de la onda de esfuerzos en el concreto estructural de agregado ligero es aproximadamente 20% menor que en el concreto normal; la longitud de la onda de esfuerzo es aproximadamente igual.

b) La resistencia sísmica, por lo general, es un poco más favorable debido a la mayor deformabilidad. El período de vibración de la estructura puede aumentar y hacer la respuesta más baja. Si la deformación máxima es también mayor, tendrá una resistencia sísmica mucho mayor.

c) La absorción de energía y de impactos parece ser mucho mayor que la del concreto normal.

d) El amortiguamiento de la vibración puede ser más efectivo debido a las numerosas discontinuidades formadas por contracciones diferenciales entre la pasta y el agregado, y a que la formación de las primeras grietas es prematura.

e) Asentamiento de las cimentaciones. El concreto de agregado ligero presforzado es, por lo general, más apto para admitir asentamientos, tanto los súbitos como los que se desarrollan durante un período de tiempo considerable.

(27) Resistencia máxima. Investigaciones recientes sobre columnas de agregados ligeros indicaron que el concreto estructural de agregado ligero alcanza una deformación unitaria máxima más grande que un concreto convencional de la misma resistencia a la compresión, y por lo tanto tiene una resistencia máxima mayor.

### 11.2.2 Utilización

El concreto de agregado ligero presforzado se ha utilizado ampliamente en ciertas aplicaciones constructivas y, en menor grado, en casi todas las aplicaciones en las que se ha usado el concreto normal presforzado. Las aplicaciones más útiles son aquellas en las cuales se utilizan completamente las propiedades únicas del concreto de agregado ligero presforzado, y no es elegido solamente como un sustituto ligero del concreto normal presforzado, sino que se emplea como un material nuevo.

Los campos en los que el concreto de agregado ligero presforzado ha tenido amplia aceptación y en los cuales se ha probado su economía y sus beneficios estructurales son los techos, muros y pisos de edificios. Para estos usos, se reduce el peso muerto y por consiguiente las cargas estructurales, sísmicas y de cimentación; el mejor aislamiento térmico y la mejor resistencia al fuego han sido por lo general, los factores determinantes en la elección del concreto de agregado ligero presforzado.

Hay numerosas aplicaciones recientes del material, las cuales parecen ofrecer posibilidades alentadoras. Muchas de estas están basadas en sus propiedades de absorción de energía y bajo módulo de elasticidad, otras en sus propiedades térmicas y aún más, otras en que el peso sumergido se reduce grandemente.

El concreto de agregado ligero presforzado se ha usado ampliamente en acción compuesta con el concreto normal. Todas las combinaciones posibles han sido tratadas y probadas estructuralmente con éxito. Estas combinaciones son:

- a) viguetas y vigas de concreto de agregado ligero presforzado con losas de concreto normal coladas in situ.
- b) viguetas y vigas de concreto de agregado ligero presforzado con losas de concreto de agregado ligero coladas in situ.
- c) vigas de concreto normal presforzadas con concreto de agregado ligero colado in situ.

Por lo general se ha encontrado que las combinaciones (a) y (b) son más eficientes, debido al módulo de elasticidad relativo. Sin embargo, la combinación (c) ha resultado apropiada en muchos casos, incluyendo una estructura de puente grande.

El concreto celular presforzado es empleado ampliamente en Rusia para techos y muros de edificios, donde sus excelentes propiedades térmicas y su bajo peso muerto son muy beneficiosos. Actualmente es usado siempre en acción compuesta con concreto normal o de agregado ligero, en forma de nervaduras o cubiertas.

En la Tabla 11.4 se presentan los usos que se le han dado al concreto ligero presforzado, junto con la forma o sección para cada uno de ellos, una idea ligera del volumen de su uso, una lista de las ventajas o propiedades que conducen a su elección y finalmente, una lista de todos los factores adversos a ese uso particular.

### 11.2.3 Consideraciones de diseño

Debido a la eliminación de agrietamientos, las secciones transversales del concreto presforzado pueden ser completamente utilizadas en todo su peralte. La ventaja económica de utilizar todo el peralte de construcción en los miembros de flexión de concreto ligero, no es, sin embargo, tan grande como en el concreto común, puesto que la posición del eje neutro en el concreto ligero reforzado ordinario es más baja que en los miembros de concreto común y por lo tanto el concreto está siendo ya mejor utilizado.

La experiencia en América ha mostrado, no obstante esto, que por ejemplo, para puentes a base de traveses de grandes claros, el peso muerto de un miembro puede ser decisivamente importante. El uso de traveses preesforzados de concreto ligero con acero postensado puede entonces permitir al diseñador usar este método de construcción más barato en vez de las traveses de acero, principalmente en lugares donde el uso de traveses de concreto común no sería económico, o porque no pudieran ser manejadas o transportadas fácilmente. Los azoteas precolados de azotea con refuerzo pretensado se han usado con ventaja en la Gran Bretaña (Short y Kinniburgh, 1967).

El diseño del concreto presforzado son aplicables al concreto ligero presforzado en la mayoría de los aspectos. Algunos breves comentarios son necesarios, cuando menos en lo que concierne a la resistencia de adherencia y a las pérdidas debidas a la deformación elástica, al flujo plástico y al encogimiento del concreto ligero, así como al relajamiento del acero.

La mayor parte de la información sobre la resistencia de adherencia se refiere a concretos ligeros que tengan una resistencia a la compresión menor que  $315 \text{ kg/cm}^2$ . Hay muy poca información hasta el momento sobre la resistencia de adherencia del concreto ligero de alta resistencia a la compresión.

Las pruebas de Bate (1961) sobre concreto común y concreto ligero conteniendo escoria espumosa, cenizas sinterizadas de combustibles en polvo, y agregados de arcilla expansiva, y con resistencias a la compresión en cubos de  $350$  a  $420 \text{ kg/cm}^2$  al momento de transferir con cables torcidos de  $1.3 \text{ cm}$  de diámetro, indican que las longitudes de transmisión en concreto hecho con agregados de peso ligero pueden no ser substancialmente diferentes de aquellas de agregados de grava con resistencias similares. Una longitud de transmisión de más o menos  $64 \text{ cm}$ , puede ser supuesta en el diseño, para una resistencia en cubos de  $350 \text{ kg/cm}^2$  en el preciso momento de transferir.

La pérdida del preesfuerzo debida a las deformaciones elásticas del concreto de grava puede calcularse con los valores correspondientes del módulo de elasticidad "E", puesto que para la misma resistencia a la compresión el módulo de elasticidad del concreto ligero es en general más o menos la mitad del concreto con agregado de grava. Para los elementos pretensados de concreto ligero, la pérdida del esfuerzo en los tendones al transferirse, debe tomarse como el producto de la relación modular en la Tabla 11.1 y el esfuerzo en el concreto adyacente. La resistencia en cubos del concreto de preferencia no deberá ser menor que  $350 \text{ kg/cm}^2$  al transferir.

Para alambres, barras o cables torcidos postensados que no sean esforzados simultáneamente, la pérdida resultante del esfuerzo en los tendones debe ser considerada como la mitad del producto de la relación modular dada en la Tabla 11.1 y el esfuerzo del concreto adyacente. La relación modular correspondiente a una resistencia en cubos de  $210 \text{ kg/cm}^2$  es incluida en la Tabla 11.1 para fines de interpolación, en postensados solamente.

La pérdida de esfuerzo que se presenta en los tendones presforzados debido al encogimiento del concreto, es mayor donde se usa concreto ligero que en donde se usa concreto común, porque la contracción del primero

es generalmente más grande. Para condiciones promedio de exposición, la contracción del concreto ligero debido a contracción, para una resistencia en cubos no menor de 420 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días, pueden suponerse igual a 600E-6 para tendones pretensados y 400E-6 para tendones postensados. Se debe suponer que ocurrirán contracciones mayores donde el postensado de los tendones se realice antes de dos a tres semanas después del colado.

*Tabla 11.1. Relación modular para el calculo de pérdidas del preesfuerzo en el concreto ligero*

f* (kg/cm <sup>2</sup> )	n
210	18.5
280	14.0
350	12.5
420	11.0
560	9.5
700	8.5

f\*: Resistencia en cubos, del concreto ligero a la compresión, al transmitirse la tensión de los cables (kg/cm<sup>2</sup>).

n: Relación modular que debe usarse en los cálculos

La pérdida de esfuerzo en el acero de preesfuerzo debida al flujo plástico del concreto debe calcularse sobre la hipótesis de que el flujo plástico es proporcional a la resistencia a la compresión inicial del concreto, tal y como se hace para el concreto común. La pérdida de esfuerzo en los tendones debida a la contracción causada por el flujo plástico del concreto se obtiene multiplicando el módulo de elasticidad del acero (tomado como 2E-6kg/cm<sup>2</sup>), por el deslizamiento plástico del concreto adyacente al tendón presforzado.

La pérdida de esfuerzo en los tendones presforzados debida al flujo plástico que debe suponerse en los cálculos, se da en la Tabla 11.2.

*Tabla 11.2. Pérdida de esfuerzo en el acero de preesfuerzo, debido al flujo plástico del concreto ligero*

Resistencia en cubos, del concreto a la compresión, al transmitirse la tensión de los cables (kg/cm <sup>2</sup> )	Pérdida del esfuerzo en el acero de preesfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> ) por cada kg/cm <sup>2</sup> de compresión en el concreto para:	
	Pretensados	Potenzados
350	1.1 kg/cm <sup>2</sup>	1.00 kg/cm <sup>2</sup>
420 y más	1.3 kg/cm <sup>2</sup>	0.84 kg/cm <sup>2</sup>

\* El tensado de los cables se efectúa 14 días después de colado el concreto.

La pérdida total eventual de esfuerzo en el acero de preesfuerzo usado con el concreto ligero puede ser de 30 a 35% del esfuerzo inicial; para el concreto de grava la pérdida correspondiente es normalmente de 20 a 25%.

Dimensionalmente los cables y alambres de acero de alta tensión usados en concreto presforzado no son completamente estables bajo grandes esfuerzos, particularmente en un ambiente de alta temperatura. Bajo un esfuerzo de tensión constante tienden a alargarse permanentemente; si se mantiene una longitud sensiblemente constante, bajo las condiciones que ocurren en los miembros de concreto presforzado, hay un relajamiento notable del esfuerzo, aún a temperaturas interiores normales.

En la mayoría de los códigos de diseño de elementos de concreto común presforzado, se sugiere que el esfuerzo inicial de tensión en el acero de preesfuerzo, inmediatamente después de la sujeción en sus extremos, no exceda del 70% del esfuerzo último del acero. Para contrarrestar la mayor pérdida del esfuerzo causado por deslizamiento y el encogimiento del concreto ligero presforzado, se ha propuesto en algunos países de Europa usar mayores esfuerzos iniciales en el acero. Con el aumento del esfuerzo inicial, sin embargo, la pérdida del esfuerzo debida al relajamiento aumentará a una rapidez mucho mayor, y esta pérdida de esfuerzo debe tomarse en cuenta en el diseño.

Los miembros de concreto presforzado son normalmente diseñados en una forma tal que no se agrietan bajo las cargas de trabajo. Es más, el concreto tiene una resistencia a la compresión mayor, y su calidad es, por lo tanto, mejor que la del concreto normal reforzado. En general, la rigidez de los miembros a flexión de concreto presforzado es mayor que la de los miembros de concreto reforzado del mismo peralte. Esto es aplicable tanto a los miembros de concreto de grava como a los de concreto ligero.

Con el concreto ligero, sin embargo, el efecto del menor módulo de elasticidad y del mayor flujo plástico del concreto en las deformaciones es más marcado en los miembros de flexión de concreto presforzado que en los de concreto normal reforzado.

En el diseño, las recomendaciones para el concreto presforzado de grava con respecto a las limitaciones en los esfuerzos permisibles y del peralte de los miembros, son normalmente también aplicables al concreto ligero, pero el menor valor de E, el incremento del flujo plástico y la contracción debe tomarse en cuenta cuantitativamente.

Donde se vayan a colocar acabados, se sugiere que la flecha total de las trabes de concreto presforzado debido al preesfuerzo no debe en general exceder a 1/240 del claro.

#### 11.2.4 Fabricación y construcción

Las técnicas y procedimientos requeridos para la fabricación y construcción del concreto estructural de agregado ligero presforzado son muy similares a las usadas en el concreto normal presforzado. La experiencia ha indicado las siguientes recomendaciones específicas.

*Tabla 11.3. Resistencias a compresión indicativas según la densidad del concreto.*

Densidad del concreto en condiciones secas (kg/m <sup>3</sup> )	600	700	800	1000	1200
* Resistencia a la compresión en cubos de 10 cm (kg/cm <sup>2</sup> )	35	50	75	100	150
** Resistencia a la compresión en cubos de 20 cm (kg/cm <sup>2</sup> )	25	35	50	75	100

\* La resistencia a la compresión obtenida en los cubos secos de 10 cm de lado se calcula con propósito de control durante el proceso de fabricación en las plantas y es llamado "control de resistencia".

\*\* La resistencia a la compresión obtenida en cubos de 20 cm con humedad normal del 8%; se requiere para el diseño y es llamada "denominación de diseño".

Para el diseño de la mezcla y compactación, para alcanzar la mejor resistencia y otras propiedades

- (1) El uso de arena natural de peso normal reemplazando una parte o todo el agregado ligero fino dará por lo general una consistencia mayor y resultados ligeramente mejores con solamente un pequeño incremento en el peso unitario. El reemplazo del 30% de los finos, junto con un incremento en la proporción de los agregados gruesos, es a menudo suficiente. La contracción por secado por lo general se reduce y la resistencia a la tensión por prueba brasileña en la condición seca por lo general se mejora.
- (2) El uso de aditivos reductores de agua y aceleradores de resistencia (pero no cloruro de calcio).
- (3) El uso de inclusores de aire para prevenir la segregación y para aumentar la resistencia a la congelación y al deshielo.
- (4) Selección y manejo cuidadoso de los agregados ligeros.
- (5) Diseño y control adecuado de las mezclas de concreto.
- (6) Las mezclas serán consolidadas y compactadas con vibración adecuada. Es importante evitar la sobrevibración, pues puede causar segregación.
- (7) En Rusia se usa también la compactación por presión en ciertos elementos precolados, tales como losas para techos.

Para el curado

- (1) El curado a vapor a presión atmosférica es empleado ampliamente y por lo general mejora las propiedades, especialmente reduciendo las contracciones por secado y el flujo plástico. Los ensayos realizados muestran que el ciclo óptimo para el curado a vapor a baja presión es:

Período de espera	3 a 5 horas
Aumento en la temperatura del vapor	22°C por hora
Máxima temperatura sostenida	65°C (60 a 70°C)
Período de curado a temperatura máxima	11 a 14 horas

El concreto de agregado ligero, debido a sus cualidades aislantes, toma el calor más lentamente y lo almacena por más tiempo; por lo tanto, para la misma resistencia a los 28 días, el concreto de agregado ligero curado a vapor a edades tempranas, por ejemplo a las 18 horas, se beneficia más que el concreto normal. Pueden usarse períodos de espera más cortos, temperaturas máximas más altas y períodos de curado más cortos a temperaturas máximas para alcanzar un ciclo de producción más corto, pero por lo general esto trae como consecuencia una reducción en la resistencia máxima a la compresión y en otras propiedades.

(2) El curado a vapor a altas presiones (autoclave) es especialmente benéfico en la reducción del cambio volumétrico, pero su uso solamente es práctico en elementos presforzados pequeños, tales como los durmientes para ferrocarril y pequeñas losas para techos.

(3) El curado electrotérmico es utilizado en Rusia. El ciclo consiste en incrementar la temperatura de 2 a 4 horas, seguido por un curado de 12 horas a una temperatura de 70 a 95°C; las temperaturas más altas se han usado cuando el elemento es esforzado directamente contra su cimbra.

(4) El curado húmedo adicional, después del curado a vapor, reducirá las contracciones por secado. Sin embargo, normalmente no es usado, excepto para los miembros estructurales muy críticos.

#### Para el presfuerzo

(1) Debido a la longitud de transmisión del presfuerzo más grande, es preferible soltar lentamente los tendones del presfuerzo por medio de gatos hidráulicos en vez de efectuar una transmisión violenta por medio del corte de los tendones.

(2) Con el postensado se debe tener cuidado para obtener concreto de alta densidad en la zona de anclaje y proporcionar un refuerzo local adecuado para evitar el despostillamiento. En algunos casos aislados se ha empleado el concreto normal en los bloques extremos; estos bloques están formados por secciones pequeñas precoladas que después se colocan en las cimbras. Sin embargo, normalmente esto no ha sido necesario.

#### Para problemas de acabados de superficies

(1) El concreto de agregado ligero es más apto que el concreto normal para formar burbujas de aire en las caras verticales y en las vueltas. Las burbujas disminuyen bastante si el concreto se vibra externamente y si se lubrican cuidadosamente los moldes.

(2) Después de la colocación del concreto deberán hacerse los acabados de las cubiertas o superficies, teniendo cuidado de dar un efecto de martelinado a un costo reducido.

(3) La sobre vibración deberá evitarse, ya que tiende a aglomerar a los agregados gruesos en la superficie.

#### Para acabados y texturas arquitectónicos

(1) El concreto de agregado ligero es por lo general apto para un amplio intervalo de acabados arquitectónicos, semejantes a los aplicados al concreto normal.

(2) La acción de un chorro de arena sobre los concretos de agregados ligeros le da un efecto de martelinado a un costo reducido.

(3) El cemento blanco es usado a menudo en concretos de agregados ligeros, aunque el color básico del agregado puede aparecer. El uso de arena natural blanca (arena de cuarzo) con cemento blanco y agregado ligero grueso por lo general da un color satisfactorio.

(4) Los acabados al agua fuerte y de agregados expuestos son usados comúnmente.

(5) Cuando se usan cerámicas, cuarzo u otros materiales de revestimiento en acción compuesta con elementos estructurales de concreto de agregados ligeros y la sección es presforzada, se le dará especial cuidado al diferente módulo de elasticidad con objeto de asegurar la localización adecuada de los tendones.

Para almacenaje, transporte y montaje

- (1) El excesivo y prolongado intemperismo de las superficies durante el almacenaje y la transportación será evitado, ya que puede causar problemas de contracciones subsecuentes después del montaje.
- (2) Se evitarán los impactos en las esquinas y en los bordes, ya que algunos concretos de agregados ligeros son más susceptibles de sufrir despostilladuras que el concreto normal.
- (3) Los elementos delgados (tales como las losas de techos) deberán estar protegidos de la temperatura diferencial producida por el calor del sol durante un almacenamiento prolongado, pues puede ocasionar contraflechas diferenciales.
- (4) En general, debido a su bajo peso, los elementos de agregados ligeros presforzados son más fáciles de transportar y de montar.

### 11.3 CONCRETOS DE AGREGADOS LIGEROS DE ALTA RESISTENCIA

Aunque este campo no ha sido ampliamente explorado, en general se consideran efectivas las técnicas usadas en el concreto normal, particularmente aquellas que reducen las contracciones por secado. Se han obtenido resistencias de 500 a 700 kg/cm<sup>2</sup> empleando concretos sin revenimiento consolidados con vibraciones prolongadas o sacudidas, un alto contenido de cemento (550 kg/m<sup>3</sup>), y sin inclusor de aire. Esto da un concreto del orden de 1,750 kg/m<sup>3</sup> y un módulo de elasticidad de 210,000 kg/cm<sup>2</sup>. Estos métodos aún no han sido aplicados en la fabricación, pero nos dan idea de los desarrollos potenciales.

#### 11.3.1 Reportes de servicio

La evaluación del empleo adecuado del concreto ligero presforzado para su utilización estructural debe estar basada en la continua inspección y en el análisis de su comportamiento real bajo las condiciones de servicio. El concreto ligero presforzado se ha usado en mayor escala durante 10 años aproximadamente y por lo general ha demostrado ser apto estructuralmente y ha presentado un comportamiento excelente. Muchas veces se ha sometido a severas sobrecargas o condiciones adversas peores de las que se habían considerado en el diseño, y tuvo un comportamiento mucho mejor de lo previsto.

En los pocos casos en que se ha tenido problemas, éstos se han debido a un diseño inadecuado o a una mala mano de obra; en general fallas debidas al desconocimiento de las propiedades especiales de este material. Mucho puede aprenderse del estudio de estos problemas y fallas pero deben considerarse como realmente son, una contra muchos miles de aplicaciones exitosas.

#### 11.3.2 Durabilidad

##### 11.3.2.1 Resistencia al congelamiento y al deshielo

Los reportes de Rusia, Estados Unidos y Canadá indican por lo general una mejor resistencia a la congelación y al deshielo que el concreto normal (Gerwich *et al*, 1986). Los inclusores de aire son considerados necesarios para mayor durabilidad. Rusia reporta que la mejor resistencia a las heladas se debe a la estructura porosa.

##### 11.3.2.2 Exposición marina

La experiencia en barcos y embarcaderos de concreto estructural de agregados ligeros utilizados en ambas guerras mundiales mostraron por lo general una durabilidad excelente, no obstante el pequeño recubrimiento del que estaba provisto el acero de refuerzo. Un caso bien estudiado es el barco Selma, el cual ha estado encallado por más de 40 años en Galveston, Texas, en aguas de un mar semitropical.

Aunque solamente hay un recubrimiento de concreto de 1 cm hecho con arcillas expansivas sobre el acero de refuerzo una porción considerable del barco permanece en excelentes condiciones.

Este comportamiento sobresaliente se cree que se debe a la baja relación agua/cemento del concreto, al alto contenido de cemento y a la buena consolidación.

Unas pilas de concreto de agregado ligero presforzado han estado en servicio en Estados Unidos desde 1955 y una inspección en los 80 ha mostrado las condiciones excelentes en que se encuentran (Gerwich *et al*, 1986).

Los reportes de Rusia (Gerwich *et al*, 1986), indican una mayor durabilidad de las construcciones marinas hechas con concretos de agregado ligero debido a la baja permeabilidad al agua como resultado de su estructura interna.

### 11.3.2.3 Comportamiento en incendios reales

Han sido numerosos los incendios fuertes que han atacado a estructuras de concreto de agregados ligeros reforzadas convencionalmente y éstas por lo general han superado a los resultados esperados a partir de las pruebas de resistencia al fuego, esto debido a que el mejor aislamiento térmico incrementa la resistencia al fuego en comparación con el concreto normal.

Hay solamente un caso documentado de un incendio real de densidad severa que atacó a una estructura de concreto de agregado ligero presforzado. Esto ocurrió en 1959 en Charlotte, Carolina del Norte (Gerwich *et al*, 1986). Las vigas dobles T que formaban el techo estaban fabricadas con agregados gruesos de arcillas expansivas, y arena natural como agregado fino. Un recubrimiento de 7.5 cm de grueso de concreto normal fue aplicado después del montaje. Al poco tiempo de que la construcción se había terminado, un carro tanque que contenía petróleo de alto octano se estrelló en el edificio y el fuego lo atacó fuertemente por más de una hora.

Todo el acero expuesto de la estructura estaba retorcido y destruido, así como los marcos de las ventanas, las escaleras metálicas y los herrajes. Los vidrios de las ventanas derretidos y los ladrillos de la fachada estaban fuertemente agrietados.

Las unidades presforzadas de losa de piso se despostillaron a una profundidad de 2.5 cm, pero aparte de eso estaban en buen estado. El piso de loseta asfáltica al otro lado no fue consumido. Las pruebas de carga efectuadas después del incendio mostraron que el piso era capaz de soportar la carga de diseño con seguridad sin presentar deflexiones excesivas.

### 11.3.3 Los problemas del cambio de volumen

Estos son problemas asociados con el flujo plástico, la contracción y el cambio de temperatura. Son similares a los encontrados en el concreto normal presforzado, pero pueden ser más fuertes y presentar más dificultades en el concreto de agregado ligero debido a su más bajo módulo de elasticidad y su más baja resistencia al cortante. Ya que la carga viva es una porción considerable de la carga total cuando se usa el concreto ligero, la contraflecha inicial en piezas descargadas es por lo general mayor. El flujo plástico y la contracción de los concretos estructurales de agregados ligeros de alta calidad son por lo general del mismo orden que los del concreto normal, pero con algunos agregados y con algunos métodos de curado, llegan a ser ligeramente mayores. El módulo de elasticidad viene a ser alrededor del 60% en comparación con el del concreto normal, su efecto es aumentar la contraflecha durante la construcción.

Subsecuentemente, varios factores pueden combinarse para aumentar la contraflecha. Debido al mejor aislamiento térmico del concreto de agregado ligero, la temperatura en la parte superior de los miembros para techos, pueden tener variaciones mucho más grandes que las de la parte inferior, especialmente si la parte superior tiene un recubrimiento negro. Esto tiende a incrementar la contraflecha durante el día; el presfuerzo tiende a evitar la recuperación total durante las noches. Debido a que hay una penetración de agua menor con algunos agregados ligeros, la contracción diferencial de los miembros de las cubiertas en servicio puede ser mayor.

A medida que la contraflecha crece, la excentricidad del presfuerzo aumenta, dando un crecimiento permanente a la contraflecha. Al mismo tiempo los extremos giran, dando origen a una tensión adicional considerable y a esfuerzos cortantes en los extremos de los miembros cerca de los apoyos.

Todos estos factores pueden sobrellevarse con éxito con un diseño adecuado, pero no pueden ser ignorados. Son similares a los procesos que se presentan en el concreto normal presforzado, pero del orden del 50% más grandes.

(1) En una ocasión los miembros T precolados presforzados se tomaron directamente de la producción (es decir, en condiciones húmedas) y se colocaron en la cubierta de un edificio a mitad del invierno con objeto de permitir que la construcción interior continuara. El recubrimiento se colocó inmediatamente, y el interior del edificio fue calentado. Esto condujo toda la humedad a la parte superior de los patines de las unidades de la cubierta, mientras que las almas de las T se secaban. La contracción diferencial causó una contraflecha excesiva la cual, combinada con el flujo plástico, alcanzó un máximo de 3.7 cm en un claro de 10 metros.

La solución a este problema consiste en almacenar los miembros presforzados hasta que una gran parte de la contracción y del flujo plástico haya tenido lugar antes de efectuar el montaje.

(2) En otros dos casos los miembros de la cubierta de concreto de agregados ligeros presforzados fueron recubiertos con un material negro, con impermeabilizante negro en un caso y con asfalto negro en otro. No se tomaron provisiones para la rotación de los extremos. El calor del sol durante el día causó una contraflecha hacia arriba; el presfuerzo evitaba su recuperación completa durante las noches. En uno de los casos se presentaron grietas en el alma de las T cerca de los apoyos. En el otro caso, un refuerzo adecuado de acero dulce previno el agrietamiento de las almas de las T, pero se presentaron grietas en las vigas en que estaban asentadas.

La correlación y solución al problema se obtiene instalando cojines de apoyo de neopreno cerca de los extremos de los apoyos para prevenir la concentración de esfuerzos en el apoyo. La necesidad del refuerzo de acero dulce adecuado en las almas de las T cerca de los apoyos es definitiva.

(3) Quizás los casos más notorios de dificultad se presentaron en los miembros del primer puente de agregado ligero presforzado hecho en Estados Unidos en 1953 (Short y Kinniburgh, 1967), embarcados e instalados a través del río Kenai en Alaska. Estas unidades eran losas planas para cubiertas, con el presfuerzo diseñado para concreto normal. Ya que los elementos debían ser enviados a 2,000 millas del punto de su fabricación, los fabricantes solicitaron y recibieron permiso para emplear concreto de agregado ligero, pero no se hizo ninguna compensación en la fuerza de presfuerzo. Las unidades así diseñadas tenían en los extremos un refuerzo de acero dulce inadecuado de acuerdo a los reglamentos y recomendaciones actuales. No se emplearon apoyos de neopreno o de goma.

La contracción y el flujo plástico durante la fabricación fueron reportados mayores comparados con los que se obtienen actualmente con mejores procedimientos, y el módulo de elasticidad más bajo. Al ser embarcadas las unidades tenían una contraflecha considerable. Fueron transportadas en camiones, luego embarcadas y posteriormente conducidas nuevamente en camión hasta el sitio. Durante este tiempo, estaban constantemente húmedas en la parte superior y por lo general secas en la inferior. Estas contracciones diferenciales y los múltiples manejos aumentaron la contraflecha.

Después de la instalación, se intentó corregir la contraflecha con pavimento asfáltico. El problema se empeoró debido a la superficie negra, a la temperatura diferencial y al gradiente de humedad.

La carga viva real que se presentó en esta localización remota fue despreciable. La contraflecha continuó creciendo y los extremos continuaron girando. Finalmente después de 8 años de servicio, los extremos se habían agrietado a tal grado que la cubierta tuvo que ser reemplazada.

Este tipo de problemas actualmente se resuelve con diseños más adecuados, los cuales incluyen un cálculo de la contraflecha durante los primeros años de servicio, una mejor distribución del acero dulce de refuerzo en los apoyos y el uso de cojines de neopreno en los apoyos.

#### *11.3.4 Comportamiento en el hincado de pilotes*

Los pilotes de concreto presforzado se han fabricado e hincado en longitudes superiores a los 40 metros. El uso de concreto de agregados ligeros reduce el peso que debe ser levantado. Las deflexiones durante su manejo fueron aproximadamente iguales a las del concreto de peso normal, el bajo peso balanceó el bajo módulo de elasticidad. El hincado prolongado con hincadores de pilotes de vapor dio un resultado similar al obtenido con pilotes de concreto normal.

En una instalación importante en la que se hincaron ataguías presforzadas tanto de concreto de agregado normal como de agregado ligero a través de ademes y enrocamientos enterrados, se observó que las ataguías de concreto de agregados ligeros presforzados fueron capaces de tomar mucha mayor distorsión sin agrietarse.

### 11.3.5 Abrasión y uso

Las losas para cubierta de concreto de agregados ligeros presforzados hechas adecuadamente y cuidadosamente, han demostrado su capacidad para soportar un tráfico pesado siendo el ejemplo más sobresaliente el puente sobre la Bahía Oakland, San Francisco. Las cubiertas de los barcos hechas con concreto de agregado ligero tienen similarmente resistencia al desgaste, a la vibración y a los esfuerzos alternantes.

Sin embargo, el concreto de agregado ligero está sujeto al despostillamiento y deterioro local bajo impactos localizados como sucede con las guarniciones y las barreras intermedias de los puentes. En el caso del puente de la Bahía de Oakland, los elementos de la cubierta de concreto ligero presforzado mostraron deterioraciones en la parte inferior de una curva vertical, donde los camiones aplicaban su potencia rápidamente para la subida de la cuesta; la parte restante de la cubierta no presentó este desgaste. Se ha utilizado una capa delgada de sustancia epóxica para su restauración y es una buena solución para los puntos de abrasión o impacto extremadamente localizados.

### 11.3.6 Economía

El extenso uso del concreto presforzado de agregados ligeros depende completamente de la facilidad para adquirir agregados ligeros de alta calidad. La fuente más importante de agregados ligeros apropiados para utilizar con presfuerzo proviene de las arcillas y las pizarras expansivas producidas por el método del horno rotatorio. Se han usado en menor grado las arcillas expansivas sinterizadas, las pizarras expansivas y los agregados hechos con cenizas muy finas sinterizadas. Los agregados ligeros naturales similares a la pómez por lo general han sido inadecuados en calidad y consistencia, pero algunas fuentes de agregados naturales localizadas en Nevada, Hawaii, Japón y Armenia, aparentemente tienen propiedades comparables con las propiedades de las arcillas expansivas y son usadas adecuadamente en los miembros presforzados de mediana calidad.

No obstante que para el montaje de una planta para producir agregados ligeros estructurales se requiere de un gran capital, estos agregados pueden utilizarse ampliamente en concreto de agregado ligero reforzado convencionalmente, así como en concreto presforzado de agregado ligero. La experiencia ha mostrado que la facilidad para adquirir agregados ligeros de una alta calidad uniforme es un fuerte estímulo a la demanda. En los países productores antes mencionados su uso se ha extendido rápidamente, necesitándose ya la instalación de plantas adicionales.

La demanda de los agregados ligeros no depende necesariamente de su bajo costo. Por el contrario, la mayor demanda del agregado ligero estructural se ha debido a las propiedades benéficas del concreto ligero. Por lo tanto el uso del concreto de agregado ligero, incluyendo las aplicaciones en presfuerzo, puede aumentar sustancialmente aún en aquellos países donde la arena y la grava natural son fáciles de obtener y a bajo precio.

La diferencia en costo entre el agregado normal y el agregado ligero varía considerablemente de un lugar a otro pero por lo general el agregado ligero de alta calidad cuesta aproximadamente el doble que el agregado normal. Este costo adicional puede ser equilibrado por las ventajas económicas directas o indirectas. En algunas regiones el agregado ligero estructural realmente cuesta menos que el agregado normal.

#### Ventajas directas

- (1) Reducción del peso muerto, ventaja especial donde la carga muerta es un alto porcentaje de la carga total, como en techos, pilas, puentes, etc.
- (2) Reducción del recubrimiento para un fuego de la misma intensidad. Mayor resistencia al fuego.
- (3) Reducción del peso por transportar lo que significa menor costo de transportación especialmente en distancias largas. En algunos casos la reducción del peso permite que los elementos sean transportados en camiones por donde el peso de los elementos de concreto normal excedería los límites permisibles del camino. El peso reducido permite la transportación y por lo tanto el uso de unidades precoladas individuales más grandes con un considerable beneficio en la economía total.
- (4) El bajo peso para el montaje, lo que a menudo permite el uso de un equipo estándar en lugar de uno especial, facilitándose el manejo y el montaje de las unidades.

- (5) Gran reducción de peso en las instalaciones sumergidas o flotantes
- (6) El aislamiento térmico es integral con los elementos estructurales

#### Ventajas indirectas

- (1) La reducción del peso muerto, debida al bajo peso de las unidades, trae como consecuencia cargas laterales reducidas para efecto de diseño sísmico
- (2) La reducción del peso muerto (+/-30%) puede reducir los requisitos del acero de presfuerzo del 10 al 18%.
- (3) La reducción del peso muerto da origen a unas cargas de cimentación más bajas, permitiendo el uso de zapatas más pequeñas, o una reducción en el número de pilotes, según el caso. Por ejemplo los requisitos para pilotes pueden reducirse del 20 al 25% usando concreto ligero.
- (4) El ahorro en otros elementos del marco estructural debido al peso propio reducido de los elementos de concreto ligero presforzado.
- (5) En algunos casos puede ser posible la reducción del peralte en vigas del mismo claro. Sin embargo, donde el diseño es controlado por las deflexiones por carga viva, puede suceder que no sea posible un ahorro sustancial en el peralte
- (6) El colado durante el invierno puede facilitarse debido a una mejor retención del calor.

En el presente, la situación económica con respecto al concreto presforzado de agregados ligeros está en un estado de rápida evolución o cambio. Hay un crecimiento tremendo real y planeado en la producción de agregados ligeros de alta calidad, mientras que, al mismo tiempo, los depósitos de agregados naturales de peso normal se están agotando y el costo de los mismos es cada vez mayor. Las mejoras en las técnicas y en el control de calidad de los agregados estructurales ligeros y su uso en trabajos de presforzado, han permitido incrementar más ampliamente la utilización de este nuevo material.

Anteriormente en muy pocos casos específicos, el concreto de agregado ligero se había usado para la producción en plantas de presforzado; el ahorro directo e indirecto que proporciona el agregado ligero puede ser económico para todas las fases de producción de la planta. En gran número de casos el agregado ligero constituye el 50% de la producción de presforzado de la planta.

El concreto presforzado de agregado ligero habiendo demostrado su capacidad estructural y técnica, está surgiendo rápidamente como un material económico para una amplia variedad de usos previniéndose un rápido crecimiento en su uso en un futuro próximo.

#### 11.4 CONCRETO CELULAR (O AIREADO) PRESFORZADO

En Rusia, el refuerzo de presfuerzo está incrementando el empleo de las estructuras hechas de concreto celular. Debido al problema de resistencia, corrosión y anclaje, se acostumbra alojar los tendones de presfuerzo en las nervaduras o losas de concreto normal para usarlas en acción compuesta con el concreto celular.

Hay varias clases diferentes de concreto celular, tales como el concreto espumoso, el concreto gaseoso, el espumoso-silicoso, el cenizo-espumoso, el cenizo-silicoso-gaseoso, etcétera. Los concretos celulares tienen densidades que varían de 600 a 1,200 kg/m<sup>3</sup> y resistencias a la compresión que van de 25 a 100 kg/cm<sup>2</sup>.

Las propiedades principales de los concretos celulares usados en Rusia se presentan en la Tabla 11.3. Estos concretos celulares consisten en materiales silicosos divididos finamente (tales como arena, cenizas y tufo), materiales base (tales como cemento y arcilla), agua y un aditivo especial para generar espuma o gas. No hay agregados gruesos en el concreto celular.

Ciertas cenizas volcánicas parecen ser capaces de dar por sí mismas resistencias aún más altas. Se han obtenido resistencias de  $160 \text{ kg/cm}^2$  con un peso volumétrico de  $740 \text{ kg/m}^3$  con estas cenizas volcánicas seleccionadas especialmente.

La principal ventaja del concreto celular comparado con el concreto de agregado ligero es el bajo peso unitario, el cual se debe a los vacíos. Además de estas propiedades, el concreto celular tiene una alta resistencia al fuego y al congelamiento.

La expansión térmica del concreto celular es aproximadamente 75% de la del concreto normal. El concreto celular tiene relativamente una alta contracción por secado. Las contracciones que se presentan en el concreto celular curado con agua o vapor a presión atmosférica, varían de 0.1 a 0.3%. El concreto celular curado en autoclave tiene un intervalo de contracciones que varía de 0.01 a 0.15%.

Para reducir la contracción por secado y mejorar la resistencia y otras propiedades, el concreto celular es por lo general curado en autoclave a temperaturas de  $170^\circ\text{C}$  o mayores, bajo una presión de vapor de  $8 \text{ kg/cm}^2$  o más alta.

En Rusia, el refuerzo usado está constituido por barras corrugadas de aleaciones de acero de alta resistencia. Estas son colocadas en la capa inferior o en las nervaduras de concreto normal. Esto proporciona un anclaje y una adherencia entre el concreto y el acero adecuados. La acción compuesta de estas nervaduras y/o las capas inferiores se alcanza por medio de la adherencia entre los concretos y por medio de un refuerzo especial por cortante que mantiene unidos a los dos concretos.

En Rusia, el concreto celular presforzado es utilizado principalmente para cubiertas de casas habitación y de edificios industriales. La losa superior o capa de concreto celular tiene un peso unitario aproximadamente de  $700 \text{ kg/m}^3$ .

El refuerzo por cortante de las losas planas para cubiertas de edificios de habitación está formado por estribos verticales junto a los apoyos en las regiones de cortante máximo. Estos estribos se sueldan a las barras de presfuerzo longitudinales. El refuerzo por cortante en cubiertas de edificios industriales está formado por estribos inclinados, soldados a los separadores de las barras longitudinales. Esto asegura la existencia de acción compuesta entre las nervaduras (de concreto normal) y la losa superior (de concreto celular).

El uso del presfuerzo permite usar acero de alta resistencia a la tensión, y por lo tanto obtener una mayor eficiencia y una reducción en la cantidad y en el costo del acero. El concreto celular reduce el peso propio de la cubierta de la estructura sustancialmente. Junto con todas las ventajas adicionales de transporte más ligero, cimentación y requisitos estructurales reducidos, cargas sísmicas de diseño más bajas, mayor facilidad de montaje, etc. Las propiedades de aislamiento térmico del concreto celular eliminan la necesidad de emplear materiales aislantes especiales, reduciéndose en esta forma el tiempo de construcción y el costo total de la cubierta. La eliminación de plafones aislantes adicionales es a menudo de gran importancia debido a las condiciones del tiempo y la época del año cuando se hace este montaje.

Considerable esfuerzo se ha desarrollado para obtener un método para presforzar directamente el concreto celular. Ente éstos están la obtención de concretos celulares de alta resistencia, y el uso de agregados ligeros o normales solamente para los bloques extremos precolados.

En Canadá, la producción experimental está siguiendo el método utilizado en la fabricación de precolados de concreto celular reforzados convencionalmente, al cual se le da un tratamiento especial formado por dos capas de anticorrosivos. El uso de recubrimientos epóxicos en las barras o tendones de presfuerzo, promete ventajas semejantes a las del galvanizado, etc.

Las ventajas originadas por el bajo peso unitario y alto aislamiento térmico combinadas con el comportamiento estructural y la economía proporcionada por el presfuerzo, hacen del concreto celular presforzado un campo particularmente atractivo para futuros desarrollos y utilización. Se prevé que su uso se extenderá a otros países, particularmente a aquellos con climas extremadamente fríos. Se ha visto también que se podrá emplear en climas desérticos, y eventualmente en climas tropicales, empleando medios adecuados para sellar las cubiertas contra la excesiva humedad.

#### 11.4.1 Áreas o campos para investigación y desarrollo adicional

Se requiere información sobre los siguientes temas:

(1) La resistencia a la tensión por prueba brasileña y la resistencia a la tensión diagonal del concreto de agregados ligeros necesitan más investigación. Se cree que las resistencias a la tensión están limitadas por la contracción diferencial entre la pasta y el agregado. Entre los medios posibles para la reducción de la contracción se encuentran: el sellado de la superficie del concreto, por ejemplo con sustancias epóxicas; recubrimiento especial de las partículas de los agregados, y el uso de cementos expansivos (ver inciso 2 a continuación). Otro medio puede ser la adaptación cuidadosa de la pasta de cemento al tipo particular de agregado utilizado, basándose en un estudio de las características del microagrietamiento.

(2) El uso de cementos expansivos con agregados ligeros puede ser mutuamente benéfico. El cemento expansivo reducirá la contracción de la pasta. El agua que absorben los agregados ligeros proporciona una buena fuente de agua de curado en el lugar adecuado con el objeto de permitir al cemento expansivo desarrollar su reacción completa, con efectos benéficos sobre la resistencia, gradiente de humedad reducido en miembros grandes durante el período de curado y reducción de la contracción. Los agregados ligeros estructurales son ideales para usar con cementos expansivos debido a que combinan la alta porosidad y la retención del agua con la alta resistencia y la relativa alta rigidez de las partículas de los agregados.

(3) Alta resistencia a la compresión. Una investigación sobre estructuras estará coordinada con el trabajo de la comisión de la FIP sobre Concreto de Alta Resistencia. La falla por compresión de los concretos de agregado ligero se cree que es esencialmente una falla en tensión. Los posibles caminos a seguir son:

- (a) El uso de un tamaño de agregado máximo más pequeño y más alto contenido de cemento;
- (b) curado a vapor a altas temperaturas y por períodos más largos para reducir las contracciones;
- (c) el uso de presfuerzo triaxial, el uso de espirales de alambre de alta resistencia combinadas con presfuerzo axial muy alto puede inducir suficiente presfuerzo transversal o confinante para tener un efecto significativo;
- (d) promover el diseño de mezclas de alta resistencia;
- (e) colocación dentro del concreto de fibras o varillas, las cuales pueden tener un efecto benéfico más grande con el concreto de agregado ligero.

(4) Comportamiento bajo choque, cargas dinámica y sísmica. Este es un aspecto particularmente prometedor y bien puede ser coordinado con la comisión de la FIP sobre Estructuras Presforzadas Sujetas a Cargas Sísmicas. Asimismo, determinar las propiedades dinámicas de estructuras hechas de concreto ligero, como por ejemplo, el amortiguamiento viscoso.

(5) Métodos y técnicas para incrementar la utilización del concreto celular presforzado particularmente en el campo del presfuerzo directo.

(6) Análisis e investigaciones de nuevas aplicaciones en las cuales el concreto ligero presforzado puede ser utilizado benéficamente.

Estas nuevas aplicaciones pueden utilizar las propiedades relacionadas con el bajo módulo de elasticidad, la absorción de energía, así como el bajo peso unitario. Se Sugieren los siguientes campos:

- (a) estructuras para maquinaria y cimentaciones;
- (b) pavimentos y autopistas - el bajo módulo de elasticidad y los movimientos térmicos más pequeños originados por el mejor aislamiento y más bajo coeficiente de expansión térmica pueden dar como resultado menores cambios en el presfuerzo durante su utilización.

- (7) Áreas de investigación sobre propiedades básicas donde se cree necesitar mayor y mejor información.
- (a) diseño por flexión a esfuerzos máximos;
  - (b) diseño de columnas con cargas excéntricas y concéntricas;
  - (c) deformación máxima;
  - (d) coeficientes de expansión y contracción térmica.
- (8) Inspección continua y reportes sobre la realización y el comportamiento del concreto presforzado de agregados ligeros bajo condiciones de servicio, haciendo énfasis especialmente en su comportamiento bajo las siguientes condiciones:
- (a) agua de mar;
  - (b) temblores;
  - (c) fuego;
  - (d) exposición a la congelación y al deshielo, con y sin exposición al agua del mar;
  - (e) sobrecarga e impacto;
  - (f) durabilidad en medios corrosivos bajo la exposición de varios agentes químicos, etc.
- (9) Investigación de la influencia de diferentes tipos de cementos sobre las propiedades de los concretos de agregados ligeros con referencia específica a la interacción entre el tipo particular de cemento y el de agregados envueltos.
- (10) Desarrollo de una teoría de resistencia para el concreto de agregado ligero.

### 11.5 COMENTARIOS FINALES

Este capítulo mostró la gran potencialidad del incremento en la fabricación y en el uso del concreto ligero presforzado; aplicaciones de ello, se resumen y detallan en la Tabla 11.4. En un artículo reciente, el ingeniero G. Ivanov-Dyatlov (Gerwich *et al*, 1986) dice: “El estudio de la tecnología de la fabricación, propiedades mecánicas-estructurales, contracción, flujo plástico, impermeabilidad al agua, resistencia al calor y fatiga, ha mostrado que la alta calidad de los concretos cuyos agregados están formados por arcillas expansivas son apropiados para la construcción de las estructuras más utilizadas”. Muchos trabajos necesitan de mayor investigación, desarrollo, aplicación, pero existen conocimientos suficientes y experiencia para justificar la afirmación de que el concreto ligero presforzado está listo para tener un mayor impulso como un nuevo material de amplio uso estructural.

Tabla 11.4. Utilización del concreto ligero presforzado

Tipo de aplicación	Volumen actual de uso	Formas o secciones uso	Propiedades y ventajas que conducen a su elección al compararlo con el concreto normal	Propiedades desfavorables
Pisos.	Sustancial	Losas planas precoladas. Losas encacetonadas. Losas T precoladas, sencillas o dobles. Vigueta precolada con losas coladas en el lugar. Losas coladas. Losas para cubiertas compuestas, coladas en el lugar sobre viguetas de agregados ligeros presforzadas. Losas postensadas (o losa y viga) para piso colada en el lugar.	Peso propio más bajo. Reducción de las cargas sísmicas. Estructura y carga de cimentación reducidas. Manejo y montaje más fácil. Mejor resistencia al fuego. Costos de transporte más bajos.	Contraflechas y deflexiones ligeramente mayores.
Cubiertas.	Muy grande y ampliamente difundido	Losas T precoladas, sencillas o dobles. Cascarones y trabelosas precoladas y coladas en el lugar. Losas compuestas de concreto celular. Losas precoladas para techos soportados en cables. Cubiertas para pabellones de exhibición y hangares para la aviación. Armaduras para cubiertas. Losas planas precoladas, sólidas o encacetonadas.	Peso propio más bajo. Reducción de las cargas sísmicas. Estructuras y cargas de cimentación reducidas. Mejor resistencia al fuego. Mejor aislante del calor. Condensación reducida. Movimientos térmicos más bajos costos de transporte y montaje más bajos.	Contraflechas y deflexiones ligeramente mayores.
Muros para edificios	Sustancial	Tableros sólidos. Tableros T. Tableros compuestos (sándwich). Tableros celulares: compuestos. Tableros con un acabado arquitectónico especial.	Presfuerzo de tableros para muros para prevenir el agrietamiento, haciendo secciones más delgadas y prácticas, facilitando el manejo y el montaje. Pese propio reducido. Cargas sísmicas reducidas. Cargas estructurales y de cimentación reducidas. Mejor aislamiento del calor. Mejor resistencia a las heladas y al deshielo. Movimientos térmicos menores. Manejo y montaje más fácil. Mejor resistencia al fuego. Menor condensación.	
Vigas de puentes	Alguno, incluyen algunas estructuras grandes e importantes	Claros suspendidos. Vigas I compuestas con cubiertas coladas en el lugar. Vigas T. Largueros de vigas en cajón. Losas aligeradas. Secciones segmentadas.	Peso propio reducido. Cargas sísmicas reducidas. Cargas estructurales reducidas. Cargas de cimentación reducidas. Manejo y montaje más fácil. En las vigas: segmentadas, el bajo módulo de elasticidad permite mejor distribución de las presiones en la cara de unión del apoyo cuando se emplean juntas secas. Mejor resistencia al fuego (algunas instalaciones en áreas susceptibles de incendiarse).	Bajo módulo de elasticidad. Mayor contraflecha. Tensión diagonal más baja.
Cubiertas de puentes	Algún uso	Losas precoladas. Losas para cubierta coladas en el lugar en acción compuesta con vigas I presforzadas de agregados ligeros.	Peso propio más bajo.	
Zapatas para puentes.	Considerable.	Vigas I, vigas T. Vigas en cajón.	Peso propio bajo particularmente donde el peso propio representa la mayor parte de la carga total de diseño y donde la carga de diseño es raramente puesta en servicio. Montaje más fácil.	Más sujeto al despostillamiento debido a la abrasión y al impacto local.
Piloteado.	Alguno.	Pilotes de cimientos. Pilotes de defensa. Pilotes para Duques de Alba. Pilotes inclinados. Ataguías.	Peso sumergido reducido lo que significa mayor capacidad para las cargas de diseño, también esfuerzo de flexión menores en los pilotes inclinados. Peso reducido para manejarlos y transportarlos, especialmente importante en pilotes muy largos. Mejor deflexión y absorción de energía. Mayor capacidad para deformarse sin agrietarse durante el hincado cuando se encuentran obstrucciones.	
Vigas para grúas viajeras y elementos de edificios industriales.	Alguno.	Vigas I. Vigas rectangulares. Secciones en cajón.	Peso propio más bajo. Cargas estructurales reducidas. Absorción de energía. Resistencia al fuego.	Mayor contraflecha. Tensión diagonal más baja. Mayores deflexiones bajo carga viva.
Estructuras resistentes a los temblores y amortiguadores de choques.	Alguno.	Vigas. Marcos para estructuras.	Absorción de energía. Módulo de elasticidad más bajo. Peso propio más bajo por consiguiente menores cargas sísmicas.	
Resguardo de rieles y defensas.	Un poco.	Vigas rectangulares.	Absorción de energía. Mayores deflexiones bajo impacto. Resistencia al fuego (comparado con la madera).	Despostillamiento bajo impacto y abrasión en los bordes.
Postes.	Experimental y alguna producción.	Ahusados. Sección constante. De núcleo hueco.	Peso reducido para transporte y montaje. Cargas sísmicas reducidas. Mayores deflexiones bajo carga.	
Durmientes de ferrocarril.	Experimental y alguna producción.		Peso reducido para el manejo y la instalación. Mejor absorción de energía. Las deflexiones mayores reducen el "confinado central".	Las inserciones pueden requerir recubrimiento o anclaje mayores.
Estructuras flotantes.	Alguno.	Elementos precolados. Colados en el lugar	Peso reducido donde el grueso de los muros está determinado por el recubrimiento sobre el acero y por los requisitos de colocación, impermeabilidad y rigidez. Mayor durabilidad anticipada. Mayor absorción de energía. Permeabilidad reducida anticipada. El peso sumergido del concreto de agregado ligero es solamente la mitad del peso del concreto normal. La resistencia a la tensión bajo el agua es aproximadamente igual a la del concreto normal.	

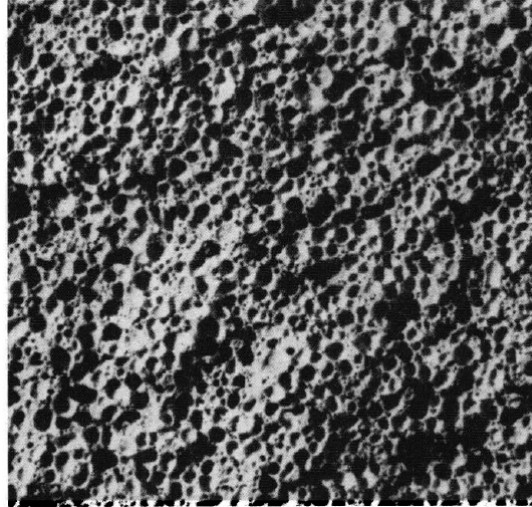
## 12 BLOQUES DE CONCRETO LIGERO

En este capítulo se describe brevemente la manufactura de bloques de concreto celular, y se explican e ilustran con algunos ejemplos prácticos las propiedades y el comportamiento de los bloques. Asimismo se incluyen los resultados de investigaciones recientes, elaboradas por Norman (1982), sobre resistencia a la intemperie, resistencia al ruido y propiedades térmicas.

El concreto celular procesado en autoclave (CCPA) no es nada nuevo, ya que evolucionó en Europa durante aproximadamente los últimos 50 años. Ha sido adoptado como un nuevo material de construcción en la mayoría de los países desarrollados con la excepción notable de Estados Unidos, donde este tipo de concreto se ha producido únicamente en escala limitada y durante periodos cortos (Norman, 1982).

El CCPA es, por definición, un producto prefabricado que sólo puede obtenerse bajo condiciones controladas de fabricación, y es una forma poco usual de concreto, ya que no contiene agregado grande; no obstante, su aplicación es la de un producto de concreto y ha demostrado poseer muchas propiedades útiles, aunque no muy especiales. Es un material ligero, celular, constituido por cemento y/o cal, y ceniza pulverizada de combustible (CPC) u otro material de sílice. Su estructura celular (Figura 12.1) se forma normalmente por una pequeña cantidad de polvo de aluminio en la mezcla, que reacciona con la cal para formar burbujas de hidrógeno que le dan al material su estructura porosa.

El desarrollo en el campo de los bloques de CCPA en muchos países ha sido paralelo con los requisitos crecientes de conservación de energía en los edificios. En los países escandinavos fue el material preferido, varios años antes de que lo fuera en otros países europeos como Alemania y el Reino Unido, en el cual sólo durante los últimos años se ha incrementado su uso, debido a sus propiedades térmicas y a la introducción de más estrictos reglamentos de aislamiento térmico en casas habitación (Norman, 1982). Un muro doble tradicional con un revestimiento exterior de tabique y un revestimiento interior de 10 cm de CCPA cumple con los reglamentos, sin necesidad de aislamiento adicional. Los avances posteriores en los requisitos de conservación de energía fomentarán también el uso de los bloques de CCPA, ya sea unidos con otros materiales aislantes no estructurales, o solos y en espesores mayores de los tradicionalmente usados en el Reino Unido (Norman, 1982).



*Figura 12.1. Estructura microcelular de bloques de concreto celular procesado en autoclaves.*

Los bloques de CCPA son aceptados por los fabricantes de bloques, como materiales de construcción de elevada productividad y calidad consistente, que tienen una forma conveniente y no requieren cubicarse para propósitos de transporte. Es más ligero que los otros tipos de bloques, por lo que sus costos de manejo y de transporte son bajos. Su manufactura se inicia con la recepción de las materias primas, algunas de las cuales pueden molerse en molinos de bolas y después lotearse por peso y mezclarse con agua. A esta mezcla se le agrega polvo de aluminio y luego se descarga en moldes ordenados en líneas, donde el material sube y fragua antes de ser cortado. Después de cortar los “panes”, los moldes que contienen los bloques se ordenan en series y son curadas por vapor a presión elevada, en autoclaves. Después de haber pasado por los autoclaves, los bloques son cargados de las bodegas y almacenes a los camiones para ser entregados en la obra. El uso de vehículos de descarga automática es muy popular entre los clientes, ya que no tienen que disponer de personal o maquinaria para recibir la entrega.

Para el proyectista de edificios los bloques de CCPA ofrecen una gran variedad de soluciones que son base del firme crecimiento de este tipo de construcción en Europa. El material está limitado en cuanto a la máxima resistencia a la compresión que puede alcanzar, y no debe considerarse como sustituto total de los otros tipos de bloques de concreto, sino como una importante y extremadamente útil modalidad, que se produce en espesores diferentes. Acepta acabados tradicionales y novedosos, aunque a la fecha, el uso de yeso ligero internamente y el cemento arena aplicado externamente, siguen siendo los acabados más comunes. Otra de las características del producto es que permite fijaciones directas.

Puesto que el CCPA es una de las formas más ligeras de concreto (puede flotar en el agua), ha sido necesario un programa continuo de investigación que respalde su pruebas similares efectuadas con comportamiento satisfactorio. A muros normales de tabiques de continuación se exponen algunos ejemplos de sus cualidades.

### *12.1 RESISTENCIA A LA INTEMPERIE*

Debido a lo ligero del CCPA, algunos arquitectos y constructores tradicionalistas piensan que tiene poca durabilidad y resistencia a la intemperie; sin embargo, numerosas investigaciones han demostrado que el concreto celular puede tener una mayor resistencia a las heladas que un concreto más pesado y que la mampostería de arcilla. Algunas marcas de concreto celular son adecuadas para usarse bajo el nivel del suelo, por lo que se han empleado en estas situaciones durante muchos años; además, su resistencia a la penetración de humedad es muy elevada.

Las investigaciones llevadas a cabo en laboratorios particulares han confirmado la superior resistencia a la penetración de humedad proporcionada por el concreto celular; cuando la lluvia logra penetrar, es sólo a lo largo de las juntas de mortero y no a través de los bloques. Por ejemplo, un muro de bloques de CCPA de 10 cm de espesor, sometido a la prueba de penetración de lluvia del British Standard, tardó 72 horas para que su cara interior se humedeciera en un 100%.

Pruebas similares efectuados con muros normales de tabiques de 10 cm de espesor, tardaron entre 15 y 24 horas para humedecerse, cuando los tabiques se colocaron con las ranuras hacia arriba y se llenaron con mortero; con las ranuras hacia abajo, el tiempo varió de 12 a 18 horas. Un muro de CCPA de 23 cm de espesor, cubierto externamente con un aplanado convencional de 1:1:6, no mostró penetración alguna de agua en la superficie de su cara posterior después de estar más de 240 horas bajo prueba.

### 12.2 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

La resistencia del CCPA a cargas concentradas producidas por apoyos de vigas y otros elementos es de interés, debido a la resistencia a la compresión relativamente baja del material. El autor ha llevado a cabo estudios del comportamiento de bloques de CCPA sometidos a esta forma de carga, mediante la técnica de recubrimiento fotoelástico: las superficies de los bloques y de las juntas de mortero son recubiertas con material fotoelástico que hace posible estudiar las deformaciones dentro de la mampostería, desde el momento en que se aplica la carga progresivamente, inclusive hasta el punto de falla, mediante el empleo de un polariscopio. Esta técnica es similar a la de los rayos X, y los resultados pueden ser fotografiados en color. Los "contornos" que se observan en el polariscopio pueden ser interpretados como indicadores de la magnitud de las deformaciones. Se sugiere aplicar más esta técnica de investigación para aumentar nuestros conocimientos del comportamiento estructural de todas las formas de mampostería.

Otro aspecto del comportamiento estructural que recientemente ha despertado interés en el Reino Unido es la resistencia a las cargas de viento (Norman, 1982). Ha habido algunas opciones de que la resistencia lateral de los bloques de concreto celular (es decir, la resistencia a la flexión producida por la fuerza del viento) es menor que la prescrita por el British Code of Practice for Structural Use of Masonry. Se llevaron a cabo pruebas en muros a tamaño natural, que definen el comportamiento de bloques de concreto celular, los resultados demuestran que los valores dados en el Code of Practice son seguros, y la experiencia en el campo indica que son conservadores. Es de esperarse que las investigaciones actuales conduzcan a una mejor comprensión de cómo los muros de mampostería de todos los tipos, resisten las cargas producidas por el viento.

### 12.3 AISLAMIENTO ACÚSTICO

Debido a la bien establecida correlación entre la masa y el aislamiento acústico, ha sido necesario efectuar investigaciones sobre el comportamiento de bloques de concreto celular en muros divisorios en las viviendas. Se publicó un informe global de todas las pruebas acústicas de campo del British Standard (Norman, 1982), sobre muros divisorios construidos con bloques de concreto celular, para los fabricantes de CCPA. Los resultados obtenidos (Tabla 12.1) son superiores a los resultados promedio obtenidos por el Building Research Establishment en un estudio nacional, cuando se probaron 1270 muros divisorios de una gran variedad de bloques y pudo observarse que sólo el 45 % de ellos cumplía con los requisitos.

Tabla 12.1. Valores U de diversos muros

Densidad seca bruta del bloque (kg/m <sup>3</sup> )	Tipo de bloque	Muro doble (tabique-espacio-bloque) recubierto interiormente con yeso	
		Cálculo BRA/668/68	Ensayo experimental
3140	Ranuras llenas de aire	1.23	1.35
1120	Ranuras llenas de espuma	1.01	1.26
1170	Ranuras llenas de aire	1.36	1.54
1200	Ranuras llenas de espuma	0.83	1.35
1150	Ranuras llenas de aire	1.22	1.33
1170	Ranuras llenas de espuma	0.96	1.20
1040	Ranuras llenas de aire	1.30	1.42
1100	Ranuras llenas de espuma	0.88	1.31
1140	Ranuras llenas de espuma	1.04	1.27
1150	Ranuras llenas de aire	1.05	1.26
930	Ranuras llenas de aire	1.02	1.15
1120	Ranuras llenas de aire	1.35	1.44
1100	Ranuras llenas de aire	1.13	1.35
670	CCPA Compacto	0.99	1.08

\* Fuente: Yarsley Technical Centre Report U68123/7 Conductividad térmica de bloques de concreto ligero.

La estructura microcelular del CCPA, según parece, le proporciona mayor aislamiento acústico en comparación con otras formas más pesadas de mampostería de concreto de composición más porosa. Los muros divisorios entre habitaciones, comúnmente son muros dobles constituidos por dos muros de 10 cm de espesor, separados por un espacio de 7.5 cm. Siempre ha sido práctica común que los amarres de los muros sean de alambres de mariposa más que amarres rígidos de tiras de acero, y las investigaciones recientes han demostrado que el aislamiento acústico aumenta aún más cuando no hay ningún amarre. Generalmente los muros divisorios son estructuralmente firmes sin necesidad de amarres, que simplemente se incluyen por razones tradicionales. Además de la masa de la mampostería existen muchos factores que afectan el aislamiento acústico; entre éstos están la mano de obra y los detalles correspondientes al edificio, tales como el tipo de acabado aplicado.

#### 12.4 AISLAMIENTO TÉRMICO

El concreto celular adquiere sus propiedades de aislamiento térmico por el encapsulamiento de miles de pequeñísimas celdas de aire en cada bloque, y por el empleo de agregados que tienen un tamaño tan pequeño que el material puede ser clasificado como homogéneo y desprovisto de puentes de calor.

La forma más común de muro exterior, en el Reino Unido (Norman, 1982), es un muro doble con cubierta exterior de tabique, espacio de 5 cm y una cubierta interior de bloques de 10 cm de espesor con acabado interior de yeso. Cuando se introdujeron los reglamentos de aislamiento térmico que exigen una transmitancia térmica (U) no mayor de  $1.0 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  para casas habitación, estaban ligados a una especificación, supuestamente satisfactoria, que establecía que la cubierta de 10 cm fuera de bloques de una densidad no mayor de  $733 \text{ kg/m}^3$ . Obviamente, las piezas de mampostería más pesadas tendrían que ser más gruesas o depender de aislamiento adicional no estructural para desarrollar su comportamiento térmico.

El Departamento Británico del Ambiente publica en 1976, en el documento BRA/668/68, un método de cálculo que ha sido aplicado extensamente para bloques ranurados de concreto (Norman, 1982). Desde esa fecha se han publicado diversos resultados de pruebas que indican que este método de cálculo rinde valores de transmitancia térmica (U) bastante aceptables tanto para bloques llenos de aire como para los bloques ranurados llenos de espuma.

El Instituto Británico de Estatutos de Servicios en Edificios (Chartered Institute of Building Services) publicó en los 80's su última guía que contiene el método autorizado de cálculo más actualizado. El método de la guía revisada, consiste en tomar el indicando que los valores medio entre la circulación paralela de calor y el cálculo paralelo isotérmico, lo cual produce respuestas que son más cercanas a los resultados de las pruebas para toda la variedad de mampostería usada para propósitos de aislamiento térmico. Sin embargo, se opina que la guía no va lo suficientemente lejos y conforme se produzca más información será posible calcular con mayor precisión, y que el resultado de las pruebas continuará resultados reales están más cerca del cálculo paralelo isotérmico (Norman, 1982).

Ambos métodos de cálculo, es decir, el método paralelo de flujo de calor incluido en el BRA/668/68 y el método paralelo isotérmico, dan el mismo resultado para bloques de concreto celular, ya que no están ranurados. Los resultados obtenidos en pruebas de muros de tamaño natural, son ligeramente superiores a los resultados calculados, pues las juntas de mortero no son tomadas en cuenta en los cálculos, por razones de reglamentación de construcciones en el Reino Unido (Norman, 1982).

Los Reglamentos de Construcción del Reino Unido (Norman, 1982) exigen valores U aún más estrictos que  $1.0 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ , para edificios que no sean de tipo habitacional. El valor U de partes opacas de muros está limitado actualmente a un valor máximo de  $0.6 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ , con excepción de los edificios para fábricas y almacenes, en los que se permite llegar hasta  $0.7 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ . Algunos diseñadores están modificando el muro doble tradicional, relleno total o parcialmente la separación con espuma soplada o aislamiento prefabricado no estructural. Algunas otras soluciones en las que el diseñador desea conservar los beneficios tradicionales de la construcción con muros dobles, incluyen la adopción de recubrimientos interiores ligeramente más gruesos o dos recubrimientos de bloques de CCPA.

Es de esperarse que los reglamentos de aislamiento térmico para casas habitación sean igualados con los de construcciones no habitacionales, es decir,  $0.6 \text{ Kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ , para las partes opacas de los muros. No se espera que este valor se reduzca más durante un tiempo bastante largo, ya que podría traer consigo una revolución en el diseño y la construcción de edificios. Asimismo, los efectos secundarios del incremento en aislamiento térmico, tales como la condensación intersticial y otros problemas, requieren algún tiempo para ser resueltos, allí donde los diseñadores se aparten de la bien conocida y probada construcción de mampostería.

### 12.5 RESISTENCIA AL FUEGO

El concreto celular no es combustible y los muros de este material han demostrado en las investigaciones, que tienen muy elevada resistencia al fuego y un aislamiento superior a las temperaturas del fuego, en comparación con otras formas de mampostería de concreto. Al igual que todas las formas de concreto los bloques de CCPA son, por supuesto, muy superiores en este aspecto, a la madera.

El Reglamento Británico en sus pruebas, menciona una tasación en horas contra el fuego, para un tipo particular de concreto, que es probado bajo condiciones estándar en un muro de un piso de altura. Los requerimientos de la prueba de la carga de diseño donde sea apropiado. Cualquier defecto como grietas que se hayan desarrollado durante la prueba no debe permitir la extensión del fuego de uno a otro lado del muro, y los criterios de aislamiento requieren que la temperatura de la cara del muro más alejada del fuego no debe haberse incrementado más allá de lo prescrito. Como guía, puede considerarse que los muros de bloques de concreto celular, proporcionan una resistencia al fuego, de media hora por cada 25 mm de espesor en muros de carga, y de una hora por cada 25 mm, en muros que no son de carga.

### 12.6 ACABADOS

Un avance reciente ha sido el uso de una sola capa de yeso que elimina una operación y proporciona un acabado muy satisfactorio sobre bloques de concreto celular, aunque debe existir un elevado grado de adherencia entre el material de base y el acabado de la superficie. Las investigaciones demostraron que los esfuerzos originados en muros por diversos tipos de movimiento pueden ser elevados, y que es vital que las resistencias a la tensión y al cortante en la interface entre la mampostería y cualquier forma de acabado, sean las adecuadas. Cualquier forma de acabado de la superficie debe ser compatible con la resistencia del material de base.

Una superficie adherida a una base de cemento reforzado con fibra de vidrio, está siendo usada limitadamente y los resultados de las pruebas de investigación son muy alentadores. Un muro de bloques de CCPA de 10 cm de espesor con una capa de 6 mm de espesor, fue sometido a la prueba de penetración de lluvia; después de un periodo de prueba de 48 horas no se observó penetración alguna. La prueba se continuó durante 14 días y tampoco se observó penetración alguna. Muretes con superficie adheridas, aplicada en una sola cara del muro y sometidas a pruebas de flexión, de manera que ésta quedara en el lado de tensión, dieron como resultado el doble de la resistencia obtenida en muretes no tratados. Tableros de muros de tamaño natural, almacenados en seco y con superficie adherida, también fueron sometidos a la prueba, y su resistencia obtenida a la compresión fue igual a tres veces la carga permitida en muros no tratados, de acuerdo con el Reglamento de Prácticas.

### 12.7 APLICACIONES

En el Reino Unido (Norman, 1982) se espera que los productores de materiales de construcción proporcionen bastante orientación y datos sobre el empleo de sus productos; por lo tanto, se continúan realizando investigaciones, por parte de los fabricantes de bloques de concreto celular, sobre diversos usos del material. Los fabricantes también proporcionan un servicio de asesoría técnica con el fin de comprobar la adecuación estructural de los diseños y orientar respecto al uso correcto de morteros y acabados, y respecto a la elección correcta de aditivos y otras sustancias necesarias.

Los bloques de CCPA son extraordinariamente adecuados para muros de estructuras de elevación baja y mediana, tanto arriba del nivel del terreno como debajo de este nivel. El material puede ser empleado para muros exteriores normales o dobles, ya sea que estén protegidos o no, o unidos a un recubrimiento de tabique. Además de su muy buen comportamiento térmico, proporcionan buen aislamiento acústico y almacenamiento térmico en comparación con otros elementos de construcción. Estos bloques también se emplean extensivamente para divisiones interiores.

Otra característica de los bloques de concreto celular es que, debido al método de corte, pueden producirse con un elevado grado de precisión dimensional. En algunos países esto ha sido aprovechado en la construcción de edificios, de manera que los muros son unidos con juntas delgadas de mortero y hasta con pegamentos. Esta técnica subraya aún más el comportamiento térmico del muro aproximadamente en un 10%, y un beneficio adicional es que la construcción con juntas delgadas es compatible con los acabados de yeso aplicados por aspersión fina, lo que proporciona un acabado rápido de construcción casi seco.

Un aspecto interesante de los bloques de CCPA en el Reino Unido (Norman, 1982), es el aislamiento que proporciona una base de bloques de concreto celular del espesor requerido, con un agregado expuesto muy atractivo o con apariencia de piedra simulada. La popularidad de este material es creciente para su uso en edificios de calidad en los que se requiere buena durabilidad y exterior atractivo, junto con una elevada capacidad de aislamiento térmico.

### 13 APLICACIONES CON CONCRETOS LIGEROS

En este capítulo se ilustran, por medio de ejemplos, algunas aplicaciones prácticas de estructuras fabricadas con concretos ligeros. La mayoría de las fotografías ilustradas en este capítulo fueron obtenidas en [www.skyscrapers.com](http://www.skyscrapers.com).

#### 13.1 EDIFICIOS

##### 13.1.1 Shell Plaza Tower

El “Shell Plaza Tower” (Figura 13.1), destinado a oficinas, está ubicado en el centro de Houston (suelo de arcilla); tiene 218 m de altura, 50 niveles, claros típicos de 11 m, 114,000 m<sup>2</sup> de área útil, y su construcción terminó en 1971; en 1994 se le hizo una reconstrucción. La torre tiene una estructuración en planta de doble tubo. Fue el edificio más alto de Texas hasta 1980, el más alto de concreto reforzado más alto del mundo hasta 1975, y actualmente es el décimo edificio más alto de la ciudad, iguala la altura del más alto considerando su antena, y es uno de los edificios más altos del mundo hechos con concreto ligero reforzado.

La resistencia a compresión del concreto ligero utilizado varía entre 315 y 420 kg/cm<sup>2</sup> y el módulo de elasticidad de 162,000 kg/cm<sup>2</sup>. Las losas ligeras tienen espesores de 9.5 cm y fueron diseñadas con cargas de 350 kg/m<sup>2</sup>. Originalmente se ideó el edificio de 35 pisos usando concreto de densidad normal, pero un estudio proponía utilizar concreto ligero con densidad de 1840 kg/m<sup>3</sup> para aumentar a 50 niveles con los mismos costos totales de construcción. El “One Shell Plaza Tower”, es un ejemplo famoso del uso del concreto de agregado ligero, en el cual se incorpora dicho concreto en todos los elementos estructurales.

##### 13.1.2 Marina City Towers

Las torres gemelas del “Marina City” (Figura 13.2), ubicadas en Chicago, fueron construidas en los años 60's sobre los bancos del río Chicago. Las dos torres son de una sección cilíndrica de 179 m de altura con 60 niveles destinados a departamentos. Las losas de pisos fueron coladas usando concreto de agregado ligero.



Figura 13.1. Shell Plaza Tower



Figura 13.2. Marina City Towers

### 13.1.3 Lake Point Tower

El “Lake Point Tower” (Figura 13.3), construido en la ciudad de Chicago entre 1965 y 1968, tiene 197 m de altura, 69 niveles y 120,770 m<sup>2</sup> de construcción. La estructura es de concreto reforzado, y en algunos elementos la resistencia a la compresión alcanzó los 520 kg/cm<sup>2</sup>. Fue hasta 1971 el edificio de concreto más alto del mundo, hasta 1994 el edificio de uso residencial más alto del mundo, y actualmente es uno de los más conocidos en la ciudad de Chicago. Las curvas del edificio fueron proyectadas para que los residentes no pudieran ver dentro de su departamento las ventanas del vecino; en la azotea del edificio se proyectó un parque privado. El concreto de agregado ligero se utilizó en todos los capiteles de las columnas y en todas las losas de 20 cm de espesor.



*Figura 13.3. Lake Point Tower*

#### 13.1.4 Water Tower Place

El “Water Tower Place” (Figura 13.4) en Chicago, construido entre 1972 y 1976, tiene 74 niveles en 262 m de altura. La resistencia del concreto es de  $620 \text{ kg/cm}^2$  en las columnas de las primeras plantas, disminuyendo la resistencia escalonadamente con la altura, quedando en 520, 410 y  $280 \text{ kg/cm}^2$  para los niveles superiores. Cuando se construyó fue el edificio más alto de concreto.



*Figura 13.4. Water Tower Place*

El Water Tower Place no descansa sobre una base de piedra, sino que los cajones están únicamente a 24 metros de profundidad sobre terreno firme. Sin el concreto ligero, la cimentación hubiera tenido que profundizarse hasta 36 metros para encontrar el lecho de roca, más uno y medio o dos metros de anclaje dentro de la roca. Los ingenieros estructuristas atribuyen el ahorro al uso en las losas del concreto estructural ligero con densidad de  $1,682 \text{ kg/m}^3$ , en lugar de la mezcla convencional de  $2,400 \text{ kg/m}^3$ ; su decisión, la primera de su clase a esta escala, redujo en más de una tercera parte el peso muerto de las losas.

#### 13.1.5 Raymond Hilliard Centre

El “Raymond Hilliard Centre”, ubicado en Chicago, fue construido en 1960. Todas las columnas, muros de carga y losas de piso fueron hechas con concreto de agregado ligero.

#### 13.1.6 Guy's hospital o Guy's tower

Dicho hospital, fue inaugurado en los 1970 en la ciudad de Londres (Figura 13.5) El conjunto consta de dos torres de 34 niveles, la de usuarios y la de comunicaciones, de 122 y 145 m de altura respectivamente, la altura de entrepiso es de 4.57 m. La estructura representa, a la fecha, el hospital más alto del mundo y el edificio más alto de Londres. El uso del concreto de agregado ligero obedece a reducir cargas en cimentación por aligeramiento de elementos estructurales y muros externos. Los primeros cinco niveles se construyeron con losas de agregado ligero con resistencia a la compresión  $f_c'$  de  $315 \text{ kg/cm}^2$  y densidad de  $390 \text{ kg/m}^3$ .



Figura 13.5. Guy's hospital

#### 13.1.7 Embajada de China en Londres

A mediados de los 80's, el ejemplo más significativo en Londres de un edificio de concreto reforzado de agregado ligero colado in-situ, fue la embajada de China en la ciudad de Portland; el edificio es de 7 niveles, un mezanine, y dos niveles de sótano. El concreto de agregado ligero (lytag), se utilizó para el colado de vigas y losas de todos los pisos, y para el colado de los muros de niveles superiores; las losas son de 17.5 cm y 22 cm de espesor, con claros de entre 4.4 m y 6.75 m. Los finos naturales tuvieron que incluirse en el mezclado para producir una mezcla bombeable. La resistencia característica a los 28 días fue de  $435 \text{ kg/cm}^2$ , registrada con base en 105 pruebas con probetas cúbicas; la resistencia de diseño del concreto en los documentos del proyecto especificaban  $300 \text{ kg/cm}^2$ , con un contenido de cemento de  $396 \text{ kg/m}^3$ .

### 13.1.8 Sheraton Park Tower

El edificio “Sheraton Park Tower”, construido en Inglaterra (Knightsbridge) tiene una planta para auditorio, y por encima una torre de 15 niveles con una planta circular de 37 m de diámetro. Todos los elementos estructurales de la torre son de concreto de agregado ligero, con agregados de Lytag y finos naturales; los elementos colados con concreto de agregado ligero fueron: losas macizas de 17.5 cm, muros radiales, y el núcleo central. El uso del concreto de agregado ligero en la obra tiene como justificación reducir las cargas en la estructura y cimentación, y con ello, minimizar el número de columnas necesarias en el auditorio.



Figura 13.6. Sheraton Park Tower

### 13.1.9 Torre NLA

La torre NLA, ubicada en Londres (Croydon), tiene losas planas de 25 cm de peralte y de 8 m de claro. De los elementos estructurales en dicha torre, sólo las losas son de concreto ligero con una resistencia a la compresión de  $290 \text{ kg/cm}^2$ .



Figura 13.7. Torre NLA

### 13.1.10 One Canada Square o Canary Wharf Tower

El “One Canada Square” (Figura 13.8), también llamado “Canary Wharf Tower” o “Canada Tower”, está ubicado en la ciudad de Londres, y su uso es de oficinas; tiene 237 m de altura, 50 niveles, 3 sótanos, 130,130 m<sup>2</sup> de construcción, y fue construido entre 1989 y 1991. Actualmente es el edificio más alto en el Reino Unido. El concreto en algunos elementos fue bombeado con agregado ligero.



Figura 13.8. One Canada Square. Canary Wharf Tower

### 13.1.11 British Library

La librería Británica, ubicada en la ciudad de Londres, fue construida utilizando en su estructura concreto de agregado ligero, el cual se diseñó con una resistencia a compresión de 400 kg/cm<sup>2</sup>, una densidad de 510 kg/m<sup>3</sup>, un revenimiento de 7.5 cm, y una relación a/c de 0.44; El concreto de agregado ligero, fue colado in situ en todas las columnas y vigas de gran claro.

### 13.1.12 Escuela Secundaria Pimlico

La escuela secundaria Pimlico (Figura 13.9), construida en Inglaterra, tiene una estructura de concreto de agregado ligero. La dosificación del concreto indicaba utilizar Lytag como agregado ligero, agregado fino, y sin finos naturales; el concreto se dosificó para alcanzar una densidad de  $1680 \text{ kg/m}^3$ , y se utilizó en las losas de piso, vigas secundarias, marcos y muros de carga. El concreto de agregado ligero fue seleccionado en la construcción para mejorar los requerimientos de desempeño, especialmente para proveer un adecuado nivel de aislamiento.

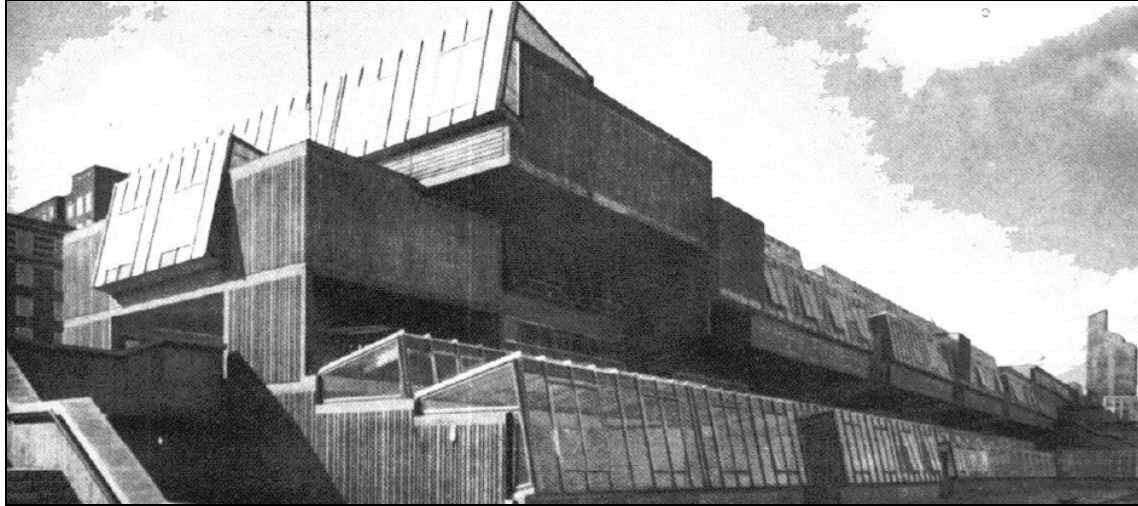


Figura 13.9. Escuela Secundaria Pimlico

### 13.1.13 Torre de Picasso

La torre de Picasso (Figura 13.10), construida entre 1988-1989 y ubicada en la ciudad de Madrid, tiene un destino de oficinas con 43 niveles en 157 m de altura. Las losas de piso de la estructura ( $3500 \text{ m}^3$ ), fueron coladas y bombeadas in-situ utilizando concreto de agregado ligero, proyectado con una resistencia a la compresión de  $450 \text{ kg/cm}^2$  y una densidad seca de  $1650 \text{ kg/m}^3$ .



Figura 13.10. Torre de Picasso

#### 13.1.14 Edificio administrativo de la BMW en Munich

El edificio administrativo de oficinas para la BMW en Munich (Figura 13.11), tiene 101 m de altura y 22 niveles. El edificio está estructurado en planta con cuatro losas circulares en voladizo, las cuales están apoyadas sólo en un núcleo central; dichas losas en voladizo, fueron construidas con concreto de agregado ligero con el propósito de reducir la carga muerta en el edificio. La resistencia del concreto ligero utilizado en las losas fue de  $300 \text{ kg/cm}^2$ , y los agregados utilizados son Liapor (shale expansivo) y arena natural.



Figura 13.11. Edificio administrativo de la BMW en Munich

#### 13.1.15 Australia Square

La estructura del edificio de oficinas “Australia Square” (Figura 13.12), fue construida entre 1965 y 1967 en la ciudad de Sydney con 56 niveles, una altura total de 184 m y una sección en planta circular con 41 m de diámetro; de 1967 a 1975, fue el edificio más alto de Australia. A partir del séptimo nivel, el marco entero es de concreto de agregado ligero, que permitió un ahorro en el peso total de la estructura del 38% respecto al que se hubiera obtenido con concreto de densidad convencional.

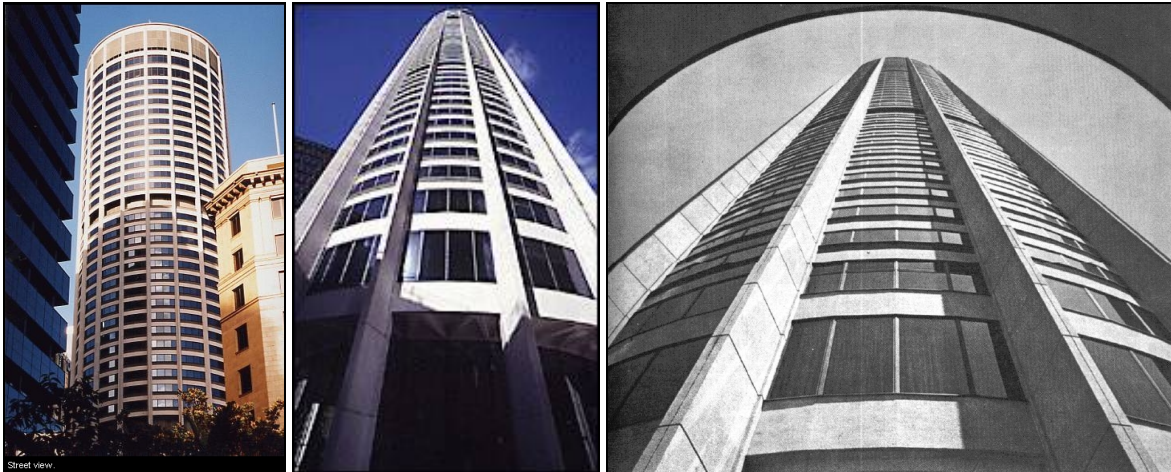


Figura 13.12. Australia Square

#### 13.1.16 Central Square

El edificio para oficinas “Central Square” (Figura 13.13), fue construido en la ciudad de Sydney entre 1971 y 1972. Tiene 26 niveles en 91 m de altura, estructurado con armaduras metálicas como vigas secundarias, columnas externas y un núcleo central de concreto de agregado ligero colados in-situ. El concreto de agregado ligero, en este caso con “Litecrete” (shale expansiva) como agregado ligero, fue utilizado en muchos de los elementos estructurales, incluyendo los muros del núcleo central, las columnas por encima del nivel 13, la vigas principales y las losas de piso.



Figura 13.13. Central Square

#### 13.1.17 Roxburgh Country Offices

Dichas oficinas de 3 niveles, construida entre 1966 y 1967, tiene una estructura de concreto de agregado ligero usado en todos los elementos estructurales. Dicha construcción, fue el primer edificio en Escocia construido completamente de concreto de agregado ligero; El agregado ligero utilizado fue Lytag graduado y arena natural.

### 13.1.18 Commercial Centre Tower en Kobe, o Kobe Commerce & Trade Center

El edificio para oficinas del “Commercial Centre Tower”, construido en Kobe-Japón entre 1967 y 1969; su altura es de 111 m con 26 niveles. Todas las losas de piso fueron coladas utilizando concreto de agregado ligero; el concreto ligero utilizado fue la “Lionite”, el cual es una shale expansiva.

### 13.1.19 Standard Bank en Johannesburg

El edificio de oficinas del banco Standard (Figura 13.14), construido en 1970 en Johannesburg- Sudáfrica, tiene 139 m de altura y 34 niveles. El edificio está estructurado en planta con un sistema de losas y vigas en voladizo, las cuales están apoyadas sólo en un núcleo central; dichas losas en voladizo, fueron construidas con concreto de agregado ligero con el propósito de reducir la carga muerta en el edificio. Las losas de piso están integradas con vigas dobles T precoladas de 3.16x10 m, 7.5 cm de espesor y densidad de 1950 kg/m<sup>3</sup>.

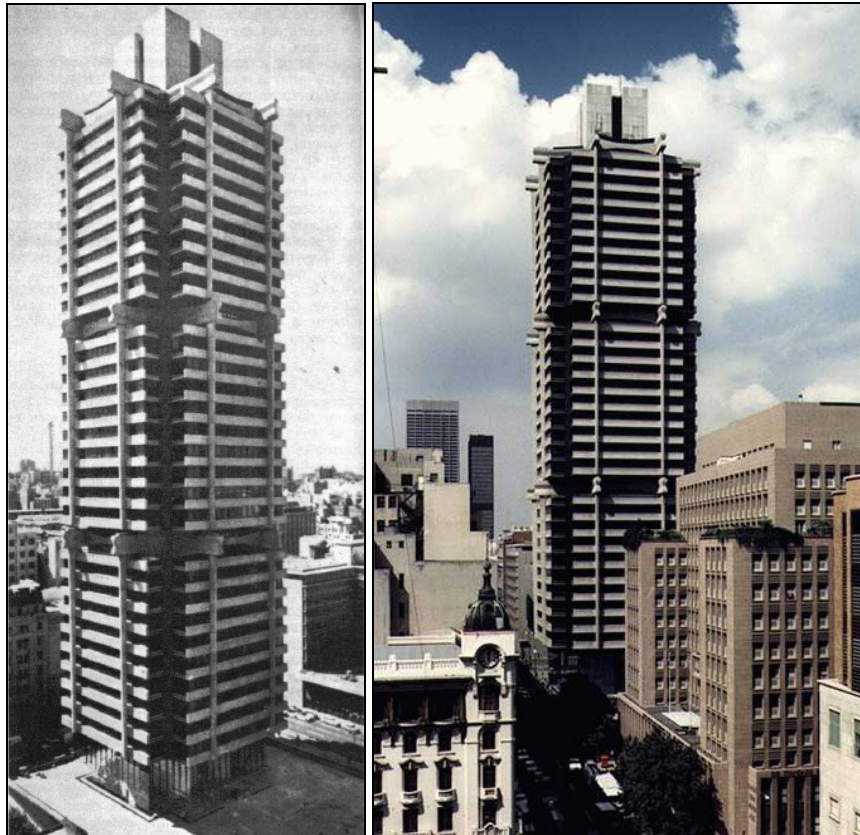


Figura 13.14. Standard Bank en Johannesburg

## 13.2 OTRAS CONSTRUCCIONES

Brice Bender (1980) publica un estudio económico, con dos alternativas, de un puente segmentado de 455 m de claro total (91 m el máximo de los seis claros); la sección del puente constaba de una trabe cajón de concreto presforzado con 14.6 m de ancho de carril. Las dos alternativas consideradas fueron, utilizando concreto presforzado de peso normal, y una segunda, utilizando concreto presforzado de peso ligero. Los resultados, considerando los costos totales de la obra incluyendo estructura y cimentación, indicaron que la alternativa con concreto de peso ligero fue 15% más económica.

De la Figura 13.17 a la Figura 13.20, se muestran diversas construcciones civiles en las cuales se incorporan en determinados elementos estructurales o no estructurales, algunos tipos de concretos ligeros.



Figura 13.15. Este edificio de nueve pisos fue construido de elementos de concreto de agregados ligeros precolados pretensados, incluyendo columnas, paneles para muros, losas para pisos y cubierta. California, EE.UU.

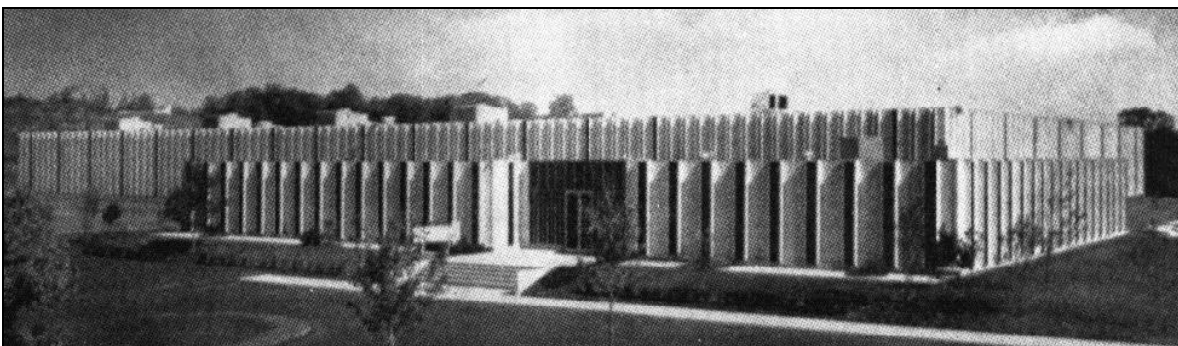
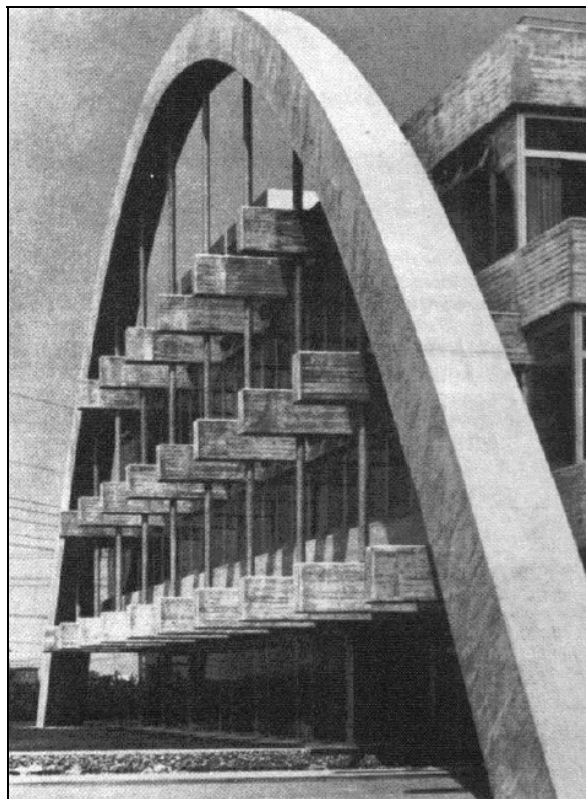
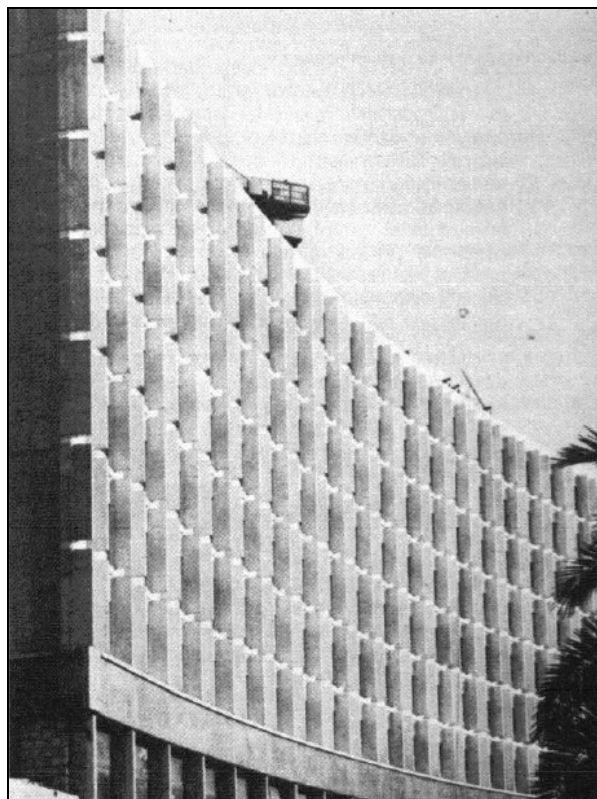


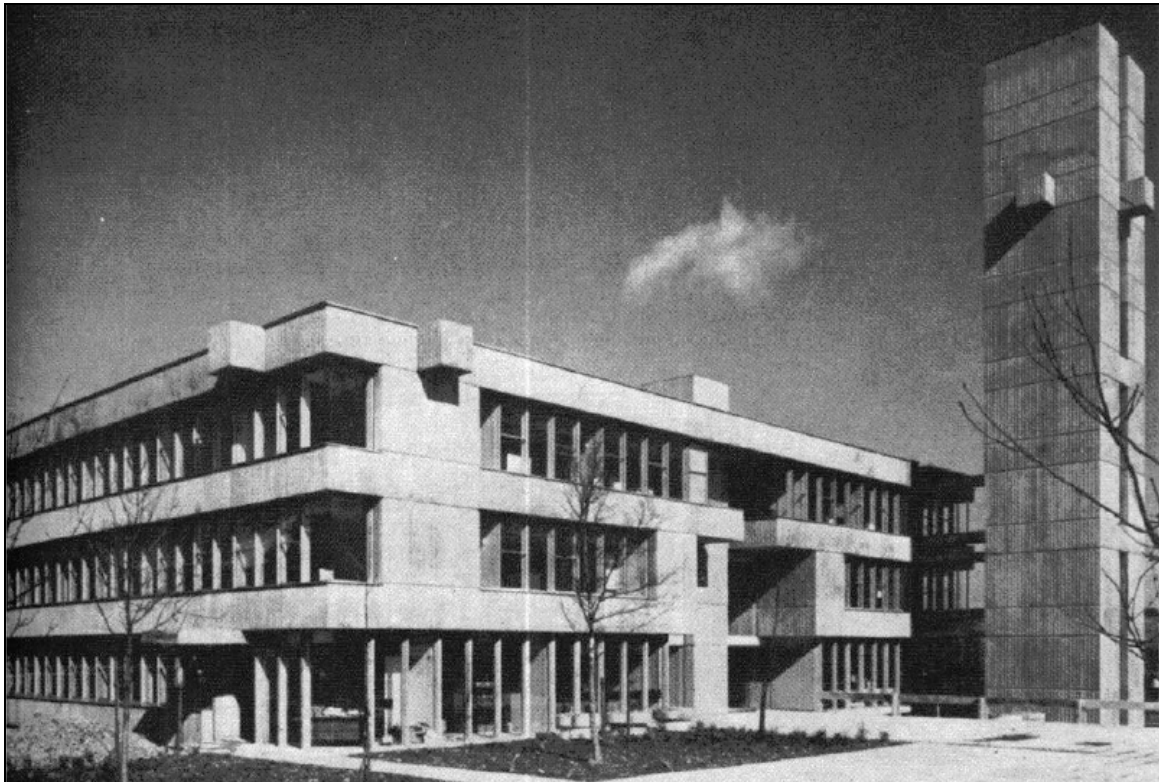
Figura 13.16. Elementos doble T precolados pretensados usados como secciones de muros para una fábrica de productos de goma. Ohio, EE.UU.



*Figura 13.17. Edificio administrativo de Nordwestdeutsche en Hamburgo*



*Figura 13.18. Hotel Queens Way en Gibraltar*



*Figura 13.19. Edificio Loxburgh County en Boswell, Escocia.*



*Figura 13.20. Casas en Sussex, Inglaterra con muros de concreto ligero sin finos colado in-situ.*

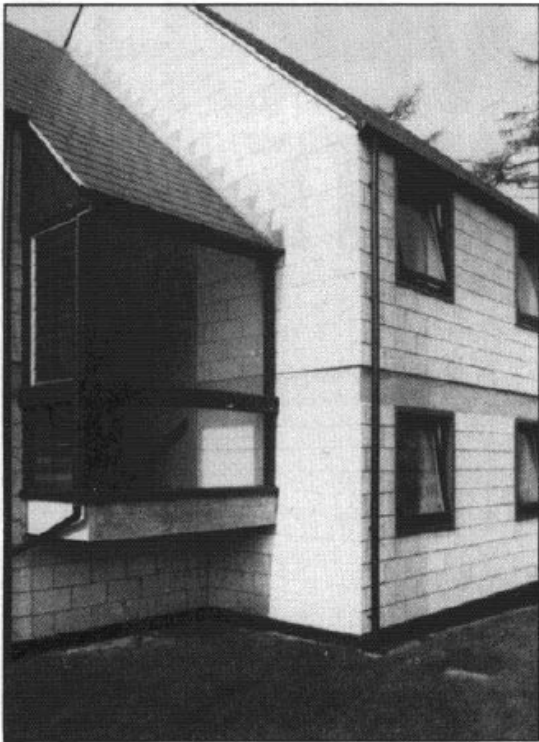


Figura 13.21. Construcción con bloques de concreto aereado (thermalite); Edificio ubicado en la ciudad de Londres que tiene algunos elementos de concreto ligero con agregado Lytag.

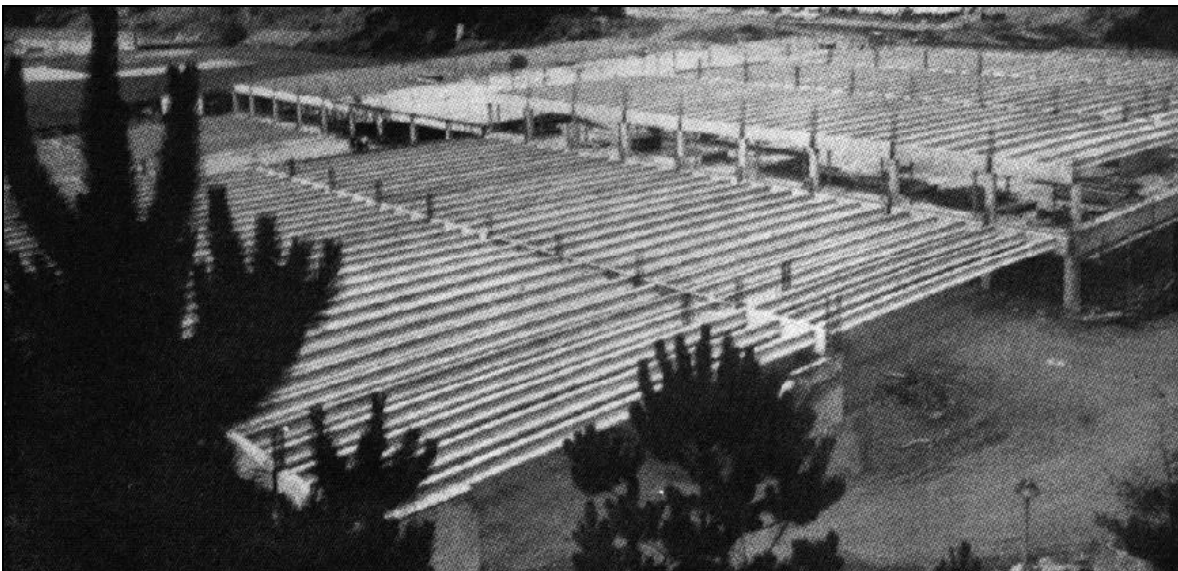


Figura 13.22. La viga y viguetas precoladas de concreto de agregados ligeros pretensado tendrán una cubierta de concreto de agregados ligeros trabajando en acción compuesta colada en el lugar. San Francisco, EE.UU.

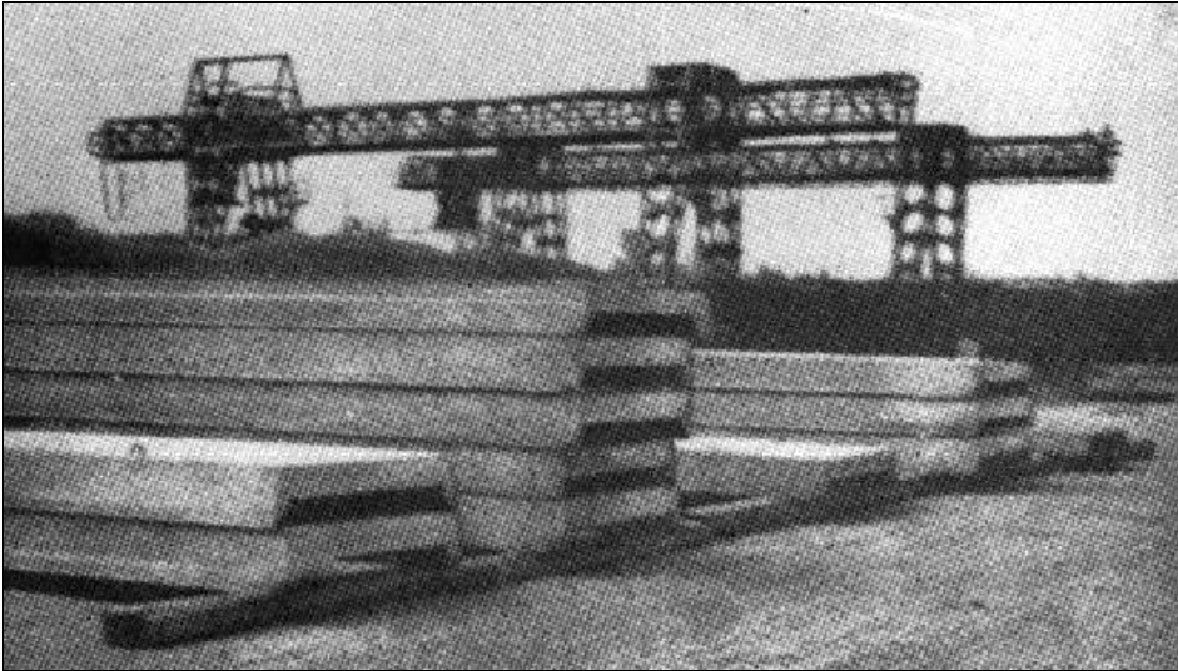


Figura 13.23. Losas precoladas para cubiertas hechas de concreto de agregados ligeros presforzado. URSS.



Figura 13.24. Unidades de concreto aerado precolado (Siporex) para losas en la ampliación de una escuela en Stanford-le-Hope, Essex, Inglaterra.

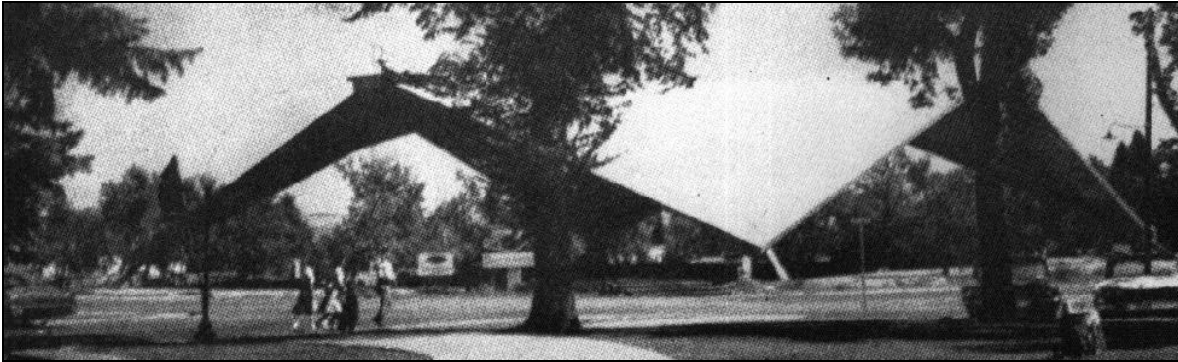


Figura 13.25. Cubierta formada por un paraboloides hiperbólico de 60 m de lado, construido de concreto de agregados ligeros. Los atiesadores de los extremos, las vigas de la cumbrera y los tirantes abajo del piso son postensados. Colorado, EE.UU.

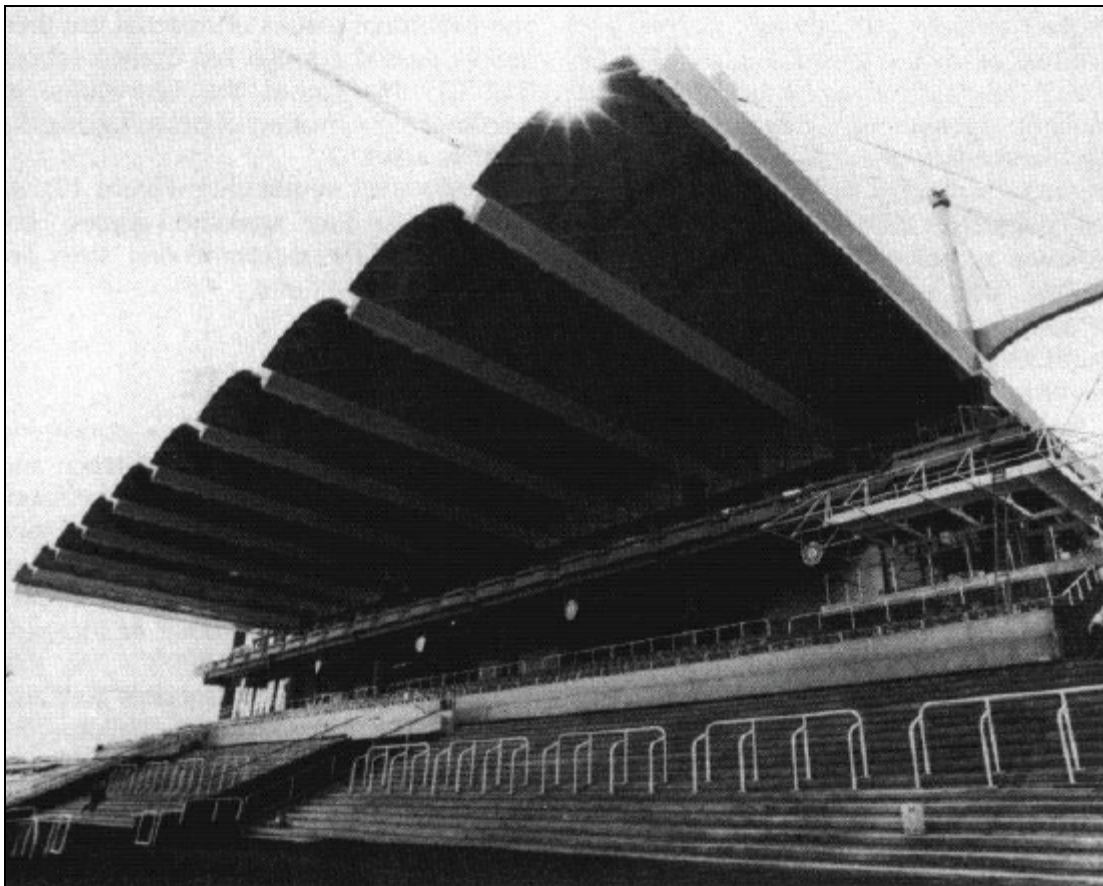
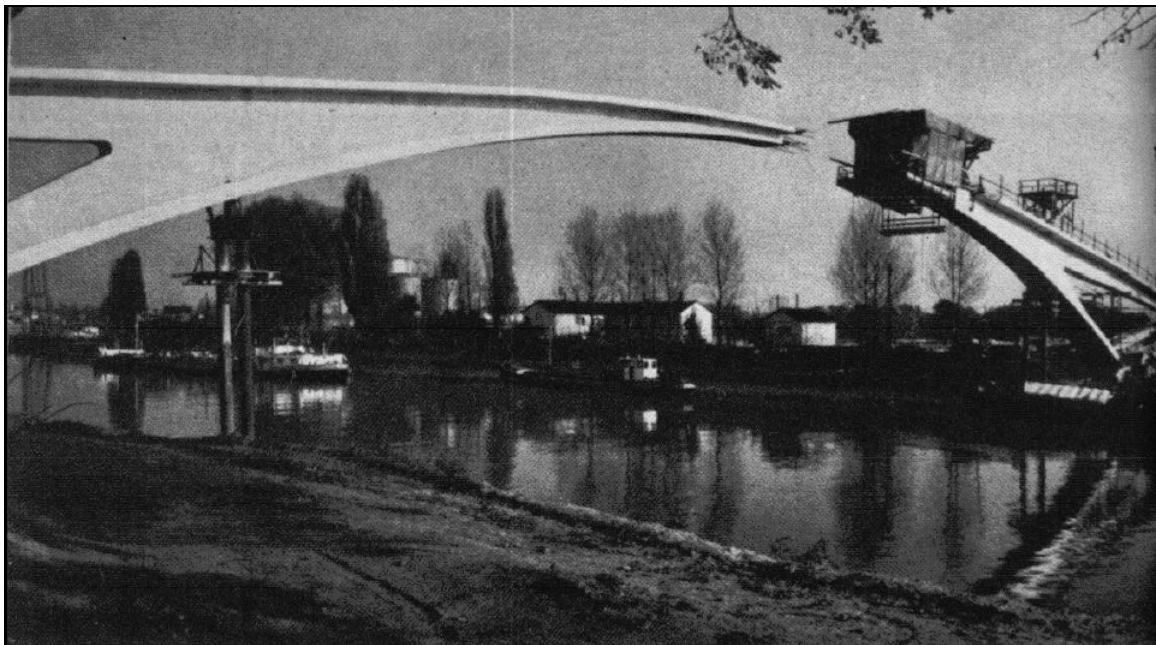
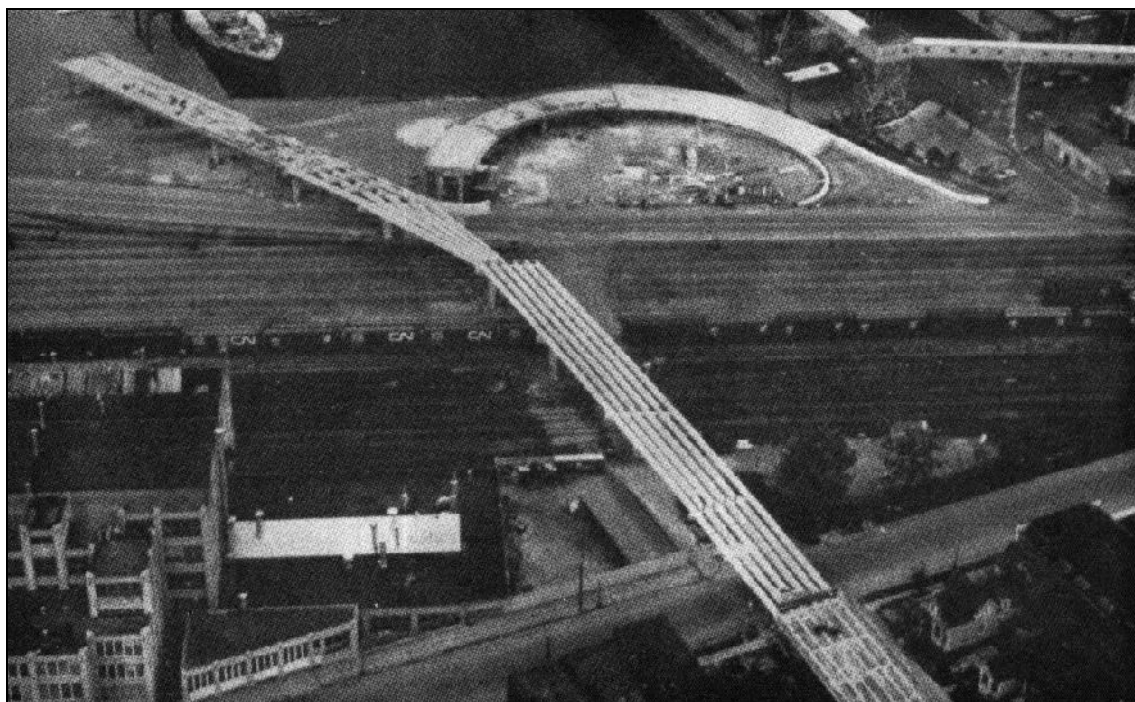


Figura 13.26. Cubierta del hipódromo Coodwood en Sussex, Inglaterra, funcionando como un tejado en voladizo con unidades de placas precoladas de agregado ligero (Lyttag).



*Figura 13.27. Puente Dyckerhoff en Wiesbaden, Alemania.*



*Figura 13.28. En el paso a desnivel de la avenida Heatley en Vancouver, Canadá, se utilizaron vigas de concreto presforzado de agregado ligero.*



Figura 13.29. Puente Friarton de la autopista en Perth, Escocia. La cubierta es de concreto de agregado ligero (Lyttag).

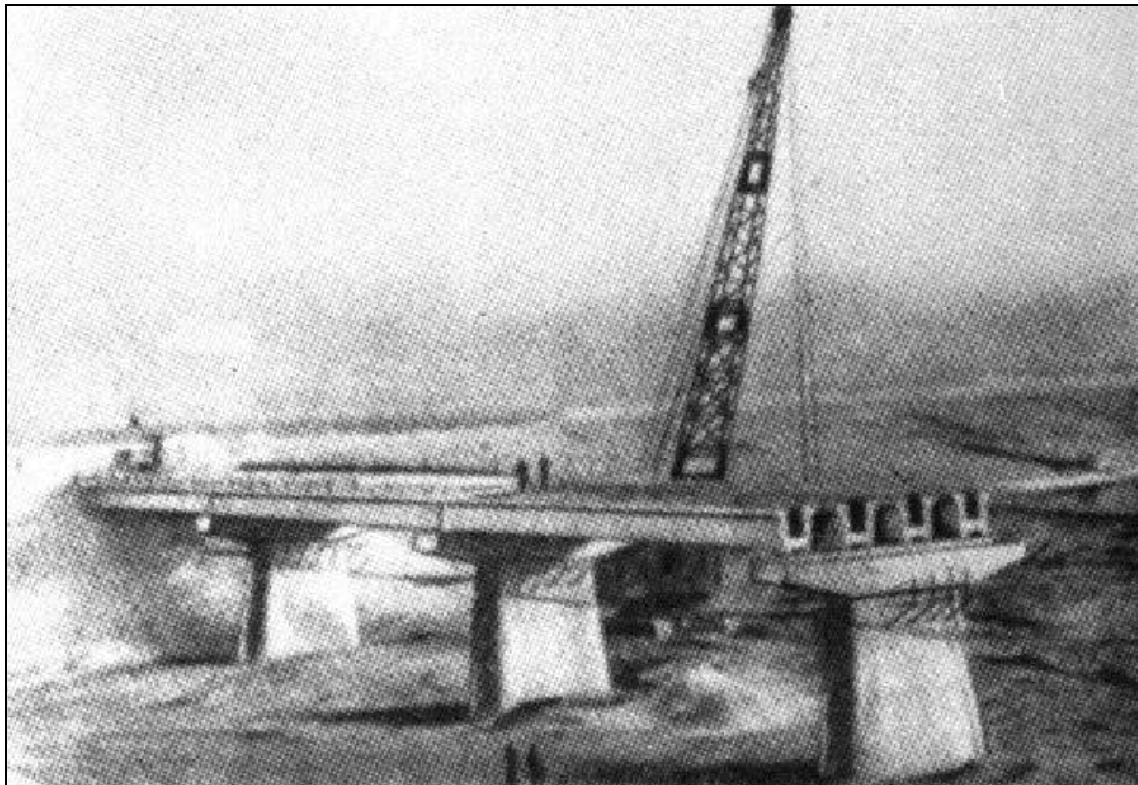


Figura 13.30. Vigas de concreto presforzado de agregados ligeros en el momento de montarlas, utilizadas en el puente a través del río Achutuba. Claros de 22 m. URSS.

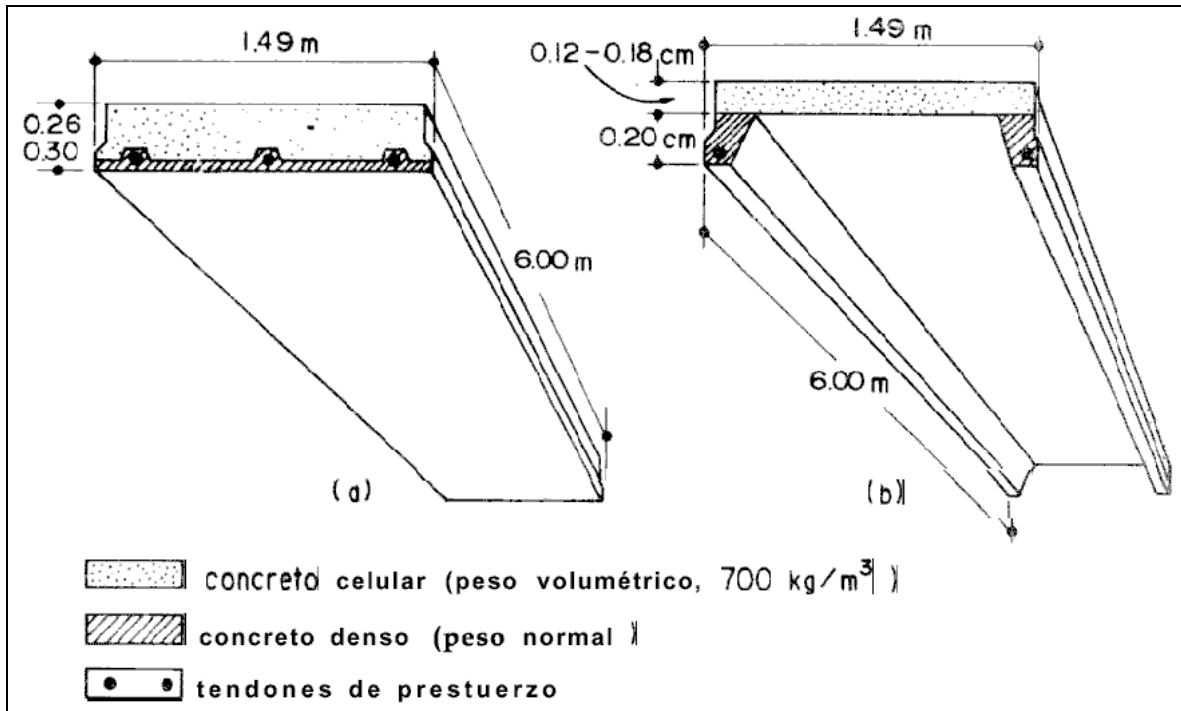


Figura 13.31. Losas para cubierta de concreto celular, utilizados en edificios de habitación e industriales, empleando paneles y nervaduras presforzadas. URSS.

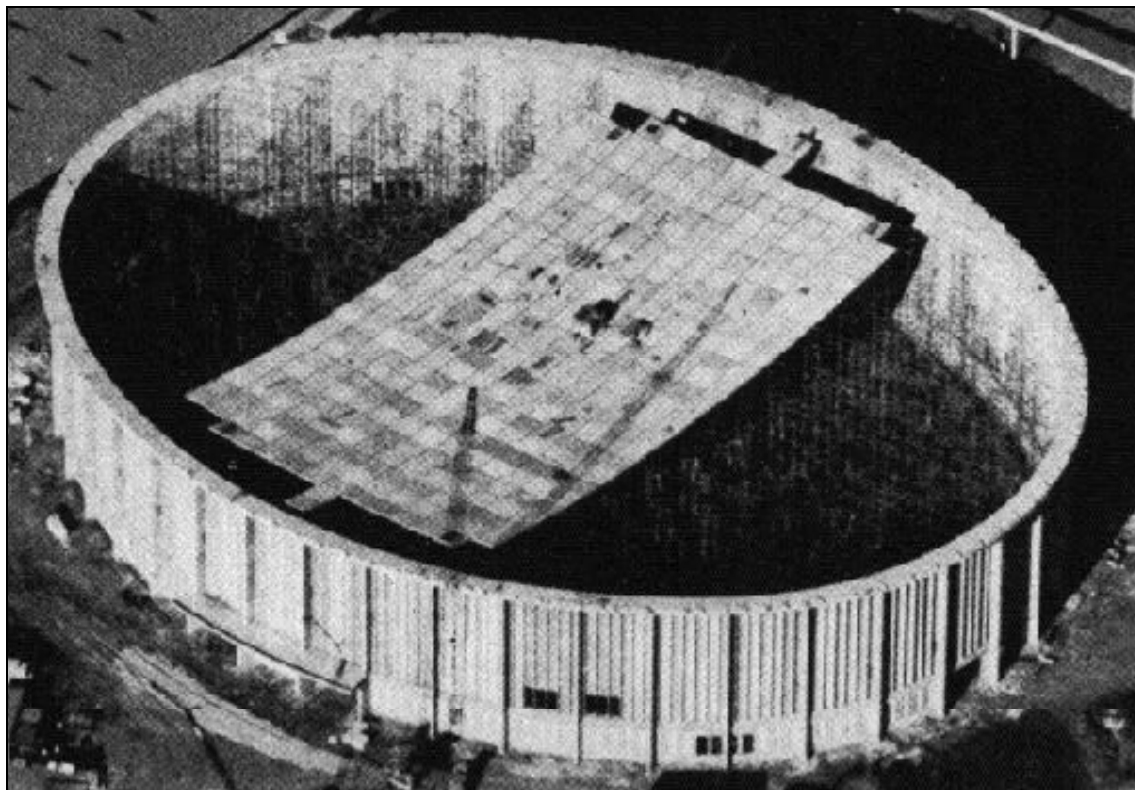


Figura 13.32. Paneles de concreto de agregados ligeros precolados postensados, utilizados para formar la cubierta de un centro de convenciones. Ejes de la cubierta elíptica son de 100 m y 120 m. Oklahoma, U.S.A.

## 14 CONSIDERACIONES REGLAMENTARIAS

### 14.1 PROPUESTA DE NTCC-RCDF, 2001

En este capítulo, las formulas y cantidades mencionadas estarán expresadas en el sistema “mks”, excepto las que aparezcan entre paréntesis, las cuales estarán expresadas en el sistema internacional (SI).

En la propuesta de Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de estructuras de Concreto del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (2001), se entiende por concreto ligero a aquel cuyo peso volumétrico en estado fresco es inferior a 1900 kg/m<sup>3</sup> (19 kN/m<sup>3</sup>).

En la propuesta de NTCC-RCDF, 2001, sólo se permite el uso de concreto ligero en elementos secundarios. Su uso en elementos principales de estructuras requiere de la autorización especial de la “Administración”.

En el diseño de elementos estructurales de concreto ligero son aplicables los criterios para concreto de peso normal con las modificaciones que se comentan a continuación.

- Se supondrá que un elemento de concreto ligero reforzado alcanza su resistencia a flexocompresión cuando la deformación unitaria del concreto es  $0.003E_C/E_L$ , donde  $E_C$  y  $E_L$ , son, respectivamente, los módulos de elasticidad del concreto de peso normal clase 1 y ligero de igual resistencia.
- En las fórmulas relacionadas con el cálculo de resistencias, aplicables a concreto de peso normal, se usará  $0.5f_t^*$  ( $1.6f_t^*$ ) en lugar de  $\sqrt{f_c^*}$  siendo  $f_t^*$  en kg/cm<sup>2</sup> (MPa), la resistencia nominal a tensión indirecta obtenida de acuerdo con estas normas para concreto clase 2.
- El valor de  $f_t^*$  que se use no debe ser mayor que  $1.5\sqrt{f_c^*}$  en kg/cm<sup>2</sup> ( $0.47\sqrt{f_c^*}$  en MPa). Si no se conoce  $f_t^*$  se supondrá igual a  $\sqrt{f_c^*}$  en kg/cm<sup>2</sup> ( $0.31\sqrt{f_c^*}$  en MPa).
- No son aplicables las fórmulas de peraltes mínimos que en elementos de peso normal permiten omitir el cálculo de deflexiones.
- El módulo de elasticidad del concreto ligero se determinará experimentalmente, con un mínimo de seis pruebas para cada resistencia y cada tipo de agregado.
- El refuerzo por cambios volumétricos que se estipula en estas normas, será obligatorio en toda dirección en que la dimensión de un elemento estructural, en metros, exceda de:

$$\frac{0.75\bar{f}_t}{\sqrt{f_c'}} \quad \left( \frac{2.35\bar{f}_t}{\sqrt{f_c'}} \right) \quad (14.1)$$

y las cuantías requeridas se incrementará en la relación:

$$\frac{2\sqrt{f_c'}}{\bar{f}_t} \quad \left( \frac{0.63\sqrt{f_c'}}{\bar{f}_t} \right) \quad (14.2)$$

- Se considera como resistencia media a tensión de un concreto,  $\bar{f}_t$  en kg/cm<sup>2</sup> (MPa), al promedio de los esfuerzos resistentes obtenidos a partir de no menos de cinco ensayos en cilindros de 150x300 mm cargados diametralmente, ensayados de acuerdo con la norma NMX-C-163. Si se desconoce  $\bar{f}_t$  se sustituirá por  $1.2\sqrt{f_c'}$  en kg/cm<sup>2</sup> ( $0.38\sqrt{f_c'}$  en MPa).
- El refuerzo no se doblará con un radio menor que  $f_y/30\bar{f}_t$  por el diámetro de la barra doblada ni menor que el que señale la respectiva Norma Mexicana para la prueba de doblado.
- En las especificaciones relacionadas con los aspectos de durabilidad, se exige que el concreto ligero mantenga las mismas características de resistencia que los concretos convencionales. Entre ellas, para exposiciones moderadas de sulfatos ( $150 \text{ ppm} < \text{SO}_4 < 1500 \text{ ppm}$ ) se requiere que la resistencia sea mayor que 300 kg/cm<sup>2</sup> (30 MPa), que la relación agua/cemento sea menor que 0.50, y que el cemento mantenga un contenido de aluminato tricálcico menor al 8% (CPP, CPC, CPEG); para exposiciones de sulfatos severas ( $1500 \text{ ppm} < \text{SO}_4 < 10000 \text{ ppm}$ ) y muy severas ( $\text{SO}_4 > 10000 \text{ ppm}$ ) se requiere que la resistencia sea mayor que 350 kg/cm<sup>2</sup> (35 MPa), que la relación agua/cemento sea menor que 0.45, y que el cemento mantenga un contenido de aluminato tricálcico menor al 5% (CPRS, CPRS+puzolana, CPRS+micosílice).
- Finalmente, la norma sugiere que para concretos ligeros se modifique la longitud básica de desarrollo de barras con dobleces por un factor de 1.30.

#### 14.2 REGLAMENTO ACI-318, 1999

El reglamento ACI-318, define al concreto estructural ligero como aquel que contiene agregado ligero y un densidad seca menor de 115 lb/ft<sup>3</sup> (1840 kg/m<sup>3</sup>). El agregado ligero en dicho concreto deberá cumplir la norma ASTM C-330 (especificaciones de agregados ligeros para concreto estructural), y la obtención de la densidad seca deberá cumplir la norma ASTM C567.

Dicho reglamento, considera a dos tipos de concreto estructural de agregado ligero: el *concreto ligero completo*, el cual se dosifica sin arena natural (all lighthweighth concrete); y el *concreto ligero parcial*, el cual si se dosifica con arena natural (sand lighthweighth concrete).

Cabe señalar que en este inciso, la formulación se presentará en unidades del sistema inglés.

Las formulas de diseño de elementos estructurales elaborados con concreto estructural ligero que propone el ACI-318, son las mismas expresiones que propone para el diseño de elementos estructurales elaborados con concreto de densidad normal; sin embargo, se deberán obtener en ensayos de laboratorio los siguientes parámetros propios del concreto estructural ligero.

- Resistencia a compresión ( $f_{CL}$ )
- Módulo de elasticidad ( $E_{CL}$ )
- Resistencia a tensión ( $f_{TL}$ )

El reglamento ACI-318, sugiere que para todas las obras que usen el concreto ligero estructural, se determine en el laboratorio la resistencia a compresión ( $f_{CL}$ ), el módulo de elasticidad ( $E_{CL}$ ), y la resistencia a tensión promedio ( $f_{TL}$ ).

El módulo de elasticidad del concreto con peso específico ( $w_{CL}$ ) entre 90 y 155 lb/ft<sup>3</sup> (1440 y 2480 kg/m<sup>3</sup>), propone obtenerlo con la siguiente ecuación:

$$E_{CL} = w_{CL}^{1.5} \cdot 33 \sqrt{f_{CL}} \quad (14.3)$$

Las ecuaciones propuestas por el ACI-318 (1999) para determinar la resistencia a corte de elementos de concreto normal, se podrán usar para estimar la resistencia cortante de elementos de concreto ligero. Sin embargo, se deberá sustituir el valor  $\sqrt{f_c'}$ , propuesto en las ecuaciones del ACI-318 para determinar la contribución del concreto a la resistencia por corte de elementos de concreto de densidad normal, por el menor de los siguientes:

- En caso que se determine experimentalmente la resistencia promedio a tensión del concreto ligero ( $f_{TL}$ ), se sustituirá el valor de  $\sqrt{f_c'}$  por  $f_{TL}/6.7$ .
- En caso de que no se determine experimentalmente  $f_{TL}$ , se multiplicará el valor de  $\sqrt{f_c'}$  por un factor reductivo ( $\alpha$ ); dicho factor tendrá un valor de  $\alpha=0.75$  para concreto ligero sin arena natural, y de  $\alpha=0.85$  para concreto ligero con arena natural.

El reglamento ACI-318, permite interpolar linealmente en un caso que se considere intermedio. Lo anterior se resume en la siguiente expresión:

$$\sqrt{f_c'} < \begin{cases} f_{TL}/6.7 \\ \alpha \sqrt{f_{CL}} \end{cases} \quad (14.4)$$

En los comentarios del reglamento ACI-318 (1999), explica que la anterior propuesta obedece a investigaciones realizadas por Hanson en 1961, e Ivey y Buth en 1967. Estos autores determinaron, con base en pruebas experimentales, que la resistencia a tensión del concreto ligero dividido entre 6.7 se aproxima a la raíz de la resistencia a compresión. Además encontraron, con base en sus ensayos experimentales, que la resistencia a compresión del concreto ligero es una fracción de la resistencia a compresión del concreto de peso normal.

Con base en lo anterior, las expresiones propuestas en el reglamento ACI-318 para determinar la contribución de resistencia a corte de elementos estructurales hechos con concreto de agregado ligero, son:

Para elementos sujetos a flexión y corte:

$$V_c < \begin{cases} 2 \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b \cdot d \\ \left( 1.9 \sqrt{f_c'} + 2500 \rho \frac{V_u d}{M_u} \right) b \cdot d \end{cases} \quad (14.5)$$

Para elementos sujetos a compresión:

$$V_c = 2 \left( 1 + \frac{Nu}{2000Ag} \right) \sqrt{f_c'} \cdot b \cdot d \quad (14.6)$$

Para elementos sujetos a tensión:

$$V_c = 2 \left( 1 + \frac{Nu}{500Ag} \right) \sqrt{f_c'} \cdot b \cdot d \quad (14.7)$$

## 15 REFERENCIAS

1. ACI Committee 318 (1999), "**Building code requirements for structural concrete (318-99) and commentary (318R-99)**". *American Concrete Institute*. USA.
2. Ashton, L. A. y Smart, P. M. T. (1960). "**Sponsored fire resistance tests on structural elements**". *H.M.S.O.* Londres, UK.
3. Bate, S.C.C. (1961). "**Prestressed Concrete**". *Editorial Butterworths*, 2a edición. Londres, UK.
4. Bower, J. E. y Viest, I. M. (1960). "**Shear strength of restrained concrete beams without web reinforcement**". *ACI Journal*. No. 32 (1). USA.
5. Brice Bender (1980). "**Economics and use of lightweight concrete in prestressed structures**". *PCI Journal*. Pág. 62-67. USA.
6. Clarke, J.L. (1993). "**Structural lightweight aggregate concrete**". *Blackie Academic & Professional*. Editado por J.L. Clarke. Gran Bretaña.
7. Evans, R. H. y Hardwick, J. R. (1960). "**Lightweight concrete with sintered clay aggregate**". *Reinforced Concrete Review*. No. 5 (6). USA.
8. Gerwich, J.R. Antia, F. Brittain, K.H. Brown, W.P. Derrington, J.A. Erskine, F. Hanson, J.A. De Heer, J.J. Lacombe, G. Makarichev, V.V. Riessauw, F.G. Svodoba, P. Ramaswany, G.S. Torroja J.A. Wesche, K. Zorzi, S. Lydon, D. (1986). "**Concreto ligero presforzado**". *V Congreso Internacional del Presfuerzo*, Federación Internacional del Presfuerzo, FIP. París, Francia.
9. González-Isabel, G. (1993). "**Hormigón de alta resistencia**". *Editorial INTEMAC*. Madrid, España.

10. Hanna, E. Luke, K. Perraton, D. y Aitcin, P. (1989). “**Rheological behavior of Portland cement pastes in the presence of a superplasticizer**”, *ACI Journal*. No. 119. Pág. 171-188. USA.
11. Hanson, J. A. (1961). “**Tensile strength and diagonal tension resistance of structural lightweight concrete**”. *ACI Journal*. No. 34 (1).
12. Hobbs, C. (1959). “**Building Materials from Pulverised-fuel Ash**”. *Brit. Chem. Eng.*, No. 4 (4). Londres, UK.
13. Holm, T. (1995). “**Lightweight concrete and aggregates**”. *American Standard Testing and Materials (ASTM)*. Standard Technical Publication STP 169C. USA.
14. López, M. (1999). “**Proposición de una metodología de dosificación de hormigones estructurales con áridos Livianos**”. *Tesis de Maestría, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile*. Santiago, Chile.
15. Malhotra, V. (1981). “**Superplasticizers: their effect on fresh and hardened concrete**”, *Concrete International Journal*. USA.
16. Nash, G. D., Comrie, J. y Broughton, H. E. (1955). “**The Thermal Insulation of Buildings**”. *H.M.S.O.* Londres, UK.
17. Nawy, E. G. (1988), “**Concreto reforzado: un enfoque básico**”. Prentice Hall. México, D.F.
18. Neville, A.M. (1999). “**Tecnología del concreto**”. *Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC)*. ISBN 9684640927. México, D.F.
19. Norman J. B. (1982). “**Bloques de concreto ligero**”. *Concrete Works International*. Vol. 1, Núm. 5, Londres, UK.
20. NTCC-RCDF (2001). “**Normas técnicas complementarias para el diseño y construcción de estructuras de concreto reforzado del reglamento de construcciones del Distrito Federal**”. [www.smie.org.mx](http://www.smie.org.mx). Propuesta del comité de Normas Técnica de Concreto. México, D.F.
21. Pellicer (1989). “**Hormigón armado en la construcción arquitectónica**”. *Editorial Bellisco*. Madrid, España.
22. Perea, Esdras. (2002). “**Concretos de Alta Resistencia**”. *Tesis de Licenciatura, UPAEP*. Puebla, Pue., México.
23. Perenchio y Klieger (1978), “**Some physical properties of high strength concrete**”. *Research and Development Bulletin*. No. RD056-01T, Portland Cement Association. USA.
24. Ramos, C. (1972). “**Resistencia de concretos livianos**”. *Memorias de las XVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*. Chile.
25. Riley, C. M. (1951). “**Relation of chemical properties to the bloating of clays**”. *Journal of Amer. Ceram. Soc.* No. 34 (4). USA.
26. Short, A. y Kinniburgh, W. (1967). “**Concreto ligero, cálculo, fabricación, diseño y aplicaciones**”. *Editorial Limusa y Wiley*. Traducido por el M. en I. Enrique Martínez Romero. México, D.F.
27. Videla, C. y López M. (1997). “**Hormigones livianos estructurales con piedra pómez: estudio de prefactibilidad técnica**”. *Informe Técnico HPP 97-04*. Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
28. Videla, C. y López M. (1999). “**Dosificaciones de hormigones livianos**”. *Revista Ingeniería de Construcción*. Pág. 17-29. Santiago, Chile.
29. Weigler, H. y Karl, S. ( 1974). “**Hormigones Ligeros Armados: fabricación, propiedades y aplicaciones**”. *Editorial Gustavo Gili*. Barcelona, España.
30. Whitaker, T. (1953). “**Lightweight Concrete in America**”. *National Building Studies Spec. H.M.S.O.* Reporte No. 13. Londres, UK.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Comparación en volumen de bloques del mismo peso hechos con (izquierda) concreto convencional y (derecha) con concreto ligero del tipo aireado (Short y Kinniburgh, 1967).....	2
Figura 1.2. Microestructura esquemática de los tipos de concretos ligeros.....	7
Figura 4.1. Relaciones aproximadas entre la relación agua-cemento y la relación agregado-cemento, para mezclas de concreto ligero para estructuras, de trabajabilidad similar (la amplitud de las relaciones agua-cemento generalmente quedan comprendidas en la zona sombreada).....	32
Figura 4.2. Relaciones aproximadas entre la relación agua-total-cemento y la resistencia a la compresión en cubos de concretos ligeros para estructuras hechos con distintos agregados.....	33
Figura 6.1. Conductividad térmica (k) de concretos hechos con agregados de baja densidad ( $\delta$ ).....	58
Figura 6.2. Ilustración esquemática de algunos agregados ligeros.....	68
Figura 6.3. Rangos característicos de densidad de concretos con agregados ligeros (Neville, 1999).....	85
Figura 12.1. Estructura microcelular de bloques de concreto celular procesado en autoclaves.....	145
Figura 13.1. Shell Plaza Tower.....	151
Figura 13.2. Marina City Towers.....	151
Figura 13.3. Lake Point Tower.....	152
Figura 13.4. Water Tower Place.....	152
Figura 13.5. Guy's hospital.....	153
Figura 13.6. Sheraton Park Tower.....	154
Figura 13.7. Torre NLA.....	154
Figura 13.8. One Canada Square. Canary Wharf Tower.....	155
Figura 13.9. Escuela Secundaria Pimlico.....	156
Figura 13.10. Torre de Picasso.....	156
Figura 13.11. Edificio administrativo de la BMW en Munich.....	157
Figura 13.12. Australia Square.....	158
Figura 13.13. Central Square.....	158
Figura 13.14. Standard Bank en Johannesburg.....	159
Figura 13.15. Este edificio de nueve pisos fue construido de elementos de concreto de agregados ligeros precolados pretensados, incluyendo columnas, paneles para muros, losas para pisos y cubierta. California. EE.UU.....	160
Figura 13.16. Elementos doble T precolados pretensados usados como secciones de muros para una fábrica de productos de goma. Ohio, EE.UU.....	160
Figura 13.17. Edificio administrativo de Nordwestdeutsche en Hamburgo.....	161
Figura 13.18. Hotel Queens Way en Gibraltar.....	161
Figura 13.19. Edificio Loxburgh County en Boswell, Escocia.....	162
Figura 13.20. Casas en Sussex, Inglaterra con muros de concreto ligero sin finos colado in-situ.....	162
Figura 13.21. Construcción con bloques de concreto aireado (thermalite); Edificio ubicado en la ciudad de Londres que tiene algunos elementos de concreto ligero con agregado Lytag.....	163
Figura 13.22. La viga y viguetas precoladas de concreto de agregados ligeros pretensado tendrán una cubierta de concreto de agregados ligeros trabajando en acción compuesta colada en el lugar. San Francisco, EE.UU.....	163
Figura 13.23. Losas precoladas para cubiertas hechas de concreto de agregados ligeros presforzado. URSS.....	164
Figura 13.24. Unidades de concreto aireado precolado (Siporex) para losas en la ampliación de una escuela en Stanford-le-Hope, Essex, Inglaterra.....	164
Figura 13.25. Cubierta formada por un paraboloides hiperbólico de 60 m de lado, construido de concreto de agregados ligeros. Los atiesadores de los extremos, las vigas de la cumbrera y los tirantes abajo del piso son postensados. Colorado, EE.UU.....	165
Figura 13.26. Cubierta del hipódromo Coodwood en Sussex, Inglaterra, funcionando como un tejado en voladizo con unidades de placas precoladas de agregado ligero (Lytag).....	165
Figura 13.27. Puente Dyckerhoff en Wiesbaden, Alemania.....	166
Figura 13.28. En el paso a desnivel de la avenida Heatley en Vancouver, Canadá, se utilizaron vigas de concreto presforzado de agregado ligero.....	166
Figura 13.29. Puente Friarton de la autopista en Perth, Escocia. La cubierta es de concreto de agregado ligero (Lytag).....	167
Figura 13.30. Vigas de concreto presforzado de agregados ligeros en el momento de montarlas, utilizadas en el puente a través del río Achtuba. Claros de 22 m. URSS.....	167
Figura 13.31. Losas para cubierta de concreto celular, utilizados en edificios de habitación e industriales, empleando paneles y nervaduras presforzadas. URSS.....	168
Figura 13.32. Paneles de concreto de agregados ligeros precolados postensados, utilizados para formar la cubierta de un centro de convenciones. Ejes de la cubierta elíptica son de 100 m y 120 m. Oklahoma, U.S.A.....	168

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Grupos de concreto ligero .....	7
Tabla 2.1. Valores de conductividad y resistividad térmica del concreto ligero y de sus materiales asociados.....	11
Tabla 2.2. Transmitancia térmica "U" (kcal/m <sup>2</sup> h°C) de algunos tipos de muros .....	11
Tabla 2.3. Resistencias térmicas de superficies .....	12
Tabla 2.4. Valores del factor F por el cual deberá multiplicarse k para materiales secos y obtener el valor de la conductividad (k) de materiales con un cierto contenido de humedad W, en porcentaje de volumen.....	13
Tabla 2.5. Intensidad del fuego y resistencia al mismo .....	15
Tabla 4.1. Tipos y granulometrías de los agregados que pueden ser utilizados en la fabricación de diferentes tipos de concretos ligeros ..	27
Tabla 4.2. Densidad y otras propiedades del concreto aireado .....	34
Tabla 4.3. Propiedades del cemento utilizado en las mezclas de prueba.....	43
Tabla 4.4. Propiedades de los agregados utilizados en las mezclas de prueba.....	43
Tabla 5.1. Efecto de la temperatura durante el desarrollo de la resistencia.....	52
Tabla 5.2. Efecto de la presión y duración del vapor en la resistencia a compresión .....	53
Tabla 5.3. Tiempo requerido para la expansión de morteros de cemento y arena en proporción 1:10 en soluciones sulfatada .....	54
Tabla 6.1. Propiedades típicas del concreto de agregado ligero .....	58
Tabla 6.2. Requerimientos de graduación para agregados gruesos de peso ligero, de acuerdo con la norma BS3797: Parte 2 .....	59
Tabla 6.3. Requerimientos de graduación para agregados finos de peso ligero, de acuerdo con la norma BS3797: Parte 2.....	59
Tabla 6.4. Requerimientos de graduación para agregados ligeros para concretos estructurales dados por ASTM C330-82a.....	59
Tabla 6.5. Datos de pesos volumétricos característicos (húmedos y nominalmente secos al aire) para una gama de concretos de agregado ligero .....	61
Tabla 6.6. Valores característicos del contenido de cemento (kg/m <sup>3</sup> ) para diferentes relaciones agregado/cemento por volumen .....	61
Tabla 6.7. Datos característicos de resistencias a 28 días y contenidos de cemento de diversos concretos de agregado ligero de mediana trabajabilidad .....	63
Tabla 6.8. Coeficiente de expansión térmica del concreto con agregado ligero .....	64
Tabla 6.9. Efecto del contenido de combustibles en las propiedades del concreto con escoria de hulla.....	71
Tabla 6.10. Límites permisibles para la pérdida por ignición en la escoria de hulla (clinker).....	72
Tabla 6.11. Efecto de la escoria de la hulla quemada .....	73
Tabla 6.12. Propiedades del concreto con escoria de hulla .....	73
Tabla 6.13. Propiedades del concreto con escoria espumosa .....	74
Tabla 6.14. Propiedades probables de concretos con agregados de arcilla expansiva completamente compactados y de diferentes densidades.....	76
Tabla 6.15. Propiedades de mezclas semisecas de concreto con arcilla expansiva.....	77
Tabla 6.16. Propiedades del concreto hecho con agregado de cenizas sinterizadas de combustible en polvo, en la "building research station".....	78
Tabla 6.17. Relación densidad/resistencia, para varias mezclas de concreto con cenizas sinterizadas de combustible en polvo.....	79
Tabla 6.18. Propiedades del concreto con agregados de cenizas de combustibles pulverizados .....	79
Tabla 6.19. Propiedades del concreto de pizarras expansivas .....	81
Tabla 6.20. Propiedades del concreto de pómez.....	81
Tabla 6.21. Propiedades del concreto de diatomita.....	82
Tabla 6.22. Propiedades del concreto de aserrín.....	83
Tabla 6.23. Valores característicos de algunas propiedades de los agregados.....	84
Tabla 8.1. Datos típicos para concretos sin finos de 10 a 20 mm (3/8 a 3/4 in).....	93
Tabla 8.2. Resistencia a la compresión de concreto sin finos obtenida en cubos de 15 cm por lado .....	95
Tabla 8.3. Contracción por secado en concreto sin finos.....	95
Tabla 8.4. Valores calculados de "U" para diferentes espesores de muros de concreto sin finos .....	96
Tabla 8.5. Coeficientes de absorción de sonido del concreto sin finos .....	97
Tabla 9.1. Propiedades del concreto de vermiculita .....	100
Tabla 9.2. Propiedades del concreto de perlita expansiva .....	101
Tabla 10.1. Contenido de cemento para concretos ligeros y diferentes resistencia a la compresión (ACI 213) .....	103
Tabla 10.2. Valores máximos sugeridos de la relación claro-peralte para miembros de flexión hechos de concreto con agregados ligeros .....	109
Tabla 11.1. Relación modular para el cálculo de pérdidas del preesfuerzo en el concreto ligero .....	132
Tabla 11.2. Pérdida de esfuerzo en el acero de preesfuerzo, debido al flujo plástico del concreto ligero.....	132
Tabla 11.3. Resistencias a compresión indicativas según la densidad del concreto. ....	133
Tabla 11.4. Utilización del concreto ligero presforzado.....	143
Tabla 12.1. Valores U de diversos muros .....	146