



Mejoramiento de un nuevo agregado sustentable artificial para el hormigón en base cenizas volantes del carbón de centrales termoeléctricas

Improvement of a new and sustainable artificial concrete aggregate derived from coal fly ash obtained from thermal power stations

Francisco Bernedo Rendel¹, alumno de 3er año
Mauricio López Casanova¹, profesor asociado

¹Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS), Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

*Autor para correspondencia: mlopez@ing.puc.cl

Francisco Bernedo Rendel¹, 3rd year student
Mauricio López Casanova¹, associate professor

¹Department of Construction Engineering and Management, Center for Sustainable Urban Development (CEDEUS), School of Engineering, Pontificia Universidad Católica de Chile.

*Corresponding author: mlopez@ing.puc.cl

RESUMEN

Los agregados pétreos naturales son cada vez más escasos para el uso en la construcción por motivos ambientales y económicos. Por otro lado, las plantas termoeléctricas a carbón producen grandes cantidades de ceniza volante como desechos. La literatura ha mostrado que a partir de cenizas volantes se pueden obtener agregados artificiales que tengan buenas cualidades para su uso en construcción. El presente estudio experimentó con distintos químicos para poder maximizar las propiedades cementicias de las cenizas volantes y así producir agregados de mejor calidad estructural. Además, se investigó el efecto de la temperatura de curado sobre la resistencia final del agregado artificial. En base a esto se implementó un diseño factorial en el que se cubrieron 8 posibles combinaciones de activadores alcalinos y temperaturas de curado. El principal objetivo del estudio fue determinar el parámetro mecánico α de cada tipo de agregado, el cual indica cuánta resistencia potencial se pierde en un hormigón debido al uso del agregado utilizado, entendiendo que el agregado posee menor resistencia mecánica que la **MATRIZ** cementicia que envuelve al agregado en un hormigón. Como resultado se obtuvo que el activador alcalino que mejor desempeño tiene es el KOH. También se encontró que el activador NaOH parece tener una concentración ideal con la que obtiene un desempeño óptimo. Por otro lado, se determinó que, en general, al curar los agregados a altas temperaturas en condiciones controladas, este tendrá un mejor desempeño que si fuera curado a temperatura ambiente. Sin embargo, también se encontró que añadir el activador alcalino Na_2SiO_3 parece reemplazar el efecto de la temperatura de curado y estabilizar el valor de α .

Palabras clave: agregados artificiales, ceniza volante, sustentabilidad, hormigón, activador alcalino.

ABSTRACT

Given the economic and ecological constrains, natural aggregates for construction are progressively less available. On the other hand, coal fired power plants generate great amounts of coal fly ash as waste product. The literature has shown that artificial aggregates, with good characteristics for their use in construction, can be obtained from these ashes. In the study herein, different chemical treatments were analyzed in order maximize the hardened properties of coal fly ash, in order to generate aggregates of improved structural quality. Furthermore, the effect of curing temperature over final aggregate strength was analyzed. To accomplish this, a factorial design was implemented, which considered 8 possible combinations of alkaline activators and curing temperatures. The main objective of the study was to measure the mechanical parameter α for every aggregate. This factor is an indicator of the potential concrete strength loss due to the use of an aggregate, assuming that the latter has lower mechanical strength than the cementitious **MATRIX** surrounding it in concrete. Results indicate that the alkaline activator with the higher performance was KOH. Furthermore, the activator NaOH seems to have an ideal concentration with an optimal performance. Additionally, it was found that, generally, curing the aggregates at controlled high temperatures improved performance in contrast with ambient curing temperature. However, it was also found that the use of the alkaline activator Na_2SiO_3 could replace the effect of high curing temperature by stabilizing the value of α .

Key words: artificial aggregates, coal fly ash, sustainability, concrete, alkaline activator.

1. INTRODUCCIÓN

Los agregados naturales están siendo cada vez más escasos y su obtención provoca grandes impactos en el medio ambiente (De Brito & Saikia, 2013). Por otra parte, las centrales termoeléctricas a carbón producen grandes cantidades de cenizas volantes que requieren ser dispuestas de manera segura para no convertirse en agentes contaminantes (Goodwin, 2014). Las cenizas volantes son residuos de carbón suficientemente finos para ser llevados por el gas que se produce en la combustión del carbón, que luego se solidifican por efecto del enfriamiento (Parra, 2015). Estas cenizas volantes se pueden trabajar mediante

1. INTRODUCTION

The availability of natural aggregates for construction is continuously decreasing and its procurement comes with great environmental costs (De Brito & Saikia, 2013). On the other hand, coal fired power plants produce large amounts of coal fly ash that require safe disposal to avoid contamination (Goodwin, 2014). Fly ashes are residues that are sufficiently fine so the gas from coal combustion can carry it away, leading to solidification when cooled down (Parra, 2015). Thus, the fly ash can be worked using a cold-bonding palletization technique so it can be used to prepare low-energy artificial sustainable aggregates,

pelletizado en frío, de tal manera que se pueden elaborar agregados artificiales sustentables que ayudan a combatir simultáneamente los problemas ambientales que ambas industrias enfrentan.

Actualmente se sabe que es posible producir hormigones con gran cantidad de cenizas volantes que alcancen una resistencia adecuada para su uso en construcción (Rivera, Martínez, Castro, & López, 2015). En esta investigación se estudiaron diversos tipos de pellets fabricados con cenizas volantes para ver cuál cuenta con mejores características para ser usado como agregado en la fabricación de hormigón. Se utilizó la metodología propuesta por Videla y Martínez, que consiste en fabricar pellets que contengan un 95% de su masa en ceniza y 5% en cemento, para facilitar la aglomeración inicial de cenizas (Videla & Martínez, 2001). El objetivo de esta investigación era ver el efecto que tienen dos factores en particular sobre la resistencia final de los pellets confeccionados. Estos factores son, por un lado, el tipo y concentración de activador alcalino utilizado para activar las propiedades cementicias de las cenizas volantes; y por otro, la temperatura de curado de los pellets fabricados. Modificando estos factores, se buscó profundizar en cómo afectan a la resistencia de los pellets, de manera de poder manipularlos y llegar la combinación óptima con que los pellets alcancen su mayor resistencia. Dado que los pellets fabricados con ceniza corresponden a un agregado más liviano que los agregados comunes, al fabricar hormigón con pellets de ceniza volante, este tendrá un **STRENGTH CEILING** (American Concrete Institute, 2014), es decir, una resistencia máxima determinada por la tensión a la que falla el agregado. Para determinar la resistencia de los pellets, se calculará el parámetro α asociado a los distintos tipos de pellets (Moreno, Martinez, & Lopez, 2014). El valor de α se puede obtener a partir de la ecuación (1).

$$f_c = f_m \cdot 10^{-\alpha \cdot V_a} \quad (1)$$

donde f_c es la resistencia del hormigón, f_m es la resistencia de la matriz y V_a es el porcentaje de volumen que ocupa el agregado. El valor de α varía entre 0 y 3,84. Si el agregado tiene α igual a 0, significa que su resistencia es igual a la de la matriz de hormigón en la que está. Si α es 3,84 entonces la resistencia del agregado es nula, como una burbuja de aire. Al conocer su valor y utilizarlo en esta misma ecuación se puede obtener una estimación de la compresión que resistirá un hormigón usando el agregado en estudio, dependiendo de la matriz que se utilice y el porcentaje de volumen de agregados que se utilice. De esta manera se puede conocer a priori el strength ceiling de un hormigón confeccionado con estos pellets.

2. METODOLOGÍA

En esta investigación se fabricaron pellets a partir de cenizas volantes obtenidas de la central termoeléctrica Ventanas, de AES GENER. Para determinar cómo afectan

which can help address the environmental issues these two industries face.

Currently, it is possible to produce concretes with large proportions of fly ash and adequate strength for their use in construction (Rivera, Martínez, Castro, & López, 2015). In this research, several types of pellets were manufactured with fly ash and were studied for their characteristics as concrete aggregates. In order to do so, the methodology proposed by Videla and Martínez (2001) was used. Briefly, it consists on fabricating pellets that contain 95% of their mass in fly ash and 5% in cement, thus facilitating the initial agglomeration of the ash material (Videla & Martínez, 2001).

The aim of this research was to study the effects of two specific factors on the final strength of the pellets. These factors were: type and concentration of the alkaline activator used to induce the cementitious properties of the fly ash; curing temperature for pellet manufacture. By altering these factors, a deeper understanding on their influence on pellet strength was sought, in order to reach an optimal combination for maximum pellet strength. Since the fly ash corresponds to a lighter material than common aggregates, by manufacturing concrete with ash pellets the resulting material should have a **STRENGTH CEILING** (maximum strength) (American Concrete Institute, 2014) determined by the stress at which the aggregate fails. In order to determine pellet strength, the parameter α will be calculated. This parameter has a different value for each type of pellet. The value of α can be obtained from equation (1).

Where f_c is the strength of concrete, f_m is the strength of the matrix and V_a is the percentage of volume occupied by the aggregate. The parameter α varies between 0 and 3.84. If an aggregate has an α value of 0, it means its strength is equal to the concrete matrix where it is embedded. If the value is 3.84, then it has null strength and acts as an air bubble. By knowing the aggregate α value, and using it in the same equation, it is possible to estimate the compressive strength that a concrete made with the studied aggregate will endure, depending on the matrix and the percentage of volume used. In this way, it is possible to know a priori the strength ceiling of a concrete made with the pellets under study.

2. METHODOLOGY

In this research, pellets were manufactured using coal fly ash from Ventanas thermal power station run by AES GENER. In order to study how different alkaline activators

los distintos activadores alcalinos y las condiciones de curado en la resistencia final de los pellets se implementó un diseño factorial en el que se consideraron 8 mezclas distintas, cuyas características se muestran en la **Figura 1**.

Los activadores alcalinos se agregaron a los pellets disolviéndolos en agua hasta alcanzar las concentraciones especificadas en la **Figura 1**. Se trabajó con una dosificación tal que para hacer 1 kg. de pellets se necesitan 0,76 kg. de ceniza, 0,04 kg. de cemento y 0,2 kg. de solución. Se fabricaron pellets con todas estas mezclas, los que luego fueron curados en ambientes controlados según correspondía a cada mezcla. Las mezclas que fueron curadas a 25°C se mantuvieron en una pieza a temperatura constante, mientras que las curadas a 60°C se dejaron en un horno que mantenía dicha temperatura y además se encontraba en presencia de humedad controlada, para evitar la evaporación del agua de los pellets producto de la temperatura ambiente. Luego de 28 días de curado se confeccionaron probetas de hormigón cilíndricas de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura. Se confeccionaron 3 probetas para cada mezcla. Estas probetas se hicieron con un hormigón con 54% de su volumen en agregado de ceniza volante, 18% en cemento y 26% en agua, suponiendo que un 2% del volumen es aire. Según esto, para fabricar 1 m³ de hormigón de estas características se utilizarían 267 kg de agua, 560 kg de cemento y 786 kg del agregado artificial. La masa necesitada de agregado artificial es aproximada ya

and curing conditions affect final pellet strength, a factorial design that considered 8 different combinations was used. **Figure 1** shows their characteristics.

The alkaline activators were added to the pellets by dissolving them in water until reaching the concentrations specified in **Figure 1**. The dosage used was such that in order to make 1 kg of pellet, 0.76 kg of fly ash, 0.04 kg of cement and 0.2 kg of activator solution were needed. Pellets were made with all the mixtures (Figure 1) and cured at the specified temperatures. For curation at 25 °C, the pellets were kept in a room at constant temperature, while the mixtures cured at 60 °C were stored in an oven with temperature and humidity control, in order to avoid water evaporation. After 28 days of curing, cylindrical concrete specimens of 5 cm in diameter and 10 cm in height were made. Three specimens were made for each mixture. These samples were made using a concrete with 54% of its volume in fly ash aggregate, 18% in cement and 26% in water, assuming the remaining 2% to be air. According to this, in order to make 1 m³ of this concrete, 267 kg of water, 560 kg of cement and 786 kg of artificial aggregate would be needed. The amount of aggregate is an approximation, since all the mixtures show slightly different densities, accounting for small variations in the final mass needed. The concrete samples were allowed to cure for 28 days and then were analyzed under compression, in order to determine their strength.

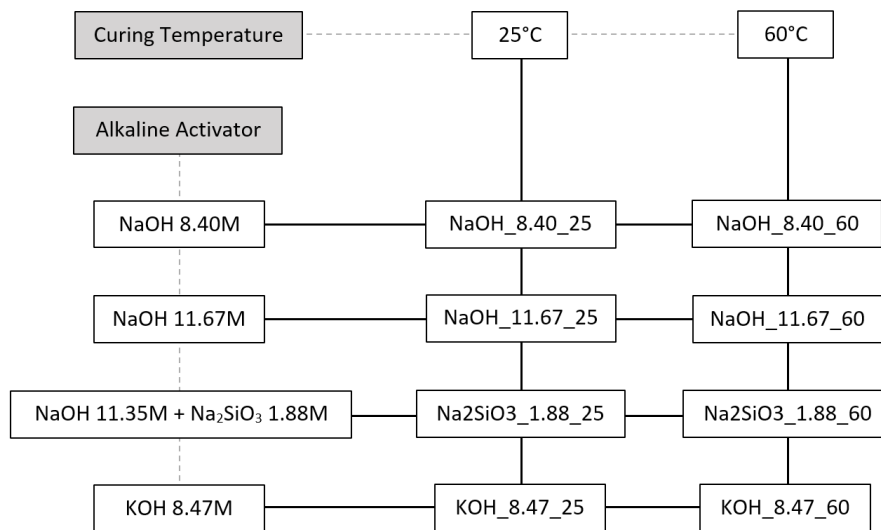


Figura 1. Características y nombre de cada mezcla estudiada. En la fila superior se especifica la temperatura de curado, mientras que la columna izquierda muestra el activador alcalino y su concentración. La intersección de ambas es el nombre que recibe la mezcla y es de la forma QUIMICO_MOL_TEMP, donde QUIMICO es el activador alcalino utilizado, MOL la molaridad con la que estaba en la solución y TEMP la temperatura de curado de los pellets.

Figure 1. Name and characteristics of the mixtures used. The upper row specifies curing temperature, while the left column shows the alkaline activator and its concentration. The intersection between rows and columns is the name for the specific mixes in the form of CHEMICAL_MOL_TEMP, where CHEMICAL is the alkaline activator used, MOL is its molarity in the used solution and TEMP is the curing temperature for the pellets.

que los distintos tipos de agregados presentan densidades distintas, pero similares, por lo que este número varía levemente entre un agregado y otro. Las probetas fueron curadas durante 28 días y después se ensayaron a compresión, de tal manera que se determinó la resistencia máxima de las probetas. Posteriormente se usaron los datos obtenidos para calcular el valor del parámetro α de cada tipo de pellet y según esto ver cómo afectan los distintos activadores alcalinos y temperaturas de curado a los agregados artificiales. Además, se analizó la viabilidad de ser utilizados como agregado complementario en un hormigón real.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se midió la resistencia a compresión de cada una de las probetas cilíndricas. A los resultados obtenidos se les aplicó el criterio de Chauvenet para descartar datos anómalos (Taylor, 1997). Se calculó el valor de α correspondiente a cada probeta y luego se promediaron los α obtenidos para cada tipo de mezcla. El valor promedio de α para cada mezcla se muestra en el **Tabla 1**, junto con la desviación estándar de las 3 probetas ensayadas por mezcla y algunos otros parámetros de interés en los agregados livianos. Estos últimos parámetros se midieron antes de usar los agregados para fabricar hormigón.

La **Tabla 1** también muestra la Estimación de Poros, que

Later, these data were used calculate the α parameter for each pellet and compare the effects of different alkaline activators and curing temperatures for the artificial aggregates. Moreover, their viability as a complementary aggregate for real concrete was analyzed.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The compressive strength was measured on each of the cylindrical concrete specimen. The Chauvenet criterion was applied to the data in order to discard anomalous results (Taylor, 1997). Then, the α parameter was calculated for each sample and the results of every replicate were averaged in order to calculate de α for each mixture. **Table 1** shows the average value, together with the standard deviation of the 3 samples analyzed per mixture. Before preparing the concrete, additional relevant parameters of the aggregates were measured and are also listed in **Table 1**.

Table 1 includes Pore Estimation, which is the percentage

Mixture	α	σ	Density SSS [kg/m ³]	Absorption [%]	Porosity estimation[%]
NaOH_8.40_25	1.26	0.02	1490	59.4	21.4
NaOH_8.40_60	1.14	0.07	1490	64.8	21.4
NaOH_11.67_25	1.66	0.08	1560	62.1	19.0
NaOH_11.67_60	1.30	0.07	1560	58.8	19.0
Na ₂ SiO ₃ _1.88_25	1.28	0.10	1420	75.3	28.4
Na ₂ SiO ₃ _1.88_60	1.23	0.23	1480	79.1	25.4
KOH_8.47_25	0.97	0.05	1460	65.4	24.9
KOH_8.47_60	1.08	0.11	1460	70.4	24.9

Tabla 1. Resumen de resultados. El valor de α es el promedio de las 3 probetas y σ es su desviación estándar. Las otras tres propiedades se midieron a los pellets antes de ser usados para preparar hormigón.

Table 1. Results summary. Average α value for the three concrete samples and their standard deviation (σ). Additional properties were measured in pellets prior to their use in concrete manufacture.

es la diferencia porcentual entre la densidad máxima teórica y la densidad en condición **SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (SSS)** de los pellets. La densidad máxima teórica se calculó ponderando las densidades de cada uno de los elementos usados para hacer los pellets según las cantidades utilizadas. Esta densidad es mayor que la densidad real ya que en ella no se considera volumen de aire. Este indicador representa la disminución de la densidad del pellet por la existencia de poros y se calculó mediante la ecuación (2).

$$E. P. = 100 \cdot \frac{D_{max} - D_{sss}}{D_{max}} \quad (2)$$

en donde D_{sss} es la densidad en condición SSS y D_{max} es la densidad máxima teórica de la mezcla para hacer pellets. En los resultados se observa que la mezcla KOH_8.47_25 es la que obtuvo un mejor resultado, ya que es la que presenta menor índice α . Además, se observa que la segunda mezcla con menor valor de α es KOH_8.47_60, es decir, la mezcla que tiene los mismos componentes que la anterior pero distinta temperatura de curado. Esto muestra que el compuesto KOH logra un mejor desempeño que los otros compuestos estudiados en la investigación.

Por otro lado, al observar los resultados obtenidos por las otras muestras, se pueden observar dos cosas. Primero, al analizar los pellets que tienen como único activador alcalino NaOH, se observa que los pellets con concentración 8,4 M tienen menor α que los con NaOH 11,67 M. La idea de usar un activador alcalino es para activar las propiedades cementicias de las cenizas volantes, por lo que de no ser usado el pellet no adquiriría tanta resistencia, lo que se vería reflejado en un α mayor. Entonces, α toma cierto valor al no usar activador alcalino, luego este disminuye al aumentar la concentración hasta 8,4 M y después aumenta al aumentar la concentración hasta 11,67 M. De esta manera se infiere que debe existir una concentración de NaOH con la que se minimice α . La segunda observación que se puede hacer es que en general los pellets que fueron curados a 60 grados presentan un menor índice α que las que fueron curadas a 25 grados. Esto ocurre en todos los casos excepto en los que se usó KOH como activador alcalino. Para ver numéricamente estas diferencias se calculó la diferencia porcentual de los α a 25 y 60°C. Esta diferencia se calculó como:

$$\%Dif. = \frac{C_{60} - C_{25}}{C_{25}} \cdot 100 \quad (3)$$

en donde C_{60} corresponde al caso curado a 60°C y C_{25} al caso curado a 25°C. Considerando sólo las cuatro mezclas que llevan NaOH como activador alcalino, se tiene que en promedio el parámetro α disminuye un 12%. Para

difference between maximum theoretical density and the **SATURATED-SURFACE-DRY (SSD)** density of the pellets. Maximum theoretical density was calculated considering the individual densities of the components used to prepare the pellets at the selected conditions. This density is higher than real density because it does not consider air volume. This indicator represents the decrease in pellet density by the presence of pores and was calculated using equation (2).

where D_{sss} is the density in SSD condition and D_{max} is the maximum theoretical density of the mix. The results indicate that KOH_8.47_25 mix had the best performance, since it showed the lower α index. Furthermore, KOH_8.47_60 was the sample with the second lowest α value, which had the same components but different curing temperature. This shows that KOH generates better performance than the other compounds studied.

On the other hand, two important observations can be drawn. First, when using NaOH as the alkaline activator, lower concentrations (8.4 M) produced lower α values. However, the reason for using alkaline activators is to stimulate the cementitious properties of the fly ash; thus, if no activator is added, then the pellet should acquire less mechanical strength, evidenced by a higher α value. In contrast, the absence of activator produces an α value which decreases when adding 8.4 M of NaOH, but increases again if more activator is added until reaching 11.67 M. This strongly suggests there is a NaOH concentration that minimizes α . The second observation is that, in general, curing the samples at 60 °C decreased the α index when comparing with samples cured at 25 °C. This occurs in every case under study, except when using KOH as alkaline activator. In order to numerically visualize these differences, the percentage difference of α values at 25 and 60 °C was calculated as:

where C_{60} corresponds to curing temperature of 60 °C and C_{25} to 25 °C. Considering only the samples with NaOH as the alkaline activator, there is an average decrease of 12% in α index by effects of temperature. For this

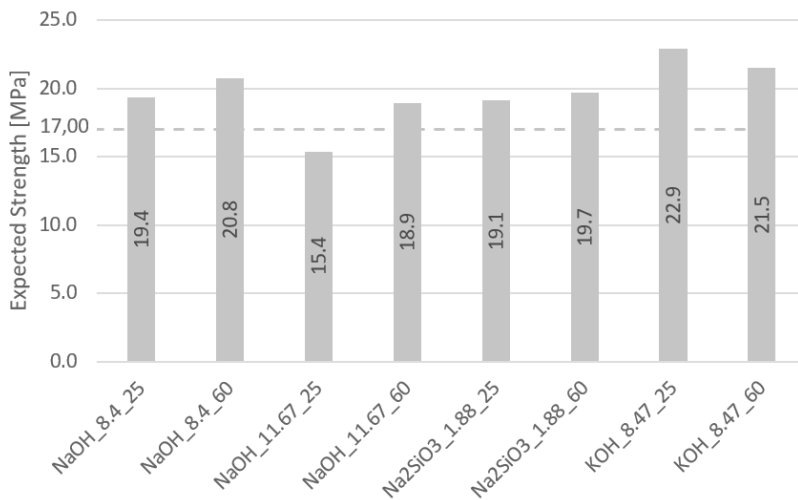


Figura 2. Resistencia esperada para un hormigón preparado con cada una de las mezclas de agregados artificiales estudiadas, calculada en base a un matriz de 40 MPa a la que se añade un 25% de volumen de agregado artificial

Figure 2. Expected strength of concrete prepared with the mixtures of artificial aggregates under study. Calculations consider a matrix of 40 MPa to which a 25% of artificial aggregate is volume.

este promedio no se consideraron las mezclas con KOH entendiéndose que, por su composición química y resultados experimentales, este puede tener un comportamiento distinto a las otras mezclas frente a las diferentes temperaturas de curado. Sin embargo, si se consideran todas las mezclas estudiadas, en promedio el valor de α disminuye un 6%. No obstante, también hay que notar que se ensayaron solamente 3 probetas por mezcla, por lo que al experimentar con estos parámetros a mayor escala estos parámetros podrían variar. Llevado a términos prácticos, esto significaría que un hormigón elaborado con pellets curados a 60°C podría tener una mayor resistencia que un hormigón hecho con los mismos pellets, pero curados a 25°C, excepto cuando se use KOH como activador. En la **Figura 2** se muestra la resistencia que se esperaría obtener de un hormigón hecho con una matriz que resiste 40 MPa (Rivera, Martínez, Castro, & López, 2015), a la que se le agrega un 25% de volumen en agregados artificiales, para cada mezcla en estudio.

Se puede observar la tendencia de que la mezcla curada a 60°C tiene mejor desempeño que la correspondiente mezcla curada a 25°C, a excepción de las mezclas KOH_8.47_XX. Aplicando la ecuación (3) sobre las resistencias de las mezclas que contienen NaOH como activador, se observa que en promedio el hormigón con agregados curados a 60°C tiene un 11% más de resistencia que el con agregados curados a 25°C. Si se consideran todas las mezclas, el promedio de la diferencia de resistencia esperado es de un 7%. Además, 7 de las 8 mezclas en estudio superan la resistencia a compresión mínima requerida en ACI318 de 17 MPa para un hormigón estructural (American Concrete Institute, 2014).

Al observar la composición química de las mezclas NaOH_11.67_XX y Na₂SiO₃_1.88_XX (**Figura 1**) se ve que la concentración de NaOH en estas mezclas es similar y que la mayor diferencia es la presencia de Na₂SiO₃ en las últimas. Al observar los valores de α obtenidos, las mezclas

calculation, the samples with KOH were not included, because the difference in chemical composition and experimental results could imply distinctive behavior to curing temperatures. However, if all the studied samples were considered, the α parameter decreased an average 6%. It is important to note that only 3 samples were probed per condition; thus, the parameters could vary when increasing sample size. Taking these data together, a concrete manufactured with pellets cured at 60 °C could be more resistant than concrete made with the same pellets cured at 25 °C, except when using KOH as activator. **Figure 2** shows the expected strength of different concretes made with a matrix that resists 40 MPa (Rivera, Martínez, Castro, & López, 2015), to which a 25% of volume is added in the form of the artificial aggregates under study.

The tendency of increased performance with higher curing temperatures can be observed, with the exception of samples KOH_8.47_XX. An average performance increase of 11% can be observed in samples cured at 60 °C when applying equation (3) to the strength of mixtures with NaOH as activator. If all the samples are considered, the average performance increase is 7%. Furthermore, 7 of the 8 samples under study surpass the minimal compression of 17 MPa required by the ACI318 for a structural concrete (American Concrete Institute, 2014).

When analyzing the chemical composition of the mixtures NaOH_11.67_XX y Na₂SiO₃_1.88_XX (**Figure 1**), it can be observed that NaOH concentration is similar between them, being the presence of Na₂SiO₃ the major difference. When comparing the obtained α values, the Na₂SiO₃_1.88_XX mixtures outperformed NaOH_11.67_XX samples at both curing temperatures. Furthermore, NaOH_11.67_XX samples show a difference in α of 0.36 with temperature, while Na₂SiO₃_1.88_XX samples only show a 0.05 variation. Considering that the major difference between these mixtures is the presence of Na₂SiO₃ as activator, it

Na₂SiO₃_1.88_XX superan a las NaOH_11.67_XX en ambas temperaturas de curado. Pero además se observa que los α de las mezclas NaOH_11.67_XX presentan entre sí una diferencia de 0,36, mientras que los α de las mezclas Na₂SiO₃_1.88_XX presentan una diferencia de 0,05. Teniendo en cuenta que la mayor diferencia entre estas mezclas es la presencia de activador Na₂SiO₃, pareciera ser que el efecto de este es de reemplazar el efecto de la temperatura de curado y estabilizar el valor de α al curar el agregado a distintas temperaturas. Sin embargo, cabe destacar que la variabilidad de la mezcla Na₂SiO₃_1.88_60 es la mayor de las mezclas estudiadas.

Para explicar por qué unas mezclas tuvieron mejor rendimiento que otras, se procedió a comparar las propiedades físicas que presentaron los pellets al momento de ser utilizados para fabricar hormigón. Las propiedades comparadas fueron la estimación de poros, la absorción, la densidad máxima teórica y la densidad del pellet. En la **Figura 3** se muestra la comparación de los valores de α versus distintas propiedades de los pellets para ver la tendencia de esta propiedad y si es que realmente explica el comportamiento de los pellets.

seems that this compound could replace the effect of curing at higher temperature by stabilizing the α index. However, Na₂SiO₃_1.88_60 samples showed the highest internal variability between replicates of all the mixtures analyzed.

In order to explain the differences in performance between samples, a comparison of the physical properties of the pellets was performed. This analysis included pore estimation, absorption, maximum theoretical density, and pellet density. In order to detect trends between physical characteristics and pellet behavior, a comparison between α indexes and aforementioned properties is shown in **Figure 3**.

In order to look for a general interpretation, and to determine which characteristic is more influential on pellet strength, all the physical properties were analyzed, disregarding pellet difference in chemical composition. However, none of the results (**Figure 3**) show a clear tendency or a predominant influence over the rest. When observing the data points on **Figure 3a**, a slight tendency in pellets with lower densities towards smaller α indexes; hence, greater strength. However, this result is counter-

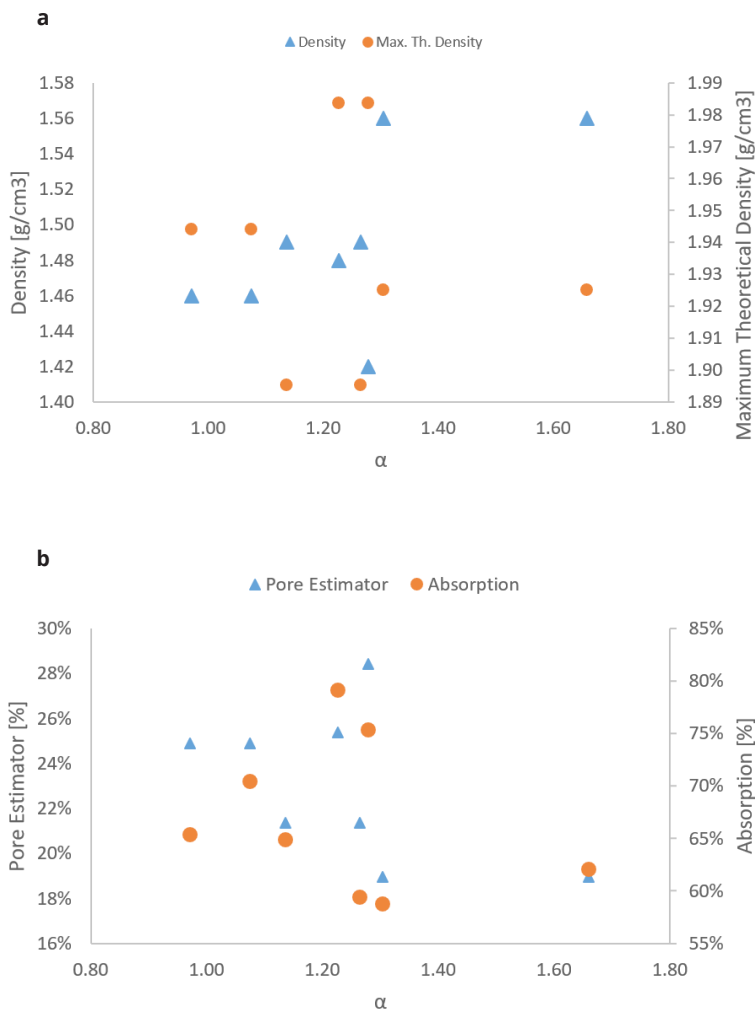


Figura 3. La Figura 3a muestra la densidad SSS y densidad máxima teórica como función de α , mientras que la Figura 3b muestra la absorción y estimación de poros también como función de α , con el fin de saber si existe correlación entre alguna de las características y el α del agregado. La única de estas características que parece presentar cierta correlación es la densidad.

Figure 3. In order to evaluate possible correlations between physical characteristics and aggregate performance, SSD density and maximum theoretical density (a), together with absorption and- pore estimation (b) are shown as a function of α . Only density appears to correlate with aggregate performance.

Se estudió la relación de todas estas características de los pellets en busca de una explicación transversal que diga cuál propiedad es predominante en cuanto a la resistencia del pellet, aunque estos tuviesen distinta composición química. Sin embargo, se observa que ninguno de los gráficos muestra claramente que un parámetro tenga directamente más influencia que los otros. Al observar los puntos de la densidad en la **Figura 3a**, se ve cierta tendencia de que mientras menor valor tenga la densidad, menor será el α del pellet, por lo tanto, mayor será su resistencia. Esto resulta contraintuitivo y va contra la idea del strength ceiling propio de los agregados en estudio. La literatura dice que los agregados de densidad normal suelen tener mayor resistencia a compresión que la de la matriz usada (Mamlouk & Zaniewski, 2011) mientras que los agregados en estudio no, lo cual es el motivo por el que existe el strength ceiling (American Concrete Institute, 2014). Por esta razón, que a menor densidad se obtenga mayor resistencia no es una buena explicación para el comportamiento de todos estos pellets en conjunto. En los gráficos de la **Figura 3b** y en el de la densidad máxima teórica en 3a no se observa ninguna tendencia clara, más bien se ve una nube difusa de puntos, por lo que estos parámetros no sirven como explicación de cómo hacer un pellet que alcance mayor resistencia. Al no haber gráficos que muestren de manera concluyente qué propiedad es la más importante en el rango de valores estudiado, se puede decir que el efecto de los distintos activadores alcalinos utilizados predomina en la resistencia del agregado, lo que deja a las otras propiedades en un segundo plano. Entonces, no es correcto explicar y comparar el comportamiento de los pellets a partir de las características físicas medidas en este estudio, sino que parece ser que la composición química de cada tipo de pellet juega un rol clave a la hora de someterlo a esfuerzos de compresión.

4. CONCLUSIONES

El objetivo de esta investigación era profundizar en los factores que ayudan a generar agregados artificiales fabricados en base a cenizas volantes que alcancen mayores resistencias. Para esto se trabajó modificando 2 factores del proceso de fabricación de pellets, el activador alcalino utilizado en la mezcla con la que se fabricaban los pellets y la temperatura a la que se curaban los pellets una vez fabricados. Teniendo en cuenta estos factores, se utilizaron 4 soluciones con activadores alcalinos, y con cada una de estas soluciones se fabricaron pellets que fueron curados a 25°C y a 60°C.

Los resultados de los ensayos de hormigones fabricados con estos pellets mostraron que el activador alcalino que mejores resultados presenta es el KOH a 8,47 M, tanto cuando es curado a 25°C ($\alpha=0,97$) como cuando es curado a 60°C ($\alpha=1,08$). Le siguen los pellets con NaOH 8,4 M, que resulta tener un comportamiento bastante mejor que aquellos con NaOH 11,67 M a ambas temperaturas de curado. En base a esto se puede concluir que debe existir

intuitive and opposes the idea of strength ceiling of the aggregates under study. Literature indicates that aggregates with normal densities tend to display greater strength to compression than the used matrix for concrete manufacture (Mamlouk & Zaniewski, 2011). This is not what was observed with the aggregates under study, which is the reason why strength ceiling exists (American Concrete Institute, 2014). Thus, increased strength at lower densities is not a good explanation for the behavior of the pellets under study. Data in **Figure 3** does not suggest a clear tendency, rather it shows data dispersion; thus, this results do not explain properly how the pellets reach different strengths. Since no unique property found to explain the differences in performance, it is safe to conclude that the effects of the alkaline activators are predominant over the physical characteristics of the pellets. Thus, comparing pellet performance to their physical features seems less relevant. Most probably, chemical differences between the pellets play key roles under compression stresses.

4. CONCLUSIONS

The objective of this research was to deepen the understanding of the factors that contribute to the improvement of mechanical strength of artificial aggregates made from coal fly ash. In order to do this, 2 major factors were modified in the process of pellet manufacture, namely the alkaline activators and the curing temperatures used. Considering these factors, 4 alkaline activator solutions were used to make pellets that were cured at either 25 or 60 °C.

The results from the concrete probes made with these pellets indicate that the best alkaline activator was KOH at 8.47 M when cured at 25°C ($\alpha=0.97$) and also at 60°C ($\alpha=1.08$). Then, pellets made with NaOH 8.4 M follow in strength, which, surprisingly, showed better performance than pellets made with NaOH 11.67 M at both curing temperatures. These results suggest that there should be an ideal NaOH concentration that minimizes α values.

Additionally, a strong tendency towards better performance

una concentración ideal en que se logre un α mínimo al usar NaOH como activador alcalino.

También se observa una tendencia de que los pellets curados a 60°C presentan un comportamiento notoriamente mejor que los curados a 25°C, a excepción del caso en que el activador alcalino es KOH, en que ocurre lo contrario. En esta experimentación, promedio α disminuyó un 6% cuando se pasa de una mezcla curada a 25°C a la misma mezcla curada a 60°C, pero por el número limitado de probetas ensayadas, se espera que este valor sea un primer indicador del comportamiento que tendrían los pellets en experimentos a mayor escala. Por último, los pellets activados con la solución que contenía NaOH 11,35 M y Na₂SiO₃ 1,88 M presentan resultados muy similares en ambas temperaturas de curado y que además son levemente mejores que los de los pellets con NaOH 11,67 M. Teniendo esto en cuenta, el mayor efecto que parece tener la adición de Na₂SiO₃ es de disminuir el efecto que tiene la temperatura sobre α , es decir, estabiliza su valor.

En cuanto al uso que pueden tener estos materiales, 7 de las 8 mezclas pueden superar los 17 MPa al ocupar un 25% del volumen del hormigón, con lo que se muestra que pueden alcanzar resistencias adecuadas para ser utilizados en construcción.

Para futuras investigaciones se propone estudiar los enlaces químicos producidos por el activador KOH y por qué estos obtienen mejores resultados que los de NaOH. También se propone estudiar el efecto de variar las concentraciones de KOH. De la misma manera, se propone estudiar la concentración ideal de activador alcalino NaOH con la cual se minimice el valor de α . Además, se puede adicionar Na₂SiO₃ en distintas concentraciones, buscando optimizar el efecto que este tiene.

Por otro lado, como se mostró que la temperatura de curado tiene grandes efectos sobre el valor de α , se propone también experimentar con distintas temperaturas de curado, buscando alguna que sea suficientemente buena en relación a la resistencia ganada versus gasto energético incurrido, de manera de lograr un agregado artificial más sustentable y que al mismo tiempo pueda ser usado comercialmente con fines estructurales en el rubro de la construcción.

Agradecimientos

Esta investigación fue realizada gracias al aporte financiero del proyecto FONDECYT #1150251 y AES GENER. También se agradece a Felipe Vargas, Mauricio Guerra y Luis González por sus aportes en las fases de investigación y experimentación de este estudio.

was observed in pellets cured at 60 °C over 25 °C. The only exception to this rule was the case of KOH, which showed the opposite behavior. In general, α values dropped an average 6% when the pellets were cured at 25 °C. However, considering the limited number of probes tested, this value is expected to be an initial indicator of temperature influence when analyzed at larger scales.

Lastly, pellets activated with NaOH 11.35 M and Na₂SiO₃ 1,88 M solutions show very similar results at both curing temperatures. Additionally, both conditions slightly outperformed the pellets with NaOH 11.67 M. Considering this, the addition of Na₂SiO₃ seems to diminish the positive effect of temperature on α values; thus, stabilizing it.

In respect to the potential use of these materials 7 out of the 8 formulations under study overcome the 17 MPa of compressive strength required for structural concrete if used at 25% of the total concrete volume, making the suitable use in construction concrete.

Future research should address the chemical bonds induced by the KOH activator and why these pellets show better performance than the ones treated with NaOH. Also, different concentrations of KOH should be tested. Likewise, different concentrations of the alkaline activator NaOH should be studied in order to determine the one that minimizes α values. Moreover, different concentrations of Na₂SiO₃ could be added in order to further improve the strength effects.

On the other hand, since temperature showed to have large effects on α values, different curing temperatures should be analyzed in order to find a good relation between gained strength and energy cost. In this way, a more sustainable aggregate with commercial use in construction could be found.

Acknowledgements

This research was done with the financial support of the FONDECYT project #1150251 and AES GENER. Special thanks to Felipe Vargas, Mauricio Guerra and Luis González for their help in the initial research phases of this study.

GLOSARIO

MATRIZ: Es un hormigón formado por una mezcla de cemento, agua y agregados naturales. A este hormigón se le agrega el agregado en estudio. La matriz por sí sola tiene una cierta resistencia que se verá disminuida por la adición del agregado artificial de ceniza volante.

SSS: Condición en que el agregado estuvo sumergido en agua durante un tiempo suficiente tal que todos sus poros superficiales se encuentren llenos de agua. Este tiempo pueden ser 24 o 72 horas dependiendo de si se trata de un agregado normal o poroso. Luego se procede a secar la superficie (con ventilador o toalla) de tal manera que a la vista la superficie parece seca, pero todos los poros siguen estando saturados.

STRENGTH CEILING: Es el valor límite (en compresión y tracción), sobre el cual la resistencia de la matriz deja de ser el factor que controla la resistencia del hormigón. Un hormigón está cercano a este valor cuando al variar la relación agua-cemento, su resistencia máxima varía de manera mínima. En el caso de esta investigación, una vez llegado a este punto, el factor que controla la resistencia del hormigón pasa a ser la resistencia del agregado utilizado.

GLOSSARY

MATRIX: concrete made by a mixture of cement, water and natural aggregates. The aggregates under study were incorporated to this concrete. The matrix has an intrinsic strength that will be decreased by the addition of the artificial fly ash aggregate.

SSD: saturated surface dry condition in which the aggregate was submerged under water for a period of time that ensures all the superficial pores to be filled with water. This time can vary between 24 to 72 h, depending of material porosity. Then, the surface of the material is dried (under a fan or with a towel) in a way that all the pores appear to be dry but are still saturated with water.

STRENGTH CEILING: maximum value (on compression and tension) at which matrix strength ceases to be the controlling factor of concrete strength. A concrete is close to this value when variations in the water-cement proportions only generates small variations in the strength. In the case of this research, once this point is reached, the governing factor for concrete strength becomes the strength of the aggregates.

PRINCIPIO CIENTÍFICO

Las cenizas volantes tienen un componente vítreo que al ser mezclado con un componente alcalino forma un material con propiedades cementicias (Férrandez-Jiménez, Palomo, & Criado, 2006). Este proceso químico es llamado activación alcalina de las cenizas volantes. Estos mismos autores señalan que el tipo de activador y su concentración afectan en las características del producto final. En esta investigación se trabajó con 4 activadores alcalinos distintos con el fin de ver cuál optimizaba las propiedades cementicias de las cenizas.

Otro parámetro que afecta la resistencia final son las condiciones de curado. El curado de los pellets se refiere a mantener los pellets recién fabricados a una temperatura y humedad controlada durante un tiempo suficiente para que se desarrollen las reacciones químicas y adquieran resistencia, en este caso 28 días. En la investigación se experimentó con 2 temperaturas de curado distintas y 100% de humedad relativa para comprobar cuál era más favorable para la resistencia final de los pellets fabricados.

SCIENTIFIC PRINCIPLE

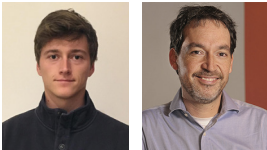
Coal fly ash has a vitreous component that makes a material with cementitious properties if mixed with an alkaline activator (Férrandez-Jiménez, Palomo, & Criado, 2006). This chemical process is called alkaline activation of coal fly ash. The same authors indicate that the type and amount of the activator used can affect the final characteristics of the product. In this research, 4 alkaline activators were tested to seek for optimization in the cementitious properties of fly ash.

Another factor that affects final strength is the curing temperature. Pellet curing refers to the process of keeping the recently made pellets under controlled temperature and humidity for enough time, in order to ensure chemical and physical transformation and strength gain. In this case, this time was 28 days. In this research, 2 curing temperatures, with 100% relative humidity, were assessed in order to find the most favorable conditions for final strength of the pellets.

REFERENCES

- American Concrete Institute. (2014). 318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (2014). Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete (ACI213R-14). Farmington Hills: American Concrete Institute.
- de Brito, J., & Saikia, N. (2013). *Recycled Aggregate in Concrete*. Springer-Verlag London.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., & Criado, M. (2006). Activación alcalina de cenizas volantes. Estudio comparativo entre activadores sódicos y potásicos. *Revista de Materiales de Construcción*, 51-65.
- Goodwin, R. W. (2014). *Combustion Ash Residue Management: An Engineering Perspective*. Oxford: Elsevier Inc.
- Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. P. (2011). *Materials for Civil and Construction Engineers*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Moreno, D., Martínez, P., & Lopez, M. (2014). Practical Approach for Assessing Lightweight Aggregate. *ACI Materials Journal*, 123-132.
- Parra, F. (2015). Estudio experimental sobre la eficiencia de una ceniza volante como adición inhibidora del fenómeno expansivo por formación de etringita retardada (DEF) en el hormigón. Santiago: Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile.
- Ries, J., & Holm, T. (2004). A approach to sustainability for the concrete community. Lightweight concrete-two millennia of proven performance. Retrieved from http://www.escsi.org/uploadedFiles/Technical_Docs/General_Information/7700.1%20A%20Holistic%20Approach%20to%20Sustainability%20for%20the%20Concrete%20Community.pdf
- Rivera, F., Martínez, P., Castro, J., & López, M. (2015). Massive volume fly-ash concrete: A more sustainable material with fly ash replacing cement and aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 104-112.
- Taylor, J. R. (1997). *An Introduction to Error Analysis The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. Sausalito: University Science Books.
- Videla, C., & Martínez, P. (2001). Fly ash lightweight aggregates for sustainable concrete construction. *Revista Ingeniería de la Construcción*, 1-11.

EQUIPO DE INVESTIGADORES / RESEARCH TEAM



Francisco
Bernedo

Mauricio
López