

ARIDOS LIVIANOS DE CENIZAS VOLANTES PARA LA CONSTRUCCION CON HORMIGON SUSTENTABLE

FLY ASH LIGHTWEIGHT AGGREGATES FOR SUSTAINABLE CONCRETE CONSTRUCTION

Por /By Carlos Videla, Patricia Martínez

Resumen

Los áridos constituyen el principal componente volumétrico del hormigón, ocupando entre el 65% Y 75% de su volumen total. La extracción de áridos naturales ha causado considerables problemas de erosión a nivel mundial, generándose, además, un déficit de estos materiales. Para enfrentar estos problemas se han propuesto diferentes alternativas, entre ellas: tecnologías de reciclado y producción de agregados livianos. A través del uso de cenizas volantes es posible fabricar áridos artificiales para hormigón. Esta solución ofrece, adicionalmente, la posibilidad de usar un residuo industrial, cenizas volantes, generado en el proceso de producción de energía eléctrica en las centrales térmicas; ello conlleva a la mitigación del problema medioambiental derivado del manejo de dicho residuo, reduciendo los costos asociados que han preocupado por décadas a estas centrales. Ambos problemas, la escasez de recursos naturales, en este caso áridos, y el uso de residuos industriales, son temas fundamentales para el Desarrollo Sustentable, uno de los desafíos más importantes a comienzos del siglo 21. En esta investigación se usó ceniza volante Clase F, aglomerada por procesos de agitación y endurecida a través de mecanismos de “enlace en frío”. Las principales variables consideradas en el proceso de producción de áridos fueron el uso de diferentes tipos y dosis de aglomerantes y condiciones de endurecimiento a temperatura ambiente, es decir, prescindiendo de sistemas con alto consumo energético. Los resultados indican que la mejor solución, considerando las propiedades físicas y mecánicas de los áridos y criterios económicos y prácticos, corresponden a los fabricados con un 5% en peso de cemento portland puzolánico expuesto a condiciones de endurecimiento a la intemperie.

Palabras clave: agregados livianos, cenizas volantes, aglomerantes, enlace en frío, sustentabilidad.

Abstracts

Aggregates are the main volumetric component of concrete occupying between 65% to 75% of the total volume. The extraction of natural aggregates has caused world-wide erosion problems and generated a deficit of these materials. To face those problems different alternatives have been proposed: recycling technologies and production of artificial aggregates. The use of fly ash allows the production of artificial aggregates for concrete. This solution also offer the possibility of using the industrial by-products of thermoelectric plants allowing to solve the disposal problems and the associated cost that these industries have had per decades. Both problems, the shortage of natural aggregates and the use of industrial waste, are highly related to the necessity of Sustainable Development, one of the main concerns at the beginning of the XXI century. In this research class F fly ash was used, agglomerated by an agitation process and hardened by “cold bonding”. Major variables of the production process were the use of different types and contents of binders and cold bonding conditions. Results indicate that the best solution, considering aggregates physical and mechanical properties and economic and practical

criteria, corresponds to aggregates manufactured with 5% wt of Portland Pozzolan cement subjected to out-door exposure hardening.

Keywords: *lightweight aggregates, fly ash, binders, cold bonding, sustainability.*

1. INTRODUCCION

En el siglo que recién empieza, el tema del desarrollo sustentable se asoma como una materia de importancia fundamental a fin de asegurar las condiciones básicas para la subsistencia de las generaciones futuras. Con respecto a la industria de la construcción, el incremento en la demanda de recursos y los problemas ambientales asociados permiten prever que bajo dichas condiciones este sector de la economía ve seriamente amenazada su sustentabilidad en el tiempo (Mehta, 1998; Nixon, 2000).

La industria de la construcción se caracteriza por el extensivo uso del hormigón en sus obras, siendo este material un gran consumidor de materias primas, las que son necesarias para su elaboración. Lo anterior conduce a que la construcción con hormigón puede tener fuertes impactos negativos sobre el medio ambiente, dentro de éstos se tiene la extracción de áridos naturales, proceso que produce erosión y pérdida de áreas naturales (CIB, 2000). Considerando que los áridos son el principal componente volumétrico del hormigón, ocupando entre el 65% y 75% del volumen total de este material, surge la opción de producción de áridos artificiales como una alternativa atractiva para mitigar los problemas mencionados.

Dentro del campo de los áridos, existen dos opciones a considerar: áridos normales y áridos livianos, estos últimos ofrecen interesantes ventajas al hormigón, como son disminución del peso propio y mayor aislación térmica, ambas características deseables para una obra de edificación.

Los áridos livianos artificiales pueden ser fabricados con diferentes materias primas y empleando diversas tecnologías, como por ejemplo peletización de cenizas volantes (Mehta, 1986). Esta solución ofrece la posibilidad de usar un residuo industrial proveniente de las plantas termoeléctricas, permitiendo, adicionalmente, involucrar otro objetivo del Desarrollo Sustentable.

2. OBJETIVO DE LA INVESTIGACION

El objetivo de la investigación fue evaluar el proceso de fabricación de Aridos Livianos de Cenizas Volantes (CV), para futuras aplicaciones en hormigones livianos estructurales, empleando técnicas de Aglomeración en Frío que evitan el alto consumo de energía (Hwang et al, 1992; Shigetomi, 1999; Baykal, 1999).

Se analizaron los efectos del uso de diferentes tipos y contenidos de aglomerantes y de distintas condiciones de aglomeración en frío sobre las propiedades de los áridos artificiales producidos.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Cenizas Volantes y Materiales Aglomerantes

Las cenizas volantes usadas en esta investigación provienen del proceso de calcinación de carbón bituminoso o antracítico, la composición química de éstas se muestra en la Tabla 1. De acuerdo a los resultados mostrados en esta Tabla, las cenizas volantes corresponden a la Clase F según requisitos ASTM (ASTM C618-93).

El diseño de las mezclas para la fabricación de áridos consideró un 3, 5 y 7% en peso de los siguientes aglomerantes: Cal (L) y dos tipos de cemento. Estos últimos fueron un cemento Portland (P) y un cemento Portland Puzolánico con 19% de puzolana natural (PP). La Tabla 2 presenta las propiedades físicas de las cenizas y de los aglomerantes.

Tabla 1. Composición química de las cenizas volantes

| Análisis químico | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | LOI |
|----------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-----------------|------------------|-------------------|------|
| Cenizas Volantes (%) | 56,21 | 24,40 | 5,76 | 1,70 | 0,90 | 0,07 | 0,89 | 0,01 | 5,85 |

Tabla 2. Propiedades físicas de las cenizas volantes y los aglomerantes

| Material | Peso específico | Superficie específica (cm ² /g) | Finura (retenido sobre tamiz N°325, %) |
|-----------------------------|-----------------|--|--|
| Ceniza Volante | 2.155 | 4380 | 23.00 |
| Cemento Portland | 3.176 | 2860 | |
| Cemento Portland Puzolánico | 2.969 | 4500 | |
| Cal | 2.440 | | 12.00 |

3.2. Disco Peletizador

La producción de Aridos Livianos de Cenizas Volantes fue realizada empleando un disco Peletizador (“pan disc”). Este sistema logra la aglomeración de las cenizas por medio de la agitación, como muestra Figura 1. El diámetro del disco fue de 1,5 m con una profundidad de 25 cm. La velocidad de revolución fue constante e igual a 21 rpm; el ángulo de inclinación fue variable.

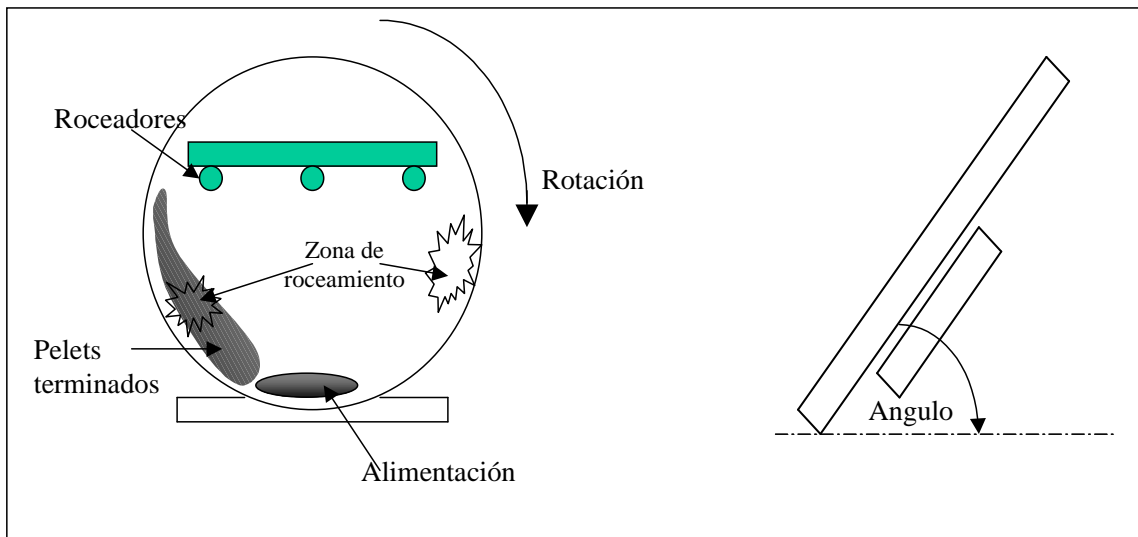


Figura 1. Diagrama disco Peletizador

3.3. Sistema de Curado y Endurecimiento

Para el endurecimiento de los áridos (o pellets) se usó una técnica de Enlace en Frío. Se consideraron tres diferentes métodos de curado a fin de evaluar el efecto del sistema de endurecimiento, o enlace en frío, sobre el desarrollo de resistencia mecánica de los áridos:

- Exposición a la intemperie (temperatura ambiente) y roceado a intervalos regulares con agua, (OD).

- Cámara húmeda a temperatura de 23 ± 2 °C y humedad relativa $\geq 90\%$, (MR).
- Bolsas selladas mantenidas a una temperatura de 23 ± 4 °C, (SB).

4. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

4.1. Cenizas Volantes

Los siguientes ensayos fueron realizados para caracterizar las cenizas volantes según la norma ASTM C618-93:

- Químicos: análisis de óxidos y pérdida por calcinación.
- Físicos: peso específico, superficie específica y finura.

Los resultados de estos ensayos son mostrados en Tablas 1 y 2. Adicionalmente, estudios de difracción de rayos X (XRD) fueron conducidos para determinar la composición mineralógica de las cenizas volantes, los resultados son presentados en Tabla 3.

Tabla 3. Composición mineralógica de las cenizas volantes (XRD)

| Nombre | Composición |
|----------------------|---|
| Cuarzo | SiO ₂ |
| Mullita | Al ₆ Si ₂ O ₁₃ |
| Sillimanita | Al ₂ SiO ₅ |
| Aluminato tricálcico | Ca ₃ Al ₂ O ₆ |
| Hematita | Fe ₂ O ₃ |

Se desarrollaron, además, dos ensayos para analizar la potencialidad y viabilidad de producir áridos de cenizas volantes, éstos son: Tiempo de Fraguado (ST) e Índice Modificado de Actividad Puzolánica (MPAI).

El objetivo del ensayo de tiempo de fraguado fue determinar, según la dosis y tipo de aglomerante, la mezcla con el menor tiempo de fraguado. Este ensayo fue realizado de acuerdo a la norma ASTM C191-99.

Por otro lado, el Índice de Actividad Puzolánica (PAI), especificado en ASTM C311-92, permite determinar la capacidad de las cenizas volantes de fijar hidróxido de calcio (Ca(OH)₂), reaccionando y produciendo el endurecimiento y desarrollo de resistencia mecánica cuando son mezcladas con cal. Debido a que nuevos aglomerantes son considerados para la fabricación de áridos, se propuso un ensayo denominado Índice Modificado de Actividad Puzolánica (MPAI) con el objeto de representar el comportamiento de las mezclas a usar. El procedimiento normalizado fue modificado en los siguientes aspectos: materiales constituyentes y proporciones de éstos, y forma y dimensión de las probetas. No se usó arena en las mezclas por no considerarse este material en la futura fabricación de áridos, los ensayos a compresión se realizaron sobre probetas cilíndricas de 50 x 100 mm. Tanto el almacenamiento de las probetas como el procedimiento de ensayo obedecieron a las especificaciones entregadas en la norma. Las mezclas de ceniza-aglomerante consideraron los siguientes contenidos de aglomerante: 3, 5 y 7% en peso de aglomerante. El requerimiento de agua de cada mezcla se determinó según procedimiento ASTM C187-98.

4.2. Áridos Livianos de Cenizas Volantes

En orden a determinar las propiedades físicas y mecánicas de los áridos, los siguientes ensayos fueron conducidos sobre los áridos de cenizas volantes fabricados:

- Valor de Trituración del Arido (ACV) según BS 812-75 (ver Figura 3)
- Peso específico, absorción y tamaño de partícula según ASTM V.402-98 (ver Tabla 4)

Se realizaron análisis de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) con el objeto de determinar el nivel de hidratación de los áridos en función del tipo de aglomerante y la edad (ver Figura 4).

5. ANALISIS DE RESULTADOS

5.1. Caracterización de Cenizas Volantes

Las Tablas 1 y 2 indican que las cenizas volantes usadas cumplen con los requisitos químicos y físicos establecidos en ASTM C618-93, éstos son:

- $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 86.37\% > 70\%$
- Pérdida por calcinación (LOI) = $5.85\% < 6.0\%$
- Finura (%retenido sobre tamiz N°325) = $23\% < 34\%$

Estos resultados permiten clasificar las cenizas como de Tipo F, es decir, ceniza con propiedades puzolánicas.

Los resultados del análisis de XRD (Tabla 3) muestran que la composición mineralógica de las cenizas presenta los principales compuestos necesarios para la formación de los productos de hidratación, como son: ettringita ($\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{32}$) y silicatos de calcio hidratados(C-S-H).

5.2. Efecto del Tipo y Dosis de Aglomerante Sobre el Comportamiento de las Mezclas de Cenizas Volantes.

La Figura 2 muestra el efecto del tipo y dosis de aglomerante sobre la actividad Puzolánica de las cenizas volantes. Se observa que, independiente del tipo de aglomerante, a mayor proporción de éste mayor es la resistencia a compresión de las mezclas de cenizas. Además, al considerar la cal como agente enlazante, se tiene que a mayor contenido de cal menor es el tiempo de fraguado, en cambio, al considerar el efecto de los cementos, el resultado indica que existe una dosis óptima para la cual se minimiza el tiempo de fraguado.

Con el fin de seleccionar la mejor mezcla para la fabricación de áridos se adoptó como variable de decisión el tiempo de fraguado, por presentar ésta mayor sensibilidad que los resultados determinados por el ensayo MPAI. Se observa que para el rango comprendido entre 3% y 7% en peso de aglomerante existe una diferencia en la medición del MPAI de aproximadamente 3 MPa para cualquier tipo de aglomerante, mientras que las diferencias arrojadas por el ensayo de tiempo de fraguado fluctúan entre un mínimo de 1 hora y un máximo de 6 horas. La mayor diferencia en los tiempos de fraguado medidos corresponde a las mezclas con cal, en cambio, las menores se presentaron al usar cemento Portland Puzolánico como agente aglomerante. Cabe destacar la gran diferencia entre los tiempos de fraguado medidos para la cal y los cementos; las mezclas con cal presentan tiempos de fraguado aproximadamente 20 hrs superiores a los medidos para los cementos.

Por lo tanto, de la Figura 2 se puede concluir que las dosis óptimas de aglomerante, de acuerdo al tipo considerado y tomando como referencia el menor tiempo de fraguado, son:

- C.V. + Cal → 7% en peso de cal (L7)
- C.V. + cemento Portland → 5% en peso de cemento Portland (P5)
- C.V. + cemento Portland Puzolánico → 5% en peso de cemento Portland Puzolánico (PP5)

Vale señalar que la mezcla correspondiente a L7 presenta de manera simultánea las condiciones ideales, es decir, a menor tiempo de fraguado mayor resistencia a compresión; sin embargo, las mezclas

fabricadas con cal presentan tiempos de fraguado excesivamente largos. Por otro lado, las mezclas indicadas como P5 y PP5 no muestran un contenido óptimo de aglomerante que cumpla simultáneamente ambas condiciones. Finalmente, los resultados sugieren que el mejor aglomerante a usar en las mezclas con cenizas volantes, desde un punto de vista técnico y económico, es el cemento Portland Puzolánico.

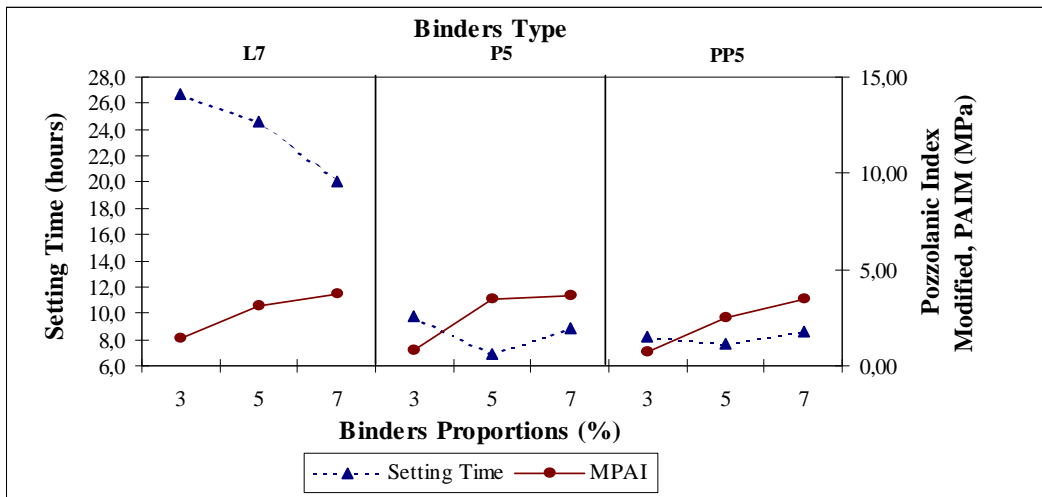


Figura 2. Tiempo de fraguado (ST) e índice modificado de actividad Puzolánica (MPAI) para las mezclas de cenizas volantes.

5.3. Efecto del Sistema de Endurecimiento Sobre las Propiedades Mecánicas de los Agregados Livianos

La Figura 3 muestra la relación entre el tipo de árido y su correspondiente resistencia mecánica (valor de trituración en porcentaje) como una función del sistema de endurecimiento. De la figura se puede concluir que el efecto del sistema de endurecimiento sobre la ganancia de resistencia depende tanto de la edad como del tipo de árido. En general, a 28 días de curado los mejores resultados se obtienen con el sistema de cámara húmeda (MR) y los más desfavorables con curado a la intemperie (OD); vale observar que a 7 días el sistema de curado tiene un efecto menos marcado sobre la ganancia de resistencia. Por otro lado, al analizar el efecto del sistema de curado con respecto a un árido en particular, se puede ver que los áridos fabricados con cemento Portland Puzolánico son los menos sensibles a las condiciones de curado, a su vez, los áridos que consideran cal como agente aglomerante son los más sensibles. Es posible observar que en todos los casos las mayores resistencias obtenidas corresponden a los áridos de tipo PP5, excepto por el comportamiento del árido L7 sujeto al sistema de endurecimiento MR durante 28 días. Resulta interesante comparar las mediciones de valor de trituración de los áridos livianos fabricados con cenizas volantes con otros agregados livianos: la piedra pómez chilena presenta un valor de trituración entre 79 y 97% y el valor correspondiente a la arcilla expandida es de 52%.

Como se mencionó anteriormente, el árido PP5 presenta el comportamiento más estable con respecto al sistema de endurecimiento considerado, y la resistencia más altas, o lo que es igual, el menor valor de trituración, independiente del tiempo de curado. Además, el tipo de aglomerante PP (cemento Portland Puzolánico) es el más económico, y el sistema de endurecimiento bajo condiciones de intemperie (OD), también presenta los menores costos y la mayor viabilidad de ser aplicado de manera práctica. Por lo tanto, tomando en consideración criterios económicos y prácticos, se concluye que el agregado tipo PP5

sometido a condiciones de endurecimiento a la intemperie, presenta el procedimiento de fabricación que ofrece las mayores ventajas.

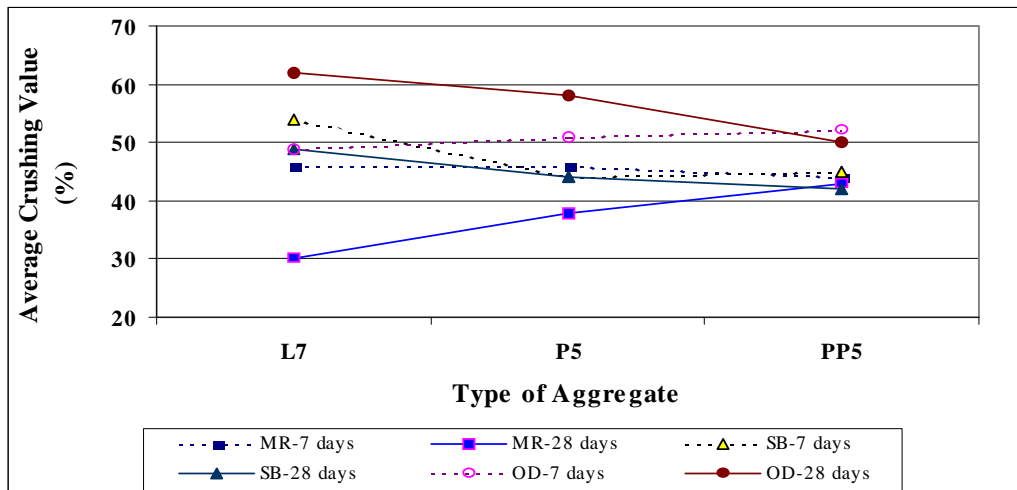


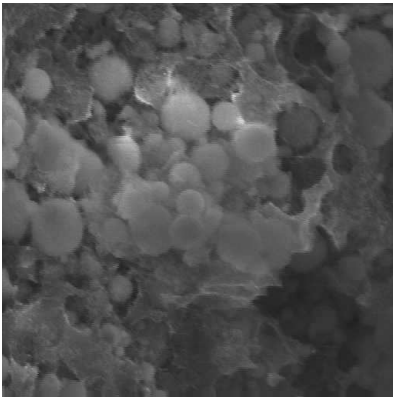
Figura 3. Relación entre tipo de árido de cenizas volantes y valor de trituración para diferentes condiciones de curado

5.4. Caracterización Física y Microscópica de los Áridos Livianos

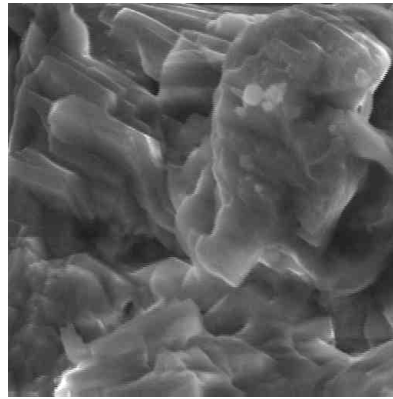
La Tabla 4 presenta las propiedades físicas de los agregados livianos de cenizas volantes. El peso específico de los áridos se encuentra en el rango comprendido entre 1,150 y 1,1274. Independiente del tipo de árido, los menores valores de peso específico se obtienen para el sistema de endurecimiento en cámara húmeda. Sin embargo, las diferencias observadas entre los diferentes tipos de áridos y sistemas de endurecimiento no son significativas, pudiendo considerarse todos los áridos como livianos. Vale señalar que el peso específico de la piedra pómez y la arcilla expandida corresponde a 0,7 y 1,0, respectivamente. Adicionalmente, los resultados de absorción de agua se encuentran entre 31 y 35%. Este valor es muy similar al presentado por otros tipos de agregados livianos, como los mencionados anteriormente. Finalmente, se realizó un análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) sobre los tipos de áridos seleccionados y sometidos al sistema de endurecimiento OD durante 7 y 28 días. El proceso de hidratación puede ser observado en Figura 4; se aprecia que a los 7 días de curado los tres áridos presentan similares estados de hidratación. Sin embargo, a los 28 días de curado el árido PP5 presenta una hidratación mucho más avanzada en relación con los otros dos tipos de áridos, presentando una estructura completamente cristalina.

Tabla 4. Propiedades físicas de los áridos livianos de cenizas volantes (TM=20 mm)

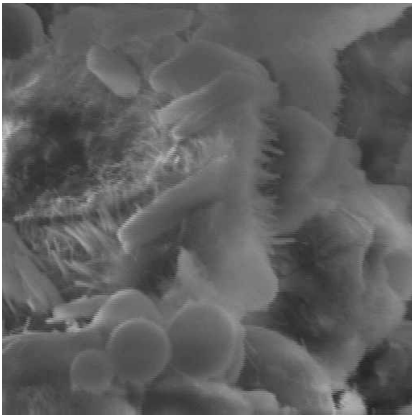
| Tipo de Arido | Sistema de Endurecimiento | Peso Específico | Absorción (%) |
|----------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------|
| L7 | MR | 1.150 | 35.0 |
| | SB | 1.230 | 31.6 |
| | OD | 1.222 | 32.5 |
| P5 | MR | 1.119 | 35.2 |
| | SB | 1.236 | 33.1 |
| | OD | 1.253 | 29.6 |
| PP5 | MR | 1.223 | 35.0 |
| | SB | 1.261 | 31.0 |
| | OD | 1.274 | 32.2 |



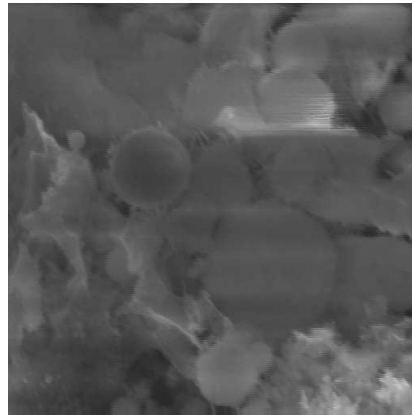
a)



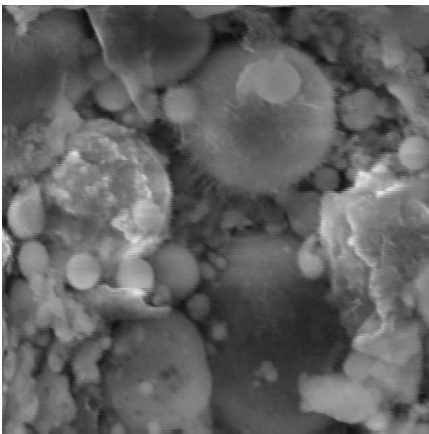
b)



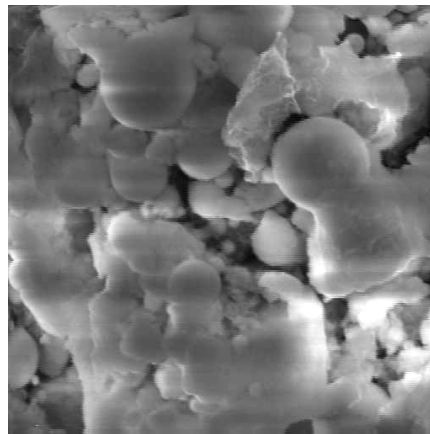
c)



d)



e)



f)

Figura 4. Micrografías SEM x 5000 de los áridos hidratados.

a) PP5 a 7 días; b) PP5 a 28 días; c) P5 a 7 días; d) P5 a 28 días;
e) L7 a 7 días; f) L7 a 28 días.

6. CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones pueden extraerse del programa experimental:

- a) Las cenizas volantes usadas en esta investigación cumplen con los requisitos ASTM C618-93, presentando un uso potencial para diferentes aplicaciones en hormigón.
- b) La aglomeración de cenizas volantes a través del método de agitación con disco Peletizador ofreció un proceso simple y efectivo para la fabricación de áridos.
- c) Las mezclas de pasta aglomeradas con cemento presentaron tiempos de fraguado del orden de 5 veces inferiores a los valores arrojados por las mezclas aglomeradas con cal. Esta es una característica muy importante a considerar ya que permite establecer que el árido puede soportar más tempranamente los requerimientos de almacenaje bajo condiciones de volúmenes a escala industrial.
- d) El ensayo de Índice Modificado de Actividad Pozolánica mostró no ser lo suficientemente sensible para discriminar entre diferentes tipos de áridos.
- e) La resistencia de los áridos livianos de cenizas volantes es afectada de diferentes maneras por el sistema de endurecimiento considerado, este efecto es más notorio para las cenizas aglomeradas con cal como por ejemplo el árido tipo L7. Los áridos fabricados con cemento Portland Pozolánico (PP5) son los menos sensibles a las condiciones de curado, no mostrando diferencias significativas en su resistencia a trituración cuando son sometidos a curado a la intemperie (OD). Además, este tipo de árido presenta la mayor velocidad de hidratación. Por tanto, se concluye que basados en criterios técnicos, económicos y prácticos, los áridos fabricados con 5% en peso de cemento Portland Pozolánico (PP5) y sometidos a un sistema de endurecimiento a la intemperie, son los que poseen la mayor viabilidad para su fabricación a escala industrial.

7. REFERENCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM (1998), Book of Standard, Volume 04.02, Concrete and Aggregates, U.S.A.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C187-98 (1998), Standard test method for normal consistency of hydraulic cement, U.S.A.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM C191-99 (1999), Standard test method for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle, U.S.A.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C311-92 (1992), Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use as a mineral admixture in portland-cement concrete, U.S.A.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C618-93 (1993), Standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concretes, U.S.A.
- BAYKAL, G. AND DOVEN, A.G. (1999), Lightweight concrete production using unsintered fly ash pellet aggregate. Proceedings: 13th International Symposium on Used and Management of Coal Combustion Products. ACAA International, January 11-15, Orlando, Florida, USA, paper 3, p.p. 1-14.
- BS 812: PART 3 (1975), Methods for sampling and testing of mineral aggregates, sand and fillers, Part 3, Mechanical properties. British Standard Institution, UK
- INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION, CIB (2000), CIB Publication 237, AGENDA 21, Green Building Challenge Chile, Julio 2000.

- HWANG, C., LIN, R., HSU, K. AND CHAN, J. (1992), Granulation of fly ash lightweight aggregate and accelerated curing technology. Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, May 1992, Istanbul, Turkey, SP132, p.p.419-438.
- METHA, K. (1998), Role of the pozzolanic and cementitious material in sustainable development of the concrete industry. Sixth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, May 31-June 5, Bangkok, Thailand, SP178, Vol.1, p.p.1-20.
- METHA, K. (1986), Concrete: Structure, properties, and materials. Ed. Prentice-Hall, USA.
- NIXON, P. (2000), Concrete: Construction material for the next millennium?. Concrete, Vol.34, N°1, p.p.20-23.
- SHIGETOMI, M., MORISHITA, N. AND KATO, M. (1999), Characteristics of high performance aggregate produced from fly ash using a rotary kiln and properties of concrete made using this aggregate. Proceedings: 13th International Symposium on Used and Management of Coal Combustion Products. ACAA International, January 11-15, Orlando, Florida, USA, paper 4, p.p. 1-10.