

Evaluación de métodos para la determinación de la absorción en agregados finos reciclados

M. E. Sosa^{a*}, C. J. Zega^b, Y. A. Villagrán Zaccardi^c

^aLaboratorio de Materiales de Construcción (LEMaC, CIC-UTNFRLP) - Centro de Investigaciones y Desarrollo en Ciencias y Tecnología de Materiales (CITEMA, UTNFRLP), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), CP B1923, Berisso, Argentina. ingmesosa@gmail.com

^bLaboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT, CIC), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET,) CP 1900, La Plata, Argentina. hormigones@lemit.gov.ar

^cSustainable Materials, Flemish Institute for Technological Research, Boeretang 200, Mol, Bélgica. yury.villagranzaccardi@vito.be

Recibido: 9 de febrero de 2023

Aceptado: 1 de marzo de 2023

RESUMEN

La absorción de los agregados finos reciclados (AFR) es mencionada como la propiedad que más afecta el desempeño del hormigón con AFR. A nivel mundial el método más utilizado para evaluar dicha propiedad es el del molde troncocónico. Sin embargo, cuando los agregados presentan alto contenido de polvo y/o formas angulares la efectividad del método se reduce, generando, ya desde la década del '70, gran cantidad de cuestionamientos. Particularmente con el interés de utilizar AFR para elaborar hormigones, han surgido diferentes métodos alternativos que superan los inconvenientes que presenta el método tradicional en agregados con las características indicadas. En este estudio, diversos métodos propuestos para determinar la absorción de AFR son analizados comparativamente. De los resultados obtenidos surge una gran variabilidad de la absorción de agua determinada por distintos métodos, siendo el eléctrico y el del secado continuo los que presentan una mayor potencialidad para la determinación de la absorción.

PALABRAS CLAVE: Agregados finos reciclados, absorción de agua, estado saturado superficie seca

ABSTRACT

The absorption of fine recycled aggregates (FRA) is mentioned as the property that most affects the performance of FRA concrete. Worldwide the most used and standardized method is the frustoconical mold. However, when the aggregates have a high dust content and/or angular shapes, the effectiveness of the method is reduced, originating a great deal of questioning in the literature since the 1970s. Since then, and particularly with the interest of using FRA in concrete production, different alternative methods have emerged, which overcome the drawbacks in aggregates with the previously indicated characteristics. This study analyzes comparatively various methods proposed to determine the FRA absorption. From the results, a great variability of the water absorption determined by different methods emerges, being the electric method and the continuous drying method the ones that present the greatest potential for the determination of the actual absorption.

KEYWORDS: Fine recycled aggregates, water absorption, saturated surface dry condition

*Autor de correspondencia

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Sosa, M. E., Zega, C. J., y Villagrán Zaccardi, Y. A. (2023). Evaluación de métodos para la determinación de la absorción en agregados finos reciclados. Revista Hormigón, 63, 23–37. <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/ae4esz27p>

1. Introducción

La escasez de agregados finos aptos para la elaboración de hormigón, junto con el impacto ambiental debido a su extracción y la necesidad de reducir la huella de carbono de la industria de la construcción, han incrementado el interés por los agregados finos reciclados (AFR). Si bien a nivel mundial son pocos los países que permiten su utilización en hormigones estructurales (Japón, Países Bajos, USA), es uno de los tópicos más abordados en la literatura de la temática en los últimos años [1-5]. Los mencionados estudios coinciden en las características particulares de los AFR de hormigón. Estas incluyen menor densidad y durabilidad y mayor absorción y contenido de polvo [1-5] en comparación con los agregados finos naturales (AFN). La menor calidad de los AFR frente a los AFN se debe a la presencia de pasta de cemento endurecida en su composición.

Respecto a la posibilidad de uso del AFR como reemplazo parcial o total del AFN en la producción de hormigones, las conclusiones de los estudios son contradictorias. Con excepción de los efectos producidos sobre la fluidez de las mezclas al emplear AFR, pueden encontrarse en igual magnitud estudios que concluyen acerca de un efecto perjudicial sobre las propiedades elásticas, mecánicas y durables del hormigón [6-8] o escasa influencia o incluso mejora en dichas propiedades [5,9-10] al hacer uso de dichos agregados.

En la mayoría de los estudios en que se concluye el efecto perjudicial [6-8], se atribuye tal efecto a la alta absorción de agua de los AFR. Para mitigar las consecuencias de la alta absorción, dos prácticas metodológicas son las más empleadas; utilizar el agregado en estado saturado a superficie seca o bien adicionar al agua de mezclado la cantidad correspondiente a la absorción del agregado. Por lo tanto, la absorción de los AFR tiene un rol fundamental en el diseño de la mezcla, ya que su determinación inadecuada resultará en

un impacto directo en la relación agua/cemento (a/c) de los hormigones en los que se emplee el AFR.

Actualmente no existe un método normalizado para determinar tal propiedad de los AFR específicamente y en general se utilizan los métodos normalizados para el AFN. En tal sentido, a nivel global, la mayoría de las normas (por ejemplo, IRAM 1520 [11], ASTM C 128 [12], NBR NM 30 [13], NMX C 165 [14], UNE EN 1097-6 [15], NTC 237 [16], NTP 4000.022 [17], entre otras) estipulan el método del cono para determinar el estado saturado a superficie seca (sss) y consecuentemente su absorción. Este método resulta apropiado para agregados naturales de forma redondeada y bajos contenidos de polvo, pero es severamente cuestionado cuando dichas propiedades no se cumplen y/o los agregados tienen una alta rugosidad superficial [18-25]. Frente a dicha problemática, ya desde 1970 se proponían métodos alternativos para determinar la absorción [19,26] en agregados con las características mencionadas.

Con el interés creciente en emplear AFR en hormigones, a pesar de que presenten alta angulosidad, contenido de polvo y alta rugosidad superficial, fueron propuestos una gran cantidad de métodos alternativos [21-24,27-30], ninguno de los cuales logró consenso generalizado y es común que la absorción se determine con distintos métodos según el autor considerado.

En este trabajo se presenta una revisión de los diferentes métodos propuestos en la literatura para determinar la absorción de agregados finos, se describe sintéticamente la metodología y se especifican las limitaciones planteadas para cada uno de ellos. Complementariamente, cada uno de estos métodos es utilizado para determinar la absorción en dos AFR y un AFN, realizándose un análisis de las problemáticas y resultados obtenidos con cada uno en comparación con el método estandarizado en nuestro país (IRAM 1520 [11]).

2. Background: métodos para la determinación de la absorción

Método del cono: Es el método más utilizado a nivel global, normalizado en diversos países (por ejemplo, IRAM 1520 [11], ASTM C 128 [12], NBR NM 30 [13], NMX C 165 [14], UNE EN 1097-6 [15], NTC 237 [16], NTP 4000.022 [17], entre otras), y consiste en determinar el estado sss a partir de la observación visual de la forma que adopta una determinada cantidad de material luego de retirado el molde. El procedimiento es sencillo y consiste en sumergir la muestra de agregado en agua durante 24 horas y luego someterla a secado gradual mientras es periódicamente colocada en el molde cónico y compactada de manera normalizada. La forma que adquiere el material cuando se retira el molde define el estado sss, y consecuentemente este estado sss para el cual se calcula la absorción es definido de manera diversa en la normativa. A modo de ejemplo respecto a la forma correspondiente al estado sss, las definiciones de las normativas incluyen que se obtiene cuándo se produce “un ligero desmoronamiento del material” (ASTM C 128 [12]), “la ligera caída del agregado fino” NTP 4000.022 [17], “cuando el material se disgrega un poco, perdiendo parcialmente la forma del molde” (NMX C 165 [14]), “cuando el agregado fino se asienta levemente” (NTC 237 [16]), o “cuando el agregado fino se

desmorone” (NBR NM 30 [13]). Algunas normas como la IRAM 1520 [11], UNE EN 1097-6 [15] y AASHTO T 84 [31] además de la definición proveen esquemas o fotografía de la forma que debe adoptar el material para considerarlo en estado sss (Fig. 1).

No se trata solamente de las diferentes definiciones en diferentes normas, sino que resulta evidente que estas definiciones no resultan suficientes para determinar inequívocamente el estado saturado a superficie seca, dejando a criterio del operador dicha determinación. En adición, de las imágenes y las definiciones mencionadas se desprende que las formas que adopta el material pueden resultar diferentes e involucran el criterio del operador.

La utilización del método del cono resulta adecuada para agregados esféricos de baja rugosidad superficial (por ejemplo, la mayoría de los AFN), por cuanto la presencia de una película de agua en la superficie de las partículas le otorga cohesión al esqueleto granular, generando que cuando se pierde dicha película, el agregado se disponga según su ángulo de fricción interna. El ángulo del tronco de cono está diseñado específicamente para este límite particular. Sin embargo, en agregados con formas angulares, texturas rugosas o alto contenido de polvo, el método no resulta adecuado por

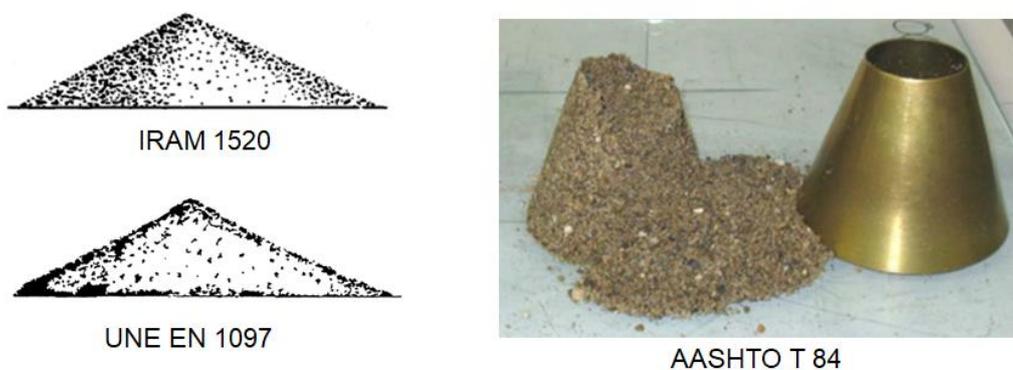


Figura 1. Esquema de la forma del agregado al alcanzar el estado sss, según IRAM 1520 [11], UNE EN 1097 [15] y AASHTO T 84 [31].

cuanto el ángulo de fricción interna es elevado y obtener dicha forma implica un sobre secado del material [19-25]. Se podría pensar en contar con troncos de cono variables para diferentes tipos de agregados, pero ello no parece práctico ya que sería necesario también determinar el ángulo de fricción interna del material.

Método colorimétrico: Este método fue propuesto por Kandhal y Lee [19] y es uno de los métodos complementarios indicados en la norma ASTM C 128 [12] cuando los agregados poseen características que hacen cuestionable la utilización del método del cono. En este método se sumerge al agregado en una solución de cloruro de cobalto (CoCl_2) al 5 % y posteriormente se lo somete a un secado gradual hasta que la superficie del agregado tome un color azulado. No se han encontrado en la literatura estudios que utilicen este método para el AFR, ni cuestionamientos al mismo.

Método del paño de papel: Este método ha sido normalizado por el Instituto Francés de Ciencia y Tecnología para el Transporte, el Desarrollo y las Redes (IFSTTAR N° 78) [31]. Consiste en colocar periódicamente sobre un paño de papel absorbente de color (tipo tissue) una muestra de agregado previamente saturada en agua y sometida a secado progresivo, ejerciendo una suave presión. Este último procedimiento se repite hasta determinar la ausencia de rastro de humedad sobre el papel. Se asume que en dicho momento el agregado habría alcanzado el estado sss y consecuentemente se determina su peso húmedo para el cálculo de la absorción. Este método ha sido utilizado para determinar la absorción de AFR por diversos autores [21,32-34]. Diferencias mayores a 187% fueron reportadas al comparar la absorción de agua determinada por este método en comparación con el método del cono [25].

Método centrífugo: Este método fue propuesto para agregados livianos por Miller et al. [35] presentando una variabilidad de 0,45 % evaluada a partir de más de 25 operarios en distintos laboratorios. El método utiliza una centrifuga de vasos en la cual se introduce el AFR previo sumersión durante 24 horas, para someterlo luego a una fuerza centrífuga. Dicha fuerza expulsará el agua dentro de los poros capilares de la muestra toda vez que sea mayor a la tensión capilar dentro del poro. Sometida la muestra de agregado a la acción centrífuga, a intervalos regulares de tiempo es retirada del dispositivo, se seca hasta peso constante y se calcula su humedad. Posteriormente, graficando la curva tiempo-humedad se obtiene una curva que se vuelve asintótica a determinado tiempo (entre 3 y 10 minutos [21,28]). El estado de humedad para el tiempo en que la curva se vuelve asintótica corresponde al estado sss.

En función de la velocidad de rotación del equipo podría mencionarse que habrá una determinada cantidad de agua que no sería expulsada de los poros cuya tensión capilar sea mayor a la fuerza centrífuga aplicada, y por consiguiente cierta limitación en la determinación de la absorción. Sin embargo, la única crítica reportada del método [36] es que la fuerza centrífuga se aplica en una dirección fija y el agua en los poros que no coinciden en orientación con esa dirección podría retenerse y, consecuentemente, la absorción determinada resultar en una subestimación. El método ha sido utilizado para evaluar la absorción de AFR por Li et al. [28] sin contrastar el valor de absorción obtenido por este y otros métodos.

Método eléctrico: El método se encuentra normalizado en Japón para evaluar la conductividad eléctrica en suelos [37]. Aplicado en agregados, el mismo consiste en determinar la conductividad eléctrica de los mismos en diferentes condiciones de humedad.

Graficando la relación entre ambas variables en escala semilogarítmica se obtiene una curva que puede aproximarse por dos rectas, correspondiendo la intersección de ellas al estado saturado superficie seca (Fig. 2). El método ha sido utilizado para AFR y agregados finos naturales [20] mostrando una buena correlación con los valores obtenidos de absorción comparativamente con el método del cono para los AFN que poseían forma redondeada y bajo contenido de polvo. Contrariamente, en AFR y AFN con alto contenido de polvo, alta rugosidad superficial y formas angulosas, las diferencias obtenidas fueron significativas.

Método de secado continuo: En este método, una muestra de agregado previamente saturado en agua durante 24 horas es secada en estufa registrándose su peso de manera continua. El método se basa en el principio de la evaporación en medios porosos que establece que la velocidad de evaporación superficial es mayor que en el medio poroso. Consecuentemente si se representa el gradiente de secado en función del tiempo, la curva representativa presenta tres etapas bien definidas. La primera etapa con una pendiente reducida corresponde al calentamiento del material, la segunda etapa con una pendiente pronunciada y gradiente constante corresponde a la pérdida del agua superficial y finalmente la última etapa

corresponde a la evaporación del agua dentro de los poros (Fig. 3). La transición entre las dos últimas etapas, es decir, el quiebre de la curva corresponde al estado sss. Diversos autores han utilizado este método [29,38] sobre AFR reportando diferencias menores al 3 % en comparación con la absorción obtenida por el método del cono. Respecto de las críticas al método, Duan et al. [36] reportan que cuando los agregados ubicados en el centro de la muestra alcanzan el estado sss los agregados más superficiales se han sobre secado. Adicionalmente, utilizando igual principio y metodologías análogas, pero utilizando microondas o analizadores de humedad, [24,39] diversos autores reportaron la dificultad de establecer con certeza el quiebre de la curva, la variación de la absorción en función de la cantidad de muestra utilizada y lecturas incoherentes debido a la vibración de la estufa.

Método de inmersión: este método fue propuesto por Leite y Santana [2] y es, luego del cono, el método más utilizado en la literatura para determinar la absorción de AFR [2,7,40]. Consiste en registrar de manera continua el peso del material (previamente seco hasta peso constante) al ser sumergido en agua y hasta las 24 horas. La absorción se calcula a partir de la diferencia de peso entre el peso final del material al ser sumergido y el inicial, referido al peso inicial. Una imposibilidad del método es establecer el

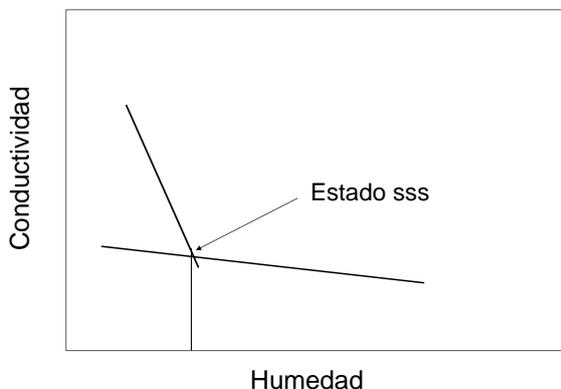


Figura 2. Curva conductividad- humedad del método eléctrico.

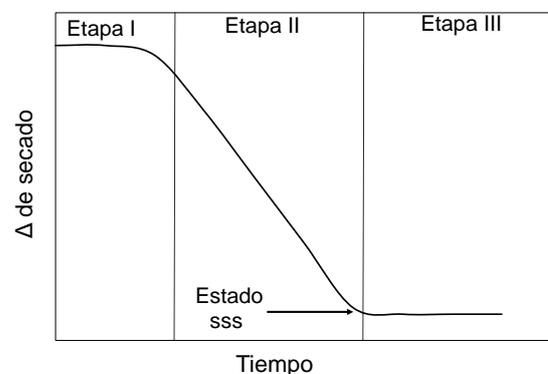


Figura 3. Relación gradiente de secado -tiempo del método de secado continuo.

peso inicial, es decir al sumergirlo, puesto que toma cierto tiempo para que la balanza estabilice la lectura. En adición, Rodríguez et al. [40] reportaron lecturas incoherentes debido a la inclusión de aire entre las partículas de las muestras sumergidas. Cabe mencionar que cuando el agregado es sumergido el gradiente de humedad es el mayor y se reducirá paulatinamente a medida que el agregado absorba agua. Por consiguiente, el tiempo que transcurre entre el inicio de la inmersión y la lectura inicial impacta de manera directa en el cálculo de la absorción. Adicionalmente, en estudios previos se encontraron diferencias de más de 322 % en la absorción obtenida por este método en comparación con el del cono en AFR.

Método del matraz aforado: El método fue propuesto por Castro et al. [22] para agregados livianos y utilizados por Li et al. [28] en AFR. Consiste en colocar una muestra de agregado en un matraz aforado y completar con agua destilada hasta el aforo agitando suavemente y registrando el peso del conjunto. Transcurridas 24 horas se agita el matraz aforado, se deja reposar 5 minutos y se completa con agua hasta el aforo. La absorción se calcula relacionando la cantidad de agua adicionada respecto del peso de la muestra al inicio del ensayo. La mayor problemática del método consiste en que toma un tiempo de hasta 5 minutos registrar el peso de la muestra cuando se adiciona el agua. Para superar dicho inconveniente Fernández-Fanjul et al. [41] utilizaron glicerina en lugar de agua destilada. Cabe mencionar que aun en agregados naturales utilizando

este método la absorción obtenida fue significativamente mayor que la obtenida por el método del cono.

3. Metodología

Cada uno de los métodos mencionados fue utilizado para evaluar la absorción de agua sobre dos AFR, uno generado a partir de la trituración de probetas moldeadas en laboratorio (AFRL) y otro obtenido de la trituración de un pavimento que culminó su vida en servicio (AFRP). Puesto que el método del cono resulta adecuado para determinar la absorción en AFN, y con el fin de validar el valor de absorción obtenido por cada método alternativo en estudio, se utilizó también como AFN una arena silíceo (AS). Las principales características de los agregados utilizados se presentan en la Tabla 1.

4. Resultados

Método del cono (IRAM 1520 [11]). Se tomó como definición del estado saturado a superficie seca (sss) la forma ilustrada en la norma (ver Fig. 1). Los agregados fueron sumergidos en agua durante 24 horas y posteriormente sometidos a una corriente de aire suave revolviendo de manera regular para lograr un secado uniforme. Periódicamente se realizó el ensayo del cono hasta obtener la forma mencionada luego de retirado el cono. En el caso del AFN la obtención de la forma indicada en la norma es sencilla de observar. Contrariamente, en los AFR reviste mayor complejidad. Esto se debe

Tabla 1. Propiedades de los agregados bajo estudio.

Agregado	Módulo de finura	Densidad	Contenido de polvo (%)	Contenido de pasta (%)
AFRL	3,36	2,49	2,7	33
AFRP	3,03	2,41	7,4	31
AS	1,2	2,65	0,12	-

a la forma angular y la mayor cantidad de partículas con tamaño menor a $75\ \mu\text{m}$, tal como fuera discutido anteriormente (ver Introducción y Background). Adicionalmente, se observó que cuando se adquiere la forma indicada en la norma, el aspecto visual de las partículas de mayor tamaño de los AFR es compatible con un mayor secado en comparación con las partículas de menor tamaño.

Método colorimétrico. En la descripción del método [19], se indica que la solución a utilizar es de CoCl_2 al 5 %. Sin embargo, para dicha concentración no se observó el color azulado en la superficie de las partículas de AFR, por lo que se trabajó con una concentración del 15 %. Todos los agregados en evaluación fueron sumergidos durante 24 horas en la mencionada solución y posteriormente sometidos al mismo procedimiento de secado indicado en el método del cono. Conforme avanzó el secado pudo distinguirse el cambio de coloración con gran claridad en el caso de los AFR, en tanto que en el AFN solo se observó en algunas partículas. Independientemente del agregado considerado, resulta sencillo detectar visualmente que el cambio de coloración se produce más rápidamente en las partículas de mayor tamaño. Finalmente, puesto que la coloración no es homogénea en ninguno de los tres agregados evaluados, determinar el cambio de coloración de la muestra resulta subjetivo. En la Fig. 4 se presenta a modo de

ejemplo lo mencionado para AS (a) y AFRL (b).

Método del paño de papel. Previo a la realización del ensayo, los agregados fueron sumergidos en agua durante 24 horas y sometidos al secado indicado en el método del cono. Conforme avanzó el secado, periódicamente una muestra de agregado de aproximadamente 100 g se colocó sobre el paño de papel y se presionó ligeramente. Cuando visualmente el agregado presentaba gran cantidad de agua superficial el rastro de humedad resultó sencillo de distinguir. Sin embargo, cuando no se evidencia rastro sobre el papel puede apreciarse visualmente que el agregado presenta aspecto de estar húmedo superficialmente. En la Fig. 5 se presenta para el agregado AS el rastro de humedad en el paño de papel conforme avanza el secado (de izquierda a derecha), incluyéndose además la forma que adopta el material al aplicar el método del cono sobre la muestra que no deja rastro de humedad en el paño. A pesar de no registrarse humedad en el paño, el método del cono evidencia la existencia aun de humedad en la superficie de las partículas, observándose suficiente capacidad de cohesión entre las mismas. Esta diferencia puede ser atribuida al hecho que sea dificultosa la percepción de la humedad sobre el papel cuando el agregado no lo está en demasía, volviendo al método del paño un tanto subjetivo y dependiente de la pericia del operario.



Figura 4. Método colorimétrico en AS (a) y AFRL (b).



Figura 5. Paño de papel post ensayo y correlación con el método del cono.

Método centrífugo. En la descripción del método se utiliza una centrífuga de vasos horizontales [29,35]. Puesto que la centrífuga disponible en el laboratorio es de vasos verticales, en primera instancia se utilizó dicho equipamiento. Como los resultados no fueron consistentes (con el incremento en el tiempo de centrifugado no se producía una pérdida de agua del conjunto del agregado), posteriormente se utilizó una centrífuga de plato en lugar de una de vasos. Así, una muestra de agregado previamente sumergida en agua fue insertada en el dispositivo, fijando una velocidad de rotación de 3500 rpm conforme lo indicado en la literatura [29,35]. A diferentes intervalos de tiempo, una muestra de agregado de alrededor de 150 g fue retirada del dispositivo y secada a 100 °C hasta peso constante. En la Fig. 6 se presentan las curvas obtenidas para los tres agregados bajo estudio (a) y la forma que adoptan los agregados al realizar el ensayo del cono cuando la curva se torna asintótica

(b). Se observa que la humedad se reduce con el incremento del tiempo y, en coincidencia con algunos autores [29,35], a los 10 minutos la curva se torna asintótica para los tres agregados bajo estudio. No obstante, visualmente los agregados parecieran estar aun con humedad superficial.

Método eléctrico. Para este estudio, la forma del recipiente fue de ángulo recto, las dimensiones fueron de 10 cm de largo, 5 cm de alto y la distancia entre los electrodos fue de 4 cm, que difiere de los utilizados por otros autores [20,23]. La Fig. 7 presenta las curvas de conductividad-humedad para AS (a) y AFRP (b). Se incluye en la figura la forma que se obtiene en el método del cono en correspondencia con el contenido de humedad determinado para el punto más cercano (en la rama de menor humedad) a la intersección de las rectas señalado como estado sss. Se observa que para el agregado AS cuando el método eléctrico indica el

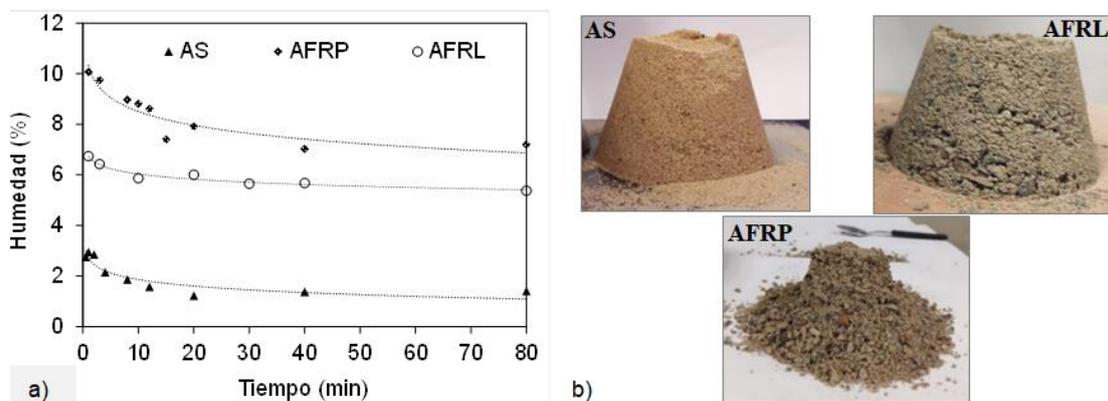


Figura 7. a) Curva Humedad-tiempo y b) forma del cono determinado a 10 min (curva asintótica).

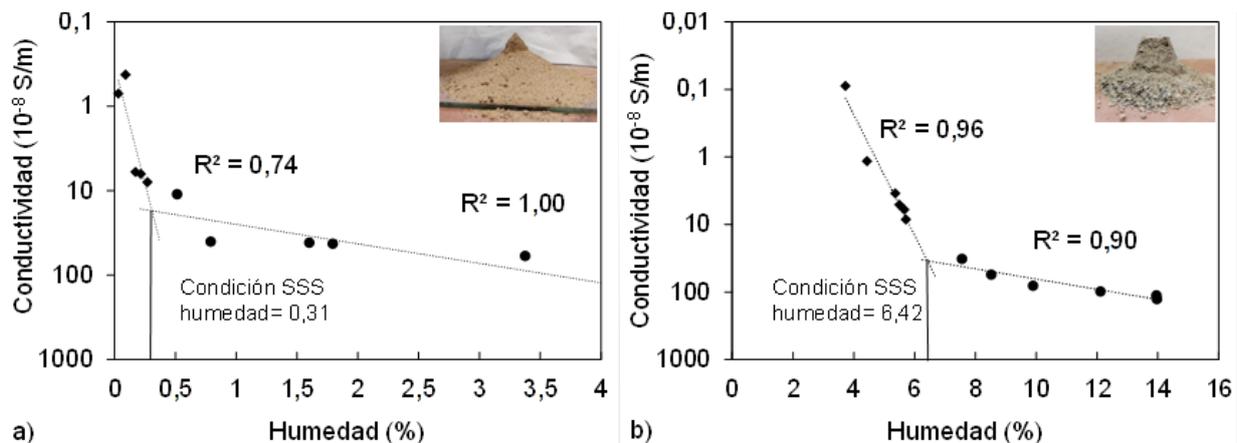


Figura 7. Curvas del método eléctrico para a) AS, b) AFRP.

estado sss, la forma del cono se asemeja a la indicada en la norma IRAM 1520 [11] para dicho estado. Por el contrario, para el AFRP cerca del estado sss según el método eléctrico, la forma del cono podría considerarse (o no, dependiendo de la experiencia del operador) en estado sss en las normas ASTM C 128 [12] y NMX C 165 [14], pero aún está lejos de la forma indicada en las normas EN 1097 (anexo e) [15], NTC 238 [16], IRAM 1520 [11] y NTP 4000.022 [17].

La similitud en la condición sss para el método del cono y este método en el agregado AS ha sido reportada en trabajos previos y es un indicador de la eficiencia del método [20]. Por el contrario, en el agregado AFRP las diferencias entre el método eléctrico y el método de cono están en relación con el alto contenido de finos y su mayor ángulo de fricción, que a su vez son responsables de la necesidad de sobre secado para obtener la forma indicada en la norma nacional [20-21].

En la norma JSCE [37], para trazar la curva humedad-conductividad se requieren tres puntos en cada rama, por lo que son necesarios más de seis registros para obtener una distribución de puntos adecuada. Sin embargo, dicha cantidad de puntos no resulta suficiente para asegurar que las tres mediciones tomadas se encuentren a ambos lados de curva, por lo que para construir la

gráfica entre la humedad y la conductividad se necesitan varias mediciones, lo que implica una muestra mayor que la indicada en IRAM 1520 [11] y consecuentemente mayor esfuerzo y tiempo.

Método del secado continuo. En la Fig. 8 se muestran las curvas de secado continuo de los agregados en evaluación, AS (a) y, AFRP y AFRP (b). En la presentación de resultados se incluyen solo los primeros 300 minutos para una mejor visualización y debido a que los tres agregados han alcanzado la etapa III mencionada en la descripción del método (ver Background). Se observa en la figura que el cambio de pendiente se produce en diferentes tiempos para los tres agregados, lo cual podría estar relacionado con la cantidad de muestra utilizada. En cada curva pueden observarse saltos en las pendientes lo que podría deberse a la vibración de la estufa y la consiguiente oscilación del material que se encuentra suspendida sobre ella. Similares variaciones en el gradiente pueden observarse en el trabajo Mechling et al. [42]. Como fue mencionado anteriormente, la mayor complejidad del método reviste en la identificación del quiebre de la curva. De hecho, el cálculo de la absorción teniendo en cuenta diferentes puntos de quiebre provoca diferencias significativas en el valor de absorción. Por ejemplo, para el agregado AS la absorción varía de 0,27 % a 0,64 %, mientras que para el AFRP varió de 4,99 % a

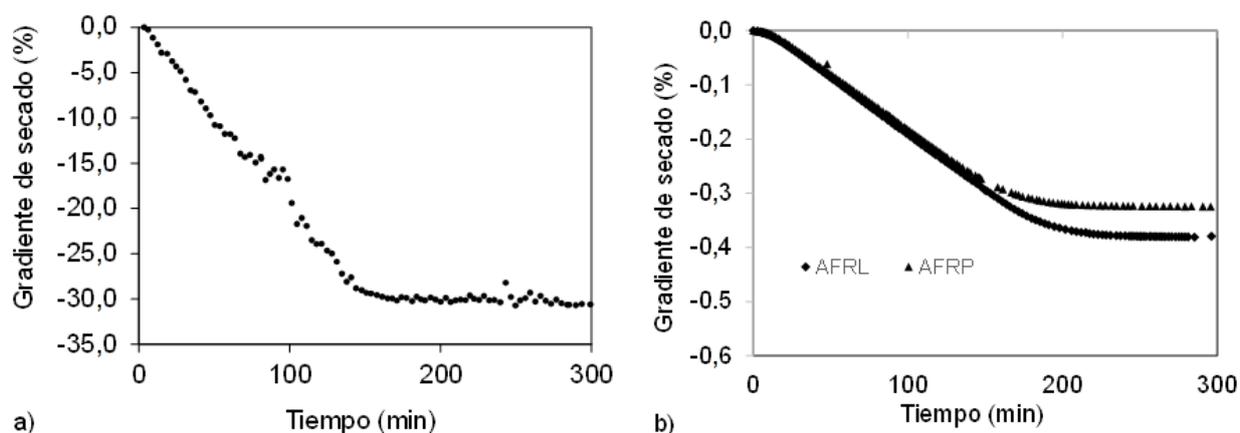


Figura 8. Curvas del método de secado continuo para el agregado a) AS b) AFRP y AFRL.

7,59 %. En la presentación de resultados el valor informado resulta del promedio de los valores extremos para los que se consideró el quiebre de la curva. Si bien el método resulta sencillo y poco laborioso, una mejora en la definición del quiebre para reducir la incertidumbre sobre la absorción determinada resulta necesaria. Gentilini et al. [25] sugieren el uso de la media móvil para una mejor determinación del quiebre de la curva. Sin embargo, este procedimiento disminuyó el ruido de la curva sin una mejora notoria en la determinación de éste.

Método de inmersión. En este método, al igual que en el método del matraz aforado, no es posible registrar el peso al tiempo cero, por lo que la primera lectura se registró luego de estabilizada la balanza, lo que consumió en promedio un tiempo de 2 minutos y 43 segundos. Este método permite conocer la absorción a distintos intervalos de tiempo y construir la curva absorción-tiempo. Sin embargo, como el fin de este trabajo es valorar las diferencias en la absorción entre diferentes métodos, solo se tomó la lectura inicial y a 24 horas para los tres agregados. La imposibilidad de tomar la primera lectura, junto con la laboriosidad del método resultan los principales inconvenientes del mismo.

Método del matraz aforado. Como se mencionó anteriormente, el principal problema a resolver en este método es la imposibilidad

de registrar la lectura en el tiempo 0, es decir, cuando el agua entra en contacto con la muestra. El tiempo hasta la primera lectura duró 2 minutos y 27 segundos (1 de estos minutos se usa para agitar la muestra para la liberación de burbujas). En ese tiempo, los agregados presentan el mayor gradiente de humedad y la cinética de absorción es más rápida. Sin embargo, esta cantidad de agua no se computa para calcular la absorción, puesto que no se puede mensurar. Un inconveniente no mencionado en la literatura es que las partículas más finas flotan generando una "espuma" en la parte superior del nivel del líquido, lo cual dificulta la observación de la lectura de manera irrefutable (Fig. 9a). Para solucionar este inconveniente, se utilizó alcohol isopropílico para disolver la espuma (Fig. 9b). Sin embargo, esto aumenta el tiempo para tomar el primer registro a 2 minutos y 58 segundos, tiempo en que la muestra continúa absorbiendo agua. Para medir el posible beneficio de usar el alcohol isopropílico, ambos procedimientos se utilizaron para el agregado AS de manera de poder establecer la potencial diferencia en la absorción al utilizar ambas metodologías. Cuando se utilizó alcohol isopropílico la absorción fue de 0,43 % en tanto que al utilizar agua la absorción fue del 0,49 %. Puesto que la diferencia no resulta significativa y la medición

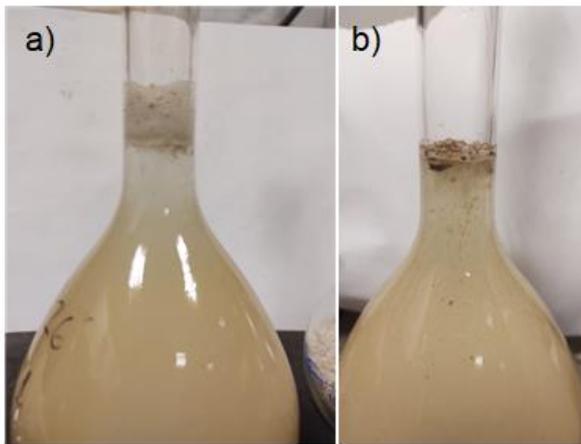


Figura 9. Método del matraz aforado.
a) formación de espuma al utilizar agua, b) sin espuma al utilizar alcohol isopropílico.

del nivel de agua resulta más sencilla al usar alcohol isopropílico, esta fue la metodología empleada para todos los agregados.

El resumen de los valores de absorción obtenidos con cada método en análisis para los agregados bajo estudio se presenta en la Tabla 2. Resulta evidente la gran variabilidad de la absorción en función de los diferentes métodos empleados. Para el agregado AS el rango de variación fue de 0,01 % a 1,57 %. Para el agregado AFRL el rango va de 2,47 % a 11,38 %. Para el agregado AFRP el rango es de 2,82 % a 12,27 %.

5. Discusión

De la evaluación de los diferentes métodos surge que el método colorimétrico y el del paño de papel resultan subjetivos para determinar el estado sss y, por lo tanto, no presentan una mejora de fondo frente al método del cono. Aun así, la subjetividad en los métodos alternativos parece ser independiente del ángulo de fricción interna, lo que sí sería una ventaja a destacar. El método de inmersión y el del matraz aforado no presentan dicha limitación de subjetividad. Sin embargo, presentan otras limitaciones que junto a la significativa mayor absorción

Tabla 2. Valores de absorción para los distintos métodos en análisis.

Método	AS	AFRL	AFRP
IRAM 1520	0,30	3,80	3,70
Colorimétrico	0,01	2,47	2,82
Del paño de papel	1,02	8,14	9,12
Centrifugo	1,57	6,42	8,97
Eléctrico	0,31	4,85	6,42
Secado continuo	0,45	6,29	6,36
Inmersión	1,23	11,38	12,27
Del matraz aforado	0,43	8,13	7,42

del agregado AS obtenida en comparación al método del cono (43 % y 310 % respectivamente) hacen estos métodos poco eficientes para la determinación de la absorción.

El método colorimétrico subestima el valor de absorción, hecho que resulta de la necesidad de un sobre secado para obtener un color azulado uniforme en el material. Por su parte, tanto el método centrifugo como el del paño de papel parecen sobreestimar la absorción, hecho que resulta evidente al compararlos con la forma que adopta el cono en el método normalizado con el agregado AS. Si bien dicha tendencia se mantiene, e incluso resulta mayor para los AFR en evaluación, dicha comparación no sería válida por cuanto el método normalizado es justamente el cuestionado para aplicar sobre dichos agregados de trituración.

Por otra parte, si bien el método de secado continuo sobrestima la absorción del agregado AS, este valor varía en función de la forma de considerar el quiebre de la curva. Una mejora del método que permita establecer con certeza dicho quiebre permitiría considerarlo como una alternativa eficiente para agregados en los que el método del cono no resulta adecuado. El método eléctrico se presenta como el de mayor potencialidad como alternativa al método del

cono debido a la similitud en el caso del agregado AS (en comparación con el valor obtenido por el método del cono) y a la gran reproducibilidad y repetibilidad reportada en estudios previos [20]. El número de puntos necesarios para la obtención de ramas confiables parece ser un aspecto que merece mayor análisis con vistas a mejorar la reproducibilidad del método.

Finalmente debe mencionarse que, en términos prácticos, debido a la baja absorción del AS las diferencias en la absorción determinada por los distintos métodos no generan una gran implicancia al momento de la dosificación de hormigones que utilizarán este AN. Sin embargo, la mayor absorción de los AFR y el gran rango de variación en función del método considerado ponen de manifiesto la necesidad de establecer una única metodología para su evaluación a fin de evitar modificaciones en la relación a/c y consecuentemente en las propiedades de los hormigones en los que se emplean AFR.

6. Conclusiones

Del análisis de la literatura sobre distintos métodos para determinar la absorción de agua de agregados finos, así como del análisis experimental sobre dos agregados finos reciclados (AFR) y un agregado fino natural (AS) pueden exponerse las siguientes conclusiones:

- Los métodos del paño del papel y colorimétrico envuelven una gran subjetividad del operario en la definición del estado sss y consecuentemente no representan una mejora al método normalizado.

- Los métodos centrífugo y del paño de papel resultan en una sobreestimación de la absorción por cuanto al obtenerse el estado sss y/o la absorción conforme al método, los agregados presentaban aun humedad en su superficie. Esto fue fácilmente constatable al realizar el ensayo del cono para el agregado

AS en correspondencia con la absorción indicada por dichos métodos.

- La forma requerida por el método del cono para determinar el estado sss fue fácil de establecer en el agregado AS, pero resultó subjetiva y compatible con un sobre secado del material en los AFR.

- El método eléctrico y el del secado continuo resultaron los de mayor potencialidad para determinar la absorción en aquellos casos en el que las características del agregado permiten cuestionar la pertinencia del método del cono. Las desventajas de estos métodos resultan en la demanda de una mayor cantidad de muestra y esfuerzo en el caso del método eléctrico, y en una necesaria mejora en la determinación del quiebre de la curva humedad-tiempo en el caso del secado continuo.

- La absorción de agua obtenida por los diferentes métodos presentó una gran variabilidad. Un único y eficiente método resulta necesario para determinar la absorción de agregados finos que no provengan de depósitos naturales, presentándose el método eléctrico como el de mayor potencial.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento por el apoyo financiero de la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación, a través del PICT 2017-0091 (FONCyT).

Referencias

- [1] Akono, A. T., Chen, J., Zhan, M., y Shah, S. P. (2021). Basic creep and fracture response of fine recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 266, 121107. <https://doi.org/ghhc9z>

- [2] Leite, M. B., y Santana, V. M. (2019). Evaluation of an experimental mix proportion study and production of concrete using fine recycled aggregate. *Journal of Building Engineering*, 21, 243–253. <https://doi.org/gpwc62>
- [3] Sivamani, J., y Renganathan, N. T. (2021). Effect of fine recycled aggregate on the strength and durability properties of concrete modified through two-stage mixing approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 85869–85882. <https://doi.org/gj38wj>
- [4] Trottier, C., Grazia, M. T., Macedo, H. F., Sanchez, L. F. M., de Andrade, G. P., de Souza, D. J., Naboka, O., Fathifazl, G., Nkinamubanzi, P. C., y Demers, A. (2022). Freezing and thawing resistance of fine recycled concrete aggregate (FRCA) mixture designed with distinct techniques. *Materials*, 15(4), 1342. <https://doi.org/jzh2>
- [5] De Sousa, D. J., de Grazia, M. T., Macedo, H. F., Sanchez, L. F. M., de Andrade, G. P., Naboka, O., Fathifazl, G., y Nkinamubanzi, P. C. (2022). Influence of the mix proportion and aggregate features on the performance of eco-efficient fine recycled concrete aggregate mixtures. *Materials*, 15(4), 1355. <https://doi.org/jzh3>
- [6] Ravindrarajah, R. S., y Tam, T. C. (1987). Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete. *Magazine of Concrete Research*, 141(39), 214–220. <https://doi.org/fvhcxw>
- [7] Evangelista, L., y de Brito, J. (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32, 9–14. <https://doi.org/ckf3fq>
- [8] Zega, C. J., y Di Maio, A. A. (2011). Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. *Waste Management*, 31, 2336–2340. <https://doi.org/fh3qxt>
- [9] Pavlů, T., Fořtová, K., Mariaková, D., Řepka, J., Vlach, T., y Hájek, P. (2022). High-performance concrete with fine recycled concrete aggregate: Experimental assessment. *Structural Concrete*, en prensa, 1–11. <https://doi.org/jzh4>
- [10] Revilla-Cuesta, V., Ortega-López, V., Skaf, M., y Manso, J. M. (2020). Effect of fine recycled concrete aggregate on the mechanical behavior of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 263, 120671. <https://doi.org/gpwc6p>
- [11] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2009). *IRAM 1532 Agregados. Método de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua*.
- [12] American Society for Testing and Materials International (2001). *ASTM C128 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregates*.
- [13] Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). *NBR NM 30 Agregado miúdo. Determinação da absorção de água*.
- [14] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación de México (2014). *NMX C 165 Industria de la Construcción. Agregados. Determinación de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua del agregado fino. Método de ensayo*.
- [15] Asociación Española de Certificación y Normalización (2011). *UNE EN 1097-6 Ensayos para determinación las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6, Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua*.
- [16] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (1995). *NTC 237 Ingeniería Civil y Arquitectura. Método para determinar la densidad y la absorción de agua del agregado fino*.
- [17] INDECOPI (2013). *NTP 4000.22 Método de ensayo normalizado para la densidad relativa real (peso específico) y la absorción de agua. Instituto*.
- [18] Kasemchaisiri, R., y Tangtermsirikul, S. (2007). A method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1322–1334. <https://doi.org/ffwxx6>
- [19] Kandhal, P. S., y Lee, D. Y. (1970). An evaluation of the bulk specific gravity for granular materials. *Arizona Highway Research Report*, 307, 44–60.
- [20] Sosa, M. E., Carrizo, L. E., Zega, C. J., y Villagrán Zaccardi, Y. A. (2018). Water

- absorption of fine recycled aggregates: effective determination by a method based on electrical conductivity. *Materials and Structures*, 51, 127. <https://doi.org/gfcvb9>
- [21] Zhao, Z., Remond, R., Daminot, D., y Xu, W. (2013). Influence of hardened cement paste content on the water absorption of fine recycled concrete aggregates. *Journal on Sustainable Cement-Based Materials*, 2(3), 186–203. <https://doi.org/gpwc7j>
- [22] Castro, J., Keiser, L., Golias, M., y Weiss, J. (2011). Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures. *Cement and Concretes Composites*, 3, 1001–1008. <https://doi.org/c25rz6>
- [23] Kim, J., Zi, G., y Lange, D. A. (2017). Measurement of water absorption in very fine particles using electrical resistivity. *Materials Journal*, 114(6), 957–965. <https://doi.org/ggpr3r>
- [24] Rueda, J., Dapena, E., Alaejos, P., y Menéndez de Llano, S. (2015). An accelerated test to assess the quality of recycled concrete sands based on their absorption capacity. *Construction and Building Materials*, 78, 464–469. <https://doi.org/gpwc9t>
- [25] Gentilini, P., Yazoghli-Marzouk, O., Delmotte, V., Descantes, Y. (2017). Determination of the water content of fillerised fine aggregates in the saturated surface dry state. *Construction and Building Materials*, 98, 662–670. <https://doi.org/jzh5>
- [26] Dana, J. S., y Peters, R. J. (1974). Experimental moisture determination for defining saturated surface dry state of highway aggregates. *Arizona Highway Research Reports*, 6, 1–47.
- [27] Leite, M. B. (2001) Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição [Tesis doctoral, Escola de Engenharia. Universidade Federal Rio Grande Do Sul].
- [28] Li, Z., Liu, J., y Tian, Q. (2018). Method for controlling the absorbed water content of recycled fine aggregate by centrifugation. *Construction and Building Materials*, 160, 316–325. <https://doi.org/gpwc7q>
- [29] Hlawatsch, F., Aycil, H., y Kropp, J. (2011). An automated test method for density in the saturated surface dry state (SSD) of porous granular materials. En V. M. John, E. Vazquez, S. C. Angulo, y C. Ulsen (Eds.), *Proceedings of the 2nd International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment* (pp. 459–468). RILEM Publications SARL.
- [30] American Association of State Highway and Transportation Officials (2022). *AASHTO T 84 Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate*.
- [31] IFSTTAR. Test Method No. 78:2011. *Tests on aggregates for concrete: measurement of total water absorption by a crushed sand*. Paris: IFSTTAR.
- [32] Zhao, Z., Xiao, J., Daminot, D., Rémond, S., Bulteel, D., y Courard, L. (2022). Quantification of the Hardened Cement Paste Content in Fine Recycled Concrete Aggregates by Means of Salicylic Acid Dissolution. *Materials*, 15 (9), 3384. <https://doi.org/gqv246>
- [33] Delobel, F., Bulteel, D., Mechling, J. M., Lecomte, A., Cyr, M., y Rémond, S. (2016). Application of ASR tests to recycled concrete aggregates: Influence of water absorption. *Construction and Building Materials*, 124, 714–721. <https://doi.org/jzh6>
- [34] Le, T., Rémond, S., Le, S. G., Garcia Diaz, E. (2016). Fresh behavior of mortar based on recycled sand – Influence of moisture condition. *Construction and Building Materials*, 106, 35–42. <https://doi.org/gpwc7b>
- [35] Miller, A., Spragg, R., Antico, F. C., Ashraf, W., Barrett, T., Behnood, A., Bu, Y., Chiu, Y., Desta, B., Farnam, Y., Jeong, H., Jones, W., Lucero, C., Luo, D., Nickel, C., Panchmatia, P., Pin, K., Qiang, S., Qiao, C., Shagerdi, H., Tokpatayeva, R., Villani, C., Wiese, A., Woodard, S., y Weiss, W. J. (2014). Determining the Moisture Content of Pre-Wetted Lightweight Aggregate: Assessing the Variability of the Paper Towel and Centrifuge Methods. En J. Olek, y J. Weiss (Eds.), *Proceedings of the 4th International Conference on the Durability of Concrete Structures* (pp. 312–316). Purdue University. <https://doi.org/jzh7>

- [36] Duan, Z., Zhao, W., Ye, T., Zhang, Y., Zhang, C. (2022). Measurement of water absorption of Recycled Aggregates. *Materials*, 15, 5141. <https://doi.org/jzh9>
- [37] JSCE-C506 (2003) *Test method for density and water absorption of slag fine aggregate for concrete by measurement of electric resistance*. Japanese Society of Civil Engineers, Tokio, Japan.
- [38] Yacoub, A., Djerbi, A., y Fen-Chong, T. (2018). Water absorption in recycled sand: New experimental methods to estimate water saturation degree and kinetic filling during mortar mixes. *Construction and Building Materials*, 158, 464–471. <https://doi.org/gpwc9j>
- [39] Damineli, B. L., Quattrone, M., Angulo, S. C., Tauqeda, M. E. S., y John, V. M. (2016). Rapid method for measuring the water absorption of recycled aggregates. *Materials and Structures*, 49, 4069–4084. <https://doi.org/jzjb>
- [40] Rodríguez, F., Evangelista, L., y de Brito, J. (2013). A New Method to Determine the Density and Water Absorption of Fine Recycled Aggregates. *Materials Research*, 16(5), 1045–1051. <https://doi.org/gpwc9s>
- [41] Fernández-Fanjul, A., Tenza-Abril, A. J., y Baeza-Brotons, F. (2017). A new methodology for determining particle density and absorption of lightweight, normal-weight and heavy weight aggregates in aqueous medium. *Construction and Building Materials*, 146, 630–643. <https://doi.org/jzjc>
- [42] Mechling, J. M., Lecomte, A., y Merriaux, K. (2003). Measurement of the absorption of water of the mineral admixtures in concrete by evaporometry. *Materials and Structures*, 36, 32–39. <https://doi.org/c22gxt>