

Propiedades dieléctricas de pastas de cemento con bajo contenido en agua libre

C. ANDRADE, L. SOLER, J. DE FRUTOS*

Instituto E. Torroja - C.S.I.C. - P.O. Box 19002. 28080 Madrid (Spain)

*Dpt Física Aplicada. ETSIT-UMP. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid(Spain)

El hormigón eléctricamente se comporta como un aislante o como un conductor en función de su contenido de agua. Así, el hormigón saturado de humedad presenta valores de resistividad de $50 \Omega\text{m}$ (a 1 KHz) lo que le sitúa en el rango de los semiconductores. Sin embargo, cuando se seca a 100°C , la resistividad alcanza valores del orden de $10^9 \Omega\text{m}$ (a 1 KHz), que corresponde a la de un aislante. Por lo tanto, el contenido en agua de los poros del hormigón tiene un gran efecto en su constante dieléctrica.

En el presente trabajo se relaciona la constante dieléctrica de la pasta con su contenido de agua a partir de medidas de Espectroscopía de Impedancia Eléctrica (EIS). Para ello se prepararon probetas con una relación $a/c=0.5$ con y sin adición de un 2 % de CaCl_2 que han sido caracterizadas para diferentes contenidos de humedad. Se presenta la dependencia de la constante dieléctrica de estas muestra con la frecuencia, contenido de agua y de cloruros. Los resultados ponen de manifiesto que la constante dieléctrica aumenta con el contenido de agua, siendo los valores muy dependientes de la frecuencia.

Palabras Clave: Hormigón, cemento, constante dieléctrica, Espectroscopía de impedancia eléctrica, contenido de agua.

Dielectric properties of cement paste and its relationship with low water content

Concrete is a material that behaves as an insulator (dielectric) or conductor depending on its water content. Moist concrete has a resistivity of about $50 \Omega\text{m}$ (at 1 KHz) which is in the range associated with semiconductors. When oven-dried, however, it increases its resistivity to around $10^9 \Omega\text{m}$ (at 1 KHz) with corresponds to that of an insulator. The dielectric properties of the concrete also change.

This paper is an attempt of relating the dielectric constants of cement paste with its water content, starting from oven-dried samples. Specimens of cement paste with water/cement ratio of 0.5 and with a 2 % of Cl^- and without chlorides were made. The dependence of dielectric constant on several parameters (frequency, moisture content, chloride content) is presented. The results show that the ϵ values increase with water content. At high frequency, values of 10 to 20 are measured whereas they increase to exceptionally high values at low frequencies.

Key words: Concrete, water content, dielectric constant, Electrical Impedance Spectroscopy (EIS).

1. INTRODUCCION

El hormigón es un material que se comporta como un dieléctrico o conductor en función de su contenido en humedad. El hormigón húmedo tiene una resistividad alrededor de $50 \Omega\text{m}$ a 1 KHz, es decir, se sitúa en el rango de los semiconductores. Sin embargo, cuando está completamente seco, la resistividad alcanza niveles del orden de $10^9 \Omega\text{m}$, lo que corresponde a un aislante (1).

Estos cambios en resistividad llevan asociados lógicamente unas variaciones en las propiedades dieléctricas del hormigón. Así, la constante dieléctrica del hormigón seco presenta valores entre 2-10 (2) y aumenta con el contenido en humedad de los poros del hormigón.

Durante los años 60-70 se publicaron los primeros intentos de medida del contenido en agua del hormigón (3)(4) a partir de la medida de su constante dieléctrica, en frecuencias del orden de los MHz-GHz. También se midió para estudiar la evolución del fraguado del cemento (3) y, más recientemente, se está utilizando para caracterizar los hormigones de altas prestaciones y los libres de defectos (MDF) (5) que son hormigones que pretenden competir en aplicaciones con algunas cerámicas.

El presente trabajo es un primer intento de los autores para tratar de relacionar la constante dieléctrica de estas muestras con la frecuencia, contenido de agua y cloruros y porosidad del material. Con ello se pretende sentar las bases para a partir de medidas de espectroscopía de impedancia eléctrica poder determinar propiedades de los materiales objeto de estudio (porosidad, contenido en cloruros, contenido en agua, etc) con un alto grado de fiabilidad.

2. EXPERIMENTAL Y DISCUSION DE RESULTADOS

2.1.Preparación de las muestras

Se han preparado materiales de dos tipos:

(Muestras A): cemento (100 gr) + H_2O (50 gr)

(Muestras B): cemento (100 gr) + H_2O (50 gr) + $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (2,56 gr)

Ambas familias se sometieron a un proceso de curado durante 10 días (en condiciones de 100 % de humedad relativa y 22°C) y posteriormente fueron mecanizadas en paralelepípedos de 2.5

mm de espesor y 600 mm² de superficie y electrodadas con tintura de plata de secado a temperatura ambiente.

Las muestras fueron sometidas a un proceso de secado a 100 °C durante 48 horas. Parte de las muestras, se introdujeron en silicona para bloquear la entrada de agua y el resto se mantuvieron en una atmósfera de humedad controlada (33 % H.R.). En intervalos de 4, 8, 12, 24, 48, 72 y 112 horas las muestras se van sacando de la atmósfera húmeda e introduciendo en silicona. De esta manera se dispone, para cada serie, de una gama de muestras con diferentes contenidos de humedad.

Las muestras así conseguidas, se caracterizaron eléctricamente, en función de la frecuencia y a temperatura constante, por medio de un puente HP-4284A Precision LCR Meter de la casa Hewlett-Packard, en el rango de 20 a 10⁶ Hz, utilizando el proceso de compensación de impedancia con una tensión de medida de 1 voltio.

2.2. Medidas experimentales y discusión de resultados

Para determinar el incremento de humedad en las muestras con el tiempo, se ha procedido al pesado de una de ellas en todas las etapas. El resultado obtenido pone de manifiesto un rápido aumento de humedad en los instantes iniciales que disminuye con el tiempo. La porosidad media, en ambas familias de materiales, es muy similar (18% serie A y 17 % serie B). No obstante hay diferencias importantes entre ellas. Ambas series muestran dos distribuciones de tamaño de poro. En las muestras sin cloruros, aproximadamente el 33 % de los poros tienen un tamaño medio centrado en 0,4 µm y el 67 % restante en 0,11 µm, mientras que en las muestras con cloruros, el 33 % tienen tamaño medio centrado en 0,018 µm y el 67 % restante en 0,055 µm, que son considerablemente menores. Esto hace que, inicialmente, la velocidad de penetración del agua en el material sea diferente, así como el contenido total de agua que entra en cada material. En las muestras con cloruros el contenido de agua, a igualdad de tiempo, es mayor así como la velocidad de variación del mismo. Esto puede justificarse a partir de la Ley de Jourin, que permite estimar la altura que alcanza un líquido dentro de un capilar (h_c), en función de la Tensión Superficial T_s , del ángulo del menisco α , del radio medio de poro estimado (r) y de la densidad del líquido.

$$h_c = \frac{2 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{\gamma \cdot r}$$

de manera que, al tratarse del mismo líquido, podemos asumir que todos los parámetros son iguales salvo el radio medio de poro. Como este es considerablemente menor en las muestras con cloruros, el nivel de agua en el interior, en condiciones iguales, es mayor.

En las ilustraciones 2 y 3, se representa la evolución, en función de la frecuencia, de la constante dieléctrica obtenida experimentalmente para cada material con diferentes contenidos de agua. Puede observarse que, en el caso de muestras con cloruros, el valor de ϵ es considerablemente mayor. Esto puede deberse, por una parte, a un mayor contenido de agua en estas muestras (en iguales tiempos) y, por otra, a la mayor retención de agua por parte de los iones Cl⁻ que modificarán el comportamiento eléctrico del material. La mayor o menor influencia de cada uno de estos factores, será analizado detenidamente en trabajos posteriores.

En las ilustraciones 4 y 5, se representa la evolución de la ϵ en función del contenido de humedad de las muestras, fijando las frecuencias de estudio. Se observa que, en todas las frecuencias,

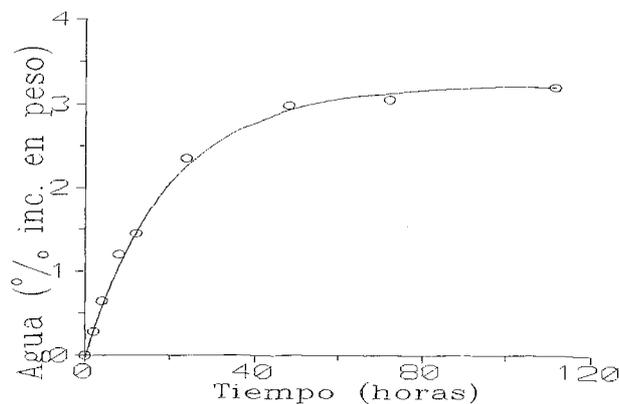


Fig. 1: Incremento en peso del contenido de agua en las muestras con el tiempo.

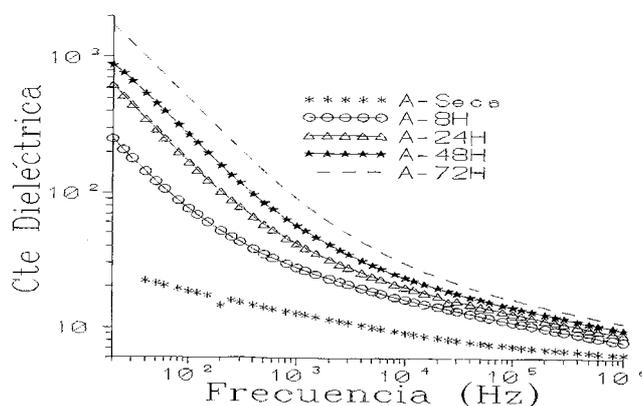


Fig. 2: Variación de la constante dieléctrica con la frecuencia, en muestras de la serie A, con diferentes contenidos de agua.

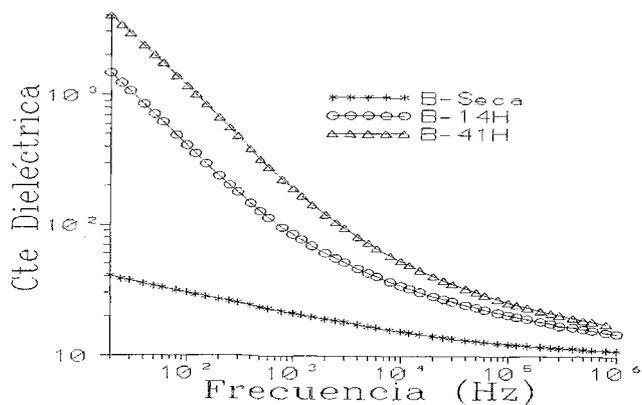


Fig. 3: Variación de la constante dieléctrica en función de la frecuencia, para muestras de la serie B, en función del contenido de agua.

aumenta el valor de la ϵ con el contenido de agua, siendo considerablemente mayor, tanto en valor absoluto, como en incremento para medidas en baja frecuencia. Este comportamiento es común a ambas series de material, sin embargo, las muestras con cloruros (en todas las frecuencias y para todos los contenidos de humedad) presentan mayor valor absoluto en la ϵ y una evolución más uniforme en el contenido de la humedad.

Dependiendo del número, distribución y tamaño de los poros, del contenido de cloruros y de la cantidad de agua absorbida por los materiales, puede establecerse la variación de la constante dieléctrica dentro de los mismos. Y, el proceso inverso, tras el conve-

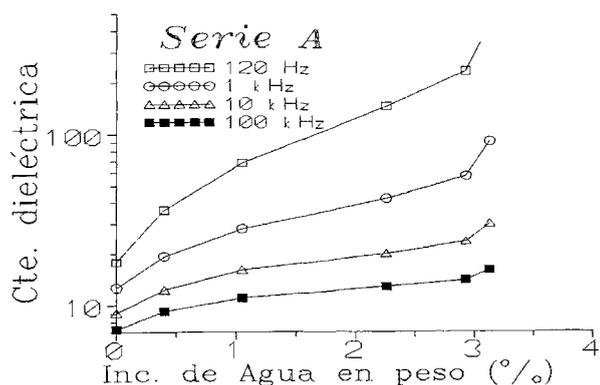


Fig. 4: Evolución de la constante dieléctrica en función del contenido de agua, para muestras de la Serie A, a cuatro frecuencias de medida.

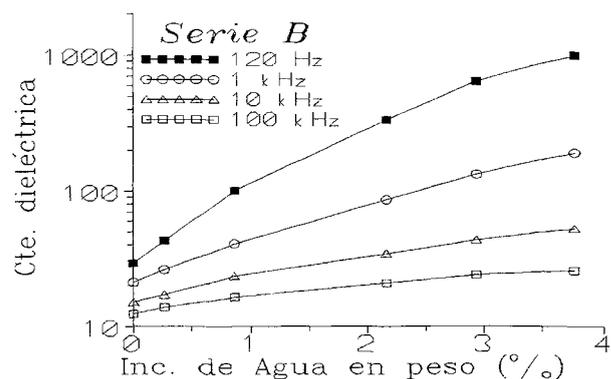


Fig. 5: Variación de la constante dieléctrica en función del contenido de agua de las muestras (serie B), para 4 frecuencias de trabajo.

niente desarrollo, se muestra como una forma útil de determinar propiedades de los materiales (porosidad, contenido en cloruros, contenido de agua etc...) aplicando técnicas no destructivas.

3. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta el carácter preliminar de los ensayos, las conclusiones que se han extraído de los presentes resultados son las siguientes:

1º) A igual presión de vapor de agua (humedad relativa) las muestras con cloruros adquieren más rápidamente y en mayor proporción agua al tener un tamaño de poro menor.

3º) La constante dieléctrica del hormigón secado a 105°C varía con la frecuencia mucho menos que la variación registrada cuando el contenido en agua aumenta.

4º) La constante dieléctrica es muy dependiente de la frecuencia, obteniéndose valores muy grandes a bajas frecuencias y próximos a los valores teóricos de caracterización (rango de microondas) para frecuencias altas. Lo que hace imprescindible asociar el dato de constante dieléctrica con la frecuencia de medida.

5º) Se confirma que la constante dieléctrica aumenta con el contenido en agua de los poros del hormigón para todas las frecuen-

cias. Las muestras con cloruros retienen mayor contenido en agua y presentan por tanto constantes dieléctricas superiores.

4. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Unidad de Materiales Ferroeléctricos del Instituto de Ciencia de Materiales, la disponibilidad de los equipos analizadores de impedancia, utilizados en la parte experimental de este trabajo. ♦

5. BIBLIOGRAFIA

1. N.R. Buenfeld, J.B. Newman and C.L. Page, "The resistivity of mortars immersed in sea water", *Cem. Concr. Res.* **16**, 511 (1986).
2. P. Hudoc, C. Macinnis and M. Moukwa, "The Capacitance effect method of measuring moisture and salt content of concrete", *Cem. Concr. Res.* **16**, 481 (1986).
3. J.M. Tobio, "Tiempo del fraguado del cemento. Exámen ártico de algunos métodos para su determinación", *Cemento y Hormigón*, **325**, 170 (1961).
4. J. Paquet, "Mesure d'humidité in-situ par les methodes dielectriques application au beton" *Matériaux et Constructions*, **4**, 87 (1971).
5. M. Pérez-Pena, P.M. Roy, A.S. Bhalla and L.E. Cross, "Dielectric properties of densified hardened cementitious materials", *Cem. Concr. Res.* **16**, 951 (1986).