

Reciclado de hormigón fresco mediante el uso de adición pelletizante

C. Schust^{a*}, M. Ramos^b y P. Stefani^c

^{a*} Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata, CP B7600, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina. cotischust@gmail.com

^b COARCO S.A., CP B7600, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina. mramos@coarco.com.ar

^c División de Materiales Sostenibles, Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA, CONICET-UNMDP), CP B7600, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina. pmstefan@fi.mdp.edu.ar

Recibido: 20 de noviembre de 2021

Aceptado: 27 de diciembre de 2021

RESUMEN

El retorno del hormigón fresco a la planta de elaboración es un problema económico y medioambiental. Aproximadamente el 2% de la producción de hormigón regresa a la planta y, en la mayoría de los casos, se elimina en gran medida como material de desecho. La producción de bloques, agregados triturados o la separación de sus componentes son algunas de las alternativas informadas para su reciclado. Recientemente se desarrolló una nueva tecnología basada en una adición en polvo de dos componentes que permite que el hormigón fresco se convierta fácilmente en un agregado artificial que puede reincorporarse a la producción de hormigón. En este trabajo se estudiaron las propiedades de los agregados pelletizados (AP) obtenidos a partir de dos formulaciones de hormigón con diferente tamaño máximo nominal de agregados naturales (AN). Asimismo, se evaluaron mezclas de hormigón que tuvieron diferentes niveles de reemplazo de AN por AP en su dosificación. En las formulaciones con sustitución parcial de AN por AP se observó una reducción de alrededor del 20% en la resistencia a la compresión respecto a la muestra control, incluso para porcentajes de sustitución muy elevados (60%). A pesar de la disminución, los hormigones basados en AP cumplen en todos los casos con los requisitos de resistencia y permiten revalorizar un residuo de la industria y cuidar el medio ambiente.

PALABRAS CLAVE: Materiales sostenibles, hormigón fresco, agregados, reciclado

ABSTRACT

Returned fresh mix concrete to the processing plant is an economic and environmental problem. About 2% of concrete production returns to the plant and, in most cases, is largely disposed of as waste material. The production of blocks, crushed aggregates or the separation of their main components are some of the alternatives reported for recycling. Recently, a new technology based on two-component powder additive has been developed, allowing the fresh returned concrete to be easily converted into an artificial aggregate, which can be incorporated into the production of concrete. In this paper, the properties of pelletized aggregates (AP) obtained from two concrete formulations with different maximum nominal natural aggregate size (AN) were studied. Also, concrete mixtures that had different levels of replacement of AN by AP in the formulation were evaluated. In the formulations with partial replacement of AN by AP, a 20% reduction in the compressive strength was observed compared to the control sample, even for very high percentages of substitution (60%). Despite the decrease, AP-based concretes comply in all cases with the resistance requirements and allow to revalue an industrial waste and take care of the environment.

KEYWORDS: Sustainable materials, fresh concrete, aggregates, recycling

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: Schust, C., Ramos, M., y Stefani, P. (2022). Reciclado de hormigón fresco mediante el uso de adición pelletizante. *Revista Hormigón*, 61, 72-87. <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/kdoj42o0m>

1. Introducción

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en el mundo debido a su versatilidad, durabilidad, resistencia y disponibilidad de las materias primas [1-2]. En el año 2020 la producción mundial de cemento fue de 4100 millones de toneladas y se estima que 27000 millones de toneladas de hormigón se fabricaron en el mismo período [3-4].

En los últimos 20 años la producción anual de cemento prácticamente se triplicó, con China como su mayor productor [3]. Las emisiones de CO₂ inherentes a la fabricación de cemento, que representan el 8% de las emisiones globales, y el aumento en el consumo de agregados naturales que se utilizan para producir hormigón afectan de modo directo al medio ambiente [1,5,6]. Las arenas y agregados gruesos representan el mayor volumen de sólidos inorgánicos que se extraen del planeta, de los cuales un 46% es utilizado en combinación con cemento Portland [4]. La sobreexplotación de los recursos naturales y el daño que genera a los ecosistemas de donde se extraen potenció el interés de los gobiernos, industrias, y público en general por el cuidado del medio ambiente [7]. El reciclado del hormigón es, hoy en día, una práctica necesaria para otorgar sostenibilidad a las plantas elaboradoras. Reciclar hormigón implica reducir el consumo de agregados naturales y sus costos de transporte asociados, generar una menor cantidad de desechos, mitigar la degradación de los ecosistemas y la contaminación del suelo, agua y aire [5,6,8]. Disminuir la cantidad de cemento, utilizar agregados reciclados, rellenar sub-bases viales con hormigón triturado, incluir desechos de otras industrias y filtrar el agua de lavado son algunas opciones que otorgan sostenibilidad a la producción de hormigón [9-13].

Siempre que un camión mezclador regresa a la planta elaboradora lo hace con un sobrante de hormigón que no fue utilizado por el cliente en el sitio de construcción [14,15]. Desechar el hormigón fresco encarna dos problemáticas: el desperdicio de materia prima útil, lo que implica pérdidas

económicas, y la potencial contaminación por la naturaleza no biodegradable del hormigón. Además, debe tenerse en cuenta a la hora de manipular el hormigón fresco que se trata de un compuesto alcalino, debido a la disolución de cemento no hidratado en fase acuosa, que puede causar serias lesiones y quemaduras en la piel, además de contaminar el suelo y el agua. Sumado a esto, el hormigón puede contener adiciones que se componen de metales pesados que constituyen una fuerte amenaza ambiental [16].

El método más común de tratamiento de hormigón sobrante y devuelto a planta es verterlo en un sitio adecuado y dejarlo endurecer. Luego, moler el material fraguado y utilizarlo de diferentes maneras: relleno de bases, sustitución de agregados naturales en formulaciones de hormigón y relleno sanitario [11,17]. Se han formulado hormigones con agregados reciclados con propiedades competitivas con los hormigones convencionales [18]. Al utilizar la fracción gruesa de la trituración como reemplazo de los agregados naturales se ha demostrado que las propiedades mecánicas no se ven significativamente alteradas hasta un grado de sustitución del 75% [19]. Sin embargo, la posibilidad de uso de agregados gruesos reciclados en hormigón estructural no se ha considerado históricamente como una buena alternativa, debido, esencialmente, a su no aceptación por el mercado. En los países europeos la utilización de agregados reciclados en aplicaciones estructurales está reglamentariamente limitada. Por ejemplo, las normativas del Reino Unido, España y Holanda restringen el reemplazo por agregados reciclados a un porcentaje máximo de 20%, siempre que la absorción de agua del agregado sea menor al 7%. Si se quiere exceder el 20% se deben presentar estudios particulares del caso y una exhaustiva investigación [9]. Otros países, como Alemania, tienen regulaciones más flexibles para el uso de agregados reciclados de trituración, allí se limita el porcentaje de reemplazo hasta en un 45% según el tipo de agregado y el entorno al que se expondrá el hormigón. Bélgica y Dinamarca permiten sustituciones máximas del 100%,

dependiendo del caso [20]. Sin embargo, el gasto energético de la trituración, carga y transporte aún es elevado, lo que reduce su factibilidad económica [10].

Otra opción de reciclado interesante es destinar el hormigón fresco residual a la producción de premoldeados o bloques, cuya viabilidad dependerá de su cercanía a la planta elaboradora y a la existencia de un mercado potencial para los productos [15,21]. La disgregación de los diferentes componentes del hormigón fresco también es una opción posible. En este método se separa la lechada de cemento de los agregados que pueden ser nuevamente acopiados y reutilizados [22]. Sin embargo, esta última alternativa requiere una importante inversión inicial y un cuidadoso control del proceso [10,14,15].

Los costos adicionales y las preocupaciones ambientales son los dos factores principales que obligan a las empresas a buscar nuevas estrategias ambientalmente sostenibles para reciclar el hormigón [15,23-25]. Recientemente se patentó una nueva tecnología que permite transformar hormigón fresco devuelto a planta en un material granular que puede usarse como agregado para nuevas mezclas de hormigón [23,26-28]. Este método suprime la generación de residuos de construcción a la vez que reduce el uso de agregados naturales sin requerir ningún equipamiento específico. La fabricación de los agregados consta de cuatro pasos básicos: incorporar adiciones pelletizantes en polvo al hormigón fresco, mezclar por unos minutos, descargar el material granular y curado de los agregados pelletizados [26]. En aplicaciones de escala real el uso de la adición sólo requiere de unos minutos de mezcla en el camión y de un espacio adecuado para dejar fraguar los pellets [23]. Desde el punto de vista industrial, el mínimo esfuerzo de logística y el bajo costo hacen que reciclar hormigón fresco con adiciones pelletizantes sea ventajoso respecto de otros procedimientos de recuperación. Además, este método tiene un perfil deseable en materia de reciclado, debido a que su uso implica beneficios

económicos y ambientales al no producir residuos y disminuir la cantidad de recursos naturales utilizados [25].

En el mercado se encuentran algunas adiciones pelletizantes que permiten reciclar hormigón fresco convirtiéndolo en un agregado pelletizado. Ferrari et al. [26,27] diseñaron un sistema bi-componente conformado por un polímero superabsorbente y un compuesto inorgánico formador de ettringita. La forma de acción de ambas partes dicta las características del producto final y, por lo tanto, las propiedades del hormigón donde el material granular estará embebido. El polímero superabsorbente (que se obtiene a partir de la copolimerización de acrilamida y ácido acrílico o sus variantes), conforma una red entrecruzada tridimensional con cadenas con grupos hidrófilos. Los entrecruzamientos físicos y químicos de la red garantizan la retención de fluidos, incluso cuando una presión externa se aplica al hidrogel [29,30]. A su vez, las adiciones formadoras de ettringita aceleran el proceso de fragüe del hormigón [27]. Con la rotación del camión mezclador, u otro dispositivo de agitación, la pasta de cemento coagulado reviste con una capa de unos milímetros de espesor a los agregados gruesos naturales y se adhiere firmemente a ellos. Así, el hormigón se convierte en gran medida en un material granular, donde cada pellet está constituido por un centro de roca natural cubierta de un compuesto hecho de pasta cementicia hidratada, arena, finos y polímero súper absorbente. Estos granos, debido a su baja cantidad de agua residual y rápido endurecimiento, no se aglomeran y pueden ser fácilmente descargados y curados en pilas [16,27].

Los trabajos previos informados, que utilizan esta metodología de revalorización de residuos de hormigón, describen la preparación de agregados pelletizados a partir de hormigones convencionales con alta relación agua/cemento ($a/c = 0,60$) o de hormigones autocompactantes con muy baja relación a/c [26,27]. Sin embargo, los hormigones convencionales estructurales (como por ejemplo, H-30) son los de mayor

interés y volumen de producción en nuestro país. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue evaluar la factibilidad de uso de los agregados obtenidos a partir de hormigón fresco sobrante, mediante el uso de una adición pelletizante, en hormigones de carácter estructural H-30.

2. Trabajo experimental

La tarea experimental se realizó en tres pasos consecutivos, como esquematiza la Fig. 1:

- Mediante el uso de una adición bi-componente se conformaron agregados pelletizados (AP) partiendo de dos dosificaciones diferentes de hormigón fresco. Las mezclas base que dieron lugar a los agregados pelletizados se compusieron de tres agregados naturales (AN) cada una, en donde la única diferencia radicó en el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado grueso utilizado.
- Posterior a su obtención, se evaluaron los rasgos principales de los AP.
- Luego, se los utilizó como reemplazo parcial del agregado total de una dosificación conocida y se caracterizaron en estado fresco y endurecido las mezclas con los diferentes niveles de sustitución de AN por AP.

2.1 Materiales de partida y caracterización

Se utilizó un cemento CPC 40 (Cementos Avellaneda) que cumple con los requisitos exigidos por las normas IRAM 50000 [31] y 50001 [32].

Se utilizaron para todas las formulaciones cuatro AN con contenido de sustancias perjudiciales aceptables (IRAM 1512 [33], IRAM 1531 [34]): arena cuarcítica de trituración 0-6 (ACT 0-6), piedras cuarcíticas de trituración 6-12 mm (PCT 6-12) y 6-20 mm (PCT 6-20) y arena silíceica fina (ASF). Los agregados cuarcíticos fueron provistos por la cantera Yaraví (Batán, provincia de Buenos Aires, Argentina), mientras que la ASF fue suministrada por la arenera Arenas Verdes (Ruta 88, km 109, provincia de Buenos Aires, Argentina). Se extrajeron muestras para análisis de los acopios de agregados de la empresa COARCO SA (Mar del Plata, Argentina) según estipula la norma IRAM 1509 [35]. En la Tabla 1 se resumen los valores de densidad en estado saturado superficie seca, porcentaje de absorción (IRAM 1520 [36], IRAM 1533 [37]), módulo de finura (MF) (IRAM 1505 [38]) y pasante tamiz 75 µm (IRAM 1540 [39]) de todos los AN. La Fig. 2 muestra la distribución granulométrica de los AN, realizada bajo las directivas de la norma IRAM 1505 [38].

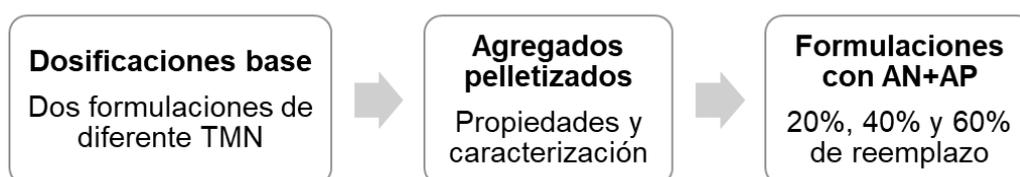


Figura 1. Esquema de trabajo experimental.

Tabla 1. Características de los AN.

Mezcla	ASF	ACT 0-6	PCT 6-12	PCT 6-20
Densidad relativa SSS*	2,65	2,56	2,52	2,49
Absorción (%)	0,95	1,12	3,00	2,60
MF	1,22	3,07	5,98	6,42
Pasa tamiz 75 µm (%)	1,50	4,24	1,32	1,24

* Densidad medida en estado saturado superficie seca (SSS)

El agua empleada para la dosificación de todas las mezclas cumplió con los requisitos de la norma IRAM 1601 [40].

Para las formulaciones se utilizó un aditivo fluidificante (F, Sikament 90-E), y un superfluidificante (SF, ViscoCrete 20 HE). Ambos productos cumplen con la norma IRAM 1663 [41].

Los agregados pelletizados se conformaron utilizando una adición sólida seca en polvo bi-componente (A y B), ReConZero Evo (Mapei, Argentina). La parte A se trata de un polímero superabsorbente (SAP), que cumple la función de retener una gran cantidad de agua libre en la mezcla y aglomerar el fino alrededor de las partículas gruesas. La fracción A es la encargada de asegurar la

granulación del hormigón fresco. La parte B está formulada a partir de un compuesto de aluminatos que promueven la formación de ettringita, lo que otorga una resistencia inicial alta a los AP, que impide su aglomeración [26].

2.2 Mezclas base para la conformación de agregados pelletizados

Dos mezclas base para la conformación de AP se produjeron a pequeña escala en el laboratorio de acuerdo a las dosificaciones que se muestran en la Tabla 2. Las dos dosificaciones se componen de tres AN cada una, la única diferencia en su formulación radica en que se utiliza un solo tipo de agregado grueso en cada una con diferente

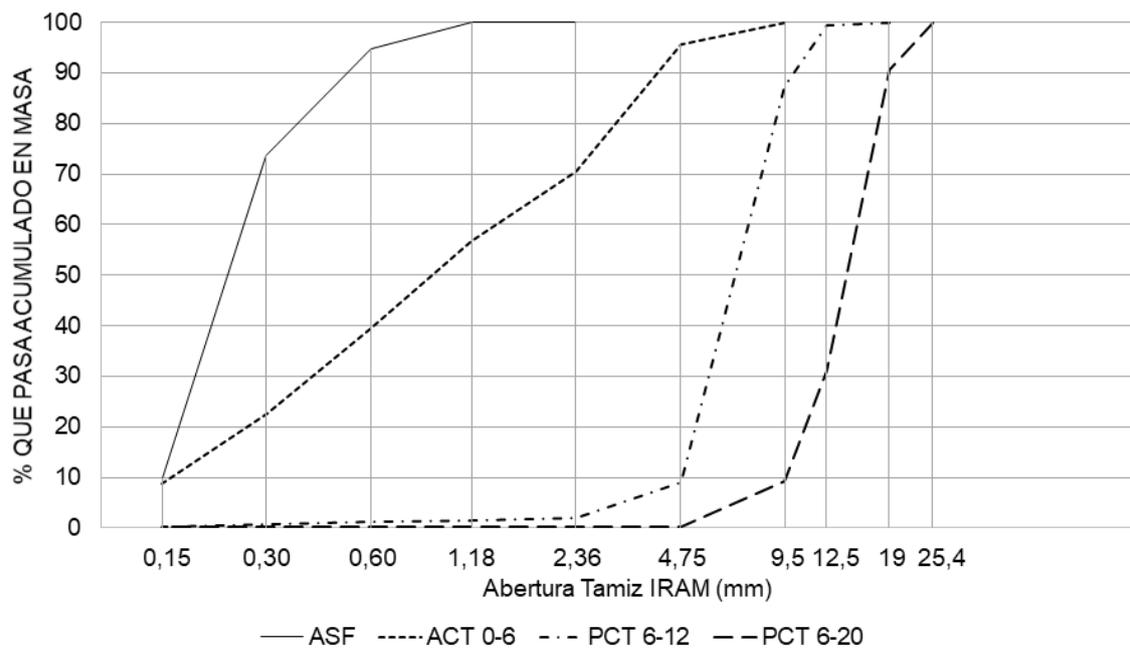


Figura 2. Granulometrías AN.

Tabla 2. Dosificación de las mezclas base para el conformado de agregados pelletizados (en kg/m³).

Mezcla	Cemento	ASF	ACT	PC 6-12	PC 6-20	Agua	F	SF
D 6-12	365	400	400	950	0	182	2	1,1
D 6-20	365	400	400	0	950	182	2	1,1

* La masa de los agregados corresponde al estado SSS

tamaño máximo nominal. La nomenclatura se distingue como dosificación (D) y el tipo de agregado grueso que posee: 6-12 o 6-20. La relación agua/cemento (a/c) se mantuvo invariable en las dos dosificaciones, donde se usa un valor de 0,50 que es típico de plantas de hormigón elaborado. El objetivo fue contar con dos formulaciones de hormigón base (D 6-12 y D 6-20) de características similares, pero con diferente granulometría y tamaño máximo nominal del agregado grueso y así obtener dos agregados pelletizados (AP 6-12 y AP 6-20) con diferente granulometría y TMN.

Las propiedades de las mezclas base en estado fresco y endurecido se muestran en la Tabla 3. Se determinó el peso de la unidad de volumen (PUV) (IRAM 1562 [42]), asentamiento con cono de Abrams (IRAM 1536 [43]), contenido de aire con aparato de Washington (IRAM 1602-2 [44]) y resistencia a la compresión (IRAM 1546 [45]) sobre muestras curadas en laboratorio (IRAM 1534 [46]).

2.3 Proceso de conformado y métodos de evaluación de los AP

El proceso de pelletización se realizó de acuerdo a lo informado por Ferrari et al. [26], con algunos cambios. En un trompo mezclador de 80 L de capacidad a una velocidad de 31 rpm se mezclaron los AN, cemento, agua y fluidificante para obtener las formulaciones base. Previo a la preparación

de cada pastón, se determinó la humedad de los agregados y se realizaron las correcciones correspondientes para mantener la relación a/c constante. Se mezcló el hormigón por 10 minutos para obtener un producto homogéneo. Luego, se midió el asentamiento para verificar que las dosificaciones de agua y aditivo fluidificante fueran adecuadas para lograr el asentamiento objetivo de $10 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ (Fig. 3a). Previo a la colocación de la adición pelletizante se incorporó el superfluidificante, de forma de lograr un asentamiento objetivo entre 15 cm y 18 cm (Fig. 3b). Se requiere este grado de trabajabilidad para facilitar el mezclado con las adiciones. Se incorporó a la mezcla la parte B (adición inorgánica) y se mezcló por 3 minutos. Luego, se incorporó la parte A (SAP) hasta la formación completa de los gránulos (Fig. 3c). Es importante destacar que el contenido de SAP se ajustó de forma preliminar, considerando la relación a/c utilizada para evitar que un exceso de SAP quede sobre la superficie del AP. Luego, se descargó el AP en pilas de poca altura al resguardo de la intemperie y se las removió una vez después de 3 h y una segunda vez luego de 24 h para evitar la aglomeración de los gránulos (Fig. 3d). El procedimiento se llevó a cabo de forma idéntica con ambas mezclas base. Como paso final, se caracterizaron los AP con los mismos parámetros y siguiendo los mismos métodos que para los agregados naturales, es decir, se calculó: densidad, absorción, granulometría, porcentaje de material pasante del tamiz $75 \mu\text{m}$ y módulo de finura.

Tabla 3. Propiedades de las mezclas base para el conformado de AP.

Propiedad	D 6-12	D 6-20
Asentamiento (cm)	8	9
Contenido de aire (%)	2,0	2,0
PUV (kg/m^3)	2.390	2.380
Resistencia a la compresión a 28 días (MPa)	$42,2 \pm 3,2$	$41,8 \pm 2,7$



Figura 3. Proceso de conformado de los agregados pelletizados. a) Asentamiento inicial; b) asentamiento con la incorporación de superfluidificante; c) inmediatamente después del granulado; d) 24 horas después del granulado.

2.4 Diseño de mezclas con diferentes niveles de reemplazo de AN por AP

Con el objetivo de evaluar el desempeño de los AP como posible reemplazo del AN en hormigones, se diseñó una dosificación de hormigón H-30, compuesta por los dos agregados finos naturales descriptos y los dos agregados gruesos naturales, y se reemplazó su AN total en un 20%, 40% y 60% en masa por AP. El criterio para la sustitución fue el de mantener invariable la curva granulométrica de agregado total de la formulación con los diferentes niveles de reemplazo de AN por

AP, a la vez que se mantuvo constante la relación a/c.

2.5 Preparación y programa de ensayos de los hormigones con AN + AP

Una vez obtenidas las dosificaciones con diferentes niveles de reemplazo de AN por AP se mezclaron todos los agregados junto con agua, cemento y aditivo fluidificante en un trompo mezclador. Inmediatamente se evaluaron sus propiedades en estado fresco: asentamiento con tronco cono de Abrams

(IRAM 1536 [43]), densidad PUV (IRAM 1562 [42]) y contenido de aire con el aparato de Washington. Luego, se confeccionaron muestras para compresión de cada una de las mezclas obtenidas y se dejaron curar en cámara húmeda (IRAM 1534 [46]). Sobre las muestras curadas a 28 días se evaluó la resistencia a la compresión (IRAM 1546 [45]), penetración de agua a presión (IRAM 1554 [47]) y absorción (EN 1916 [48]).

3. Resultados

3.1 Caracterización de los agregados pelletizados (AP)

Las Figs. 4 y 5 muestran la amplia distribución de tamaños de los AP 6-12 y AP 6-20 obtenidos a partir de la pelletización de las formulaciones D 6-12 y D 6-20, respectivamente. Estas curvas indican que los AR obtenidos pueden abarcar casi toda la distribución granulométrica de las formulaciones, que con AN solo puede lograrse con el empleo de, al menos, tres agregados. En ambos casos se observa que

las curvas correspondientes a los AP están desplazadas hacia los tamices de mayor tamaño de abertura, lo que indica que los agregados pelletizados poseen un mayor TMN que los AN que les dan origen. Este último resultado es coherente con el mecanismo de acción de la adición formadora de gránulos: los agregados más finos forman un gel junto con el SAP y el cemento, y recubren a los agregados gruesos. A su vez, un porcentaje de este mortero que no encuentra superficie disponible de piedra gruesa para adherirse se aglomera y forma gránulos semejantes a arena gruesa.

Se aprecia en la Tabla 4 que las densidades de las dos fracciones de cada uno de los AP no difieren en gran medida entre sí. Las discrepancias entre los valores pueden atribuirse al error propio del ensayo, sobre todo si se considera que el examen normalizado para la parte fina (<4,75 mm) asume que el material ensayado es natural. Se destaca que, en comparación con los datos de densidad de los AN listados en la Tabla 1, los AP son más livianos, indicando que el proceso de pelletizado genera agregados de una porosidad mayor que la de

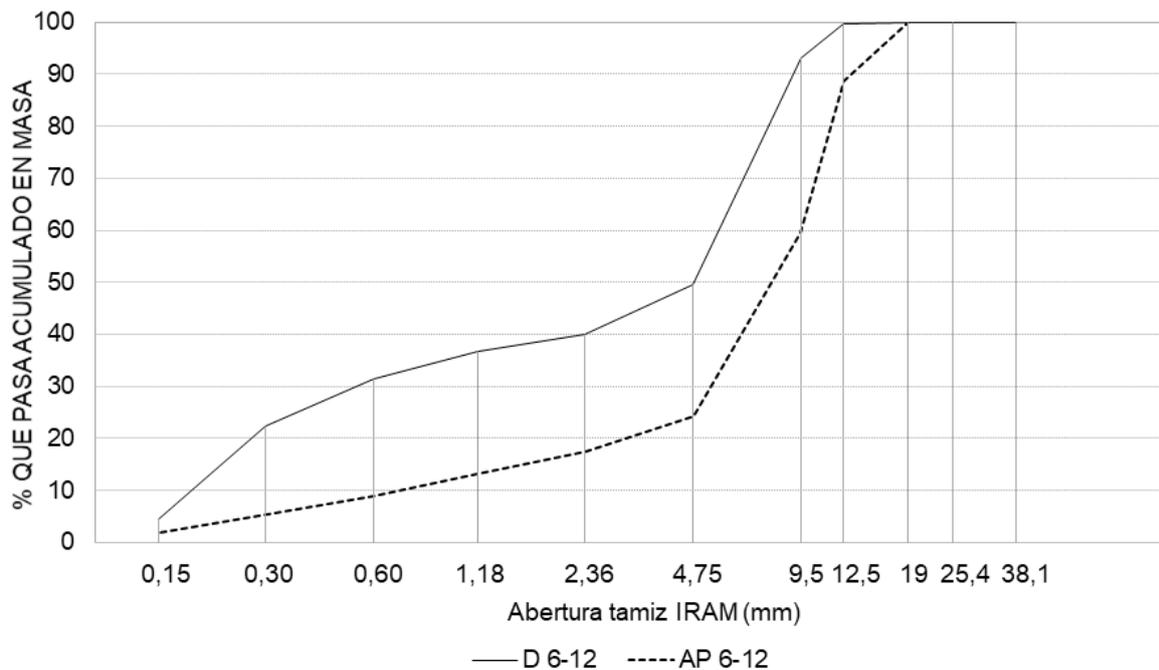


Figura 4. Comparación de distribución granulométrica entre agregado total de la dosificación D 6- 12 y el AP 6-12.

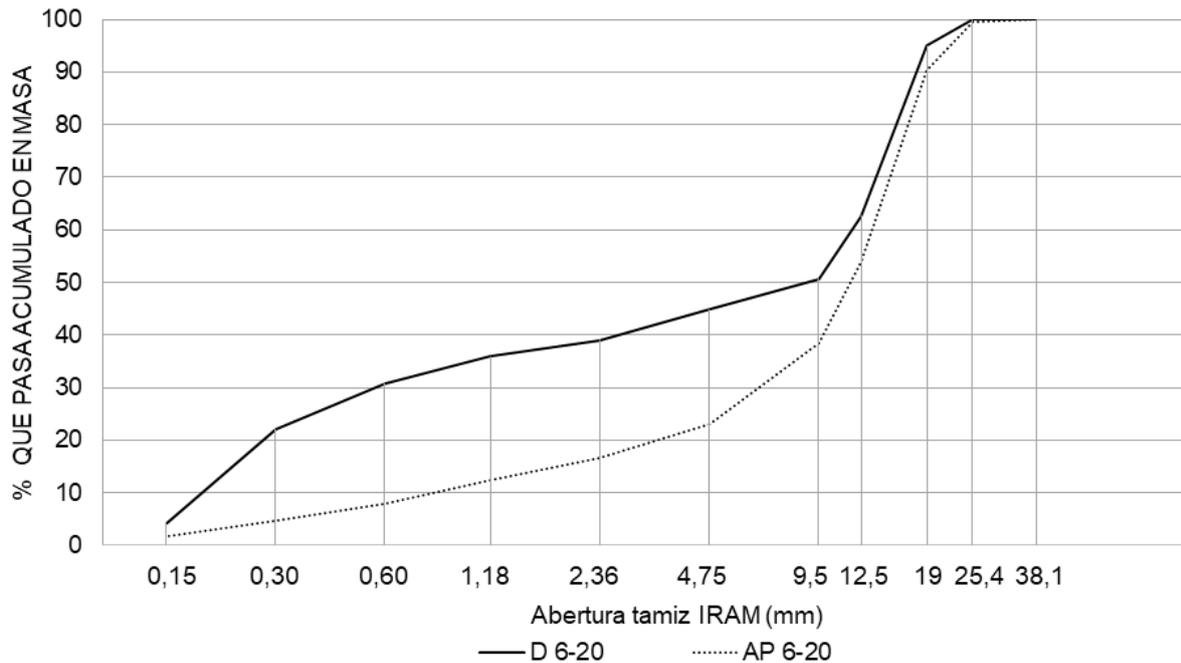


Figura 5. Comparación de la distribución granulométrica entre agregado total de la dosificación D 6-20 y el AP 6-20.

Tabla 4. Densidad y absorción de los AP.

Agregados	AP 6-12 (<4 mm)	AP 6-12 (>4 mm)	AP 6-20 (<4 mm)	AP 6-20 (>4 mm)
Densidad relativa SSS *	2,30	2,34	2,35	2,37
Absorción (%)	8,46	7,43	8,54	6,39

* Densidad medida en estado SSS

los AN. El mismo comportamiento fue observado por Ferrari et al. [26] y Bassani et al. [27]. El incremento de la porosidad en los AP respecto de las arenas y piedras naturales se verifica, además, en el porcentaje de absorción presentado en la Tabla 4 que, aproximadamente, duplica al valor de los gruesos naturales y triplica al de los finos presentados en la Tabla 1. Además, se aprecia que la porción fina de los dos AP estudiados presenta un porcentaje de absorción mayor que el de la fracción retenida en el tamiz IRAM 4,75 mm. El aumento en la absorción es un indicador de que las partículas finas del AP, conformadas por aglomeraciones de AN finos, agua y SAP, presentan una porosidad mayor que la

porción de AP gruesa que incluye piedra cuarcítica en su conformación (Fig. 6).

Respecto del tamaño de los AP se observa en la Tabla 5 que tanto el TMN como el MF del AP 6-20 son más altos que para AP 6-12, resultado esperable dado por el TMN de la piedra que les da origen. A su vez también son mayores que los respectivos agregados totales (AT) correspondientes a las formulaciones base D 6-20 y D 6-12. Es importante recordar que el agregado grueso es recubierto por el mortero en el proceso de pelletización, lo que aumenta su TMN [26].

Sin embargo, ambos MF son menores a los de agregados gruesos que les dan origen (Tabla 1), esto se debe a que el agregado



Figura 6. Imagen de AP grueso partido.

pelletizado posee una fracción de finos de granulometría similar a una arena gruesa que el agregado grueso no posee. Respecto del porcentaje de material que pasa el tamiz IRAM 75 μm se aprecia que el AP basado en piedra 6-20 mm presenta una mayor cantidad de polvo fino menor a 75 μm .

3.2 Caracterización de las mezclas con reemplazo parcial de AN por AP

La Fig. 7 muestra las distribuciones granulométricas de agregado total de las formulaciones con niveles de reemplazo de AN por AP variables, incluido el 0% que pertenece a la dosificación conocida de H-30. El ajuste de las curvas correspondientes al 20%, 40% y 60%, que imitan a la curva de 0%, se logró modificando las proporciones en peso de todos los agregados componentes en

estado saturado superficie seca, como lo indica la Tabla 6. En todos los casos se utilizó la misma relación $a/c = 0,47$. El reemplazo de los AN por AP se llevó a cabo manteniendo constante la fracción en peso de agregados usados para la dosificación base con 0% de AP. Debido a que los AP son más livianos que los AN, la fracción volumétrica de pasta (V_p), la masa de cemento y la masa total de agregados por m^3 de hormigón disminuyeron levemente a medida que aumentó el grado de sustitución (~3% para la dosificación con 60% de sustitución de AN por AP).

Las cantidades de AN decrecen a medida que el porcentaje de AP aumenta para todas las fracciones de tamaño, debido al amplio espectro granulométrico de los AP. Esta disminución se nota de manera acentuada en el grueso natural 6-12 mm que llega a ser cero para un porcentaje de reemplazo del 60%, como se observa en la Tabla 6.

3.3 Caracterización de los hormigones con AP + AN

Al aumentar el porcentaje de reemplazo de AN por AP se observó un leve aumento en el asentamiento en estado fresco en las mezclas (Tabla 7), siempre manteniendo la razón a/c constante y el contenido de aditivo fluidificante por masa de cemento. Este resultado se atribuye a la morfología del AP, ya que presentan una esfericidad y redondez [49] mayor que la de los AN. La inclusión de mayor cantidad de partículas con menor índice de lajosidad en las mezclas incrementó su trabajabilidad.

Tabla 5. MF, TMN y % de material fino que pasa el tamiz 75 μm de los agregados pelletizados (AP) y de los agregados totales (AT) de las formulaciones D 6-12 y D 6-20.

Propiedad	AP 6-12	AP 6-20	AT 6-12	AT 6-20
MF	5,70	6,05	4,14	4,66
Pasa tamiz 75 μm (%)	2,59	3,12	2,03	1,99
TMN (mm)	19,0	25,4	12,5	19,0

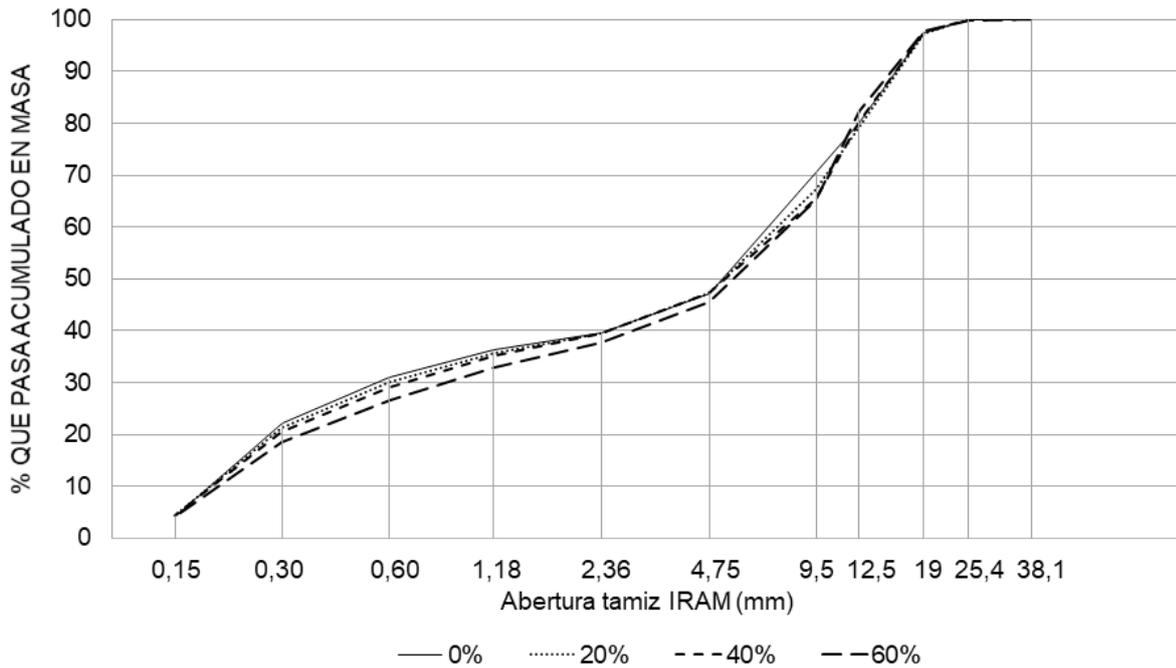


Figura 7. Distribución granulométrica de las mezclas.

Tabla 6. Dosificaciones en peso (kg/m^3 de hormigón) de las mezclas con reemplazo parcial de AN por AP.

Reemplazo de AN por AP	0%	20%	40%	60%
Cemento	365	361	358	353
ASF	408	370	331	276
ACT	408	370	331	276
PC 6-12	450	246	87	0
PC 6-20	515	423	297	138
AP 6-12	0	264	523	776
AP 6-20	0	88	174	258
Agua	170	168	167	164
F	2,17	2,15	2,13	2,10
Vp (%)	28,5	28,1	27,8	27,5

* La masa de los agregados corresponde al estado SSS

En la Tabla 7, además, se presentan los resultados de PUV. Se observó una tendencia decreciente a medida que aumenta la cantidad de AP en las mezclas, lo que es coincidente con los resultados de densidad propia de los AP (Tabla 4). Al aumentar el

porcentaje de agregados de menor densidad el PUV de la mezcla disminuye.

Respecto del contenido de aire incorporado a las mezclas listado en la Tabla 7 se observó un leve aumento en el porcentaje de aire

Tabla 7. Características en estado fresco de las mezclas con reemplazo parcial de AN por AP.

Reemplazo de AN por AP	0%	20%	40%	60%
Asentamiento (cm)	8	10	11	11
PUV (kg/m ³)	2.380	2.340	2.300	2.280
Contenido de aire (%)	2,0	2,4	2,5	2,3

retenido en todas las formulaciones que contienen AP, pero sin una tendencia clara.

En los hormigones con reemplazo parcial de AN por AP los valores de la Tabla 8 muestran una reducción en la resistencia a la compresión a 28 días a medida que el nivel de reemplazo aumenta. Respecto a la muestra control (0%) la reducción máxima en la resistencia se mantuvo menor al 20%, lo que permitió obtener hormigones que siguieron cumpliendo los requisitos de la clase resistente sobre la cual fueron diseñados (H-30). La resistencia de los AP depende de la relación a/c de la formulación de hormigón base, de su porosidad y de las características de los agregados naturales que lo componen [26]. Al disminuir la cantidad de AN en las mezclas y aumentar el porcentaje de AP más porosos y livianos, la resistencia final del conjunto se ve afectada de forma adversa.

En contraposición al resultado de resistencia, se observa en la Tabla 8 que el ensayo de penetración de agua a presión mostró mejorías en el comportamiento a medida que aumentó el porcentaje de AP incluido en la mezcla. Este hecho encuentra su base en las interfaces generadas en el hormigón con AP, debido a que los agregados recuperados están externamente compuestos por mortero

de cemento que, al incorporarse en una nueva mezcla, toma contacto con una nueva pasta cementicia. Se ha informado que la interfaz generada entre el mortero que recubre al AP y la pasta cementicia de un nuevo hormigón posee mejores propiedades adherentes que la generada entre un AN y la pasta [26].

La Tabla 8 muestra los valores de absorción de las probetas de hormigón endurecido con los diferentes niveles de reemplazo, allí se ve que, al aumentar el porcentaje de AP, la absorción decreció levemente. Al incrementar la cantidad de agregado más poroso, como lo es el AP respecto del AN, es esperable encontrar porcentajes de absorción levemente más altos.

3.4 Prueba en camión mezclador

En virtud de evaluar la potencial aplicación industrial del reciclado de hormigón fresco mediante el uso de adiciones pelletizantes se mezcló en un camión moto-hormigonero 1 m³ de la formulación correspondiente al 0% de reemplazo. Luego de 10 minutos de mezclado continuo a 12 rpm se agregó la parte B de la adición y se esperó 3 minutos. Inmediatamente, se incorporó a la mezcla la parte A y pasados los 4 minutos de amasado

Tabla 8. Características en estado endurecido de las mezclas con reemplazo parcial de AN por AP.

Reemplazo de AN por AP	0%	20%	40%	60%
Resistencia a la compresión a 28 días (MPa)	50,4 ± 1,6	42,5 ± 2,1	40,1 ± 1,5	39,8 ± 5,0
Penetración de agua a presión promedio (mm)	20 ± 1	19 ± 1	15 ± 1	12 ± 1
Absorción (%)	7,04	7,09	7,64	7,77



Figura 8. a) Descarga de AP desde camión moto-hormigonero. b) AP obtenidos de prueba en mixer.

se descargó el contenido del mixer en pilas de poca altura (Fig. 8a). Los AP obtenidos inmediatamente después de la descarga poseían dimensiones y comportamiento adecuado, sin diferencias apreciables con los pelletizados en laboratorio a pesar de las diferentes condiciones de mezclado (Fig. 8b).

Es importante destacar que el proceso fue rápido y sencillo, elementos claves a la hora de incorporar un procedimiento nuevo en una planta de hormigón elaborado. La estrategia de reciclado utilizada es ambientalmente sostenible y económicamente favorable respecto al reciclado por trituración, que consume más energía en el proceso, o el realizado por separación de los componentes de hormigón, que requiere una fuerte inversión inicial [22,23,26]. A su vez esta alternativa de reciclado puede ser económicamente viable a medida que crece la distancia entre la planta y las canteras que proveen los agregados naturales.

4. Conclusiones

En este trabajo se prepararon agregados a partir del hormigón fresco que retorna a las plantas de elaboración mediante el uso de

adiciones pelletizantes como una estrategia de reciclado ambientalmente sostenible.

Se obtuvieron agregados pelletizados con una amplia distribución de tamaños, que incluye material pasante del tamiz 150 μm hasta el tamiz 25,4 mm lo que los convierte en candidatos apropiados para su uso en hormigones. Los mismos pueden sustituir, en diferente porcentaje, a todos los agregados naturales presentes en una mezcla convencional de hormigón.

Se observó que hay un orden de incorporación apropiado de cada componente del sistema pelletizante (A y B) en el hormigón fresco. La colocación del componente inorgánico (B) previo el polímero superabsorbente (A) facilita el proceso de formación del agregado pelletizado.

En los hormigones con reemplazo parcial de agregado natural por pelletizado se observó, respecto a la muestra control, una reducción de alrededor del 20% en la resistencia a la compresión, aun para porcentajes muy altos de sustitución (60%). Pese a la merma, los hormigones basados en los agregados pelletizados cumplen en todos los casos con los requisitos de resistencia (H-30) y permiten revalorizar un residuo de la industria

favoreciendo el cuidado del medioambiente. Además, algunas de las propiedades que afectan directamente a la durabilidad de las estructuras, como la penetración de agua a presión, presentaron mejoras con la incorporación de los agregados pelletizados.

Finalmente, se considera necesario avanzar en el estudio de los agregados producidos con adiciones pelletizantes. Por ejemplo, evaluar el efecto de la relación agua/cemento en las formulaciones de hormigón fresco base sobre la resistencia y la densidad de los agregados pelletizados obtenidos, como así también en las propiedades de los hormigones derivados que utilizan estos agregados sostenibles. En particular se debe estudiar el rol de las diferentes interfases que se generan con agregados pelletizados sobre las propiedades del hormigón en estado endurecido.

Referencias

- [1] Martínez-Molina, W., Torres-Acosta, A. A., Alonso-Guzmán, E. M., Chávez-García, H. L., Hernández-Barrios, H., Lara-Gómez, C., Martínez-Alonso, W., Pérez-Quiroz, J. T., Bedolla-Arroyo, J. A., y González-Valdéz, F. M. (2015). Concreto reciclado: una revisión. *ALCONPAT*, 5(3), 235–248.
- [2] Mehta, P. K. (2001). Reducing the environmental impact of concrete. *Concrete International Magazine*, 23(10), 61–66.
- [3] United States Geological Survey. (1 de noviembre de 2021). *Cement Statistics and Information*. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/cement-statistics-and-information>
- [4] United States Geological Survey. (1 de noviembre de 2021). *Sand and Gravel Statistics and Information*. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/construction-sand-and-gravel-statistics-and-information>
- [5] Turk, J., Cotič, Z., Mladenovič, A., y Šajna, A. (2015). Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. *Waste Management*, 45, 194–205. <https://doi.org/f7zkmv>
- [6] Kleijer, A. L., Lasvaux, S., Citherlet, S., y Viviani, M. (2017). Product-specific Life Cycle Assessment of ready mix concrete: Comparison between a recycled and an ordinary concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 210–218. <https://doi.org/gbg5tv>
- [7] United Nations Environment Programme (2019). *Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources*. United Nations Environment Programme. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28163/SandSust.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [8] Rodrigues Vieira, D., Calmon, J. L., Zanellato Coelho, F. (2016). Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 124, 656–666. <https://doi.org/gjzkkq>
- [9] Tang, W., Khavarian, M., Yousefi, A., y Cui, H. (2020). Properties of self-compacting concrete with recycled concrete aggregates. En R. Siddique (Ed.), *Self-Compacting Concrete: Materials, Properties and Applications* (pp. 219–248). Woodhead Publishing. <https://doi.org/hbmb>
- [10] Ferriz-Papí, J. A. (2014). Recycling of fresh concrete exceeding and wash water in concrete mixing plants. *Materiales de Construcción*, 64(313). <https://doi.org/hbmc>
- [11] RMC Research and Education Foundation (2007). *Crushed Returned Concrete as Aggregates for New Concrete* (Project 05-13). National Ready Mixed Concrete Association. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.506.4386&rep=rep1&type=pdf>
- [12] Xuan, D., Zhan, B., Poon, C. S., y Zheng, W. (2016). Innovative reuse of concrete slurry waste from ready-mixed concrete plants in construction products. *Journal of Hazardous Materials*, 312, 65–72. <https://doi.org/f8p28c>
- [13] Islam, R., Hassan Nazifa, T., Yuniarto, A., Shanawaz Uddin, A. S. M., Salmiati, S., y Shahid, S. (2019). An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling. *Waste Management*, 95, 10–21. <https://doi.org/gj375f>
- [14] Ulubeyli, S., Kazaz, A., y Arslan, V. (2017). Construction and demolition waste recycling plants revisited: management issues. *Procedia Engineering*, 172, 1190–1197. <https://doi.org/hbmd>
- [15] Gebremichael, N. N., Karein, M. M., Karakouzian, M., y Jadidi, K. (2019). Investigation of setting time and compressive

- strength of ready-mixed concrete blended with returned fresh concrete. *Construction and Building Materials*, 197, 428–435. <https://doi.org/hbmf>
- [16] Wang, R., y Zhang, Y. X. (2018). Recycling fresh concrete waste: A review. *Structural Concrete*, 19(6), 1939–1955. <https://doi.org/hbmg>
- [17] Dettenborn, T., Forsman, J., y Korkiala-Tanttu, L. (2017). Crushed concrete in road structures – two decades of experience. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 170(6), 273–280. <https://doi.org/hbmf>
- [18] Arezoumandi, M., Smith, A., Volz, J. S., y Khayat, K. H. (2015). An experimental study on flexural strength of reinforced concrete beams with 100% recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 88, 154–162. <https://doi.org/f667hp>
- [19] Priano, C., Señas, L., Moro, J. y Marfil, S. (2016). Agregados reciclados pretratados para uso en hormigón. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 36, 77–86.
- [20] Ortiz, J. A., de la Fuente, A., Mena Sebastia, F., Segura, I., y Aguado, A. (2017). Steel-fibre-reinforced self-compacting concrete with 100% recycled mixed aggregates suitable for structural applications. *Construction and Building Materials*, 156, 230–241. <https://doi.org/hbmi>
- [21] Luna, M. Á., Castillo, G. B., Domínguez, E. R., y Fernández, L. M. (2018). Aplicación de ACV en bloques de hormigón para la medición de impactos mediante el uso de áridos naturales y reciclados. *Centro Azúcar*, 45(2), 14–24.
- [22] Xuan, D., Zhan, B., y Poon, C. S. (2016). Assessment of Mechanical Properties of Concrete Incorporating Carbonated Recycled Concrete Aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 65, 67–74. <https://doi.org/gnvgqz>
- [23] Bassani, M., Diaz Garcia, J. C., Meloni, F., Volpatti, G., y Zampini, D. (2019). Recycled coarse aggregates from pelletized unused concrete for a more sustainable concrete production. *Journal of Cleaner Production*, 219, 424–432. <https://doi.org/hbmk>
- [24] Kazaz, A., y Ulubeyli, S. (2016). Current Methods for the Utilization of the Fresh Concrete Waste Returned to Batching Plants. *Procedia Engineering*, 161, 42–46. <https://doi.org/hbmm>
- [25] Bester, J., Kruger, D., y Miller, B. (2017). The use of a concrete additive to eliminate returned concrete waste volumes. *MATEC Web of Conferences*, 120, 03010. <https://doi.org/hbmn>
- [26] Ferrari, G., Miyamoto, M., y Ferrari, A. (2014). New sustainable technology for recycling returned concrete. *Construction and Building Materials*, 67(C), 353–359. <https://doi.org/hbmp>
- [27] Ferrari, G., Surico, F., Brocchi, A., Banfi, E., Maltese, C., y Squinzi, M. (2012). *Method for recycling concrete*. No. 10196236.3. París, Francia: Oficina de Patentes Europeas. <https://patentimages.storage.googleapis.com/c7/08/de/11f7dbec7e95d1/EP2468695A1.pdf>
- [28] Zampini, D., Guerini, A., y Volpatti, G. (2018). *Method to produce aggregates from unsettled cementitious mixtures*. No. 20180162774. Oficina de Patentes y marcas registradas de Estados Unidos. <https://patentimages.storage.googleapis.com/7e/d8/e7/76717ad13a0f03/WO2016198384A1.pdf>
- [29] Rostami, R., Klemm, A. J., y Almeida, F. C. R. (2021). The Effect of SCMs in Blended Cements on Sorption Characteristics of Superabsorbent Polymers. *Materials*, 14(7), 1609. <https://doi.org/hbmr>
- [30] Chang, L., Xu, L., Liu, Y., y Qiu, D. (2021). Superabsorbent polymers used for agricultural water retention. *Polymer Testing*, 94, 107021. <https://doi.org/ghq43h>
- [31] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2017). *IRAM 50000. Cementos. Cementos para uso general. Composición y requisitos*.
- [32] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2019). *IRAM 50001. Cementos. Cementos con propiedades especiales. Requisitos*.
- [33] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). *IRAM 1512. Agregado fino para hormigón de cemento. Requisitos*.
- [34] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1996). *IRAM 1531. Agregado grueso para hormigón de cemento. Requisitos y métodos de ensayo*.
- [35] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1987). *IRAM 1509. Agregados para hormigones. Muestreo*.
- [36] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2002). *IRAM 1520. Agregados*

finos. Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua.

- [37] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2002). IRAM 1533. Agregados gruesos. Método de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua.
- [38] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2019). IRAM 1505. Agregados. Análisis granulométrico.
- [39] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1986). IRAM 1540. Agregados. Método de ensayo del material fino que pasa por el tamiz IRAM 75 μm , por lavado.
- [40] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2012). IRAM 1601. Agua para morteros y hormigones de cemento.
- [41] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2002). IRAM 1663. Hormigón de cemento. Aditivos químicos.
- [42] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2012). IRAM 1562. Hormigón fresco de cemento. Método para la determinación de la densidad (masa de la unidad de volumen) y el cálculo del rendimiento y del contenido de aire (gravimétrico).
- [43] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2020). IRAM 1536. Hormigón fresco de cemento. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono.
- [44] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1988). IRAM 1602-2. Hormigón de cemento pòrtland. Método por presión para la determinación del contenido de aire en mezclas frescas de hormigones y morteros. Método B.
- [45] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1992). IRAM 1546. Hormigón de cemento. Método de ensayo de compresión.
- [46] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2004). IRAM 1534. Hormigón de cemento. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral.
- [47] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1983). IRAM 1554. Hormigón de cemento pòrtland. Método de determinación de la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido.
- [48] Asociación Española de Normalización y Certificación. (2008). EN 1916 (Anexo F). Tubos y piezas complementarias de hormigón en masa, hormigón armado y hormigón con fibra de acero.
- [49] León, M. P., y Ramirez, F. (2010). Morphological characterization of concrete aggregates by means of image analysis. *Revista Ingeniería de Construcción*, 25(2), 215–240. <https://doi.org/bkm9x7>