

DETERMINACIÓN EFECTIVA MEDIANTE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL ESTADO SATURADO A SUPERFICIE SECA EN ARENAS DE TRITURACIÓN

L. Carrizo^{1,2}, M.E. Sosa¹, Y.A. Villagrán Zaccardi^{1,3}, C.J. Zega^{1,3}

(1) Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT), CICIPBA, Calle 52 e/121 y 122, (1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina.

e-mail: hormigones@lemit.gov.ar

(2) Dep. Construcciones, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

(3) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

Palabras clave: agregado fino, absorción, propiedades eléctricas, arena de trituración

RESUMEN

La mayoría de las normas empleadas para la determinación de la densidad y absorción del agregado fino utilizan el método del molde troncocónico para determinar la condición de saturado a superficie seca. Este criterio resulta apropiado para agregados cuyas partículas son de forma redondeada, pero en el caso de agregados finos de trituración, su angulosidad y rugosidad superficial pueden hacer que la aplicación del método del tronco de cono deje de ser efectiva. Entonces, parece necesario adoptar métodos alternativos al molde troncocónico para determinar el estado saturado a superficie seca de agregados finos de trituración. Este trabajo presenta determinaciones efectivas de la condición de saturado a superficie seca en los agregados finos, mediante un método basado en la conductividad eléctrica. Se evaluaron dos agregados silíceos naturales y dos agregados de trituración. Se analiza el contraste entre los resultados del método del molde troncocónico y del método eléctrico en función de la representatividad de cada uno.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una gran cantidad de agregados finos naturales cuyos yacimientos proveedores se están agotando, y cuya explotación resulta problemática por cuestiones ambientales. Por otra parte, durante la producción de agregados pétreos, aproximadamente el 40-50% de la roca se transforma en arena que puede ser utilizada para obtener hormigones de adecuada calidad utilizando las tecnologías disponibles (1). Sin embargo, para que un material sea utilizado en la producción de hormigón, es preciso el total conocimiento de sus propiedades.

La absorción de agua de los agregados constituye un dato necesario al momento de su empleo en hormigones. En el caso del agregado fino, el método del molde troncocónico es el establecido por la norma IRAM 1520 (2) para determinar la condición de saturado a superficie seca (SSS) del mismo. Dicho método se basa en que cuando el agregado fino presenta humedad superficial, la película de agua que recubre las partículas le otorga cohesión al esqueleto granular gracias a la tensión superficial. En condición de superficie seca, se pierde dicha película acuosa y un montículo de agregado se dispone según su ángulo de reposo o de fricción interna.

Este criterio resulta apropiado para agregados finos cuyas partículas son de forma redondeada, lo que permite que la película de agua sea uniforme en toda la superficie de las mismas. Sin embargo, en el caso de los agregados finos de trituración, su angulosidad, rugosidad superficial y granulometría desbalanceada hacen que existan mayores puntos de contacto que si tuviera formas redondeadas, provocando que la aplicación del método del tronco de cono deje de ser efectivo debido a la diferente fricción interna(3). Se produce entonces un error por defecto en el contenido de humedad para el estado SSS, y por lo tanto en la absorción y densidad saturada a superficie seca. En este sentido, la norma ASTM C-128 (4) establece criterios para determinar el estado saturado a superficie seca de agregados angulosos o con alto contenido de finos en forma alternativa. Aun así, todos estos métodos coinciden en un criterio subjetivo de determinación de dicha condición:

- Dejar caer un puñado de agregado fino usado en la prueba de cono sobre una superficie, desde una altura de 10 a 15 cm, y observar los finos que se dispersan en el aire. La presencia de finos suspendidos en el aire indica este problema, y entonces la condición SSS será la correspondiente al punto en que sólo un lado del cono formado se desmorona ligeramente al retirar el molde.
- Llenar el cono rellenándolo luego de 10 golpes de compactación, haciendo otros 10 golpes, luego 3 y finalmente 2, volviendo a rellenar cada vez. Este procedimiento es diferente a un llenado con sobrante y 25 golpes normalmente usados.
- Para el caso que se note contenido de polvo excesivo, puede utilizarse un método de superficie, en el que se esparcen con la mano 100 g de material sobre una superficie plana, no absorbente, seca, limpia, oscura o brillante. Se retira el agregado luego de 1 a 3 s, si la mancha de humedad persiste por más de 2 s, entonces aún existe humedad superficial en la muestra.
- Un procedimiento similar al anterior puede hacerse con toallas de papel rígidas, para determinar la humedad superficial a partir del mojado positivo de la toalla.
- Un procedimiento colorimétrico descrito por Kandhal y Lee (5), que consiste en remojar el agregado en agua con un colorante químico especial (por ej., una solución de cloruro de cobalto). En la eliminación del agua, el color del agregado presaturado con el colorante, cambia cuando se seca superficialmente, indicando el estado SSS. El método también es afectado por distintos aspectos subjetivos como la interpretación del viraje colorimétrico en función de la coloración natural del agregado y el criterio del operador, y las variaciones del secado de acuerdo al tamaño de las partículas.

Por otra parte, la norma ASTM C-128 indica que el estado SSS se produce cuando ocurre un leve asentamiento del agregado al retirar el cono, definición que en la práctica es bastante diferente a la de IRAM 1520, donde el cono debe adoptar una forma cónica con pendiente de generatriz recta (Figura 1, c). Si bien la definición de ASTM C-128 es algo imprecisa, el término “asentamiento leve” debe entenderse como un descenso leve de la altura del cono por desplazamiento de las partículas, sin involucrar únicamente el desmoronamiento lateral. En el caso de las partículas redondeadas, ambas situaciones se dan simultáneamente dando como resultado el perfil de la Figura 1, c, pero en el caso de partículas angulosas, ambas definiciones mostrarán mayores diferencias.

Ante dicha situación, surge la necesidad de adoptar métodos alternativos al del tronco de cono para evaluar efectivamente la absorción de los agregados finos de trituración. Uno de estos métodos es el propuesto por Ueno et al (6), el cual se basa en el principio de que la conductividad eléctrica de una muestra de agregado fino es función de su contenido de humedad superficial. Esta relación presenta cambios significativos cuando el agregado pierde toda su humedad superficial, es decir, cuando se encuentra en estado saturado a superficie seca (3), ya que la corriente no puede ser transportada por el contacto directo entre las partículas sólidas. El método de Ueno et al (6) utiliza una medición directa de la conductividad, que estará muy influenciada por la calidad del

contacto en los terminales. Dado que se trata de un material granular, este contacto puede ser bastante deficiente. Entonces, surge la alternativa de utilizar la metodología de cuatro puntas, que ha sido largamente aplicada para la medición de la humedad en suelos. Esta metodología data de fines del siglo XIX, aunque el desarrollo de equipos para su implementación se produjo hacia mediados del siglo pasado (7). De esta forma, logra reducirse la incidencia de los contactos entre electrodos y el suelo.

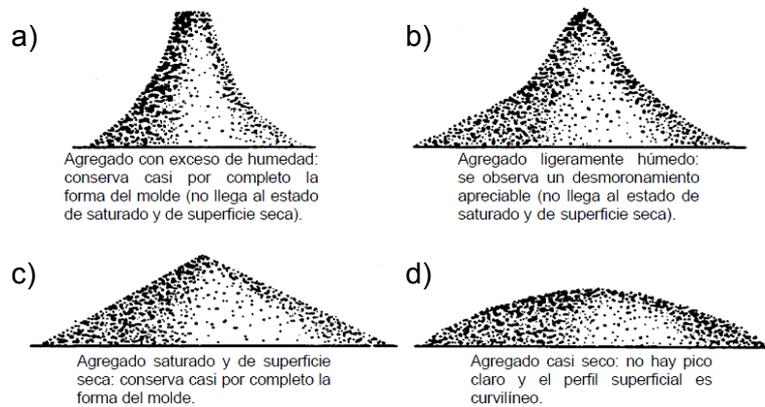


Figura 1: Comprobación visual del estado saturado a superficie seca según IRAM 1520 (2).

El método de cuatro puntas para medir la resistividad eléctrica es empleado habitualmente para evaluar el nivel de saturación del hormigón y su correlación con la corrosión de armaduras, entre otros aspectos durables (8-9). Sin embargo, no se han encontrado estudios similares al presentado por Ueno et al (6) en los cuales se verifique la eficacia del método de conductividad eléctrica medida por el método de cuatro puntas para la determinación de la absorción en las arenas de trituración. Por tal motivo, el objetivo de este trabajo es evaluar la efectividad de este método en la determinación del estado SSS al aplicarlo en dos agregados finos naturales y dos agregados finos de trituración. Se analiza el contraste entre los resultados del método del tronco de cono según IRAM 1520 y del método eléctrico en función de la representatividad de cada uno.

EXPERIENCIAS

Materiales

Se seleccionaron dos arenas naturales silíceas, intermedia (AI) y oriental (AO), y dos arenas de trituración, granítica (ATG) y cuarcítica (ATC), cuya forma de partículas se pueden observar en la Figura 2.

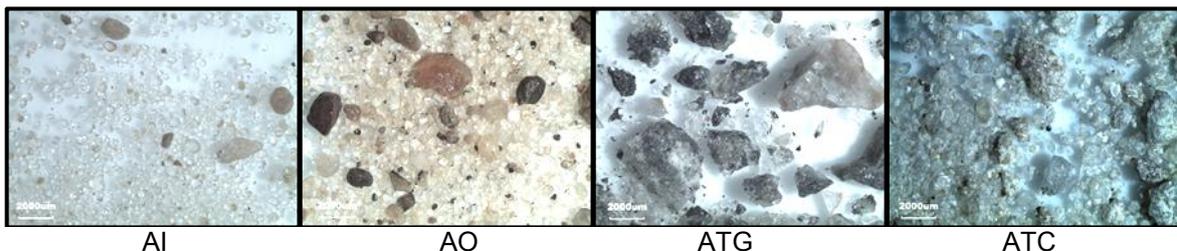


Figura 2: Características de las partículas de las arenas seleccionada.

En la Tabla 1 se indican algunas propiedades de las arenas seleccionadas, para cuya determinación se emplearon las respectivas normas IRAM. En el caso del ángulo de

fricción interna, el mismo se obtuvo a partir de medir el diámetro y la altura del montículo formado al levantar lentamente un cilindro abierto en ambos extremos lleno con la arena.

Tabla 1: Propiedades de las arenas seleccionadas.

Tipo de arena	Módulo de finura	Densidad (g/cm ³)	Ángulo de fricción (°)	Granulometría, retenido acumulado (%)						Pasa tamiz 75 µm (%)
				4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm	600 µm	300 µm	150 µm	
AI	1,99	2,66	19	0	1	3	16	80	99	0,1
AO	2,98	2,65	20	0	24	36	50	89	99	0,6
ATG	3,59	2,72	26	7	39	61	75	85	92	2,8
ATC	3,18	2,58	23	7	27	43	62	83	96	1,5

Equipamiento

Para realizar las determinaciones de conductividad eléctrica en las arenas, se fabricó un dispositivo con una sección transversal en forma de “U” para evitar la existencia de ángulos rectos que pudieran distorsionar las mediciones. El material utilizado fue PVC ya que no absorbe humedad, es aislante eléctrico y resulta fácil de limpiar. Como electrodos, en cada extremo del recipiente se colocaron placas de acero inoxidable y en el interior se colocaron dos varillas de acero inoxidable separadas 4 cm entre sí y 4 cm respecto de las placas de metal. Las dimensiones del contenedor son: 12 cm de longitud, 8 cm de alto y 5 cm de ancho. En la Figura 3 se muestra una imagen del equipo utilizado.



Figura 3: Dispositivo empleado para la medición de la conductividad eléctrica.

Para las mediciones, se utilizó una fuente de 12V±1V AC para aplicar un potencial eléctrico a las placas de acero inoxidable y dos multímetros para medir voltaje y corriente. Para el cálculo de la conductividad de la muestra, se determinó la constante de la celda a partir de la resistencia eléctrica determinada para una solución patrón de conductividad conocida, 0,01M KCl.

Procedimiento y cálculo de la absorción

Para cada una de las arenas seleccionadas, se tomó una porción representativa del material a estudiar (aproximadamente 2,5 kg) y se sumergió en agua durante 24h previo al ensayo a fin de lograr su saturación.

Se colocó la muestra dentro del contenedor en dos capas, compactando con 10 golpes la primera y 15 golpes la segunda, para lo cual se empleó el mismo pisón que el indicado para el método del molde troncocónico (IRAM 1520), procediendo al enrasado de la superficie. Posteriormente se aplicó un potencial eléctrico conectando la fuente de alimentación a las placas de los extremos y se midió la diferencia de potencial y la corriente eléctrica correspondientes. Posteriormente, se colocaron aproximadamente 200 g de la muestra testeada en un recipiente y se registró el peso húmedo. Luego, el recipiente fue colocado durante 24h en estufa a una temperatura de $105^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ a fin de obtener el peso seco de la muestra. Finalmente se determinó el contenido de humedad.

El procedimiento se repitió para varios estados de humedad de la muestra conforme se fue secando la misma, lo cual se realizó de la manera descrita en la Norma IRAM 1520, hasta que la corriente medida fue cero. Siguiendo este procedimiento es posible relacionar la humedad y conductividad, dando como resultado una curva de dos tramos que puede ser aproximada por dos rectas si la conductividad se representa en escala logarítmica. La intersección de ambas rectas constituye el momento en el que la humedad superficial de la muestra desaparece y la conductividad decae abruptamente. La humedad correspondiente al punto de intersección se determinó como la correspondiente al estado saturado y superficie seca de la muestra.

Simultáneamente, se realizó para cada determinación también el método del tronco de cono, para definir cuál era el contenido de humedad correspondiente a la disposición según la Figura 1 c. En el caso del método del tronco de cono, se consideraron además la variable de subjetividad, a partir de determinaciones realizadas por tres operarios, con el mismo equipamiento y sobre las mismas muestras.

RESULTADOS

En las Figuras 4 a7 se presentan la relación entre conductividad y humedad determinada para AI, AO, ATG y ATC, respectivamente. Cada Figura incluye datos obtenidos en 3 determinaciones independientes en cada caso. Además, se indican las rectas de ajuste y el contenido de humedad correspondiente a la intersección de las mismas, el cual se asume como el estado SSS de la arena y está representando, por lo tanto, la absorción de la misma. En cada Figura se incluyen fotos ilustrativas de resultados del método de tronco de cono para distintos estados de humedad.

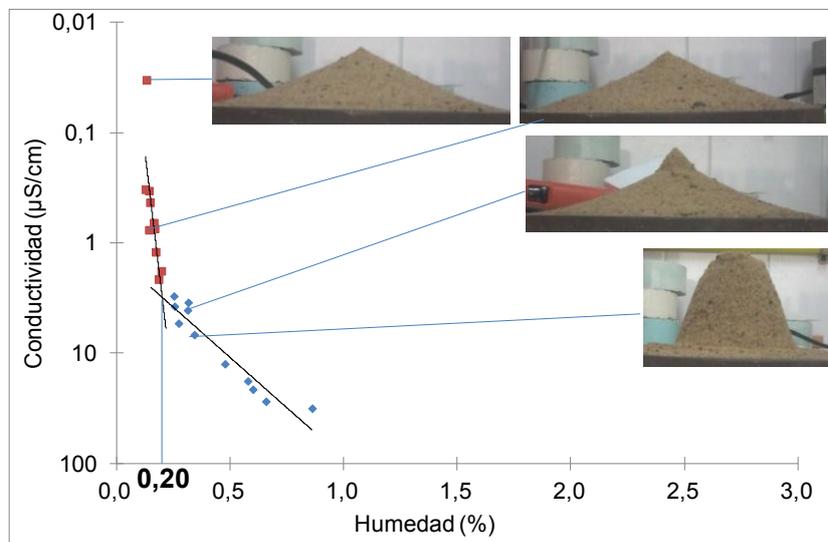


Figura 4: Relación entre conductividad y humedad para la arena intermedia.

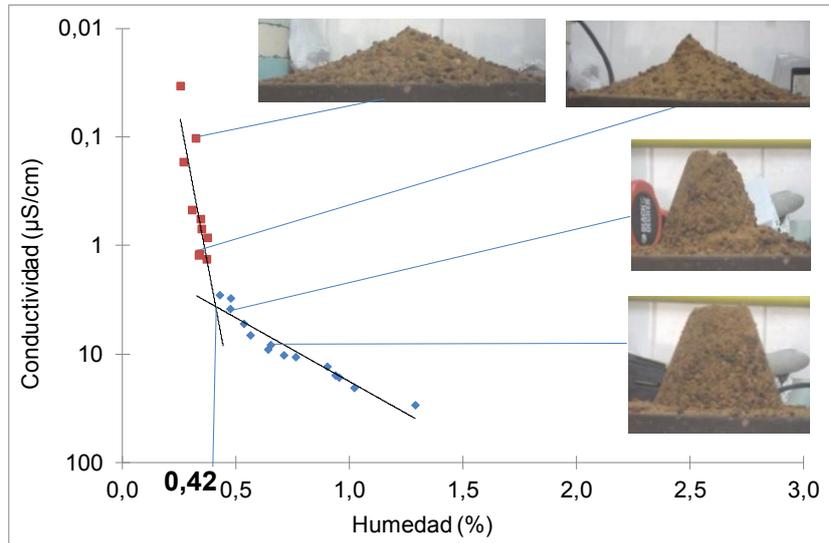


Figura 5: Relación entre conductividad y humedad para la arena oriental.

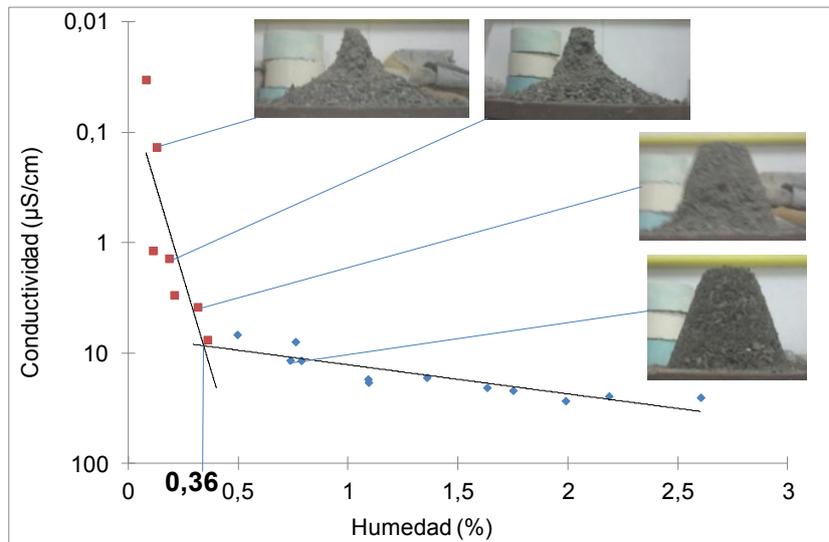


Figura 6: Relación entre conductividad y humedad para la arena de trituración granítica.

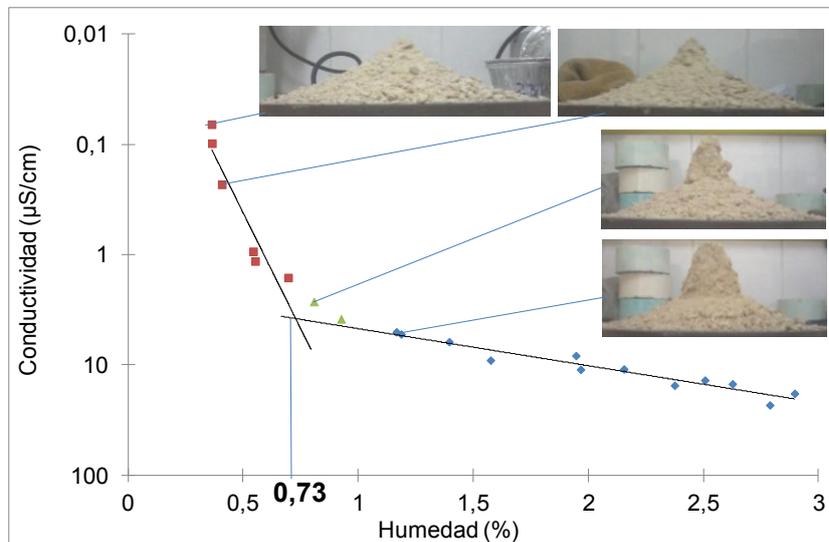


Figura 7: Relación entre conductividad y humedad para la arena de trituración cuarcítica.

En cada figura, se puede observar que la variación entre las determinaciones realizadas es acotada y presenta una buena correlación entre ambos parámetros, lo cual permite verificar que el método de la conductividad eléctrica resulta una metodología apta para la determinación del contenido de humedad del agregado fino.

En la Tabla 2 se presentan los valores de absorción obtenidos por distintos operarios mediante el método del tronco de cono y el obtenido gráficamente por el de conductividad eléctrica, para cada una de las arenas seleccionadas.

Tabla 2: Absorción de las arenas por diferentes métodos.

Tipo de arena	Absorción (%)			
	Método troncocónico			Método de Conductividad eléctrica
	Operario1	Operario2	Operario3	
AI	0,15	-	0,14	0,20
AO	0,46	0,62	0,53	0,42
ATG	0,08	0,60	0,15	0,36
ATC	0,36	1,30	0,86	0,73

Es importante destacar que la norma IRAM 1520 indica una diferencia máxima admisible para la determinación de la absorción de 0,31% y 0,66% para la repetibilidad y la reproducibilidad respectivamente. Respecto a las determinaciones realizadas con el método del cono, los valores obtenidos para las arenas silíceas por los diferentes operarios dan cuenta de que el método resulta apropiado, sin variaciones importantes entre los valores de absorción obtenidos por cada uno de ellos (0,01% para AI y 0,16% para AO). En el caso de las arenas de trituración, se produce una variación importante entre los valores de absorción obtenidos por uno u otro operario (0,52% para ATG y 0,94% para ATC). Estas diferencias radican en la dificultad de determinar fehacientemente el punto en el cual el cono de arena de trituración se desmorona, debido a la trabazón generada entre sus partículas. Las opciones que propone la norma ASTM C-128 tampoco logran subsanar el aspecto subjetivo de la determinación. Esta subjetividad induce una influencia significativa del operario, que en el caso de arenas de trituración con alta absorción se magnifica a partir de la porosidad interna de las partículas. Es decir, ATC es más porosa que ATG debido a las características de la roca originaria de cada una, y por lo tanto, el método del molde troncocónico tiene más variación en el primer caso que en el segundo.

Al comparar los valores de absorción obtenidos por el método del cono con el obtenido por el de conductividad eléctrica, se observa que las diferencias resultan escasas en el caso de las arenas silíceas, mientras que en el caso de las arenas de trituración las diferencias resultan significativas. De la comparación entre la conductividad eléctrica y la forma del cono formado en las Figuras 4 y 5, puede verse que para el caso de las dos arenas naturales, constituidas por partículas redondeadas, no existe una diferencia significativa en el contenido de humedad obtenido por el método eléctrico y la forma correspondiente a la Figura 1 c. Para las arenas de trituración, Figuras 6 y 7, la diferencia es muy significativa, y se observa que la forma de la Figura 1 c se consigue solamente cuando la conductividad es prácticamente nula, demostrando el requerimiento de un sobreseco importante. Por lo tanto, en general, se produce una subestimación de la absorción por método del cono en las arenas de trituración, debido a un secado excesivo como consecuencia de querer salvar el inconveniente de la trabazón entre partículas. A partir de ello, resulta conveniente una modificación de la norma IRAM 1520 que permita subsanar este inconveniente.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la aplicación del método de la conductividad eléctrica para la determinación efectiva del estado saturado a superficie seca de arena. Dicho método fue aplicado a dos arenas naturales silíceas y a dos tipos diferentes de arenas naturales de trituración, determinándose paralelamente la absorción de las mismas según el método del cono indicado en la norma IRAM 1520. A partir de los resultados alcanzados se puede indicar que:

- El método del tronco de cono utilizado habitualmente para la determinación del estado saturado a superficie seca de las arenas de río resulta apropiado, siendo mínima la dispersión a causa del operario. ello es debido a unabaja trabazón que supone el contacto entre partículas como consecuencia de su esfericidad.
- Aplicado a las arenas de trituración, el método del cono resulta en una subestimación de la absorción de las mismas como consecuencia de un sobresecado, ocasionado en la trabazón de sus partículas y no en un aparente contenido de humedad superficial. En este caso, se requiere un método alternativo.
- El método de la conductividad eléctrica resulta apropiado en la determinación de la absorción de las arenas de trituración, debido a que no tiene en consideración la forma de las partículas sino la pérdida de humedad superficial en las mismas, situación en la cual la conductividad decrece bruscamente. Por otra parte, presenta como ventaja el ser mucho menos subjetivo que las alternativas propuestas por ASTM C-128. El método de cuatro puntas resulta altamente confiable en cuanto al contacto eléctrico con el material granular, lo cual supone una ventaja respecto al método directo.
- La norma IRAM 1520 requiere una revisión respecto a la metodología a emplear en el caso de arenas de trituración, ya que el método indicado actualmente no puede ser aplicado universalmente.

REFERENCIAS

- (1) Cabrera, O.A., Ortega, N.F., Traversa, L.P., "Una fuente alternativa de agregados finos para el hormigón", Ciencia y Tecnología, (Universidad de Palermo), N°10, (2010), pp. 17-37.
- (2) IRAM 1520:2002, Agregados finos, Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua. IRAM, 16p.
- (3) ASTM C-128:2001, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, ASTM, 6 p.
- (4) Kandhal, P.S., Mallick, R.B., Huner, M., "Development of a new test method for measuring bulk specific gravity of fine aggregates", NACT Report 99-07, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, 277 Technology Parkway, (1999). (<https://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/files/technical-reports/rep99-07.pdf>)
- (5) JSCE-C506, "Test method for density and water absorption of slag fine aggregate for concrete by measurement of electric resistance", Japanese Society of Civil Engineers, Tokio, Japón, (2003), 7p.
- (6) Ueno, A., Kokubu, K., Ohga, H., "Basic study on the new testing method of judging the saturated dry conditions of fine aggregates", Recent Advances in Concrete Technology, SP179, (1998), pp. 481-498.
- (7) Johnson, A.I., "Methods of measuring soil moisture in the field", Geological Survey Water-Supply Paper 1619-U, United States Government Printing Office, Washington, (1962), 29p.
- (8) Andrade, C., D'Andrea, R., "La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad", Revista ALCONPAT, Vol. 1, N° 2, (2011), pp. 90-98.
- (9) González, J.A., Andrade, C., Alonso, C., "Aproximación al efecto de la resistividad del hormigón en la corrosión de armaduras embebidas en el hormigón", Materiales de Construcción, Vol. 37, N° 207, (1987), pp. 5-12.