

BENEFICIACIÓN DE ARENAS DE TRITURACIÓN MEDIANTE MÉTODOS SECOS DE CLASIFICACIÓN

Petit, H. A.; Paulo, C. I.; Cabrera, O. A.; y Irassar, E. F.

Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, CIFICEN (UNCPBA-CICPBA - CONICET), Av. Del Valle 5737, B7400JWI, Olavarría, Argentina. TE: (02284) 451055/56. hpetit@fio.unicen.edu.ar

Palabras claves: arenas trituradas, separación de materiales granulares, clasificación de partículas, subproductos minerales.

Resumen

Las arenas de trituración presentan problemas específicos para su utilización como agregado fino para el hormigón. Uno de ellos es el contenido de polvo mayor al establecido en las normativas. Actualmente, el exceso de polvo se trata mediante el lavado con agua. Este método permite obtener arena conforme pero presenta un alto consumo de agua, gran contenido de humedad en los productos y pérdida del polvo extraído en forma de lodos. El polvo representa una gran parte del costo energético de la molienda y puede ser utilizado en otros mercados. Este trabajo presenta un sistema de beneficiación de arenas de trituración capaz de reemplazar el proceso de lavado. Su principal ventaja es el uso de aire en vez de agua y la obtención del polvo extraído como un subproducto seco. El sistema de beneficiación fue puesto a prueba a escala piloto. Dos arenas diferentes fueron beneficiadas para su uso como agregado fino y dos puntos de operación del sistema fueron estudiados. El proceso de beneficiación resultó eficaz para reducir el contenido de polvo, siendo importante en zonas donde no se dispone de agua. Se obtuvieron arenas beneficiadas con un rendimiento cercano al 90% en peso de la alimentación y el polvo como subproducto seco.

1. Introducción

En la Argentina se producen actualmente alrededor de 150 millones de toneladas de piedra triturada para la construcción por año. Cerca del 60% de esta piedra se extrae de canteras de la zona pampeana. La región más importante se encuentra en la zona del centro de la provincia de Buenos Aires comprendiendo los partidos de Olavarría, Azul y Tandil. Esta zona produce más de 30 millones de toneladas de piedra triturada por año, que se comercializa en cortes de 30/50, 10/30, 6/20 y 6/12 mm. La trituración de piedra genera subproductos con tamaños de 0/3 y 0/6 mm llamados arenas de trituración o triturada. Estos sub-productos representan entre el 10% y 20% del total, si el proceso comprende trituración primaria y secundaria, y en el caso de ser necesaria una trituración terciaria, estos porcentajes se incrementan a valores del 20% al 60 % [1].

La principal aplicación de las arenas de trituración consiste en el uso como agregado fino para hormigones y concretos asfálticos. En el caso del hormigón, las arenas de trituración han ganado terreno reemplazando a las naturales obtenidas de río. La tendencia a nivel mundial sugiere un reemplazo total de arenas naturales por trituradas debido a restricciones ambientales y crecientes costos de extracción y transporte [2,3]. En Argentina esto es sólo posible en un determinado porcentaje debido al marco regulatorio vigente [4]. Otros usos de las arenas trituradas es el de la elaboración de morteros de albañilería, fabricación de bloques de cemento portland, 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.

Las arenas de trituración presentan dos problemas específicos para su utilización como agregado fino. Uno de ellos es un contenido de polvo, (partículas menores a 75 μm), mayor al establecido en las normativas [5]. El otro es la forma de las partículas. Las arenas trituradas presentan partículas angulosas y elongadas, mientras que las naturales presentan partículas redondeadas con textura superficial lisa [6,7]. Cabe aclarar que la normativa argentina es relativamente estricta en cuanto al contenido de polvo permitido, en otros países se tiene en cuenta la mineralogía del polvo o el medio de exposición, y los valores límites resultan ser mayores. Por ejemplo, el reglamento español permite el empleo de arenas trituradas calizas con porcentajes de polvo (< 63 μm) de 6, 10 y 16 %, de acuerdo a la clase de exposición a la que se encontrará sometida la obra, siendo el mayor valor permitido para aquellas obras expuestas a los ambientes generales I, IA o IB (clases no agresiva y normal con humedad alta o media, respectivamente), y que no estén sometidas a ninguna clase específica de exposición [8]. En el mismo sentido, en Sudáfrica se permite un contenido de polvo de hasta el 10 % para arenas de trituración, límite que puede ampliarse hasta el 20 % en el caso que se compruebe que el polvo no contiene arcillas deletéreas [9].

Actualmente, el exceso de polvo se trata generalmente mediante el lavado con agua. Este método permite

obtener arena conforme. Sin embargo, presenta diversos problemas como el elevado consumo de agua (1,5 y 3,5 m^3 por tonelada de arena a tratar [10]) y gran contenido de humedad en los productos. El lodo efluente es generalmente bombeado hacia reservorios naturales donde decanta naturalmente. El polvo perdido con el lodo representa una gran parte del costo energético de la molienda y puede ser utilizado en otros mercados, como por ejemplo como carga en matrices poliméricas sintéticas y naturales [11, 12, 13].

El Laboratorio de Micropartículas de la Facultad de Ingeniería de Olavarría ha desarrollado un método alternativo de beneficiación de arenas utilizando aire. La ventaja de este proceso es la de obtener dos productos: arena triturada conforme a la normativa y polvo o material fino. El sistema puede ser utilizado en sistemas de producción fijos y móviles que no tengan acceso a grandes volúmenes de agua. El sistema se basa en un clasificador de partículas diseñado específicamente para la tarea de desempolvado de arenas. El clasificador fue diseñado mediante simulación numérica de alta performance. Luego, un prototipo físico del clasificador fue construido y montado en una planta piloto de beneficiación de arenas para su evaluación.

El objetivo de este trabajo es presentar un sistema de beneficiación de arenas de trituración capaz de reemplazar el proceso convencional de lavado, orientado al uso más generalizado de este tipo de arena. Dos arenas diferentes fueron beneficiadas para su uso como agregado fino y dos puntos de operación del sistema fueron estudiados. El sistema de beneficiación fue evaluado mediante la granulometría de la arena obtenida, la obtención de polvo fino como producto secundario y la energía necesaria para llevar a cabo el proceso.

2. Metodología y materiales

2.1 Descripción de la planta de beneficiación

El núcleo central de la planta piloto de beneficiación es un desempolvador de arenas que utiliza aire para clasificar las partículas por tamaño. Dicho dispositivo es un clasificador de tipo garganta desarrollado en el Laboratorio de Micropartículas, y diseñado con el objetivo específico de extraer el exceso de polvo en arenas de trituración. Actualmente, el diseño se encuentra en vías de ser patentado.

La Figura 1 presenta la planta piloto de beneficiación de arenas de trituración. La arena es alimentada al desempolvador (Punto 1), donde se produce la extracción del exceso de polvo. Del desempolvador surgen tres corrientes de producto. El producto más grueso es arena de trituración con un contenido de polvo menor al de la alimentación. Este es considerado el producto primario del proceso y se le denomina arena tratada (AT). La AT es colectada en una tolva en la parte inferior del desempolvador (Punto 2). También es posible operar el desempolvador liberando la AT directamente a una pila a cielo abierto.

El producto secundario consiste en el material extraído de la arena de trituración. Este producto es la parte fina del proceso de desempolvado y se le denomina fino (F). Este material está compuesto en su mayoría por partículas de tamaño menor a 75 µm, aunque es posible encontrar partículas más gruesas dependiendo de la velocidad del aire dentro del desempolvador. Este producto se colecta en una tolva de colección en la parte inferior del mismo (Punto 3).



Figura1: Planta piloto de beneficiación de arenas.

El aire que clasifica las partículas sale del desempolvador por un ducto (Punto 4). A pesar de operar a bajas velocidades, acarrea parte del material extraído de la arena. El aire y las partículas que escapan del desempolvador son separados en un filtro de mangas (Punto 5). Las partículas se colectan en una tolva en la parte inferior del filtro y forman el producto terciario de la planta (Punto 6). Este producto está compuesto casi en su totalidad por partículas menores a 75 µm con una gran proporción de partículas menores a 35 µm. El tamaño medio de las partículas en este producto es menor al de F, por lo que se lo denomina ultra fino (UF). El aire limpio sale del filtro por un ducto de ventilación (Punto 7), y se dirige hacia el ventilador que proporciona la depresión necesaria para moverlo (Punto 8).

2.2 Condiciones de operación

La planta de beneficiación de arenas puede ser operada para controlar la cantidad y tamaño de partículas que el desempolvador extrae. El control del desempolvado se realiza regulando la velocidad del aire que pasa por el desempolvador. El caudal de aire y su velocidad se controlan mediante un variador de frecuencia conectado al ventilador de la planta. La energía requerida para llevar a cabo el desempolvado depende de la frecuencia de trabajo utilizada. En este trabajo se utilizaron dos condiciones de operación de trabajo distintas. Las condiciones se

obtuvieron a frecuencias de operación distintas para el ventilador. La energía consumida por la planta en cada una de las frecuencias fue medida experimentalmente. La Tabla 1 presenta las condiciones utilizadas, el caudal de alimentación de arena a la planta, la potencia requerida por la planta y el consumo energético por tonelada de alimentación. También se informa la potencia utilizada en el proceso en términos de la capacidad total instalada de la planta.

Tabla1: Condiciones de operación para la planta de beneficiación.

Condición	Frecuencia (Hz)	Potencia entregada (KW)	% potencia instalada	Alimentación (t/día)	Consumo por tonelada (KWh/t)
1	5,7	0,15	20,5	10	0,36
2	12,8	0,24	33,3	10	0,58

2.3 Evaluación del proceso de beneficiación

El proceso de beneficiación fue evaluado en términos de los productos obtenidos y el consumo energético. El peso de la alimentación y los productos fue medido para cada caso. Los rendimientos de los productos fueron calculados como un porcentaje de la arena de alimentación, definido como:

$$I_F = \frac{1 + \sum_{i=1}^{n-1} e^{-\delta_i^2}}{\sum_{i=1}^n i}$$

Donde: RPi es el rendimiento del producto i, M_{Pi} es el peso del producto obtenido y M_A el peso de la arena alimentada a la planta.

El producto AT fue caracterizado mediante el análisis granulométrico. Los tamices utilizados fueron la serie de agregados finos en vía seca (Tamiz de 9,5 mm a N°100), y los tamices N° 200 y N° 325 en vía húmeda. Se calcularon el módulo de finura, el contenido de polvo del producto primario y el peso por unidad de volumen por ensayo normalizado [14].

Este trabajo propone además la caracterización de la granulometría del agregado mediante un valor numérico definido como **índice de conformidad** (I_F). Este índice tiene en cuenta la posición relativa de cada punto de la curva acumulada pasante del agregado respecto de las curvas límites establecidas en la norma IRAM 1627 para agregados finos [15]. El índice está definido como:

$$I_F = \frac{1 + \sum_{i=1}^{n-1} e^{-\delta_i^2}}{\sum_{i=1}^n i}$$

Donde: n es el número de tamices de la serie utilizados, siendo i=1 el tamiz N° 200 (75 µm) y i=8 el tamiz de 3/8" (9,5mm). La función δ_i es una función que depende de la distancia del punto de la curva acumulada pasante para el tamiz i al punto medio dado por las restricciones de la

norma para agregados para ese mismo tamiz. La función δ_i se define como:

$$\delta_i = \frac{c_i - (a_i + b_i) / 2}{b_i - (a_i + b_i) / 2}$$

Donde: c_i es el valor de la curva acumulada pasante para el agregado en el tamiz i , a_i y b_i son los valores límites inferior y superior respectivamente establecidos por la norma IRAM para agregados finos en el tamiz i .

Para el último tamiz, $i=8$ de 9,5 mm, la función no está definida ya que las curvas A y B tienen el mismo valor. Es por esto que el numerador de la función IF establece la suma de un valor unidad para este tamiz y la sumatoria dependiente de la función para los restantes. Los valores de este índice se encuentran entre, 0 si el agregado se encuentra muy lejos de ser ideal, a 1 si la curva acumulada pasante del agregado coincide con el punto medio entre las curvas límites A y B.

Los productos F y UF obtenidos en la planta de beneficiación se caracterizaron mediante granulometría de difracción laser.

2.4 Arenas de trituración utilizadas

Dos arenas de trituración producidas en la zona de Olavarría fueron utilizadas para la evaluación de la planta de beneficiación de arenas. Una de ellas proveniente de roca dolomítica con un tamaño de partícula entre 0/6 mm (arena dolomítica - AD) y otra producida por la trituración de roca granítica entre 0/3mm (arena granítica - AG). Las curvas granulométricas de las arenas AD y AG se observan en la Figura 2 junto con las curvas límites A y B establecidas en la norma IRAM para agregados finos en hormigones [15]. Se observa que las granulometrías no se ajustan a estos límites en el rango de tamaño menor a 150 μm por el alto contenido de polvo. Algo similar ocurre en tamaños de partículas mayores. La AG se encuentra fuera de los límites en 1,18 mm mientras que la AD para las partículas mayores a 600 μm . En el caso de la AD el material resulta ser más grueso que lo especificado.

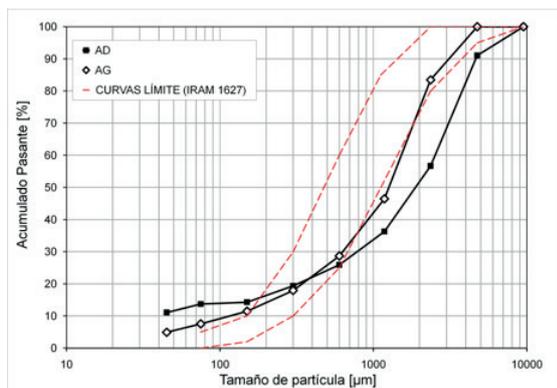


Figura 2: Granulometría de las arenas de trituración antes de la beneficiación.

Otros parámetros de caracterización para las arenas fueron obtenidos experimentalmente y se presentan en la Tabla 2. Se observa que el contenido de polvo es mayor al 5% establecido en la norma IRAM 1512 [5]. La caracterización de las arenas mediante el IF confirma lo observado en la Figura 2. Las granulometrías de las arenas tienen una gradación regular siendo la AD peor graduada que la AG.

Tabla 3: Casos de estudio.

Caso	Condición (según Tabla 1)	Tipo de arena
1	1	AD
2	1	AG
3	2	AD
4	2	AG

Luego de cada caso se pesan los productos obtenidos y se los caracteriza mediante granulometría. Para el caso del UF el gran volumen del filtro, su difícil limpieza y el bajo peso de material colectado hace que la muestra quede contaminada con material de casos anteriores. Para solucionar esto se decidió caracterizar a UF por la energía del proceso sin diferenciar el material de donde proviene. Se tomó una única muestra de UF para la condición 1 y otra para la condición 2. En cada caso la muestra consistió de una mezcla de dolomita y granito.

3. Resultados y discusión

3.1 Análisis de los rendimientos

La Figura 3 presenta los rendimientos de los productos obtenidos en la planta de beneficiación. El eje vertical se presenta en escala logarítmica para una mejor visualización de los resultados. La Figura 3a muestra los resultados para AD en ambas condiciones de operación y la 3b para AG. La línea punteada muestra el rendimiento ideal para las arenas tratadas. Este valor se obtiene eliminando el polvo de la arena cruda hasta el máximo valor permisible por la norma (5%) [5].

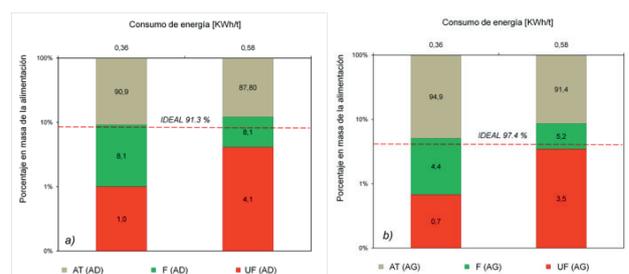


Figura 3: Rendimientos de los productos para ambas condiciones de operación: a) AD; b) AG.

disminuye levemente para la condición 2. Esto se debe a que la mayor velocidad de flujo es capaz de extraer más cantidad de material fino de la arena cruda. Para el caso de F, el rendimiento permanece constante con el aumento de la velocidad del aire. Por otra parte, los UF colectados en el filtro aumentan. Esto confirma el efecto de que una mayor energía es capaz de extraer más material de la arena cruda a pesar de que la cantidad de finos es igual. Los efectos observados para la AG en la Figura 3b son similares. El rendimiento de la AT disminuye levemente con la energía del proceso alejándolo del rendimiento ideal. En el caso de F, aumenta de manera leve. El rendimiento de UF aumenta significativamente con la mayor energía consumida.

3.2 Caracterización de arenas tratadas

Las granulometrías de las AT para cada condición se presentan en la Figura 4a para AD y 4b para AG. Se puede observar un cambio gradual en la curva de distribución con el aumento de la energía del proceso para ambas arenas.

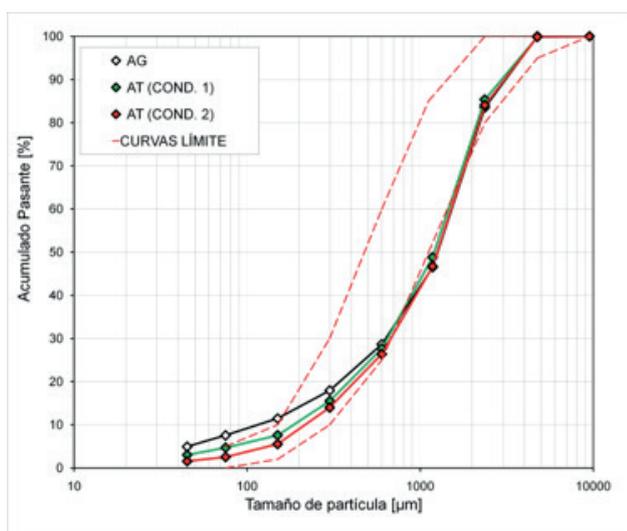
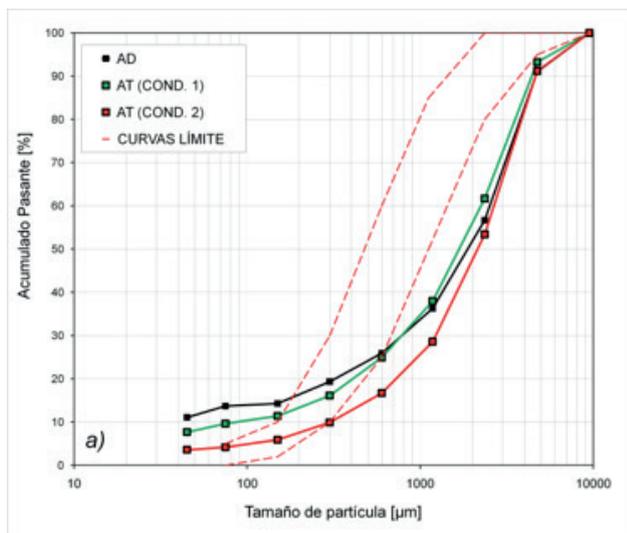


Figura 4: Curvas granulométricas de las AT, a) AD y b) AG.

Para la AD la condición 1 no alcanza a extraer la cantidad de material necesaria y la curva sigue por encima del

límite superior para tamaños de 150 µm. La cantidad de partículas de tamaños menores a 35 y 75 µm mantiene un porcentaje significativo. En cambio, la condición 2 es capaz de extraer una mayor cantidad de material fino. La curva de la AT cumple parcialmente con los límites establecidos y su contenido de partículas de tamaño menores 35 y 75 µm disminuye. Para tamaños mayores a 1,18 mm (Nº 16), la curva se mantiene por debajo de la franja granulométrica especificada a pesar del tratamiento. Para la AG la situación es similar. Sin embargo, la AG sin tratar se encuentra más cerca de cumplir los límites. La curva de la AT en ambas condiciones cumple con los límites establecidos con la excepción para tamaños de 1,18 mm (Nº 16).

La evaluación de la mejora de la curva granulométrica respecto de los límites establecidos se complementa a través del índice de conformidad. La Figura 5a presenta los resultados de las experiencias para ambas arenas en términos de este índice. Se observa que para la AD el índice muestra un crecimiento con la energía entregada al proceso. Esto indica una mejora en la curva granulométrica. Sin embargo, la curva inicial tiene un índice muy bajo debido a la mala distribución de tamaños por encima de los 600 µm (Nº 30). La planta de beneficiación puede mejorar la curva de distribución para tamaños menores, por lo que una mayor energía entregada al proceso no se verá reflejada en un mayor índice de conformidad. Para la AG el índice inicial es mayor debido a que la curva de distribución presenta mayor similitud con los límites establecidos. La extracción de polvo de esta arena hace que la curva se encuentre más cerca de los puntos medios de los límites y su índice aumente significativamente.

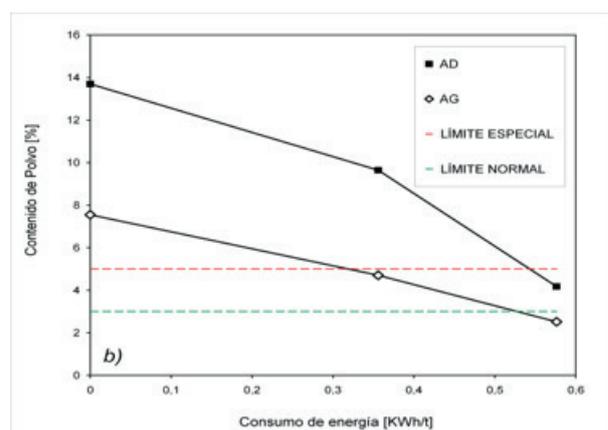
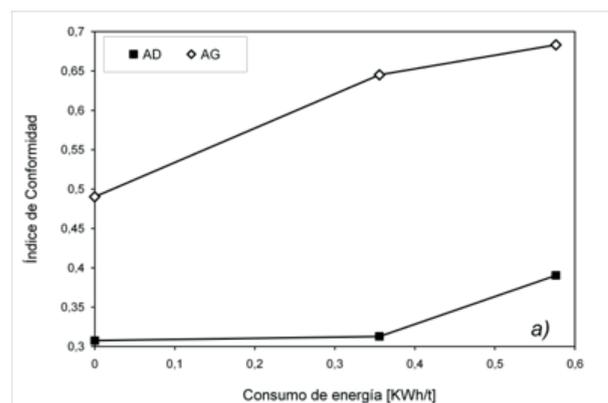


Figura 5: Relación entre el consumo de energía y el índice de conformidad (a) y el contenido de polvo (b).

La Figura 5b representa la variación del contenido de polvo con el consumo de energía para las AT, obtenidas a partir de AD y AG. Se observa una disminución de la cantidad de polvo al aumentar la energía del proceso para ambas arenas. Las líneas punteadas establecen los límites permisibles para agregados finos. Para la AG la condición 1 es suficiente para disminuir el contenido de polvo a valores permitidos. La AD tiene un contenido de polvo más alto y requiere mayor cantidad de energía para poder disminuirlo hasta valores permisibles.

-Módulo de finura y peso de la unidad de volumen

La Figura 6a presenta los resultados del módulo de finura para las arenas, el que se obtiene de la curva granulométrica y representa de algún modo el grado de finura del material. Al ir eliminando el polvo la curva del material tiende a acercarse a la curva límite más gruesa, y el módulo de finura se incrementa. La tendencia que muestra el módulo de finura con el incremento de la energía es similar a la que presenta el índice de conformidad, dado que ambos parámetros están asociados a la granulometría de la arena.

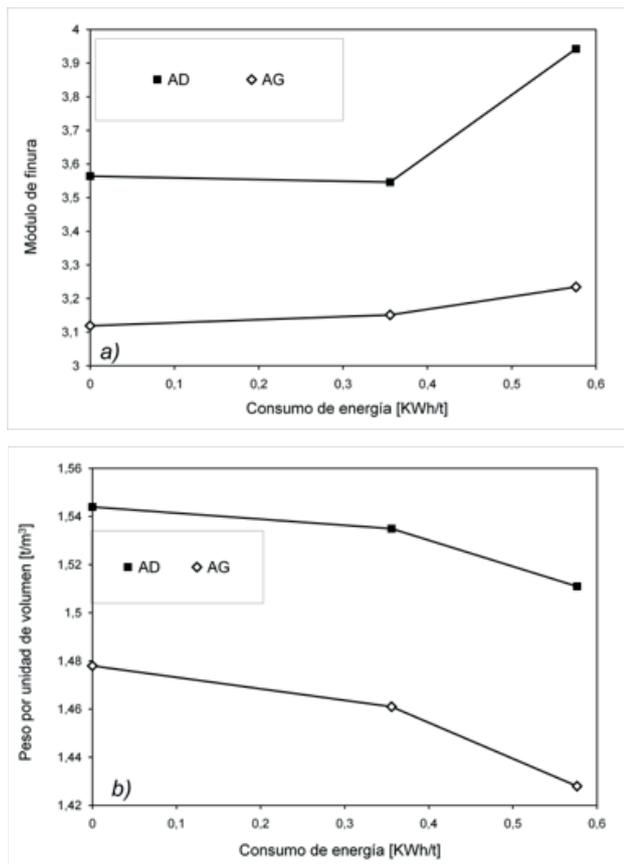


Figura 6: Relación entre el consumo de energía con el módulo de finura (a) y el PUV en estado suelto (b).

La Figura 6b presenta el peso de la unidad de volumen (PUV), el mismo depende de la densidad de las partículas, de la forma, textura superficial y distribución

granulométrica, de la humedad y de la energía de compactación empleada. Aquellas granulometrías que poseen una amplia gama de tamaños permiten obtener una mayor compactación del material granular, dejando un menor volumen para ser ocupado por la pasta de cemento. Al disminuir el contenido de finos, parte de los espacios entre partículas dejan de estar ocupados por el polvo, y por ello el PUV volumen de la arena en estado suelto, disminuye.

- Caracterización de los finos

Los resultados de la granulometrías de los productos F obtenidas por medio de un granulómetro laser se presentan en la Figura 7a para la AD y 7b para la AG. En ambos casos se observa que un leve incremento de la finura del material con el aumento de la energía del proceso. Este incremento es más significativo en la AD a pesar de su mayor densidad. Esto se puede atribuir a una mayor cantidad de polvo en la AD, un aumento de la energía puede extraer más material.

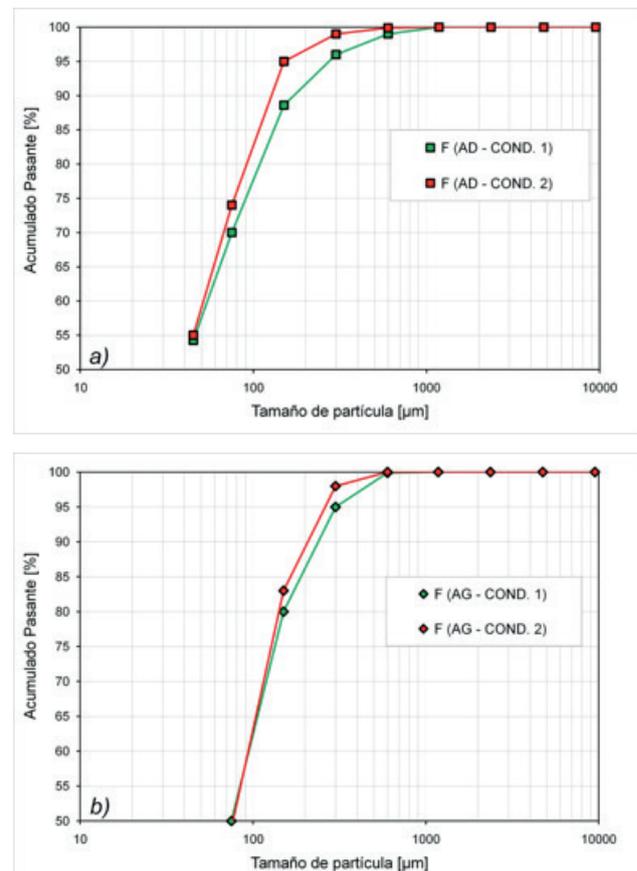


Figura 7: Granulometría láser de los productos F: a) a partir de AD; b) partir de AG.

- Caracterización de ultrafinos

La Figura 8 presenta los resultados de las granulometrías laser para los UF. El comportamiento observado es inverso al de los F. La curva de UF para la condición 1 tiene una mayor proporción de partículas de tamaño menor a 35 y 75 µm. Esto indica que partículas más grandes pudieron llegar al filtro en la condición 2. Al aumentar la energía del proceso la velocidad del aire aumenta,

pudiendo transportar partículas más grandes desde el desempolvador al filtro.

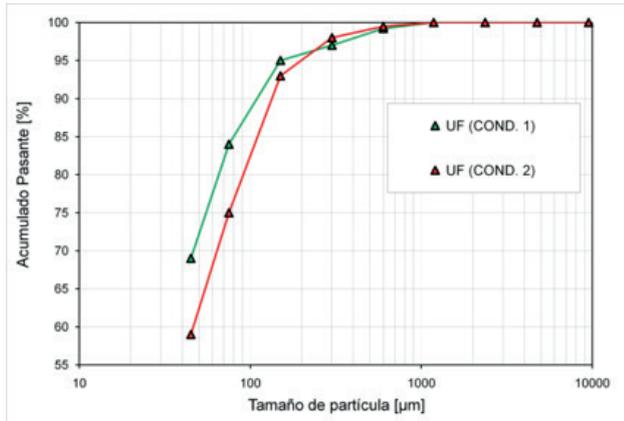


Figura 8: Granulometría láser del material UF para las condiciones de operación 1 y 2.

4. Conclusiones

Los estudios y experiencias realizadas permiten efectuar las siguientes consideraciones:

- El procedimiento de separación en seco resulta un método eficaz para reducir el contenido de polvo de las arenas de trituración, y también, para modificar parcialmente la granulometría de las mismas. Siendo un proceso importante en zonas donde no se dispone de agua.
- Dos arenas de trituración diferentes fueron beneficiadas. En ambos casos se pudo disminuir el contenido de polvo de las arenas, obteniendo arenas tratadas con un rendimiento cercano al 90% en peso de la alimentación.
- El módulo de finura, índice de conformidad propuesto y peso de la unidad de volumen de las arenas tratadas dieron resultados positivos y consistentes respecto del proceso de beneficiación.
- El proceso de beneficiación puede operarse selectivamente para tratar arenas con distintos contenidos de polvo, minimizando la energía a utilizar.
- A diferencia del proceso de lavado, se obtienen dos productos secundarios secos que pueden tener un valor agregado y no se pierden en el proceso.
- El índice de conformidad propuesto resulta ser sensible a los cambios de la granulometría dando información útil sobre la calidad del agregado para su aplicación en hormigones.

5. Referencias

- [1] I.V. Kalcheff, C. Machemehl. Use of crushed stone screenings in highway construction. Transportation Research Record, 741, 40-42, 1980.
- [2] R. Johansson & M. Evertsson. CFD simulation of a gravitational air classifier, Comput Model. 33:20-26, doi:10.1016/j.mineng.2012.01.007, 2012.
- [3] R. Cepuritis, S., Jacobsen, B. Pedersen, E. Mørtzell. Crushed sand in concrete - Effect of particle shape in

different fractions and filler properties on rheology. Cement and Concrete Composites, 71, 26-41, 2016.

[4] Reglamento CIRSOC 201-05, Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. Ed. INTI, Buenos Aires, Argentina, 482 pp., 2013.

[5] Norma IRAM 1512, Agregado fino natural para hormigón de cemento portland. 13 pp., 2006.

[6] G. Medina, I.F. Saez del Bosque, M. Frías, M.I. Sanchez de Rojas, C. Medina. Granite quarry waste as a future eco-efficient supplementary cementitious material (SCM): Scientific and technical considerations, Journal of Cleaner Production. 148, 467-476, 2017.

[7] Aditya Rana, Pawan Kalla, H.K. Verma, J.K. Mohnot. Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review. Journal of Cleaner Production, 135, 312-331, 2016.

[8] EHE - Instrucciones de hormigón estructural. Ministerio de Fomento, España, 704 pp., 2008.

[9] M.G. Alexander, S. Mindess. Aggregates in concrete, Modern Concrete Technology Series. Ed. Taylor & Francis, London, 435 pp., 2005.

[10] J.L. Bouso. Gasto mínimo de agua en el lavado de áridos. Proc. 1er. Congreso Argentino sobre Áridos, Mar del Plata, Tomo 2, 815-826, 2008.

[11] M. D. Ninago, C. I. Paulo, G. Marchetti, O. V. López, A. E. Ciolino, M. A. Villar. Caracterización estructural de metacaolín y arcilla illítica para su potencial uso como relleno de matrices poliméricas. Congreso Internacional de Metalúrgica y Materiales 16 SAM-CONAMET, 711-712, noviembre, Córdoba, Argentina, 2016.

[12] M. D. Ninago, C. I. Paulo, M. G. Passaretti, O. V. López, A. Petit, A. E. Ciolino, M. A. Villar. Separación de arenas de trituración y su efecto sobre las propiedades finales de matrices termoplásticas. XII Simposio Argentino de Polímeros (SAP2017), octubre, Córdoba, Argentina, 2017.

[13] C. Paulo, M. Ninago, A. Petit, F. Irassar, A. Ciolino, M. Villar. Separación y aprovechamiento de arenas de trituración para su potencial uso como relleno de matrices poliméricas. III Workshop de Nanoarcillas y sus Aplicaciones, noviembre, Bahía Blanca, Argentina, 2016.

[14] Norma IRAM 1548, Agregados. Determinación de la densidad a granel y de los espacios vacíos. 11 pp., 2003.

[15] Norma IRAM 1627, Agregados: granulometría de los agregados para hormigones. 23 pp., 1997.

6. Agradecimiento

Los autores agradecen a la S.P.U. del Ministerio de Educación y Deportes por el financiamiento parcial de este trabajo en el marco del programa "Universidades Agregando Valor".