

RECICLADO DE HORMIGÓN FRESCO MEDIANTE EL USO DE ADICIONES

PROYECTO FINAL DE GRADO | INGENIERÍA EN MATERIALES

DICIEMBRE 2021

ESTUDIANTE: Constanza Schust

DIRECTOR: Dr. Pablo Stefani

CO-DIRECTOR: Ing. Mariano Ramos





RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

RECICLADO DE HORMIGÓN FRESCO MEDIANTE EL USO DE ADICIONES

PROYECTO FINAL DE GRADO | INGENIERÍA EN MATERIALES

DICIEMBRE 2021

ESTUDIANTE: Constanza Schust

DIRECTOR: Dr. Pablo Stefani

CO-DIRECTOR: Ing. Mariano Ramos



Agradecimientos

Quisiera agradecer especialmente al Ing. Mariano Ramos y al Dr. Pablo Stefani por su dedicación, tiempo y esfuerzo para la realización de este trabajo. Gracias por confiar en mí y brindarme un espacio de crecimiento profesional y personal.

A todo el equipo de COARCO S.A. por abrirme las puertas de su lugar de trabajo, siempre estar dispuestos a resolver dudas, ayudar o compartir un café.

A todos los profesores y profesionales que siempre estuvieron dispuestos a cooperar. Especialmente al Ing. Juan Belmonte y la Dra. Beatriz Valcarce.

A la Facultad de Ingeniería, que fue mi lugar de formación, donde conocí gente maravillosa. Gracias a todos ellos también, que hicieron el paso por la universidad una etapa inolvidable.

A mi familia, amigos y pareja, que siempre me apoyaron, escucharon mis interminables llantos y, seguro, hicieron todo más divertido.

¡GRACIAS!

Índice

Listado de tablas y figuras.....	4
Resumen.....	5
1 <i>Introducción</i>	6
1.1 Generalidades del hormigón.....	6
1.2 Impacto ambiental de la industria de la construcción.....	7
1.3 Técnicas de reciclado del hormigón.....	8
1.3.1 Métodos de reciclado de hormigón en estado endurecido.....	8
1.3.2 Métodos de reciclado de hormigón en estado fresco.....	9
2 <i>Trabajo experimental</i>	11
2.1 Materiales de partida y caracterización.....	11
2.1.1 Cemento.....	11
2.1.2 Agregados naturales.....	11
2.1.3 Agua de amasado.....	12
2.1.4 Aditivo plastificante reductor de agua y aditivo super-plastificante.....	12
2.1.5 Adición formadora de pellets.....	12
2.2 Mezclas base para el conformado de áridos reciclados.....	13
2.3 Proceso de conformado y métodos de evaluación de los agregados reciclados.....	13
2.4 Diseño de mezclas con diferentes niveles de reemplazo de AN por AR.....	15
2.5 Preparación y plan de ensayos de hormigones con AN+AR.....	15
3. <i>Resultados</i>	16
3.1 Características de los agregados reciclados.....	16
3.2 Selección de una relación a/c de AR para su reemplazo en mezclas.....	19
3.3 Características de las mezclas con reemplazo parcial de AN por AR.....	20
3.4 Características de los hormigones con AN+AR.....	21
3.5 Prueba preliminar en camión mezclador.....	23
4 <i>Evaluación económica</i>	25
5 <i>Análisis ambiental</i>	27
6 <i>Conclusiones</i>	28
7 <i>Difusión de resultados del proyecto y trabajos a futuro</i>	29
Referencias.....	30
Anexo.....	34

Listado de tablas y figuras

Figura 1. Estructura del hormigón a escala.

Figura 2. Esquema de trabajo experimental.

Tabla 1. Características de los AN.

Figura 3. Granulometrías AN.

Tabla 2. Dosificación de las mezclas base para el conformado de agregados pelletizados (en kg/m^3).

Tabla 3. Características de las mezclas base para el conformado de AR.

Figura 4. Proceso de conformado de los agregados reciclados.

Figura 5. Tabla de comparación de redondez y esfericidad.

Figura 6. Comparación de distribución granulométrica entre agregado total 6-12 y los AR 6-12.

Figura 7. Comparación de distribución granulométrica entre agregado total 6-20 y los AR 6-20.

Tabla 4. Densidad y absorción de los AR.

Figura 8. Agregado reciclado.

Tabla 5. MF y % de material fino que pasa el tamiz IRAM 200.

Figura 9. Geometría de AN y AR.

Figura 10. SAP sobre superficie de agregados con baja relación a/c.

Figura 11. Distribución granulométrica de las mezclas.

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

Tabla 7. Características en estado fresco.

Tabla 8. Características en estado endurecido.

Figura 12. Probetas ensayadas a la penetración de agua.

Figura 13. Superficie de probeta con 40% de reemplazo después del ensayo de compresión.

Figura 14. Prueba en camión mezclador.

Tabla 9. Costos asociados a diferentes métodos de reciclado.

Figura 15. Costos de obtención de agregados según la distancia a la cantera.

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, áridos 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 áridos reciclados (AR) obtenidos a partir de seis formulaciones: dos mezclas de hormigón con diferente tamaño máximo nominal de áridos naturales (AN) y dos relaciones agua/cemento cada una. Asimismo, se evaluaron mezclas de concreto que tuvieron diferentes niveles de reemplazo de AN por AR en su dosificación. En las formulaciones con sustitución parcial de áridos naturales por reciclados 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 AR cumplen en todos los casos con los requisitos de resistencia y permiten revalorizar un residuo de la industria y cuidar al medio ambiente.

1. Introducción

1.1 Generalidades del hormigón

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en el mundo debido a su versatilidad, durabilidad, resistencia y disponibilidad de las materias primas (Martínez-Molina et al, 2015; Mehta, 2001). En el año 2020 la producción mundial de cemento fue de 4100 millones de toneladas y se estima que 27000 millones de toneladas de concreto se fabricaron en el mismo período (USGS, 2020).

El amplio uso del hormigón en obras de arquitectura e ingeniería se debe a su capacidad de endurecer bajo el agua, su alta durabilidad, su capacidad de ser moldeado *in situ* en diversas formas y tamaños, y, debido a su alto pH en estado endurecido, su propiedad de proteger a las armaduras de acero de la corrosión (Irassar, 2004). Además, tiene un costo relativamente bajo respecto de otros materiales de construcción, ya que el precio energético de elaboración es moderado, las materias primas son económicas y su mantenimiento es bajo (Mohamed et al, 2018; Heravi et al, 2016).

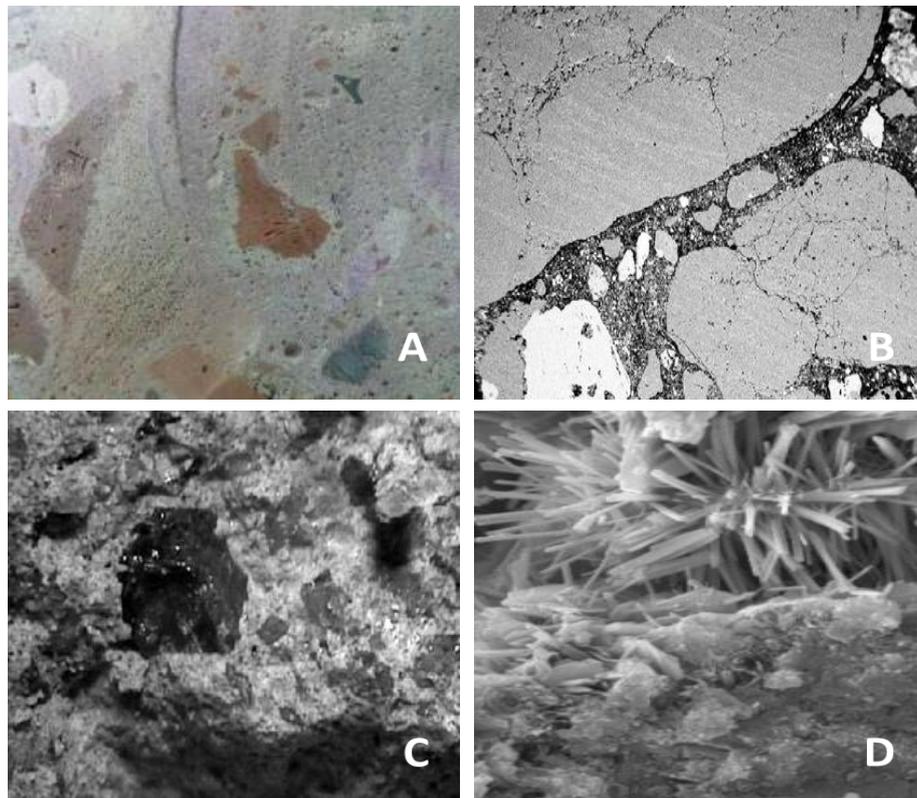


Figura 1. Estructura del hormigón a escala 10^{-2} (A), 10^{-3} (B), 10^{-6} (C) y 10^{-9} (D) (Ribiero et al, 2011; Evangelista et al, 2019)

El hormigón endurecido se compone en volumen de, aproximadamente, un 70% de áridos, que incluyen piedras y arenas, un 28% de pasta cementicia hidratada y 2% de aire. El concreto puede clasificarse como un material compuesto multifásico, donde la descripción de la compleja estructura puede hacerse en cuatro escalas: la macroestructura del hormigón (cm) está formada por partículas de agregados gruesos de diferentes tamaños rodeados por mortero, que es la pasta de cemento hidratada junto con el agregado fino (Figura 1A); a una escala menor (mm) se observa

que el mortero está compuesto por partículas finas, como las arenas, embebidas en la matriz cementicia (Figura 1B); a nivel microscópico (μm) la pasta está integrada por sólidos y una extensa red de poros (Figura 1C); finalmente, a escala submicroscópica (nm) se puede apreciar la estructura de los diferentes componentes del cemento hidratado, como el silicato de calcio hidratado, hidróxido de calcio y la familia de los sulfoaluminatos de calcio, tales como la ettringita y el monsulfoaluminato (Figura 1D) (Hilal, 2016).

La respuesta mecánica del hormigón está íntimamente ligada a las características de sus fases componentes y a la interacción entre ellas. Para analizar el comportamiento resistente del concreto se debe tener en cuenta su estructura interna: la relación agua/ cemento, el tipo, textura y rugosidad de los áridos, distribución de tamaños de los agregados, las diferencias de rigidez entre la matriz y las inclusiones, las cantidades proporcionales de componentes, el tipo de cemento y aditivos y las condiciones de curado (Yehia et al, 2020). En resumen, los principales factores de los cuales depende el mecanismo de rotura del hormigón son la resistencia de la matriz cementicia, la resistencia de los agregados y la resistencia de la zona interfacial entre ambos (De Brito et al, 2018).

1.2 Impacto ambiental de la industria de la construcción

El hormigón, sin dudas, es el material preferido para la construcción. La industria de la construcción es la responsable de un alto porcentaje de la contaminación a nivel mundial, en gran parte por las emisiones de carbono, pero también por el manejo inadecuado de recursos naturales no renovables y un incorrecto tratamiento de los residuos. Fabricar una tonelada de cemento emite entre 0,8 y 1,2 toneladas de CO_2 , lo que anualmente representa el 8% de las emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial (Grimmeissen et al, 2020). Las arenas y agregados gruesos representan el mayor volumen de sólidos inorgánicos que se extraen del planeta, entre 250 y 350 millones de toneladas al año (Garside, 2021), de los cuales un 46% es utilizado en combinación con cemento Portland (USGS). La explotación de canteras y areneras tiene impacto sobre la biodiversidad, turbidez y niveles del agua, paisaje y sobre el clima, además de las emisiones de carbono debidas al transporte (*Sand Stories*, 2020). En un análisis que incluye desde el origen de las materias primas hasta la entrega del producto final, la producción de hormigón elaborado es responsable del consumo de $16,6 \times 10^9 \text{m}^3$ de agua. Este valor equivale al 18% del consumo industrial global anual de agua (Miller et al, 2018; Mack-Vergara et al, 2017). Los residuos de construcción y demolición (RCD) son uno de los tipos de residuos mayoritarios en el mundo. Se estima que entre un 30% y 40% de los desechos sólidos totales corresponden a la construcción y demolición (Rashidul, 2019). Dentro de los RCD se encuentran materiales inertes y no inertes, en el primer grupo se incluye al hormigón que es, aproximadamente, un 70% del total de RCD. Es importante destacar que el porcentaje de composición es muy variable en los diferentes países alrededor del mundo, ya que los materiales disponibles y las economías regionales afectan al modo de construcción. (Kourmpanis et al, 2008; Akhtar et al, 2018; Asgari et al, 2017; Silva et al, 2014; Ding et al, 2014; Mália et al, 2013)

Debido a que las emisiones de CO_2 inherentes a la fabricación de cemento, el aumento en el consumo de agregados naturales, el agua utilizada por la industria de la construcción y los desechos ligados a la construcción y demolición afectan de modo directo a los ecosistemas (Martínez-Molina et al, 2015; Turk et al, 2015; Kleijer et al, 2017) en los últimos años se potenció el interés de los gobiernos, industrias, y público en general por el cuidado del medio ambiente

(UNEP, 2019). El reciclado del concreto 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 y mitigar la degradación de los ecosistemas y la contaminación del suelo, agua y aire (Rodrigues Vieira et al, 2016; Turk et al, 2015; Kleijer et al, 2017). Disminuir la cantidad de cemento, utilizar áridos reciclados, rellenar sub-bases viales con concreto triturado, incluir desechos de otras industrias y filtrar el agua de lavado son algunas de las opciones que otorgan sostenibilidad a la producción de hormigón (Tang et al, 2020; Férriz-Papi et al, 2014; Obla et al, 2007; Xuan et al, 2016; Islam et al, 2019).

1.3 Técnicas de reciclado de hormigón

Las técnicas de reciclado de hormigón se pueden clasificar según el estado del concreto: endurecido o fresco.

1.3.1 Métodos de reciclado de hormigón en estado endurecido

Las técnicas se basan en la trituración del material y utilización en diversas aplicaciones. Una de las opciones de uso del concreto molido es el relleno de bases y sub-bases viales, allí los requisitos químicos y granulométricos del triturado no son altos, ya que solo se trata de una estructura de soporte que transmite cargas a través de la fricción entre partículas (Ocaranza et al, 2013). Otra forma de uso del hormigón molido es como reemplazo de áridos naturales. Se han formulado hormigones con agregados reciclados con propiedades competitivas con los concretos convencionales (Arezoumandi et al, 2015). 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% en masa (Priano et al, 2016). Sin embargo, la posibilidad de uso de agregados gruesos reciclados en concreto 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 áridos reciclados en aplicaciones estructurales está limitada. Por ejemplo, las normativas del Reino Unido, España y Holanda restringen el reemplazo de reciclados a un porcentaje máximo de 20%, siempre que la absorción de agua del árido sea menor al 7%. Si se quiere exceder el 20% se deben presentar estudios particulares del caso y una exhaustiva investigación (Tang et al, 2020). 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 concreto. Bélgica y Dinamarca permiten sustituciones máximas del 100%, dependiendo del caso (Ortiz et al, 2017). Sin embargo, el gasto energético de la trituración, carga y transporte aún es elevado, lo que reduce su factibilidad económica (Férriz-Papi et al, 2014).

1.3.2 Estrategias de reciclado de hormigón en estado fresco

Frecuentemente los camiones mezcladores regresan a la planta elaboradora con un sobrante de hormigón que no fue utilizado por el cliente en el sitio de construcción (Ulubeyli et al, 2016; Gebremichael et al, 2019). 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 concreto. Además, debe tenerse en cuenta a la hora de manejar 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 suele contener adiciones que se componen de metales pesados que constituyen una fuerte amenaza ambiental (Wang et al, 2018).

Si los controles son adecuados y el material se encuentra en buenas condiciones, es posible dosificar un nuevo hormigón encima del sobrante (Wang et al, 2018; Ferriz-Papi et al, 2014) o, dependiendo del volumen, encontrar nuevos clientes dispuestos a utilizarlo en el momento (Torrent, 2020). Estas opciones requieren un alto esfuerzo logístico y exhaustivos controles de calidad.

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 como hormigón reciclado triturado, según los métodos antes descritos (Dettenborn et al, 2017; Obla et al, 2007). Otra técnica de reciclado 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 (Gebremichael et al, 2019; Luna et al, 2018). 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 (Xuan et al, 2016). Sin embargo, esta última alternativa requiere una importante inversión inicial y un cuidadoso control del proceso (Ferriz-Papi et al, 2014; Ulubeyli et al, 2016; Gebremichael et al, 2019)

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 concreto (Gebremichael et al, 2019; Bassani et al, 2019; Kazaz et al, 2016; Bester et al, 2017). Recientemente se patentó una tecnología que permite transformar hormigón fresco devuelto a planta en un material granular que puede usarse como agregado para nuevas mezclas de concreto (Bassani et al, 2019; Ferrari et al, 2014; Ferrari et al, 2012; Zampini et al, 2018). Este método reduce drásticamente la generación de residuos de hormigón fresco a la vez que disminuye el uso de áridos naturales sin requerir ningún equipamiento específico. La fabricación de los AR pelletizados consta de cuatro pasos fundamentales: agregado de compuestos pelletizantes al hormigón fresco; mezclado de unos minutos; descarga del material granular y curado de los áridos reciclados (Ferrari et al, 2014). 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 (Bassani et al, 2019). 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 (Bester et al, 2017).

Ferrari et al. (Ferrari et al, 2014; Ferrari et al, 2012) diseñaron un sistema bi-componente conformado por un polímero superabsorbente [*super absorbent polymer* (SAP)], nombrado como parte A de la adición, y un compuesto inorgánico formador de ettringita o parte B. El polímero superabsorbente producido a partir de la copolimerización de acrilamida y ácido acrílico (o sus variantes), da lugar a una red tridimensional con cadenas con grupos hidrófilos. Los

entrecruzamientos físicos y químicos del entramado garantizan la retención de fluidos, incluso cuando una presión externa se aplica al hidrogel (Rostami et al, 2021; Chang et al, 2021). La principal función del polímero superabsorbente es la de aumentar drásticamente la viscosidad del hormigón al incorporar en su matriz agua, cemento y finos. Una vez que el SAP se hincha y concentra los elementos en su red queda inactivo y permanentemente embebido en la matriz cementicia (Ferrari et al, 2012). A su vez, la adición formadora de ettringita favorece la precipitación de aluminato de calcio hidratado, lo consume gran parte del agua libre de la pasta no retenida por el SAP y refina la porosidad de la mezcla cementicia fraguada. Por esto, la parte B de la adición contribuye a disminuir la absorción de agua del material granular resultante (Zampini et al, 2018). Además, la morfología en forma de finas agujas de la ettringita le da resistencia en verde al material granular, lo que se traduce en pellets que resisten el proceso de descarga sin deformarse, desintegrarse ni aglomerarse entre sí (Ferrari et al, 2012). 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 áridos gruesos naturales y se adhiere firmemente a ellos. Así, el hormigón se convierte 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 superabsorbente. 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 sin riesgo de conglomeración (Ferrari et al, 2012; Wang et al, 2018).

Los trabajos previos informados que utilizan esta metodología de revalorización de hormigón describen la preparación de agregados reciclados a partir de hormigones convencionales con alta relación agua/cemento ($a/c=0.6$) o de hormigones autocompactantes con muy baja relación a/c (Ferrari et al, 2014; Ortiz et al, 2017). Sin embargo, los hormigones convencionales estructurales, como por ejemplo un H-30, son uno de los concretos 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 áridos reciclados obtenidos a partir de hormigón fresco sobrante, mediante el uso de adiciones pelletizantes en hormigones de carácter estructural H-30. Además, se buscó mapear los factores más relevantes que modifican las características propias de los agregados reciclados.

2. Trabajo experimental

La tarea experimental se realizó en tres pasos consecutivos, como esquematiza la Figura 2:

a) Mediante el uso de una adición bi-componente se conformaron agregados reciclados (AR) partiendo de seis dosificaciones diferentes de hormigón: tres relaciones agua/ cemento (a/c) (0,45, 0,475 y 0,5) repetidas en dos mezclas con diferente tamaño máximo nominal (TMN). Las mezclas base que dieron lugar a los áridos pelletizados se compusieron de tres agregados naturales (AN) cada una, en donde la única diferencia en los áridos radicó en el TMN del agregado grueso utilizado.

b) Posterior a su obtención, se evaluaron las características principales de los AR.

c) Después de caracterizar a los AR se los utilizó como reemplazo parcial del árido total de una dosificación conocida. Luego, se caracterizaron en estado fresco y endurecido las mezclas con los diferentes niveles de sustitución de AN por AR.

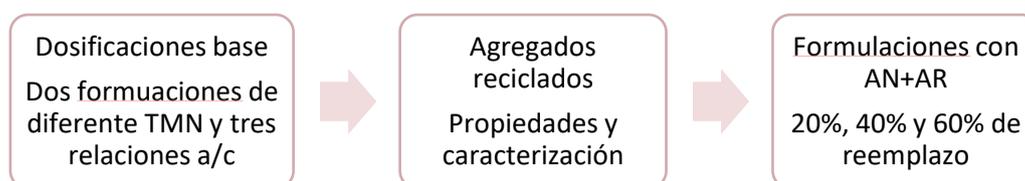


Figura 2. Esquema de trabajo experimental.

2.1 Materiales de partida y caracterización

2.1.1 Cemento portland compuesto (CPC) 40

El cemento utilizado se trató de un CPC 40 (Cementos Avellaneda) que cumple con los requisitos exigidos por las normas IRAM 50000 y 50001.

2.1.2 Agregados naturales

Se utilizaron para todas las formulaciones cuatro AN con contenido de sustancias perjudiciales aceptables (IRAM 1512:2013, IRAM 1531:1996): arena cuarcítica de trituración 0-6 (ACT 0-6), piedras cuarcíticas de trituración 6-12 (PCT 6-12) y 6-20 (PCT 6-20) y arena silíceo fina (ASF). Los áridos cuarcíticos fueron provistos por la cantera Yaraví (Batan, Pcia. Buenos Aires, Argentina), mientras que la ASF fue suministrada por la arenera Arenas Verdes (Ruta 88 km 109, Pcia. Buenos Aires, Argentina). Se extrajeron muestras para análisis de los acopios de agregados de la empresa COARCO S.A. (Mar del Plata, Argentina) según estipula la norma IRAM 1509:1987 (Anexo 1). En la Tabla 1 se resumen los valores de densidad saturado superficie seca (SSS), porcentaje de absorción (IRAM 1520:2002, IRAM 1533:2002) (Anexo 2), módulo de fineza (IRAM 1505:2019) (Anexo 4) y pasante tamiz 75 μm (IRAM 1540:1986) (Anexo 3) de todos los AN. En la Figura 3 muestra la distribución granulométrica de los AN (IRAM 1505:2005) (Anexo 4).

Tabla 1. Características de los AN.

	ASF	ACT 0-6	PCT 6-12	PCT 6-20
Densidad relativa SSS (d3)	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 200 (%)	1,50	4,24	1,32	1,24

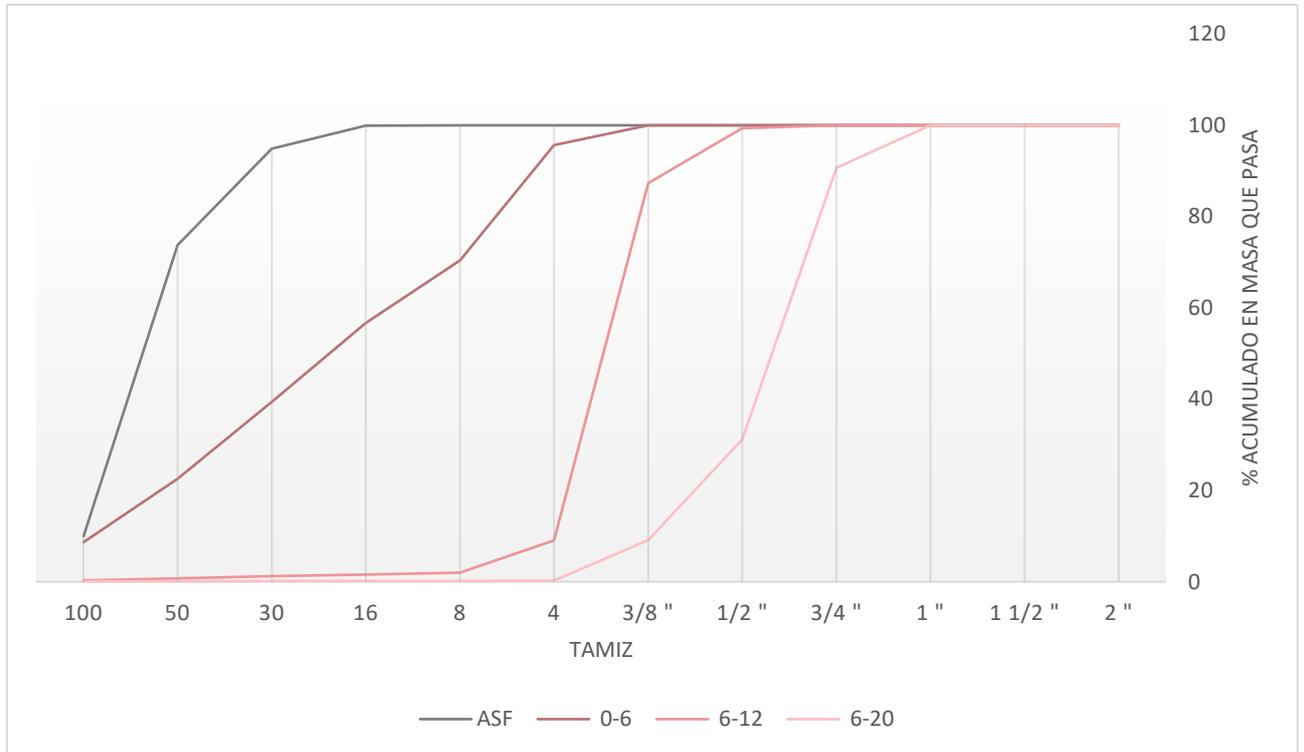


Figura 3. Granulometrías AN.

2.1.3 Agua de amasado

El agua empleada para la dosificación de todas las mezclas cumple con los requisitos de la norma IRAM 1601:2012.

2.1.4 Aditivo plastificante reductor de agua y aditivo súper fluidificante

Para todas las formulaciones se utilizó un aditivo reductor de agua (RA) de medio rango (Sikament 90-E) y uno de alto rango (ViscoCrete 20-HE). Ambos productos cumplen con la norma IRAM 1663: 2002.

2.1.5 Adición formadora de pellets

Los agregados reciclados 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, 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 parte B está formulada de un compuesto inorgánico formador de ettringita, lo que otorga una resistencia inicial alta a los AR, que impide su aglomeración (Ferrari et al, 2014).

2.2. Mezclas base para la conformación de áridos reciclados

Seis mezclas base para la conformación de AR se produjeron a escala en el laboratorio de acuerdo a las dosificaciones que se muestran en la Tabla 2. Todas las dosificaciones se componen de tres AN: las primeras tres contienen el mismo TMN de agregado y tres relaciones a/c diferentes, las últimas tres poseen un agregado grueso de mayor gradación y repiten las mismas variaciones que las primeras en su relación a/c. La nomenclatura se distingue como dosificación (D), el tamaño de grueso que posee: 6-12 o 6-20 y la relación a/c de la mezcla: 0,45, 0,475 y 0,5.

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

	Cemento	ASF	ACT	PC 6-12	PC 6-20	Agua	RA
D 6-12 0,450	365	400	400	900	0	158	3,7
D 6-12 0,475	365	400	400	900	0	166	3,1
D 6-12 0,500	365	400	400	900	0	175	2,6
D 6-20 0,450	365	400	400	0	900	158	3,4
D 6-20 0,475	365	400	400	0	900	166	2,9
D 6-20 0,500	365	400	400	0	900	175	2,5

Las propiedades de las mezclas base en estado fresco y endurecido se muestran en la Tabla 3. Se determinaron la densidad en estado fresco (PUV) (IRAM 1562:2012) (Anexo 5), módulo de fineza del agregado total (IRAM 1505:2019) (Anexo 4), asentamiento con cono de Abrams (IRAM 1536:2020) (Anexo 6), contenido de aire con aparato de Washington (IRAM 1602-2:1988) (Anexo 7) y resistencia a la compresión (IRAM 1546:1992) (Anexo 9) sobre muestras curadas en laboratorio (IRAM 1534: 2004) (Anexo 8). El objetivo de trabajar con tres relaciones a/c y dos tamaños máximos nominales fue el de evaluar la influencia que cada factor tiene sobre las características del AR.

Tabla 3. Características de las mezclas base para el conformado de AR.

	D 6-12 0,450	D 6-12 0,475	D 6-12 0,500	D 6-20 0,450	D 6-20 0,475	D 6-20 0,500
MF total	4,14	4,14	4,14	4,66	4,66	4,66
Asentamiento (cm)	8	11	8	12	10	9
Contenido de aire (%)	2,1	2,3	2,0	2,0	2,2	2,0
Densidad PUV (kg/L)	2,396	2,386	2,388	2,369	2,370	2,380
Resistencia a la compresión a 28 días (MPa)	49,45±2,54	45,53±3,18	42,20±3,21	48,68±2,97	44,32±2,66	41,78±2,72

2.3 Proceso de conformado y métodos de evaluación de los AR

El proceso de pelletización se realizó de acuerdo a lo informado por Ferrari et al (Ferrari et al, 2014), 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 aditivo reductor de agua de medio rango para obtener las formulaciones base. Se mezcló el concreto por 10 minutos para obtener un producto homogéneo. Luego, se midió el asentamiento para verificar que las dosificaciones de agua y aditivo reductor de agua fueran adecuadas para lograr el asentamiento objetivo de $10 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ (Figura 4A). Pevio a la colocación de la adición pelletizante se incorporó el aditivo fluidificante de alto rango, de forma de lograr un asentamiento entre 15 y 18 cm, de acuerdo a lo especificado por la ficha técnica del producto (Figura 4B). 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 hasta la formación completa de los gránulos (Figura 4C). Posteriormente, se descargó el AR en pilas de poca altura al resguardo de la intemperie y se las removió una vez al cabo de 3 hs. y una segunda vez luego de pasadas 24 hs., esto evitó la aglomeración de los gránulos (Figura 4D). El procedimiento se llevó a cabo de forma idéntica con todas mezclas base. Como paso final, se caracterizaron los AR con los mismos parámetros y siguiendo los mismos métodos que para los agregados naturales, es decir, se midió: densidad, absorción, granulometría, porcentaje de material pasante del tamiz $75 \mu\text{m}$, módulo de fineza y geometría. Además, se realizó una inspección visual y clasificación de redondez y esfericidad en comparativa con los AN, utilizando una tabla modelo dada por Krumbein et al (Krumbein et al, 1963) (Figura 5).



Figura 4. Proceso de conformado de los agregados reciclados. A) Asentamiento inicial; B) asentamiento con la incorporación de superplastificante; C) inmediatamente después del granulado; D) 24 horas después del granulado

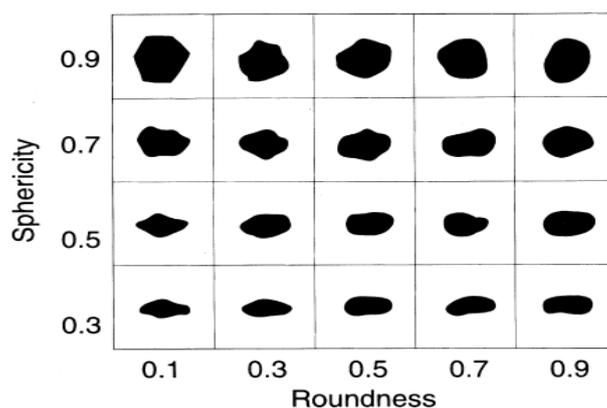


Figura 5. Tabla de comparación de redondez y esfericidad.

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

Con el objetivo de evaluar el desempeño de los AR como posible reemplazo del AN en hormigones se diseñó una dosificación de hormigón H-30, compuesta por los dos agregados finos naturales descritos y los dos áridos gruesos naturales, y se reemplazó su AN total en un 20%, 40% y 60% por AR. 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 AR, a la vez que se mantuvo constante la relación a/c.

2.5 Preparación y plan de ensayos de los hormigones con AN + AR

Una vez obtenidas las dosificaciones con diferentes niveles de reemplazo de AN por AR se mezclaron todos los áridos junto con agua, cemento y aditivo reductor de agua en un trompo mezclador. Inmediatamente se evaluaron sus propiedades en estado fresco, de la misma manera que para las mezclas base: Asentamiento con tronco cono de Abrams, densidad PUV 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. Sobre las muestras curadas a 28 días se evaluó la resistencia a la compresión, penetración de agua a presión (IRAM 1554:1983) y absorción (EN 1916:2002) (Anexo 10).

3. Resultados

3.1 Caracterización de los agregados reciclados

Las Figuras 6 y 7 muestran la distribución de tamaños de los AR 6-12 y AR 6-20 obtenidos a partir de la pelletización de las formulaciones D 6-12 y D 6-20 con todas las relaciones a/c utilizadas y las granulometrías totales D 6-12 y D 6-20. Allí se observa que los AR abarcan gradaciones desde el pasante del tamiz 100, es decir que son menores a los 150 μm , hasta diámetros de 19 mm, correspondientes al tamiz $\frac{3}{4}$. 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 áridos. Además, las Figuras 6 y 7 muestran granulometrías del AR continuas, lo que representa una ventaja en la densidad de empaquetamiento al ser usados en mezclas de concreto.

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

Respecto de las diferencias entre las granulometrías de los AR con diferentes relaciones a/c: la Figura 7 muestra un aumento del tamaño de la distribución con la disminución de la cantidad de agua. Sin embargo, este patrón no se repite en la Figura 6, por lo que no puede concluirse que la relación a/c defina el cambio de TMN.

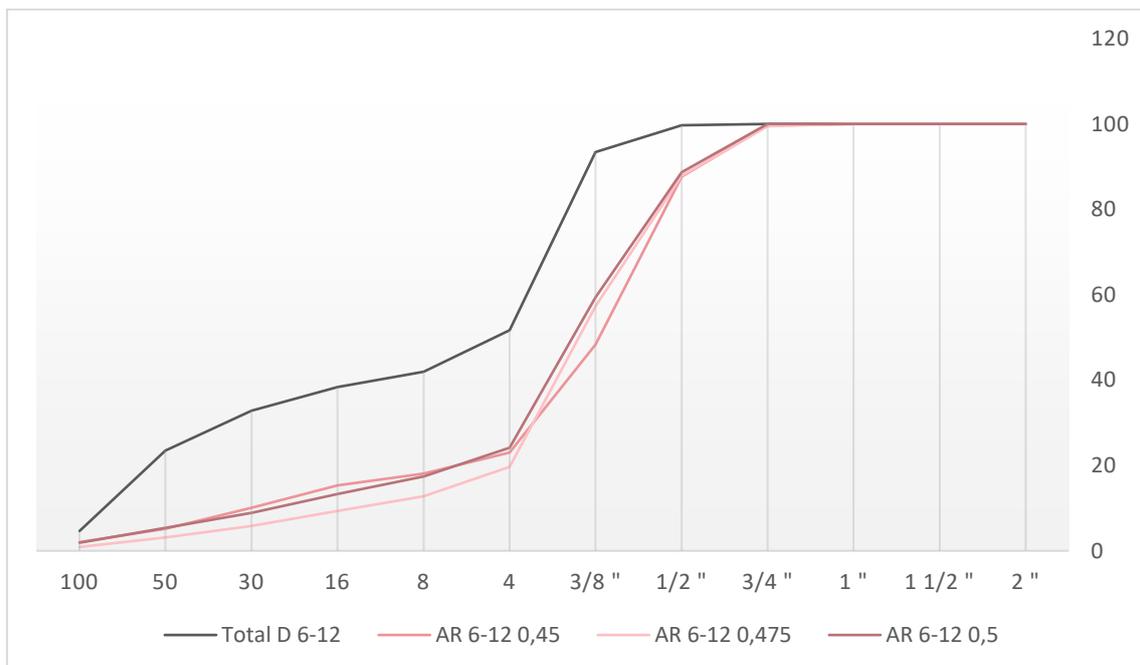


Figura 6. Comparación de distribución granulométrica entre agregado total 6-12 y los AR 6-12

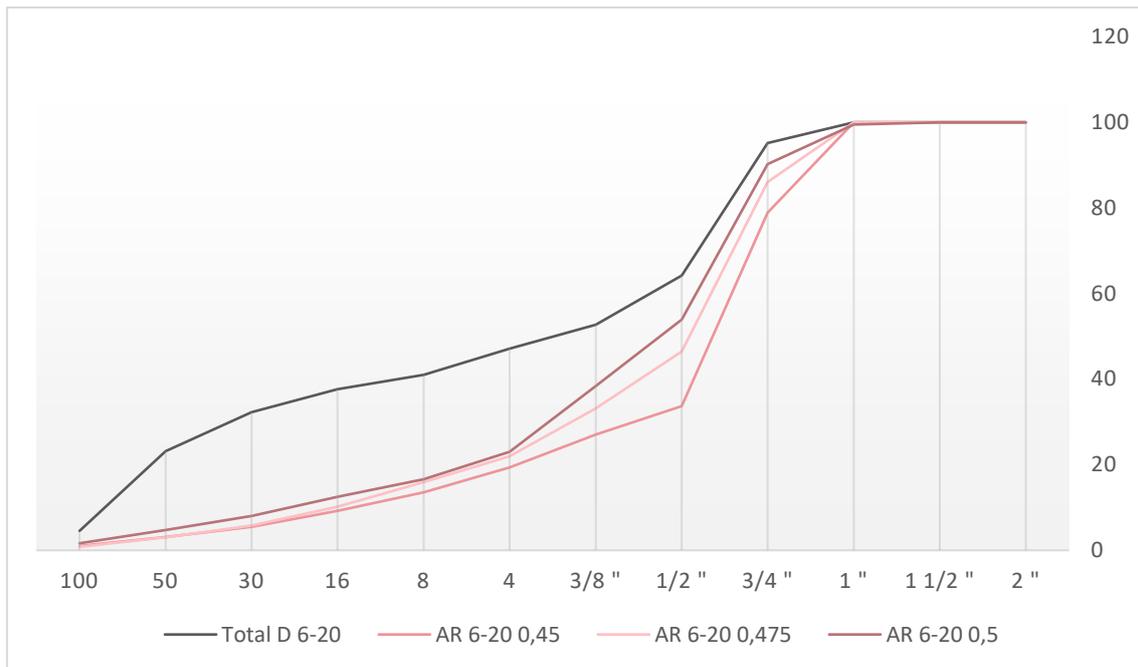


Figura 7. Comparación de distribución granulométrica entre agregado total 6-20 y los AR 6-20

Se aprecia en la Tabla 4 que las densidades de los AR son muy similares entre sí, incluidas la fracción fina (<4mm) y gruesa (>4mm). Debe destacarse que la dispersión propia del ensayo es alta, ya que el examen normalizado para la parte fina asume que el material ensayado es natural. En promedio general, en comparación con los datos de densidad de los AN listados en la Tabla 1, los AR son más livianos, es decir que las diferentes aglomeraciones de material que se dan en el proceso de pelletizado cuentan con una porosidad mayor que la presente en el AN. Un comportamiento similar fue observado por Ferrari et al. y Bassani et al. (Ferrari et al, 2014; Bassani et al, 2019). El análisis de la densidad respecto de la relación a/c muestra que para la parte fina el aumento de la cantidad de agua en la dosificación disminuye la densidad. Este patrón se repite en los AR 6-12 y 6-20. Sin embargo, no hay una propensión marcada de la densidad en la parte gruesa con la variación de la relación a/c. Esta tendencia puede explicarse por la conformación de cada una de las fracciones: los AR finos se componen, en gran cantidad, por aglomeraciones de cemento, agua, arena y componentes pelletizantes (Figura 8A). Allí, pequeños aumentos en la cantidad de agua afectan significativamente a la porosidad de los aglomerados y bajan su densidad. En cambio, la fracción gruesa de los AR se compone, en gran parte, por pasta cementicia que rodea a los AN gruesos (Figura 8B). De esta forma, la densidad del agregado grueso reciclado depende de varios factores: Espesor de la capa de recubrimiento, densidad de la capa y densidad del AN grueso en el núcleo.

El incremento de la porosidad en los AR 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 AR estudiados presenta un porcentaje de absorción mayor que el de la fracción retenida en el tamiz IRAM 4, lo que indica un aumento en la porosidad. Por otro lado, la absorción de los finos aumenta con la relación a/c, lo que comprueba el aumento de la porosidad de los aglomerados predicho por la variación de la densidad. En los AR gruesos nuevamente no se observa un comportamiento definido, pero los valores de absorción y densidad de cada agregado son congruentes: cuanto menor densidad, mayor absorción.

Tabla 4. Densidad y absorción de los AR

		AR 6-12 0,45	AR 6-12 0,475	AR 6-12 0,5	AR 6-20 0,45	AR 6-20 0,475	AR 6-20 0,5
Densidad relativa SSS (d3)	(<4mm)	2,5	2,47	2,30	2,51	2,47	2,35
	(>4mm)	2,36	2,32	2,34	2,37	2,54	2,37
Absorción (%)	(<4mm)	7,96	8,35	8,46	8,01	8,47	8,54
	(>4mm)	6,55	8,09	7,43	6,29	5,84	6,39

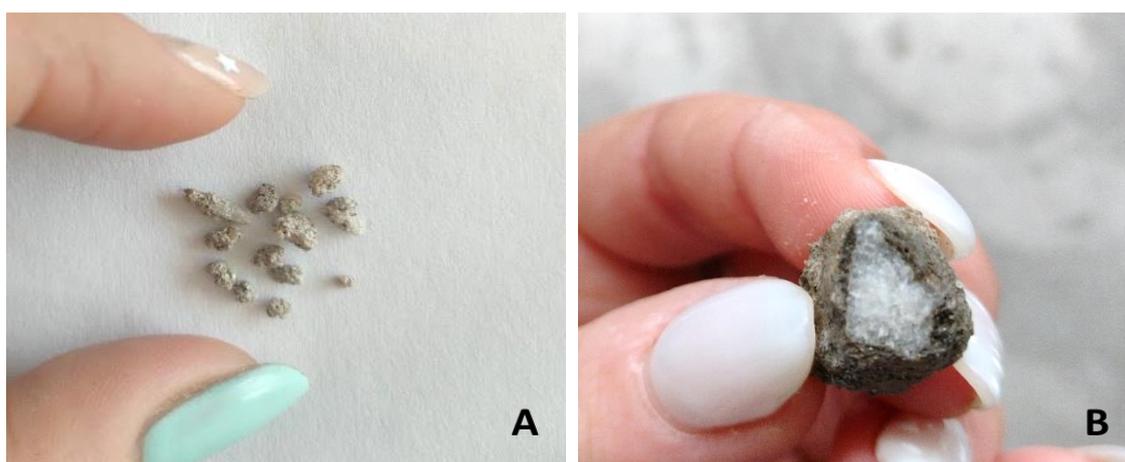


Figura 8. Agregado reciclado. A) AR fino. B) AR grueso partido.

Respecto del tamaño de los AR se observa en la Tabla 5 que el MF del AR obtenido a partir de piedra 6-20 posee un mayor valor que el reciclado formulado a partir de árido grueso 6-12, resultado esperable dado por el tamaño de la piedra que les da origen (Ferrari et al, 2014). Sin embargo, todos los MF son menores a los de las piedras que les dan origen (Tabla 1), esto se debe a que el agregado reciclado posee una fracción de finos de granulometría similar a una arena gruesa que el árido grueso no posee. En el MF se observa la misma tendencia de disminución del tamaño de la distribución a medida que aumenta la relación a/c en los AR obtenidos a partir de piedra 6-20. Sin embargo, el patrón no se repite en el AR basado en AN grueso 6-12. Respecto del porcentaje de material que pasa el tamiz IRAM 200 se aprecia que el AR basado en piedra 6-20 presenta una mayor cantidad de polvo fino menor a 75 μ m que el AR conformado a partir de agregado 6-12. Nuevamente, no se aprecian tendencias claras con la variación de la relación a/c.

Tabla 5. MF y % de material fino que pasa el tamiz IRAM 200

	AR 6-12 0,45	AR 6-12 0,475	AR 6-12 0,5	AR 6-20 0,45	AR 6-20 0,475	AR 6-20 0,5
MF	5,78	5,92	5,70	6,42	6,23	6,05
Pasa tamiz 200 (%)	2,69	2,54	2,59	2,86	2,63	3,12

Respecto de la forma de los AR se observa, en comparación con los AN gruesos (Figura 9A), un aumento en la redondez y esfericidad, patrón que se repite en los áridos obtenidos a partir de piedra 6-12 (Figura 9B) y 6-20 (Figura 9C) y que también fue observado en la bibliografía (León et al, 2010). Este fenómeno se atribuye al mecanismo de acción de la adición pelletizante, donde la capa de mortero que recubre a los AN toma una forma esférica por el mezclado rotativo.

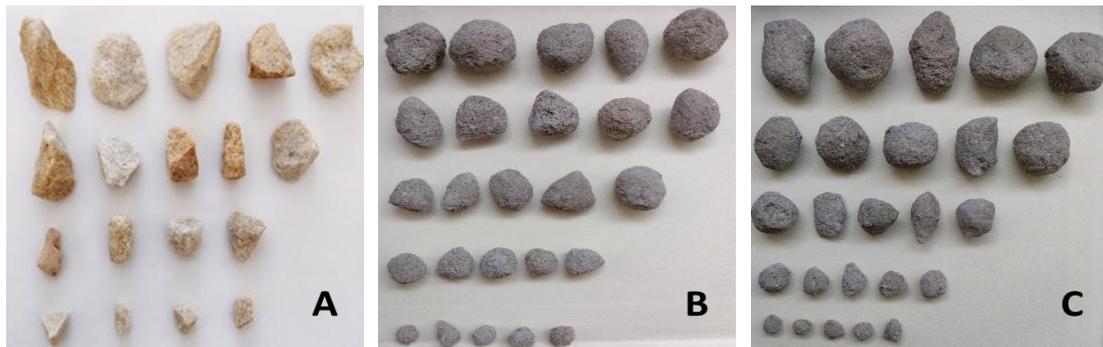


Figura 9. Geometría de AN y AR. A) AN cuarcítico. B) AR 6-12 0,5. C) AR 6-20 0,5.

3.2 Selección de una relación a/c de AR para su reemplazo en mezclas

La dosificación de las partes A y B de la adición se hizo de forma proporcional al volumen de hormigón preparado en las mezclas de laboratorio, teniendo en cuenta que la presentación comercial del producto es para 1m^3 de concreto. Así, la dosificación de ambas partes de la adición se mantuvo constante para todos los pastones elaborados. En las mezclas con relaciones a/c bajas se observó polímero no incluido en la red cementicia, sino libre, en la superficie de los áridos reciclados (Figura 10). Esto se atribuye un exceso estequiométrico del SAP respecto de la cantidad de agua incorporada en la mezcla. Tanto la bibliografía (Ferrari et al, 2012) como la ficha técnica del producto establecen un asentamiento para el mezclado óptimo de la adición de entre 15 y 18 cm, el cual se logró con el uso de superplastificantes, pero podría haberse trabajado con agua y así obtener una relación SAP/agua adecuada.

Los AR obtenidos con relación a/c=0,5 no exhibieron SAP libre en su superficie, es por ello que se decidió utilizar los AR 6-12 0,5 y 6-20 0,5 para el reemplazo de AN por AR. De esta manera se evitó la posibilidad de que el SAP pudiera tomar agua perteneciente a la mezcla de hormigón con reemplazo de áridos naturales.



Figura 10. SAP sobre superficie de agregados con baja relación a/c.

3.3 Caracterización de las mezclas con reemplazo parcial de AN por AR

La Figura 11 muestra las distribuciones granulométricas de árido total de las diferentes formulaciones con niveles de reemplazo de AN por AR 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 de todos los agregados componentes, como lo indica la Tabla 6 de las dosificaciones de todas las formulaciones en estado SSS. En todos los casos se utilizó la misma relación $a/c = 0,465$.

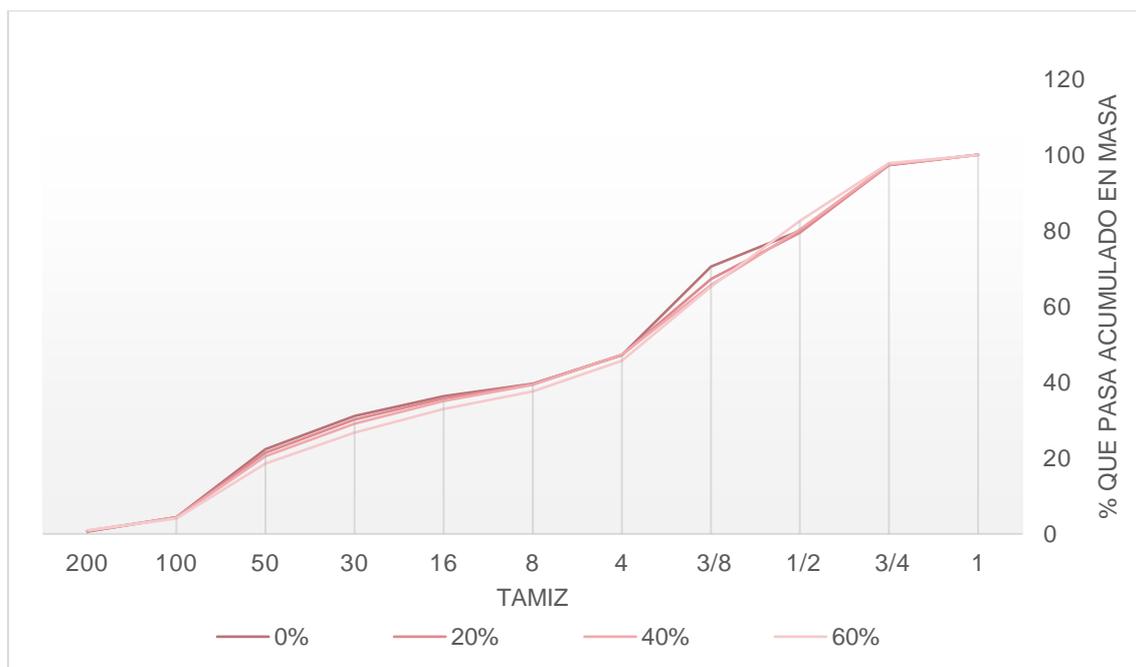


Figura 11. Distribución granulométrica de las mezclas

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

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

	0%	20%	40%	60%
Cemento	365	365	365	365
ASF	408	374	338	285
ACT	408	374	338	285
PC 6-12	450	249	89	0
PC 6-20	515	427	303	143
AR 6-12	0	267	534	802
AR 6-20	0	89	178	267
Agua	170	170	170	170
RA	2,17	2,17	2,17	2,17

3.4 Caracterización de los hormigones con AR + AN

Al aumentar el porcentaje de reemplazo de AN por AR se observó un mayor asentamiento en las mezclas (Tabla 7), siempre manteniendo la razón a/c y el contenido de aditivo reductor de agua. Este resultado se atribuye a la morfología más esférica y redonda de los AR. La inclusión de mayor cantidad de partículas con menor índice de lajiosidad en las mezclas acarreó un incremento en la trabajabilidad.

En la Tabla 7, además, se presentan los resultados de densidad PUV. Allí se observa una tendencia decreciente a medida que aumenta la cantidad de AR en las mezclas, lo que es coincidente con los resultados de densidad propia de cada uno de los reciclados (Tabla 4). Al aumentar el porcentaje de agregados de menor peso por unidad de volumen la densidad de la mezcla disminuye.

Respecto del contenido de aire incorporado a las mezclas listado en la Tabla 7 se observa un aumento en el porcentaje de aire retenido en todas las formulaciones que contienen AR, pero sin una tendencia clara.

Tabla 7. Características en estado fresco

	0%	20%	40%	60%
Asentamiento (cm)	8	10	11	11
PUV (kg/m ³)	2,38	2,34	2,30	2,28
Contenido de aire (%)	2,0	2,4	2,5	2,3

En los hormigones con reemplazo parcial de AN por AR 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 siguieran cumpliendo los requisitos de la clase resistente sobre la cual fueron diseñados (H-30). La disminución en la resistencia a la compresión es causada, en gran medida, por los áridos que lo componen. Los AR, por tratarse de un conglomerado poroso de AN, son más sensibles al desgaste los ángeles y poseen una resistencia al impacto menor (Bester et al, 2017). Al disminuir la cantidad de AN en las mezclas y aumentar el porcentaje de AR la resistencia final del conjunto se ve levemente 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 (Figura 12) mostró mejorías en el comportamiento a medida que aumentó el porcentaje de AR incluido en la mezcla. Este hecho encuentra su base en las interfaces generadas en el hormigón con AR, 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 AR y la pasta cementicia de un nuevo hormigón posee mayor adherencia que la generada entre un AN y la pasta (Ferrari et al, 2014).

Los AR incluidos en concretos exhiben dos comportamientos opuestos: una disminución en la resistencia compresiva del hormigón debida a la menor resistencia al impacto de los AR, en comparación con los AN; y, un aumento de la resistencia cohesiva de la interfaz entre el AR y la pasta, nuevamente en comparación con los AN.

Tabla 8. Características en estado endurecido

	0%	20%	40%	60%
Resistencia a la compresión a 28 días (MPa)	50,43±1,57	42,50±2,12	40,08±1,54	39,84±5,03
Penetración de agua a presión promedio (mm)	20±1	19±1	15±1	12±1
Absorción (%)	7,04	7,09	7,64	7,77

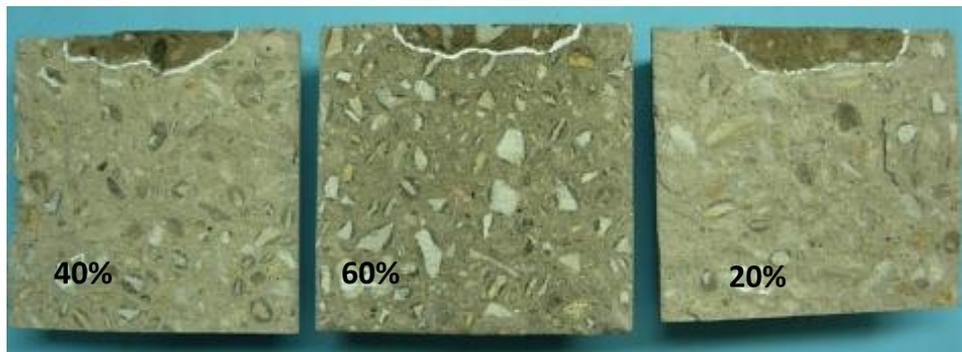


Figura 12. Probetas ensayadas a la penetración de agua.

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 AR la absorción de agua crece. Al incrementar la cantidad de árido más poroso, como lo es el reciclado respecto del AN, es esperable encontrar porcentajes de absorción de agua mayores.



Figura 13. Superficie de probeta con 40% de reemplazo después del ensayo de compresión

Los mecanismos de falla de las muestras de hormigón dependen de la resistencia de la pasta cementicia, la resistencia de los agregados y la resistencia de la interfaz entre los dos anteriores (De Brito et al, 2018). En la Figura 13 se muestra una superficie de rotura de un hormigón con 40% de reemplazo de AN por AR, donde se aprecia una mayor cantidad de AR partidos (marcados con círculos) que superficies de ellos expuestas dadas por una separación de la interfaz (marcadas con rectángulos). La observación anterior es congruente con los resultados anteriores, donde se estableció que la resistencia del AR decrece y la adhesión con la pasta mejora. Sin embargo, se concluye que, por los resultados de resistencia a la compresión de las mezclas y la superficie de falla, el factor con mayor influencia en la resistencia final del hormigón es el de menor resistencia intrínseca del árido por sobre los fenómenos de interfaz.

3.5 Prueba preliminar 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 1,0 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 4 minutos de amasado se descargó el contenido del *mixer* en pilas de poca altura (Figura 14A). Los AR obtenidos inmediatamente después de la descarga poseían dimensiones y resistencia en fresco similares a los pelletizados en laboratorio (Figura 14B). Es importante destacar que el proceso fue rápido y sencillo, elementos clave a la hora de incorporar un procedimiento en una planta de hormigón elaborado.



Figura 14. Prueba en camión mezclador. A) Descarga de AR desde camión moto-hormigonero. B) AR obtenidos de prueba en *mixer*.

4. Evaluación económica

Con el fin de realizar una evaluación económica del reciclado de hormigón fresco mediante el uso de adiciones pelletizantes se efectuaron comparaciones de costos de implementación de diferentes métodos usuales de reciclado. También, se estimó la pérdida económica en materias primas de desechar el hormigón fresco y se aproximó la distancia a las canteras a partir de la cual comienza a ser rentable reciclar hormigón fresco en lugar de comprar AN.

Las opciones más comunes a la hora de tratar hormigón sobrante devuelto a planta incluyen: disposición del sobrante, que acarrea el costo de pérdida de materia prima; vertido del concreto en un espacio adecuado, fragüe y trituración, para lo que es necesario, como mínimo, una planta trituradora; llenado de moldes para la fabricación de piezas pre-moldeadas, donde debe considerarse, como costo básico, la compra de moldes metálicos; recuperación de los áridos y agua mediante el uso de piletas de decantación, para lo que es necesario instalar en la planta un sistema de piletas, filtros y bombas; y, finalmente, la granulación del material mediante el uso de adiciones pelletizantes, que, como ya se expuso, solo requiere el gasto de compra del producto. En la Tabla 9 se incluyen los costos en pesos de todas estas alternativas, excepto por la planta trituradora, ya que los valores de maquinaria e importación son muy elevados y no son comparables con los métodos tratados. El precio del molde corresponde a bocas de registro de 1m^3 de un productor local y el monto de las piletas de lavado es una estimación realizada a partir de un modelo provisto por Loma Negra.

Tabla 9. Costos asociados a diferentes métodos de reciclado

Costo de materias primas (1m^3)	5.536
Costo de molde metálico	1.500.000
Construcción de piletas	10.000.000
Compra de adición (1m^3)	3.400

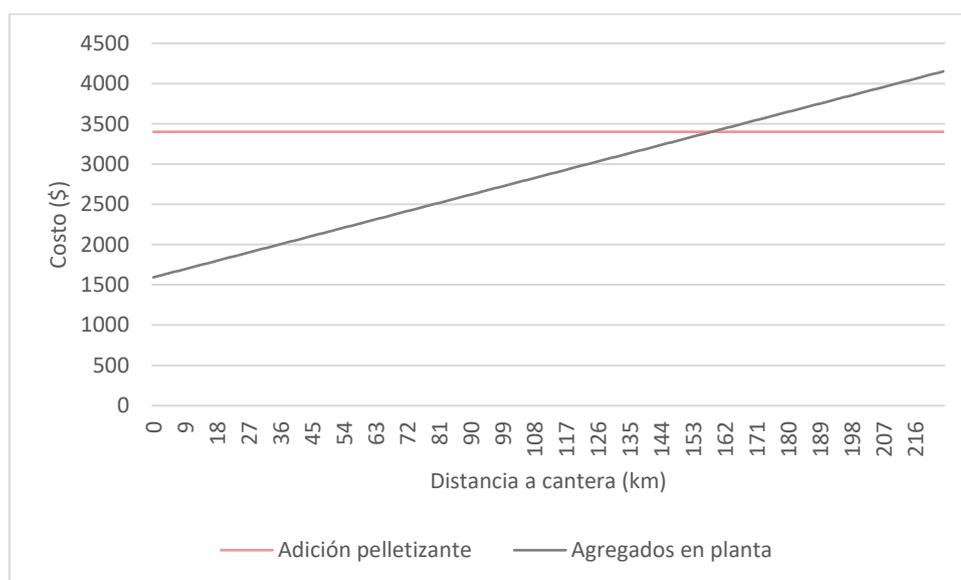


Figura 15. Costos de obtención de agregados según la distancia a la cantera.

Se aprecia que el monto de compra de la adición pelletizante es muy competitivo respecto del resto de los valores.

En el caso de optar por el uso de la adición para su implementación en nuevas mezclas de hormigón, en la Figura 15 se propone la evaluación del punto de mínima distancia a la cantera donde comienza a ser más económico reciclar hormigón mediante el uso de aditivos pelletizantes que comprar AN. El modelo se realizó separando los costos de materia prima en cantera de los valores de transporte por kilómetro de distancia. A medida que la distancia a los yacimientos aumenta los costes se elevan, hasta que a una distancia aproximada de 150 km el precio de compra de la adición pelletizante pasa a ser más económico. Este caso sería aplicable, por ejemplo, en obradores temporales instalados en locaciones remotas.

5. Análisis ambiental

El impacto ambiental que genera la industria de la construcción es alto. Sin embargo, existen técnicas que permiten un mejor uso de los recursos disponibles e, incluso, innovaciones que reemplazan a elementos que producen altos niveles de contaminación.

Un análisis cuantitativo excede al alcance del trabajo. Sin embargo, un examen cualitativo sobre el impacto ecológico del reciclado de hormigón fresco mediante el uso de adiciones pelletizantes muestra que tres puntos críticos mejoran su rendimiento ambiental: Se reduce la explotación de canteras, se contribuye a la disminución de residuos en disposición final y disminuyen las emisiones dadas por el transporte de materias primas.

Entre las técnicas de reciclado de hormigón el uso de aditivos pelletizantes confiere a las plantas productoras de hormigón muy buenos balances medioambientales. Esto se debe a varios motivos: No se precisan procesos que requieran altos consumos de energía o grandes cantidades de materiales suplementarios, el material granular obtenido se utiliza en su totalidad sin producir ningún residuo y su incorporación en mezclas de hormigón, al menos, reduce la cantidad de AN consumidos.

6. Conclusiones

Las conclusiones generales que se obtuvieron del trabajo son las siguientes:

- a) Los AR obtenidos presentaron distribución de tamaños apta para su uso en hormigones. La ventaja principal de una granulometría amplia es la posibilidad de reemplazar, en diferente porcentaje, a todos los AN presentes en una mezcla convencional de hormigón. Respecto a las variaciones en sus propiedades dadas por las diferentes relaciones a/c y los dos tamaños de AN grueso no se detectaron tendencias claras, en términos generales.
- b) En los hormigones con reemplazo parcial de agregado natural por reciclado 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 AR 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 AR.
- c) Sobre el uso de las adiciones se detectó que el agregado de la parte B y luego de la parte A mejora sustancialmente el mezclado y la homogeneidad del producto obtenido. Además, se concluye que dosificando la parte A y B en relación al volumen de hormigón, sin dependencia de la relación a/c, se obtienen AR con exceso de SAP en su estructura.
- d) Entre las opciones disponibles el reciclado de hormigón fresco utilizando adiciones pelletizantes presenta un buen balance económico, siempre que el reciclado sea un requisito. En el caso de que se evalúe el costo de reutilizar el hormigón sobrante o comprar AN, existe una distancia mínima a las canteras y areneras a partir de la cual comienza a ser rentable el uso de adiciones.
- e) El impacto ambiental de la industria de la construcción y los problemas relacionados a los vertidos de residuos pueden disminuirse con el reciclado de hormigón fresco utilizando adiciones pelletizantes.

7. Difusión de resultados del proyecto y trabajo a futuro

Como indican las conclusiones, existen áreas donde el estudio puede continuar desarrollándose. Algunas propuestas de trabajos futuros incluyen: trabajo con mezclas base donde el SAP se dosifique experimentalmente respecto del agua de amasado; evaluación de diferentes variables que afecten a los AR, como distintos tipos petrográficos de AN, tiempo de mezclado o cantidad de cemento en las mezclas base; y, evaluación cuantitativa del impacto ambiental.

Un resumen del presente trabajo fue presentado en la Jornada de Jóvenes Investigadores el 14 de octubre de 2021, organizada por la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, donde ganó una mención especial a mejor presentación. Además, el trabajo fue invitado a publicarse en la Revista Hormigón, perteneciente a la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, donde se encuentra actualmente en instancia de revisión por pares.

Referencias

- Akhtar, A., y Sarmah, A. K. (2018). Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, 186, 262–281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>
- 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/10.1016/j.engstruct.2015.01.043>
- Asgari, A., Ghorbanian, T., Yousefi, N., Dadashzadeh, D., Khalili, F., Bagheri, A., Raei, M. y Mahvi, A. (2017). Quality and quantity of construction and demolition waste in Tehran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 15 (14). <https://doi.org/10.1186/s40201-017-0276-0>
- 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.
- 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. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712003010>
- Chang, L., Xu, L., Liu, Y. y Qiu, D. (2021). Superabsorbent polymers used for agricultural water retention. *Polymer Testing Journal*, 94, 107021. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.107021>
- De Brito, J., Kurda, R. y Raposeiro da Silva, P. (2018). Can We Truly Predict the Compressive Strength of Concrete without Knowing the Properties of Aggregates? *Applied Sciences*, 8(7), 1095. <http://dx.doi.org/10.3390/app8071095>
- 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
- Ding, T., y Xiao, J. (2014). Estimation of building-related construction and demolition waste in Shanghai. *Waste Management*, 34(11), 2327–2334. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.07.029>
- Evangelista, L., y Guedes, M. (2019). Microstructural studies on recycled aggregate concrete. *New Trends in Eco-Efficient and Recycled Concrete*, 425–451. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-102480-5.00014-2>
- Ferrari, G., Miyamoto, M. y Ferrari, A. (2014). New sustainable technology for recycling returned concrete. *Construction and Building Materials*, 67(C), 353-359.
- Ferrari, G., Surico, F., Brocchi, A., Banfi, E., Maltese, C. y Squinzi, M. (2012). Method for recycling concrete. No. 10196236.3. Oficina de Patentes Europeas.
- Férriz-Papi, J.A. (2014). Recycling of fresh concrete exceeding and wash water in concrete mixing plants. *Revista de Materiales de Construcción*, 64 (313).
- Garside, M. (22 de febrero de 2021). Industrial sand and gravel production worldwide from 2008 to 2020. Statista. <https://www.statista.com/statistics/728756/industrial-sand-and-gravel-production-worldwide/>
- Gebremichael, N.N., Karakouzian, M., 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/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.201>

- Grimmeissen, L., Jensen, A. y Wehner, S. (2020). Hoja de ruta para el desarrollo de bajas emisiones en la Industria Chilena del Cemento. Proyecto Mecanismos y Redes de Transferencia de Tecnología Relacionada con el Cambio Climático en América Latina y el Caribe
- Heravi, G., Nafisi, T. y Mousavi, R. (2016). Evaluation of energy consumption during production and construction of concrete and steel frames of residential buildings. *Energy and Buildings*, 130, 244-252. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.067>
- Hilal, A. A. (2016). Microestructure of concrete en S. Yilmaz y B. Ozmen (Eds.), High performance concrete technology and applications. InechOpen. <https://doi.org/10.5772/61562>
- Irassar, E. F. (2004). Hormigón: Naturaleza y propiedades. En E. F. Irassar (Ed.), *Hormigones especiales* (pp. 1-16). Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Buenos Aires, Argentina.
- Islam, R., Nazifa, T.H., 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/10.1016/j.wasman.2019.05.049>
- Kazaz, A. y Ulubeyli, S. (2016). Current Methods for the Utilization of the Fresh Concrete Waste Returned to Batching Plants. *Procedia Engineering Journal*, 161, 42-46.
- 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/10.1016/j.resconrec.2017.02.004>
- Kourmpanis, B., Papadopoulos, A., Moustakas, K., Stylianou, M., Haralambous, K. J. y Loizidou, M. (2008). Preliminary study for the management of construction and demolition waste. *Waste Management & Research*, 26(3), 267–275. <https://doi.org/10.1177/0734242x07083344>
- Krumbein WC, Sloss LL. *Stratigraphy and sedimentation*. 2nd ed. San Francisco, CA: WH Freeman & Co 1963
- León, M.P. y Ramírez, F. (2010). Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes. *Revista Ingeniería de Construcción*, 25 (2), 215 – 240.
- Luna, M. Á., Castillo, G. B., Domínguez, E. R. R., & 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).
- Mack-Vergara, Y. L., y John, V. M. (2017). Life cycle water inventory in concrete production—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 227-250. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.004>
- Mália, M., de Brito, J., Pinheiro, M. D., y Bravo, M. (2013). Construction and demolition waste indicators. *Waste Management & Research*, 31(3), 241–255. <https://doi.org/10.1177/0734242x12471707>
- 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), 224 – 237.
- Mehta, P. K. (2001). Reducing the environmental impact of concrete. *Concrete International Magazine*, 23(10), 61-66.

- Miller, S. A., Horvath, A., y Monteiro, P. J. M. (2018). Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. *Nature Sustainability*, 1(1), 69–76.
<https://doi.org/10.1038/s41893-017-0009-5>
- Mohammed, H. A. (2018). Precast Concrete Cost Solution. [Presentación]. Al-Furat Al-Awsat Technical University, Technical Collage of Al-Mussaib, Iraq.
- Obla, K., Kim, H. y Lobo, C. (2007). Crushed Returned Concrete as Aggregates for New Concrete (Proyecto 5-13). RMC Research & Education Foundation.
- Ocaranza, S., Sánchez, R.M. y Anaya, H.D. (3 y 4 de octubre de 2013). Uso de material granular reciclado proveniente de residuos de construcción y demolición (RCD) en bases y subbases para pavimento flexibles [Trabajo de investigación]. IX Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA, Santiago del Estero, Argentina.
- 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.
- 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
- Ribeiro, S., Ribeiro, D., Dias, M., Ribeiro, G. y Santos, É. (2011). Study of the Fracture Behavior of Mortar and Concretes with Crushed Rock or Pebble Aggregates. *Materials Research*, 14(1), 46-52. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392011005000004>. 2011
- 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/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.125>
- Rostami, R.; Klemm, A.J.; Almeida, F.C.R. (2021). The Effect of SCMs in Blended Cements on Sorption Characteristics of Superabsorbent Polymers. *Materials* 2021, 14, 1609.
- Sand Stories. (28 de mayo de 2020). *Is the world running out of sand?*.
<https://www.sandstories.org/stories/2020/5/27/a-conversation-with-joanna-thomson-trustee-of-the-goodwin-sands-conservation-trust>
- Silva, R. V., de Brito, J., y Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201–217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>
- Tang, W., Khavarian, M., Yousefi, A., y Cui, H. (2020). Properties of self-compacting concrete with recycled concrete aggregates. *Self-Compacting Concrete: Materials, Properties and Applications*, 219–248.
- Torrent, R. (2020). Propiedades del Hormigón Fresco y Endurecido: ¿qué, cómo y por qué las medimos? [Webinar]. Asociación Argentina del Hormigón Elaborado.
<https://web.icpa.org.ar/wp-content/uploads/2020/04/M02b-Ensayos-de-Consistencia-Convencionales.pdf>
- 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/10.1016/j.wasman.2015.06.035>.
- U.S. Geological Survey. *Cement Statistics and Information*.
<https://www.usgs.gov/centers/nmic/cement-statistics-and-information>.
- U.S. Geological Survey. *Sand and Gravel Statistics and Information*
<https://www.usgs.gov/centers/nmic/construction-sand-and-gravel-statistics-and-information>.

- Ulubeyli, S., Kazaz, A. y Arslana, A. (2016). Construction and demolition waste recycling plants revisited: management issues. *Procedia Engineering Journal*, 172, 1190-1197.
- UNEP (2019). Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources. GRID-Geneva, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland.
- Wang, R. y Zhang, Y. X. (2018). Recycling fresh concrete waste: A review. *Structural Concrete Journal*, 19, 1939-1955. <https://doi.org/10.1002/suco.201800057>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.018>
- 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/10.1016/j.jhazmat.2016.03.036>
- Yehia, S., Abdelfatah, A., y Mansour, D. (2020). Effect of aggregate type and specimen configuration on concrete compressive strength. *Crystals*, 10(7), 625. <http://dx.doi.org/10.3390/cryst10070625>
- Zampini, D., Guerini, A. y Volpatti, G. (2018). Method to produce aggregates from unsettled cementitious mixtures. No. US2018/0162774 A1. Oficina de patentes y marcas de EEUU.

Anexo: Metodología de ensayo de áridos y ensayos de hormigón fresco y endurecido

1. Método de cuarteo

Para cada ensayo realizado se muestreó el árido según indica la norma IRAM 1509:2006. Debido a que el acopio de las arenas fue distinto al de las piedras la toma de muestras significativas debió ser diferente. La extracción de especímenes de los áridos gruesos se hizo tomando una fracción parcial de agregado del tercio superior de la pila, una del tercio medio y una del tercio inferior. Luego, se mezclaron las muestras parciales para obtener una total. En cambio, en las arenas no

fue necesaria la toma de muestras parciales, ya que la forma de acopio no representaba riesgo de segregación.

El método de cuarteo propuesto por la norma se compone de varios pasos:

- Colocación de la muestra sobre una superficie dura y limpia, donde no sea posible la incorporación de materias extrañas ni pérdida de material.
- Formación de una pila cónica mediante sucesivos vertidos del material sobre el vértice del cono que se va creando.
- Truncamiento del cono mediante el aplanamiento de la pila con el reverso de una pala, hasta lograr un espesor uniforme (Figura 1A).
- Trazado de dos diámetros perpendiculares que forman cuatro cuartos iguales (Figura 1B).
- Extracción de dos cuartos opuestos, cuidando que los cuartos no se mezclen con vecino ni que queden polvos residuales (Figura 1C).
- Mezclado de los dos cuartos remanentes y repetición del proceso hasta alcanzar el volumen de muestra deseado (Figura 1D).

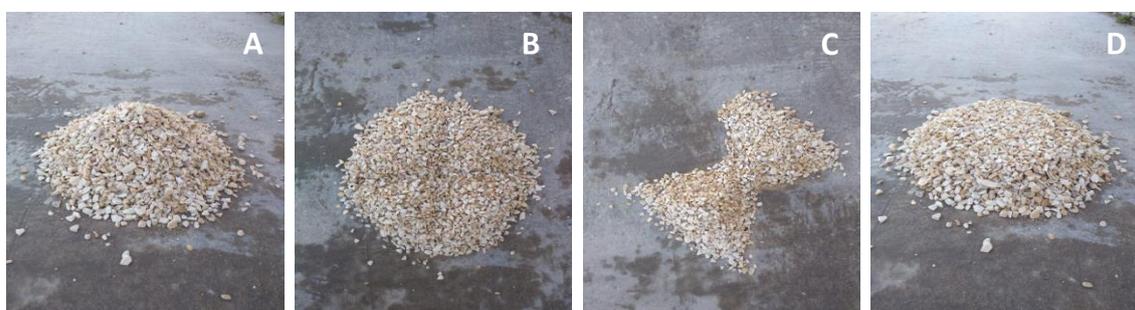


Figura 1. Proceso de cuarteo de áridos.

2. Cálculo de absorción y densidad de los agregados

Para la determinación de los valores de absorción y densidad debe separarse al material en agregado fino y grueso. Por definición los agregados que pasan el tamiz IRAM 4, con una abertura de malla de 4,75 mm, son finos, mientras que los que quedan retenidos se denominan gruesos. La normativa que rige la obtención de la densidad y absorción del árido fino es la IRAM 1520:2002 y para el grueso es la 1533:2002.

2.1 Agregado fino

Los pasos incluyen:

- Preparación de aproximadamente 500 g de muestra con el método de cuarteo (Anexo 1)
- Estacionado de las arenas sumergidas en agua durante 24 hs.
- Secado del árido con corriente de aire caliente y remoción constante hasta lograr el estado saturado superficie seca (SSS), definido como la condición donde los poros internos se encuentran saturados de agua y la superficie de las partículas seca. Este estado se puntualiza por la formación de una pila de arena de forma cónica y con generatriz recta luego de retirar el molde troncocónico y golpear la muestra con la varilla de compactación (Figura 2).
- Se pesan $50g \pm 10g$ en estado SSS y se registra ms.
- Se coloca la muestra en el matraz aforado y se pesa el conjunto para obtener m1.

- Luego se llena de agua a $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ hasta la marca de 500 cm^3 y se remueve periódicamente durante 1 hora para eliminar el aire retenido.
- Se completa con agua hasta el aforo y se pesa el conjunto, allí se registra m_2 .
- Se retira todo el material del matraz y se deja secar en estufa hasta masa constante donde, finalmente, se pesa y se obtiene el valor de m .

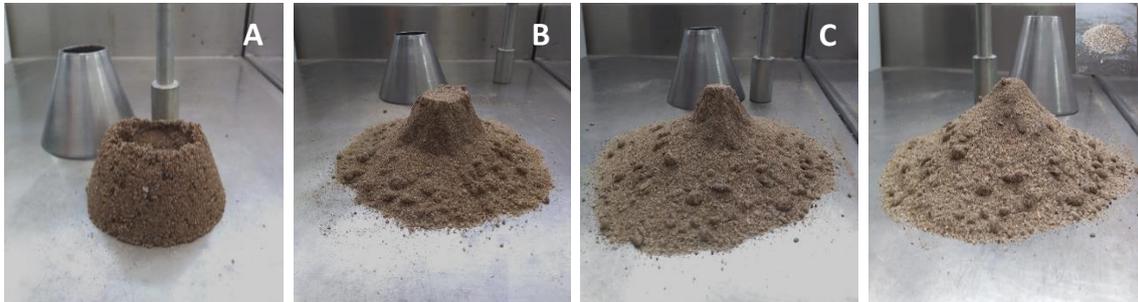


Figura 2. Evolución de la arena desde el estado mojado hasta SSS.

Los valores de densidad relativa SSS (d_3) y absorción se calculan como:

$$d_3 = \frac{ms}{\left(500\text{cm}^3 - \frac{m_2 - m_1}{\frac{1\text{g}}{\text{cm}^3}}\right) * \frac{1\text{g}}{\text{cm}^3}}$$

$$abs [\%] = \frac{ms - m}{m} * 100$$

2.2 Agregado grueso

La metodología se compone de los siguientes pasos:

- Cuarteo de las muestras de piedras hasta obtener una masa adecuada según el tamaño máximo nominal (Anexo 1).
- Lavado de los áridos hasta la eliminación casi total del polvo (Figura 3A y 3B).
- Reposo durante 24 en agua.
- Secado superficial con paño absorbente hasta alcanzar el estado saturado superficie seca (SSS), que se caracteriza por humedad en las piedras sin que se aprecien restos de agua libre en su superficie (Figura 3C y 3D).
- Pesado de los áridos en estado SSS y registro de m_s .
- Pesado de los áridos en agua dentro de una cesta de alambre sumergida en agua en agua, lo que da el valor de m_a .
- Secado hasta peso constante.
- Pesado en estado seco y registro del valor m .

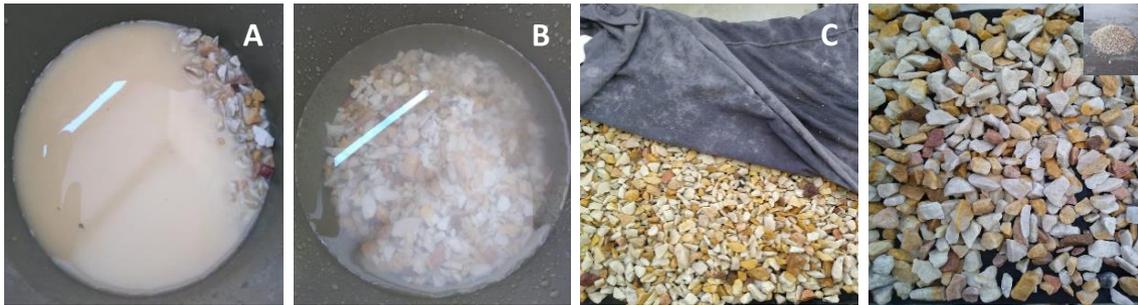


Figura 3. Lavado y secado hasta estado SSS del agregado grueso.

Los valores de densidad relativa SSS (d_3) y absorción se calculan como:

$$d_3 = \frac{ms}{ms - ma}$$

$$abs [\%] = \frac{ms - m}{m} * 100$$

3. Porcentaje de material que pasa el tamiz IRAM #200

La norma IRAM 1540:1986 establece el siguiente procedimiento para determinar el porcentaje de material menor a $75 \mu\text{m}$:

- Se obtiene un peso seco adecuado de muestra de acuerdo a su tamaño máximo nominal mediante el cuarteo (Anexo 1) de una muestra total.
- Pesado del agregado seco y obtención de m_s .
- Colocación del material en un recipiente adecuado y agregado de agua.
- Agitación vigorosa del conjunto, de forma que las partículas finas queden suspendidas en el agua.
- Vertido del agua con polvo en suspensión sobre dos tamices sucesivos de aberturas 1,18 mm y $75 \mu\text{m}$, con cuidado de que el árido de mayor tamaño no caiga sobre el primer tamiz (Figura 4).
- Repetición del proceso hasta que el agua de lavado sea límpida.
- Retorno del material retenido en los tamices al recipiente que contiene la muestra.
- Secado del agregado hasta masa constante.
- Pesado del conjunto y registro de m_l .



Figura 4. Árido con agua y tamices.

El porcentaje de material menor a $75 \mu\text{m}$ se calcula como:

$$Pasa\ 200\ [\%] = \frac{ms - ml}{ms} * 100$$

4. Granulometría y módulo de fineza

Los pasos a seguir para determinar la distribución de tamaños según la norma IRAM 1505:2005 son:

- Cuarteo de la muestra seca hasta obtener la masa necesaria según el tamaño del agregado (Anexo 1).
- Colocación del árido sobre los tamices (Figura 5) apilados en tamaño decreciente de abertura.
- Agitado del conjunto con una máquina vibradora durante aproximadamente 10 minutos.
- Pesado del material retenido en cada tamiz.
- Cálculo del porcentaje retenido, porcentaje retenido acumulado y porcentaje pasante acumulado. Con estos datos se construye la curva granulométrica y se determina el módulo de fineza (MF).



Figura 5. Tamices normalizados IRAM.

El cálculo del MF se realiza como la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices IRAM 150 μ m, IRAM 300 μ m, IRAM 600 μ m, IRAM 1,18 mm, IRAM 2,36 mm, IRAM 4,75 mm, IRAM 9,5 mm, IRAM 19 mm, IRAM 37,5 mm y más grandes, aumentando en la proporción de 2 a 1. Luego, se divide la suma por 100.

5. Determinación del peso por unidad de volumen (PUV)

La norma 1562:2012 establece los siguientes pasos para la medición del peso por unidad de volumen:

- Calibración y tara de un recipiente de volumen conocido (V)
- Llenado del recipiente con tres capas de mezcla, donde entre cada una se varilla 25 veces y se golpea al molde de forma lateral con martillo de goma.
- Enrase del recipiente.
- Pesado del conjunto y determinación del peso P.

El cálculo del PUV se realiza como:

$$PUV \left[\frac{kg}{L} \right] = \frac{P}{V}$$

Además, ese valor se puede comparar y verificar con la sumatoria de las densidades de los componentes del hormigón, debiendo afectarla por la proporción de cada uno de los elementos en la mezcla.

6. Medida del asentamiento

La norma 1536:2020 estipula que los pasos a seguir para determinar el asentamiento de una mezcla son:

- Mojado superficial del molde
- Llenado del molde en tres capas, entre las cuales se varilla 25 veces.
- Enrasado de la superficie.
- Retirado del cono a velocidad constante en dirección vertical.
- Medición de la diferencia de altura, en cm, entre el molde y el cono de concreto obtenido (Figura 6).



Figura 6. Medida del asentamiento.

7. Medida del contenido de aire con aparato de Washington

Los pasos a seguir para determinar el contenido de aire de una mezcla de concreto según la norma IRAM 1602-2:1988 son:

- Llenado del recipiente con tres capas de mezcla, donde entre cada una se varilla 25 veces y se golpea al molde de forma lateral con martillo de goma.
- Enrase del recipiente.
- Limpieza de los bordes del recipiente y colocación hermética de la tapa.
- Cerrado de la válvula principal y apertura de las llaves de la tapa.
- Inyección de agua a través de una de las llaves hasta que emerge a través de la llave opuesta (Figura 7).
- Cerrado de las llaves.
- Bombeo de aire hasta alcanzar la presión inicial con la aguja del manómetro.
- Apertura de la válvula de aire y lectura del porcentaje de aire en el manómetro.



Figura 7. Aparato de Washington.

8. Método de preparación y curado de probetas para ensayo

La norma IRAM 1534:2004 establece los siguientes pasos para la preparación y curado de probetas para ensayo en laboratorio:

- Engrasado de los moldes.
- Llenado de los probeteros con dos capas de material, cada una compactada con 25 varillados y golpes laterales del molde con martillo de goma.
- Enrasado del molde.
- Reposo de 24 hs al resguardo de la intemperie (Figura 8).
- Desmolde.
- Curado en cámara húmeda o en pileta saturada en hidróxido de sodio hasta el momento del ensayo.



Figura 8. Moldes con hormigón fresco.

9. Medida de la resistencia a la compresión de probetas normalizadas de hormigón

Los pasos indicados para obtener la resistencia mecánica de probetas de hormigón mediante la norma 1546:1992 son:

- Registro de las medidas de la probeta.

- Apoyo de las probetas sobre los cabezales de caucho.
- Limpieza de las superficies de apoyo de la máquina de ensayos (Figura 9).
- Aplicación de la carga de forma constante con prensa hidráulica hasta la rotura de la muestra.
- Registro de la carga máxima alcanzada, tipo de rotura y todos los datos importantes.



Figura 9. Prensa hidráulica.

10. Medida de la absorción de agua

La norma EN 1916:2002 en su Anexo F indica que los pasos para determinar la absorción de agua en probetas de hormigón endurecido son:

- Sumergido en agua en etapas de las probetas hasta alcanzar masa constante mojada.
- Secado de la superficie de la probeta, sin eliminar agua absorbida.
- Pesado de la muestra y registro de m_1 .
- Secado de la probeta hasta peso constante.
- Pesado de la muestra seca y registro de m_2 .

El valor de absorción se calcula como:

$$A_w[\%] = \frac{(m_1 - m_2)}{m_2} * 100a$$