

La relación agua/cemento ¿Para qué sirve y cómo no se la puede medir?

Roberto J. Torrent, Ing. Civil, PhD, Presidente Honorario de la AATH

torrent.concrete@gmail.com

1. Objetivo

El objetivo de este artículo es revisar conceptos y mitos acerca del que es, posiblemente, el indicador más importante y utilizado, de la calidad de un hormigón con una dada composición: la relación agua/cemento (a/c).

2. Definición de la relación a/c

Veamos algunas definiciones:

IRAM 1666:2020 - relación agua/cemento (a/c). Cociente entre la masa del agua de amasado y la masa del cemento. La relación agua/cemento también es conocida como relación agua/material cementicio.

CIRSOC 201:2005 – la llama razón agua/cemento, pero no la define. En la sección 4.5.2.1 se esboza un modo de determinarla, donde se enumeran las variables a considerar, pero no se da una fórmula definida de cálculo. Volveremos sobre este tema.

Basándonos en la norma ASTM C125: “Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates” la podemos definir así:

Relación agua/cemento – la relación entre la masa de agua, excluyendo la absorbida por los agregados, y la masa de cemento en una mezcla cementícea (esta definición vale cuando la mezcla contiene solamente cemento portland como ligante), o sea:

$$\frac{a}{c} = \frac{\text{masa de agua efectiva en la mezcla}}{\text{masa de cemento en la mezcla}} \quad (1)$$

El agua efectiva es el agua agregada a la mezcla + la aportada por los aditivos químicos (habitualmente despreciable) y la aportada por los agregados húmedos, menos la absorbida por estos últimos.

En el caso de agregarse al hormigón materiales cementíceos suplementarios (MCS): cenizas volantes u otras puzolanas, escoria molida o humos de sílice, el denominador en la Eq. (1) debe contemplarlos. En Norteamérica suele sumarse el contenido de MCS al del cemento, en cuyo caso podemos hablar de una relación agua/cementante. En Europa, a cada MCS se le asigna un factor K, que se relaciona con la contribución hidráulica del MCS, por lo que se habla de una relación agua/ C_{eq} , donde C_{eq} es el contenido 'equivalente' de cemento de la mezcla = masa de cemento + K × masa de MCS.

Para simplificar el análisis que sigue, supongamos que el hormigón no lleva MCS.

3. ¿Qué mide la relación a/c ?

La relación agua/cemento es el cociente entre la masa de agua efectiva y la de cemento, en la mezcla de hormigón. Entonces, la relación agua/cemento en masa, o mejor en volumen, dividiendo numerador y denominador por la densidad del agua y del cemento, respectivamente, nos indica el volumen de agua en los que se encuentran en suspensión los granos de cemento. Por lo tanto, la relación a/c mide, para un cemento dado, el grado de dispersión de las partículas de cemento. A mayor relación a/c , mayor será el grado de dispersión de las partículas de cemento en el agua y, por lo tanto, mayor será la distancia que separa a una de otras.

Entonces, ¿cómo es posible que se le asigne tanta importancia a un parámetro que solamente mide el grado de dispersión de las partículas de cemento en el agua de la mezcla?

En efecto, para el diseño de mezclas suele establecerse una relación entre la resistencia a compresión a 28 días y la relación a/c . La Fig. 1 muestra la función propuesta en ACI 211, para el diseño de mezclas de hormigón.

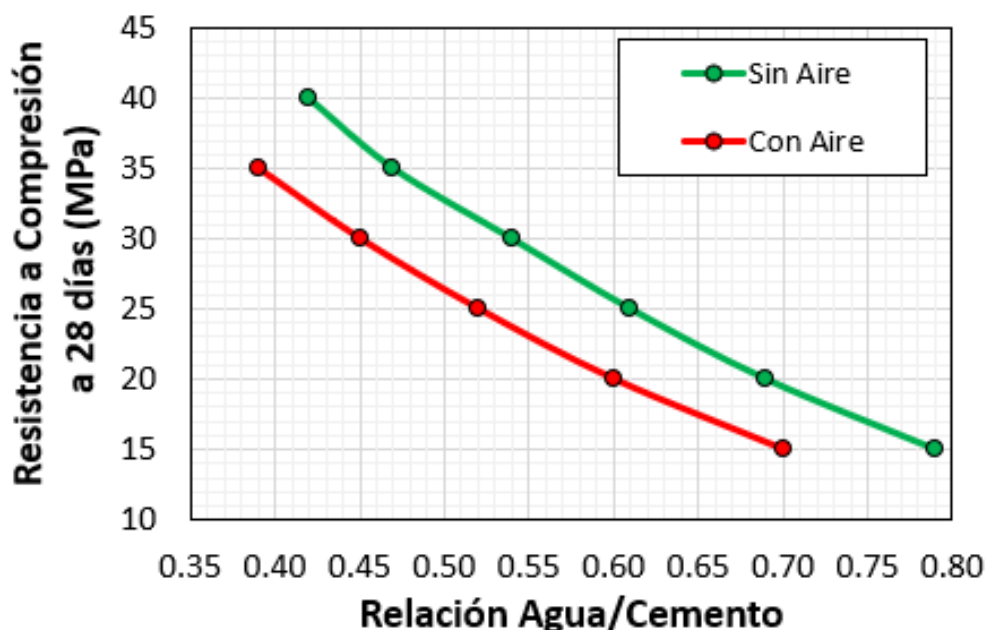


Figura 1 – Ejemplo de relación entre resistencia a compresión a 28 días y relación a/c

El uso de la relación agua/cemento para estimar la resistencia, se basa en el trabajo de Duff Abrams, quien estableció en 1918 la ley que aún hoy lleva su nombre, expresando: “para dados materiales, la resistencia del hormigón (en tanto sea de consistencia plástica) depende solamente de la cantidad relativa de agua a la de cemento, independientemente del tamaño y granulometría de los agregados”.

Es común expresar matemáticamente la ley de Abrams como:

$$f'_c = \frac{A}{B^{a/c}} \quad (2)$$

Donde f'_c es la resistencia a compresión del hormigón con relación a/c y A y B son parámetros que dependen de los constituyentes usados, del contenido de aire, temperatura, etc.

Es interesante destacar que en Sudáfrica suele usarse la relación cemento/agua, que conduce a la expresión más simple (el autor la ha usado para ciertos análisis, dada su simplicidad):

$$f'_c = a + b \cdot c/a \quad (3)$$

Para entender mejor la relación entre resistencia a compresión y a/c , debemos refrescar algunos conceptos de la hidratación del cemento. El más importante, a los fines de este artículo, es que cuando una partícula de cemento anhidro de volumen V_a se hidrata completamente, los productos de hidratación ocupan un volumen V_h que es:

$$V_h \approx 2 \cdot V_a \quad (4)$$

O sea que podemos visualizar físicamente el desarrollo de la hidratación de una partícula de cemento como un avance de los productos de hidratación sobre el volumen que ocupaba el agua que la rodeaba en estado anhidro. Esa agua, que corresponde a la porosidad del hormigón, es la zona débil de la pasta de cemento. La Fig. 2 muestra esquemáticamente el proceso de hidratación de partículas de un mismo cemento dispersas en el agua que las rodea, para una relación a/c alta y otra baja.

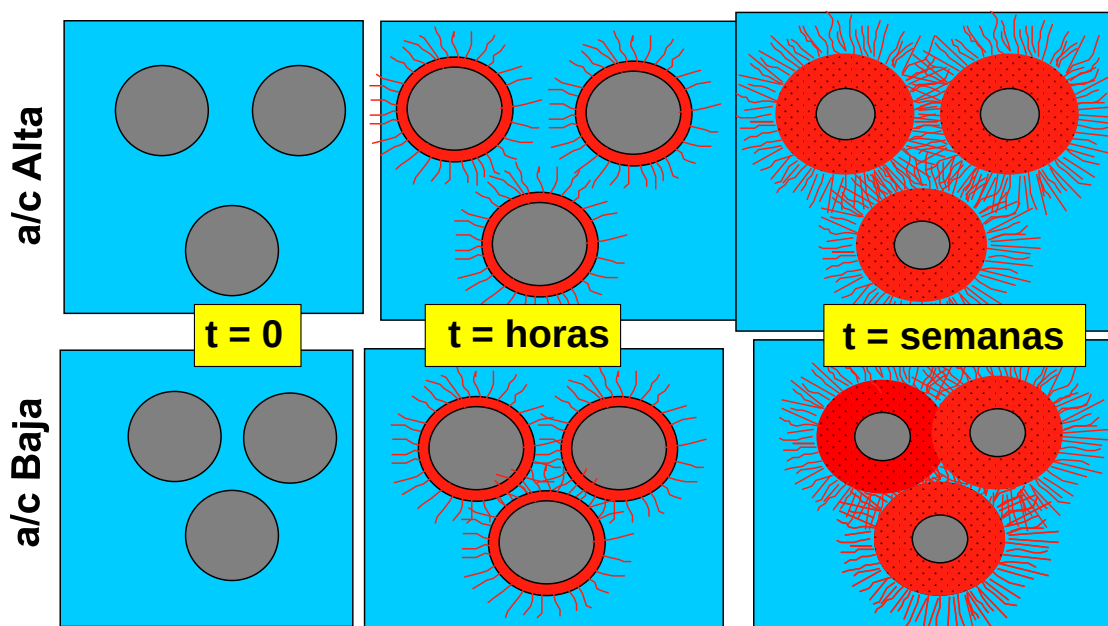


Figura 2 – Diagrama esquemático de la hidratación de pastas con alta y baja a/c

La única diferencia entre ambas pastas es el grado de dispersión de las partículas, que es alto para la relación a/c alta y bajo para la relación a/c baja. O sea que, en el primer caso, la distancia que separa a las partículas es mayor que en el segundo. Podemos suponer sin mayor error que, si la relación a/c de las pastas no es demasiado baja, el desarrollo de la hidratación de las partículas de cemento en ambas pastas es igual. Entonces, luego de algunas horas de contacto con el agua, los productos de hidratación de las partículas con a/c baja, habrán avanzado hasta tomar contacto con los de sus vecinas. En ese momento comienza a rigidizarse

la pasta de a/c baja y sobreviene el fraguado, en tanto que la pasta con a/c alta aún no fragua porque los productos de hidratación de las partículas no han llegado a atravesar la mayor distancia que la separa de sus vecinas.

Al llegar a un grado avanzado de madurez, digamos 28 días (que corresponde a algo así como un 75% de avance de la hidratación), ya los productos de hidratación de las partículas han tomado contacto íntimo con sus vecinas, estableciéndose vínculos moleculares y de fuerzas superficiales que otorgan resistencia y estabilidad al material. Sin embargo, la pasta con mayor a/c , dada la mayor distancia original entre partículas, dejará más espacios sin ocupar por los productos de hidratación, los que constituyen más vacíos y de mayor tamaño. Esto conduce a un material con mayores “defectos” y, por lo tanto, de menor resistencia a la compresión, justificando la forma de la curva de la Fig. 1.

Asimismo, la permeabilidad de la pasta de mayor a/c será mayor por la presencia e intercomunicación de esos vacíos, lo que la hace menos durable. Esto da justificación a los códigos y normas (CIRSOC, ACI, EN) para establecer valores máximos de la a/c por durabilidad. Cuanto más severo es el ambiente al cual estará sometida una estructura, menor será la a/c máxima especificada, para obtener un material con menor volumen de vacíos y poros de menor radio, que obstaculice y retarde el ingreso de Cl^- , SO_4^{2-} , CO_2 , etc. desde el exterior.

Una prueba experimental de lo dicho más arriba se presenta en la Fig. 3, que presenta con líneas llenas la distribución de tamaño de poros¹ (es como una ‘granulometría’ de los poros) de 3 hormigones, confeccionados con los mismos constituyentes, con relaciones $a/c = 0.60$, 0.46 y 0.42, privadas de curado húmedo.

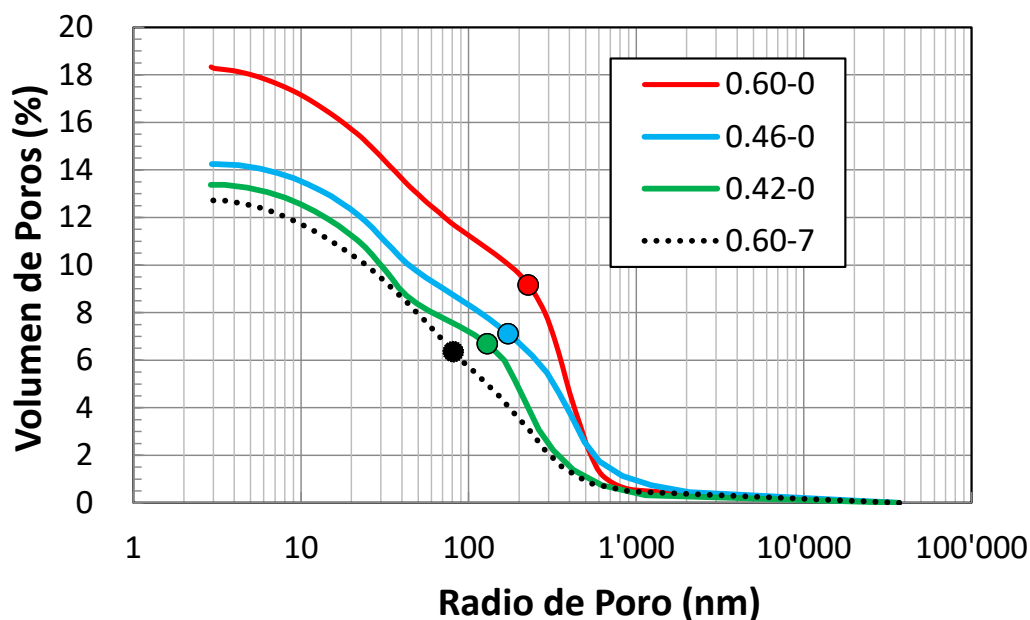


Figura 3 – Distribución de tamaño de poros de hormigones con distintas a/c y curado

¹ Utilizando la técnica de Porosimetría por Intrusión de Mercurio

Puede verse que el hormigón de $a/c = 0.60$ (curva roja llena) es la más alta, o sea con mayor porosidad y, también, que la porosidad decrece al disminuir a/c . Los puntos indicados sobre las curvas corresponden a un valor del radio medio de poros (el que corresponde a la mitad de la porosidad total). Se puede ver que, además de reducir el volumen de poros, disminuir la relación a/c también reduce el tamaño de los poros. La curva negra punteada corresponde al mismo hormigón de $a/c = 0.60$, pero curado 7 días en cámara húmeda. El curado húmedo favorece el crecimiento de productos de hidratación y hace que tanto el volumen como el tamaño de poros se reduzca, consiguiendo una estructura de poros más cerrada aún que la del hormigón de $a/c = 0.42$ sin curado.

4. ¿Para qué sirve la relación a/c ?

Un uso muy práctico de la relación a/c es en el diseño de mezclas, pudiéndose utilizar el gráfico de la Figura 1 para diseñar una mezcla de 30 MPa de resistencia media (sin aire incorporado), que resultaría con $a/c = 0.54$.

El problema es que gráficos como el de la Fig. 1 no son universales. Para empezar, no todos los cementos conducen a, cualitativa y cuantitativamente, los mismos productos de hidratación, sino que éstos dependerán de la composición del clínker y del proceso de clinkerización en el horno de cemento, de la finura de molienda, del tipo y contenido de regulador de fraguado (“yeso”) que se emplee, etc. Esto, sin considerar el efecto de otros constituyentes sobre la resistencia a compresión del hormigón, en especial del tipo de agregados. Un diagrama parecido al de la Fig. 1 se muestra en la Fig. 4, donde se intenta complejizar la situación haciendo intervenir, aparte del aire incorporado, a la clase de resistencia del cemento y al tipo de agregado².

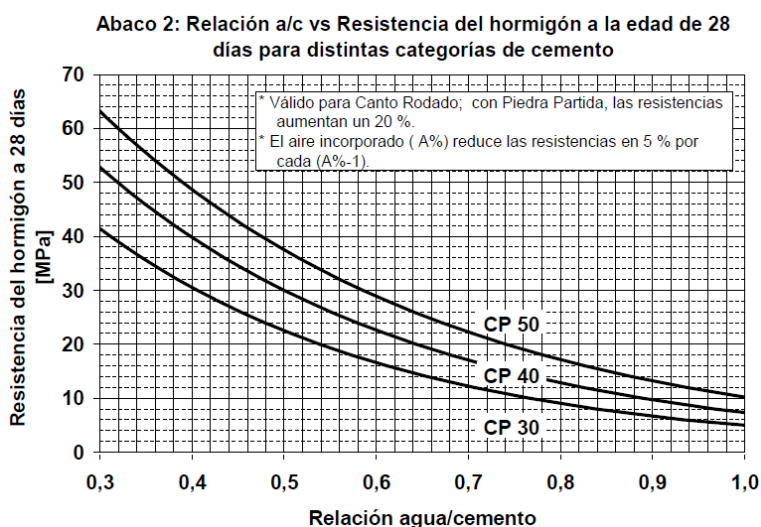


Figura 4 – Relación entre resistencia a compresión y a/c , considerando la clase de resistencia del cemento

² <https://icpa.org.ar/wp-content/uploads/2022/11/Diseno-racional-de-mezclas-de-hormigon-Metodo-ICPA.pdf>

Nótese que la curva para cemento CP40 corresponde bastante bien a la de la Fig. 1 (sin aire).

En general, lo que se hace, si no hay datos previos de hormigones elaborados con los mismos constituyentes, es hacer mezclas de prueba. Si, por ejemplo, se desea un hormigón con resistencia media de 30 MPa y se utiliza un cemento de categoría 40, según la Fig. 4, se necesitaría una $a/c = 0.50$. Luego, se podrían preparar mezclas con $a/c = 0.45$, 0.50 y 0.55 , ensayarlas y, por interpolación de resultados de resistencia, obtener la a/c de diseño.

La Figura 5 muestra la relación entre el coeficiente de permeabilidad al aire kT (IRAM 1892) y la relación a/c .

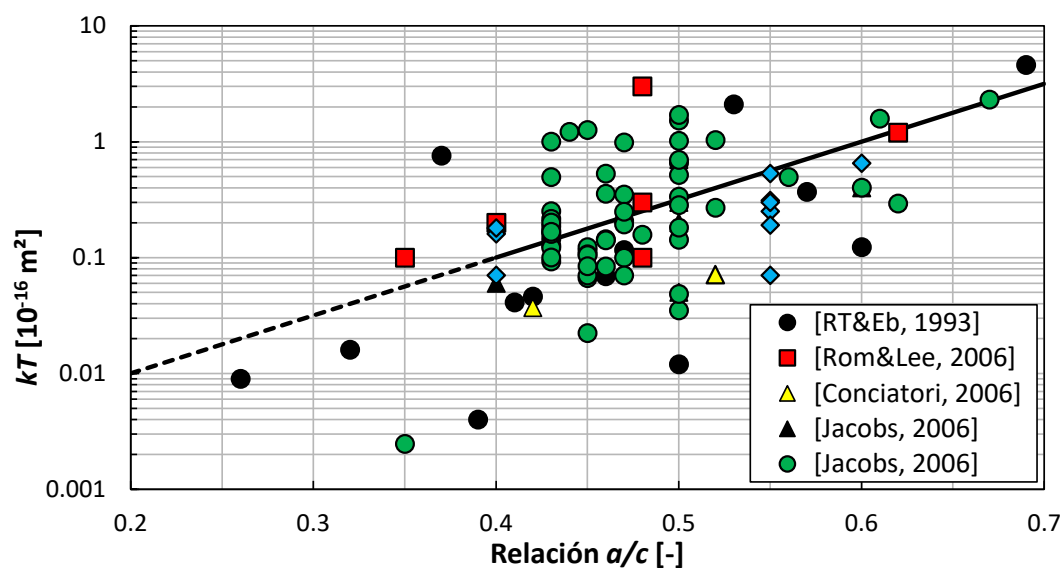


Figura 5 – Relación entre el coeficiente de permeabilidad al aire kT (IRAM 1892) y a/c

Puede verse que, si bien los datos experimentales se ajustan razonablemente bien a la tendencia indicada por la ecuación (5), sugerida en³, se observa que para la misma a/c hay una gran disparidad de valores, fruto del efecto de las características de los constituyentes.

$$kT (m^2) = 10^{-19+5 \cdot a/c} \quad (5)$$

De todos modos, la ecuación (5) puede servir como primera aproximación para el diseño de mezclas por permeabilidad, a fin de preparar mezclas de prueba.

5. Determinación de la relación a/c

Existen dos casos totalmente diferentes de determinación de la relación a/c :

- Determinación de a/c en el laboratorio
- Determinación de a/c a escala industrial

³ CEB/FIP (1991), "CEB-FIP Model Code 1990", CEB Bull. d'Information No. 203, 1991.

5.1 Determinación de la relación a/c en el laboratorio

La determinación de a/c en el laboratorio es necesaria cuando se preparan mezclas de prueba, para conocer su valor con buena precisión.

La determinación es bastante sencilla y muy precisa. Se mide (en masa) la cantidad de agua que se agrega directamente a la mezcladora W_m , lo mismo que la del cemento C . Luego se pesan las n fracciones de agregados utilizados en su condición de uso, A_i ($i=1$ a n). Se mide la humedad de cada fracción de agregado h_i , de las que se conoce su absorción a_i . Podemos despreciar la cantidad de agua que llevan los aditivos (si no, se la agrega en el numerador) y se calcula la relación a/c con la ecuación (6).

$$\frac{a}{c} = \frac{W_m + \sum_{i=1}^n A_i \frac{h_i - a_i}{h_i + 1}}{C} \approx \frac{W_m + \sum_{i=1}^n A_i (h_i - a_i)}{C} \quad (6)$$

5.2 Determinación de la relación a/c a escala industrial

Esta determinación es importante, tanto para el productor como para el receptor de hormigón, ya que el CIRSOC 201: 2005 establece valores máximos de a/c para cumplir con los requisitos de durabilidad de las estructuras.

El mismo código establece en el apartado 4.5.2.1 un procedimiento de determinación de a/c , que se transcribe: *“Cuando se exija una razón agua/cemento máxima, ella se debe verificar a partir de los pesos de los materiales empleados en la producción de los pastones. Los valores de las pesadas deben ser tomados de los registros impresos o relevados de los equipos de pesada. En la determinación del contenido de agua, se debe considerar la humedad superficial y el agua absorbida de los agregados. El agua absorbida por los agregados se debe determinar para un tiempo de inmersión de veinticuatro horas. En caso de agregados muy absorbentes dicha determinación se debe realizar también para un tiempo de inmersión de 60 min”*. Lamentablemente falta indicar que dichos datos deben aplicarse a la ecuación (6) para calcular a/c . Todo parece muy sencillo y, sin embargo, hay enormes lagunas en el proceso, que se detallan a continuación y que hacen que la relación a/c determinada de esta manera sea cuestionable y que se informen valores de a/c muy diferentes a los reales.

5.2.1 *Incertidumbre en la cantidad de agua añadida W_m*

Empecemos por el numerador de la ecuación (6). El valor W_m parece claro e indiscutible, ya que sería la masa de agua medida en la planta para la carga de un camión y registrada en el protocolo de carga. Pero ¿estamos seguros de que el tambor del camión estaba vacío al llegar al punto de carga o podría tener restos del agua del lavado previo a la carga?

Asimismo, ¿estamos seguros de que toda el agua que lleva el camión es la medida durante la carga? Existe una práctica muy difundida en la industria que es el llamado “slumping” en

inglés, que es el ajuste “a ojo de buen cubero” del asentamiento, mediante la adición extra de agua por parte del conductor antes de salir de la planta (ver Figura 6).

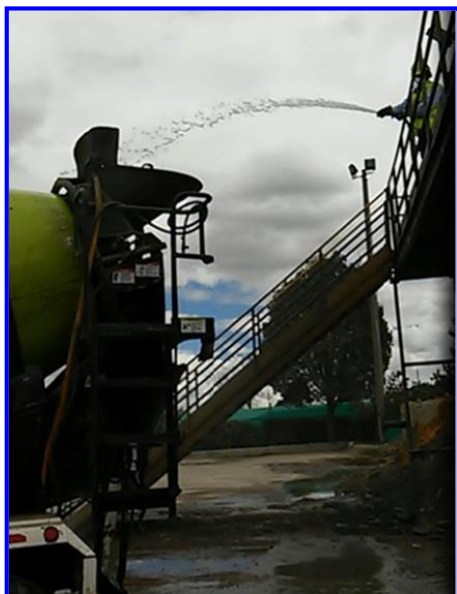


Figura 6 – Ajuste del asentamiento en una planta de hormigón, mediante adición de agua al tambor durante el lavado previo a la salida del camión.

Este mismo proceso puede efectuarse al arribo del camión a obra donde, o por propia iniciativa o por indicación del contratista, se agrega agua al camión para aumentar el asentamiento de la mezcla. El autor tuvo la experiencia de ver cómo se agregaban 30 litros/m³ a un pequeño camión que entregaba hormigón, afortunadamente para un patio domiciliario.

Examinemos ahora el segundo término del numerador de la ecuación (6) que considera el agua aportada por las fracciones de agregado, habitualmente almacenadas y pesadas con humedad superficial (o sea $h_i > a_i$). Supongamos que los valores de absorción a_i utilizados en la planta sean correctos. La aplicación de la ecuación (6) requiere un conocimiento bastante preciso de la humedad h_i de cada fracción de agregado utilizada, pero especialmente de la(s) arena(s), la que debe ingresarse al sistema de control de carga de la planta. Esta humedad suele ser variable durante la jornada de trabajo.

Esto puede hacerse manualmente, tomando muestras de las pilas de almacenamiento de los agregados y aplicando el método gravimétrico, pesándolas antes y después de secarlas en estufa o, más rápidamente en el caso de las arenas, volumétricamente usando el frasco de Chapman (Norma de Vialidad VN - E37 – 78).

La primera duda que nos surge es si la humedad del agregado en la pila es representativa de la que llevan los agregados colocados en las tolvas de pesaje, pero supongamos que se haga correctamente y con la frecuencia debida. La otra pregunta es si la humedad registrada en la unidad de control de pesaje se corresponde con la medida. Bueno, según la experiencia del autor, que efectuó auditorías de calidad en los últimos 20 años en numerosas compañías de muy distintos países, esto deja bastante que desear, lo que se ilustra en un ejemplo concreto, algo extremo. Analicemos el protocolo de carga de una planta de hormigón europea que muestra en la Figura 7.

Ticket		Thursday, 12 February,		Ordered 8.00m ³		Batched 8.00m ³
Mix Code:		Route:	Dry	Slump:	70mm	Wtr/Cem: 0.440
Type	Material	Moisture %	Target	Achieved	Error	% Error
Aggregate	2/20 mm	0.00	8,152 kg	8,165 kg	13 kg	0.16%
	Sand	0.39	6,604 kg	6,601 kg	-3 kg	-0.05%
Cement	OPC		2,440 kg	2,443 kg	3 kg	0.10%
Water	Recycled		1,331 ltr	1,049 ltr	-282 ltr	-21.18%
Additive	WRDA90		14.64 ltr	14.66 ltr	0.02 ltr	0.14%

Figura 7 – Protocolo de carga de un camión de 8 m³, con a/c declarada de 0.44.

Detengámonos en los valores destacados en rojo. Los valores en el rectángulo son las cantidades realmente medidas en la planta de hormigón (de arriba hacia abajo): Grava, Arena, Cemento, Agua (W_m) y Aditivo. Los valores en el círculo a su izquierda son las humedades declaradas de la Grava (0%) y la Arena (0.39%). Si aplicamos la Ecuación (6), podemos calcular que la relación a/c de la carga del camión correspondiente es 0.44, tal como se indica dentro del óvalo arriba a la derecha.

Ahora, la humedad indicada para la arena es muy baja, del orden de la absorción, lo que no se condecía con lo observado por el autor en la pila de almacenamiento, donde la arena lucía muy húmeda. Ordenado un ensayo de humedad de la arena, ésta resultó del 6.0%. Ahora, si aplicamos este valor en la Ecuación (6) y recalculamos, el valor real de la relación a/c resulta igual a 0.59!!!

En muchos casos, menos extremos, se encontró que la humedad reportada era menor que la real, y ello no necesariamente responde a una intención de fraguar valores de a/c menores a los reales. La razón es que cuando se efectúa el control de stock, se aparenta haber consumido mucha más arena de la real, ya que se subestima la cantidad de agua que va en la pesada de arena húmeda, en favor del operador de la planta.

Una manera de superar esta situación es colocar sensores de humedad en las tolvas de pesada de las arenas, cuya indicación se sube automáticamente a la unidad de control de las cargas. Baste decir que en muchos casos esto ha fracasado por la inadecuada calidad y robustez de los sensores, así como por una instalación incorrecta respecto al flujo de material. En muchos casos, además, el operador puede ingresar manualmente valores de humedad distintos a los indicados por los sensores.

5.2.2 Incertidumbre en la cantidad de cemento C añadida

Bien, ocupémonos ahora del denominador, la masa de cemento en la mezcla. En principio, el valor registrado en el protocolo debería corresponder, con suficiente exactitud, a la cantidad real de cemento en la mezcla.

Sin embargo, en ocasión del 6º Congreso Iberoamericano del Hormigón Premezclado, Buenos Aires, 23-27 de Marzo, 1987, el representante de una empresa española que exhibía su sistema de administración de mezclas, sin ningún pudor, mostraba cómo mediante cierto artilugio su sistema permitía indicar y registrar un contenido de cemento mayor al real..... En estos 20 años de experiencia el autor nunca se encontró con un sistema fraudulento de tal envergadura, pero un colega de la zona de Medio Oriente se lo confirmó.

5.3 Situación del receptor del hormigón

La situación del receptor del hormigón es aún más difícil, ya que recibe un camión conteniendo hormigón fresco y un protocolo con la información del productor, con las debilidades que se describieron más arriba. La pregunta es: ¿existe algún método preciso para medir la relación a/c de una muestra de hormigón fresco? La respuesta es que, a pesar de varios intentos, no existe ningún método de ensayo normalizado o ampliamente aceptado para medir experimentalmente la a/c de un pastón de hormigón fresco. Una revisión de tales métodos se presenta en un informe de la Comisión de Normas Europeas⁴, que declara: "*Se concluye [...] que el problema de medir la relación a/c sobre una muestra de hormigón fresco de la que nada se conoce es muy difícil y probablemente imposible*". Otra discusión detallada sobre el tema puede encontrarse en las páginas 161-162 de⁵, que concluye: "*Podemos ver que no existe ningún procedimiento seguro y practicable para la medición de la relación agua/cemento. Verdaderamente, no existe prueba para la composición del concreto fresco que sea lo bastante conveniente y segura para ser utilizada como una prueba de aceptación del concreto antes de colocarlo*". En el Reino Unido, se desarrolló la llamada "Rapid Analysis Machine" (el autor tuvo ocasión de observar su funcionamiento allá por 1980); incluso, en 1997 se lanzó la British Standard BS 1881-128 sobre "Métodos para análisis del hormigón fresco"; esta iniciativa no prosperó y la norma fue retirada por "no ser ya relevante".

6. Conclusiones

En lo precedente, se ha tratado la relevancia de la relación a/c como indicador de calidad y de durabilidad del hormigón, pudiéndose concluir lo siguiente:

- La relación a/c mide sencillamente el grado de dispersión de las partículas de cemento en el agua de mezclado del hormigón fresco
- Para un mismo conjunto de materiales constituyentes, la relación a/c se correlaciona muy bien con indicadores importantes de la calidad de la mezcla, tales como resistencia mecánica, permeabilidad y otros indicadores de durabilidad, por lo que se la usa a fines de diseño de mezclas

⁴ CEN Report CR 13902, "Test methods for determining the water/cement ratio of fresh concrete", European Committee for Standardization, May 2000, 7 p.

⁵ Neville, A.M., "Tecnología del Concreto". IMCYC, México D.F., 2013

- Sin embargo, tales correlaciones no son universales, sino que dependen de las características de los constituyentes
- Por lo tanto, establecer límites máximos a la relación a/c para especificar la durabilidad es incorrecto, inseguro y puede limitar indebidamente la sostenibilidad del hormigón
- Para agravar este cuadro de situación, se ha demostrado que no existen métodos aptos para medir la relación a/c de una muestra de hormigón fresco y que basarse en los protocolos de carga de la planta de hormigón (como postulan el CIRSOC 201 y la EN 206) dista de ser una manera confiable de verificar la a/c
- Consecuentemente, el receptor de un camión de hormigón no tiene manera certera de saber si la relación a/c de la mezcla que recibe cumple o no con los requisitos fijados por los códigos (p.ej. CIRSOC 201)
- Lo anterior puede conducir a prácticas fraudulentas, que conspiran contra una sana competencia de proveedores, ya que es relativamente sencillo para un productor inescrupuloso violar la relación a/c máxima especificada sin riesgo de ser detectado
- La solución a este dilema casi centenario (“no tiene sentido especificar un requerimiento que no pueda ser verificado”) es eliminar la restricción de a/c máxima de los códigos de hormigón, sustituyéndola por requisitos basados en ensayos normalizados, que puedan ser efectuados por productor y receptor del hormigón para verificar su cumplimiento (p.ej. IRAM 1554, 1871 y 1892)
- Tímidamente el CIRSOC 201:2005 incorporó, complementariamente a la relación a/c máxima, requisitos basados en las Normas IRAM 1554 y 1871, pero fijando valores únicos para todos los grados de exposición. Se recomienda vivamente moverse enérgicamente en la dirección prestacional en las futuras revisiones de normas y códigos de construcción en hormigón