

¿ESTAMOS CONSIDERANDO RELACIONES AGUA - CEMENTO IRREALES? (*)



Por SANDRO ROCCI BOCCALERI
Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

JOAQUIN PENAS LADO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

La estimación correcta de la absorción de los áridos, por su influencia en la relación agua/cemento de un hormigón, es no sólo de importancia teórica sino también práctica, pues puede permitir un mayor aprovechamiento de los métodos de dosificación con buen resultado económico. Se propone un método de determinación del estado "saturado superficie seca", que presenta la ventaja de su mayor racionalidad, poca dispersión y proporcionar un criterio único para áridos gruesos y finos.

La relación agua-cemento es, posiblemente, el parámetro más influyente en la compacidad y resistencia de un hormigón, debido a que de ella depende la porosidad de la pasta que, junto con el aire ocluido, forma una matriz en la que está dispersado el árido. Las propiedades mecánicas de esta matriz son, más que las propias de los áridos, las que determinan la resistencia; y dichas propiedades mecánicas dependen, en gran parte, de la porosidad de la pasta.

Inicialmente, la pasta contiene agua, cuyo volumen representa huecos después que ha fraguado y endurecido el hormigón. Sin embargo, al reaccionar el cemento con el agua, los productos resultantes tienen un volumen superior al del cemento originalmente presente (del orden del 60 por 100 si no hay formación de sulfatoaluminato cálcico por la presencia de sulfatos). Así, un gramo de cemento, que ocupa $1/3,1 = 0,32 \text{ cm}^3$, requiere $0,6 \times 0,32 = 0,19 \text{ cm}^3$ de espacio adicional para alojar los productos de la hidratación. Esto significa que, para una relación agua-cemento igual a 0,19 la pasta se convierte, teóricamente, en un sólido sin huecos.

Sin embargo, la estructura de los productos formados al hidratarse el cemento, y especialmente los geles, modifica este esquema, puesto que dichos productos presentan poros pequeños en proporción prácticamente constante (del orden del 28 por 100 del volumen aparente

del gel). Resulta entonces que, en lugar de $0,19 \text{ cm}^3/\text{g}$ de espacio adicional, se necesitan:

$$\frac{1 + 0,60}{1 - 0,28} \times 0,32 \text{ cm}^3/\text{g} = 0,38 \text{ cm}^3/\text{g}$$

Por consiguiente, si una pasta tiene una relación agua-cemento inferior a 0,38, parte del cemento no consigue hidratarse por falta de espacio; mientras que si la relación agua-cemento es superior a 0,38, sobra espacio después de hidratarse el cemento, y este espacio forma una red capilar de poros que disminuye la resistencia de la pasta.

Por todo lo que antecede, se comprende que la relación entre el agua que inicialmente (en el momento de puesta en obra) compone la pasta, y el cemento, tiene una influencia preponderante en la resistencia, influencia reconocida desde 1918 por Abrams. Es muy corriente hablar de la relación agua-cemento de un hormigón; pero frecuentemente se omite el hecho de que el agua a la que se refiere la relación anterior es *agua libre*, es decir, el agua total menos la que tienen absorbida los áridos.

La mayoría de los áridos son porosos, pudiéndose distinguir entre su sistema de poros internos, no conexo con el exterior y que no influye en la absorción de agua, y el sistema de poros conexo con el exterior, capaz de absorber agua que no reaccionará con el cemento. La determinación de la fracción del volumen aparente del árido que representa el volumen de

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta revista hasta el 31 de enero de 1977.

dichos poros conexos es, forzosamente, experimental, y se realiza por diferencia de peso entre un árido saturado con superficie seca (en el que todos dichos poros están llenos de agua) y el mismo árido seco en estufa. Existen normas al respecto, tales como las NLT 153 y 154; pero precisamente la dificultad estriba en apreciar cuándo un árido, inicialmente saturado en exceso, se ha secado hasta el estado de superficie seca, mediante un criterio que, sobre todo en el caso del árido fino (arena), creemos que es bastante arbitrario.

El objeto de este artículo es mostrar los resultados obtenidos con un nuevo método de determinación del estado saturado con superficie seca de un árido, que creemos es más racional y, además, es aplicable igualmente a áridos gruesos y finos, y con el que se obtienen valores de absorción muy parecidos a los del método clásico para los áridos gruesos, pero distintos para el fino.

El método se basa en hacer pasar una corriente de aire saturado por el interior de la masa de una muestra de áridos, previamente

sumergida veinticuatro horas en agua y secada *grosso modo* hasta un estado próximo al saturado con superficie seca (para evitar pérdidas de tiempo y facilitar la circulación del aire por la masa), e ir pesando el árido cada cierto intervalo de tiempo (alrededor de un cuarto de hora). Representados estos valores en un diagrama pesos-tiempos como el de la figura 1, se define el punto de saturación con superficie

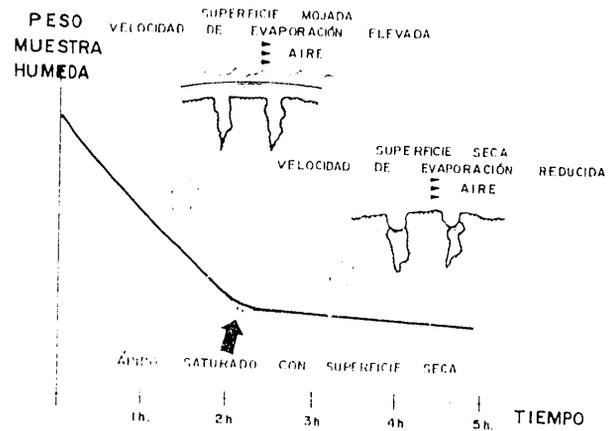


Figura 1.

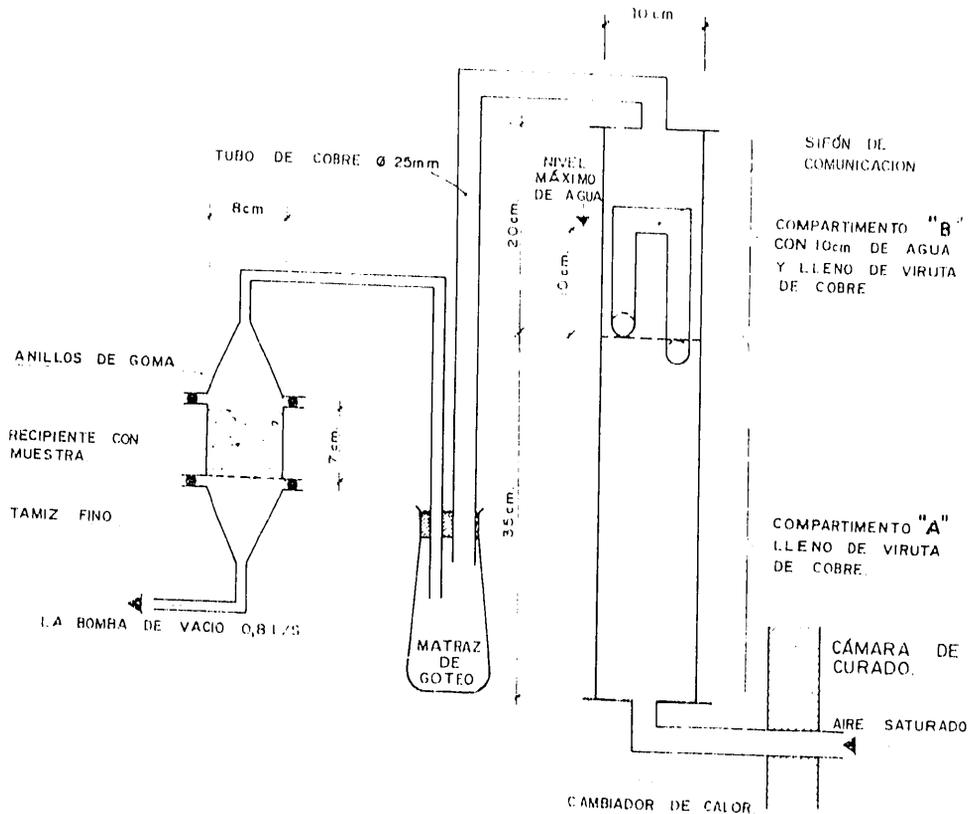


Figura 2.

seca tal como se muestra en la misma. No hay, entonces, más que hallar el peso seco en estufa de la muestra empleada para poder obtener la absorción.

El fundamento físico consiste, en primera aproximación, en ser distinta la velocidad de pérdida de agua por evaporación cuando dicha agua ocupa la superficie del árido y cuando sólo existe en el interior de los poros. El emplear aire saturado es fundamental, pues acentúa mucho la diferencia de velocidad de evaporación: ya que cuando el árido tiene agua en su superficie, la disminución de presión debida a la velocidad del aire en contacto con ella hace que, a pesar de estar la superficie saturada en principio, absorba agua en forma de vapor; lo que no sucede en los poros, dentro de los cuales el aire no tiene apenas velocidad, siendo entonces la evaporación casi nula.

Para el empleo de este método es necesario el siguiente material:

- Una fuente de aire saturado o casi saturado (humedad relativa 95 por 100).

Por ejemplo, una cámara húmeda para curado de probetas de hormigón.

- Un cambiador de calor, para que el aire saturado procedente de la fuente tome la temperatura del local donde se efectúa el ensayo, que debe ser constante y, por lo menos, 1° C inferior a la de la cámara húmeda o fuente de aire saturado. Según nuestras experiencias no debe ser tampoco inferior en más de 3 ó 4° C a ella, para evitar problemas de condensación de agua en el aparato.
- Un recipiente para la muestra, abierto por su parte superior y con un tamiz # 200 ASTM en la inferior para evitar que se salga la muestra, y que se acopla a dos piezas troncocónicas auxiliares por medio de cierres herméticos con arandelas de caucho. De estas piezas, una es para conectarlo a la conducción de aire procedente del cambiador de calor y otra para la que termina en la bomba de vacío.

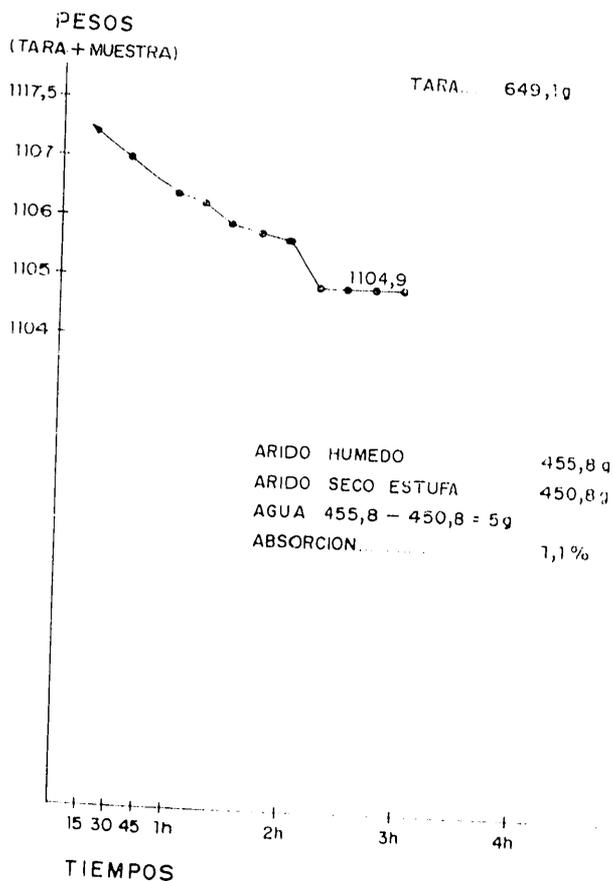


Fig. 3. — Arido machacado grueso calizo.

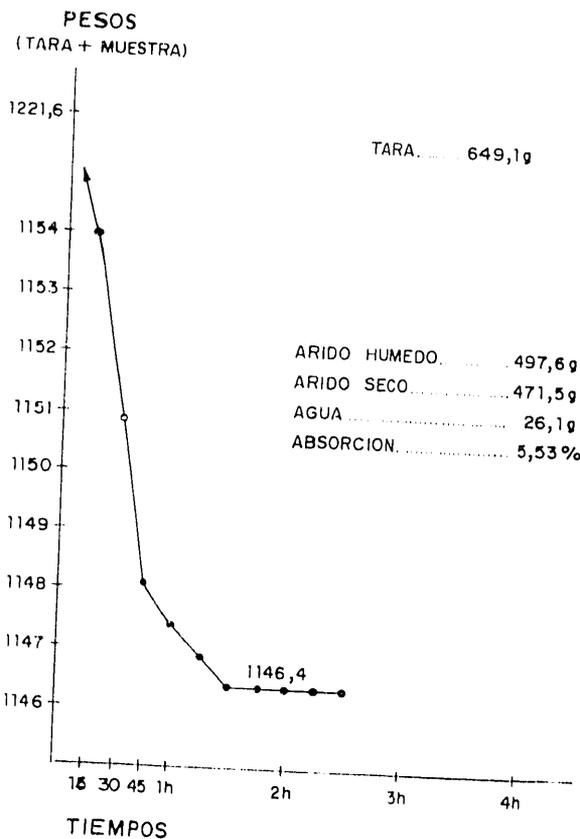


Fig. 4. — Arena de río caliza.

-- Una bomba de vacío que debe succionar un caudal de, aproximadamente, 0,8 litros por segundo. En nuestro caso se ha usado un pequeño compresor de taller, con el equipo de purga del calderín abierto y la conducción conectada a la toma de aire, colocando antes un recipiente de bastante volumen para amortiguar las emboladas del compresor y

producir un caudal prácticamente constante.

En las figuras 3 y 4 se representan dos ejemplos de curvas experimentales obtenidas con este aparato en dos áridos: uno grueso y otro fino.

Los primeros resultados experimentales obtenidos, comparados con el método expuesto en las NLT 153 y 154, son los siguientes:

| Tipo de árido | Procedencia | Medias | | Desviación-tipo (aire saturado) |
|-------------------------|---|--------|---------------|---------------------------------|
| | | NLT | Aire saturado | |
| Grueso, machacado | Río Júcar (95 %, CO ₂ /Ca) | 1,43 | 1,47 | 0,17 |
| Fino, natural | Río Júcar (25 %, CO ₂ /Ca) | 2,54 | 5,38 | 0,12 |
| Fino, natural | Río Jarama (0 %, CO ₂ /Ca) | 1,55 | 4,58 | 0,14 |

Se observa lo siguiente:

- La buena reproducibilidad de los resultados con el método del aire saturado (desviaciones típicas pequeñas).
- Los parecidos resultados, en el caso del árido grueso, proporcionados por ambos métodos.
- La mayor absorción del árido fino, tanto calizo como silíceo, detectada por el método del aire saturado y de difícil apreciación en el método NLT.

La discrepancia observada no es baladí, como se comprueba aplicando estos resultados a una dosificación como la siguiente, empleada en las obras del nuevo puente sobre el río Júcar, en Cuenca:

| | Por m ³ | Por amasijo de 1/3 m ³ |
|---------------------|--------------------|-----------------------------------|
| Arido grueso | 645 Kg | 215 Kg |
| Arido | 423 Kg | 141 Kg |
| Arido fino | 768 Kg | 256 Kg |
| Cemento P-450 | 400 Kg | 133,3 Kg |
| Agua amasadura ... | 160 l | 53,3 l |

Las características de los áridos son las siguientes:

| | Absorción (% peso húmedo) | Humedad (% peso húmedo) |
|--------------------|---------------------------|-------------------------|
| Arido grueso | 1,47 | 0,20 |
| Arido medio | 1,47 | 1,40 |
| Arido fino | 5,38 | 4,60 |

Las dosificaciones de áridos corregidas por humedad serán:

| | |
|--------------------|--|
| Arido grueso | $\frac{215}{1-0,002} = 215 \text{ Kg}$ |
| Arido medio | $\frac{141}{1-0,014} = 143 \text{ Kg}$ |
| Arido fino | $\frac{256}{1-0,046} = 268 \text{ Kg}$ |

y el agua total presente será:

| | |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| Humedad del árido grueso | $215 \times 0,002 = 0,4 \text{ l}$ |
| Humedad del árido medio | $143 \times 0,014 = 2,0 \text{ l}$ |
| Humedad del árido fino | $268 \times 0,046 = 12,3 \text{ l}$ |
| Agua de amasadura | 53,3 l |
| TOTAL | 68,0 l |

La relación agua-cemento así calculada sería $68/133,3 = 0,51$. Si descontamos del agua total la absorbida, según el método NLT, se tendrá:

| | |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| Agua absorbida por el árido grueso. | $215 \times 0,0143 = 3,1$ l |
| Agua absorbida por el árido medio.. | $143 \times 0,0143 = 2,0$ l |
| Agua absorbida por el árido fino.... | $268 \times 0,0254 = 6,8$ l |
| | ----- |
| Suma | 11,9 l |
| Agua libre | 56,1 l |
| | ----- |
| TOTAL | 68,0 l |

con una relación agua libre-cemento igual a $56,1/133,3 = 0,42$. Si descontamos, en cambio, el agua absorbida, según el método del aire saturado, se tendrá:

| | |
|--------------------------------------|------------------------------|
| Agua absorbida por el árido grueso. | $215 \times 0,0147 = 3,2$ l |
| Agua absorbida por el árido medio.. | $143 \times 0,0147 = 2,1$ l |
| Agua absorbida por el árido fino.... | $268 \times 0,0538 = 14,4$ l |
| | ----- |
| Suma | 19,7 l |
| Agua libre | 48,3 l |
| | ----- |
| TOTAL | 68,0 l |

lo cual baja la relación agua libre-cemento a $48,3/133,3 = 0,36$. ¡La diferencia de relaciones agua-cemento supone 6 puntos en porcentaje!

Es interesante observar la influencia de estas relaciones agua-cemento en la propiedad fundamental del hormigón: su resistencia, estimada por algunos de los métodos de dosificación usuales, y que en el presente caso se determinó experimentalmente como una media a compresión de 480 Kgf/cm^2 a veintiocho días. Así, por ejemplo, en la fórmula de De la Peña:

$$z = \frac{1}{A/C} = K_2 R_m + 0,5$$

se obtendrá, partiendo de $A/C = 0,36$ y $R_m = 480$:

$$K_2 = \frac{1/0,36 - 0,5}{480} = 0,0047$$

mientras que, para este mismo K_2 , la relación $A/C = 0,42$ dada por el método NLT habría estimado la resistencia en:

$$R_m = \frac{1/0,42 - 0,5}{0,0047} = 400 \text{ Kgf/cm}^2$$

es decir, 80 Kgf/cm^2 menos (un 16,7 por 100).

Para obtener en este último una resistencia de 480 Kgf/cm^2 haría falta emplear una relación $A/C = 0,36$, o sea, una dosificación de cemento igual a $56,1 \times 0,36 = 155 \text{ Kg}$, o sea, $155 \times 3 = 466 \text{ Kg/m}^3$. Es decir, 66 Kg/m^3 más de cemento (un 16,7 por 100).

Se comprueba así el interés teórico y práctico de estimar correctamente la absorción de los áridos.

Como resumen, se ofrece un método, el del aire saturado, para la determinación de la absorción de los áridos, que presenta, a nuestro juicio, las siguientes ventajas:

- Determinación clara del estado "saturado con superficie seca".
- Criterio único para áridos gruesos y finos.
- Poca dispersión experimental.
- Mayor aprovechamiento de los métodos de dosificación al uso, con ahorro de cemento para alcanzar una misma resistencia.