

Una Fuente Alternativa de Agregados Finos para el Hormigón

Oscar A. Cabrera*, Néstor F. Ortega** y Luis P. Traversa***

Abstract

One of the most used composed materials in civil engineering is concrete and it requires for manufacturing large volumens of nonrenewable resources. At the present, natural fine aggregates deposits are seriously in danger of extinction or its exploitation cause environmental damages. On the other hand, during coarse aggregates production, rock becomes sand in a 40-50 % approximately of its volume, being its use very limited in the concrete. However, nowadays, it is possible to obtain concretes of suitable qualities using available technologies.

Keywords: crushed sand, recycled, concrete, aggregates.

Resumen

El hormigón es uno de los materiales más utilizado en las obras civiles, y requiere de grandes volúmenes de recursos no renovables para su fabricación. En la actualidad, existe una gran cantidad de agregados finos naturales cuyos yacimientos proveedores se encuentran en vías de extinción o su explotación resulta problemática por razones ambientales. Por otra parte, durante la producción de agregados pétreos, aproximadamente el 40-50 % de la roca se transforma en arena cuyo uso en el hormigón esta muy limitado, sin embargo se puede obtener hormigones de adecuada calidad utilizando las tecnologías disponibles.

Palabras clave: arena triturada, reciclado, hormigón, agregados.

Fecha de recepción del original: 3/02/2010 | Fecha de evaluación del original: 21/07/2010

• Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Avda. del Valle 5737 (7400) Olavarría, Argentina | e-mail: ocabrera@fio.unicen.edu.ar

•• Departamento de Ingeniería - Universidad Nacional del Sur, Avda. Alem 1253 (8000) Bahía Blanca, Argentina | e-mail: nfortega@criba.edu.ar

••• Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT) Comisión de Investigaciones Científicas, Calle 52 y 121 (1900) La Plata, Argentina | e-mail: direccion@lemit.gov.ar

1. Introducción

La producción y empleo de los materiales de construcción, especialmente el cemento, los agregados pétreos, la cal, los cerámicos, provocan dos importantes impactos sobre el medio ambiente, la gran producción de CO₂ en algunos casos, y daños al paisaje y perjuicios a los factores socioculturales que se desarrollan en ese medio. La explotación de los recursos naturales (rocas) involucrados en la industria de la construcción, no tiene un control estricto ni limitaciones.

El agregado pétreo ideal para elaborar hormigones raramente se encuentra disponible, y el problema que se presenta es decidir la performance que se le requiere en una determinada situación, y determinar el grado al cual es económicamente alcanzable. Entre el 65 y 75 % del volumen del hormigón esta ocupado por los agregados, y sus propiedades controlan muchas de las características del hormigón. Respecto del agregado fino (arena), que representa en el orden del 40 % del total de los agregados, sus propiedades pueden afectar al hormigón en estado fresco como endurecido. Cuando se requiere elaborar hormigones con un alto nivel de resistencia mecánica o propiedades particulares, las características de las partículas (forma, textura superficial, tamaño, porosidad y mineralogía) se tornan importantes, especialmente cuando se debe seleccionar o decidir comparativamente su empleo.

En la Provincia de Buenos Aires existe una producción importante de rocas, siendo una de las principales provincias mineras de nuestro país. En ella se desarrollan dos cordones serranos, los sistemas de Tandilia y Ventania. En el de Tandilia existe una importante explotación de canteras para la producción de agregados triturados que tienen como mercados la Capital Federal, y las ciudades cercanas, Tandil, Olavarría, Azul, Mar del Plata, etc. En el sistema de Ventania existen yacimientos de arenas naturales en las cuencas de alguno de sus ríos, y también, existen canteras de agregados triturados.

La minería en la Provincia de Buenos Aires comprende actividades extractivas con una producción del orden de 24 Mt/año, y en ella se produce la mayor parte de los triturados pétreos del país. Conjuntamente con el aprovechamiento de la caliza y del granito, el de la arena constituye uno de los renglones de mayor volumen de la industria extractiva bonaerense, no así el del canto rodado que se resume en explotaciones reducidas (ver Tabla 1). Las principales rocas relacionadas con la tecnología del hormigón que se explotan en la Provincia de Buenos Aires se indican en la Tabla 2, y en la Figura 1 se señala la ubicación geográfica de los principales yacimientos y canteras.

Tabla 1 | **Producción de rocas en la Provincia de Buenos Aires**

Minerales no metalíferos	Producción (toneladas)	
	2003	2004
Granito triturado	5.290.000	--
Calizas	5.132.920	4.791.050
Cuarcita	899.540	--
Arenas de construcción	5.556.144	5.684.403
Dolomita triturada	792.700	79.396
Arenas silíceas	16.450	10.000
Triturados pétreos (*)	--	7.268.439
Canto rodado	--	128.000

(*) incluye triturados de roca granítica, cuarcitas, pórfidos, gneiss, calcáneos, etc.

Fuente: Dirección de Recursos Geológicos y Mineros. Información del CITAB-BPBA, 2005.

A pesar de la gran producción de arenas, no siempre se encuentran yacimientos aptos para su uso en el hormigón. Por lo tanto, pueden considerarse como *agregados marginales*, aquellos agregados que no cumplen las especificaciones establecidas por los Reglamentos respecto a sus propiedades físicas y/o químicas. Generalmente, uno de los requisitos que margina a las arenas es el hecho de que la curva granulométrica no se encuadre dentro de los límites establecidos, dado que el material es muy fino, o resulta monogranular (arena de médano). También, la presencia de contenidos elevados de conchillas en las arenas de playa, puede marginar el empleo de este material como componente del hormigón. Si bien las conchillas son un material duro, su empleo en hormigón puede hacer necesario el incremento del contenido de pasta para mantener controlada la consistencia, ante la forma extremadamente plana de este tipo de partículas. Además, estas arenas, de acuerdo a diversos estudios realizados, contienen constituyentes que pueden reaccionar con los álcalis del cemento, y se encuentran en porcentajes superiores a los máximos recomendados, en particular se ha detectado la presencia de calcedonia, chert, ópalo y vidrio volcánico [1]. Otro caso de arenas marginales son las provenientes de la trituración de rocas (arena triturada) donde la forma, la textura y el contenido de polvo resultan ser los factores limitantes de su utilización, por la incidencia de estas características físicas sobre el consumo de agua de mezclado del hormigón.

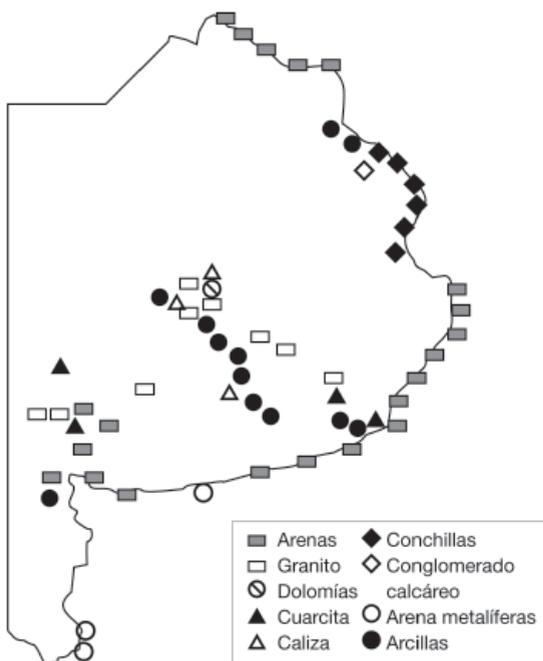


Fig. 1 | Recursos mineros de la Provincia de Buenos Aires relacionados con la tecnología del hormigón

Tabla 2 | Producción de rocas en la Provincia de Buenos Aires, por partido

Partidos	Tipo de Rocas
Baradero, Campana, Monte Hermoso, Quilmes, Tigre, San Fernando	Arena natural
Olavaria	Granito y dolomita triturados, caliza, arena de cantera
Benito Juárez	Caliza, arena
Tandil, Torquinst	Granito triturado, arena de cantera
Gral. Pueyrredón, Saavedra	Cuarcita triturada, arena
Gral. Lavalle	Arena médano
Azul, Balcarce	Granito triturado

La Provincia de Buenos Aires presenta un dilatado litoral marítimo, lo cual ha permitido la extracción de arenas de playa que se emplean como agregado fino para elaborar hormigones estructurales con ventajas vinculadas con la economía de las obras ya que disminuye el material a ser transportado. Debe recordarse que en las proximidades del litoral marítimo bonaerense no existen yacimientos alternativos de agregados finos para hormigón. Recientemente autoridades de los municipios de la costa

marítima bonaerense plantearon, avalados con los estudios técnicos, el inconveniente en emplear y extraer arenas de playa, por problemas de orden ambiental [1]. En ese sentido durante el desarrollo de la *Bienal de Ciencia y Tecnología* organizada por la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, en la cual participaron representantes de diversos sectores se planteó la necesidad de encontrar alternativas en la Provincia de Buenos Aires a éste problema, orientando la solución hacia el empleo de agregados finos reciclados o provenientes de la trituración de rocas [2].

A nivel internacional se puede plantear que en Venezuela existe una legislación para regular la administración, uso y manejo de las zonas costeras, con el objeto de su conservación y aprovechamiento sustentable, como parte integrante del espacio geográfico venezolano. Se establece que en la zona costera de dominio público queda prohibida la extracción de arena y de otros minerales en las playas y dunas de las costas marinas [3]. En algunas zonas del sudoeste de Inglaterra por restricciones legislativas los agregados son importados desde Irlanda. En este caso se utilizan agregados marinos obtenidos por medio de dragado, los cuales se encuentran exentos de un impuesto que se aplica a los agregados naturales proveniente canteras y yacimientos terrestres [4]. En cambio, en Argentina existe una ausencia o ineficiencia en la legislación específica de uso de suelo, y el manejo de los recursos naturales ha sido causante de la pérdida y/o deterioro del recurso playa y de la descaracterización general del paisaje [5]. Si bien la extracción de arenas de playa puede ser una causal de deterioro, no puede atribuirse a la misma todos los efectos negativos observados en los últimos años en la costa bonaerense.

Al planteo realizado sobre las arenas de playa se debe sumar los problemas ambientales asociados a su explotación, y debe considerarse en un contexto donde aparecen otras zonas de la Provincia de Buenos Aires con inconvenientes en la provisión y uso de agregados finos. Los principales centros productores de arena se ubican en la amplia zona del Delta (Río Paraná, Paraná Guazú, canales e islas del mismo), pero el material resulta ser fino. En el noroeste de la Provincia de Buenos Aires se dispone de arena de médanos, que se presentan en el paisaje como suaves ondulaciones con alturas relativas del orden de los 7 metros, en cercanías de la localidad de Trenque Lauquen. Hacia el sur de la Provincia, cabe mencionar el aprovechamiento de arenas del río Sauce Grande y de los arroyos Sauce Chico, Napostá y otros del área de las Sierras Australes las cuales pueden tener algún grado de reactividad. Varios trabajos indican que las arenas provenientes de sedimentos fluviales del río Sauce Grande, están constituidas principalmente por cuarcitas (27 %), rocas volcánicas frescas (26 %) y en menor proporción rocas sedimentarias y graníticas. El contenido de vidrio es de 2.5 % en promedio, son reactivos y han producido deterioros en pavimentos [6, 7]. Finalmente, en el centro de la Provincia la disponibilidad de arena se limita a las arenas trituradas. En la Figura 2 se indican las zonas de la Provincia de Buenos Aires con los diferentes problemas detallados.

Por lo expuesto, cada vez más va a ser necesario encontrar yacimientos de arenas de partículas duras, resistentes y estables, libres de impurezas orgánicas y de material más fino que el tamiz IRAM 75 μm (N° 200), que den resultados satisfactorios en los ensayos de durabilidad por ataque con soluciones de sulfato de sodio o magnesio, y que no presenten sustancias nocivas o deletéreas para el hormigón, pero cuyos granos deben tener dimensiones tales que satisfagan los requisitos de calidad del hormigón en estado fresco y endurecido. Además, se debe tener en cuenta que en nuestro país, de incrementarse las obras de infraestructuras se hace necesario disponer de fuentes de agregados aptos. Por ello, una mayor generalización del empleo de arenas trituradas basado en un conocimiento científico-tecnológico de la influencia en el hormigón, se asociaría también al agotamiento de yacimientos de arenas naturales cercanos a los centros de consumo, o a limitaciones impuestas por consideraciones de orden ambiental, asociadas a los impactos ambientales de la producción de agregados. Esta situación no difiere de otras regiones a nivel internacional, observándose en muchos países una creciente escasez de agregados naturales [4, 8, 9, 10,11, 12].

Finalmente, en marzo de 2010 la Legislatura bonaerense aprobó una ley que declara zona (paisaje) protegida la denominada poligonal ubicada dentro del casco urbano de Tandil y limitada por las rutas provinciales 74 y 30 y la ruta nacional 226. Además, dispone un plazo de dos años para que las cuatro empresas que hoy explotan canteras deberán presentar planes de reconversión y cesar la actividad.

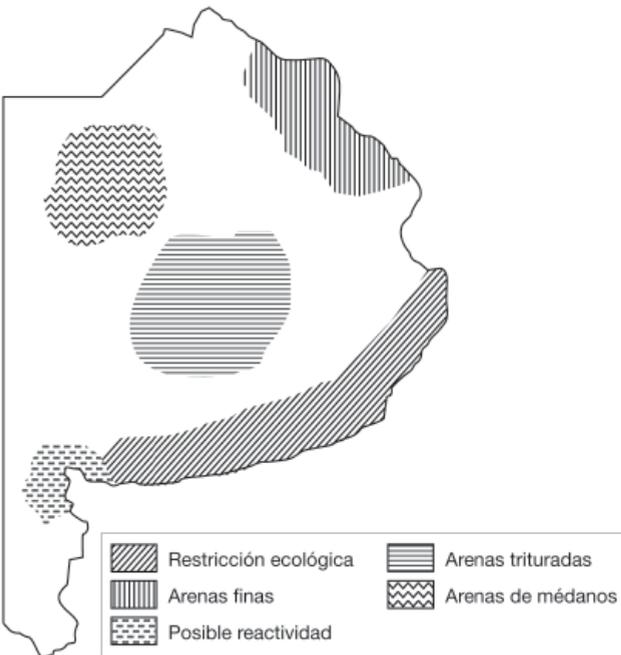


Fig. 2 | Recursos de agregados finos de la Provincia de Buenos Aires

2. Estado del Arte sobre el Uso Arenas Trituradas

El volumen significativo de arena triturada originado en las plantas de productoras de agregados pétreos hace aconsejable darle una deposición conveniente a este subproducto (Figura 3), desde el punto de vista ambiental. Por lo cual resulta adecuado evaluar su empleo en el hormigón desde el punto de vista científico-tecnológico, analizando las modificaciones que su incorporación origina en la estructura del material y sus efectos sobre los parámetros de diseño, como ser la resistencia mecánica, el módulo de elasticidad y la durabilidad. Durante el proceso de transporte, y trituración primaria y secundaria la cantidad de material menor de 4.75 mm esta entre 10 y 20 % del total. En el caso de que el material se tenga que pasar por una trituradora terciaria, estos porcentajes se incrementan a valores que oscilan entre 20-60 % [13].



Fig. 3 | Acopio de arena triturada granítica (Canteras Argentinas, Olavarría)

Esta arena puede considerarse un subproducto, que se acumula en las plantas productoras y que tiene restricciones para ser utilizadas en el hormigón. El Reglamento CIRSOC 201-05 [14] permite utilizar un 30 % de arenas trituradas dentro del agregado fino. Ante la escasez de yacimientos de arenas adecuadas para elaborar hormigón, el uso de arenas trituradas es un tema que empieza a tomar mayor relevancia.

Como antecedente del uso de las arenas trituradas como material de construcción en nuestro país se remonta a los morteros de albañilería empleados en la construcción de viviendas, edificios públicos e industriales, a partir del comienzo de las explotaciones de canteras para diferentes

usos en de la industria de la construcción. A modo de referencia, un caso que merece destacarse, entre otros, es el mortero de asiento de ladrillos cerámicos elaborado con arenas trituradas utilizado en el edificio del Asilo San José de la ciudad de Olavarría, que se remonta a comienzos del Siglo XX y presenta un comportamiento satisfactorio a pesar del tiempo transcurrido (ver Figura 4).

Respecto a los primeros antecedentes, en grandes obras, del uso de arenas trituradas se puede citar que en la construcción del embalse El Nihuil (año 1942), Provincia de Mendoza, se utilizó una mezcla de agregados finos que contenía entre 8 y 30 % de arena triturada producida en la trituración del agregado grueso basáltico.

Los antecedentes internacionales, según Gray, respecto al uso de arenas trituradas se remonta a comienzos del Siglo XX, y la información aparece en la literatura técnica a partir de la década del '30, en trabajos realizados por C.C. Furnas, F.O. Anderegg, H.R. Fox, A.T. Goldbeck, L. Dow y otros. Una de las primeras publicaciones sobre el tema fue el NCSA Bulletin N° 10, "Stone Sand", escrito por A.T. Goldbeck en 1936. Los estudios de las propiedades básicas y funciones del agregado fino de trituración, llevan a aceptar a este material en zonas donde compiten económicamente con la arena natural. La producción de arena calcítica, según el Bureau of Mines, pasa de 229.890 toneladas en 1938 a 2.56 Mt en 1956 [15].

Uno de los principales usos iniciales de la arena triturada fue en la construcción de grandes presas [16], y como antecedente se pueden citar presas realizadas con hormigones conteniendo arenas trituradas calcíticas: Wolf Creek Dam (1943-1950), Ft. Gibson Dam, y otras con otro tipo de arena, Dalles Dam (1952-1960), y Buggs Island Dam (John Kerr Dam, 1946-1953). Además, existen otros antecedentes de obras construidas con arenas trituradas en Estados Unidos, el Ohio State University Stadium (Columbus, 1921-1922) y el Henley Street Brigde (Knoxville, Tennessee, 1930-1931) que aún siguen en servicio [17]. El estadio tiene un largo de 215 m por un ancho de 182 m. Ambas estructuras se encuentran ubicadas en una zona de clima severo según la Norma ASTM C-33 [18].

En Latinoamérica, entre 1937 y 1940 se construyó en el puerto de Castro, en el estado de Yucatán, México, un muelle de 2000 m de longitud cuyo diseño consiste en una serie de arcos soportados por pilares de hormigón simple. Los agregados grueso y fino se obtuvieron por la trituración de rocas calizas de la región. En este caso se desechó el uso de la arena de playa por su granulometría inadecuada y por el alto contenido de cloruros que poseía. Después de más de 60 años de prestación de servicio, esta obra ha mostrado un comportamiento satisfactorio [19].



Fig. 4 | **Asilo San José**
(Olavarria, 2009) (a)



Fig. 4 | **Henley Street Bridge**
Tennessee River Knoxville (b)

2.1. Usos de las Arenas Trituradas

Actualmente, el uso habitual de las arenas trituradas es el de la elaboración de morteros de albañilería, fabricación de bloques de cemento Pórtland, o como estabilizado granular de suelos en bases y sub-bases de pavimentos. En la práctica, estos usos no exigen estrictos controles de calidad sobre la arena, debido a que no tienen una gran exigencia estructural o resistente. Sin embargo, el mayor uso de las arenas trituradas se establece en su empleo en mezclas asfálticas, donde el conjunto de agregados pétreos constituyen el 90-95% en peso de las mezclas.

Por otra parte, el empleo de arenas trituradas en mezclas asfálticas y bases de pavimentos es de suma importancia ya que las propiedades físicas y mineralógicas

de los agregados afectan la capacidad de carga del pavimento. Específicamente, la forma de las partículas del agregado fino influye en las propiedades de la mezcla asfáltica tales como la estabilidad, trabajabilidad, contenido de asfalto, etc. En ese sentido, el Departamento de Transporte de Estados Unidos incluye a la angularidad del agregado fino que asegura un alto grado de fricción interna y una satisfactoria resistencia al ahuellamiento de las mezclas asfálticas [20]. En el año 2004, la Ciudad Autónoma de Buenos Aires aprobó las *Especificaciones Técnicas Generales de Mezclas Asfálticas en Caliente de Bajo Espesor para Carpetas de Rodamiento*, donde no se permite el empleo de arenas naturales en este tipo de mezclas [21].

Del análisis de la bibliografía se concluye que el uso de arenas trituradas en las mezclas asfálticas es mayor que en el hormigón de cemento Pórtland, y esto además, se manifiesta en las normativas, en los métodos de evaluación de la forma y textura superficial de las partículas de agregado fino, y en los numerosos trabajos científico/tecnológicos específicos sobre la temática.

Finalmente existen otros usos de la arena triturada como material de construcción:

- la trituración de material calcáreo no origina un subproducto dado que el mismo se emplea en su mayoría en la fabricación de cales y cementos, por lo que no es habitual su empleo en hormigones.
- cuando la roca es dolomía, el uso del subproducto de la trituración en el hormigón se ve reducido, dado que el mismo tiene un fuerte uso en la industria siderúrgica. En ella se la utiliza como fundente en el alto horno, o en la fabricación de cales, o como dolomita refractaria (calcinada a 1600 °C), o es utilizada en la fabricación de vidrio plano para mejorar la resistencia general del vidrio al ataque natural y/o químico, o en la agricultura usada como aditivo para el suelo y como materia base para los fertilizantes de magnesio, o en la industria cerámica, o como aditivo de alimentos para animales, y también, en las industrias de la pintura y química.
- otra aplicación de la arena de trituración granítica y/o del polvo originado en el aserrado y pulido de bloques graníticos es la de integrar las pastas de cerámica roja. El reemplazo de pasta cerámica por polvo granítico hasta un 50 % permite obtener cerámicas para ladrillos o revestimientos con características que verifican las especificaciones de la normalización de esos productos [22, 23].

2.2. Características y Alternativas Tecnológicas para Mejorar el Empleo de Arenas Trituradas en Hormigones

Las principales características físicas de la arena triturada para su empleo en hormigón, son formas angulares y texturas rugosas que tiene una importante influencia sobre el consumo de agua de las mezclas de hormigones y/o morteros porque las partículas se traban por tener mayores puntos de contactos que si fueran redondeadas y lisas, e indirectamente influyen sobre la relación agua/cemento (a/c). De éste modo la resistencia mecánica y la durabilidad de las estructuras pueden verse afectada. Además, contienen un porcentaje de polvo que supera los límites establecidos en nuestro país (5 %).

En el campo de la tecnología del hormigón es habitual que se presenten inconvenientes en la selección de los materiales componentes y en estos casos, casi siempre existe una alternativa tecnológica para minimizar los riesgos de daño y asegurar la vida útil de la estructura definida en el proyecto. En el caso del empleo de arenas trituradas, si el objetivo es controlar la relación a/c para que el material resultante cumpla las exigencias de resistencia mecánica y la estructura pueda resistir las acciones del medio al que estará expuesto, se puede analizar alguna de las siguientes alternativas [24, 25, 26]:

- *Mezcla de arenas*: Esta solución se puede realizar utilizando arenas naturales de bajo módulo de finura y menor costo, o de finura similar a la arena triturada. En el primer caso las partículas, de arena natural se ubicarán en los espacios que dejan las partículas de arena triturada aumentando el factor de empaque y también, reducirán la fricción interna y mejorarán la terminación superficial del hormigón. En cambio, en el segundo caso el efecto será más favorable pero el costo se incrementa significativamente.
- *Utilización de aire intencionalmente incorporado*: Otra alternativa para mejorar el comportamiento reológico del hormigón con arenas trituradas en estado fresco es la incorporación intencional de aire, donde las burbujas tienen dos efectos importantes sobre la trabajabilidad: incrementan el volumen de pasta y actúan como partículas sin fricción. Además, este tipo de aditivo mejora la consistencia del hormigón reduciendo la segregación y la exudación.
- *Empleo de aditivos reductores de agua*: Estos aditivos, y especialmente los superfluidificantes, presentan amplias ventajas para la elaboración y colocación de hormigones de diferentes tipos ante la enérgica acción plastificante que producen. Esta acción sobre el estado fresco será una ventaja también para los hormigones con arena triturada.

- *Incremento de la energía de compactación:* El empleo de una mayor energía de compactación no se puede realizar en todas las estructuras civiles, pero en el caso de los pavimentos que al carecer de armaduras, andamios y encofrados, pueden ser compactados con equipos pesados. En los hormigones compactados a rodillo la arena de trituración puede llegar a presentar ventajas competitivas. Entonces, para mezclas secas que posean una adecuada granulometría, con un bajo contenido de vacíos, la influencia de la forma y textura del agregado fino será menos significativa sobre el consumo de agua que en los hormigones de consistencia plástica o fluidos.
- *Soluciones para otros problemas:* Dentro de las problemáticas asociadas al uso de arenas trituradas se pueden encontrar, vinculadas al mayor consumo de agua o de pasta, la contracción, el contenido de finos plásticos o la presencia de mica. En este caso la solución es el lavado del material para eliminar las partículas livianas o finas.

2.3. Importancia Técnico-Económica del Empleo de Arenas Trituradas

La importancia económica de la utilización de arenas trituradas está relacionada con el bajo costo del material, la disponibilidad y el volumen de hormigón de la obra. Mayor será la importancia económica si el material puede ser empleado sin tener que efectuar el lavado u otro proceso de mejoramiento. Estos procesos implican un mayor consumo de energía y de agua que incrementarán el costo del material, perdiendo competitividad y reduciendo la zona potencial de mercado para este producto.

Hay regiones que no poseen yacimientos de arena natural, por ejemplo en la Provincia de Buenos Aires se transporta este material desde el río Paraná hacia el interior de la Provincia, por lo cual el transporte de arenas trituradas, desde puntos más cercanos podría ser una alternativa viable, desde el punto de vista económico y ambiental. El costo del hormigón está influenciado por el contenido de cemento necesario para lograr una determinada resistencia mecánica o cualquier otra propiedad especificada, el uso de aditivos, la disponibilidad de agregados adecuados y la magnitud del proceso requerido para adecuar los agregados.

El aspecto técnico se relaciona con la obtención de hormigones de calidad aceptable con un material regional, donde las partículas de arena no interfieran de modo desfavorable en la estructura porosa y no presenten reacciones deletéreas o baja resistencia mecánica. Actualmente, la disponibilidad de los aditivos de última generación produce notables mejoras en el comportamiento del hormigón.

Respecto a la producción de arenas trituradas en nuestro país, se puede mencionar que la actividad extractiva de rocas para agregados pétreos depende fuertemente del desarrollo de obras civiles, por lo cual la producción anual de estos materiales ha sido oscilante a lo largo de los últimos años, acompañando en forma alternada las etapas de crisis y los períodos de mayor actividad económica en nuestro país.

3. Contribución sobre las Propiedades de los Hormigones con Arenas Trituradas

A continuación se brindan los resultados obtenidos experimentalmente, con diferentes tipos de arenas trituradas empleadas en hormigones de cemento Pórtland, con el fin de mostrar las propiedades y la factibilidad del uso de este subproducto.

3.1. Hormigón en Estado Fresco

El empleo de arenas trituradas como único agregado fino trae aparejado, entre otros factores, los siguientes inconvenientes, que se deben tener en cuenta cuando se diseñan hormigones con este tipo de subproducto:

- *cambios en la reología de las mezclas ante la modificación de la forma y textura superficial del agregado fino*: los hormigones con arenas trituradas exigen una mayor cantidad de energía o de pasta para poder ser colocados y compactados, y la terminación resulta más áspera que en el caso de utilizar arenas naturales. El uso de aditivos superplastificante o una mezcla de arenas triturada y natural, mejoran sensiblemente este problema [24].
- *necesidad de un mayor contenido de agua y/o de pasta para obtener una trabajabilidad similar*: Experiencias realizadas con hormigones con arenas graníticas 0-4 mm y otras similares, pero de origen dolomítico, muestran un comportamiento en el estado fresco diferente a aquellos hormigones con arenas naturales. En la Tabla 3 se muestran los consumos de agua para dos tipos de arenas trituradas, dolomítica y granítica, para diferentes grados de consistencia del hormigón [25]. Los resultados muestran que la forma y textura superficial de las partículas del agregado fino tiene una fuerte influencia sobre el estado fresco de hormigones, que se manifiesta en incrementos del contenido de agua entre 25 y 32 kg/m³ respecto a

hormigones con arenas naturales (ACI 211), que depende del tipo de arena triturada empleada. Este incremento en el contenido de agua cuando el hormigón endurece se traduce en un incremento de la porosidad. También, los estudios muestran que el contenido de pasta debe ser un 28 % mayor, para disminuir la fricción entre partícula causada por el mayor número de puntos de contacto entre ellas, debido a la forma irregular y la textura superficial más áspera [26].

Tabla 3 | **Contenido de agua (kg/m³) vs. Asentamiento para hormigones con diferentes tipos de arenas**

Asentamiento (cm)	Rango de Consistencia	Hormigón elaborado con arena:		
		Dolomítica	Granítica	Natural
0 – 5.0	Seca	200-218	215	190
7.5 – 10.0	Plástica	225-230	225	205
15.0 – 17.5	Fluida	248	240	216

- *efecto sobre la acción de los aditivos químicos:* La forma y textura de las partículas del agregado fino, cuando esta formado exclusivamente con arenas trituradas, son determinantes sobre el efecto de los aditivos incorporador de aire, plastificante y superfluidificante. Las dosis recomendadas por los fabricantes son efectivas en morteros de arenas naturales, y para el caso de las arenas trituradas la eficiencia es menor, siendo necesario dosis elevadas de los mismos, pero en ningún caso se logra la fluidez o la incorporación de aire de los morteros con arena natural [24]. En estos casos es necesario efectuar pruebas y ajustes de las mezcla previos al inicio de las obras.
- *modificaciones en el fenómeno de exudación:* la exudación del hormigón está influenciada por las proporciones de las mezclas y las características de los materiales, el contenido de aire, las adiciones y los aditivos químicos y particularmente por granulometría de la arena. En consecuencia, una cantidad mínima de finos (material pulverulento, partículas menores que 300 μm) debe incorporarse al hormigón para disminuir los efectos nocivos que produce la exudación. En el caso que el 100 % de agregado fino sea arena triturada, experiencias realizadas con 0, 5, 10 15 y 20 % de polvo de roca, no plástico, muestran que las mezclas con 10 y 15 % tienen una menor exudación, manteniéndose la consistencia en el mismo rango [27].

Otros estudios donde se comparan hormigones con arenas natural y triturada muestran que a pesar del mayor contenido de agua de los hormigones con arena triturada, la presencia de polvo de roca que contienen estas arenas tiene un efecto beneficioso sobre el fenómeno de exudación.

3.2. Hormigón en Estado Endurecido

Las experiencias realizadas se basan en hormigones elaborados con arenas trituradas calcítica (caliza), dolomítica, granítica y cuarcítica, y como referencia se utilizó una arena natural. Estos hormigones se denominaron *HC*, *HD*, *HG*, *HQ* y *HN*, respectivamente. Todas las arenas tenían igual módulo de finura, y los hormigones se diseñaron con iguales proporciones, relación a/c 0.50, y con un contenido de cemento de 400 kg/m³. Las mezclas con arenas trituradas contienen aditivo superfluidificante.

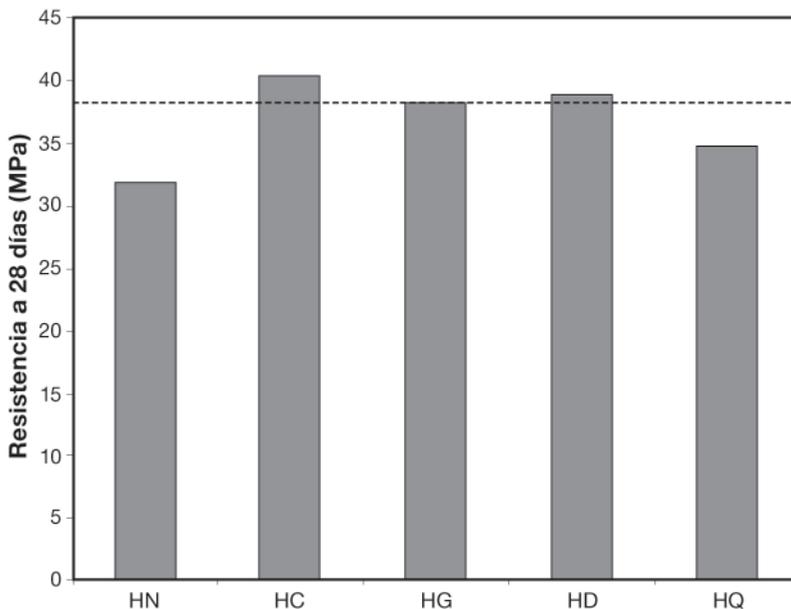


Fig. 5 | Resistencia a compresión de los hormigones a los 28 días

En la Figura 5 se informa la resistencia a compresión de los hormigones, y en la Figura 4 se establece la relación entre esta resistencia y el módulo de elasticidad a los 28 días. Por otra parte, se estudiaron los parámetros

relacionados con la durabilidad del hormigón (porosidad, absorción, velocidad y capacidad de succión capilar de acuerdo con la Norma IRAM 1871[28]). En la Tabla 4 se informan los resultados obtenidos debido que estos parámetros influyen sobre los mecanismos de transporte de sustancias agresivas al interior del hormigón.

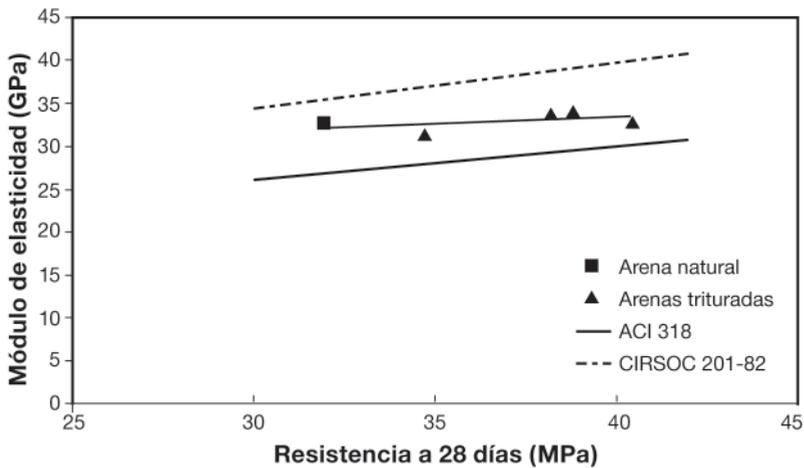


Fig. 6 | Relación entre la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad de los hormigones

Tabla 4 | Propiedades de los hormigones en estado endurecido, asociadas a la durabilidad

Mezcla	Hormigones				
	HC	HD	HG	HQ	HN
Absorción, (%)	5.75	5.82	6.16	6.03	6.10
Porosidad, (%)	13.3	13.5	14.0	13.9	13.8
Velocidad de succión, (g/m ² .s ^{0.50})	4.32	3.75	3.56	4.13	5.05
Capacidad de succión, (g/cm ²)	0.387	0.38	0.346	0.387	0.374

- Resistencia a compresión y módulo de elasticidad:

La resistencia a compresión es la propiedad más utilizada para el diseño estructural y el control de calidad en la producción de hormigones. Respecto a

los resultados obtenidos de resistencia a compresión, en la Figura 6 se puede establecer que los valores de los hormigones con arena trituradas, a los 28 días, fueron de 38 ± 3 MPa. La mezcla con arena natural tuvo un valor de resistencia a compresión más bajo, respecto a los valores medios que se obtuvieron con arenas trituradas, del 84 %. En ambos casos, la forma redondeada y la textura superficial son responsables, en parte, de este comportamiento, aunque también, la presencia del polvo de la arena puede haber modificado las características de los productos de hidratación del cemento.

El módulo de elasticidad generalmente se vincula con la resistencia a compresión, debido a que ambos parámetros son afectados por la porosidad, aunque no en igual grado. La relación entre esta resistencia y el módulo de elasticidad muestra que a pesar de la diferencia en los valores de la resistencia a compresión, todos los resultados tienden a una única curva, que se ubica entre las curvas que establecen los Reglamentos ACI 318 [29] y el CIRSOC 201-82 [30].

- Propiedades asociadas a la durabilidad:

La durabilidad del hormigón esta fuertemente relacionada con la velocidad de infiltración y el movimiento del agua a través de su estructura de poros. La succión capilar y la difusión son los principales mecanismos que controlan el transporte de materiales deletéreos, como iones cloruros y sulfatos, al interior del hormigón. Actualmente, la determinación de la succión capilar se considera como una de las herramientas prácticas más sencillas de implementar, de amplia difusión por su sensibilidad frente al cambio de la calidad del material.

La absorción de todos los hormigones fue de 6 ± 0.25 % y la porosidad estuvo comprendida en 13.7 ± 0.4 %, es decir que el tipo de arena no afectan estas variables, al mantener el contenido y calidad de pasta constante.

Como valoración de uno de los principales mecanismos de transporte de sustancias agresivas, tanto para el hormigón como para las armaduras se estudió la succión capilar. La velocidad de succión capilar de los hormigones con arenas trituradas es de 3.94 ± 0.4 g/m².s^{0.50}. El hormigón con arena natural tiene una velocidad mayor que el promedio de los hormigones con arena triturada, 28 %.

Al finalizar el ensayo la capacidad de succión de todas las mezclas es prácticamente constante, 0.35 ± 0.03 g/cm², no existiendo diferencias que se puedan atribuir al tipo de agregado fino.

4. Conclusiones

De acuerdo a los estudios y análisis realizados se puede considerar que:

- Existen un porcentaje elevado de arenas trituradas como resultado de la producción de agregados gruesos triturados que constituyen un subproducto que se acumula en las canteras, que puede ser reciclado y por otra parte, existen zonas donde no se cuenta con yacimientos de arenas naturales que cumplan los requisitos establecidos para la producción de hormigones.
- En un futuro no lejano muchos de los yacimientos de agregados naturales se agotaran o entrarán en vigencias legislaciones ambientales que limiten el uso de estos recursos naturales. La Provincia de Buenos Aires cuenta amplias zonas con yacimientos de agregados que no cumplen con requisitos que aseguren la producción de hormigones durables. De este modo, el empleo de arenas trituradas se incrementará, y es necesario contar con estudios que avalen su uso.
- El empleo de arenas de trituración con un contenido de polvo correspondiente al límite fijado por las normas IRAM (5 %), produce hormigones con una elevada capacidad y velocidad de exudación y absorción de agua, lo que provoca una disminución de la resistencia mecánica y de la durabilidad. Este comportamiento se revierte cuando el contenido de polvo presente en la arena es de 10-15 %.
- En los procesos de degradación del hormigón donde el fenómeno de succión capilar puede tener una incidencia importante, la durabilidad no se ve afectada en los hormigones con 100 % de agregado fino triturado con significativos porcentajes de polvo, respecto a la del hormigón con arena natural, siempre que se controle el contenido y calidad de la pasta de cemento. De un modo similar, la resistencia a compresión de los hormigones con arena triturada resulta superior o igual a la correspondiente al hormigón con arena natural.
- Por último, frente a la falta de disponibilidad de agregados naturales aptos, o por limitaciones ambientales que restrinjan las explotaciones en canteras, las arenas trituradas constituyen una alternativa válida para la elaboración de hormigones estructurales, resistentes y durables.

Referencias

- [1] L. Traversa, “*Empleo de Arenas de Playa en Hormigón Estructural*”, Taller “Manejo de Costas Arenosas. Aspectos Regionales, Experiencias Comparadas y Perspectivas Futuras”, San Bernardo, Argentina, del 26-28 de Octubre de 2005.
- [2] “*Bienal de Ciencia y Tecnología*”, conclusiones del Taller de Infraestructura, Vivienda y Servicios Públicos, organizada por la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, La Plata, 8 al 10 de Noviembre de 2005.
- [3] Ley de Reforma Parcial del Decreto N° 1.468, Venezuela, (2004).
- [4] M.G. Alexander, S. Mindess, “*Aggregates in Concrete*”, Modern Concrete Technology Series, Ed. Taylor & Francis (London), (2005).
- [5] P. Nigoul, G. Bengoa, R. Ferraro, “*Desarrollo Histórico y Aspectos Sociales en la Gestión Ambiental de Recursos. El caso de El Partido de La Costa - Provincia de Buenos Aires*”, VII Jornadas Interescuelas/Departamentos de Historia, Neuquén, Argentina, 22-24 de septiembre 1999.
- [6] S.A. Marfil, P.J. Maiza, “*Los Agregados Gruesos Utilizados en la Zona de Bahía Blanca (Pcia. de Buenos Aires), en Relación con la Reacción Álcali-Agregado*”, Proc. Congreso Internacional de Ingeniería Estructural y Tecnología del Hormigón (AIE-AATH), Tomo I, (1993) pp. 1-10, Córdoba, Argentina.
- [7] O. Batic, J. Sota, D. Falcone, “*Agregados de la República Argentina para Construir Estructuras de Hormigón Frente a la RAS*”, Proc. Simposio fib El Hormigón Estructural y el Transcurso del Tiempo, La Plata, Argentina, Vol. 1, (2005), pp. 217-224.
- [8] J. Rigan, “*Dolomitic Aggregates for Concrete*”, Proc. Colloque International sur les Materiaux Granulaires, Budapest, Hungrie, 9-12 october, (1978), pp. 102-107.
- [9] A. Neville, “*Tecnología del Concreto*”, Tomos 1 a 3, Ed. Limusa S.A., México, (1988).
- [10] H. Kankkunen, P. Ojanen, “*Concrete Rheology and Compaction*”, Nordic Concrete Research, Publication N° 11, (1992), pp. 100-109.
- [11] J.K. Kim, C.S. Lee, C.K. Park, S.H. Eo, “*The Fracture Characteristics of Crushed Limestone Sand Concrete*”, Cement and Concrete Research, Vol. 27, N° 11, (1997), pp. 1719-1729.

- [12] M. Westerholm, B. Lagerblad, J. Silfwerbrand, E. Forsseberg, “*Influence of Fine Aggregate Characteristics on the Rheological Properties of Mortars*”, *Cement and Concrete Composite*, 30, (2008), pp. 274-828.
- [13] I.V. Kalcheff, C. Machemehl, “*Use of Crushed Stone Screenings in Highway Construction*”, *Transportation Research Record*, 741, (1980), pp. 40-42.
- [14] Reglamento CIRSOC 201- 2005, “*Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón*”, Ed, INTI, Buenos Aires, (2005).
- [15] J.E. Gray, J.E. Bell, “*Stone Sand*”, *Engineering Bulletin* N° 13, (1964), National Crushed Stone Association.
- [16] A.T. Goldbeck, “*Crushed Stone Production*”, *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 25, N° 9, (1954), pp. 761-772.
- [17] A.T. Goldbeck, “*Stone Sand*”, *Engineering Bulletin* N° 10, National Crushed Stone Association, (1936), 42 p.
- [18] ASTM C-33, (2003), “*Standard Specification for Concrete Aggregates*”.
- [19] P. Castro Borges, A.A. Torres Acosta, E.I. Moreno, O. Tronconis, A. Knudsen, M. Martínez Madrid, “*El Muelle de Progreso a sus 60 años de Vida: un Ejemplo de Estructura Durable*”, *Colloquia 2002*, Nuevos Avances en el Estudio de la Corrosión de la Armadura, Maracaibo, Venezuela, (2002).
- [20] Instituto del Asfalto, “*Antecedentes del Diseño y Análisis de Mezclas Asfálticas de Superpave*”, *Publicación de la Federal Highway Administration* N° FHHWA SA 95.003, Departamento de Transporte de los Estados Unidos, (1996).
- [21] J.O. Agnusdei, “*Aplicaciones de los Asfaltos Modificados con Polímeros*”, *Jornada sobre Nuevos Materiales y Mezclas Asfálticas para Pavimentos*, LEMIT, La Plata, 8 de agosto de 2006.
- [22] R.R. Menezes, H.S. Ferreira, G. Neves, H.C. Ferrerira, “*Uso de Rejeitos de Granitos como Materias Primas Cerámicas*”, *Cerámica*, Vol. 48, N° 306, (2002), pp. 1-12, Sao Paulo, Brasil.
- [23] J.M.S. Moreira, M.N. Freire, J.N.F. Holanda, “*Utilização de Resíduo de Serragem de Granito Proveniente do Estado do Espírito Santo em Cerâmica Vermelha*”, *Cerâmica*, Vol. 49, N° 312, (2003), pp. 1-13, Sao Paulo, Brasil.
- [24] O.A. Cabrera, E.F. Irassar, “*Empleo de Arena Triturada en Hormigones Estructurales*”, *Proc. XXV Jornadas Sul-americanas de Engenharia Estrutural*, Porto Alegre - RS - Brasil - Tomo 4 – (1991), pp. 73-82.

- [25] O.A. Cabrera, L.P. Traversa y N.F. Ortega, “*Fluidez de Morteros Cementíceos con Arenas Machacadas*”, revista Materiales de Construcción (en prensa).
- [26] O.A. Cabrera, H.A. Donza, J. Garay, “*Ámbito de Aplicación de los Hormigones con Arena Triturada*”, Proc. Congreso Internacional de Ingeniería Estructural y de Tecnología del Hormigón - Tomo 2, Córdoba, (1993), pp. 379-392.
- [27] V.L. Bonavetti, O.A. Cabrera, E.F. Irassar, “*Influencia del Polvo de Roca Granítica sobre las Propiedades de los Hormigones*”, CONPAT, (2003), Mérida, México (publicado en CD).
- [28] IRAM 1871, “*Hormigón. Método de Ensayo para Determinar la Capacidad y la Velocidad de Succión Capilar de Agua del Hormigón Endurecido*”, (2004).
- [29] ACI Committee 318, “*Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*”, ACI Manual of Concrete Practice, Farmington Hill, USA, 2002.
- [30] Reglamento CIRSOC 201 y Anexos “*Proyecto, Cálculo y Ejecución de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado*”, Tomos 1 y 2, Ed. INTI, Buenos Aires, Argentina, (1982).

