

INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS DE CONTROL DE CALIDAD DEL CEMENTO Y SU IMPACTO EN EL HORMIGÓN

Raúl López¹, Darío Barberi¹

¹ Centro de Desarrollo e Innovación (CDi), Holcim (Argentina) S.A., Casilla de correo 16, X5101ACE, Córdoba, Argentina, raul.lopez@lafargeholcim.com

RESUMEN

Los cementos que se comercializan en Argentina están especificados en las normas IRAM 50000 (Cemento de Uso General), IRAM 50001 (Cementos con propiedades especiales) e IRAM 50002 (Cementos para Terminadoras de Alto Rendimiento). Los cementos de uso general son aquellos aptos para aplicaciones convencionales de hormigón estructural y no estructural donde no se requieran condiciones especiales. La IRAM 50000 establece para estos cementos requisitos de composición (tipos de componentes y sus proporciones) y también las exigencias físicas, mecánicas y químicas aplicables a estos tipos de cementos, que son los que normalmente el fabricante informa como características de sus productos. Los requisitos químicos y de finura constituyen un grupo de exigencias prescriptivas tendientes a controlar la composición y evitar patologías en el hormigón. Las exigencias mecánicas y los restantes requisitos físicos, son requerimientos de desempeño y están definidos para morteros y pasta de cemento. En ambos casos resulta difícil relacionar las características normativas del cemento con el desempeño en hormigones y morteros en la aplicación. En este trabajo se compila parte de la experiencia de los autores en relación al impacto de las variaciones de algunas propiedades de los cementos en el hormigón, con el propósito de aportar a la interpretación de los resultados que permitan ayudar a su comprensión por parte de los profesionales.

Palabras clave: cemento, IRAM 50000, especificaciones, hormigón.

INTRODUCCIÓN

Es frecuente que se requiera en obra la información de control de calidad de él o los cementos utilizados. Esto en diversas ocasiones responde a un requisito de los sistemas de gestión de calidad y en otros a un interés por conocer las propiedades de los cementos y sus variaciones en el tiempo. Esta información es generalmente aportada por el fabricante de cemento, ya que es poco usual contar en obra con laboratorios para hacer estos controles y, en muchas ocasiones resulta difícil para el profesional de obra poder valorar el verdadero impacto que tendrán determinadas propiedades y su variación en el desempeño del hormigón u otras mezclas en las que se utilice el cemento.

Establecer correlaciones únicas parece ser una tarea casi imposible teniendo en cuenta la diversidad de características de los cementos y demás componentes del hormigón, sin embargo, hay diferentes estudios tendientes a encontrar estas relaciones. Los requisitos normativos tienden más a un control de calidad, que asegure que las principales características de los cementos se mantengan, primero, dentro de límites normativos y luego dentro de límites más acotados fijados por cada fabricante para dar a sus productos

las características deseadas con variaciones que no afecten el desempeño final del producto. Estos últimos se vuelcan en el plan de calidad del productor, y forman parte de los controles de rutina que se hacen en la fabricación del cemento. A partir de estos controles y evaluaciones en paralelo en hormigones de laboratorio de composición fija (estándar) es que se han obtenido algunas de las correlaciones incluidas en este trabajo. Estas correlaciones no pretenden ser de carácter universal sino orientativas para los profesionales que deben interpretar los datos de calidad de cemento y son de validez limitada al campo dentro del que se hicieron. Por otra parte, por la necesidad de acotar la extensión del presente trabajo, no se analizaron todas las variables, ni se presentan mayor número de correlaciones dentro de las variables estudiadas.

REQUISITOS QUÍMICOS

Los límites químicos establecidos en la norma IRAM 50000 [1] son requisitos del tipo prescriptivos que podemos clasificar en dos grupos: el primero incluye la pérdida por calcinación (PPC) y el residuo insoluble (RI) y su finalidad principal es controlar el cumplimiento del límite superior de contenido de "filler" calcáreo y puzolana, respectivamente. El segundo grupo lo conforman el trióxido de azufre (SO_3), óxido de magnesio (MgO), cloruros (Cl^-) y sulfuros (S^{2-}), cuyo objetivo es evitar patologías tales como la generación de compuestos expansivos en la masa del hormigón y la corrosión de las armaduras. En este trabajo concentramos el análisis en la pérdida por calcinación (PPC), residuo insoluble (RI) y trióxido de azufre (SO_3), haciendo foco en el efecto de estos parámetros en las propiedades mecánicas.

Pérdida por calcinación (PPC)

Este ensayo determina la pérdida de masa de una muestra de cemento al ser calcinada durante un determinado tiempo a una temperatura de 950 °C y por lo tanto es una medida de aquellos compuestos químicos que se volatilizan a esa temperatura o inferiores. Este parámetro no permite evaluar qué sustancias se pierden y, por lo tanto, su utilidad puede ser relativa.

En el caso de los cementos que en su composición tienen filler calcáreo como componente principal (CPF o CPC) o minoritario (menor al 5 % en masa) la PPC puede adoptarse como un parámetro de control del contenido de esta adición que debe estar compuesta por, al menos, 75 % de carbonato de calcio (CaCO_3) [1], el que al ser sometido a altas temperaturas se descompone en óxido de calcio y dióxido de carbono, cuya volatilización genera una pérdida de peso de la muestra (PPC).

Si bien otros constituyentes de los cementos pueden aportar a la PPC sólo analizaremos el impacto de las variaciones ocasionadas por el contenido de filler, las que dependerán de su pureza (Tabla 1). El impacto sobre la resistencia dependerá de la granulometría del cemento y del contenido de esta adición mineral. Con una adecuada distribución granulométrica puede incorporarse caliza al cemento con mínimo impacto en la resistencia final [2, 3] ya que la caliza mejora el empaque de las partículas del cemento en la pasta. El contenido de caliza que puede admitir un cemento sin pérdida apreciable del desempeño mecánico es limitado; por sobre este límite el efecto del empaque se pierde y cobra fuerza el efecto de dilución, bajando la resistencia [2]. Este efecto puede observarse en la Figura 1 (a), en donde para bajas PPC el cambio de resistencia es del orden de 0,25 MPa/1 % PPC y para valores altos es de 1,5 MPa/1 % PPC.

Tabla 1: Variación del contenido de filler correspondiente a la variación de 1 % de PPC para calizas con purezas extremas dentro del marco normativo.

	% CaCO ₃ del filler	Variación en el contenido de filler	Variación de resistencia IRAM 1622 [4]
A	75 %	3,0	0,25 a 1,5 MPa
B	100 %	2,3	

Residuo Insoluble (RI):

De manera muy general el ensayo consiste en atacar la muestra de cemento con ácido para disolver todos los compuestos “activos” del cemento y poder así cuantificar aquellos no solubles en ácido, que es el llamado “residuo insoluble”. Estos están compuestos fundamentalmente por sílice no soluble que puede provenir de las puzolanas o de impurezas de otros materiales como el yeso o algunos filleres.

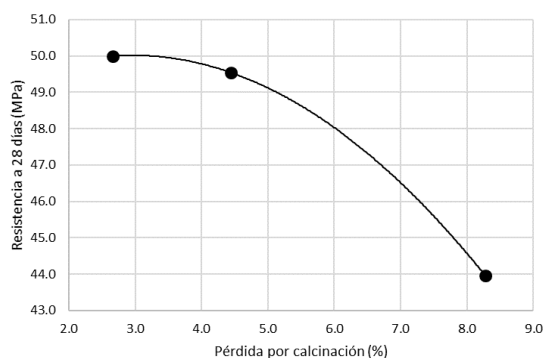


Figura 1 (a): Resistencia a 28 días en mortero (IRAM 1622) de tres cementos de una misma planta con diferentes contenidos de filler calcáreo y su relación con la PPC.

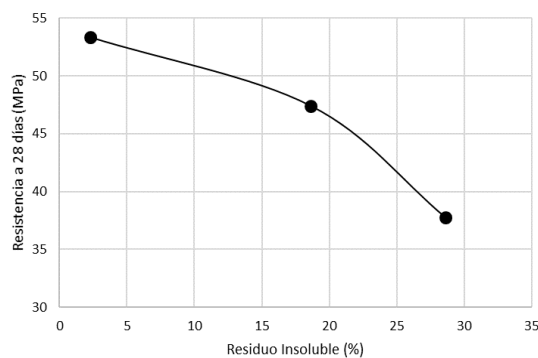


Figura 1 (b): Resistencia a 28 días en mortero (IRAM 1622) de tres cementos de una misma planta con diferentes contenidos de puzolana y su relación con el residuo insoluble.

Este parámetro también sirve para un control indirecto de variaciones en la composición del cemento, aunque es necesario conocer el RI de las diferentes materias primas utilizadas. En el caso de los cementos puzolánicos este parámetro cobra mayor importancia y un aumento en el RI se asocia a un aumento en el contenido de puzolana. En la Figura 1 (b) se ilustra el efecto del aumento del residuo insoluble en la resistencia a 28 días para tres cementos puzolánicos de una misma planta de producción. De manera similar al filler calcáreo, el efecto no es lineal. Para este ejemplo se verifica una pérdida variable entre 0,35 y 0,96 MPa/%RI.

Trióxido de azufre (SO₃)

El SO₃ es una manera de expresar el contenido de yeso (manera genérica de mencionar diferentes formas mineralógicas de sulfatos de calcio) en el cemento. Éste está influenciado principalmente por la cantidad clinker, contenido de aluminato tricálcico y álcalis del clinker y por la finura del cemento [5, 6]. El yeso reacciona con el aluminato tricálcico (C₃A) del Clinker para formar etringita cuando el hormigón se encuentra aún en estado fresco, pero si el contenido de yeso es excesivo habrá formación de este tipo de compuestos en el mediano o largo plazo, ocasionando reacciones expansivas en el hormigón endurecido que afectarán su resistencia y durabilidad [3]. Por esto último se limita el contenido de sulfatos en el cemento.

Además del fraguado, el contenido de yeso afecta la evolución de resistencias, los valores absolutos de resistencia alcanzados y otros parámetros. Según la propiedad buscada se determina el denominado “yeso óptimo” (SO_3 óptimo) que permita desarrollar el mayor potencial de esta propiedad, pero manteniendo el SO_3 siempre dentro del límite máximo permitido por la norma. En la Figura 2 se ilustra la variación de resistencia inicial y final en función del contenido de SO_3 para dos cementos diferentes, obtenidas en pruebas de determinación de yeso óptimo. Como se observa, los cementos no presentan el mismo comportamiento ya que, como se mencionó anteriormente, el impacto de la variación de SO_3 depende de múltiples variables.

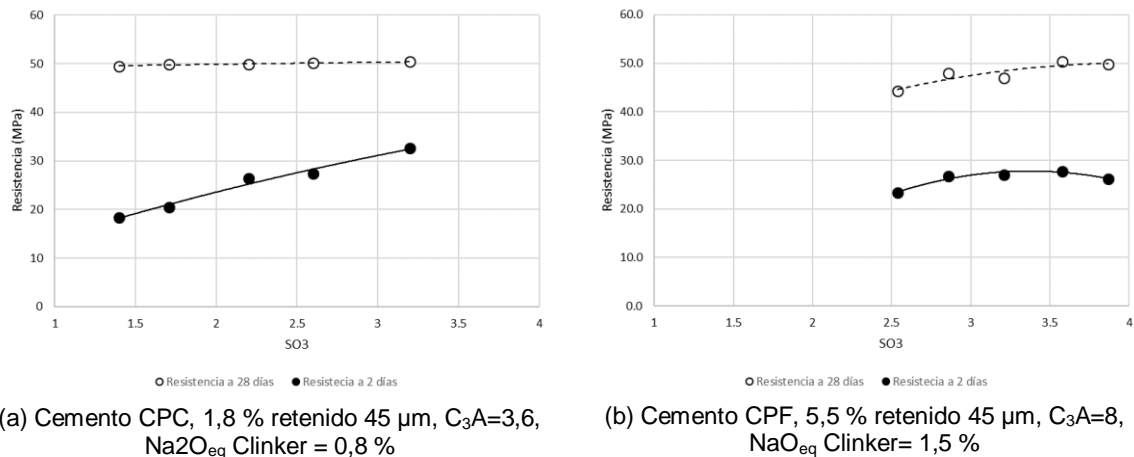


Figura 2: resistencia en función del contenido de sulfato de calcio expresado como SO_3 de dos cementos de distintos orígenes y composición.

En general, las variaciones de este parámetro son muy bajas entre las producciones de un mismo cemento. A modo de ejemplo la desviación estándar del SO_3 para los cementos de la Figura 2 es inferior a 0,15 y el impacto en la resistencia de estas variaciones es muy bajo.

Finura del cemento

La finura del cemento está relacionada con su grado de molienda y tiene importancia en cuanto influencia su velocidad de hidratación y por lo tanto el desarrollo de resistencia y sus propiedades en estado fresco. Hay dos parámetros que se relacionan con la finura: el primero es el porcentaje en masa retenido en una malla de $75 \mu m$ (#200). En términos generales, cementos más finos se hidratarán más rápidamente y, además, puede considerarse que las partículas superiores a $75 \mu m$ no se hidratarán completamente en los tiempos normales de evaluación de resistencia mecánica y por lo tanto tienen muy baja contribución a la resistencia. Powers demostró que los granos de cemento superiores a $50 \mu m$ no se hidratarán completamente [5, 2], por lo que la industria recurre al control del retenido en malla $45 \mu m$ y $32 \mu m$ para el control de calidad.

En la Figura 3 se ilustra el impacto de la variación del retenido en $45 \mu m$ en la resistencia a 28 días para cuatro tipos de cementos molidos en un molino de bolas. Como se aprecia la variación depende del tipo y proporción de adición mineral. En este grupo de datos la variación va desde 0,4 a 1,1 MPa por cada punto de retenido. En la Figura 4 se hace un análisis similar, pero comparando el impacto de la variación del residuo en $75 \mu m$ y el de $45 \mu m$.

El otro método para determinar la finura es el método de la permeabilidad al aire (método de Blaine) [7], que permite determinar la superficie específica (superficie relativa a la masa - m^2/kg). En este caso los cementos más finos presentarán una mayor superficie específica. Este parámetro se ve influenciado por la distribución granulométrica de las partículas que lo constituyen. En el caso de moliendas conjuntas (todos los componentes del cemento ingresan en el mismo momento al molino), el grado de molienda de cada uno de los componentes del cemento variará según su molturabilidad y, con esto la distribución granulométrica del cemento y su superficie específica. Como ejemplo, los cementos que incorporan filler calcáreo en su composición, en similares condiciones de molienda, presentarán mayor porcentaje de partículas finas, dado que el filler es más molturable y por lo tanto la superficie específica aumenta. Adicionalmente a la composición, la distribución granulométrica depende de la tecnología de molienda utilizada (tipo de molino y separadores). Esto hace que la superficie específica por sí sola no sea adecuada para comparar cementos de distintos orígenes o diferentes composiciones, pero sí para evaluar la uniformidad entre diferentes partidas de un mismo cemento.

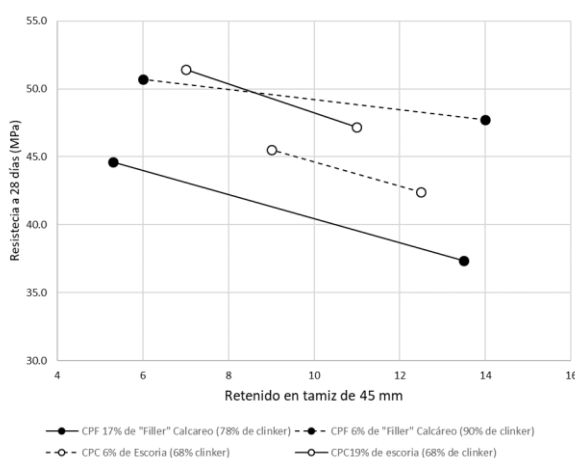


Figura 3: Cambio de la resistencia con el retenido en 45 μm para distintos cementos molidos en un molino de bolas.

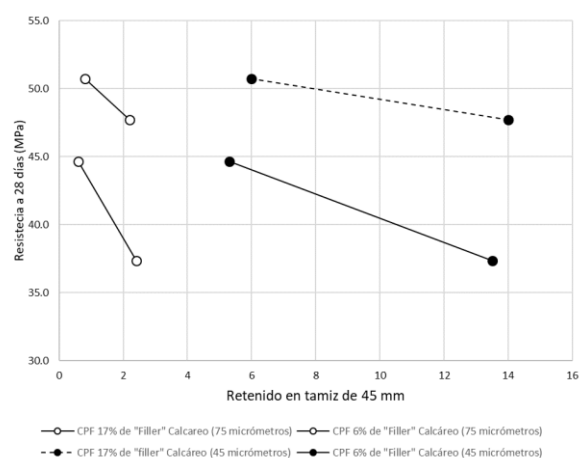


Figura 4: Cambio de la resistencia con el retenido en 45 y 75 μm para dos cementos CPF molidos en un molino de bolas.

REQUISITOS MECÁNICOS (RESISTENCIA)

En condiciones normales de curado (23 °C) las resistencias iniciales de los hormigones convencionales dependen esencialmente de la resistencia de la pasta de cemento por ser el constituyente más débil. Lo mismo puede afirmarse para el mortero estándar utilizado para evaluar la resistencia mecánica del cemento [4]; por lo que cabría esperar buenas correlaciones entre mortero y hormigón siempre que no existan grandes diferencias de demanda de agua entre los cementos. Para ilustrar este punto en la Figura 5 se representa la correlación de la resistencia promedio a 1 día en mortero estándar y hormigón de un grupo de cementos de diferente composición y origen. En este ejemplo se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,88 lo que indica un ajuste razonable.

Con el aumento de la edad de curado el desempeño mecánico comienza a ser influenciado por la distribución de poros de la pasta hidratada y su interacción con los agregados [3]; por lo que el ajuste de las correlaciones entre mortero estándar y hormigones empeora. En las Figuras 6 (a) y (b) se analizan las correlaciones de resistencias a 28 días de morteros de diferentes cementos con sus resistencias en diferentes hormigones. En la Figura 6 (a) se observa, en primer lugar, como para una misma resistencia en mortero se pueden obtener diferentes resistencias en hormigón, aun cuando la relación agua/cemento presenta una variación baja (0,55-0,58). Si bien el grado de correlación es bajo puede

obtenerse una tendencia [8] donde para una variación de 13 MPa en la resistencia del mortero produjo una variación de 7,5 MPa en el hormigón (relación mortero hormigón de 1,7:1). En el caso de la Figura 6 (b) haciendo un mismo análisis se observa en primer lugar que hay dos cementos que con las menores resistencias en mortero dan alta resistencia en hormigón. Sacando estos dos casos, también se observa una tendencia, pero muy diferente a (a): para una variación en mortero de 4 MPa se obtiene en hormigón una variación de 10 MPa (0,25:1). Lo anterior evidencia la limitación de la resistencia en mortero estándar para predecir el impacto de un dado cemento en el desempeño mecánico de los hormigones.

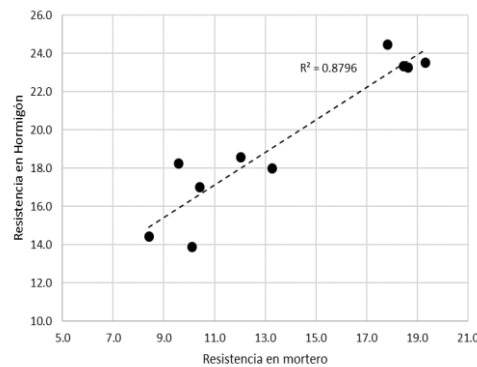
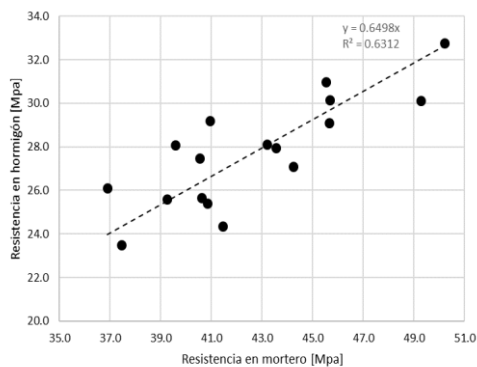
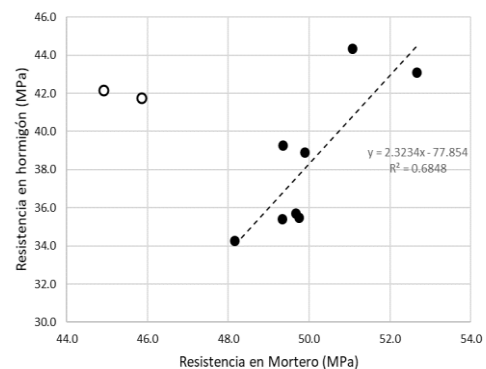


Figura 5: Correlación entre resistencia a 1 día entre mortero estándar hormigón de laboratorio (CUC: 420 y aditivo plastificante).



(a) H° c/ CUC 330 kg/m³, sin aditivo, a/c variable para asentamiento 10 cm.



(b) H° c/ CUC 420 kg/m³, aditivo plastificante, a/c variable para asentamiento 10 cm.

Figuras 6: Relación Resistencia de mortero – Resistencia del hormigón para diferentes cementos.

Con la finalidad de obtener una herramienta predictiva para evaluar el impacto en hormigón de la variación de resistencias de morteros, se analizaron una serie de eventos de cambios de resistencia en mortero y su correspondiente impacto en hormigón. En términos de cambios de resistencia tanto absolutas como porcentuales se obtuvieron buenas correlaciones las que se muestran en las Figuras 7 (a) y (b). Los hormigones utilizados para este análisis son del mismo tipo de los representados en la Figura 6 (b) (CUC 420 kg/m³, aditivo plastificante, a/c variable para asentamiento 10 cm).

Analizando la línea de tendencia se observa que en valores relativos un 1% de variación de la resistencia del mortero produjo 0,67 % de variación en la resistencia del hormigón

(relación mortero:hormigón de 1,5:1). En valores absolutos, una variación de resistencia del mortero de 1,0 MPa produce una variación en el hormigón de 0,55 MPa (1,8:1).

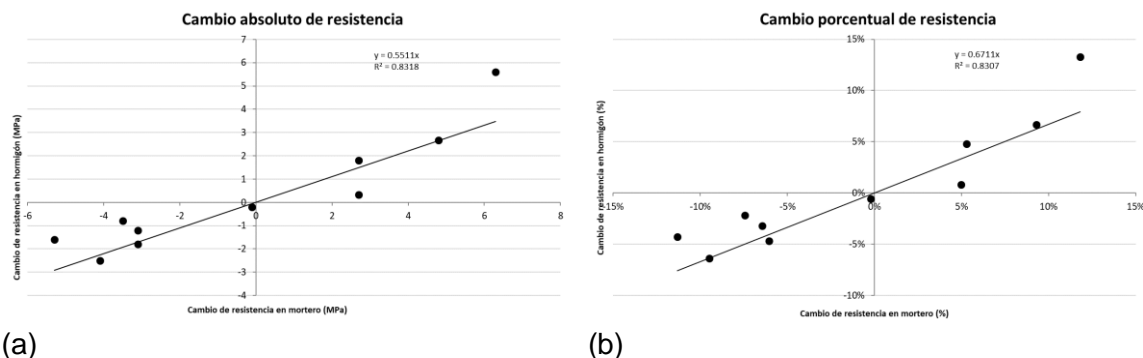


Figura 7 a y b: Impacto de la variación de la resistencia del cemento medida en mortero normalizado en la resistencia del hormigón.

CONCLUSIONES

Si bien las propiedades evaluadas en las especificaciones de los cementos son importantes como medida de la calidad de los productos, no fue posible encontrar correlación directa y general entre los valores absolutos de estas variables y su efecto en la resistencia del cemento, sea en mortero u hormigón. Sí se obtuvieron mejores correlaciones entre la variación de cualquiera de estas variables y la variación en el comportamiento mecánico del cemento. Lo que es de importancia práctica para los profesionales que utilizan un determinado tipo de cemento de un determinado origen. Por otra parte, las conclusiones del presente trabajo no deben tomarse como universales, sino que tienen validez dentro del ámbito de estudio.

Dentro de ciertos límites la resistencia del cemento no limita la resistencia alcanzable en el hormigón, la que dependerá, además, de la relación agua/cemento, agregados utilizados y sus proporciones, aditivos, y de condiciones exógenas tales como la temperatura, el curado, entre otras. Es claro que la resistencia del cemento influirá en la resistencia del hormigón, pero su correlación no es única, ni tan directa y dependerá, además, del cemento y hormigón que se pretendan correlacionar. Por lo que la conveniencia del uso de uno u otro cemento dependerá de una evaluación técnico-económica.

REFERENCIAS

- [1] IRAM 50000, "Cementos de uso general - Composición y requisitos", (2017).
- [2] Schäfer E, Suter W, Zimmerman Y, "Manual interno: Cement Manufacturing Services", Holcim Group Support Ltd. Holderbank, (2009), CMS-MT 09/14833/E.
- [3] Taylor HFW, "Cement chemistry", London, (1997), 0727725920.
- [4] IRAM 1622, "Determinación de las resistencias mecánicas".
- [5] López R. et al., "Cementos", Ese material llamado hormigón, AATH, (2012).
- [6] Grzeszczyk S, "Rheological properties of cement pastes and reactivity of clinker", Cement and Concrete Science & Tecnology, Vol. 1, Part 2, New Delhi, ABI Books Private Limited, (1992).
- [7] IRAM 1623, "Determinación de la superficie específica por permeabilidad al aire", (2004).
- [8] López R, Clariá M, "Base de datos de Morteros y Hormigones", AATH, (1998).

