

**CONSIDERACIONES SOBRE LA DOSIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE HORMIGONES EN BASE
A MATERIALES CARACTERÍSTICOS DE COCHABAMBA**
**EXPERIMENTALLY OBTAINED CONCRETE DESIGN MIXES UTILIZING MATERIALS
CHACTERISTIC OF COCHABAMBA**

Francisco Aguirre, Orlando Rojas, Janen I. Calle y Álvaro M. Moscoso
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles - CIMOC
faguirre@upb.edu

(Recibido el 1 mayo 2013, aceptado para publicación el 20 de julio 2013)

RESUMEN

Con el progresivo aumento de la producción de hormigones, debido al crecimiento de obras civiles públicas y privadas en nuestro país, se hace necesario realizar estudios formales para aprovechar mejor los materiales existentes en nuestra región y también tener mayor confiabilidad en relación a la resistencia del hormigón. Por este motivo, en esta investigación fueron elaboradas curvas de dosificación con materiales comúnmente empleados en Cochabamba. Durante el trabajo experimental se fue modificando los porcentajes de finos y agua, obteniendo un pastón con una adecuada cohesión para un determinado asentamiento del cono de Abrams. Una vez obtenido el pastón fueron preparadas tres dosificaciones de hormigón: una rica, una normal y la última pobre en cemento. Finalmente, se obtuvieron por regresión las expresiones teóricas que relacionan resistencia del hormigón, relación agua-cemento, cantidad de áridos y cantidad de cemento, mediante las cuales se elaboraron los diagramas de dosificación. Estos son los diagramas utilizan las empresas más prestigiosas que venden hormigón premezclado, estos diagramas de dosificación son mantenidos como secretos. Después de obtener los diagramas fue elaborada una dosificación para una resistencia de 29 MPa a los 28 días y fue obtenida en los ensayos una resistencia promedio de 30,5 MPa, proporcionando un resultado muy satisfactorio.

ABSTRACT

With the increase in concrete production due to ongoing expansion of the construction industry in our country, rigorous studies must be undertaken in order to better take advantage of local resources and also to improve understanding with regards to material strength and durability. To address these questions, this paper reports on the study of concrete design mixes materials commonly available in Cochabamba. To start, the percentages of fines and water were varied, to obtain a mortar with adequate cohesion for a given slump. Once de mortar was obtained, three concrete mixes were prepared: one rich, one normal and the last poor in cement. Finally regression analysis was used to develop theoretical expressions relating the concrete strength, water-cement ratio, amount of aggregates and the amount of cement. These relationships were then expressed graphically as concrete design mix curves. These are the diagrams used in the most prestigious companies selling ready-mixed concrete and are typically kept as proprietary information. On the basis of the design mix information obtained experimentally, a concrete mix was prepared for a design strength of 29 MPa after 28 days, and resulted in an average strength of 30.5 MPa during resistance testing.

Palabras Clave: Diagramas de Dosificación, Empaquetado de Áridos, Asentamiento del Hormigón, Porosidad.

Keywords: Design Mix Diagrams, Packed Aggregates, Concrete Slump, Porosity.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón resulta ser un material muy importante en la mayor parte de las obras civiles que se llevan a cabo. La calidad de las mismas dependerá, en gran medida, de la calidad del hormigón empleado en su construcción, siendo por ello necesario contar con procedimientos eficientes para la elaboración de este material. Valores elevados de la resistencia del hormigón colocado en una determinada estructura son indicadores de que la misma es menos susceptible a presentar deterioros y deficiencias. A la resistencia del hormigón debe añadirse también la trabajabilidad del mismo, de este factor dependerá el correcto vaciado y colocado del material en obra.

En base a lo indicado, resulta importante contar con métodos de dosificación que logren integrar eficientemente los factores mencionados, garantizando así la obtención de una resistencia requerida del concreto a una edad determinada, así como el correcto colocado del material en la obra, logrando además en el proceso la optimización de las cantidades de los materiales componentes del concreto.

En esta investigación se busca obtener un diagrama de dosificación de hormigones elaborados a partir de materiales existentes en la región de Cochabamba, mediante el cual puedan obtenerse concretos que cumplan los requerimientos técnicos y económicos propios de cada proyecto.

2. PROPIEDADES Y DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN

Las propiedades del hormigón, tanto fresco como endurecido, tienen un fuerte impacto en la calidad del material, y por tanto, en la calidad de una determinada obra. Por ello, el conocimiento, control y evaluación de las mismas siempre deberá estar presente en la etapa del diseño de la mezcla. Algunas de las propiedades del hormigón son la consistencia, la trabajabilidad, la homogeneidad, la resistencia, entre otras. Siendo que en todas ellas la cantidad de agua que se agrega al hormigón es la que determina sus características finales.

2.1 Resistencia del hormigón

La resistencia del hormigón es un indicador de la capacidad que presenta éste ante las solicitaciones a las cuales se encuentra sometido el material. Usualmente, se determina mediante cuerpos de ensayo o probetas cilíndricas de tamaños estandarizados, los cuales son sometidos a una carga de compresión ejercida mediante una prensa, siendo la resistencia a compresión igual a la presión ejercida que provoca la falla o rotura de la probeta.

Por otra parte, la resistencia del hormigón depende, en gran medida de la relación agua-cemento (a/c) que presente el material, conociéndose esta dependencia como Ley de Abrams. Esto se ilustra a continuación en la Figura 1.

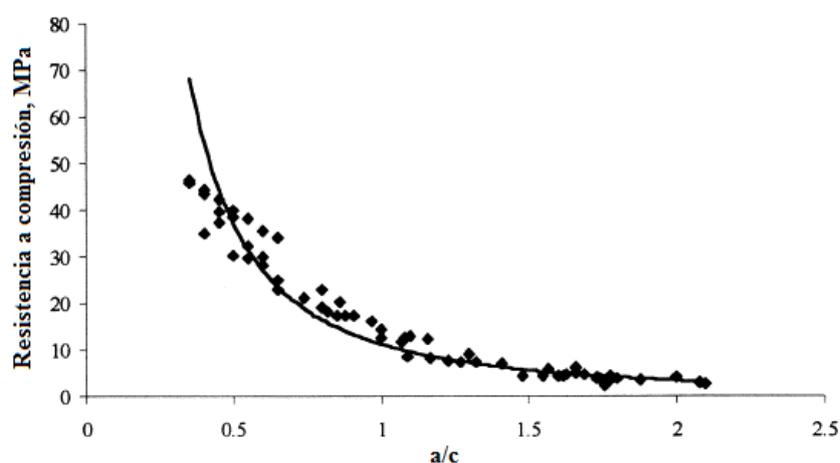


Figura 1 –Variación de la resistencia del hormigón en función de a/c .

La resistencia del hormigón estará también en función de la edad y del periodo de curado del mismo, obteniéndose resistencias más elevadas a edades y periodos de curado mayores. Esto se ilustra en la Figura 2. Además de lo mencionado, la resistencia dependerá también del contenido de vacíos en la pasta de cemento, y por tanto, del contenido de agua presente en la misma. Esto último se explica a continuación.

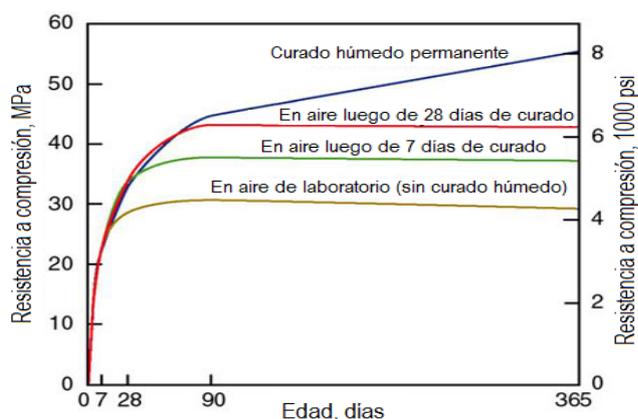


Figura 2 – Ganancia de resistencia del hormigón respecto al tiempo, adaptado de Kosmatka S. *et al.* [1].

2.2 Agua en la pasta de cemento hidratada

El agua en la pasta de cemento hidratada se presenta en distintas formas. Sin embargo, puede clasificarse, según la facilidad en que ésta es removida, en los siguientes tipos [2]:

- **Agua capilar:** Puede dividirse aún en agua libre, existente en poros mayores a 50 nm., cuya remoción no altera el volumen de la mezcla; y en agua retenida por tensión capilar en poros pequeños, cuya remoción puede causar la retracción.
La fracción del agua capilar en la pasta de cemento equivale a la diferencia entre el agua empleada y el agua necesaria para la hidratación completa.
- **Agua adsorbida:** Es el agua que se encuentra cerca a la superficie de las partículas sólidas. La pérdida de la misma podrá ocasionar la retracción de la pasta de cemento hidratada, y por tanto, los cambios de volumen en el sistema. La fracción del agua adsorbida es igual al 18% de la masa de cemento.
- **Agua químicamente combinada:** Forma parte de la microestructura de los productos de la hidratación. A diferencia de las anteriores, esta agua no se pierde por la sequedad, sino que es liberada cuando los hidratos se descomponen. La fracción del agua químicamente combinada se encuentra en el rango de 20% a 25% de la masa de cemento.

2.3 Dosificación de hormigones

La dosificación de hormigones es el proceso por el cual se obtiene la combinación correcta de cemento, agua, agregados y aditivos, para la elaboración de hormigón según especificaciones y/o características exigidas en el proyecto. Este proceso resulta ser bastante complejo por ser dependiente de distintos factores, unos ligados a las propiedades del hormigón requerido, otros a las propiedades de los materiales empleados, y otros a los medios de fabricación, transporte y colocación. Es por ello que este proceso resulta ser tanto un arte como una ciencia [3].

Uno de los objetivos de la dosificación de hormigones es la obtención de un producto que cumpla con los requisitos establecidos en el proyecto, siendo los más importantes la trabajabilidad del concreto fresco y la resistencia del mismo a una edad específica. Dichos requisitos de desempeño del hormigón deberán ser obtenidos al menor costo posible, por lo cual los materiales a emplearse deberán ser seleccionados tanto por su calidad, como por su disponibilidad y costo.

Finalmente, en el medio existen una gran cantidad de métodos de dosificación de hormigón. Sin embargo, todos ellos deberán considerarse como orientativos. Las proporciones de los materiales componentes del concreto deberán ser obtenidas necesariamente mediante ensayos de laboratorio, debiéndose realizar posteriormente las correcciones y ajustes que resulten convenientes [3].

3. MÉTODO EXPERIMENTAL DE DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES

Este método, propuesto inicialmente por Petrucci [4] y modificado a lo largo del tiempo por distintos investigadores de Brasil, es uno de los métodos más versátiles, simples y capaces de satisfacer los requisitos exigidos para un hormigón determinado, considerando las exigencias técnicas, económicas, de sustentabilidad y de productividad [5]. Según el método, la relación agua-cemento es el parámetro más importante del hormigón. Una vez definidos los materiales y la relación agua-cemento, la resistencia del concreto será única, siempre que se mantenga una trabajabilidad definida del mismo [5]. Este método no requiere necesariamente el conocimiento de las características o propiedades de los materiales a emplearse en la elaboración del concreto, permitiendo que la obtención de las curvas del diagrama sea más rápida y directa.

Puede ser clasificado como un método teórico-experimental, ya que requiere del análisis y combinación de distintas leyes teóricas del hormigón, así como de un estudio experimental en laboratorio. En dicho estudio experimental deberán determinarse las fracciones óptimas de arena y grava en la mezcla para un pastón (relación en masa agregados secos/cemento) intermedio previamente definido (m). Dicha proporción de los agregados corresponderá a la mínima relación agua-cemento para un asentamiento específico, el cual deberá ser establecido según las características del proyecto. Esta etapa es sumamente importante, ya que determinará cuán adecuado es el hormigón para ser vaciado y colocado en obra.

Para lograr lo mencionado anteriormente, se deberá variar el contenido de mortero seco (α), mediante adiciones de arena, cemento y agua, manteniendo constante permanentemente el pastón definido, hasta encontrar el punto óptimo mediante evaluación visual y de tacto [5]. El contenido de mortero seco viene dado en la (1):

$$\alpha = \frac{1+a}{1+m} \quad (1)$$

donde α es el contenido de mortero seco, a la relación en masa de arena/cemento y m la relación en masa de agregados secos/cemento.

En esta etapa deberá monitorearse además la relación agua-cemento, ya que, como se indicó anteriormente, la menor relación agua-cemento para un asentamiento establecido es la correspondiente a la mejor proporción de los agregados; es decir, al valor óptimo del contenido de mortero seco (α).

Una vez definidas las fracciones óptimas de los agregados y la relación agua-cemento mínima para el pastón y asentamiento definidos, se obtendrán probetas para la realización de ensayos posteriores. Posteriormente, se deberán elaborar mínimamente, dos pastones adicionales, siendo uno de ellos más rico en cemento (1:m-1) y el otro más pobre con relación al pastón intermedio (1: m+1). Esto a fin de verificar el asentamiento definido con relaciones agua-cemento diferentes [5].

En estas nuevas relaciones de las *mezclas*, se mantendrá constante el valor de α determinado anteriormente, variando únicamente la relación agua-cemento hasta conseguir el asentamiento establecido. De igual forma, se deberán obtener probetas para realizar ensayos posteriores. Posteriormente, se determinará la resistencia de los hormigones elaborados, a las edades establecidas, mediante ensayos de compresión. Finalmente, a partir de los resultados obtenidos, se obtienen las leyes teóricas del comportamiento del hormigón en las cuales se encuentran basados los diagramas de dosificación del método. Estas últimas se explican a continuación.

- **Ley de Abrams:** Esta ley fue establecida en 1918 y según Tutikian *et al.* [5] se establece que, dentro del campo de los concretos plásticos, la resistencia a los esfuerzos mecánicos, así como las demás propiedades del concreto endurecido, varían inversamente en función de la relación agua-cemento (a/c). Esto se muestra en la ecuación (2):

$$f_{c_j} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad (2)$$

- **Ley de Lyse:** Esta ley fue establecida en 1932 y de acuerdo a esta ley, definidos el cemento y los agregados, la consistencia del concreto fresco depende preponderantemente de la cantidad de agua por metro cúbico de concreto [5]. Por otra parte, si el contenido de agua y la relación agua-cemento de una mezcla fueron definidos, la cantidad de cemento requerida para una mezcla de la misma consistencia, pero de diferente relación agua-cemento, puede estimarse asumiendo que el contenido total de agua se mantiene constante con la variación del contenido de cemento [6]. Esta ley es expresada, de forma simplificada por la ecuación (3),

$$m = k_3 + k_4 (a/c) \quad (3)$$

- **Ley de Prizskulnik & Kirilos:** Esta ley fue establecida en 1974 y según ésta, la cantidad de cemento por metro cúbico de hormigón varía inversamente en función de la relación cemento-agregados secos (m) [5], de acuerdo a la ecuación (4):

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 (m)} \quad (4)$$

siendo f_{c_j} la resistencia del hormigón a la edad j ; a/c la relación agua-cemento, m la relación cemento-agregados secos presente en el hormigón, C la cantidad de cemento requerido por metro cúbico de hormigón, $k_{1,2,3,4,5,6}$ los parámetros obtenidos mediante regresión.

En la Figura 3 se presenta un ejemplo de diagrama típico de dosificación obtenido mediante el método descrito.

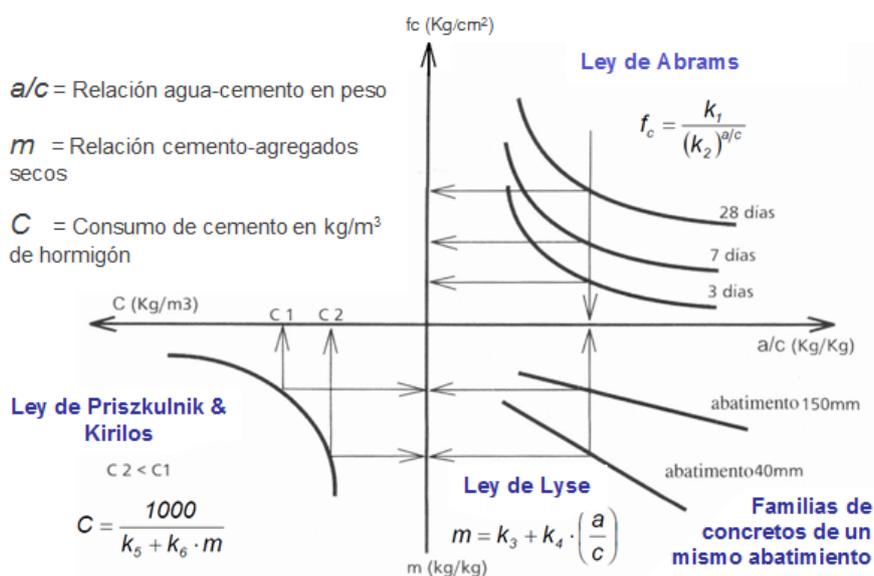


Figura 3 – Ejemplo de diagrama de dosificación elaborado mediante el método IBRACON(Adaptado de IME [7]).

4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Definición de los materiales

Para el presente estudio se adquirieron materiales existentes en la región de Cochabamba de proveedores ubicados en la ciudad. Los materiales empleados son los siguientes:

- Arena proveniente de Pankoruma,
- Grava de 3/8", proveniente de Suticollo,
- Grava de 1 1/2", proveniente de Viloma,
- Cemento EMISA IP-30.

Cabe mencionar que los áridos mencionados son todos provenientes de río, es decir, agregados boleados. No se optó por analizar agregados chancados en el estudio ya que la producción de estos resulta ser bastante costosa, por lo que resultan poco convenientes desde el punto de vista económico, en proyectos comunes que se llevan a cabo en la región. Sin embargo, la utilización de los mismos sí resultará conveniente en proyectos donde los requerimientos del hormigón sean más estrictos, como ser pavimentos, puentes, estructuras especiales, etc.

En la Tabla 1 y las Figuras 4 a 6, se muestran las características granulométricas de los agregados mencionados.

TABLA 1 – PROPIEDADES GRANULOMÉTRICAS DE LOS AGREGADOS EMPLEADOS

Tamiz	Abertura (mm)	Curva Granulométrica		
		Arena	Grava 3/8"	Grava 1 1/2"
3"	75,00	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	37,50	98,55	100,00	97,55
3/4"	19,00	97,1	98,28	46,67
3/8"	9,50	88,46	38,36	5,46
Nº 4	4,75	71,93	1,61	0,35
Nº 8	2,36	58,74	0,20	0,32
Nº 16	1,18	27,23	0,10	0,30
Nº 30	0,63	12,16	0,08	0,28
Nº 50	0,30	4,69	0,07	0,26
Nº 100	0,15	1,44	0,01	0,20
Módulo de Finura		4,40	6,61	7,49

En la Figura 4 se puede observar que la granulometría de la grava de 3/8 está fuera de sus límites lo que invalidaría el uso de otros métodos de dosificación, como el método de la ACI, pero el Método Experimental propuesto en este trabajo sería el adecuado para su utilización.

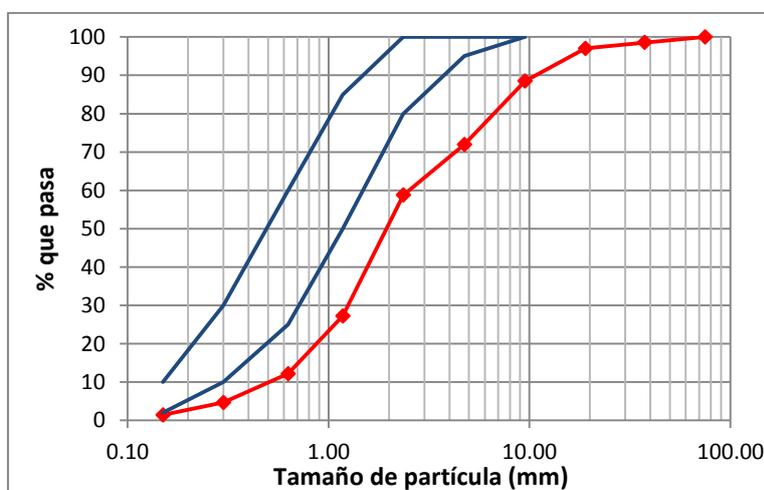


Figura 4 – Curva granulométrica de la arena empleada.

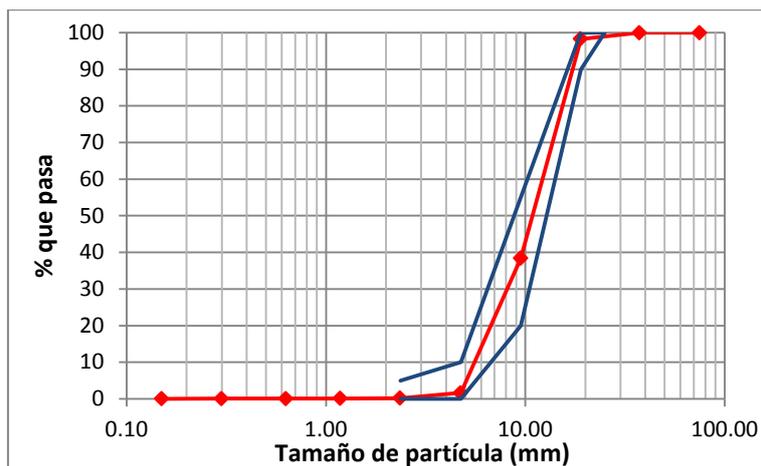


Figura 5 – Curva granulométrica de la grava 3/8”.

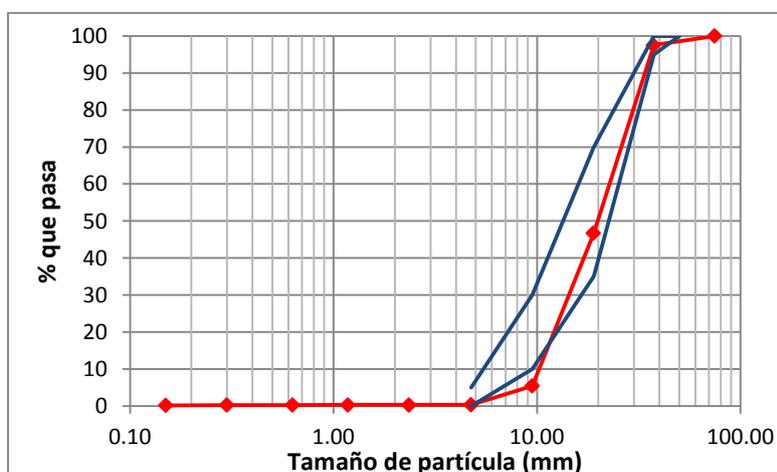


Figura 6 – Curva granulométrica de la grava 1½”.

4.2 Estudios experimentales en laboratorio

Los estudios experimentales se llevaron a cabo en el Laboratorio de Hormigones de la Universidad Privada Boliviana y en los Laboratorios de la empresa Ready Mix. Las actividades realizadas son explicadas en los apartados siguientes.

4.2.1 Determinación de las fracciones óptimas de los áridos gruesos

En el proceso de dosificación se busca la maximización del contenido de los agregados presentes en la mezcla, reduciendo así la cantidad de vacíos presentes en la misma. Esto se logra con una adecuada gradación de los agregados, en la que las partículas pequeñas llenan los vacíos existentes entre las partículas más grandes, Figura 7.

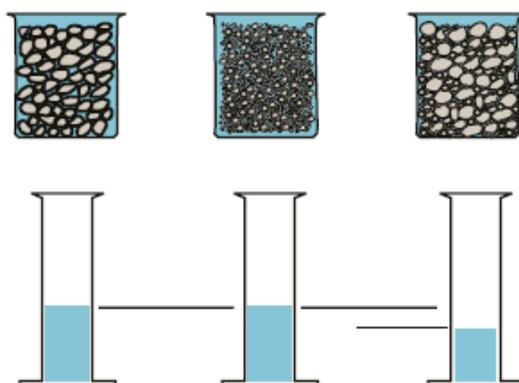


Figura 7 – Efecto de la gradación en el contenido de vacíos [8].

La adecuada gradación permitirá que el concreto sea más trabajable y durable, reduciendo la cantidad de agua y pasta de cemento requerida, así como los costos de fabricación del hormigón. Además de ello, reducirá también la permeabilidad y susceptibilidad a la contracción de la mezcla [8].

En este trabajo, la maximización del contenido de agregado grueso se realizó mediante la comparación de los pesos específicos de distintas combinaciones de las gravas empleadas (grava 1½" y grava 3/8"). Para ello, se elaboraron mezclas de los agregados gruesos en distintas proporciones de los mismos en un recipiente de volumen conocido, acomodándose las partículas a fin de reducir la cantidad de vacíos. De cada una de las mezclas fue determinado su respectivo peso específico. Los pesos específicos de cada mezcla analizada se muestran en la Figura 8.

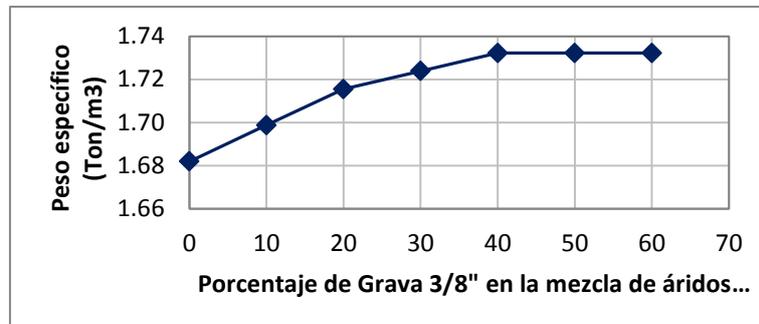


Figura 8 – Pesos específicos de las distintas combinaciones de áridos gruesos analizadas en laboratorio.

En la Figura 8 se observa que el incremento del porcentaje de grava 3/8" en la mezcla de áridos produce el aumento del peso específico del agregado grueso combinado. Aquello ocurre hasta el 40% de grava 3/8" en la mezcla de áridos gruesos, punto a partir del cual el peso específico de dicha mezcla tiende a ser constante.

En base a la Figura 8 se determinó como combinación óptima a la correspondiente a 60% de grava 1½" y 40% de grava 3/8" ya que ésta logra maximizar la cantidad de agregado en el concreto, reduciendo el volumen de aire presente en el mismo.

Es posible realizar un estudio complementario del empaquetamiento en el agregado fino, es decir, combinar 2 o más tipos de arenas. Sin embargo, esto no fue realizado para no incorporar otras variables en el estudio.

4.2.2 Determinación del contenido óptimo de mortero seco

Según el método, deberá determinarse experimentalmente el contenido óptimo de mortero seco en el concreto, el cual corresponderá a las fracciones óptimas de los agregados gruesos y finos y a la mínima relación agua-cemento.

Para ello, inicialmente, se comenzó con una mezcla de relación agua-cemento de 0.5 y un contenido de mortero seco (α) de 40% para un pastón intermedio de 1:5 (cemento-agregados secos). Esta mezcla resultó ser muy poco trabajable, Figura 9, por lo que se fue incrementando el valor de α de 2% en 2% mediante la adición de cemento, arena y agua en pequeñas cantidades, hasta conseguir un asentamiento en cono de Abrams de 9 cm, previamente definido, y un hormigón bastante manejable y de buen aspecto, obteniéndose en este punto el valor óptimo de α Figura 10.



Figura 9 – Concreto obtenido a partir del contenido de mortero seco y α inicialmente asumidos.

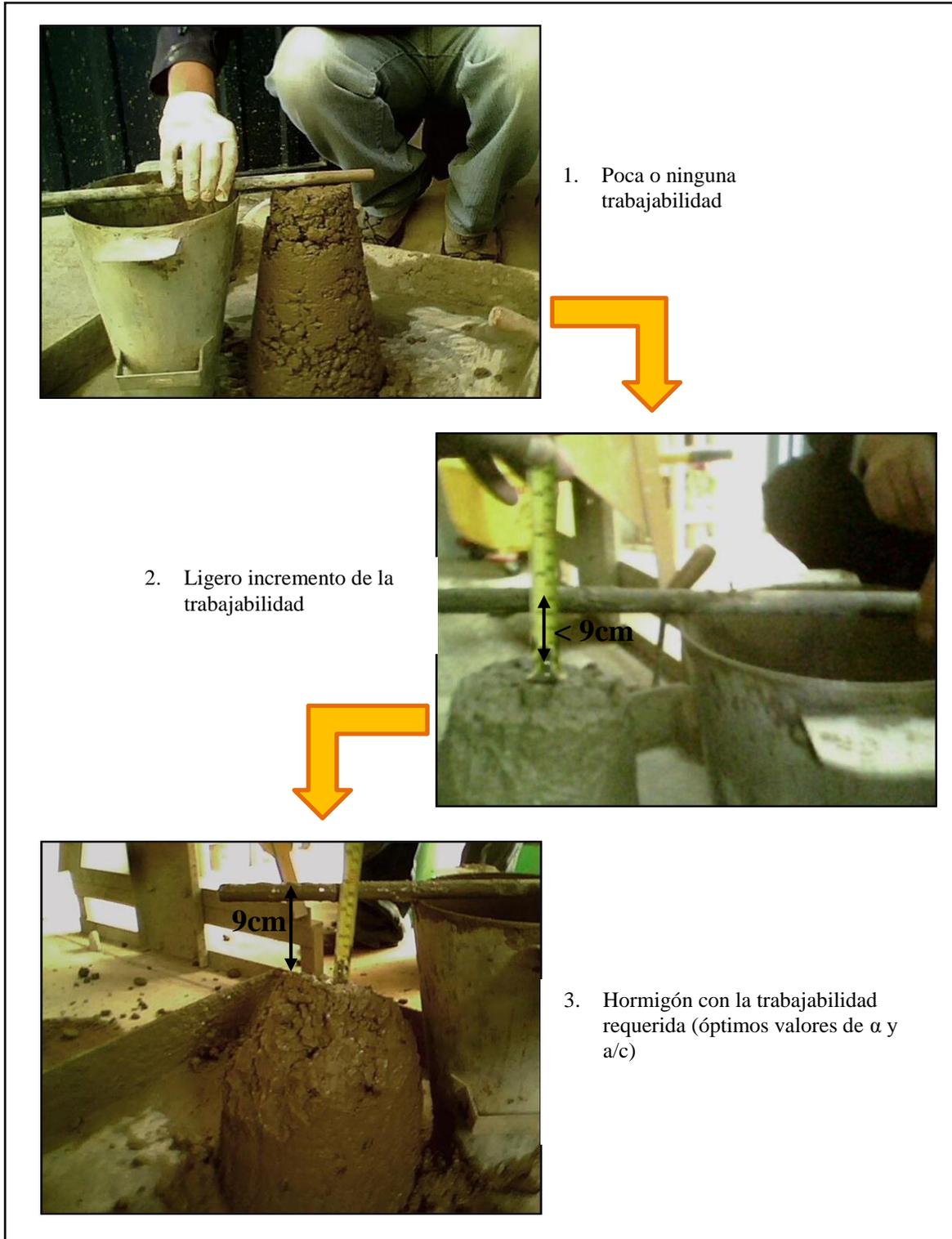


Figura 10 – Evolución de la trabajabilidad del hormigón fresco debida a los incrementos de los materiales.

Las adiciones de cemento, arena y agua fueron realizadas manteniendo permanentemente constante la relación 1:5 entre cemento y agregados secos previamente establecida. Esto se muestra en la Figura 11.

Finalmente, se encontró como contenido óptimo de mortero seco el correspondiente a 48%, para una relación agua-cemento de 0,6, obteniéndose de esta forma un concreto fresco con asentamiento en cono de Abrams de 9 ± 1 cm, del cual se obtuvieron diez probetas para ser sometidas posteriormente a ensayos de compresión.



Figura 11 – Incrementos de los materiales para la obtención del contenido óptimo de mortero seco.

4.2.3 Determinación de las cantidades de materiales para las otras mezclas

Se elaboraron dos *mezclas* adicionales, siendo una de ellas más rica en cemento ($1:m = 1:3,5$) y la otra más pobre ($1:m = 1:6,5$). En estos hormigones se mantuvo constante el valor óptimo de α encontrado anteriormente. Posteriormente se verificó el asentamiento obtenido con el valor óptimo de α para las otras *mezclas*, tratando de mantener constante la relación agua/materiales secos y para obtener el mismo abatimiento se fueron variando la relación agua-cemento del hormigón de 0,02 en 0,02, hasta obtener el abatimiento definido.

La variación de la relación agua-cemento se realizó mediante incrementos pequeños de agua, necesarios para lograr una variación de a/c de 0,02. Esto se muestra en la Figura 12.



Figura 12 – Incrementos de agua para la variación de a/c de 0,02.

Finalmente, se encontró que las relaciones agua-cemento para lograr el asentamiento definido son de 0,48 y 0,72 para la *mezclas* $1:3,5$ y $1:6,5$, respectivamente. De igual forma, se obtuvieron diez probetas (para cada *mezcla*) las cuales serían sometidas a ensayos de compresión.

La Tabla 2 muestra las proporciones finales de los diferentes materiales para cada una de las *mezclas* preparadas. Estas proporciones fueron obtenidas mediante las ecuaciones (1) y (5)

$$m = a + g \quad (5)$$

donde g es la relación en masa de grava/cemento y a , m ya fueron definidos anteriormente.

TABLA 2 – PROPORCIONES EN MASA (1:ARENA:GRAVA;A/C) PARA UN CONTENIDO DE MORTERO SECO DE 48%

<i>Mezcla fuerte 1:3,5</i>	<i>Mezcla media 1:5</i>	<i>Mezcla pobre 1:6,5</i>
1:1,16:2,34;0,48	1:1,88:3,12;0,6	1:2,60:3,90;0,72

4.2.4 Determinación de la resistencia a compresión de los hormigones

La parte experimental del estudio concluyó con la determinación de las resistencias de los hormigones elaborados mediante el ensayo a compresión de las probetas obtenidas de cada *mezcla* estudiada. Como se indicó anteriormente, de cada *mezcla* se obtuvieron diez probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, las cuales fueron curadas en agua fría hasta el día correspondiente a su respectivo ensayo. Los ensayos fueron realizados a los 9, 14 y 28 días de edad en el Laboratorio de Ready Mix Cochabamba, empresa dedicada a la elaboración y venta de hormigón premezclado. La preparación de las probetas y su respectivo ensayo se ilustran en la Figura 13.



Figura 13 – Preparación y ensayo a compresión de las probetas obtenidas.

4.3 Determinación del volumen de vacíos del hormigón

Adicionalmente fue realizado un análisis de los volúmenes de los componentes del concreto en estado fresco y en estado de hidratación completa, lo cual posteriormente permitió determinar la cantidad de vacíos presentes en el hormigón endurecido, así como las cantidades de los productos de la hidratación.

Para la realización de este análisis se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones (Helene, P. [10]):

- El agua que reacciona en la hidratación (agua químicamente combinada) equivale al 22% de la masa del cemento, es decir, por 1 kg. de cemento, se tiene 0,22 kg de agua químicamente combinada.
- Según Powers, T. C. [6], la reacción de hidratación ocurre con una reducción del volumen equivalente al 25,4% del volumen del agua que reaccionó.
- En base a lo anterior, los microporos formados en la hidratación equivalen a 0,056 dm³ por cada kilogramo de cemento empleado. Considerando el peso específico real del cemento como 2,89 kg/dm³, este valor se comprueba a continuación:

- Volumen de cemento: $1 \text{ [kg]} / 2,89 \text{ [kg/dm}^3\text{]} = 0,346 \text{ [dm}^3\text{]}$
- Volumen de agua que reacciona: $0,22 \text{ [dm}^3\text{]}$
- Volumen total cemento + agua: $0,566 \text{ [dm}^3\text{]}$
- Volumen efectivo: $0,346 + (1-0,254)*0,22 = 0,510 \text{ [dm}^3\text{]}$
- Volumen de microporos de hidratación: $0,566 - 0,510 = 0,056 \text{ [dm}^3\text{]}$

- Por otra parte, el agua adsorbida para la hidratación completa equivale al 18% de la masa de cemento empleada.
- Finalmente, la cantidad mínima de agua para la hidratación completa equivale al 40% de la masa de cemento empleada, valor que se obtiene de la cantidad de agua químicamente combinada y del agua adsorbida.

5. RESULTADOS

5.1 Diagrama de dosificación de hormigones convencionales

A partir de las resistencias obtenidas de los ensayos de compresión, las relaciones agua-cemento para obtener el asentamiento requerido, y las cantidades del cemento empleado en la elaboración de los hormigones en el estudio experimental, fue obtenido el diagrama de dosificación que se muestra en la Figura 14.

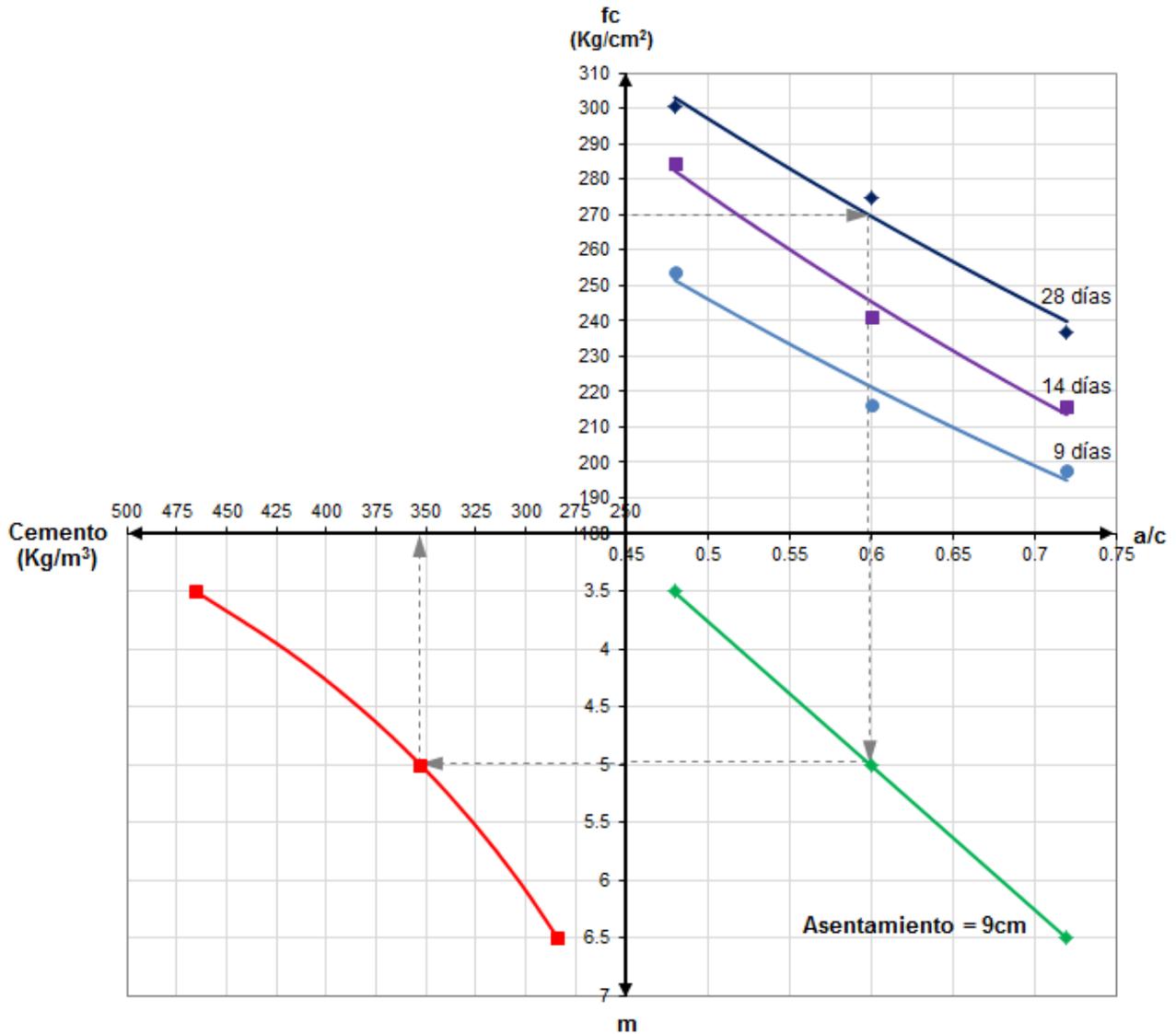


Figura 14 – Diagrama de dosificación.

Las ecuaciones de las leyes en que se basa el diagrama se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3 – ECUACIONES DEL DIAGRAMA DE DOSIFICACIÓN OBTENIDO

Ley de comportamiento del hormigón	Ecuación obtenida	R^2
Ley de Abrams – 9 días	$R = \frac{483,881}{2,651^{(a/c)}}$	0,976
Ley de Abrams – 14 días	$R = \frac{493,741}{3,204^{(a/c)}}$	0,988

Ley de comportamiento del hormigón	Ecuación obtenida	R ²
Ley de Abrams – 28 días	$R = \frac{418,483}{2,889^{(a/c)}}$	0,980
Ley de Lyse – Asentamiento 9 cm	$m = 12,5^{(a/c)} - 2,5$	1,000
Ley de Priszkulnik&Kirilos	$C = \frac{1000}{(0,546 + 0,457m)}$	1,000

5.2 Determinación de los vacíos en la pasta de cemento

Las fracciones del volumen total del concreto que ocupa cada componente del mismo fueron determinadas a partir de las consideraciones señaladas en el apartado 5.3. Esto fue realizado para cada una de las *mezclas* analizadas en el presente estudio. Para cada kg de cemento, se presenta en las Tablas 4 hasta la Tabla 6.

TABLA 4 – VOLÚMENES DE MATERIALES DE LA MEZCLA POBRE (1 : 2,60 : 3,90 ; 0,72)

Hormigón fresco			100 % hidratación			
Componente	Vol.(dm ³)	% Volumen	Componente	Vol.(dm ³)	% Volumen	% Volumen
Aire	0,054	1,50	Aire	0,054	1,50	11,88
H ₂ O capilar	0,320	8,84	Microporos	0,056	1,54	
H ₂ O adsorbida	0,180	4,97	H ₂ O capilar	0,320	8,84	19,06
H ₂ O combinada	0,220	6,08	H ₂ O adsorbida	0,180	4,97	
Cemento	0,346	9,56	Pasta hidratada	0,510	14,09	2,62
Arena	1,000	27,62	Arena	1,000	27,62	
Grava	1,500	41,43	Grava	1,500	41,43	
	3,620			3,620		

TABLA 5 – VOLÚMENES DE MATERIALES DE LA MEZCLA MEDIA (1 : 1,88 : 3,12 ; 0,60)

Hormigón fresco			100 % hidratación			
Componente	Vol.(dm ³)	% Volumen	Componente	Vol.(dm ³)	% Volumen	% Volumen
Aire	0,044	1,50	Aire	0,044	1,50	10,28
H ₂ O capilar	0,200	6,87	Microporos	0,056	1,92	
H ₂ O adsorbida	0,180	6,18	H ₂ O capilar	0,200	6,87	23,69
H ₂ O combinada	0,220	7,55	H ₂ O adsorbida	0,180	6,18	
Cemento	0,346	11,88	Pasta hidratada	0,510	17,51	24,82
Arena	0,723	24,82	Arena	0,723	24,82	
Grava	1,200	41,20	Grava	1,200	41,20	
	2,913			2,913		

TABLA 6 – VOLÚMENES DE MATERIALES DE LA MEZCLA FUERTE (1 : 1,16 : 2,34 ; 0,48)

Hormigón fresco			100 % hidratación			
Componente	Vol.(dm ³)	% Volumen	Componente	Vol.(dm ³)	% Volumen	% Volumen
Aire	0,033	1,50	Aire	0,033	1,50	7,66
H ₂ O capilar	0,080	3,63	Microporos	0,056	2,53	
H ₂ O adsorbida	0,180	8,16	H ₂ O capilar	0,080	3,63	
H ₂ O combinada	0,220	9,98	H ₂ O adsorbida	0,180	8,16	31,30
Cemento	0,346	15,69	Pasta hidratada	0,510	23,13	
Arena	0,446	20,23	Arena	0,446	20,23	20,23
Grava	0,900	40,81	Grava	0,900	40,81	40,81
	2,205			2,205		

El resumen del proceso anterior se presenta en la Tabla 7. Se observa que la mayor cantidad de vacíos en la pasta de cemento ocurre en la *mezcla* pobre, y por tanto, el que presenta una mayor relación agua-cemento. Esto resulta ser bastante lógico ya que en dicha *mezcla* fue necesario incorporar una mayor cantidad de agua para lograr el asentamiento definido, lo cual en el tiempo se traduce en una mayor cantidad de vacíos en el concreto endurecido.

TABLA 7 – FRACCIONES DEL VOLUMEN TOTAL QUE OCUPAN LOS COMPONENTES DEL CONCRETO

Pastón en masa	Consumo de cemento (kg/m ³)	Agregados (%)	Pasta de cemento	
			Gel hidratado (%)	Vacíos (%)
1 : 2,60 : 3,90 ; 0,72	276	69,05	19,06	11,88
1 : 1,88 : 3,12 ; 0,60	343	66,02	23,69	10,28
1 : 1,16 : 2,34 ; 0,48	453	61,04	31,30	7,66

5.3 Validación del diagrama de dosificación obtenido

El diagrama fue verificado mediante una dosificación de prueba para la obtención de un hormigón de 290 kg/cm² a 28 días de edad. Para ello, fueron elaboradas nueve probetas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, las cuales fueron curadas en agua fría y posteriormente ensayadas a los 9, 14 y 28 días. Los resultados de esta verificación se muestran en la Tabla 8.

TABLA 8 – RESULTADOS DE VERIFICACIÓN DEL DIAGRAMA DE DOSIFICACIÓN

Edad (días)	Resistencia obtenida (kg/cm ²)	Resistencia obtenida promedio (kg/cm ²)	Resistencia calculada según diagrama (kg/cm ²)
9	224,31	216,97	239,74
	214,29		
	212,30		
14	260,14	259,59	267,87
	249,17		
	269,46		
28	313,58	305,26	290,00
	301,48		
	300,73		

De acuerdo a la Tabla 8 y a la Figura 15, puede evidenciarse que la resistencia obtenida a los 9 días es un 9% menor, a los 14 días esta diferencia es 3% menor y a los 28 días es un 5% mayor que las obtenidas por el método experimental. Estas diferencias muestran que el hormigón es un material heterogéneo y por más cuidado que se tenga sus resultados siempre están sujetos a errores durante el preparo del hormigón, confección de las probetas y durante el ensayo.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, se concluye que el Método Experimental resulta ser bastante eficiente, práctico y de sencilla aplicación, por lo que resulta adecuado para la obtención de hormigones en distintos proyectos, siendo capaz de proporcionar hormigones que cumplan con requisitos más elevados.

Adquiere mucha importancia la determinación de mortero seco, porque una deficiencia del mismo puede provocar porosidad y presencia de *cangrejas* en el hormigón y un exceso provoca un aumento del costo del hormigón, aumentado el riesgo de fisuración por retracción y calor de hidratación.

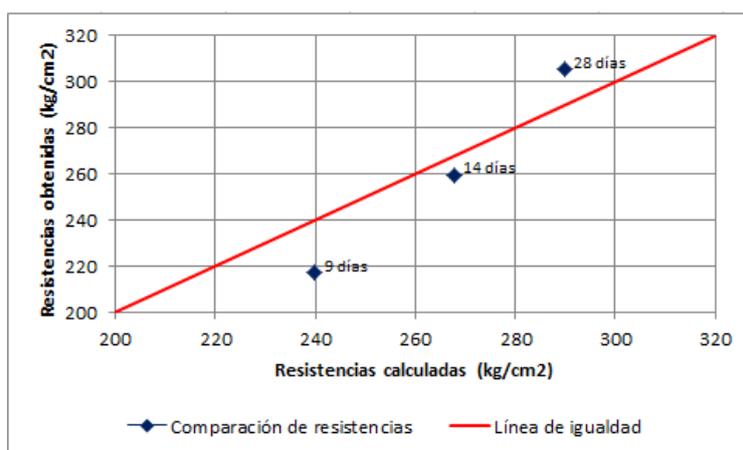


Figura 15 – Ilustración de la precisión del diagrama de dosificación.

Por otra parte, el diagrama de dosificaciones obtenido presenta un grado de precisión bastante aceptable, por lo que se recomienda su aplicación siempre y cuando se empleen agregados bastante similares y el mismo cemento para la elaboración del concreto.

Este método resulta muy valioso por su simplicidad y su uso es obligatorio para realizar cualquier trabajo de investigación en laboratorio, especialmente donde los modelos a ser ensayados necesiten una determinación de la mezcla del hormigón para una determinada resistencia.

Se ha visto también que se puede calcular el % de poros en el hormigón considerando la teoría propuesta por Powers, T. C. [6], donde muestra que a mayor cantidad de a/c, mayor es la porosidad.

7. REFERENCIAS

- [1] S. H. Kosmatka et al. *Design and Control of Concrete Mixtures, 14th Edition, PCA Engineering Bulletin EB 001*. Skokie, IL : Portland Cement Association, 2002. ISBN: 0-89312-217-3
- [2] P. K. Mehta y P. J. M. Monteiro. *CONCRETO Microestructura, Propiedades e Materiais*. Sao Paulo : IBRACON, 2008. ISBN: 978-85-98576-12-1.
- [3] A. García et al. *Jiménez Montoya Hormigón Armado*. Barcelona : Gustavo Gili S.A., 2011. ISBN: 978-84-252-2307-5.
- [4] E. G. R. Petrucci. *Concreto de Cimento Portland*. : ABCP, 1968.
- [5] B. Tutikian y P. Helene. “Capítulo 12. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland.” *Concreto: Ciência e Tecnologia*. s.l. : IBRACON, 2011.
- [6] T.C. Powers. *The Properties of Fresh Concrete*. s.l. : John Wiley & Sons, Inc., 1968. ISBN: 471 69 590 4.
- [7] P. Helene y P. Terzian. *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*. São Paulo: PINI, 1995. ISBN: 85-7266-007-0
- [8] IME. Instituto Militar da Engenharia. Internet: <http://aquarius.ime.br/~moniz/matconst2/conc10.pdf>. [Sep. 21, 2012.]

- [9] P.C. Taylor et al. *Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State-of-the-Practice Manual*. Washington D.C. : U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration, 2007.
- [10] P. Helene. *Estrutura Interna do Concreto*. Sao Paulo : USP, 2008.