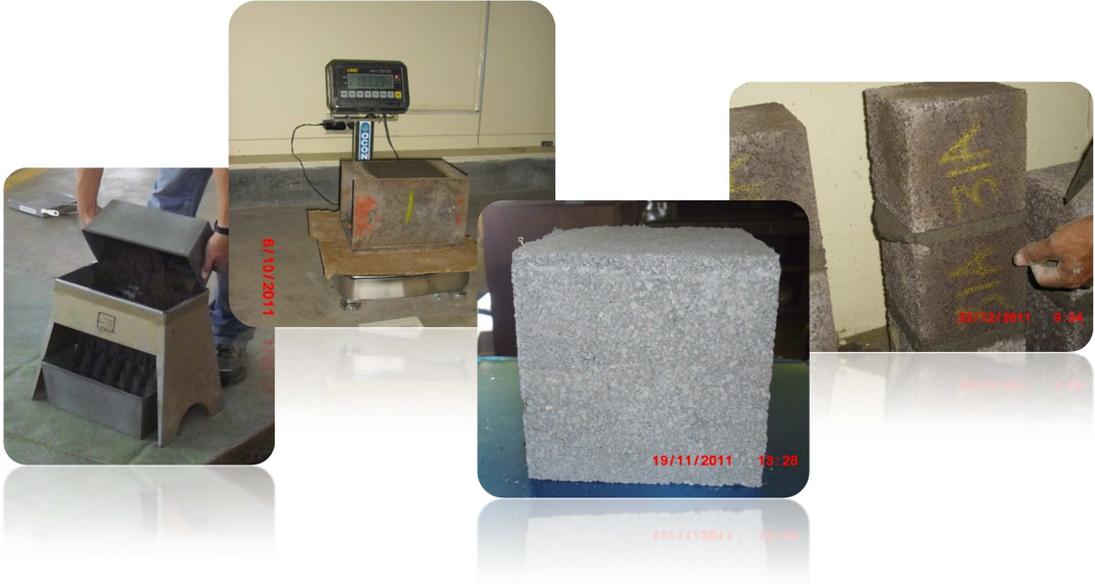


# Relaciones preliminares para la definición de los valores máximos de absorción en unidades de mampostería de concreto



# Abstract

This research is intended to demonstrate that aggregates have an important influence on density and absorption of concrete masonry units. This fact is not considered in the concrete masonry national standard INTE 06-03-01-07. Standards of other countries define the absorption according to density and compressive strength of the units. Higher absorptions are registered for blocks made of lighter weight aggregates, due to its greater absorption.

Three sources of aggregates with different unit weight and absorption were selected for this research. They were used to design dry concrete mixtures in the laboratory and manufacturing cubes to establish the relationship between absorption and density. In addition, the compressive strength, bond and permeability were evaluated. The cubic specimens of 15cm per side were built using a vibratory hammer to simulate the industrial process of vibro compaction with which the hollow blocks are produced.

The absorption of concrete cubes has an inverse linear relationship with its corresponding oven dry density. Keeping the same amount of cement, cubes made with more porous and absorbent aggregates, presented lower densities and resistance, as it happens with higher absorptions and highly permeable concretes.

**Keywords:**

*No-slump concrete ("dry concrete"), concrete masonry units, paste/aggregates relationship, absorption, oven dry density, compressive strength, bond.*

# Resumen

Con esta investigación se pretende demostrar que los agregados tienen una influencia importante en la densidad y absorción de las unidades de mampostería de concreto, factor que no se considera en la norma nacional de bloques de concreto INTE 06-03-01-07. Las normas de otros países definen la absorción de acuerdo con la densidad y resistencia a la compresión de las unidades, coincidiendo mayores absorciones para bloques fabricados con agregados de menor peso, debido a su mayor absorción.

Para ello se seleccionaron tres fuentes de agregados con diferente peso unitario y absorción, para diseñar mezclas de concreto seco en laboratorio y fabricar cubos que permitan establecer la relación entre la absorción y densidad de los mismos. Además, se evaluó la resistencia a la compresión, la adherencia y la permeabilidad. Los especímenes cúbicos de 15cm de lado se realizaron con un martillo vibratorio para simular el proceso industrial de vibro compactación con los cuales se producen los bloques huecos.

La absorción de los cubos de concreto tiene una relación lineal inversa con su correspondiente densidad seca al horno. Manteniendo la cantidad de cemento, los cubos elaborados con agregados más porosos y absorbentes presentan menores densidades y resistencias, en concordancia con absorciones mayores y concretos sumamente permeables.

**Palabras clave:**

*Concreto seco, bloques de concreto, relación pasta/agregados, absorción, densidad seca al horno, resistencia a la compresión, adherencia.*

# **Relaciones preliminares para la definición de los valores máximos de absorción en unidades de mampostería de concreto**

ALBERT QUESADA ARIAS

Proyecto final de graduación para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Mayo del 2012

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

# Contenido

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| PREFACIO.....                       | 1  |
| RESUMEN EJECUTIVO .....             | 2  |
| INTRODUCCIÓN .....                  | 5  |
| MARCO TEÓRICO.....                  | 7  |
| METODOLOGÍA .....                   | 19 |
| RESULTADOS.....                     | 31 |
| ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....    | 53 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .... | 61 |
| APÉNDICES .....                     | 63 |
| ANEXOS.....                         | 64 |
| REFERENCIAS.....                    | 65 |

# Prefacio

Las unidades de mampostería de concreto deben cumplir con una serie de especificaciones técnicas, entre ellas las correspondientes a la resistencia a la compresión y absorción, las cuales son claros indicativos de la calidad de los bloques y su conveniencia para ser usados en una construcción. Por lo tanto, se hace necesario que los bloques de concreto satisfagan valores de absorción que sean compatibles, principalmente, con el mortero de pega de bloques y el concreto de relleno de las celdas, a fin de lograr un adecuado comportamiento estructural. Además, es conveniente que las especificaciones técnicas que regulan la calidad de este producto consideren, de la mejor manera posible, los distintos tipos de agregados con los cuales pueden ser fabricados, puesto que la materia prima influye en el peso, absorción y resistencia de los bloques; propiedades que, a su vez, están íntimamente relacionadas.

Según lo anterior, el objetivo de este proyecto consiste, principalmente, en diseñar mezclas de concreto seco en laboratorio, para elaborar bloques sólidos (cubos) que permitan establecer relaciones preliminares entre la densidad de los bloques y su correspondiente valor de absorción, a partir de tres tipos de agregados de diferente peso unitario, densidad relativa seca al horno y absorción.

Todos los ensayos necesarios fueron realizados en el laboratorio del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO), adscrito a la Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Así entendido, quiero agradecer al Ing. Rommel Cuevas por su disposición para la coordinación de las pruebas y al técnico Vicente Villalta por su activa participación durante todo el proyecto.

Asimismo, deseo reconocer a mi profesor guía, Ing. Jorge Solano, su anuencia para colaborar en el desarrollo de este trabajo y para compartir su conocimiento y capacidad investigativa.

Por último, agradecer a mi familia por el apoyo incondicional durante toda mi formación profesional.

# Resumen Ejecutivo

La absorción de los bloques de concreto es función de la densidad del concreto con el cual fueron fabricados y, en consecuencia, se relaciona con el tipo de agregado empleado. La norma nacional INTE 06-03-01-07 “Elementos de mampostería hueca de concreto (bloques de concreto) para uso estructural — Requisitos” no contempla este aspecto, definiendo los valores de absorción según la clase de mampostería, o lo que es lo mismo, según la resistencia de los bloques. El incluir valores de absorción que estén en función de la densidad del concreto facilita el cumplimiento de las especificaciones técnicas por parte de los fabricantes, pues, contempla indirectamente las características de los agregados que utilizan. Este proyecto nace de la iniciativa del Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto (ICCYC) para realizar estudios previos que permitan mejorar la normativa vigente de estos productos.

Según lo anterior, el objetivo principal de esta investigación consiste en diseñar mezclas de concreto seco en laboratorio para fabricar especímenes cúbicos (simulando bloques de

concreto) con diferentes densidades que permitan establecer relaciones entre la absorción y densidad de los mismos. Para ello se seleccionaron tres tipos de agregados con diferente peso unitario y absorción: materiales calizos (caracterizados principalmente por su baja absorción), materiales de río (de peso intermedio) y materiales de tajo (muy porosos y con altas absorciones, además de su bajo peso unitario).

Para cada tipo de agregado se realizaron tres mezclas de concreto seco con diferente relación pasta/agregados, obteniendo un total de nueve mezclas diferentes, y con cada una de ellas se fabricaron 15 cubos para mediciones de absorción, densidad seca al horno, resistencia a la compresión y adherencia con el mortero de pega. Además, de cada mezcla se obtuvo un espécimen cilíndrico de concreto, el cual permitió la medición de la permeabilidad usando el método de carga variable.

Los valores ponderados de la combinación de agregados usados en las mezclas se indican a continuación:

| <b>CUADRO 1. CARACTERIZACIÓN DE LAS COMBINACIONES DE AGREGADOS UTILIZADOS EN LAS MEZCLAS DE CONCRETO SECO PARA ELABORAR CUBOS</b> |                                 |  |   |                               |
|---|---------------------------------|--|---|-------------------------------|
| <b>Tipo de agregados</b>  | <b>Relación Pasta/Agregados</b> | <b>Peso unitario ponderado, kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Gravedad específica bruta seca ponderada</b> | <b>Absorción ponderada, %</b> |
| Calizos:<br>-Arena industrial<br>-Arena gruesa  | 0,14                            | 1563   | 2,58  | 1,5                           |
|   | 0,17                            |  |   |                               |
|   | 0,20                            |  |   |                               |
| De río:<br>-Arena<br>-Polvo piedra<br>-Quintilla de 3/8"  | 0,14                            | 1359   | 2,36  | 5,7                           |
|   | 0,17                            |  |   |                               |
|   | 0,20                            |  |   |                               |
| Livianos (de tajo)<br>-Arena<br>-Quintilla de 3/8"  | 0,14                            | 1062   | 1,98  | 13,0                          |
|   | 0,17                            |  |   |                               |
|   | 0,20                            |  |   |                               |

Al comparar los valores de absorción, densidad y resistencia a la compresión de cubos elaborados, según la metodología del proyecto (usando martillo vibratorio y con un curado de 28 días en cámara húmeda) y bloques huecos (de acuerdo con el proceso de producción de la empresa Pedregal), ambos obtenidos de la misma partida de concreto, se obtuvieron las siguientes relaciones:

- Densidad de los bloques = 0,944 x Densidad de los cubos

- Absorción de los bloques = 1,217 x Absorción de los cubos
- Resistencia de los bloques (sobre el área neta) = 0,632 x Resistencia de los cubos

Los datos de absorción, densidad seca al horno y resistencia se presentan a continuación (los valores entre paréntesis fueron afectados por los factores anteriores, con el propósito de reflejar de mejor manera los valores esperados en bloques).

| <b>CUADRO 2. RESULTADOS DE ENSAYOS EN CUBOS DE CONCRETO</b> |                                 |   |                     |   |
|---|---------------------------------|---|---------------------|---|
| <b>Cubos elaborados con agregados:</b>                      | <b>Relación Pasta/Agregados</b> | <b>Densidad seca al horno, kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Absorción, %</b> | <b>Resistencia a la compresión, kg/cm<sup>2</sup></b> |
| Livianos (de tajo)  | 0,14                            | 1744 (1646)                                     | 17,8 (21,7)         | 38 (24)   |
|   | 0,17                            | 1743 (1645)                                     | 17,2 (20,9)         | 57 (36)   |
|   | 0,20                            | 1751 (1652)                                     | 16,2 (19,7)         | 85 (54)   |
| De río  | 0,14                            | 1918 (1811)                                     | 12,6 (15,3)         | 88 (55)   |
|   | 0,17                            | 1990 (1878)                                     | 10,8 (13,2)         | 130 (82)  |
|   | 0,20                            | 2055 (1940)                                     | 9,4 (11,4)          | 188 (119)   |
| Calizos   | 0,14                            | 2138 (2018)                                     | 7,4 (9,0)           | 164 (103)   |
|   | 0,17                            | 2224 (2099)                                     | 5,7 (6,9)           | 228 (144)   |
|   | 0,20                            | 2277 (2150)                                     | 4,8 (5,9)           | 324 (205)   |

Los valores entre paréntesis corresponden a los valores obtenidos en cubos multiplicados por los correspondientes factores de corrección, para simular los valores esperados en bloques huecos.

Con los resultados de absorción y densidad del cuadro anterior se puede establecer la relación lineal inversa entre estas dos variables, definiendo con cierto nivel de confianza el rango de absorción esperada para una determinada resistencia. Así, de acuerdo con los valores corregidos, para una densidad de 2000kg/m<sup>3</sup> (límite de densidad para bloques de peso medio y normal, según la norma ASTM C90) se espera una absorción entre 8,4% y 11,4%, con un 95% de confianza.

La prueba de adherencia se realizó en prismas compuestos de 3 cubos unidos con mortero, a los cuales se les aplica una carga puntual en el centro del claro, fallando los especímenes de forma horizontal utilizando dos apoyos simples. En cada relación pasta/agregados, los cubos realizados con agregados calizos mostraron mayor adherencia,

seguidos de los cubos con agregados livianos y, por último, los de agregados de río. En este caso, la adherencia se aumentó conforme se aumenta la relación pasta/agregados, es decir, conforme se disminuye la absorción. Los resultados manifiestan que la adherencia no solo está en función de la absorción de los bloques, sino también del tipo de superficie, del tipo de agregados y de la dosificación del mortero de pega.

El peso de los agregados influye directamente en la densidad y resistencia de los cubos. A su vez, unidades elaboradas con concretos de mayor densidad experimentan menores niveles de absorción y menor permeabilidad. Además de los agregados, la relación pasta/agregados es un factor indispensable en la definición de estas características.

Queda claro que los valores de absorción de los bloques no se deben definir solo en criterio de su densidad, sino también en términos de resistencia a la compresión. Para la inclusión de valores mínimos de adherencia en la norma nacional de bloques de concreto, primero es necesario establecer un método de ensayo estándar que permita obtener datos reproducibles a nivel nacional.

# Introducción

## El problema y su importancia

La mampostería reforzada o integral es uno de los métodos constructivos más ampliamente usados en Costa Rica, por lo tanto, es importante que los fabricantes de bloques de concreto cumplan con una reglamentación técnica que defina valores de absorción máximos de los bloques, de acuerdo con los materiales disponibles en el país, además de cumplir con requerimientos mínimos de resistencia y adherencia.

El problema consiste en revisar los valores máximos de absorción que deben cumplir los elementos de mampostería hueca de concreto (bloques de concreto) para uso estructural, según la norma nacional INTE 06-03-01-07, considerando que las propiedades de los agregados, como su peso unitario y absorción, influyen directamente en las propiedades del producto final (absorción, densidad, peso unitario, resistencia a la compresión, adherencia y permeabilidad).

Con el objetivo de revisar los valores de absorción para los bloques de concreto en Costa Rica, y su eventual relación con el peso unitario del concreto de que están fabricados, se realizó una investigación que permita establecer valores locales a partir de condiciones locales: agregados, cementos, etc. En un principio, se pretende establecer relaciones de absorción y densidad de cubos de concreto seco, elaborados en laboratorio con tres tipos de agregados, generando el criterio de que los agregados influyen directamente en la densidad y absorción de las unidades de mampostería, lo cual no es un factor que se contempla en la reglamentación hoy vigente.

Esta investigación se une al esfuerzo de la Comisión de Mampostería que forma parte del Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto (ICCYC), a fin de coadyuvar en el mejoramiento de la normativa vigente para bloques de concreto.

## Alcances y limitaciones

El proyecto se realiza utilizando especímenes cúbicos y no bloques huecos de concreto. Esto por la dificultad de simular en un laboratorio los procesos industriales de fabricación de unidades de mampostería. Debido a lo anterior, se esperan variaciones respecto al método de compactación y vibrado del concreto. De acuerdo con los resultados, se planteará una nueva investigación utilizando bloques de concreto.

Con este trabajo se pretende obtener relaciones preliminares a partir de datos de laboratorio, utilizando materiales locales y usando valores de densidad, absorción, resistencia a la compresión, permeabilidad y adherencia obtenidos de cubos de concreto. Las tendencias entre esas propiedades pueden variar si se evalúan en bloques huecos de concreto.

Los resultados obtenidos no son vinculantes para efectos de ser tomados en cuenta en una modificación de la normativa que regula la calidad de los bloques de concreto, puesto que aquí se han elaborado cubos sólidos y no bloques huecos de concreto, lo cual podría traer complicaciones técnicas y legales.

No obstante, los conceptos, la metodología y los resultados que se expresan en este proyecto pueden tomarse como un precedente para investigaciones subsecuentes que permitan optimizar las especificaciones técnicas que deben cumplir las unidades de mampostería de concreto, en Costa Rica.

## Acerca del marco teórico

En Costa Rica, se establecen los valores de absorción de los bloques de concreto de acuerdo con la clase de mampostería (A, B o C) sin importar el tipo de agregado con el cual fueron elaborados y, en consecuencia, sin contemplar la densidad del concreto que producen. Las normas de otros países (como Estados Unidos, México, Colombia y Argentina) definen los valores de absorción de acuerdo con la densidad del concreto, otorgando mayores valores a aquellas unidades que fueron elaboradas con agregados de menor peso, dado su mayor absorción.

Los agregados no son, del todo, inertes. Su composición química y mineralógica, su forma, densidad, rugosidad y porosidad son algunos de los aspectos que influyen en las propiedades del concreto, especialmente, en el desarrollo de la adherencia pasta-agregado y resistencia a la compresión.

- ❖ Establecer relaciones significativas entre el peso de los agregados y la densidad del concreto, entre el peso de los agregados y la absorción del concreto, entre la densidad del concreto y la resistencia a la compresión, entre la absorción de los cubos y su adherencia con el mortero de pega y entre la permeabilidad y el peso volumétrico del concreto.

## Objetivos

### Objetivo general

- ❖ Establecer relaciones significativas entre la absorción de cubos de concreto seco y la densidad seca al horno del concreto con el cual fueron fabricados.

### Objetivos específicos

- ❖ Obtener relaciones entre las propiedades de agregados (peso unitario, gravedades específicas y absorción) provenientes de tres diferentes fuentes de extracción.
- ❖ Evaluar el efecto de la relación pasta/agregados sobre la absorción, densidad, resistencia a la compresión, permeabilidad y adherencia de los especímenes cúbicos de concreto.

# Marco teórico

## Fabricación de las unidades de mampostería de concreto

El proceso de fabricación de bloques de concreto se puede resumir en los siguientes pasos:

- ❖ Elección del equipo de producción y del proceso de curado, almacenamiento y despacho.
- ❖ Selección de agregados de buena calidad, limpios y con la granulometría indicada, según las dimensiones de las unidades y la resistencia y textura esperadas. Elección de los tipos de cemento, los aditivos y, en algunos casos, de los pigmentos.
- ❖ Formulación de la dosificación de todos estos materiales y del agua, de acuerdo con las características esperadas para el producto terminado. Esto se debe hacer con base en experiencias previas o en guías de los productores del equipo, pues, no se puede realizar una dosificación de mezclas convencionales (como para concreto estructural) dada la naturaleza seca de la mezcla y las diferencias radicales en el vibrado y compactación de la misma dentro de los equipos.
- ❖ Los agregados se introducen en una mezcladora indicada para mezclas secas, en las cantidades calculadas, siguiendo una secuencia adecuada para el tipo de producto. Allí se le adiciona la cantidad necesaria de agua, tomando en cuenta la humedad contenida en los agregados y, luego, se adiciona el cemento. Los aditivos se adicionan, por lo general, en forma líquida a la mezcladora, mezclados con el agua o incorporando parte de esta. Los colorantes se adicionan en polvo o gránulos directamente a la mezcladora o

en suspensión, también incorporando parte del agua calculada. La mezcla resultante debe ser homogénea en composición y color.

- ❖ La mezcla pasa a una máquina vibrocompresora, en la cual las unidades se moldean con ayuda de vibración y compresión, en moldes de dimensiones controladas.
- ❖ Para el curado se emplean diversos métodos: vapor en cámaras a baja presión, microaspersión de agua o riego de agua en espacios abiertos. El curado inicial, en cámaras, se extiende por unas 24 horas, período después del cual las unidades salen secas y se agrupan sobre estibas, conformando cubos. Cuando el curado se hace con riego de agua, en espacios abiertos, las unidades se dejan sobre las bandejas hasta que fragüen. Luego se conforman los cubos, se almacenan estibados y se continúa su curado (unos 7 días) hasta que las unidades alcancen la resistencia adecuada y se procede a empacarlos para su despacho, con lo cual se obtienen unidades sin control de humedad.

## Características de los bloques de concreto

En Costa Rica, las características de los bloques deben cumplir con la norma INTE 06-03-01-07 (Elementos de mampostería hueca de concreto para uso estructural. Requisitos). Algunas de las características más importantes de los bloques son las siguientes:

## Densidad

La densidad de los bloques de concreto depende, principalmente, del peso de los agregados, la dosificación empleada, la relación pasta/agregados y del proceso de fabricación (vibración y compactación dada a la mezcla).

La densidad está directamente relacionada con la resistencia a la compresión, mientras que está inversamente relacionada con la absorción y la permeabilidad.

| <b>CUADRO 3. CLASIFICACIÓN DE LAS UNIDADES DE MAMPOSTERÍA DE CONCRETO, SEGÚN LA DENSIDAD DEL CONCRETO</b> |                     |                    |
|---|---------------------|--------------------|
| <i>Densidad seca al horno del concreto (kg/m<sup>3</sup>)</i>   |                     |                    |
| <i>Peso liviano</i>   | <i>Peso mediano</i> | <i>Peso normal</i> |
| Menos de 1680   | 1680-2000           | 2000 o más         |

Fuente: Norma ASTM C90 y NTC 4026

## Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es la principal propiedad que deben cumplir las unidades de mampostería.

Las pruebas de compresión de los bloques deben realizarse según INTE 06-02-13-07 (Muestreo y ensayo de unidades de mampostería de concreto, bloques de concreto).

El Código Sísmico de Costa Rica 2010 establece tres tipos de unidades de mampostería, basado en su resistencia a la compresión sobre el área neta:

| <b>CUADRO 4. REQUERIMIENTOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MEDIDA SOBRE EL ÁREA NETA A LOS 28 DÍAS DE EDAD) DE LOS BLOQUES DE CONCRETO</b> |  |                   |  |
|---|--|-------------------|--|
| <b>Clase</b>  | <b>Resistencia mínima, kg/cm<sup>2</sup></b> |                   | <b>Uso</b>   |
|   | <b>Promedio</b>                              | <b>Individual</b> |  |
| A   | 133  | 120               | Obligatoria para todas las construcciones con área mayor de 1000m <sup>2</sup> y de 3 pisos de altura.   |
| B   | 90   | 80                | Construcciones con área menor de 1000m <sup>2</sup> y hasta 2 pisos de altura.   |
| C   | 75   | 70                | Solo puede emplearse en elementos que no forman parte del sistema sismo resistente, por lo que no debe emplearse para la construcción de paredes de viviendas o de otros tipos de paredes estructurales. |

Fuente: CSCR 2010

## Absorción

La absorción es la cantidad de agua que la unidad puede absorber hasta llegar a la saturación. La absorción de las unidades está inversamente relacionada con la densidad del

concreto y con su resistencia a la compresión, por lo tanto, se permiten mayores niveles de absorción para unidades de menor resistencia y para aquellas de uso no estructural. Por otro lado, a mayor absorción mayor permeabilidad de los bloques.

Con respecto a la adherencia, entre más absorbente sea el bloque, este sustrae más agua del mortero de pega y del concreto de relleno. Si la absorción es muy alta podría quitar demasiada agua al mortero de pega y al concreto de relleno, impidiendo la suficiente hidratación de los aglutinantes presentes en la mezcla, con lo cual se pierde adherencia y se originan fisuras. Mientras que unidades totalmente impermeables impiden el intercambio de humedad entre la superficie del bloque y el mortero de pega, dando como resultado uniones de poca resistencia (baja adherencia) que se manifiestan como fisuras y

que son permeables al agua, lo mismo sucedería con el concreto de inyección. Una absorción baja reduce el ingreso de agua dentro de la masa de la unidad y el de materiales contaminantes arrastrados por esta, por lo cual se convierte en un requisito de calidad para la durabilidad.

La norma nacional INTE 06-03-01-07 establece un valor de absorción máxima para los bloques de concreto, según su clasificación, sea A, B o C, independientemente de la densidad del bloque y, en consecuencia, no se considera el tipo de agregado con los cuales fueron fabricados.

| <b>CUADRO 5. REQUERIMIENTOS DE ABSORCIÓN MÁXIMA PARA LOS BLOQUES DE CONCRETO, SEGÚN LA NORMATIVA NACIONAL</b> |                       |                                   |                                      |  |
|---|-----------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--|
| <b>Clase</b>  | <b>Absorción</b>      |                                   |                                      |  |
|   | <b>Expresada en %</b> | <b>Valor máximo individual, %</b> | <b>Expresada en kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Valor máximo individual, kg/m<sup>3</sup></b> |
| A   | ≤10                   | 11                                | ≤196                                 | 218  |
| B   | ≤11                   | 12                                | ≤218                                 | 237  |
| C   | ≤14                   | 15                                | ≤277                                 | 297  |

Fuente: Norma INTE 06-03-01-07

Las especificaciones de otros países hacen la diferencia en los valores de absorción de acuerdo con la densidad de los bloques, concediendo valores mayores a los bloques fabricados con agregados livianos, dado su mayor absorción. En Colombia, por ejemplo, se establecen los valores expresados en el siguiente cuadro:

| <b>CUADRO 6. REQUISITOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, ABSORCIÓN DE AGUA Y CLASIFICACIÓN DEL PESO</b> |                               |                   |  |  |  |
|--|-------------------------------|-------------------|--|--|--|
| <b>Resistencia a la compresión a los 28 días, evaluada sobre el área neta promedio</b>                 |                               |                   | <b>Absorción de agua, %, según el peso (densidad) del concreto secado en horno</b> |  |  |
| <b>Mínimo, MPa</b>   |                               |                   | <b>Promedio de 3 unidades, máximo, %</b>   |  |  |
| <b>Clase</b>   | <b>Promedio de 3 unidades</b> | <b>Individual</b> | <b>Peso liviano, menos de 1680kg/m<sup>3</sup></b>                                 | <b>Peso mediano, de 1680kg/m<sup>3</sup> hasta menos de 2000kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Peso normal, 2000kg/m<sup>3</sup> o más</b> |
| Alta resistencia (A)   | 13                            | 11                | 15%  | 12%  | 9%   |
| Baja resistencia (B)   | 8                             | 7                 | 18%  | 15%  | 12%  |

Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 4026

De igual forma, la Norma Argentina IRAN 11561, "Bloques Huecos de Hormigón" presenta los siguientes valores:

| <b>CUADRO 7. REQUERIMIENTOS DE ABSORCIÓN MÁXIMA DE AGUA EN BLOQUES HUECOS DE HORMIGÓN</b> |   |                              |   |
|---|---|------------------------------|---|
| <b>Designación</b>  | <b>Valores máximos de absorción de agua</b>     |                              |   |
|   | <b>Densidad del Hormigón (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Absorción de agua (%)</b> | <b>Absorción de agua (kg/m<sup>3</sup>)</b> |
| Normal o estándar   | más 2000  | 10,5                         | 210   |
| Mediano   | 1700 a 2000                                     | 13                           | 240   |
| Liviano   | menos 1700                                      | 17                           | 290   |

Fuente: Norma IRAN 11561

Por otro lado, la norma ASTM C90 establece los valores admisibles de absorción de agua y de resistencia a la compresión para los bloques de concreto huecos, de acuerdo con la densidad seca al horno del concreto:

| <b>CUADRO 8. REQUERIMIENTOS DE RESISTENCIA, ABSORCIÓN Y CLASIFICACIÓN DEL PESO</b> |   |   |                              |                            |
|--|---|---|------------------------------|----------------------------|
|  | <b>Resistencia a la compresión mínima sobre el área neta, MPa</b> | <b>Absorción máxima de agua, kg/m<sup>3</sup></b>                                   |                              |                            |
|  |   | <b>Clasificación del peso-densidad seca al horno del concreto, kg/m<sup>3</sup></b> |                              |                            |
|  |   | <b>Liviano, menos de 1680</b>   | <b>Medio, de 1680 a 2000</b> | <b>Normal, más de 2000</b> |
| Promedio de 3 unidades   | 13,1  | 288   | 240                          | 208                        |
| Unidad individual  | 11,7  | 320   | 272                          | 240                        |

Fuente: Norma ASTM C90

## Humedad

Es la presencia de agua dentro de la masa del bloque, entre la saturación y el estado seco al horno.

Es importante que los bloques estén secos antes de su colocación y que cumplan con los requerimientos de calidad en cuanto a la absorción, de manera que sean capaces de absorber el exceso de agua del concreto de relleno. El concreto de relleno, generalmente, es una mezcla muy fluida (revenimiento entre 20 y 25cm) para poder acomodarse en las cavidades

de los bloques, por lo tanto, si los bloques están secos absorberán agua de la mezcla, disminuyendo la relación agua/cemento e incrementando la resistencia del concreto de relleno. En caso de que los bloques se tengan que colocar en condición saturada se debe reducir la relación agua/cemento del concreto de relleno para hacerlo más resistente, además de la utilización de un vibrador de 3/8" de diámetro o la inclusión de un aditivo plastificante.

El concreto se expande o contrae con el aumento o disminución de su humedad, la colocación de unidades muy húmedas conlleva a su contracción posterior y a la aparición de

fisuras. Si las unidades se colocan en el muro con un contenido de humedad mayor que la del ambiente, pierden humedad hasta llegar al equilibrio con la humedad del ambiente, y dado que los muros poseen restricciones de movimiento, aunque sea solo en su fundación, la contracción de las unidades origina fisuración de los muros por compatibilidad de deformaciones. Lo anterior implica que es indispensable mantener los menores contenidos de humedad posibles, en las unidades, en todo momento. Lo ideal sería que, una vez que se termina el curado, estas se sequen y se conserven en dicho estado. Para mantener las unidades secas, lo recomendable es protegerlas con láminas de plástico hasta que sean colocadas en el muro, el cual se debería proteger de igual manera, para que no reciba humedad proveniente de la lluvia o de otras actividades de la construcción. Cuando no se controla la humedad, las unidades se curan con riego de agua y se almacenan a la intemperie en la planta y en la obra.

## **Adherencia entre bloque de concreto-mortero de pega**

Para lograr una adherencia adecuada es necesario que la superficie de las unidades de mampostería sea de textura lisa y abierta. Para permitir la unión mecánica del mortero y la unidad, esta debe tener una absorción adecuada, compatible con el mortero. Es importante también que el mortero tenga la suficiente plasticidad y la retención de agua necesaria para que no se debilite la unión con la unidad.

De la adherencia mecánica entre las unidades y el mortero dependen las resistencias a esfuerzos cortantes y de tensión. Por lo tanto, esta propiedad es muy importante para el correcto funcionamiento de muros sometidos a flexión o a cargas horizontales.

La adherencia se puede mejorar con morteros que tengan una apropiada dosificación, buena manejabilidad y que sean colocados adecuadamente.

## **Adherencia entre bloque de concreto-mortero de inyección**

La adherencia entre el concreto de relleno y las unidades se presenta mediante la unión mecánica del concreto de inyección y la unidad de mampostería, debidas a las rugosidades de la unidad y a la forma misma de la cavidad. La transferencia de agua permite reducir la relación agua/cemento de la mezcla con lo que se aumenta su resistencia final.

## **Características dimensionales**

### **Modularidad y variaciones**

La variabilidad en las dimensiones de las unidades de mampostería altera el espesor del muro y del mortero de pega, modificando las características estructurales y constructivas (apariencia final del muro, niveles de enrase, alineación de juntas, acabados adicionales). En el proceso de fabricación de las unidades, las medidas deben estar dentro de ciertos límites, pues, variaciones entre celdas de moldes o el desgaste de los mismos, pueden dar lugar a diferencias entre unidades supuestamente iguales.

### **Dimensiones**

Las dimensiones de una unidad de mampostería están definidas como su espesor, su altura y su longitud. Para cada una de ellas existen tres tipos de dimensiones, según el propósito: las dimensiones reales son las medidas directamente sobre la unidad en el momento de evaluar su calidad; las dimensiones estándar son las designadas por el fabricante en su catálogo (dimensiones de producción) y las dimensiones nominales son iguales a las dimensiones estándar más el espesor de una junta de pega (generalmente de 1cm).

## Acabado y apariencia

Todas las unidades deben estar sanas y no deben tener fisuras ni otros defectos que interfieran con un proceso apropiado de colocación de la unidad, o que perjudiquen significativamente su resistencia o la permanencia de la construcción. Las fisuras menores, inherentes al método de fabricación, o las pequeñas quebraduras en los bordes que resultan de los métodos usuales de manejo en el despacho y en la entrega, no son motivo de rechazo.

Las unidades que se van a utilizar como base para un recubrimiento posterior, deben tener una superficie con una textura lo suficientemente abierta que permita una buena adherencia.

## Calidad del mortero de pega

La arena debe cumplir con las normas ASTM C144 e INTE 06-01-02-09 (Agregados para concreto. Requisitos).

La resistencia a la compresión del mortero medida en cubos y a los 28 días de edad debe ser como mínimo de 175kg/cm<sup>2</sup>; 126kg/cm<sup>2</sup> y 53kg/cm<sup>2</sup> para morteros tipo A, B y C respectivamente.

| <b>CUADRO 9. CLASIFICACIÓN DEL MORTERO DE PEGA, SEGÚN LA CLASE DE MAMPOSTERÍA</b> |                        |
|---|------------------------|
| <b>Tipo de mampostería</b>  | <b>Tipo de mortero</b> |
| Clase A   | A                      |
| Clase B   | A o B                  |
| Clase C   | A, B o C               |

Fuente: CSCR 2010

Las proporciones por volumen para la fabricación del mortero de pega pueden ser las siguientes (se pueden utilizar otras proporciones si se demuestra que producen un adecuado comportamiento de la mampostería):

| <b>CUADRO 10. PROPORCIONES RECOMENDADAS PARA LA FABRICACIÓN DEL MORTERO DE PEGA</b> |                        |                |                               |                      |   |
|---|------------------------|----------------|-------------------------------|----------------------|---|
| <b>Combinación de materiales cementantes</b>  | <b>Tipo de mortero</b> | <b>Cemento</b> | <b>Cemento de mampostería</b> | <b>Cal hidratada</b> | <b>Arena en condición húmeda y suelta</b> |
| Cemento-cal hidratada   | A                      | 1              | 0                             | ¼                    | 3   |
| Cemento-cal hidratada   | B                      | 1              | 0                             | ½                    | 4   |
| Cemento-cal hidratada   | C                      | 1              | 0                             | ¾                    | 5   |
| Cemento-cemento de mampostería  | A                      | 1              | 1                             | 0                    | 5   |
| Cemento-cemento de mampostería  | B                      | ½              | 1                             | 0                    | 4   |
| Cemento de mampostería  | C                      | 0              | 1                             | 0                    | 3   |

Fuente: CSCR 2010 (adaptada de INTE 06-02-21-08 (Especificaciones del mortero para unidades de mampostería))

## Calidad del concreto de relleno de celdas de mampostería

El concreto de relleno debe consistir en una mezcla de cemento, agregados y agua. El tamaño máximo por utilizar en el agregado grueso es 1,2cm. La arena y la piedra deben cumplir con las normas INTE 06-01-02-09 (Agregados para concreto. Requisitos) y ASTM C476.

El concreto de relleno por emplear será de acuerdo con el siguiente cuadro:

| <b>CUADRO 11. CLASIFICACIÓN DEL CONCRETO DE RELLENO, SEGÚN LA CLASE DE MAMPOSTERÍA</b> |                                    |
|--|------------------------------------|
| <b>Tipo de mampostería</b>   | <b>Tipo de concreto de relleno</b> |
| Clase A  | A                                  |
| Clase B  | A o B                              |
| Clase C  | A, B o C                           |

Fuente: CSCR 2010

El concreto debe tener un revenimiento de 20 a 25cm.

El concreto de relleno tipo A debe tener una resistencia de 175 kg/m<sup>3</sup>, el tipo B de 140 kg/m<sup>3</sup> y el tipo C de 120 kg/m<sup>3</sup>. Las pruebas deben hacerse conforme a INTE 06-02-19-07 (Método de ensayo para el muestreo y ensayos de concreto de relleno para mampostería hueca de concreto).

Las proporciones por volumen para la fabricación del concreto de relleno pueden ser las indicadas en el Cuadro 12 (se pueden utilizar otras proporciones si se demuestra que producen un adecuado comportamiento de la mampostería):

| <b>CUADRO 12. PROPORCIONES POR VOLUMEN PARA LA FABRICACIÓN DEL CONCRETO DE RELLENO</b> |                |                     |                         |
|--|----------------|---------------------|-------------------------|
| <b>Concreto de relleno tipo</b>  | <b>Cemento</b> | <b>Arena suelta</b> | <b>Piedra quintilla</b> |
| A  | 1              | 2                   | 2                       |
| B  | 1              | 2 ½                 | 2                       |
| C  | 1              | 3                   | 2                       |

Fuente: CSCR 2010 (Adaptado de ASTM C476 e IBC-2000, tabla 2103.9)

## Resistencia a la compresión de la mampostería

La resistencia a la compresión ( $f'_m$ ) se debe basar en ensayos de prismas construidos con los mismos materiales y mano de obra que se utilizan en la construcción de la obra. Asimismo, los prismas deben ser ensayados según la norma INTE 06-02-18-07 (Métodos de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de prismas de mampostería).

El valor de  $f'_m$  mínimo por emplear para las diferentes clases de mampostería es el indicado en el cuadro siguiente. Asimismo, cuando no exista información obtenida del ensayo de prismas, el valor de  $f'_m$  se puede suponer igual al valor mostrado en el Cuadro 13.

| <b>CUADRO 13. VALORES DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MÍNIMAS DE LA MAMPOSTERÍA</b> |  |
|--|--|
| <b>Mampostería clase</b>   | <b><math>f'_m</math> sobre el área neta, kg/cm<sup>2</sup></b> |
| A  | 100  |
| B  | 70   |
| C  | 60   |

Fuente: CSCR 2010

## Adherencia del agregado con la pasta de cemento

La adherencia pasta-agregado se produce por el entrelazamiento mecánico y reacción química de los productos de hidratación del cemento con las partículas de agregado. A la región, donde se produce esa unión, se le denomina Zona de Transición Interfacial (ITZ por sus siglas en inglés).

La ITZ es una región más porosa y débil que el resto de la pasta de cemento, debido a que en esta zona los productos de hidratación del cemento son incapaces de adherirse fuertemente con las partículas más grandes de agregado. Al ser una zona muy porosa, la cantidad de cemento es menor y, en consecuencia, la relación agua/cemento es mayor que la de la pasta más alejada. Esquemáticamente la ITZ se puede representar de la siguiente forma:

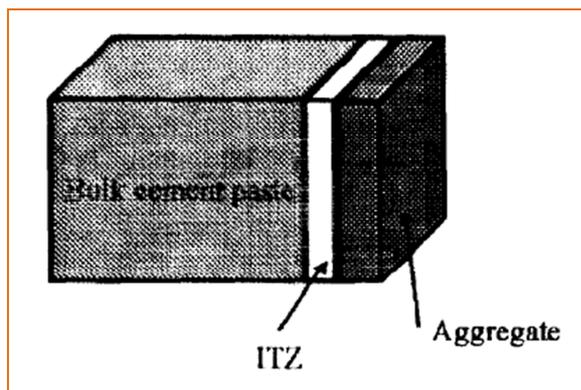


Figura 1. Ilustración esquemática de la ITZ (Bentz y Garboczi, 1999).

La adherencia se debe, en parte, a que el agregado y la pasta se entrelazan debido a la aspereza de la superficie del primero. Una superficie más áspera, como la de las partículas trituradas, da como resultado una mejor adherencia, que también se consigue cuando se usan materiales compuestos por partículas más suaves, porosos y mineralógicamente heterogéneos. Por lo general, las características de textura que no permiten la penetración de las partículas por la superficie no producen una buena adherencia. Además, hay otras propiedades químicas y físicas de los agregados

que afectan la adherencia, que están relacionadas con su composición mineralógica y química y con las condiciones electrostáticas de la superficie de la partícula. Por ejemplo, debe existir algún tipo de adherencia química en el caso de la dolomita, la caliza y, posiblemente, los agregados silíceos.<sup>1</sup>

Las propiedades de los agregados, tales como su forma, tamaño, rugosidad, área real de superficie y composición mineralógica influyen en la zona donde se genera la adherencia.

## Generalidades sobre el concreto seco

Las mezclas de concreto seco son aquellas que presentan un revenimiento de 0 a 2,5cm, por lo tanto, la prueba del revenimiento no es de utilidad. Estos tipos de mezclas son ampliamente utilizadas en elementos prefabricados, ya que, permiten retirar rápidamente los encofrados. Para su colocación en los moldes se requiere alta energía de vibración y/o compactación.

Entre las aplicaciones de las mezclas secas se encuentran:

- Elementos prefabricados como tuberías, viguetas y unidades de mampostería.
- Concreto compactado con rodillo.
- Concreto permeable.
- Elementos pre esforzados.

Una forma de medir la consistencia de las mezclas secas es mediante el método ASTM C1170, el cual utiliza el aparato Vebe. La prueba consiste en obtener una muestra representativa de concreto para llenar un molde cilíndrico, el cual se adapta a una mesa vibratoria. Se inicia la vibración y se registra el tiempo necesario para que se forme un anillo de mortero a lo largo de todo el perímetro del espécimen (método sin sobrecarga). Para mezclas con consistencia de muy rígidas a extremadamente secas, se utiliza el aparato Vebe con una sobrecarga de 50lb sobre el concreto contenido en el cilindro, registrando el tiempo necesario para que se forme, en su totalidad, un anillo de mortero en el espacio anular comprendido entre la sobrecarga y la superficie interior del molde. Al tiempo obtenido en esta prueba se le conoce como consistencia

<sup>1</sup>Neville, A. 1999. Tecnología del Concreto

Vebe y se reporta en segundos. En mezclas muy secas este método permite identificar fácilmente diferencias de consistencia.

## Mezclas secas para la fabricación de bloques de concreto

### Graduación de los agregados

La selección del tipo de agregado y su graduación es un parámetro importante en la selección de proporciones de concreto de productos prefabricados elaborados en máquinas vibrocompactadoras (como los bloques huecos de concreto). Los encofrados de estos productos son removidos inmediatamente después de la colocación y compactación del concreto. Por lo tanto, la mezcla de concreto fresco debe ser cohesiva para retener su forma. La cohesión es lograda suministrando suficiente fineza en las mezclas. Estos finos se pueden obtener de una selección cuidadosa de la granulometría del agregado fino. La cohesión deseada también se puede alcanzar incrementando el contenido de material cementicio. Esta alternativa no es recomendada por el efecto negativo del exceso de material cementicio, tal como el elevado calor de hidratación y la contracción por secado, además del incremento en el costo del bloque

Los agregados para bloques de concreto pueden ser de peso normal o de peso liviano. Los agregados de peso normal deben cumplir con los requerimientos de ASTM C33, mientras que los de peso liviano deben cumplir con la ASTM C331.

Generalmente, el material pasando el tamiz de 3/8" y retenido en el tamiz de 4,75mm (#4) es considerado agregado grueso. La graduación ideal es la mezcla que contenga la mayor cantidad de agregado grueso que pueda ser usado, evitando producir una excesiva textura rugosa en el bloque, y que contenga la cantidad precisa de material fino que proporcione uniformidad.

El módulo de finura óptimo de la mezcla de agregados, generalmente, es de 3,70. Para lograrlo es necesario un 40% de material grueso (retenido en cribas N°4 y N°8 otorga resistencia al hormigón), un 45% de agregado medio (retenido

en cribas N°16, N° 30 y N° 50) y un 15% de fino (otorgando homogeneidad y facilitando el llenado de los moldes). No obstante, se podría utilizar otro módulo de finura, dependiendo de los materiales disponibles y del proceso de fabricación de los bloques; siempre y cuando el producto final cumpla con los requisitos de calidad.

El porcentaje de agregado grueso y fino por volumen para obtener un módulo de finura determinado se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\%AF = \frac{MF_{AG} - MF_{COMB}}{(MF_{AG} - MF_{AF})} \times 100\%$$

Donde:

%AF: % de agregado fino

MF<sub>AG</sub>: Módulo de finura del agregado grueso

MF<sub>AF</sub>: Módulo de finura del agregado fino

MF<sub>COMB</sub>: Módulo de finura combinado

Las siguientes tres figuras muestran las distribuciones granulométricas recomendadas por el ACI para las mezclas de agregados, dependiendo de su peso (normal, liviano, intermedio):

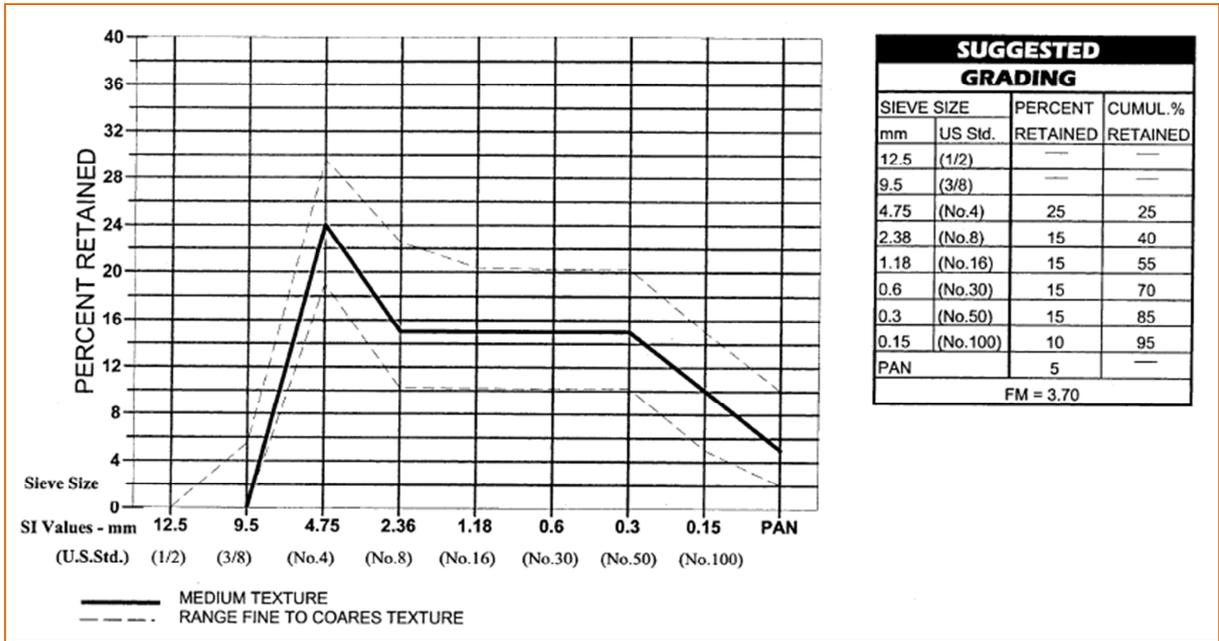


Figura 2. Granulometría combinada para agregados de peso normal, según ACI 211.3R-02

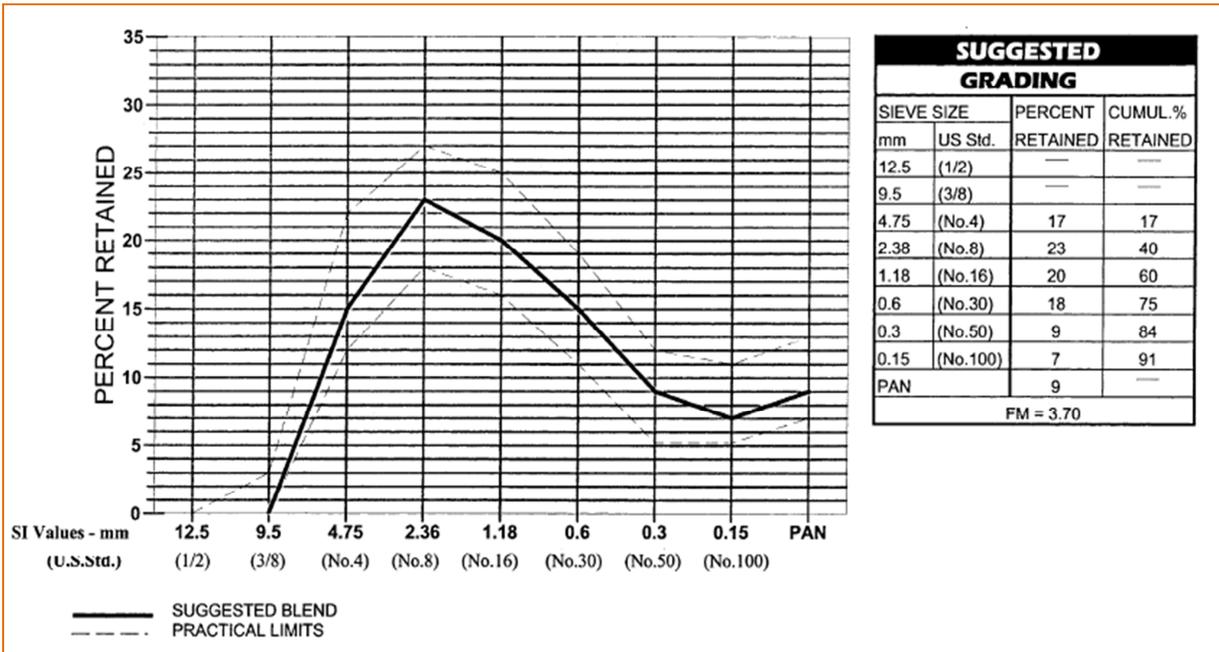


Figura 3. Granulometría combinada para agregados de peso intermedio, según ACI 211.3R-02

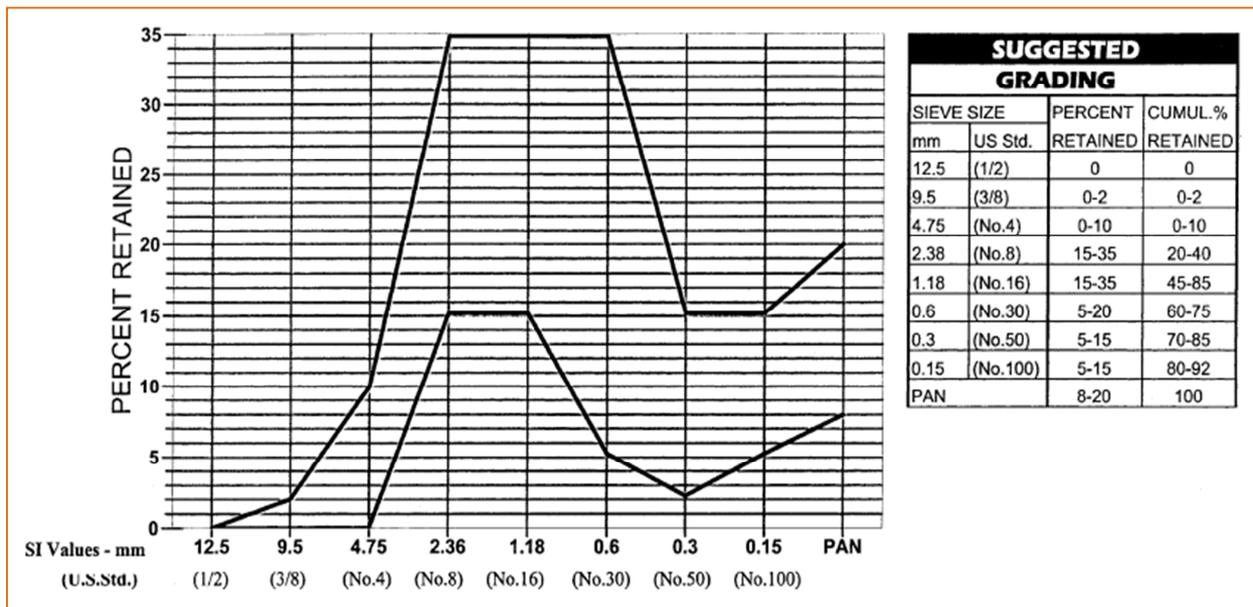


Figura 4. Granulometría combinada para agregados de peso liviano, según ACI 211.3R-02 y norma ASTM C331

## Cantidad de cemento

El cemento portland es el ingrediente más costoso, por lo que debe ser utilizado inteligentemente en la mezcla. Es posible economizar cemento manteniendo la calidad del bloque mediante una adecuada dosificación de los agregados. El material cementicio puede ser expresado en kilogramos de material por tanda, por bloque o como porcentaje del total de la masa del agregado.

El contenido de cemento puede variar dependiendo de la resistencia de diseño, de la calidad y granulometría del agregado y de las condiciones de curado.

El siguiente cuadro sugiere las proporciones cemento:agregados de acuerdo con el tipo de agregado, coincidiendo mayores cantidades de cemento para agregados livianos, es decir, menores proporciones cemento:agregados.

| <b>CUADRO 14. PROPORCIONES CEMENTO:AGREGADOS (POR VOLUMEN) PARA ELABORAR CONCRETO SECO PARA BLOQUES</b> |                 |
|---|-----------------|
| <b>Tipo de agregado</b>   | <b>Relación</b> |
| Arena y grava   | 1:8 a 1:12      |
| Escorias  | 1:6 a 1:8       |
| Arcilla (expandida)   | 1:6 a 1:9       |
| Caliza  | 1:7 a 1:12      |
| Pómez   | 1:4 a 1:6       |
| Escoria de altos hornos (expandida)   | 1:5 a 1:7       |
| Escoria de altos hornos (enfriada al aire)  | 1:8 a 1:12      |

Fuente: Víctor Julio Ruiz (1983), "Fabricación Técnica de bloques de concreto"

## Contenido de agua

El contenido de agua presenta gran importancia a la hora de dosificar un concreto para bloques, tanto por su influencia en la resistencia como en la fabricación. Es recomendable que el requerimiento de agua sea establecido en pruebas de laboratorio. La regla general es usar tanta agua que el producto pueda tolerar sin desplomarse ni quebrarse cuando los encofrados son removidos. El contenido de agua puede ser ajustado hasta que la mezcla forme una "bola" al apretarla con la mano, así tendrá la suficiente cohesión para mantener su forma cuando se aprieta; pero no debe exhibir humedad libre. Es común el uso de aditivos plastificantes para reducir la relación agua/cemento, puesto que el control de calidad del producto final está íntimamente relacionado con la cantidad de agua por agregar al pastón.

# Metodología

Todas las pruebas necesarias para esta investigación fueron desarrolladas en el laboratorio del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO), de la Escuela de Ingeniería en Construcción del ITCR.

## Selección de los agregados

Para el desarrollo de la investigación se seleccionaron tres tipos de agregados con diferente peso unitario, de manera que se obtuvieran unos agregados de peso liviano, de peso medio y pesado; de acuerdo con los materiales disponibles en Costa Rica. Paralelamente, los materiales presentaron diferentes valores de absorción: alto, intermedio y bajo. Los materiales utilizados fueron:

- ❖ Agregados de tajo (provenientes de Tilarán): arena y quintilla de tamaño máximo de 3/8", de origen volcánico, caracterizados por su alta absorción (superior al 10%), bajo peso unitario (alrededor de 1100kg/m<sup>3</sup>), de un color rojizo, conocido como "chopo".
- ❖ Agregados de río (provenientes de Belén): arena, polvo de piedra y quintilla de tamaño máximo de 3/8". Considerados de peso medio debido a que sus pesos unitarios varían de 1300kg/m<sup>3</sup> a 1500kg/m<sup>3</sup>.
- ❖ Agregados calizos (provenientes de Nicoya): en este trabajo se han identificado como calizo #1 (arena industrial, caracterizada por un alto porcentaje retenido en el tamiz #8 y #16 (65%) pero con menos de un 5% retenido en el tamiz #4, además de un bajo porcentaje pasando la malla #200) y calizo #2 (con mayor cantidad de material retenido en el tamiz #4 que el material

calizo #1, además de un alto porcentaje pasando la malla #200 (10%). Estos agregados se caracterizan por su baja absorción (menor a 2%) y tienen un peso unitario de aproximadamente 1600kg/m<sup>3</sup>.

## Caracterización de los agregados

Se realizaron los siguientes ensayos:

- ASTM C702 Reducción de muestras al tamaño de ensayo.
- ASTM C40 Colorimetría (impurezas orgánicas del agregado fino).
- ASTM C29 Peso unitario de los agregados: el ensayo debe tener una desviación estándar menor a 14kg/cm<sup>2</sup> (calculado a partir de 3 mediciones). El peso unitario se calcula como sigue:

$$M = (G - T) / V$$

Donde:

T: Masa del recipiente (kg)

V: Volumen del recipiente (m<sup>3</sup>)

G: Masa de los agregados más el recipiente (kg)

M: Densidad en masa de los agregados (kg/m<sup>3</sup>)

- ASTM C117 Lavado por malla #200 (material más fino que la malla #200): por cada agregado se realizaron 2 ensayos.
- ASTM C136 Análisis granulométrico de agregado fino y grueso: por cada agregado se realizaron 2 ensayos.
- ASTM C127 Gravedades específicas y absorción del agregado grueso: para cada agregado (quintilla de río, quintilla de tajo, calizo #2) se realizaron 3 ensayos, seleccionando los tres datos o eliminando el que presente más

dispersión respecto al promedio, de manera que se cumplan los límites de precisión dados en el siguiente cuadro, además los valores de absorción deben tener un porcentaje de variación menor al 5%.

| <b>CUADRO 15. PRECISIÓN DEL ENSAYO ASTM C127</b>    |                            |  |
|---|----------------------------|--|
| <b>Precisión de un solo operador:</b>               | <b>Desviación estándar</b> | <b>Rango aceptable de dos resultados</b> |
| » Gravedad específica bruta seca GBS                | 0,009                      | 0,025                                    |
| » Gravedad específica saturada superficie seca GBSS | 0,007                      | 0,020                                    |
| » Gravedad específica aparente Gs                   | 0,007                      | 0,020                                    |

- ASTM C 128 Gravedades específicas y absorción del agregado fino: para cada agregado (arena de río, polvo de piedra, arena de tajo, calizo #1 y calizo #2) se realizaron 3 ensayos, seleccionando los tres datos o eliminando el que presente más dispersión respecto al promedio, de manera que se cumplan los límites de precisión dados en el siguiente cuadro, además los valores de absorción deben tener un porcentaje de variación menor al 5%.

| <b>CUADRO 16. PRECISIÓN DEL ENSAYO ASTM C128</b>    |                            |  |
|---|----------------------------|--|
| <b>Precisión de un solo operador:</b>               | <b>Desviación estándar</b> | <b>Rango aceptable de dos resultados</b> |
| » Gravedad específica bruta seca GBS                | 0,011                      | 0,032                                    |
| » Gravedad específica saturada superficie seca GBSS | 0,0095                     | 0,027                                    |
| » Gravedad específica aparente Gs                   | 0,0095                     | 0,027                                    |
| » Absorción, %                                      | 0,11                       | 0,31                                     |

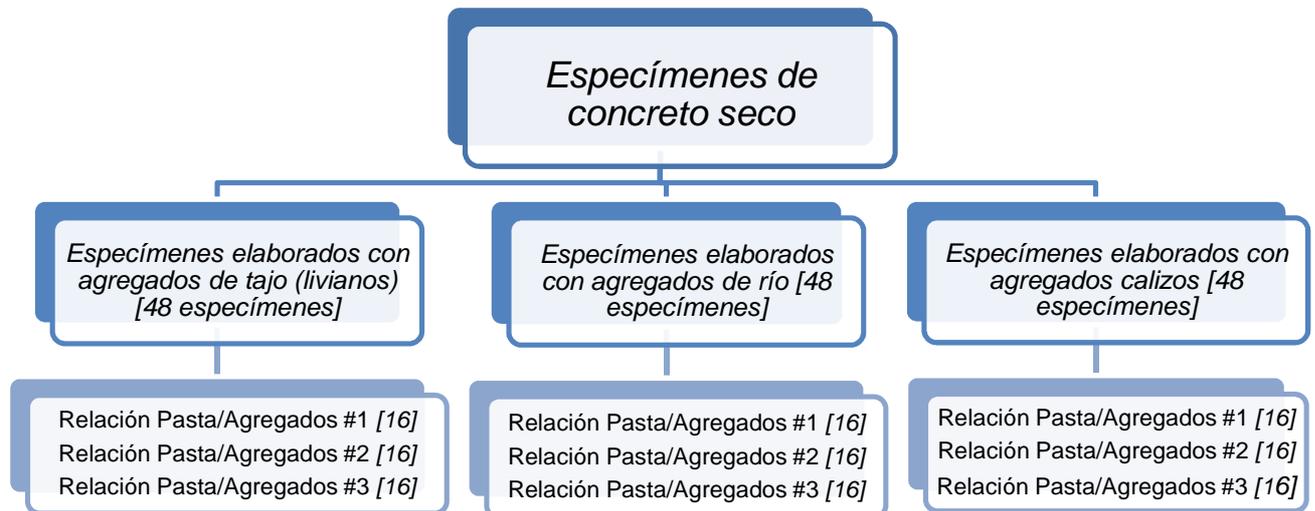
El material calizo #2 es un agregado fino que posee un porcentaje considerable retenido en la malla #8. Por lo tanto, para determinar sus gravedades específicas y absorción se debió separar en dos partes: retenido en la malla #8 (grosso) y pasando la malla #8 (fino). Ambas fracciones fueron ensayadas de acuerdo con el procedimiento que correspondía y posteriormente los valores se ponderaron para obtener las gravedades específicas y absorción de la

totalidad del material. Así, para calcular el valor de absorción se aplica la siguiente expresión:  

$$\%A = (\%A_{\text{FRACCIÓN FINA}} \times \% \text{Pasando la malla \#8}) + (\%A_{\text{FRACCIÓN GRUESA}} \times \% \text{Retenido en la malla \#8})$$

| <b>CUADRO 17. EXPRESIONES PARA EL CÁLCULO DE LAS GRAVEDADES ESPECÍFICAS Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS</b> |  |   |   |
|--|--|---|---|
| <b>Dato</b>  | <b>Significado físico</b>  | <b>Agregado grueso (ASTM C127)</b><br>Quintilla de tajo<br>Quintilla de río<br>Calizo #2 (fracción retenida en el tamiz #8) | <b>Agregado fino (ASTM C128)</b><br>Arena de tajo<br>Arena de río<br>Polvo de piedra<br>Calizo #1<br>Calizo #2 (fracción pasando el tamiz #8)           |
| Gravedad específica aparente ( $G_s$ )   | $G_s = \frac{P_s}{V_s \times \gamma_w}$  | $G_s = \frac{A}{A - C}$   | $G_s = \frac{A}{B + A - C}$   |
| Gravedad específica saturada superficie seca ( $G_{BSS}$ )   | $G_{BSS} = \frac{P_{SS}}{V_B \times \gamma_w}$   | $G_{BSS} = \frac{B}{B - C}$   | $G_{BSS} = \frac{S}{B + S - C}$   |
| Gravedad específica bruta seca ( $G_{BS}$ )  | $G_{BS} = \frac{P_s}{V_B \times \gamma_w}$   | $G_{BS} = \frac{A}{B - C}$  | $G_{BS} = \frac{A}{B + S - C}$  |
| Absorción (%D)   | $\%D = \frac{P_{WD}}{P_s} \times 100\%$  | $\%D = \frac{B - A}{A} \times 100\%$  | $\%D = \frac{S - A}{A} \times 100\%$  |
| Simbología   | <p><math>P_s</math>: peso de los sólidos</p> <p><math>P_{SS}</math>: peso de los sólidos con los poros saturados de agua.</p> <p><math>P_{WD}</math>: peso agua absorbida</p> <p><math>V_s</math>: volumen de los sólidos (incluye los poros impermeables).</p> <p><math>V_B</math>: volumen bruto (volumen de sólidos más poros permeables e impermeables).</p> <p><math>\gamma_w</math>: densidad del agua (<math>997,5 \text{ kg/m}^3</math>)</p> | <p>A: peso seco (g)</p> <p>B: peso saturado superficie seca (g)</p> <p>C: peso sumergido (g)</p>                            | <p>A: peso seco (g)</p> <p>B: peso picnómetro + agua (g)</p> <p>C: peso picnómetro + agua + muestra (g)</p> <p>S: peso saturado superficie seca (g)</p> |

## Tipo, distribución y cantidad de pruebas en especímenes de concreto



**Figura 5.** Esquema metodológico de las 9 combinaciones de agregados-relaciones pasta/agregados necesarias para elaborar los 9 grupos de bloques, en paréntesis cuadrados se indica la cantidad de especímenes.

En el Cuadro 18 se presentan, cómo fueron distribuidos, los 16 especímenes en cada combinación de agregados-relación pasta/agregados para realizar los ensayos requeridos. Las pruebas de absorción, peso unitario y densidad del concreto fueron realizadas sobre los mismos especímenes.

| <b>CUADRO 18. DISTRIBUCIÓN DE PRUEBAS REALIZADAS EN ESPECÍMENES DE CONCRETO SECO PARA CADA RELACIÓN PASTA/AGREGADOS</b> |                            |  |
|---|----------------------------|--|
| <b>Ensayo</b>   | <b>Cantidad de pruebas</b> | <b>Distribución de especímenes</b>   |
| Absorción, densidad del concreto y peso unitario  | 3                          | 3 (cubos de 15cm de lado)  |
| Resistencia a la compresión   | 3                          | 3 (cubos de 15cm de lado)  |
| Adherencia  | 3                          | 9 (cada ensayo se realiza en prismas compuestos de 3 cubos unidos con mortero) |
| Permeabilidad   | 1                          | 1 (cilindro de 15cm de diámetro y 17cm de alto)                                |

## Diseños de mezcla

Las unidades de mampostería de concreto se fabrican con mezclas de concreto seco, es decir, mezclas con contenidos de agua mucho menores que las mezclas convencionales. Lo anterior hace posible que los encofrados de los bloques se puedan retirar inmediatamente después del moldeo, el cual se realiza, por lo general, con la ayuda de máquinas vibro compresoras. Por lo tanto, los procedimientos para el diseño de mezclas de concreto normal no son aplicables.

En esta investigación se tomó como base la guía ACI 211.3R-02 (Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete), la cual en su Apéndice 5 (Concrete masonry unit mixture proportioning) establece sugerencias para el proporcionamiento de este tipo de mezclas. Además, se realizó una visita a una planta de producción de bloques, con el propósito de observar la consistencia de la mezcla, los agregados utilizados y el proceso de fabricación y curado.

El proceso de diseño de las mezclas se puede resumir de la siguiente manera:

- ❖ Selección de la combinación de los agregados, tratando de que la curva granulométrica de los agregados combinados se ajuste a las curvas establecidas en la literatura (especialmente a las establecidas en la guía ACI 211.3R-02 en su Apéndice 5, ver Figuras 2, 3 y 4).
- ❖ Selección de la cantidad de cemento, expresada como porcentaje de cemento por peso seco de los agregados (se tomó como base un 10%). El cemento utilizado en todas las mezclas es de tipo UG-35 (cemento industrial).
- ❖ Elaboración de mezclas de prueba para ajustar la cantidad de agua, tomando como principal criterio el hecho de que, al moldear un cubo de 15cm de lado por medio de un martillo vibratorio (retirando el encofrado inmediatamente después del moldeo), la superficie resultante sea rugosa (similar a un bloque de concreto), puesto que un exceso de agua produciría superficies que han sido selladas por la pasta (agua y cemento) y,

en consecuencia, se perdería la rugosidad característica de los bloques.

- ❖ Una vez seleccionada la cantidad de agua se calcula la relación agua/cemento y la relación pasta/agregados. Con todos los datos anteriores se realiza el proporcionamiento de la mezcla correspondiente a un tipo determinado de agregado (de tajo, de río o calizo) y su primera relación pasta/agregados. Para las tres mezclas elaboradas con los mismos agregados la única variable fue su relación pasta/agregados.

## Definición de las relaciones pasta/agregados

Para calcular las relaciones pasta/agregados primeramente se definen dos términos:

- ❖ Agua de mezcla: contempla el agua por adicionar a la mezcla y el agua libre de los agregados, excluyendo el agua absorbida por los mismos. Esta es la cantidad de agua que se utiliza para el cálculo de la relación agua/cemento.
- ❖ Pasta: constituida por el cemento y el agua de mezcla

$$1. \text{ Relación } \frac{\text{Pasta}}{\text{Agregados}} = \frac{\text{Peso de pasta (kg)}}{\text{Peso de agregados secos (kg)}}$$

$$2. \text{ Relación } \frac{\text{Agua}}{\text{Cemento}} = \frac{\text{Peso del agua de mezcla (kg)}}{\text{Peso del cemento (kg)}}$$

El peso de la pasta se calcula usando la expresión 1 (conociendo el peso de los agregados secos y definiendo la relación pasta/agregados).

Si para las mezclas elaboradas con los mismos agregados se mantiene la relación agua/cemento y las cantidades de agregados secos, y si se define la relación pasta/agregados se puede calcular el peso del cemento con la siguiente expresión:

$$3. \text{ Peso del cemento (kg)} = \frac{\text{Peso de la pasta}}{1 + \text{Relación } \frac{\text{agua}}{\text{cemento}}}$$

Finalmente, la cantidad de agua para una relación pasta/agregados dada se estima usando la relación agua/cemento.

## Elaboración de los especímenes

### Determinación de la humedad de los agregados

Para determinar el contenido de humedad de los agregados se procedió a cubrirlos con una lona, con el propósito de evitar la pérdida de humedad. Se tomaron dos muestras de cada material (de aproximadamente 1000g cada una), se secaron al horno (por al menos 16 horas) y se procedió al cálculo de la humedad (como el promedio de los dos datos obtenidos):

$$\% \text{ humedad} = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \times 100$$

El procedimiento anterior se realizó cada vez que se iba a preparar la mezcla de concreto seco y, así, poder realizar la corrección por humedad de los agregados y determinar con precisión la cantidad de agua de la mezcla.

### Preparación de la mezcla

La dosificación de los componentes se realizó por peso. El procedimiento de mezclado fue el siguiente:

- Adición de aproximadamente la mitad del agua.
- Adición de los agregados (primero la quintilla y después la arena). Mezclado por 2 minutos aproximadamente.
- Adición del cemento.
- Adición del agua restante.
- Mezclado durante 5 minutos.

### Moldeo de los especímenes

Los especímenes cúbicos de 15cm de lado se realizaron con un martillo vibratorio (utilizado para obtener especímenes de concreto compactado con rodillo, según norma ASTM C1435). El procedimiento realizado fue el siguiente:

1. Colocación del concreto en el molde de manera que una vez compactado se haya llenado aproximadamente la mitad de su volumen.
2. Encendido del martillo vibratorio, permitiendo, luego, que el concreto se consolide bajo la placa durante 10 segundos.
3. Escarificación de la primera capa, con el propósito de unir la capa moldeada con la siguiente.
4. Repetición del procedimiento 1 y 2 para la segunda capa. Si después de la compactación el molde no se llena completamente, se escarifica la cara superior, se agrega mezcla y se compacta para llenar el volumen restante del cubo.
5. Retiro de los encofrados al día siguiente e introducción de los especímenes en la cámara húmeda durante 28 días.

Las siguientes fotos ilustran el proceso para la elaboración de los cubos:



Figura 6. Preparación de moldes para la elaboración de los especímenes



Figura 7. Preparación de la mezcla en una mezcladora con capacidad de 50 litros



**Figura 8.** Método para el moldeo de cubos de 15cm de lado utilizando vigas y separadores de madera



**Figura 11.** Moldeo de espécimen para prueba de permeabilidad



**Figura 9.** Moldeo de especímenes utilizando el martillo vibratorio



**Figura 12.** Escarificación (rallado) de la superficie



**Figura 10.** Superficie resultante después de los 10 segundos de vibro compactación del martillo vibratorio



**Figura 13.** Acabado de los especímenes

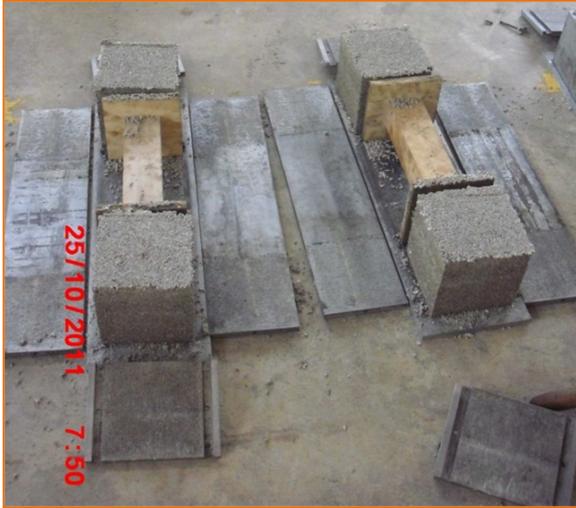


Figura 14. Desmolde (al día siguiente del moldeo)

## Pruebas en especímenes de concreto seco

### Absorción y densidad

Este ensayo se realizó en cubos de concreto (para cada combinación de agregados-relación pasta/agregados se ejecutaron 3 ensayos) tomando en cuenta el siguiente procedimiento (conforme a la norma ASTM C140):

- Saturar: sumergir los bloques por 24 horas.
- Obtener el peso sumergido.
- Remover el bloque del agua y drenarlo por, aproximadamente, 1 minuto. Luego, remover el agua superficial de todas las caras con un paño limpio y obtener el peso saturado superficie seca.
- Secar los especímenes en un horno a 100-115°C por al menos 24 horas y obtener el peso seco.

La absorción se calcula como sigue:

$$A (\%) = \frac{\text{Peso}_{\text{saturado}} - \text{Peso}_{\text{seco}}}{\text{Peso}_{\text{seco}}} \times 100$$

$$A \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Peso}_{\text{saturado}} - \text{Peso}_{\text{seco}}}{\text{Peso}_{\text{saturado}} - \text{Peso}_{\text{sumergido}}} \times 1000$$

La densidad seca al horno del concreto se calcula con la siguiente fórmula:

$$D \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Peso}_{\text{seco}}}{\text{Peso}_{\text{saturado}} - \text{Peso}_{\text{sumergido}}} \times 1000$$

Adicionalmente se calcula el porcentaje de vacíos de los cubos de la siguiente manera:

$$\% \text{ Vacíos} = \left( \frac{\text{Gravedad específica de la mezcla} - \text{Gravedad específica de los cubos}}{\text{Gravedad específica de la mezcla}} \right) \times 100.$$

La gravedad específica de los cubos se obtiene dividiendo la densidad seca al horno del concreto entre la densidad del agua. Mientras que la gravedad específica de la mezcla se obtiene ponderando las gravedades específicas de todos los componentes (agregados, cemento y agua), es decir, suponiendo que no existen vacíos entre los componentes (como una densidad máxima teórica).



Figura 15. Determinación del peso sumergido de los especímenes



Figura 16. Determinación del peso seco de los especímenes

## Peso unitario

Para obtener el peso unitario se utilizaron los mismos especímenes de la prueba de absorción y densidad. Para el cálculo del volumen bruto de los bloques se realizaron dos medidas de su largo, alto y ancho para obtener un promedio en cada una de las dimensiones.

$$PU \left( \frac{kg}{m^3} \right) = \frac{Peso_{seco} (g)}{Volumen_{bruto} (cm^3)} \times 1000$$

## Resistencia a la compresión

Los cubos destinados para determinar la resistencia a la compresión fueron coronados en su cara superior con yeso cemento, para garantizar el contacto total entre el espécimen y la placa de carga. La razón de carga utilizada fue de 0,25 MPa/s

$$RC \left( \frac{kg}{cm^2} \right) = \frac{Carga \text{ máxima } (kg)}{\text{Área bruta } (cm^2)}$$



Figura 17. Coronamiento de los especímenes



Figura 18. Ensayo de resistencia a la compresión

## Adherencia

Esta prueba constituye una variante de la norma ASTM E518, ya que, los prismas utilizados están compuestos por tres cubos de concreto unidos con mortero, al cual se le aplica una carga puntual en el centro del claro (distancia entre apoyos).

Los prismas se construyen verticales pero se fallan de forma horizontal. Las juntas de mortero deben tener un espesor de  $10 \pm 1,5$  mm y el curado se realiza durante 28 días en cámara húmeda.

La norma ASTM E518 indica que el claro debe ser mayor a 2,5 veces la altura del espécimen; dado que la altura de los prismas es de aproximadamente 15 cm, el claro mínimo sería de 37,5 cm y considerando que el largo del espécimen es de aproximadamente 47 cm, la distancia del borde al apoyo debe ser aproximadamente de 5 cm.

La adherencia entre el mortero de pega y la superficie de los cubos se calcula de la siguiente manera:

$$Adherencia, \frac{kg}{cm^2} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_1 + A_2} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{2 \times b \times d}$$

Donde:

$P_{\text{máx}}$ : carga máxima aplicada por la máquina de ensayo (kg).

b: espesor promedio del espécimen (cm).

d: altura promedio del espécimen (cm).

$A_1 = A_2 = b \times d$ : área de contacto entre el cubo y el mortero de pega.

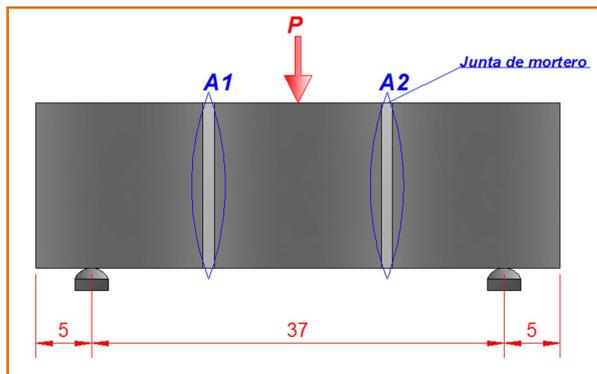


Figura 19. Esquema de la prueba de adherencia. Las cotas están dadas en centímetros.



Figura 20. Construcción de los prismas



Figura 21. Construcción de los prismas formados por cubos elaborados con agregados livianos.



Figura 22. Montaje de la prueba de adherencia



Figura 23. Falla de prismas durante el ensayo de adherencia

## Mortero para pega de bloques

Para la preparación del mortero se empleó arena de río y cemento UG-28. La arena de río fue previamente caracterizada (granulometría, peso unitario, colorimetría, gravedades específicas y absorción). La proporción cemento/arena y la relación agua/cemento del mortero se mantuvieron constantes. Cada vez que se construyeron los prismas se elaboraron cubos de mortero para obtener su resistencia a la compresión.



Figura 24. Ensayo de resistencia a la compresión de cubos de mortero

## Permeabilidad

Para realizar la prueba se elaboraron especímenes cilíndricos en los moldes empleados para determinar el Índice de Soporte de California (CBR) de suelos y, así, poder hacer uso del permeámetro de carga variable.

La prueba consiste en llenar la tubería de entrada hasta una altura conveniente y medir la cabeza hidráulica a través de la muestra para obtener  $h_1$ , iniciar el flujo de agua y empezar a medir el tiempo. Dejar que el agua corra a través de la muestra hasta que el nivel de la tubería de entrada descienda a la altura  $h_2$ . Registrar el tiempo transcurrido para que el nivel de agua pase de  $h_1$  a  $h_2$ , así como la temperatura del agua.

El coeficiente de permeabilidad se calcula con la siguiente fórmula:

$$k_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{\eta_T}{\eta_{20^{\circ}\text{C}}} \times \frac{aL}{At} \times \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Donde:

$k_{20^{\circ}\text{C}}$  = coeficiente de permeabilidad a 20°C.

$\eta_T / \eta_{20^{\circ}\text{C}}$  = corrección por viscosidad del agua dado una temperatura T.

$a$  = área de la sección transversal de la tubería de entrada ( $\text{cm}^2$ ).

$A$  = área seccional de la muestra de concreto ( $\text{cm}^2$ ).

$h_1$  = carga hidráulica a través de la muestra al comienzo del experimento (en  $t = 0$ ).

$h_2$  = carga hidráulica a través de la muestra al final del ensayo (en  $t = t_{\text{ensayo}}$ ).

$L$  = longitud de la muestra (cm).

$t$  = tiempo transcurrido durante el experimento (s).



Figura 25. Permeámetro de carga variable



Figura 26. Montaje de la prueba de permeabilidad

## Muestreo de concreto seco en Pedregal

Para establecer una comparación entre la densidad, absorción y resistencia a la compresión de los cubos elaborados con la metodología del proyecto (con el martillo vibratorio) y los bloques de concreto fabricados industrialmente mediante vibro compactación, se realizó un muestreo de concreto en la planta de producción de bloques de la empresa Pedregal, para moldear 6 cubos usando el martillo vibratorio y obtener 6 bloques de la misma partida de concreto. El detalle de las pruebas se muestra en el Cuadro 19.

| <b>CUADRO 19. TIPO Y CANTIDAD DE PRUEBAS REALIZADAS EN LOS ESPECÍMENES OBTENIDOS EN EL MUESTREO EN LA EMPRESA PEDREGAL</b> |  |   |
|--|--|---|
| <b>Ensayo</b>  | <b>Tipo de espécimen</b>                                   |   |
|  | <b>Cubos (moldeados según la metodología del proyecto)</b> | <b>Bloques huecos (obtenidos de la producción de la empresa Pedregal)</b> |
| Absorción y densidad   | 3  | 3   |
| Resistencia a la compresión  | 3  | 3   |

Los cubos fueron curados según la metodología del proyecto (28 días en cámara húmeda), mientras que los bloques fueron curados según el proceso de producción de Pedregal (28 horas en cámara de vapor).

# Resultados

## Caracterización de los agregados

| CUADRO 20. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS    |   |                              |               |                  |              |               |                   |               |
|--|---|------------------------------|---------------|------------------|--------------|---------------|-------------------|---------------|
| Norma ASTM                                     | Propiedad   | Agregados de tajo (livianos) |               | Agregados de río |              |               | Agregados calizos |               |
|  |   | Arena                        | Quintilla     | Arena            | Polvo piedra | Quintilla     | Arena (Calizo #1) | Calizo #2     |
| C29  | Peso volumétrico suelto, kg/m <sup>3</sup>                    | 1049                         | 1082          | 1323             | 1419         | 1401          | 1601              | 1536          |
|  | Peso volumétrico varillado, kg/m <sup>3</sup>                 |                              | 1158          |                  |              | 1558          |                   |               |
| C127 (agregado grueso)<br>C128 (agregado fino) | Gravedad específica bruta seca G <sub>bs</sub>                | 1,98                         | 1,97          | 2,27             | 2,28         | 2,53          | 2,61              | 2,56          |
|  | % de Absorción  | 14,8%                        | 10,4%         | 7,4%             | 6,3%         | 2,7%          | 1,0%              | 1,8%          |
|  | Gravedad específica aparente G <sub>s</sub>                   | 2,80                         | 2,48          | 2,73             | 2,67         | 2,72          | 2,68              | 2,68          |
|  | Gravedad específica saturada superficie seca G <sub>bss</sub> | 2,28                         | 2,18          | 2,44             | 2,43         | 2,60          | 2,64              | 2,61          |
| C117 y C136                                    | Módulo de finura  | 3,75                         | 5,17          | 3,00             | 3,58         | 5,22          | 3,88              | 3,79          |
|  | % pasando el tamiz #200                                       | 2,1%                         | 2,8%          | 5,4%             | 10,3%        | 4,0%          | 2,1%              | 10,2%         |
|  | Tamaño máximo del agregado                                    |                              | 9,50mm (3/8") |                  |              | 9,50mm (3/8") |                   | 9,50mm (3/8") |
| C40  | Impurezas orgánicas (agregado fino)                           | No contiene                  |               | No contiene      | No contiene  |               | No contiene       | No contiene   |

## Granulometrías de los agregados

Los valores señalados en rojo indican incumplimiento de los límites granulométricos de la norma ASTM C33 para un tamiz determinado.

| <b>CUADRO 21. RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS FINOS</b> |                      |                           |                     |                     |                                 |                  |                                |
|---|----------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|------------------|--------------------------------|
| <b>Tamaño nominal</b>   |                      | <b>% Pasando promedio</b> |                     |                     |                                 |                  | <b>Especificación ASTM C33</b> |
| <b>Malla</b>  | <b>Abertura (mm)</b> | <b>Arena de tajo</b>      | <b>Arena de río</b> | <b>Polvo piedra</b> | <b>Arena caliza (calizo #1)</b> | <b>Calizo #2</b> |                                |
| 3/8"  | 9,50                 | 100                       | 100                 | 100                 | 100                             | 100              | 100                            |
| #4  | 4,75                 | 100                       | 97                  | 86                  | 96                              | 81               | 95-100                         |
| #8  | 2,36                 | 65                        | 79                  | 58                  | 58                              | 54               | 80-100                         |
| #16   | 1,18                 | 33                        | 59                  | 39                  | 31                              | 35               | 50-85                          |
| #30   | 0,60                 | 15                        | 38                  | 27                  | 16                              | 23               | 25-60                          |
| #50   | 0,30                 | 8                         | 19                  | 19                  | 8                               | 16               | 5-30                           |
| #100  | 0,15                 | 4                         | 9                   | 14                  | 4                               | 12               | 0-10                           |
| #200  | 0,075                | 2                         | 5                   | 10                  | 2                               | 10               |                                |

| <b>CUADRO 22. RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS GRUESOS</b> |                      |                           |                         |                  |                                |
|---|----------------------|---------------------------|-------------------------|------------------|--------------------------------|
| <b>Tamaño nominal</b>   |                      | <b>% Pasando promedio</b> |                         |                  | <b>Especificación ASTM C33</b> |
| <b>Malla</b>  | <b>Abertura (mm)</b> | <b>Quintilla de tajo</b>  | <b>Quintilla de río</b> | <b>Calizo #2</b> |                                |
| 3/8"  | 9,50                 | 99                        | 100                     | 100              | 90-100                         |
| #4  | 4,75                 | 46                        | 40                      | 81               | 20-55                          |
| #8  | 2,36                 | 13                        | 14                      | 54               | 5-30                           |
| #16   | 1,18                 | 9                         | 8                       | 35               | 0-10                           |
| #30   | 0,60                 | 6                         | 6                       | 23               |                                |
| #50   | 0,30                 | 5                         | 5                       | 16               | 0-5                            |
| #100  | 0,15                 | 4                         | 5                       | 12               |                                |
| #200  | 0,075                | 3                         | 4                       | 10               |                                |

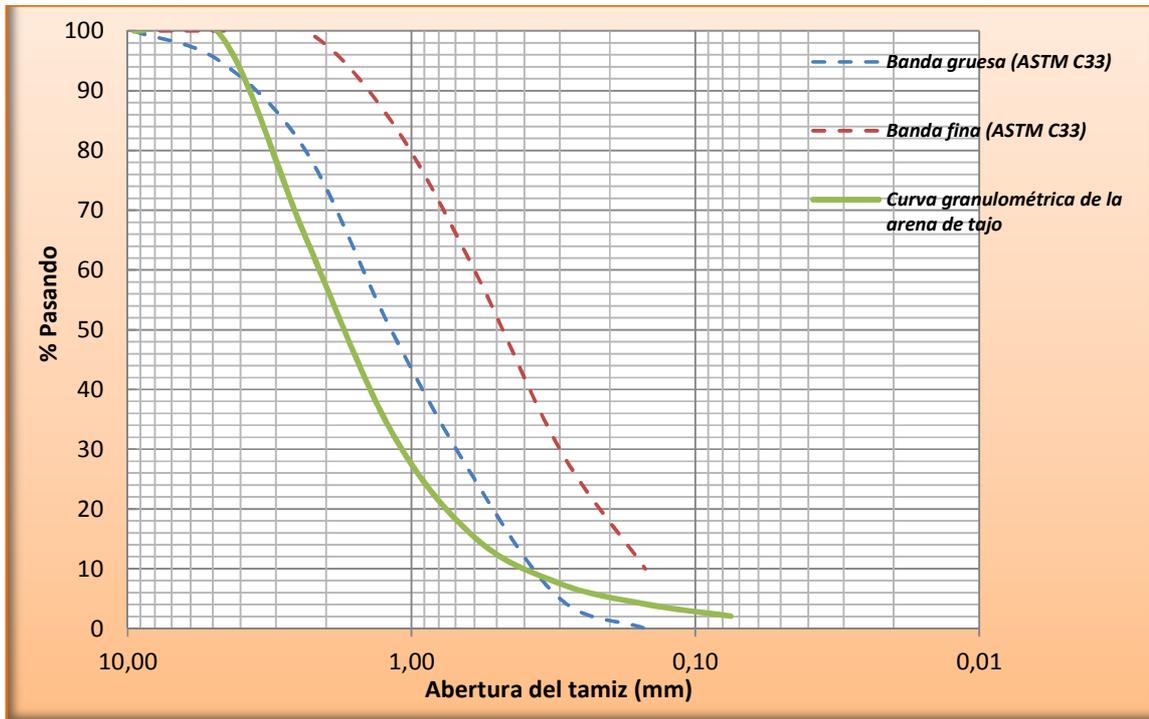


Figura 27. Curva granulométrica de la arena de tajo

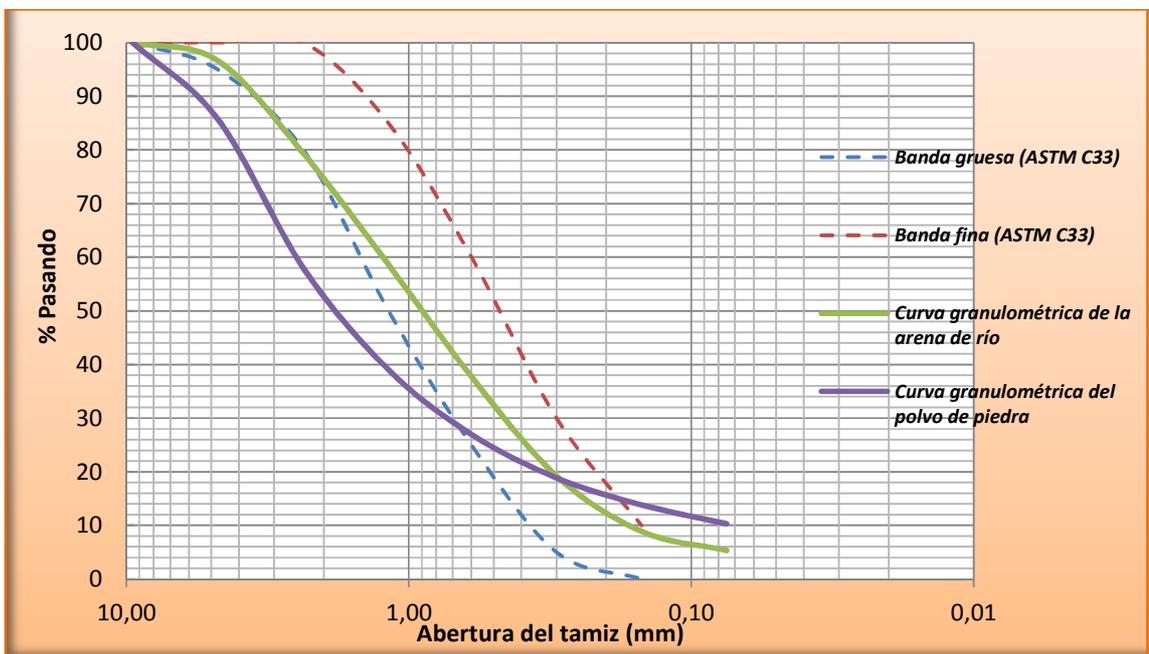


Figura 28. Curva granulométrica de la arena de río y el polvo de piedra



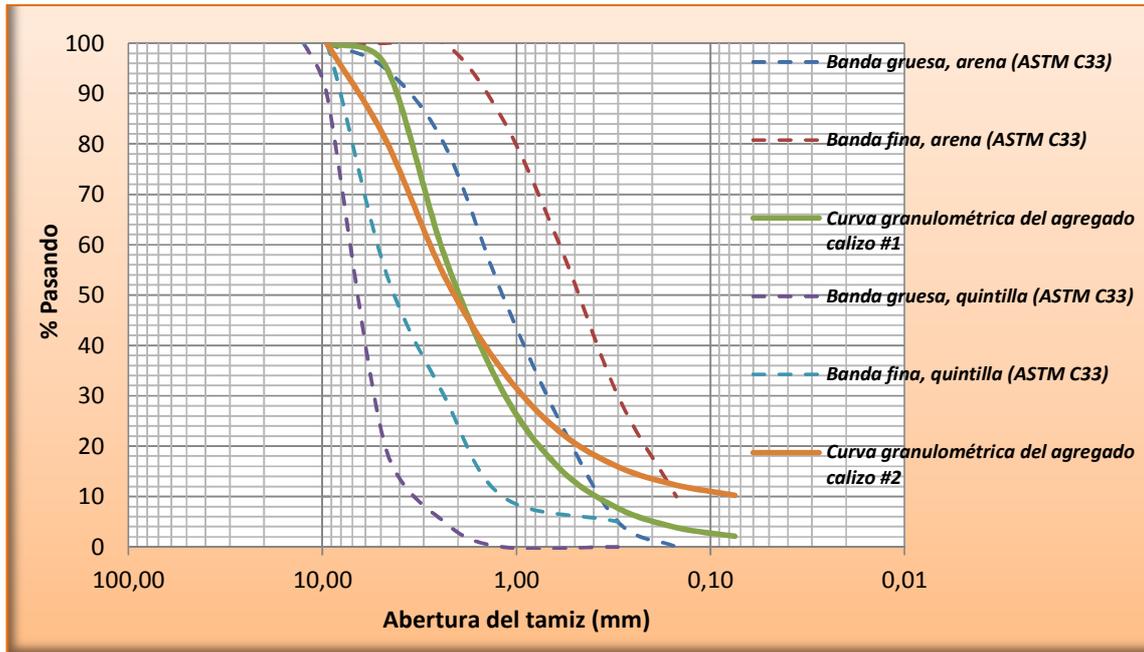


Figura 31. Curva granulométrica del agregado calizo #1 y #2

## Arena para preparación del mortero de pega de bloques

| <b>CUADRO 23. CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA DE RÍO UTILIZADA PARA EL MORTERO DE PEGA DE BLOQUES</b> |  |                        |
|---|--|------------------------|
| <b>Norma ASTM</b>   | <b>Propiedad</b>                                       | <b>Resultados</b>      |
| C29   | Peso volumétrico                                       | 1419 kg/m <sup>3</sup> |
| C128  | Gravedad específica bruta seca $G_{bs}$                | 2,36                   |
|   | % de Absorción   | 5,8%                   |
|   | Gravedad específica aparente $G_s$                     | 2,74                   |
|   | Gravedad específica saturada superficie seca $G_{bss}$ | 2,50                   |
| C117 y C136   | Módulo de finura                                       | 3,08                   |
|   | % pasando el tamiz #200                                | 6,8%                   |
| C40   | Impurezas orgánicas                                    | No contiene            |

| <b>CUADRO 24. RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA ARENA DE RÍO UTILIZADA PARA EL MORTERO DE PEGA DE BLOQUES</b> |                      |                          |                                |
|--|----------------------|--------------------------|--------------------------------|
| <b>Tamaño nominal</b>  |                      | <b>%Pasando promedio</b> | <b>Especificación ASTM C33</b> |
| <b>Malla</b>   | <b>Abertura (mm)</b> |                          |                                |
| 3/8"   | 9,50                 | 100                      | 100                            |
| #4   | 4,75                 | 97                       | 95-100                         |
| #8   | 2,36                 | 78                       | 80-100                         |
| #16  | 1,18                 | 54                       | 50-85                          |
| #30  | 0,60                 | 34                       | 25-60                          |
| #50  | 0,30                 | 19                       | 5-30                           |
| #100   | 0,15                 | 11                       | 0-10                           |
| #200   | 0,075                | 7                        |                                |

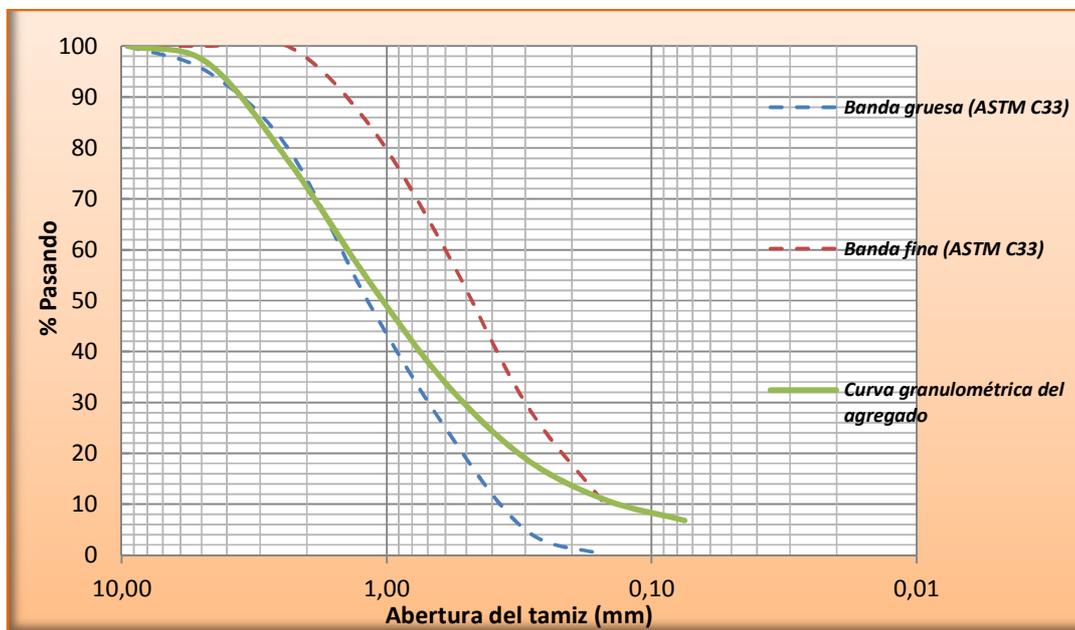


Figura 32. Curva granulométrica de la arena de río para el mortero de pega de bloques

# Relaciones entre propiedades de los agregados

| <b>CUADRO 25. IDENTIFICACIÓN DE AGREGADOS FINOS Y GRUESOS (FIGURAS 33, 34 Y 35)</b> |   |  |                     |
|---|---|--|---------------------|
| <b>Agregados finos</b>  | <b>Peso unitario suelto [varillado], kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Gravedad específica bruta seca G<sub>BS</sub></b> | <b>Absorción, %</b> |
| Arena de tajo   | 1049  | 1,98   | 14,8                |
| Arena de río  | 1323  | 2,27   | 7,4                 |
| Calizo #2 (fracción pasando el tamiz #8)  | 1463  | 2,49   | 2,8                 |
| Calizo #1   | 1601  | 2,61   | 1,0                 |
| <b>Agregados gruesos</b>  |   |  |                     |
| Quintilla de tajo   | 1082 [1158]   | 1,97   | 10,4                |
| Quintilla de río  | 1401 [1558]   | 2,53   | 2,7                 |
| Calizo #2 (fracción retenida en el tamiz #8)  | 1424 [1571]   | 2,66   | 0,6                 |

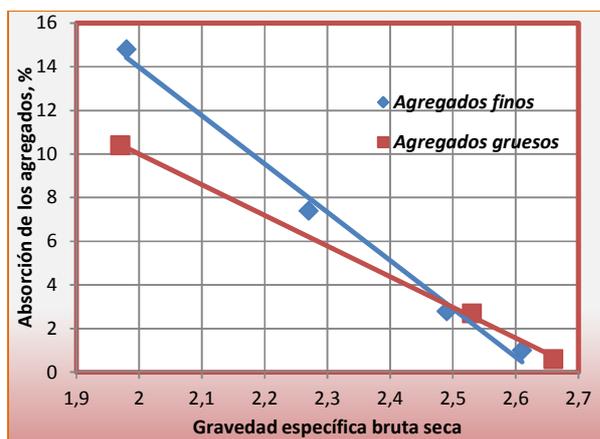


Figura 33. Relación entre la absorción y la gravedad específica bruta seca (G<sub>BS</sub>) de los agregados

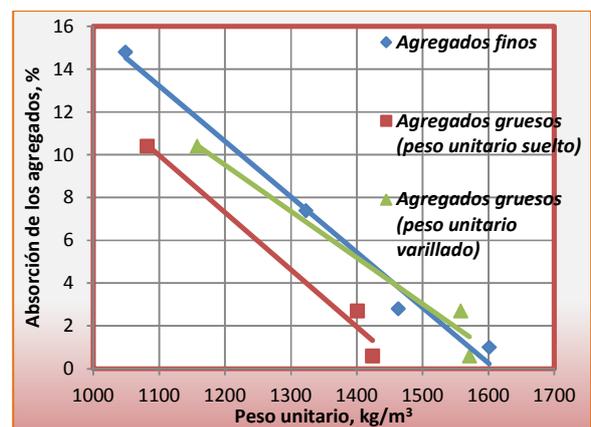


Figura 34. Relación entre la absorción y el peso unitario de los agregados

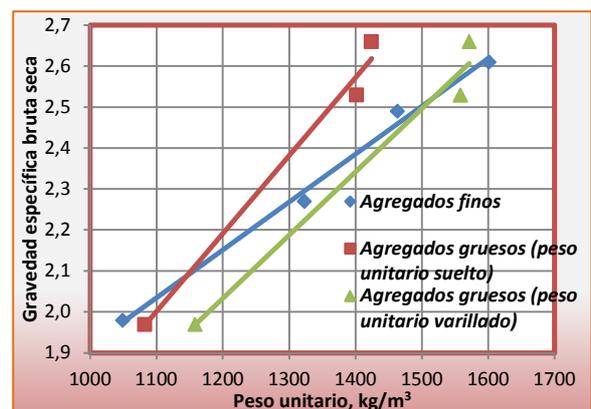


Figura 35. Relación entre la gravedad específica bruta seca (G<sub>BS</sub>) y el peso unitario de los agregados.

## Combinaciones de agregados

| <b>CUADRO 26. GRANULOMETRÍAS COMBINADAS DE LOS AGREGADOS</b> |                      |  |                          |                          |
|--|----------------------|--|--------------------------|--------------------------|
| <b>Malla</b>   | <b>Abertura (mm)</b> | <b>% Pasando de agregados combinados</b> |                          |                          |
|  |                      | <b>Agregados de río</b>                  | <b>Agregados calizos</b> | <b>Agregados de tajo</b> |
| 3/8"   | 9,50                 | 100                                      | 100                      | 100                      |
| #4   | 4,75                 | 77                                       | 87                       | 78                       |
| #8   | 2,36                 | 55                                       | 56                       | 44                       |
| #16  | 1,18                 | 40                                       | 33                       | 23                       |
| #30  | 0,60                 | 26                                       | 20                       | 12                       |
| #50  | 0,30                 | 15                                       | 13                       | 7                        |
| #100   | 0,15                 | 8  | 9                        | 4                        |
| #200   | 0,075                | 5  | 7                        | 2                        |
| <i>Módulo de finura</i>                                      |                      | 3,79                                     | 3,83                     | 4,32                     |

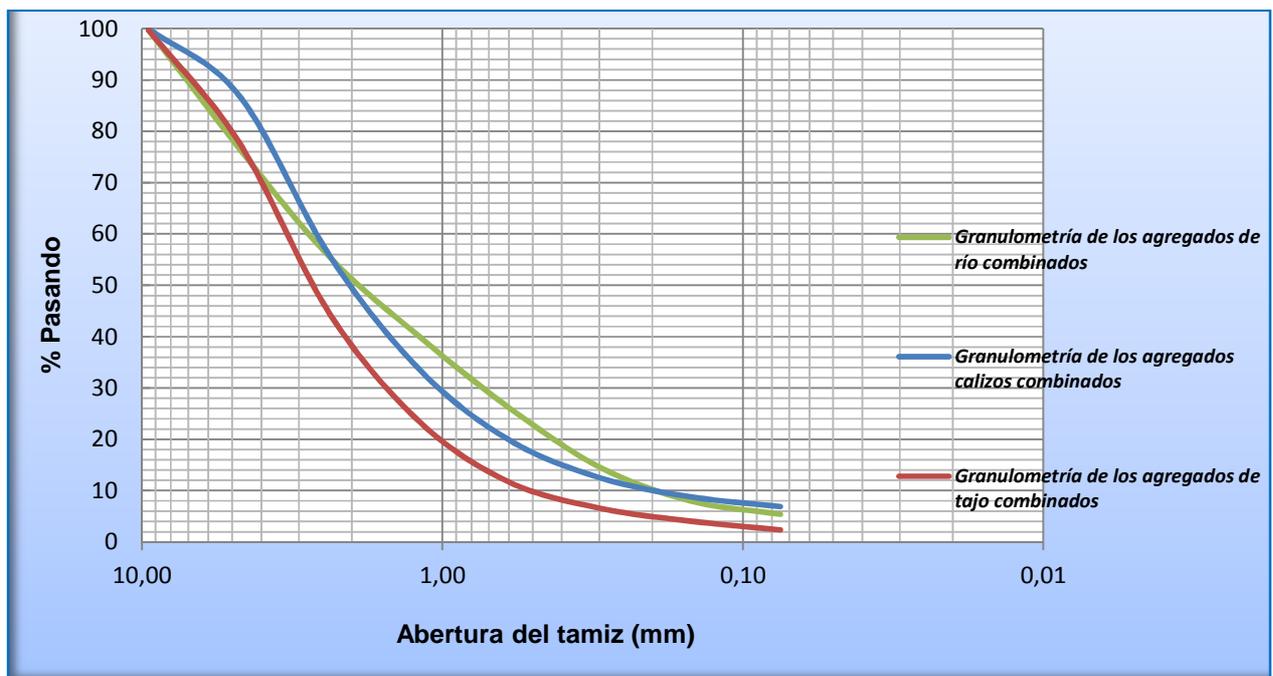


Figura 36. Curvas granulométricas de los agregados combinados

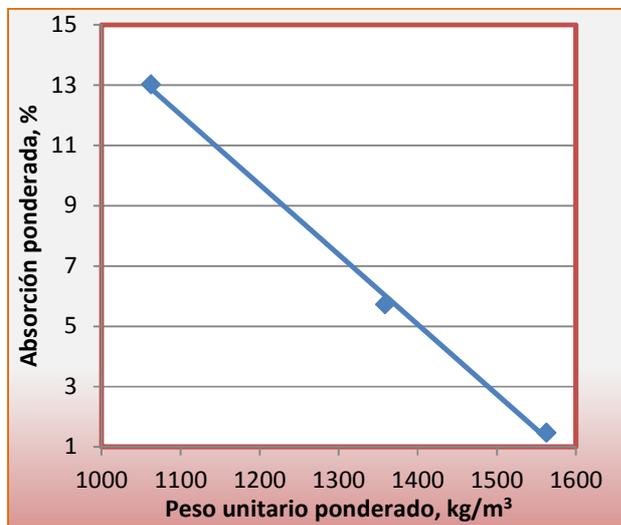
En el Cuadro 27 se presenta el peso unitario, absorción y gravedad específica bruta seca, de la combinación de agregados empleados en la elaboración de las mezclas de concreto. Por ejemplo, el peso unitario ponderado de los agregados de río se calcula de la siguiente forma:

**Peso unitario ponderado (agregados de río),  $kg/m^3$**  = (Peso unitario de la arena x % de arena en la mezcla de agregados) + (Peso unitario del polvo piedra x % de polvo piedra en la mezcla de agregados) + (Peso unitario de la quintilla x % de quintilla en la mezcla de agregados)

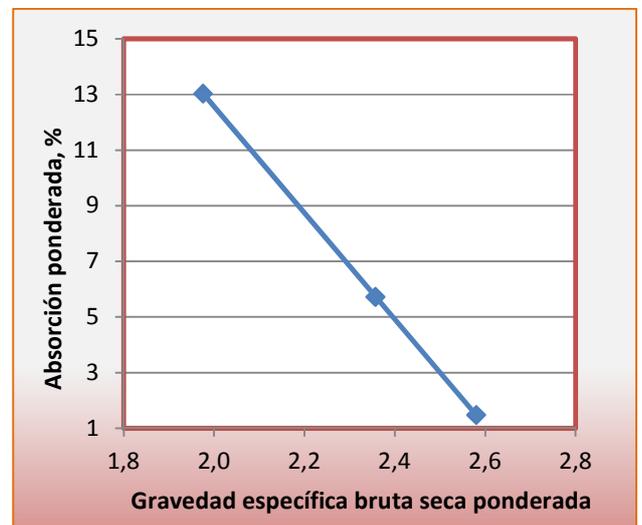
$$\text{Peso unitario ponderado (agregados de río), } kg/m^3 = 1323 \times 57\% + 1419 \times 10\% + 1401 \times 33\% = 1359$$

De manera análoga, se calcula la absorción y gravedad específica bruta seca. Los pesos unitarios así calculados son, en realidad, aproximaciones de los valores verdaderos de la combinación de agregados. Lo anterior porque no se considera la relación de vacíos resultante de la combinación de los materiales.

| <b>CUADRO 27. VALORES PONDERADOS DE LAS COMBINACIONES DE AGREGADOS</b> |                 |                                     |   |                     |   |                         |
|--|-----------------|-------------------------------------|---|---------------------|---|-------------------------|
| <b>Tipo de agregado</b>  |                 | <b>Distribución en la mezcla, %</b> | <b>Peso unitario, <math>kg/m^3</math></b> | <b>Absorción, %</b> | <b>Gravedad específica bruta seca GBS</b> | <b>Módulo de finura</b> |
| Agregados de río   | Arena           | 57%                                 | 1359                                      | 5,7                 | 2,36                                      | 3,80                    |
|  | Polvo de piedra | 10%                                 |   |                     |   |                         |
|  | Quintilla       | 33%                                 |   |                     |   |                         |
| Agregados calizos  | Calizo #1       | 41%                                 | 1563                                      | 1,5                 | 2,58                                      | 3,83                    |
|  | Calizo #2       | 59%                                 |   |                     |   |                         |
| Agregados de Tajo Chopo  | Arena           | 60%                                 | 1062                                      | 13,0                | 1,98                                      | 4,32                    |
|  | Quintilla       | 40%                                 |   |                     |   |                         |



**Figura 37.** Relación entre la absorción y el peso unitario ponderados de las combinaciones de agregados



**Figura 38.** Relación entre la absorción y la gravedad específica bruta seca ( $G_{BS}$ ) ponderados de las combinaciones de agregados

## Caracterización de las mezclas de concreto seco

| <b>CUADRO 28. CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS PARA LA FABRICACIÓN DE LOS ESPECÍMENES DE CONCRETO SECO</b> |                                 |  |                              |   |
|--|---------------------------------|--|------------------------------|---|
| <i>Tipo de agregado</i>  | <i>Relación pasta/agregados</i> | <i>% de cemento por peso seco de los agregados</i> | <i>Relación agua/cemento</i> | <i>Gravedad específica ponderada de la mezcla</i> |
| De tajo (liviano)  | 0,14                            | 10,00  | 0,39                         | 1,92  |
|  | 0,17                            | 12,14  | 0,39                         | 1,93  |
|  | 0,20                            | 14,29  | 0,39                         | 1,94  |
| De río   | 0,14                            | 10,00  | 0,38                         | 2,30  |
|  | 0,17                            | 12,10  | 0,38                         | 2,30  |
|  | 0,20                            | 14,24  | 0,38                         | 2,30  |
| Calizo   | 0,14                            | 10,00  | 0,39                         | 2,54  |
|  | 0,17                            | 12,38  | 0,38                         | 2,53  |
|  | 0,20                            | 14,56  | 0,38                         | 2,53  |

| <b>CUADRO 29. PROPORCIONES EMPLEADAS EN LA ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO SECO CON AGREGADOS DE TAJO (LIVIANOS), %</b> |                                 |                    |                 |                    |                 |                    |
|--|---------------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| <i>Material</i>  | <i>Relación Pasta/Agregados</i> |                    |                 |                    |                 |                    |
|  | <i>0,14</i>                     |                    | <i>0,17</i>     |                    | <i>0,20</i>     |                    |
|  | <i>Por peso</i>                 | <i>Por volumen</i> | <i>Por peso</i> | <i>Por volumen</i> | <i>Por peso</i> | <i>Por volumen</i> |
| Arena  | 52,4                            | 52,0               | 51,0            | 50,6               | 49,8            | 49,3               |
| Quintilla  | 35,4                            | 35,4               | 34,5            | 34,4               | 33,7            | 33,5               |
| Cemento  | 8,8                             | 6,0                | 10,4            | 7,0                | 11,9            | 8,1                |
| Agua de mezcla   | 3,4                             | 6,6                | 4,0             | 7,9                | 4,6             | 9,1                |

| <b>CUADRO 30. PROPORCIONES EMPLEADAS EN LA ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO SECO CON AGREGADOS DE RÍO, %</b> |                                 |                    |                 |                    |                 |                    |
|--|---------------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| <i>Material</i>  | <i>Relación Pasta/Agregados</i> |                    |                 |                    |                 |                    |
|  | <i>0,14</i>                     |                    | <i>0,17</i>     |                    | <i>0,20</i>     |                    |
|  | <i>Por peso</i>                 | <i>Por volumen</i> | <i>Por peso</i> | <i>Por volumen</i> | <i>Por peso</i> | <i>Por volumen</i> |
| Arena (seca)   | 49,7                            | 50,1               | 48,5            | 48,6               | 47,3            | 47,1               |
| Polvo piedra (seco)  | 8,9                             | 8,9                | 8,7             | 8,6                | 8,4             | 8,4                |
| Quintilla (seca)   | 29,3                            | 26,5               | 28,5            | 25,7               | 27,8            | 24,9               |
| Cemento  | 8,8                             | 6,9                | 10,4            | 8,1                | 11,9            | 9,3                |
| Agua de mezcla   | 3,3                             | 7,6                | 4,0             | 9,0                | 4,6             | 10,4               |

**CUADRO 31. PROPORCIONES EMPLEADAS EN LA ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO SECO CON AGREGADOS CALIZOS, %**

| Material       | Relación Pasta/Agregados |             |          |             |          |             |
|----------------|--------------------------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|
|                | 0,14                     |             | 0,17     |             | 0,20     |             |
|                | Por peso                 | Por volumen | Por peso | Por volumen | Por peso | Por volumen |
| Calizo #1      | 36,0                     | 34,1        | 35,0     | 32,9        | 34,1     | 31,8        |
| Calizo #2      | 51,8                     | 50,0        | 50,4     | 48,3        | 49,1     | 46,7        |
| Cemento        | 8,8                      | 7,5         | 10,6     | 8,9         | 12,1     | 10,2        |
| Agua de mezcla | 3,4                      | 8,4         | 4,0      | 9,9         | 4,6      | 11,3        |

## Resultados de ensayos en especímenes de concreto seco

**CUADRO 32. VALORES DE ABSORCIÓN Y DENSIDAD DE CUBOS DE CONCRETO SECO, SEGÚN EL TIPO DE AGREGADO CON LOS CUALES FUERON ELABORADOS Y SU RELACIÓN PASTA/AGREGADOS, %**

| Tipo de agregado  | Relación Pasta/Agregados | Absorción, % | Absorción, kg/m <sup>3</sup> | Densidad seca al horno, kg/m <sup>3</sup> |
|-------------------|--------------------------|--------------|------------------------------|---|
| De tajo (liviano) | 0,14                     | 17,8%        | 311                          | 1744                                      |
|                   | 0,17                     | 17,2%        | 300                          | 1743                                      |
|                   | 0,20                     | 16,2%        | 283                          | 1751                                      |
| De río            | 0,14                     | 12,6%        | 242                          | 1918                                      |
|                   | 0,17                     | 10,8%        | 216                          | 1990                                      |
|                   | 0,20                     | 9,4%         | 192                          | 2055                                      |
| Calizo            | 0,14                     | 7,4%         | 159                          | 2138                                      |
|                   | 0,17                     | 5,7%         | 126                          | 2224                                      |
|                   | 0,20                     | 4,8%         | 110                          | 2277                                      |

**CUADRO 33. PESO UNITARIO Y % DE VACÍOS DE CUBOS DE CONCRETO SECO, SEGÚN EL TIPO DE AGREGADO CON LOS CUALES FUERON ELABORADOS Y SU RELACIÓN PASTA/AGREGADOS, %**

| Tipo de agregado  | Relación Pasta/Agregados | Peso unitario, kg/m <sup>3</sup> | % de vacíos |
|-------------------|--------------------------|----------------------------------|-------------|
| De tajo (liviano) | 0,14                     | 1491                             | 9%          |
|                   | 0,17                     | 1491                             | 10%         |
|                   | 0,20                     | 1537                             | 10%         |
| De río            | 0,14                     | 1885                             | 17%         |
|                   | 0,17                     | 1936                             | 13%         |
|                   | 0,20                     | 2002                             | 11%         |
| Calizo            | 0,14                     | 2064                             | 16%         |
|                   | 0,17                     | 2132                             | 12%         |
|                   | 0,20                     | 2199                             | 10%         |

**CUADRO 34. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE CONCRETO SECO, SEGÚN EL TIPO DE AGREGADO CON LOS CUALES FUERON ELABORADOS Y SU RELACIÓN PASTA/AGREGADOS, kg/cm<sup>2</sup>**

| Tipo de agregado  | Relación Pasta/Agregados |      |      |
|-------------------|--------------------------|------|------|
|                   | 0,14                     | 0,17 | 0,20 |
| De tajo (liviano) | 38                       | 57   | 85   |
| De río            | 88                       | 130  | 188  |
| Calizo            | 164                      | 228  | 324  |

**CUADRO 35. COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO SECO, SEGÚN EL TIPO DE AGREGADO CON LOS CUALES FUERON ELABORADOS Y SU RELACIÓN PASTA/AGREGADOS**

| Tipo de agregado  | Relación Pasta/Agregados | Coefficiente de permeabilidad | Peso unitario, kg/m <sup>3</sup> | % de compactación |
|-------------------|--------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| De tajo (liviano) | 0,14                     | 1,1E-02                       | 1492                             | 100               |
|                   | 0,17                     | 9,7E-03                       | 1518                             | 102               |
|                   | 0,20                     | 9,5E-03                       | 1543                             | 100               |
| De río            | 0,14                     | 1,2E-03                       | 1840                             | 98                |
|                   | 0,17                     | 5,3E-04                       | 1904                             | 98                |
|                   | 0,20                     | 2,6E-05                       | 1958                             | 98                |
| Calizo            | 0,14                     | 2,9E-04                       | 2016                             | 98                |
|                   | 0,17                     | 1,9E-04                       | 2139                             | 100               |
|                   | 0,20                     | 3,3E-08                       | 2176                             | 99                |

**CUADRO 36. VALORES DE ADHERENCIA ENTRE LA SUPERFICIE DE LOS CUBOS Y EL MORTERO DE PEGA, SEGÚN EL TIPO DE AGREGADO CON EL CUAL FUERON FABRICADOS LOS CUBOS Y SU RELACIÓN PASTA/AGREGADOS, kg/cm<sup>2</sup>**

| Tipo de agregado  | Relación Pasta/Agregados |       |      |
|-------------------|--------------------------|-------|------|
|                   | 0,14                     | 0,17  | 0,20 |
| De tajo (liviano) | 1,29*                    | 2,16* | 2,43 |
| De río            | 1,00                     | 1,36  | 2,41 |
| Calizo            | 1,59                     | 2,53  | 2,96 |

\*La falla de prisma se presentó en el centro, es decir, en el bloque central y no en alguna de las dos juntas.

**CUADRO 37. CARACTERIZACIÓN DEL MORTERO PARA PEGA DE BLOQUES**

|   |      |
|---|------|
| Relación Cemento : Arena  | 1:3  |
| Relación Agua/Cemento   | 0,50 |
| Resistencia a la compresión promedio de cubos, kg/cm <sup>2</sup> | 300  |

## Resultados del muestreo de concreto seco en Pedregal

| <b>CUADRO 38. COMPARACIÓN DE LOS VALORES OBTENIDOS EN ESPECÍMENES CÚBICOS Y BLOQUES HUECOS DE CONCRETO</b> |              |                          |
|--|--------------|--------------------------|
| <b>Propiedad</b>   | <b>Cubos</b> | <b>Bloques</b>           |
| Absorción, % ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  | 8,6 (177)    | 10,5 (203)               |
| Densidad seca al horno del concreto, $\text{kg}/\text{m}^3$  | 2050         | 1935                     |
| Resistencia a la compresión, $\text{kg}/\text{cm}^2$   | 226          | 143 (sobre el área neta) |

## Relaciones entre las propiedades de los cubos y las relaciones Pasta/Agregados

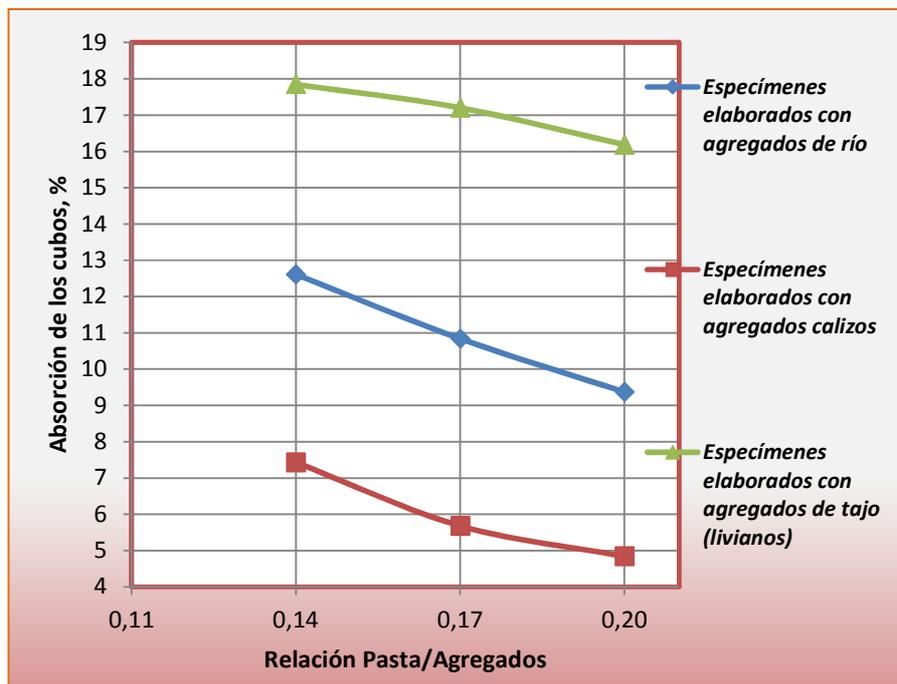


Figura 39. Efecto de la relación Pasta/Agregados sobre el valor de absorción de los cubos

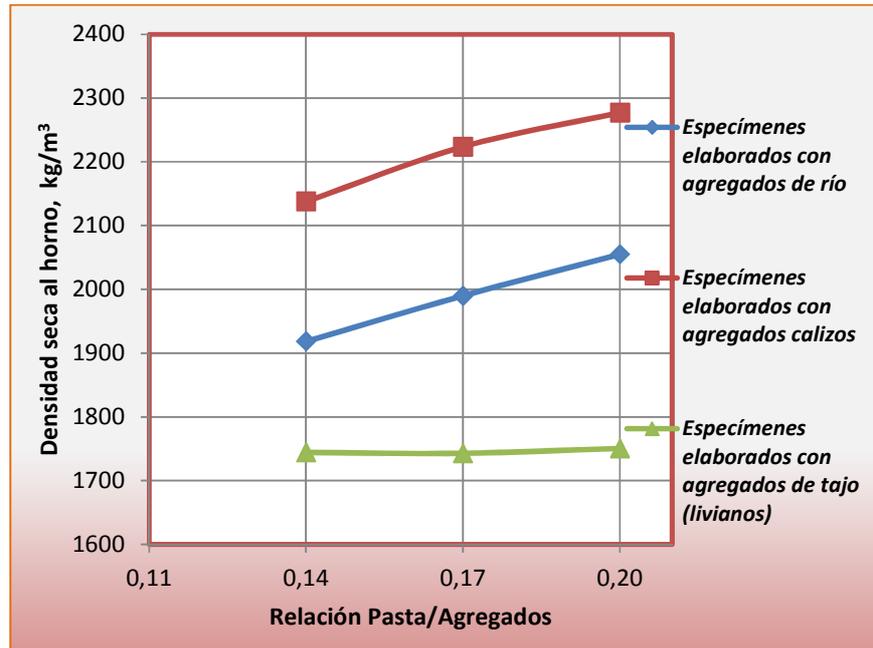


Figura 40. Efecto de la relación Pasta/Agregados sobre la densidad seca al horno del concreto

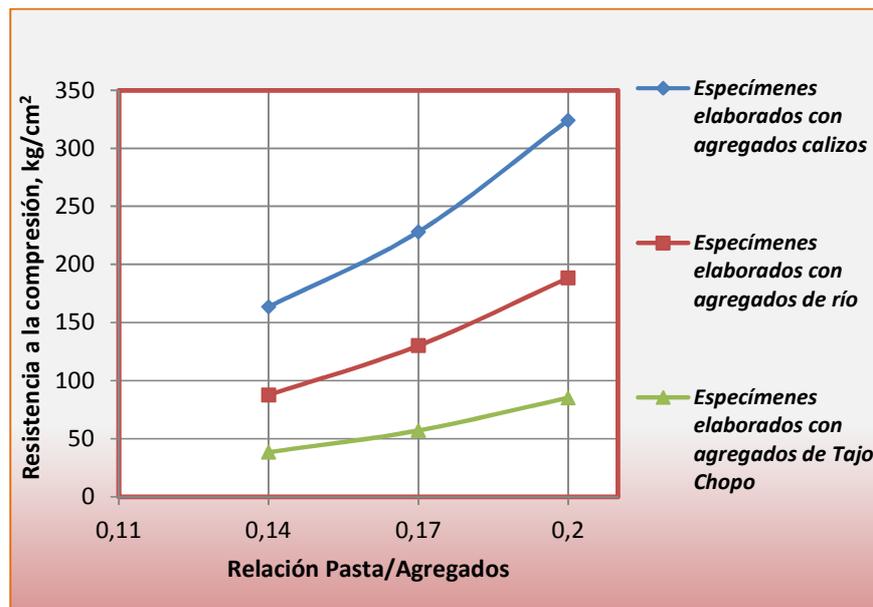


Figura 41. Efecto de la relación Pasta/Agregados sobre la resistencia a la compresión de los cubos

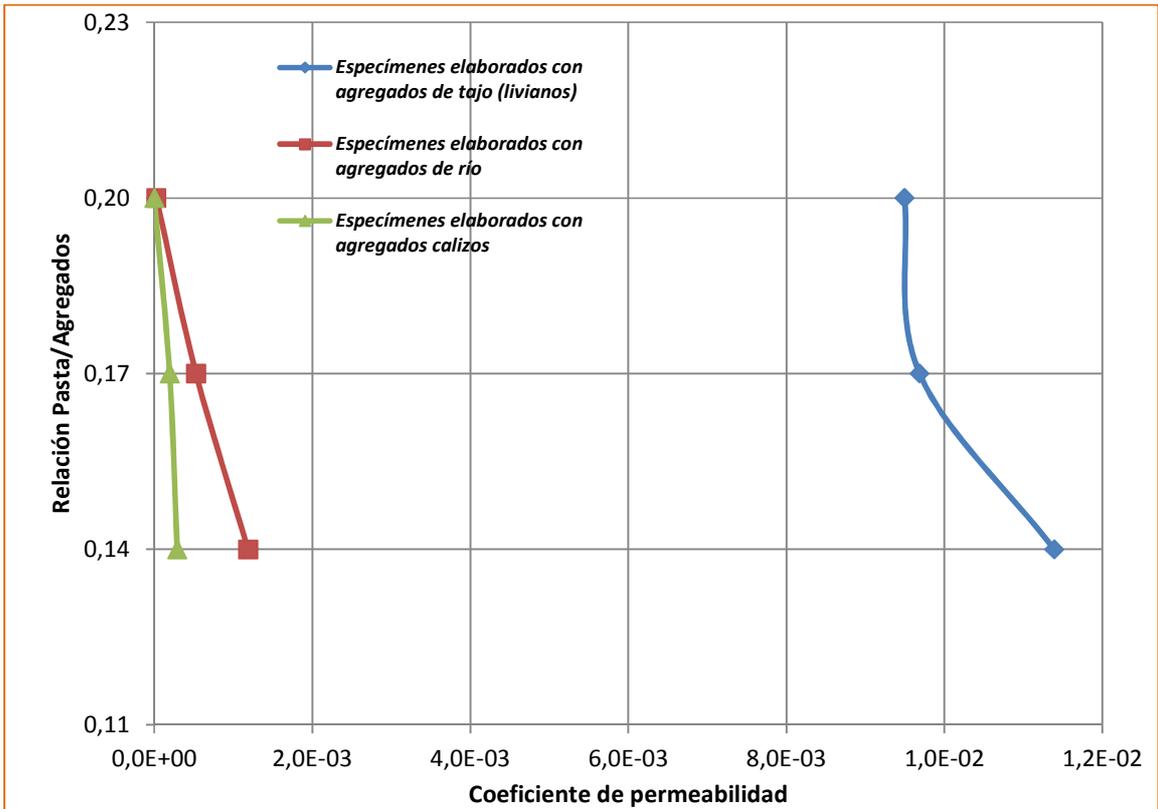


Figura 42. Efecto de la relación Pasta/Agregados sobre la permeabilidad del concreto

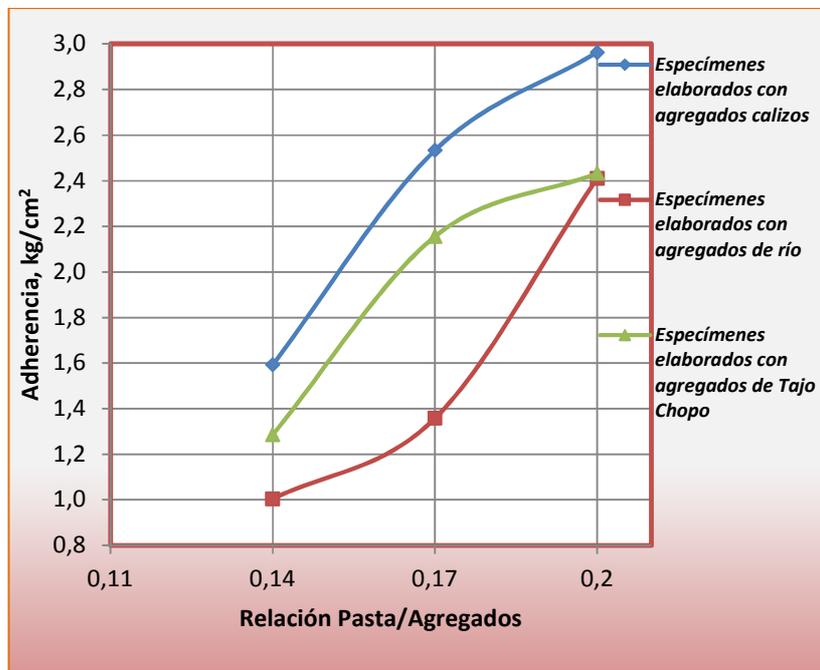


Figura 43. Efecto de la relación Pasta/Agregados de los cubos sobre la adherencia

# Relaciones entre las propiedades de los cubos y las combinaciones de agregados

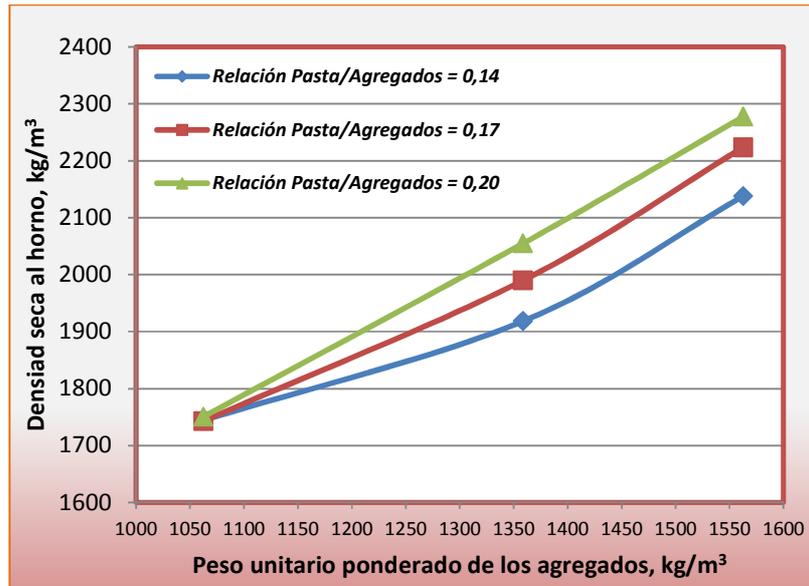


Figura 44. Relación entre la densidad seca al horno del concreto y el peso unitario de las combinaciones de agregados

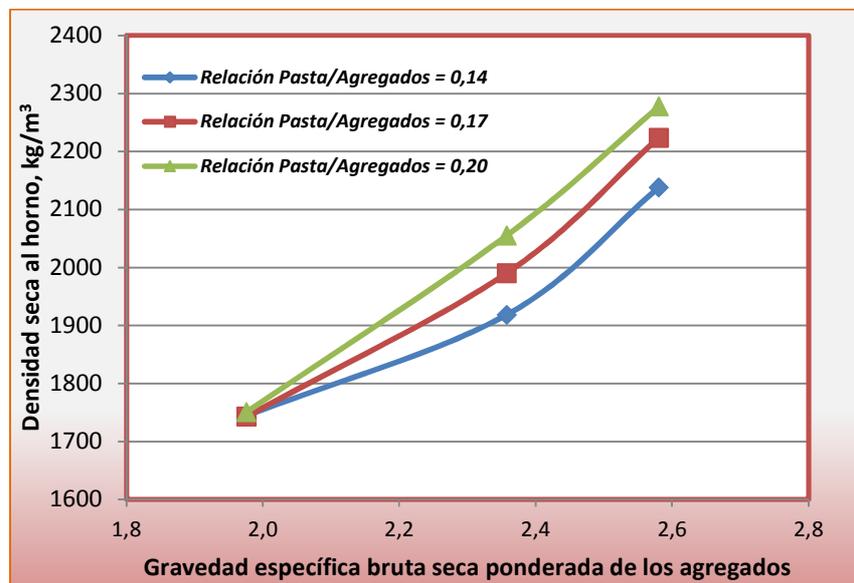


Figura 45. Relación entre la densidad seca al horno del concreto y la gravedad específica bruta seca ( $G_{BS}$ ) ponderada de las combinaciones de agregados

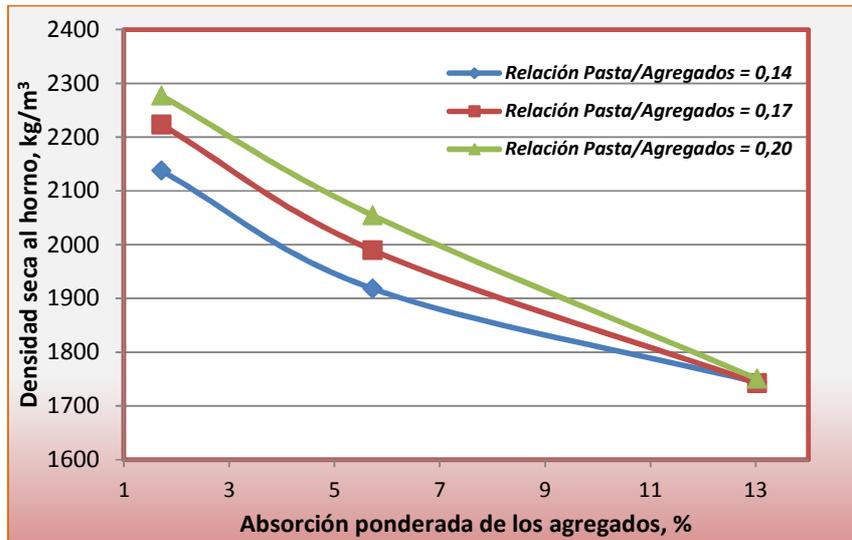


Figura 46. Relación entre la densidad seca al horno del concreto y la absorción ponderada de las combinaciones de agregados

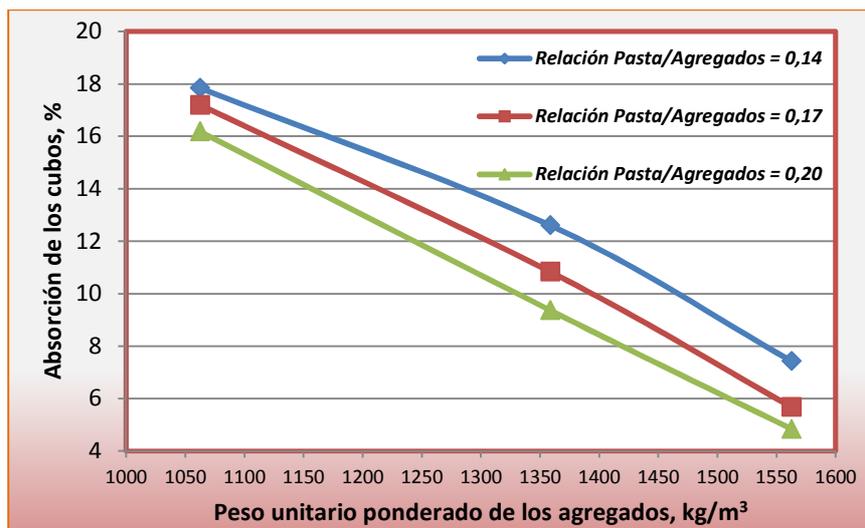


Figura 47. Relación entre la absorción de los cubos y el peso unitario ponderado de las combinaciones de agregados

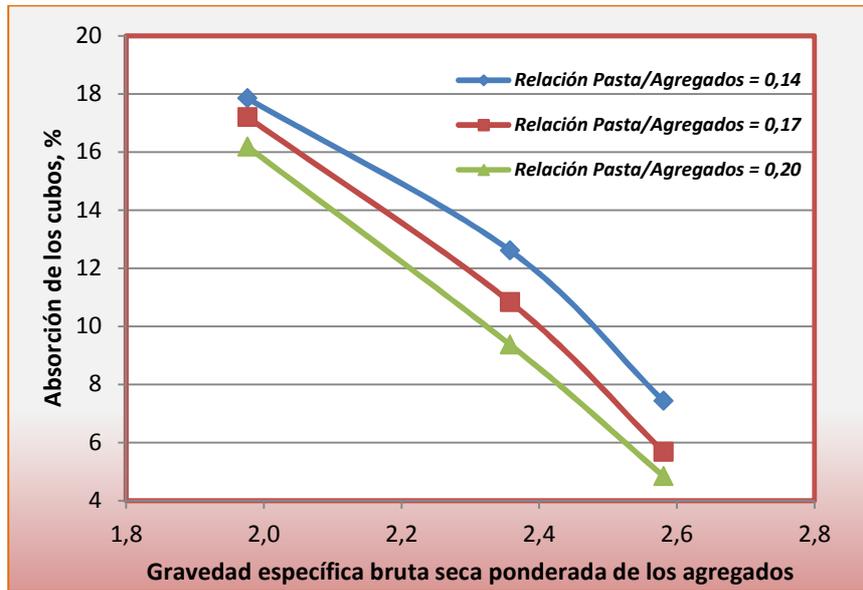


Figura 48. Relación entre la absorción de los cubos y la gravedad específica bruta seca ( $G_{BS}$ ) ponderada de las combinaciones de agregados

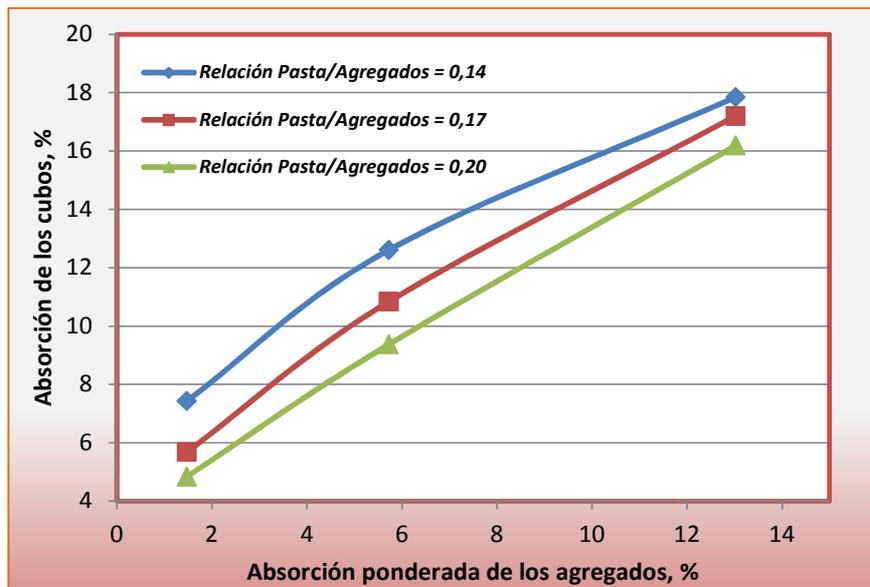


Figura 49. Relación entre la absorción de los cubos y la absorción ponderada de las combinaciones de agregados

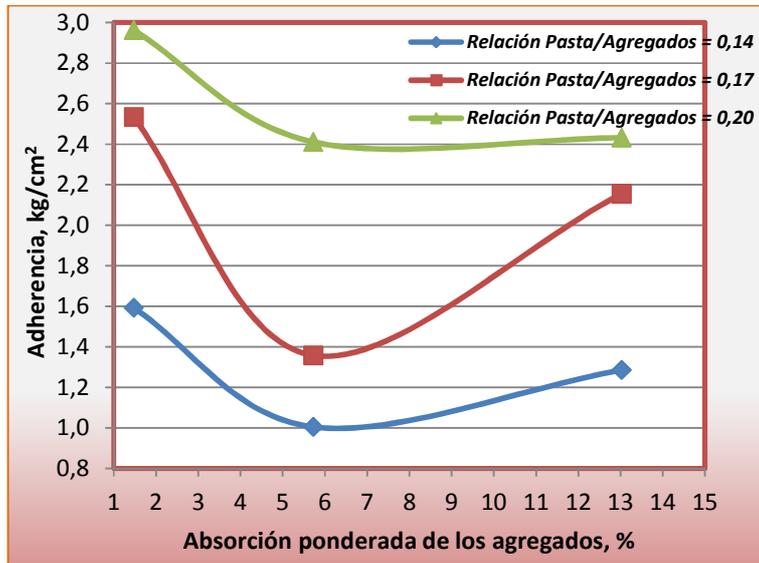


Figura 50. Relación entre la adherencia y la absorción ponderada de las combinaciones de agregados

## Relaciones entre propiedades de los cubos

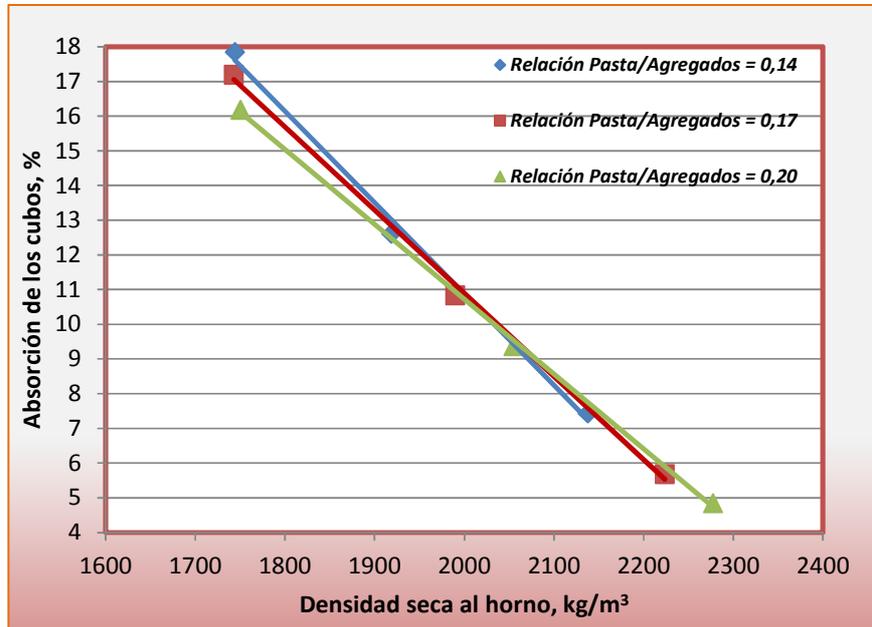


Figura 51. Relación entre la absorción de los cubos y la densidad seca al horno del concreto

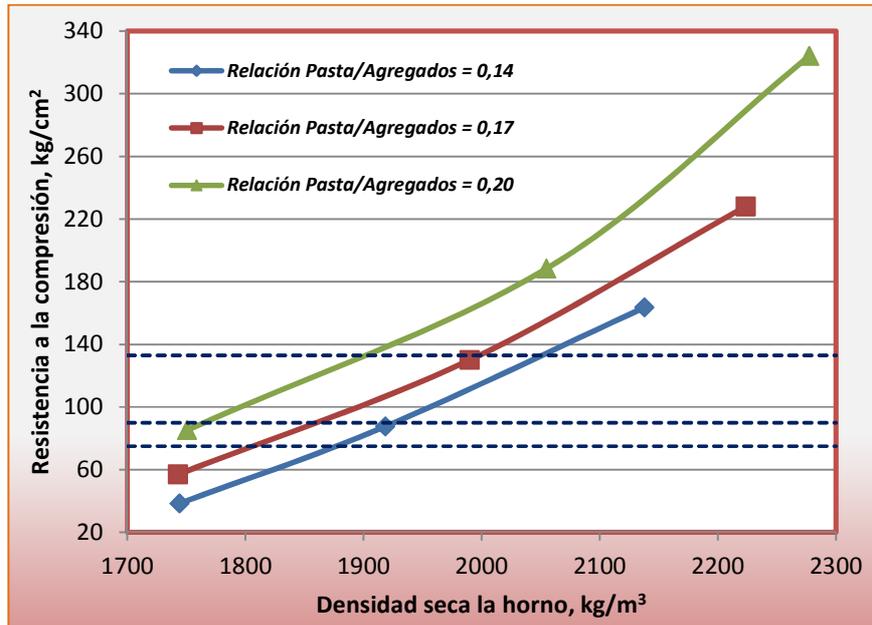


Figura 52. Relación entre la resistencia a la compresión de los cubos y la densidad seca al horno del concreto

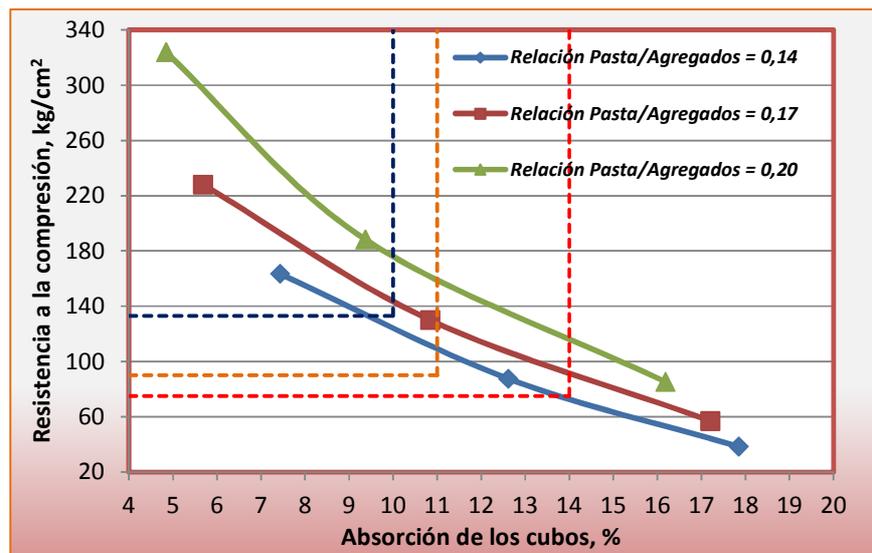


Figura 53. Relación entre la resistencia a la compresión y la absorción de los cubos

Las líneas punteadas en las dos figuras anteriores corresponden a los límites de absorción y resistencia a la compresión que establece la norma nacional de bloques de concreto: las líneas azules corresponden a mampostería clase A, las naranjas a clase B y las rojas a clase C.

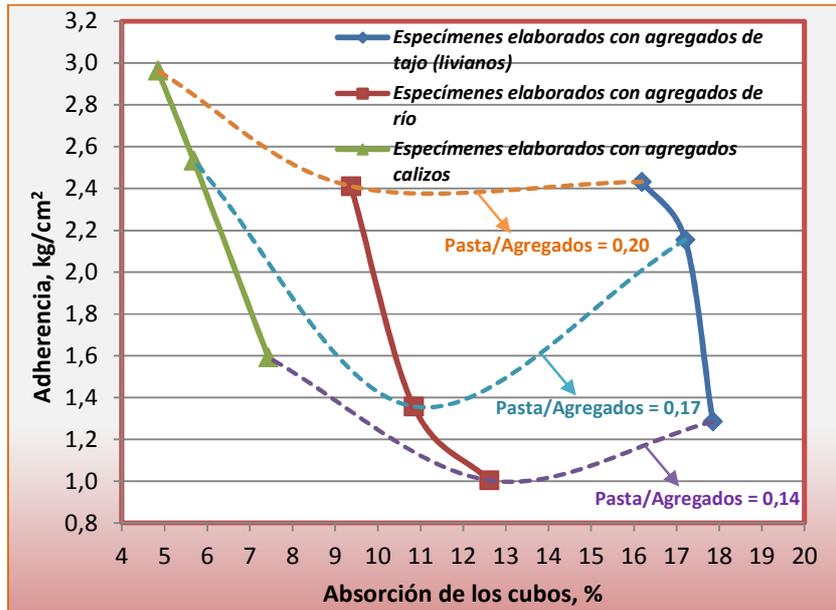


Figura 54. Relación entre la adherencia y la absorción de los cubos

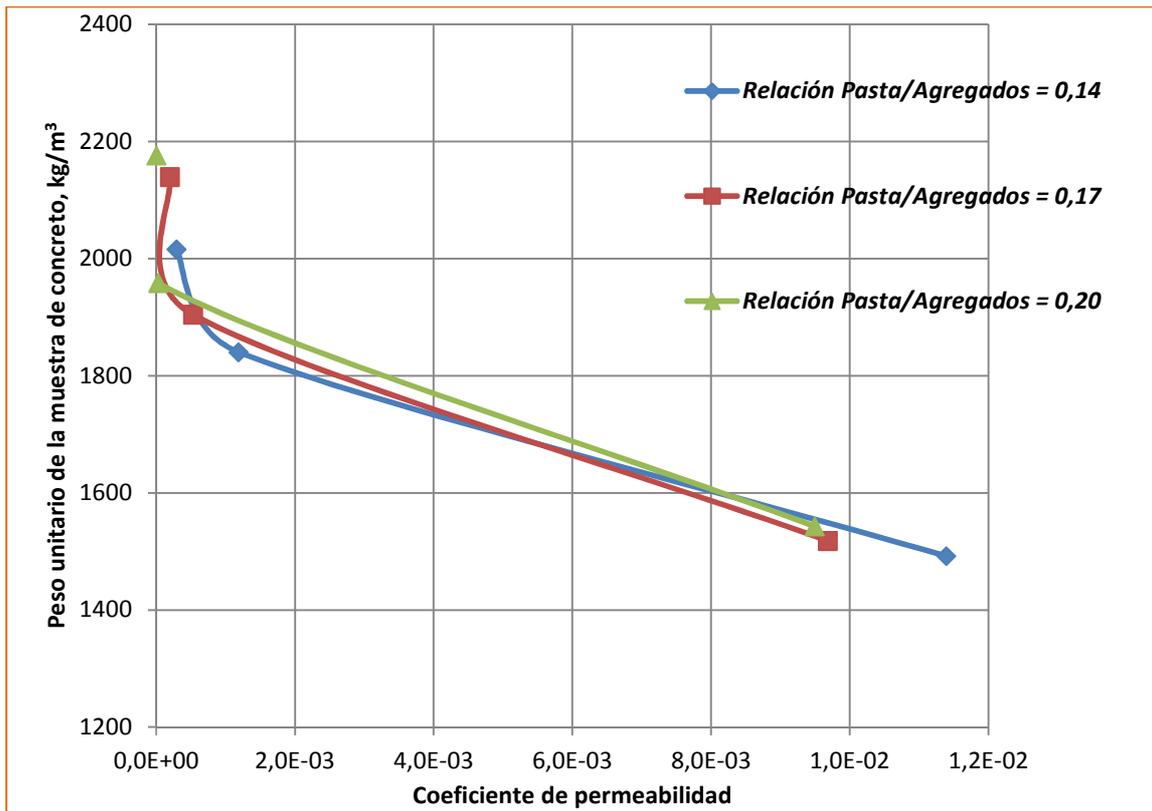


Figura 55. Relación entre el peso unitario de los cilindros de concreto empleados en el ensayo de permeabilidad y los valores de permeabilidad del concreto

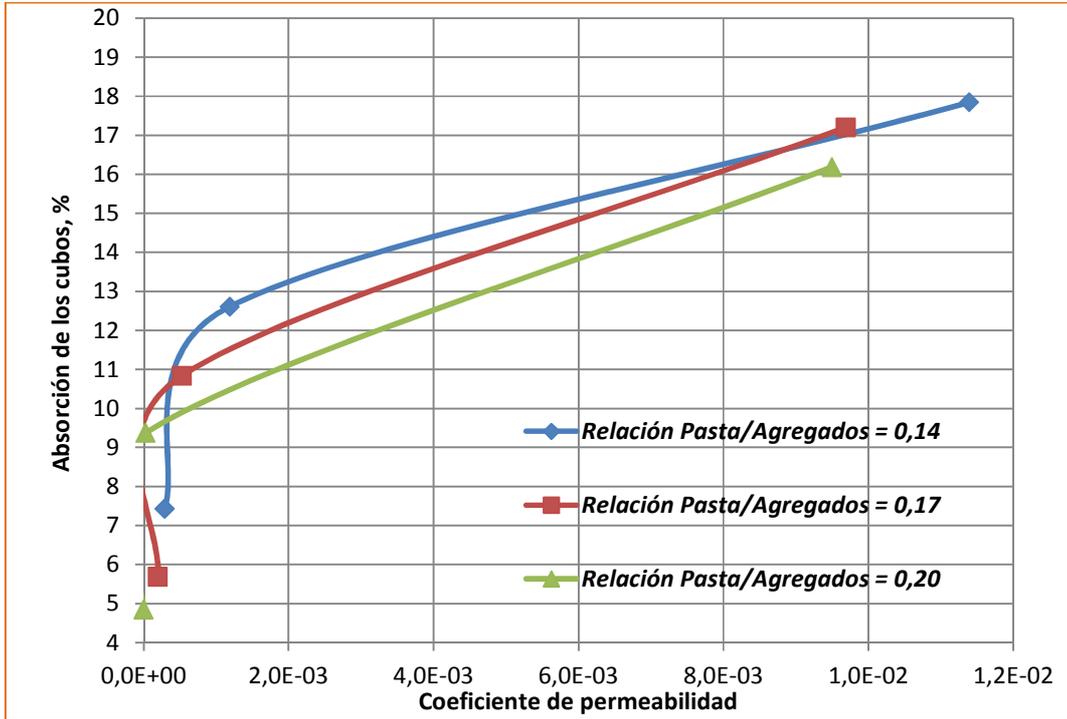


Figura 56. Relación entre la absorción de los cubos y la permeabilidad del concreto

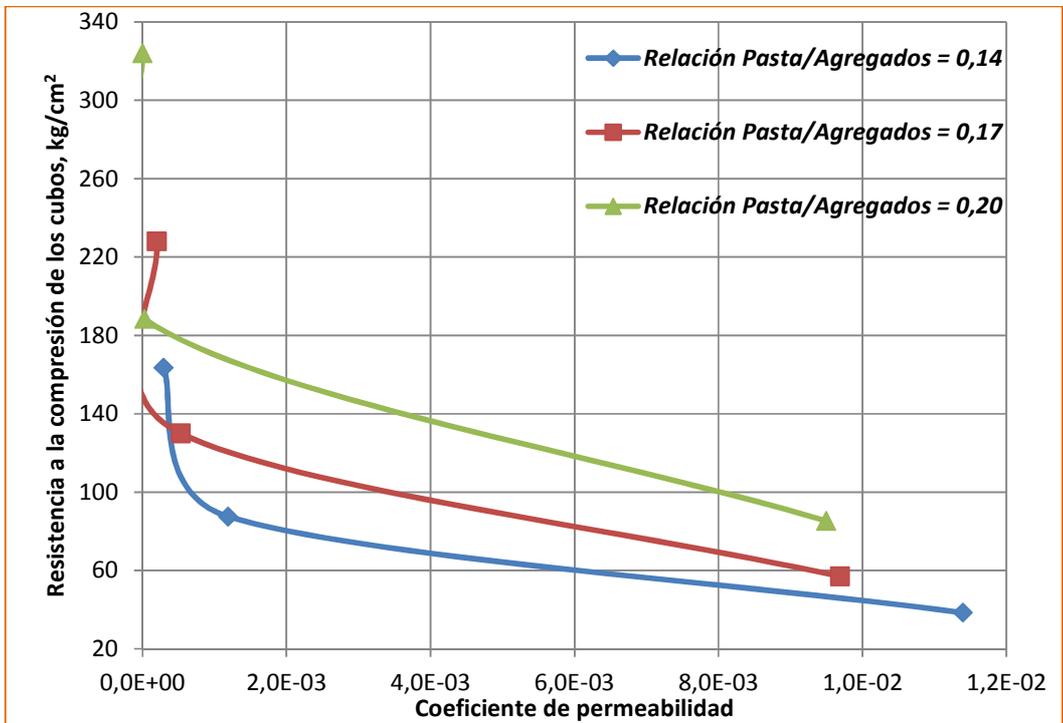


Figura 57. Relación entre la resistencia a la compresión de los cubos y la permeabilidad del concreto

# Análisis de los resultados

## Acerca de los agregados

Los agregados representan más del 80% del volumen de las mezclas de concreto elaboradas en este estudio. Entonces, es de esperar que su densidad y absorción contribuya materialmente en las propiedades del concreto: en las Figuras 44, 45, 46, 47, 48 y 49 se evidencia que el peso unitario, gravedad específica bruta seca y absorción ponderados de las combinaciones de agregados influye en la densidad y absorción de los cubos para una determinada relación pasta/agregados.

La densidad de los agregados depende tanto de los minerales que lo componen como de la cantidad de poros, tanto permeables como impermeables que contengan, lo cual refleja la relación inversa que existe entre la gravedad específica bruta seca y la absorción. El peso volumétrico está directamente relacionado con la densidad, pero, además, influyen factores como el tamaño, distribución y forma de las partículas, que define el acomodo de las mismas y, en consecuencia, el grado de confinamiento que se puede lograr. En el Cuadro 25 y las Figuras 33, 34 y 35 se presenta la relación inversa entre la absorción de los agregados finos y gruesos y sus correspondientes gravedades específicas (contemplando el volumen de poros) y pesos unitarios, además de la relación directa entre la densidad del material (contemplando el volumen de poros) y su peso unitario. En el Cuadro 27 y Figuras 37 y 38 se presentan relaciones semejantes pero ponderando los valores a partir de la combinación de agregados empleadas en las mezclas.

Los agregados calizos (cuyo peso unitario excede los  $1500\text{kg/m}^3$ ) poseen valores de absorción menores al 2% y con una adecuada dosificación de la mezcla las unidades de mampostería, posiblemente, no presenten problemas para el cumplimiento de los requerimientos de absorción. Sin embargo, las

unidades producidas con estos agregados serán más pesadas. Los agregados de tajo, al ser materiales de origen volcánico y muy porosos, presentan un peso unitario de aproximadamente  $1100\text{kg/m}^3$ , que los hace uno de los materiales naturales más livianos que se pueden encontrar en Costa Rica; la superficie de sus partículas son rugosas y porosas, por lo tanto la absorción tiene valores cercanos al 10% en el caso de la quintilla y 15% en la arena, dándose mayores valores en los agregados finos debido a una mayor área superficial para la absorción de agua.

La graduación combinada de los agregados es uno de los factores más importantes en el proporcionamiento de mezclas para bloques de concreto, especialmente, por el efecto del agregado grueso en la resistencia a la compresión y el efecto de los materiales más finos, tanto en la trabajabilidad de la mezcla como en el efecto puzolánico de los finos de origen calizo y los polvos de roca que, además, contribuyen a rellenar vacíos entre las partículas más gruesas, aumentando la resistencia y disminuyendo la permeabilidad del concreto. Este aspecto favoreció a las mezclas elaboradas con agregados calizos, donde la graduación propuesta contiene un 7% de material pasando el tamiz #200, mientras que la graduación de los agregados de río cuenta con un 5% y los de tajo con un 2% (Cuadro 26).

Aunque las proporciones por peso de agregados y cemento para una misma relación pasta/agregados se mantienen constantes, independientemente del tipo de agregado utilizado, las proporciones por volumen sí varían sustancialmente (Ver Cuadros 29, 30 y 31). En el caso de los agregados de tajo, dado su menor peso unitario y densidad, estos ocupan un mayor volumen que aquel que ocupa una misma masa de agregados de río y calizos, ocasionando que el porcentaje de cemento por volumen se reduzca, en mayor medida, cuando se utilizan los agregados livianos, debido a que un mismo volumen de cemento debe aglomerar un mayor

volumen de agregado, siendo insuficiente para aglomerar las partículas y produciendo concretos de baja resistencia.

La pasta agua-cemento es la encargada de lograr la adherencia pasta-agregado, la cual es la base de la resistencia del concreto. En el caso de agregados de baja absorción y poca porosidad (como los calizos), la pasta tiene la función principal de desarrollar la adherencia pasta-agregado, mientras que en agregados muy porosos y de alta absorción, una cantidad importante de pasta hace la función de rellenar los vacíos en el agregado y no la de aglutinar las partículas, siendo necesario la inclusión de más pasta. Lo anterior se refleja en las resistencias a la compresión obtenidas en los cubos elaborados con agregados livianos, las cuales son bastante inferiores a las resistencias de los cubos elaborados con agregados de río y, aún más, de aquellos que se realizaron con los materiales calizos. Estas mezclas requerían mayor cantidad de pasta para alcanzar mayores resistencias, lo cual es un efecto negativo desde el punto de vista económico, especialmente, porque las mezclas de concreto para unidades de mampostería poseen bajas cantidades de cemento.

Queda claro que en el proceso de producción de bloques, las combinaciones óptimas de los agregados, el contenido de cemento, la relación pasta/agregados y la humedad de la mezcla son factores que deben someterse a prueba hasta llegar a adaptarse al tipo de proceso de producción, a los equipos disponibles y a los mecanismos de manejo y curado de las unidades.

## Acerca de la humedad de las mezclas

En todas las mezclas se utilizó una relación agua/cemento entre 0,38 y 0,39. Al incrementar la relación pasta/agregados se incrementó la cantidad de agua y de cemento para mantener dicha relación (Ver Cuadro 28). El criterio principal para mantener ese valor fue obtener superficies rugosas similares a los bloques de concreto y, posteriormente evaluar la resistencia a la compresión de los cubos para cada combinación de agregados y de relaciones pasta/agregados. Esa relación agua/cemento se

manifiesta en la consistencia seca de la mezcla, es decir, en su poco contenido de humedad, lo cual implica que los elementos deben ser moldeados a la mayor brevedad posible puesto que estas mezclas pierden humedad muy rápidamente, ocasionando problemas de segregación y pulverización. En un proceso de fabricación de bloques se podrían utilizar aditivos fluidificantes y reductores de agua para lograr esas relaciones agua/cemento e inclusive reducirlas, logrando mezclas que se puedan compactar apropiadamente, obteniendo una adecuada densificación y alcanzado las resistencias especificadas. En la teoría del concreto compactado con rodillo, se puede estimar una humedad óptima de compactación que genere la densidad máxima teórica. Sin embargo, en el caso de las unidades de mampostería es preferible ajustar el contenido de humedad en mezclas de prueba y revisar que las unidades cumplan con los requerimientos de resistencia, absorción y acabado, de manera que la superficie de los bloques alcancen una adecuada adherencia con el mortero de pega, el concreto de relleno y el recubrimiento de las paredes.

Las mezclas realizadas con agregados más densos se compactan con menores contenidos de humedad. Esto porque su baja absorción reduce el requerimiento de agua necesario para saturar los agregados. Por ejemplo, para una relación pasta/agregados de 0,14; las mezclas elaboradas con agregados calizos se compactaron con un contenido de humedad del 4,8%; las de agregados de río con un 8,6% y las de agregados de tajo con un 15,3%.

## Densidad de los cubos y de los bloques

En el muestreo de concreto seco en una planta de producción de bloques se obtuvieron cubos y bloques de la misma partida de concreto (Cuadro 38). Dando como resultado que la densidad de los cubos es de un 105,94% de la densidad de los bloques, siendo esto un indicativo de que la energía de vibro compresión que se le aplicó a los cubos fue suficiente para alcanzar la densidad de los bloques. Los cubos presentaron menores

valores de absorción que los bloques, en concordancia con su mayor densidad; y al ser elementos sólidos y más densos, presentan una resistencia a la compresión que excede a la de los bloques en un 58%.

## Efecto de la relación Pasta/Agregados

La pasta es el elemento más importante en el desarrollo de la adherencia pasta-agregado. Mezclas con mayores cantidades de pasta producirán concretos de mayor resistencia y, a su vez, de menor absorción. Esto porque las partículas de agregado se encontrarán embebidas en una mayor cantidad de pasta, la cual supera en resistencia a las partículas de agregado y que, a su vez, contribuye a rellenar los espacios vacíos. En el caso de la metodología empleada para elaborar los cubos de concreto, si se incrementara la cantidad de pasta se lograría que esta se desplace hacia las paredes de los encofrados, formando un anillo de mortero alrededor del espacio libre entre la placa de compactación y las paredes de los moldes, lo cual ocasionaría superficies lisas y muy poco permeables al agua, obteniendo cubos con niveles de absorción bajos y con una adherencia con el mortero de pega muy pobre. De igual forma, se debe tener especial cuidado con el control de humedad de la mezcla, puesto que si las mezclas contienen más agua de la necesaria se produciría el mismo efecto de impermeabilización de la superficie, afectando la absorción y la adherencia, además de que se incrementa la relación agua/cemento en detrimento de la resistencia del concreto.

La *Figura 39* muestra cómo al adicionar más pasta se reduce la absorción de los cubos, reflejando el efecto del tipo de agregado en esta propiedad, pues, los valores de absorción de los agregados están directamente relacionados con la de los cubos, tal y como se observa en la *Figura 49*. Al incrementar la cantidad de pasta los especímenes elaborados con agregados livianos experimentan el menor crecimiento en su densidad y resistencia a la compresión y, en consecuencia, los concretos poseen permeabilidades muy similares y elevadas (Ver *Figuras 40, 41 y 42*), indicativo de que se requiere

aumentar la matriz de pasta para que sea suficiente tanto para llenar espacios vacíos en el agregado como para desarrollar adherencia con las partículas. Los demás cubos exhiben un mayor aumento de densidad y desarrollo de resistencia, conforme se incrementa la pasta y se utilizan agregados de mayor densidad, ocasionando concretos menos permeables al agua.

## Relación entre la absorción y densidad de los cubos

En la *Figura 51* se evidencia que la absorción es inversamente proporcional a la densidad de los cubos. Como se dijo, con anterioridad, los agregados contribuyen materialmente a definir estas propiedades. De manera adicional, se puede observar que las curvas correspondientes a cada relación pasta/agregados tienen una tendencia similar y sus curvas de mejor ajuste son casi coincidentes, especialmente, para densidades superiores a  $1900\text{kg/m}^3$ , y se podría considerar que la relación pasta/agregados no es una variable por tomar en cuenta al obtener la relación entre estas dos propiedades. Entonces, las tres curvas de la *Figura 51* se podrían sustituir por una sola curva de mejor ajuste, de la forma  $y = a + bx$ , con ecuación  $A(\%) = 58,192 - 0,0236D$ , donde la densidad "D" es la variable independiente y la absorción "A" es la variable dependiente. La curva resultante se muestra en la *Figura 58* de este apartado como una línea azul. Desde el punto de vista estadístico se puede anotar lo siguiente:  $b = -0,0236 \text{ \%}/(\text{kg/m}^3)$  representa la razón de cambio de la absorción con respecto a la densidad. La absorción disminuye en promedio 0,0236% cada  $1\text{kg/m}^3$  de incremento de densidad. El coeficiente de correlación muestral "r" es de -0,996, lo cual indica que existe una relación inversa entre las dos variables y que la tendencia es fuertemente lineal. De manera aproximada,  $r^2 = 99,12\%$  indica que el 99,12% de la variación en la absorción se debe a la variación en la densidad y el restante 0,88% se debe a otros factores.

Las propiedades de los cubos varían sustancialmente con respecto a la de los bloques huecos, incluso si se fabrican con el mismo

concreto. Lo anterior sugiere el desarrollo de otra curva pero usando bloques. No obstante, para considerar ese aspecto se van a corregir los valores de los cubos, usando factores procedentes de la comparación de las propiedades de cubos y bloques obtenidos a partir del muestreo de concreto seco en la empresa Pedregal (Cuadro 38), suponiendo que

estos factores se mantienen constantes, de tal forma que los nuevos datos reflejen, de mejor manera, los valores esperados en bloques. Los factores utilizados para la densidad, absorción y resistencia son, respectivamente: 0,944, 1,217 y 0,632. La curva obtenida se muestra en la Figura 58 (línea roja o curva corregida).

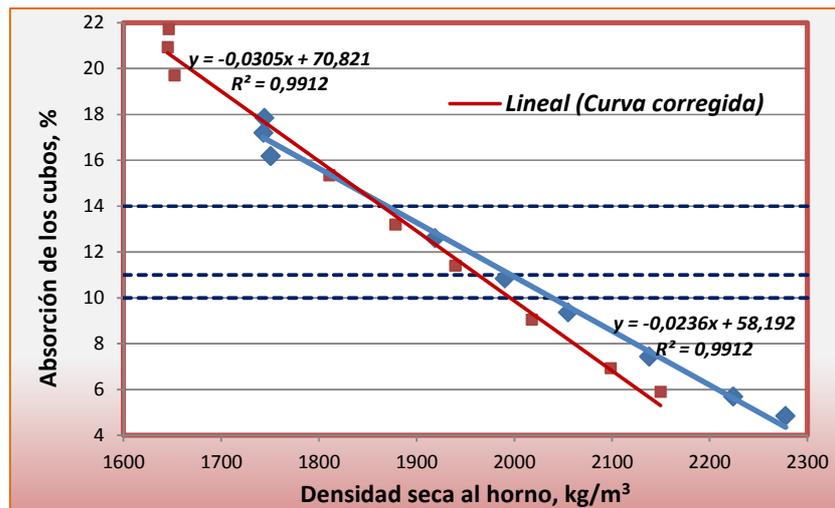


Figura 58. Relación entre la absorción de los cubos y la densidad seca al horno del concreto

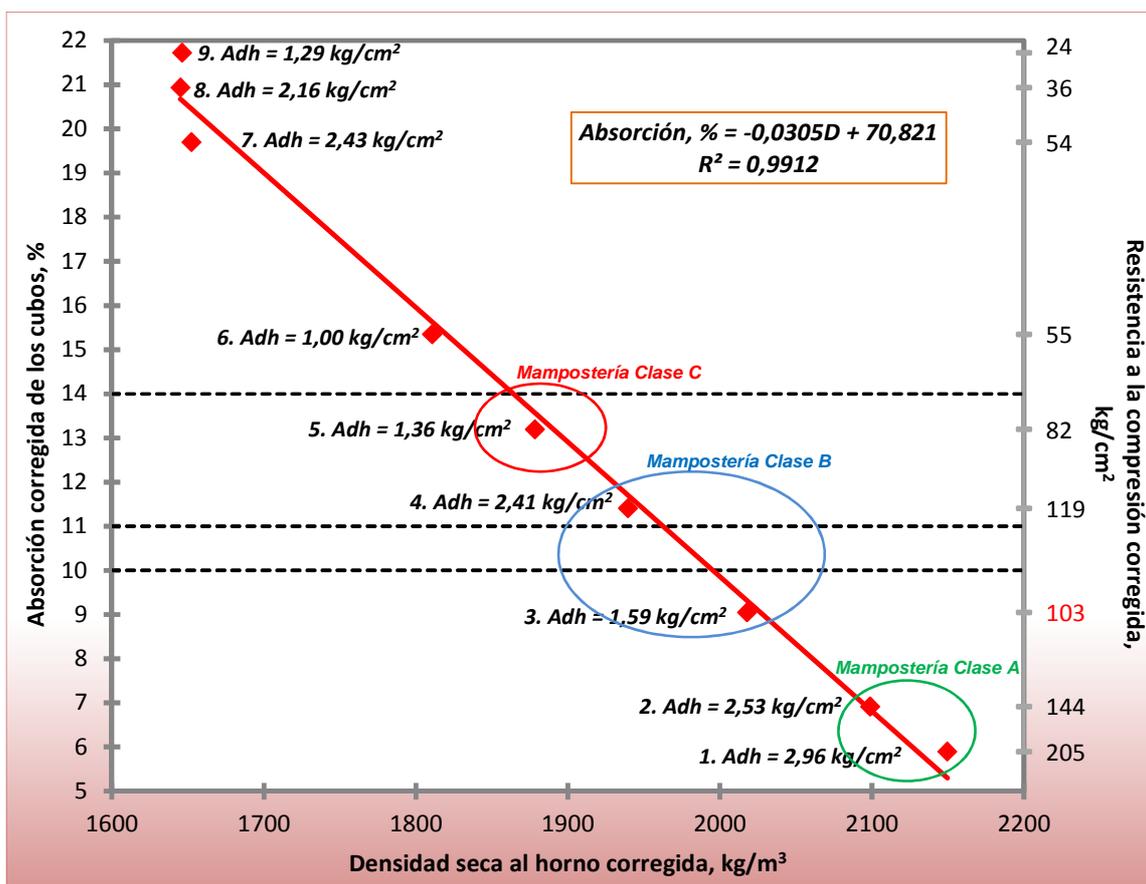
En la Figura 59 los datos de densidad, absorción y resistencia de los cubos corresponden a los valores corregidos. Además, los valores señalados en cada uno de los puntos corresponden a la adherencia. El valor señalado en rojo en la escala de resistencia a la compresión corresponde al punto 3. Este es el único caso en donde un incremento en la densidad de los cubos no significa un incremento en la resistencia. Lo anterior porque los resultados concernientes a los puntos 3 y 4 provienen de cubos que fueron elaborados con diferente agregado y relación pasta/agregados; los valores del punto 4 fueron obtenidos de cubos elaborados con agregados de río y con una relación pasta/agregados de 0,20, mientras que los del punto 3 corresponden a cubos elaborados con agregados calizos y con una relación pasta/agregados de 0,14.

De la Figura 59 se deducen los datos del cuadro siguiente. Estos indican que manteniendo la relación agua/cemento y la relación

pasta/agregados, los cubos elaborados con materiales calizos son los que satisfacen, de mejor manera, la normativa nacional de bloques de concreto en lo que respecta a la absorción y resistencia. Mientras que los cubos realizados con materiales livianos no satisfacen ningún requerimiento. Es importante resaltar que el análisis anterior es meramente hipotético, esto porque se está evaluando el cumplimiento de las especificaciones técnicas en lo que respecta a bloques huecos de concreto y, en realidad, el análisis procede de valores obtenidos en cubos de concreto.

**CUADRO 39. EVALUACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE ABSORCIÓN Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ACUERDO CON LA NORMATIVA NACIONAL DE BLOQUES DE CONCRETO**

| Punto | Clase Mampostería | Tipo de agregado utilizado | Relación Pasta/Agregados | Densidad seca al horno corregida, kg/m <sup>3</sup> | Cumple Absorción | Cumple Resistencia |
|-------|-------------------|----------------------------|--------------------------|---|------------------|--------------------|
| 1     | A                 | Calizo                     | 0,20                     | 2150  | Sí               | Sí                 |
| 2     | A                 | Calizo                     | 0,17                     | 2099  | Sí               | Sí                 |
| 3     | B                 | Calizo                     | 0,14                     | 2018  | Sí               | Sí                 |
| 4     | B                 | De río                     | 0,20                     | 1940  | No               | Sí                 |
| 5     | C                 | De río                     | 0,17                     | 1878  | Sí               | Sí                 |
| 6     | ---               | De río                     | 0,14                     | 1811  | ---              | ---                |
| 7     | ---               | De tajo (liviano)          | 0,20                     | 1652  | ---              | ---                |
| 8     | ---               | De tajo (liviano)          | 0,17                     | 1645  | ---              | ---                |
| 9     | ---               | De tajo (liviano)          | 0,14                     | 1646  | ---              | ---                |

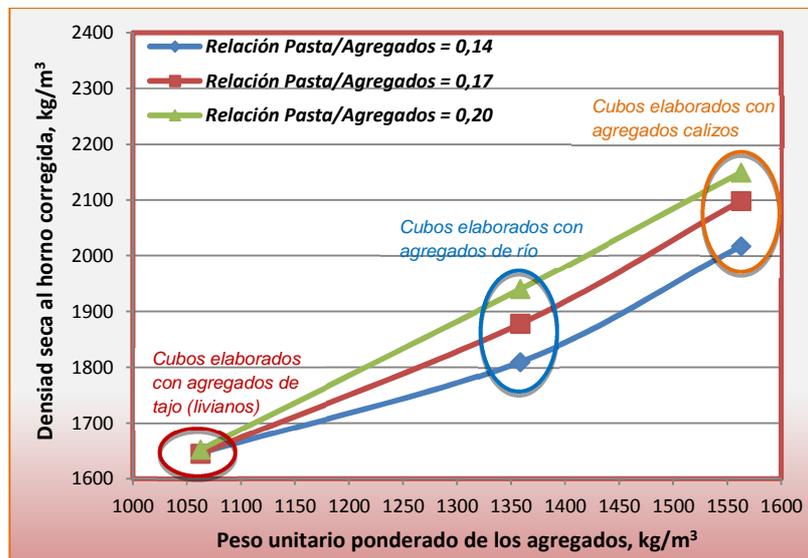


**Figura 59.** Valores de densidad, absorción y resistencia a la compresión corregida de los cubos de concreto. En cada punto se indica el valor de adherencia.

A partir de una curva como la anterior se pueden plantear los valores de absorción para determinadas densidades de los cubos. En este caso, se van a plantear los valores para  $2000\text{kg/m}^3$  (cubos de peso normal),  $1900\text{kg/m}^3$  (con agregados de mediana calidad se obtienen con facilidad densidades entre  $1900\text{ kg/m}^3$  y  $2000\text{ kg/m}^3$ ) y  $1800\text{ kg/m}^3$  (constituyen cubos de peso intermedio con altas absorciones). Por ejemplo, de acuerdo con los datos obtenidos, el 95% de los cubos con una densidad de  $2000\text{kg/m}^3$  tendrán absorciones entre 8,4% y 11,4%, evidentemente, este intervalo se podría haber reducido si el tamaño de la muestra fuera mayor. En el siguiente cuadro se muestran los valores de absorción para estas tres densidades del concreto. Además se indica el peso unitario y

gravedad específica de los agregados que producen dichas densidades, empleando una relación pasta/agregados de 0,20. Un cambio en esta relación producirá concretos de diferente densidad, aun cuando se mantenga constante el peso unitario y densidad de los agregados. Como se puede observar en la *Figura 60*, para cada valor de peso unitario ponderado de los agregados, se obtienen tres densidades del concreto (correspondientes a cada relación pasta/agregados).

| <b>CUADRO 40. VALORES DE ABSORCIÓN, %, PARA DIFERENTES DENSIDADES DE LOS CUBOS, CON UN INTERVALO DE CONFIANZA DEL 95% PARA LA PREDICCIÓN DE LA ABSORCIÓN</b> |                         |                         |
|--|-------------------------|-------------------------|
| $D = 1800\text{kg/m}^3$  | $D = 1900\text{kg/m}^3$ | $D = 2000\text{kg/m}^3$ |
| $15,9\pm 1,5$  | $12,9\pm 1,5$           | $9,9\pm 1,5$            |
| Peso unitario de los agregados, $\text{kg/m}^3$ , para una relación pasta/agregados = 0,20   |                         |                         |
| 1213   | 1314                    | 1415                    |
| Gravedad específica bruta seca ponderada de los agregados, para una relación pasta/agregados = 0,20  |                         |                         |
| 2,17   | 2,29                    | 2,41                    |



**Figura 60.** Relación entre la densidad seca al horno corregida del concreto y el peso unitario de las combinaciones de agregados.

## Resistencia a la compresión

La composición mineralógica de los agregados, su densidad y absorción y la granulometría de la mezcla de agregados son factores que influyen en la resistencia del concreto. Agregados más densos sugieren una mayor resistencia de las partículas, la cual se refleja en la resistencia del concreto, mientras que algunos materiales contienen cementantes naturales que ayudan a optimizar el uso de la pasta.

La resistencia a la compresión fue la propiedad de los cubos que presentó más variación con respecto a los bloques de concreto, estableciéndose que los bloques solo alcanzaron

el 63,2% de la resistencia de los cubos. En la siguiente figura ya se han multiplicado los valores de absorción y resistencia por el factor correspondiente: los puntos contenidos entre las líneas punteadas azules cumplen con la normativa nacional para mampostería clase A, los puntos contenidos entre las líneas azules y naranjas corresponden a mampostería clase B y los contenidos entre las líneas naranjas y rojas corresponden a clase C. Los puntos de mayor absorción (3 de ellos corresponden a los especímenes elaborados con agregados livianos) no entran en ninguna clase de mampostería por su limitada resistencia, mientras que los especímenes que clasifican para mampostería clase A fueron realizados con agregados calizos.

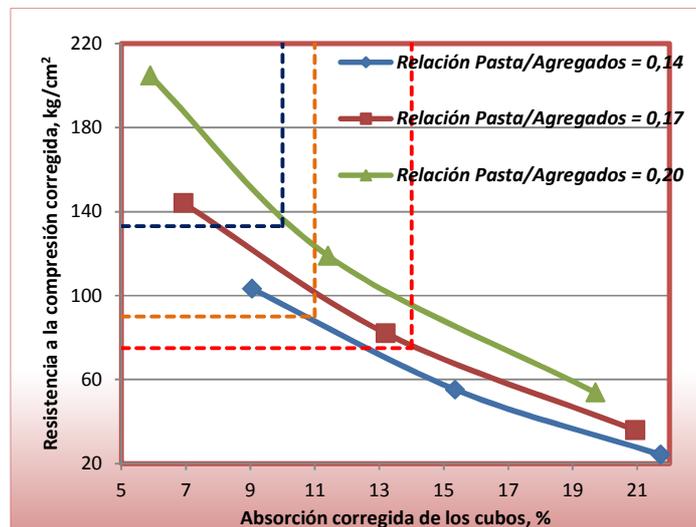


Figura 61. Relación entre la resistencia a la compresión y la absorción de los cubos (valores corregidos)

## Adherencia de los cubos con el mortero de pega

Como se puede observar en el Cuadro 36, en cada relación pasta/agregados los cubos elaborados con agregados calizos fueron los que experimentaron mayor adherencia con el mortero de pega, mientras que los que mostraron menos adherencia fueron los cubos elaborados con agregados de río. La utilización de agregados calizos puede mejorar la adherencia, ya que, su

composición mineralógica y química puede desarrollar adherencia química con la pasta de cemento. Además, la textura rugosa del concreto hace posible que la pasta y los agregados se entrelacen formando unión mecánica. Los cubos que se realizaron con materiales de río presentaron la textura más lisa, lo cual pudo haber afectado su adherencia.

Los especímenes elaborados con agregados de tajo mostraron una buena adherencia con el mortero, dando como resultado que la interfase superficie-pasta fuese más fuerte que el bloque, puesto que para las dos primeras

relaciones pasta/agregados los prismas fallaron en zonas cercanas a la aplicación de la carga y no en alguna de las juntas (como en los cubos elaborados con los demás agregados). Para la tercera relación pasta/agregados se observó que parte de los cubos quedaba adherida al mortero de pega (Ver Figura 62). Por lo tanto, se consigue una buena adherencia cuando se utilizan agregados porosos, que conllevan a texturas ásperas que permiten la penetración del mortero en las irregularidades de la superficie, aumentando el área superficial de contacto entre la pasta y los agregados. Sin embargo, el uso de materiales muy porosos, generalmente, está ligado con debilidad del mineral. Por otro lado, los agregados rugosos y de alta porosidad extraen más agua del mortero de pega, reduciendo la relación agua/cemento en la zona de transición interfacial, donde se produce la adherencia pasta-agregados, ocasionando uniones de mayor resistencia.

La adherencia se incrementa conforme se aumenta la relación pasta/agregados (Cuadro 36 y Figura 43) y, en consecuencia, esta aumenta con la disminución de la absorción (Figura 54). En la Figura 54 se trazaron tres curvas que ilustran el comportamiento de los prismas elaborados con cada tipo de agregado, faltando la parte de las curvas en donde la adherencia decrece si se reduce la absorción. Esto se lograría agregando más pasta y/o humedad a la mezcla, reduciendo paulatinamente la absorción y, al mismo tiempo, logrando superficies más lisas que experimentarán una pobre adherencia.

Los resultados manifiestan que la adherencia no solo está en función de la absorción de las unidades, sino que también influyen factores como el tipo de agregado y la textura de la superficie, además de la dosificación del mortero.

No obstante, otro aspecto que influye en los resultados corresponde a la configuración de la prueba. Al tener prismas con apoyos simples en sus extremos y aplicar una carga en el centro del claro, es posible que los esfuerzos que se generan en las juntas no sean primordialmente esfuerzos cortantes (el cálculo de la adherencia se realizó como un esfuerzo cortante que actúa en cada una de las juntas), sino que también pueden actuar esfuerzos de flexión. Entonces, es necesario definir un diseño del experimento tal

que, la adherencia sea medida como un esfuerzo cortante, sin la influencia de esfuerzos de flexión.



Figura 62. Adherencia entre el mortero de pega y los bloques elaborados con agregados livianos

## Acerca de la permeabilidad del concreto

Como complemento se tomaron mediciones de la permeabilidad del concreto, empleando el método de carga variable. Este es ampliamente utilizado en suelos muy poco permeables. Los ensayos fueron realizados en especímenes cilíndricos, los cuales superan el 98% de la densidad de los cubos (Cuadro 35). En la Figura 55, conforme aumenta la pasta/agregados y el peso unitario de la muestra de concreto coinciden menores permeabilidades, debido a que un incremento en el peso unitario implica una mayor compactación de la mezcla, quedando menos vacíos que limitan el recorrido del agua y aumentando la resistencia del concreto. Los especímenes que emplearon agregados livianos no mostraron resistencia al paso del agua, mientras que en el caso de concretos de mayor resistencia la carga hidráulica aplicada fue descendiendo paulatinamente tardando minutos e incluso varias horas.

# Conclusiones y recomendaciones

## Conclusiones

Los agregados de mayor peso unitario exhiben las mayores gravedades específicas (densidad relativa seca al horno) y, a su vez, los menores niveles de absorción.

El uso de agregados de baja absorción, como los calizos, no presenta inconvenientes para el cumplimiento de la normativa nacional en cuanto a la absorción de bloques de concreto, no siendo así con los agregados de río y aún menos con los materiales livianos, dado sus mayores niveles de absorción.

Se requieren mayores cantidades de pasta agua-cemento cuando se utilizan agregados livianos, debido a que la pasta primero ocupa los vacíos en las partículas de agregado, reduciéndose la pasta que se encarga de aglutinar las partículas. Los cubos elaborados con estos agregados no satisfacen los valores de absorción y resistencia de la norma nacional de bloques de concreto.

Es más factible obtener bloques de mayor resistencia usando agregados más pesados. Manteniendo las cantidades de cemento, los cubos que se realizaron con agregados más pesados siempre mostraron mayores resistencias a la compresión.

La adecuada granulometría combinada de los agregados en el proporcionamiento de las mezclas de concreto seco es importante, porque permite optimizar el uso del cementante y mejorar las características de los bloques, tales como su resistencia a la compresión, absorción y textura.

El control de la humedad de las mezclas de concreto seco es indispensable puesto que tiene gran influencia en la consistencia y densificación de la mezcla, así como en la absorción, resistencia y acabado del producto final.

El muestreo de concreto seco en la empresa Pedregal mostró que la densidad que se logra en los cubos, al utilizar el martillo vibratorio, es de un 106% de la que se logra en bloques de concreto mediante una máquina vibrocompresora.

El uso de más pasta en las mezclas ocasiona bloques más densos y resistentes y, a su vez, menos absorbentes y permeables.

La absorción de los cubos es inversamente proporcional a la densidad del concreto. El principal factor que define esa relación es el tipo de agregado y la cantidad de pasta por agregar a la mezcla.

Por cada incremento de  $100\text{kg/m}^3$  en la densidad de los cubos, la absorción disminuye en promedio un 2,4%

El método de regresión lineal es un modelo estadístico adecuado para describir la relación entre la absorción y densidad de los bloques. Así es posible establecer, con un nivel de confianza específico, la absorción esperada para una determinada densidad y, posteriormente, revisar el cumplimiento de la resistencia a la compresión.

En cada tipo de agregado, los cubos de menor absorción presentaron los mayores valores de adherencia, resaltándose la importancia de las superficies lisas y abiertas para mejorar el entrelazamiento mecánico con el mortero de pega, así como la adherencia química que puede

existir entre los agregados y los productos de hidratación del cemento.

Concretos elaborados con agregados porosos, tales como los agregados livianos, favorecen la adherencia con el mortero de pega, puesto que proporcionan una mayor área superficial y permiten el intercambio de humedad entre el mortero de pega y la superficie.

La permeabilidad del concreto está directamente relacionada con la absorción de las unidades e inversamente vinculada con su densidad y resistencia.

## Recomendaciones

Es conveniente establecer relaciones pasta/agregados mayores, para evaluar la adherencia con valores más bajos de absorción de los cubos elaborados con cada uno de los agregados. Lo anterior también es importante para aumentar la resistencia a la compresión de los cubos que fueron realizados con materiales de río y livianos y, así, obtener especímenes más representativos de la resistencia de los bloques de concreto. Además, con la evaluación de una mayor cantidad de mezclas se obtienen especímenes con un rango más amplio de densidades, absorciones y resistencias. Esto aumenta el tamaño de la muestra y aumenta la confianza del estudio desde el punto de vista estadístico, especialmente, en la relación entre la absorción y densidad de los bloques.

La prueba de adherencia de los bloques huecos o sólidos se puede ejecutar conforme a la norma ASTM E518; utilizando al menos cinco especímenes, cada uno de ellos formado por cuatro bloques debidamente pegados con mortero, y aplicando las cargas en los tercios del claro libre entre los apoyos del espécimen. Para la inclusión de valores adherencia en la norma nacional de bloques, es necesario definir un método de ensayo estándar, de manera que se obtengan datos reproducibles a nivel nacional y que permita una medida directa de la adherencia.

Se sugiere realizar esta misma investigación en bloques huecos de concreto, utilizando agregados con características semejantes a los

empleados en este trabajo y utilizando relaciones pasta/agregados que permitan obtener resistencias que, como mínimo, superen la correspondiente a bloques para mampostería clase C.

En caso de que se considere conveniente establecer una posterior investigación, que permita determinar los valores de densidad, absorción, resistencia a la compresión y adherencia de los bloques huecos de concreto, utilizando especímenes cúbicos similares a los empleados en este trabajo; sería conveniente calibrar desde un inicio los valores de densidad y absorción de los cubos, de manera que las variaciones sean mínimas respecto a los valores obtenidos en bloques huecos.

# Apéndices

- **Apéndice 1.** Granulometrías combinadas de agregados calizos, de río y de tajo (livianos), empleados en cada una de las mezclas de concreto seco.
- **Apéndice 2.** Hoja de cálculo para determinar corrección por humedad de los agregados, la cantidad de cemento y el agua por adicionar a las mezclas.
- **Apéndice 3.** Análisis estadístico de la relación existente entre la absorción y densidad de los cubos de concreto.

# Anexos

- **Anexo 1.** Fotografías de las fallas de los prismas empleados en la prueba de adherencia.
- **Anexo 2.** Guía empleada para definir el proporcionamiento de las mezclas: Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete, Appendix 5-Concrete masonry unit mixture proportioning (ACI 211.3R-02).
- **Anexo 3.** Normas importantes en el desarrollo de este trabajo:
  - Norma para la ejecución del ensayo de absorción y densidad de bloques de concreto: ASTM C140 “Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units”
  - Norma para la ejecución del ensayo de adherencia: ASTM E 518 “Standard Test Methods for Flexural Bond Strength of Masonry”

# Referencias

- ACI Committee 211. 2002. *Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete (ACI 211.3R.02*. Estados Unidos. **American Concrete Institute**. 26p.
- Herrera V, A.M.; Madrid M, G.G. 2001. **MANUAL DE CONSTRUCCIÓN DE MAMPOSTERÍA DE CONCRETO**. México. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 79p.
- Gordillo, T. *MANUAL TÉCNICO DE LA MAMPOSTERÍA DE BLOQUES DE HORMIGÓN*. Argentina. **ASOCIACIÓN ARGENTINA DEL BLOQUE DE HORMIGÓN**. 118p.
- Ruiz, V.J. 1983. **Fabricación técnica de bloques de concreto**. Costa Rica. 18p.
- Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica. 2010. *Código Sísmico de Costa Rica*. **Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos**.
- Bentz, D.P; Garboczi, E.J. 1999. *COMPUTER MODELING OF INTERFACIAL TRANSITION ZONE: MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES*. Estados Unidos. **National Institute of Standards and Technology**.
- Neville, A. 1999. **Tecnología del concreto**. 1<sup>a</sup> ed. México. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Kosmatka, S.H.; Kerkhoff, B.; Panarese, W.C. y Tanesi, J. 2004. **DISEÑO Y CONTROL DE MEZCLAS DE CONCRETO**. Stokie, Illinois, Estados Unidos. Portland Cement Association, 468p.
- Acuña, P. 2004. **ESTADÍSTICA APLICADA CON FATHOM**. Cartago, Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 304p
- Solano J, J. 2011. *Adherencia pasta-agregado: base de la resistencia del concreto*. **INSTITUTO COSTARRICENSE DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO**. Boletín #31, Agosto 2011. 4p
- Normas ASTM:*
- C702 "Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size"
- C40 "Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete"
- C29 "Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate"
- C117 "Standard Test Method for Materials Finer than 75- $\mu$ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing"
- C136 "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates"
- C127 "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate"
- C128 "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate"

C33 “Standard Specification for Concrete Aggregates”

C331 “Standard Specification for Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units”

C109 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or [50-mm] cube specimens)”

C1435 “Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer”

C90 “Standard Specification for Loadbearing Concrete Masonry Units”

E518 “Standard Test Methods for Flexural Bond Strength of Masonry”

C140 “Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units”

*Otras normas:*

Norma Nacional INTE 06-03-01-07  
*“Elementos de mampostería hueca de concreto (bloques de concreto) para uso estructural — Requisitos.”*

Norma Técnica Colombiana NTC 4026  
*“Ingeniería civil y arquitectura: unidades (bloques y ladrillos) de concreto para mampostería estructural”*

Norma Argentina IRAN 11561 *“Bloques Huecos de Hormigón”*