



**UNIVERSIDAD DE LEÓN**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA AGRARIA Y FORESTAL**

**TRABAJO FIN DE GRADO**  
**GRADO EN INGENIERÍA AGRARIA**

**ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE**  
**HORMIGONES Y MORTEROS**  
**GEOPOLIMÉRICOS**

***ANALYSIS OF PROPERTIES OF CONCRETES***  
***AND GEOPOLYMERIC MORTARS***

**Alumno:** Carlos Rodríguez Antuña

**Tutor:** Andrés Juan Valdés  
**Colaborador:** Daniel Merino Maldonado

León, julio 2023

## HOJA DE COMPROBACIÓN DE DOCUMENTOS

**Título:** Análisis de las Propiedades de Hormigones y Morteros Geopoliméricos

**Autor:** Carlos Rodríguez Antuña

### ELEMENTOS DE OBLIGADA APARICIÓN

- Resumen.** De 400 palabras como máximo.
- Introducción.** Debe incluir los motivos por los que se realiza el trabajo y los antecedentes o estudios previos sobre el mismo.
- Objetivos.** Se detallarán de forma clara y concisa los objetivos que se pretenden alcanzar.
- Material y Métodos / Metodología.** Descripción de las técnicas, los materiales empleados, y los métodos de análisis de datos, de forma que se garantice la repetibilidad de los mismos.
- Resultados / Análisis / Diagnóstico.** La información obtenida con el estudio se presentará de forma sistemática, preferentemente mediante tablas y figuras que deberán ser en todo caso autoexplicativas, y deberán aparecer debidamente numeradas y referenciadas en un índice propio.
- Discusión.** Los resultados propios del trabajo deberán ser discutidos relacionándolos, en su caso, con otros de estudios precedentes.
- Conclusiones.** Deberán ser claras, concisas, y coherentes con los objetivos propuestos. En el caso planes de ordenación de recursos forestales, propuestas concretas con objetivos, líneas y medidas.
- Planos / Mapas.** Serán obligatorios en trabajos topográficos, estudios de implantación de cultivos o transformaciones de explotaciones, y en general, cualquier trabajo técnico o científico asociado a áreas, parcelas, o territorios determinados.
- Bibliografía.** Listado de las fuentes de información utilizadas debidamente referenciadas y ordenadas.

	El tutor:	El colaborador:
REALIZADA LA COMPROBACIÓN  <input checked="" type="checkbox"/>		
	León, fecha de la firma electrónica	León, fecha de la firma electrónica

## RESUMEN

Los geopolímeros se obtienen a partir de una reacción química de geopolimerización, que consiste en la activación alcalina (solución acuosa de hidróxido y silicato sódicos) de subproductos industriales o agrícolas ricos en sílice y en alúmina, con el fin de obtener un material aglomerante que contribuya a mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> y, por tanto, la huella de carbono. El propósito es el de implantar un modelo productivo basado en la economía circular.

La metodología seguida para elaborar este Trabajo Fin de Grado ha consistido en efectuar una búsqueda, acotada a los años comprendidos entre el 2.012 y el 2.022, de artículos científicos en la *Web of Science*. Se obtuvieron 1.144 artículos científicos en relación con hormigones geopoliméricos, de los que se ha realizado una revisión bibliográfica a 22, y 430 artículos científicos en relación con morteros geopoliméricos, de los que se ha revisado bibliográficamente 1.

Los resultados obtenidos tras efectuar un análisis estadístico, mediante la hoja de cálculo *Microsoft Excel*, a las propiedades de 489 dosificaciones de hormigones y morteros geopoliméricos, permiten concluir que los materiales geopoliméricos, utilizados como sustitutos del cemento Pórtland convencional, presentan propiedades mecánicas y de durabilidad similares a las de los materiales convencionales.

Si bien el objetivo de este Trabajo Fin de Grado era el de obtener un conjunto inicial de datos científicos para un análisis estadístico más profundo mediante técnicas de *machine learning* e inteligencia artificial, finalmente, no se llevará a cabo por constituir una tarea mucho más avanzada.

**Palabras clave:** geopolímero, hormigón, mortero.

# ÍNDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Aglomerantes .....	2
1.1.1. <i>Materiales precursores de los aglomerantes</i> .....	3
1.2. Clinker de cemento Pórtland .....	4
1.3. Humo de sílice .....	5
1.3.1. <i>Propiedades físicas</i> .....	5
1.3.2. <i>Propiedades químicas</i> .....	6
1.3.3. <i>Efectos en el hormigón</i> .....	6
1.4. Cenizas volantes y cenizas de hogar o escorias .....	7
1.4.1. <i>Propiedades físicas</i> .....	8
1.4.2. <i>Propiedades químicas</i> .....	8
1.4.3. <i>Efectos en el hormigón</i> .....	9
1.5. Código estructural .....	10
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>11</b>
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>12</b>
3.1. Bases de datos.....	12
3.2. Artículos científicos .....	12
3.2.1. <i>Títulos de las revistas científicas</i> .....	15
3.2.2. <i>Rango temporal de publicación de los artículos científicos</i> .....	16
3.2.3. <i>Origen geográfico de los artículos científicos: países y continentes</i> .....	17
3.3. Análisis de los datos .....	18
3.3.1. <i>Media aritmética</i> .....	19
3.3.2. <i>Desviación típica</i> .....	19
3.3.3. <i>Error estándar de la media aritmética</i> .....	20
3.3.4. <i>Regresión lineal simple</i> .....	20
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>21</b>
4.1. Análisis individual de los 23 artículos científicos .....	21
4.1.1. <i>Materiales precursores de aglomerantes (binders)</i> .....	21
4.1.2. <i>Áridos</i> .....	24
4.1.3. <i>Solución alcalina</i> .....	26
4.1.4. <i>Tiempo de curado</i> .....	28
4.1.5. <i>Resistencia a la compresión</i> .....	30
4.2. Análisis global de los 23 artículos científicos .....	32
4.2.1. <i>Hormigones geopoliméricos</i> .....	32
4.2.2. <i>Morteros geopoliméricos</i> .....	36

<b>5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>40</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>43</b>
<b>7. ANEXO .....</b>	<b>48</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición de cementos según la Instrucción para la recepción de cementos.....	4
Tabla 2. Artículos científicos. ....	13
Tabla 3. Valores mínimos, medios y máximos de los <i>binders</i> por artículo. ....	21
Tabla 4. Valores mínimos, medios y máximos de los áridos finos y gruesos por artículo. ....	24
Tabla 5. Valores mínimos, medios y máximos de la solución alcalina.....	26
Tabla 6. Valores mínimos, medios y máximos del tiempo de curado por artículo.....	28
Tabla 7. Valores mínimos, medios y máximos de la resistencia a la compresión por artículo...	30
Tabla 8. Análisis estadístico global de los hormigones geopoliméricos. ....	32
Tabla 9. Análisis de regresión simple de los hormigones geopoliméricos.....	35
Tabla 10. Análisis estadístico global de los morteros geopoliméricos.....	36
Tabla 11. Análisis de regresión simple de los morteros geopoliméricos.....	39
Tabla 12. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 1. ....	48
Tabla 13. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 2. ....	49
Tabla 14. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 3. ....	50
Tabla 15. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 4. ....	51
Tabla 16. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 5. ....	52
Tabla 17. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 6. ....	53
Tabla 18. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 7. ....	55
Tabla 19. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 8. ....	56
Tabla 20. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 9. ....	57
Tabla 21. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 10. ....	57
Tabla 22. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 11. ....	58
Tabla 23. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 12. ....	59
Tabla 24. Parámetros de las dosificaciones de morteros geopoliméricos del artículo 13.....	60
Tabla 25. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 14. ....	62
Tabla 26. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 15. ....	63
Tabla 27. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 16. ....	64
Tabla 28. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 17. ....	64
Tabla 29. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 18. ....	65
Tabla 30. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 19. ....	65
Tabla 31. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 20. ....	66
Tabla 32. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 21. ....	67
Tabla 33. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 22. ....	68
Tabla 34. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 23. ....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Activación alcalina de un material silicoaluminoso. ....	2
Figura 2. Reacción química de geopolimerización. ....	3
Figura 3. Número de revistas científicas utilizadas para elaborar el TFG. ....	15
Figura 4. Portada de la revista <i>Construccion and Building Materials</i> . ....	16
Figura 5. Año de publicación de los artículos científicos en las revistas científicas. ....	16
Figura 6. Relación de los países de los autores de los artículos científicos. ....	17
Figura 7. Relación de los continentes de los autores de los artículos científicos. ....	18
Figura 8. Relación de los valores máximos, medios y mínimos de cemento Pórtland por artículo. ....	22
Figura 9. Relación de los valores mínimos, medios y máximos de humo de sílice por artículo. ....	22
Figura 10. Relación de los valores máximos, medios y mínimos de cenizas volantes por artículo. ....	23
Figura 11. Relación de los valores máximos, medios y mínimos de escorias por artículo. ....	23
Figura 12. Relación de los valores máximos, medios y mínimos de árido fino por artículo. ....	25
Figura 13. Relación de los valores máximos, medios y mínimos de árido grueso por artículo. ....	25
Figura 14. Relación de los valores máximos, medios y mínimos de silicato de sodio por artículo. ....	27
Figura 15. Relación de los valores máximos, medios y mínimos de silicato de sodio por artículo. ....	27
Figura 16. Relación de los valores máximos, medios y mínimos del tiempo de curado por artículo. ....	29
Figura 17. Relación de los valores máximos, medios y mínimos de la resistencia a la compresión por artículo. ....	31
Figura 18. Relación entre las variables <i>binders</i> y resistencia a la compresión. ....	33
Figura 19. Relación entre las variables solución alcalina y resistencia a la compresión. ....	33
Figura 20. Relación entre las variables áridos finos y resistencia a la compresión. ....	34
Figura 21. Relación entre las variables áridos gruesos y resistencia a la compresión. ....	34
Figura 22. Relación entre las variables tiempo de curación y resistencia a la compresión. ....	35
Figura 23. Relación entre las variables <i>binders</i> y resistencia a la compresión. ....	37
Figura 24. Relación entre las variables áridos finos y resistencia a la compresión. ....	37
Figura 25. Relación entre las variables solución alcalina y resistencia a la compresión. ....	38
Figura 26. Relación entre las variables tiempo de curación y resistencia a la compresión. ....	38

## 1. INTRODUCCIÓN

El Diccionario de la Real Academia de Ingeniería (Diccionario Español de Ingeniería, 2.022) define el hormigón como el material obtenido de la mezcla de un aglomerante (*binder*) con arena, grava y agua. Su composición es muy variable dependiendo del uso al que se destine. La proporción en que intervienen los distintos componentes se llama dosificación (densidades) y se expresa en peso o en volumen de los componentes por metro cúbico de mezcla. Además, se añaden otra serie de productos (aditivos), que se incorporan a la masa del hormigón sin fraguar con objeto de facilitar su preparación y puesta en obra, regular su fraguado y endurecimiento, o mejorar alguna de sus características. El hormigón se diferencia del mortero en que el segundo carece de gravas (áridos gruesos).

Todo aglomerante debe tener actividad puzolánica y actividad hidráulica. La actividad puzolánica es la capacidad que tienen los aglomerantes para fijar hidróxido cálcico, a la temperatura ordinaria y en presencia de agua, originando productos sólidos, insolubles y dotados de resistencia mecánica. Asimismo, la actividad hidráulica se define como la aptitud que tienen los aglomerantes para endurecerse en presencia de agua o humedad (CEDEX, 2.011).

Los materiales de construcción en base cemento Pórtland, principalmente los hormigones, son los materiales más utilizados en el mundo. No obstante, la industria cementera, debido a su alto nivel de producción en términos globales, debe enfrentarse a ciertos problemas de gran trascendencia social: económico-energéticos (uso de gran cantidad de combustibles fósiles cada vez más caros y escasos) y ecológicos (1 t cemento  $\equiv$  1,5 t materias primas  $\equiv$  0,8 t dióxido de carbono) (Fernández Jiménez, 2.009).

La producción de cemento Pórtland genera aproximadamente el 10% de las emisiones totales de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en todo el mundo. Según una estimación, alrededor de 2,8 billones de toneladas de cemento se producen cada año y llegarán a 4 billones de toneladas para 2.050 (Waqas *et al.*, 2.021).



### 1.1. Aglomerantes

El cemento Pórtland es el aglomerante por antonomasia del hormigón. En 1.978, Joseph Davidovits propuso como su sustituto un aglomerante denominado geopolímero. Un geopolímero es un material cementante formado mediante un proceso de activación alcalina (figura 1), que consiste en una reacción química de polimerización inorgánica entre un material sólido cuya composición química contiene sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (precursor o catalizador), mezclado con una solución de elevada alcalinidad (activador) (Lizán Jiménez *et al.*, 2.014).

Por lo general, los activadores son soluciones constituidas por hidróxido sódico ( $\text{NaOH}$ ) o hidróxido potásico ( $\text{KOH}$ ), donde el tipo de ión tiene un efecto sobre las características y propiedades finales del producto obtenido. El  $\text{NaOH}$  es el más utilizado debido a su gran disponibilidad comercial y por ser uno de los más económicos. No obstante, la utilización de  $\text{KOH}$ , debido al tamaño del catión  $\text{K}^+$ , podría contribuir a la mayor disolución del precursor y, con ello, a mejorar las propiedades reológicas de la mezcla en estado fresco, la obtención de un elevado desempeño mecánico, así como una mayor estabilidad térmica con temperaturas de fusión de hasta  $1.400^\circ\text{C}$ . (Mejía De Gutiérrez *et al.*, 2.015). Esta solución alcalina vendría a sustituir al agua que se utiliza en la elaboración del hormigón convencional.

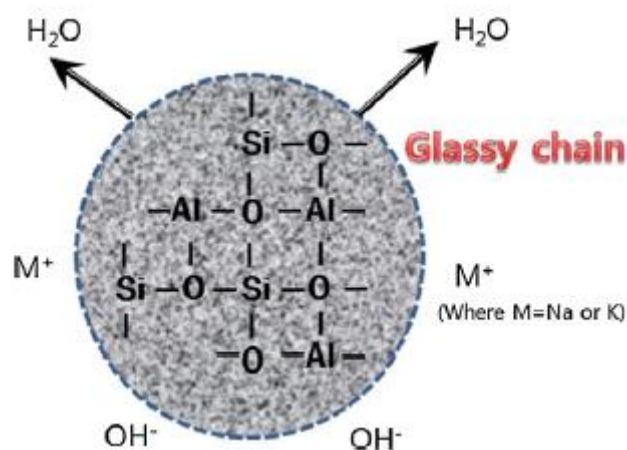


Figura 1. Activación alcalina de un material silicoaluminoso.

Fuente: Ryu *et al.*, 2.013



En España, como se observa en la Tabla 1, la Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-16) no contempla ningún cemento cuyo único material precursor sea un desecho o subproducto de origen industrial rico en sílice y en alúmina. Se establece que será la mezcla de Clinker de cemento Pórtland, a no ser el CEM I, con cenizas de hogar o escorias, humo de sílice o cenizas volantes en porcentajes variables, aunque siempre predominará el Clinker.

**Tabla 1. Composición de cementos según la Instrucción para la recepción de cementos.**

Tipos de cemento	Denominación		Material precursor de aglomerantes (%)			
			Clinker de cemento Pórtland	Escorias	Humo de sílice	Cenizas volantes
CEM I	Cemento Pórtland común		95-100	-	-	-
CEM II/A-S	Cemento Pórtland con escoria		80-94	6-20	-	-
CEM II/B-S			65-79	21-35	-	-
CEM II/A-D	Cemento Pórtland con humo de sílice		90-94	-	6-10	-
CEM II/A-V	Cemento Pórtland con cenizas volantes	síliceas	80-94	-	-	6-20
CEM II/B-V			65-79	-	-	21-35
CEM II/A-W		Calcáreas	80-94	-	-	6-20
CEM II/B-W			65-79	-	-	21-35

Fuente: España. Ministerio de la Presidencia, 2.016

## 1.2. Clinker de cemento Pórtland

Según el Diccionario esencial de las Ciencias (Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2.006) el Clinker de cemento Pórtland es un producto granulado o escoriforme que se obtiene calcinando a temperaturas próximas a 1.400 °C, sin llegar a la temperatura de fusión (sinterización), mezclas suficientemente finas y homogéneas de materias primas adecuadas para la obtención de cemento. En el caso del cemento Pórtland (España. Ministerio de la Presidencia, 2.016), las materias primas básicas son calizas y arcillas, normalmente expresadas en forma de óxidos (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), y pequeñas cantidades de otras materias.

### 1.3. Humo de sílice

La producción de silicio metal, proceso de reducción de cuarzo de elevada pureza con carbón en hornos de arco eléctrico, origina humo de sílice como subproducto industrial. El humo de sílice forma parte mayoritaria de los humos que son captados en los filtros de mangas.

Se presenta en forma de finísimas partículas esféricas. Es un material con marcado carácter puzolánico, idóneo como adición para preparar hormigones y morteros de altas prestaciones, ya que les confiere elevada resistencia mecánica, gran impermeabilidad y resistencia a ataques químicos.

También tiene aplicación en la producción de fibrocementos, en la fabricación de refractarios y como soporte en la producción de pigmentos (Sistema Español de Inventario de Emisiones: Metodologías de estimación de emisiones, 2.020).

Actualmente, en España, únicamente se fabrica silicio metal en Sabón (A Coruña). En 2.010, su producción fue de 17.000 t de humo de sílice (CEDEX, 2.012).

#### 1.3.1. *Propiedades físicas*

Las propiedades físicas del humo de sílice son las siguientes (CEDEX, 2.012):

- *Color:* es un polvo de color variable, del negro al blanco, en función de su contenido en óxidos de carbono y hierro. En general, cuanto más elevado es el contenido de carbono, más oscuro es el humo de sílice. Cuando se mezcla con agua, produce una pasta de color negro.
- *Peso específico:* se encuentra próximo a 2,2, inferior al del cemento Pórtland, que es 3,1, aunque depende del tipo de aleación que se fabrique.
- *Densidad:* real de 2.226 kg/m<sup>3</sup> y aparente o de conjunto de 660 kg/m<sup>3</sup>.
- *Tamaño de las partículas:* partículas esféricas muy finas con una superficie específica del orden de 20.000 m<sup>2</sup>/kg. La gran mayoría de partículas son menores a 0,5 µm, con un diámetro promedio generalmente entre 0,1 y 0,2 µm, que es menor, casi, 50 veces a la partícula promedio de cemento Pórtland.

### 1.3.2. *Propiedades químicas*

El contenido en sílice del humo se sitúa en torno al 92%, aunque puede ser más bajo para productos con una elevada cantidad en carbono o carburo de silicio.

El humo de sílice se condensa de los gases de emisión de los hornos de producción de silicio metal.

Se utiliza para la fabricación de aleaciones aluminio-silicio, siliconas y silicio para placas solares (CEDEX, 2.012).

### 1.3.3. *Efectos en el hormigón*

Según el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX, 2.012), algunos de los efectos del humo de sílice en el hormigón son:

- *Tiempo de fraguado*: acelera la hidratación del cemento a edades bajas del hormigón, provocando también un incremento del calor de hidratación.
- *Consistencia*: el hormigón fresco es más cohesivo y menos propenso a la segregación que un hormigón sin humo de sílice. Si se incrementa el contenido de humo de sílice, el hormigón se vuelve viscoso. La experiencia ha demostrado que es necesario disminuir la consistencia del hormigón con humo de sílice, utilizando un cono mayor (aproximadamente 5 cm) que el de un hormigón convencional con cemento Pórtland, para conseguir la misma trabajabilidad real.
- *Exudación*: se reduce considerablemente, debido a la finura del humo de sílice.
- *Resistencias a flexión y tracción*: el desarrollo de las resistencias a flexión y tracción del hormigón con humo de sílice es similar al que experimenta un hormigón sin humo de sílice.
- *Agentes agresivos*: debido a su reducida permeabilidad, este tipo de hormigón presenta una buena resistencia a los sulfatos y cloruros.

#### 1.4. Cenizas volantes y cenizas de hogar o escorias

La producción de energía eléctrica a partir de centrales termoeléctricas, que emplean carbón como combustible, origina fundamentalmente dos tipos de residuos: las cenizas volantes y las cenizas de hogar o escorias, cuya principal diferencia es el tamaño de las partículas. Las partículas más finas, las cenizas volantes, se obtienen por precipitación mecánica o electrostática del polvo en suspensión comprendido en los gases procedentes de la combustión, mientras que las más gruesas, las escorias, caen al fondo por gravedad. Se suelen extraer por arrastre con agua hasta los silos de almacenamiento.

Se definen como un polvo fino con partículas principalmente esféricas, cristalinas, originadas por la combustión del carbón pulverizado, con o sin materiales de cocombustión, que tienen propiedades puzolánicas y que están compuestas fundamentalmente de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; el contenido de  $\text{SiO}_2$  reactivo es de, al menos, el 25% en masa.

Las cenizas volantes constituyen el 80% del total de la ceniza, correspondiendo el 20% restante a escorias. El total en peso de las cenizas volantes producidas en centrales térmicas es aproximadamente del 30% de la masa de carbón consumida.

La propiedad puzolánica es la más importante de las cenizas silicoaluminosas, que es mayor que en muchas puzolanas naturales y artificiales, y depende del contenido en material silico-aluminoso soluble. Esta es una de las principales razones para su empleo en hormigón, pues las cenizas son capaces de reaccionar con el hidróxido cálcico ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) liberado en la reacción de hidratación del cemento Pórtland.

De las 22 centrales térmicas que había en España en el año 2.010, en la actualidad, únicamente siguen en funcionamiento 4: Aboño y Soto de Ribera (Asturias), Carboneras (Almería), y Es Murterar (Mallorca). En el año 2.010 se producían en las centrales térmicas españolas 916 kt de cenizas volantes y 293 kt de escorias (CEDEX, 2.011).

#### 1.4.1. *Propiedades físicas*

Las cenizas volantes secas suelen presentarse como una arena o polvo muy fino, suave al tacto y de un color gris más o menos claro, según la proporción de hierro y carbón sin quemar.

La finura media de las cenizas volantes brutas, es decir, sin moler, es comparable a la del cemento Pórtland y su tamaño de grano oscila entre 0,2 y 200 micras de diámetro. La densidad de conjunto es aproximadamente de 0,89 g/cm<sup>3</sup> y el peso específico de las partículas oscila entre 2,0 y 2,9 g/cm<sup>3</sup>.

Por su parte, las escorias están formadas por partículas angulares con textura superficial muy porosa y rugosa. Su tamaño varía entre el de una grava y una arena finas, con bajo porcentaje de finos; generalmente se trata de un material bien graduado con predominio del tamaño arena.

El peso específico de las escorias es función de su composición química; disminuye al aumentar el contenido de carbón, con valores típicos entre 2,1 y 2,7 g/cm<sup>3</sup>. Las partículas con bajo peso específico tienen una textura vesicular que hace que se degraden rápidamente bajo la acción de las cargas (CEDEX, 2.011).

#### 1.4.2. *Propiedades químicas*

La composición química de las cenizas volantes es muy variable dependiendo de la composición de los componentes del carbón. Los porcentajes en los que se presentan los distintos componentes varían sustancialmente de unas a otras. En general poseen los siguientes componentes, en mayor proporción: sílice (SiO<sub>2</sub>), alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxidos de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), cal (CaO) y carbón sin quemar; en menor proporción, generalmente menor del 5% en peso: magnesia (MgO), óxido de azufre (SO<sub>3</sub>), alcalinos (Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O), y, otros constituyentes en cantidades aún más reducidas, como compuestos de titanio, vanadio, manganeso, fósforo, germanio, galio, etc (CEDEX, 2.011).

La Instrucción para la Recepción del Hormigón (RC-16) (España. Ministerio de la Presidencia, 2.016) clasifica a las cenizas volantes en:

*Silíceas ó V:* polvo fino de partículas esféricas que tienen propiedades puzolánicas y que consta principalmente de dióxido de silicio reactivo ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). El resto contiene óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y otros compuestos.

*Calcáreas ó W:* polvo fino que tiene propiedades hidráulicas o puzolánicas, que consta esencialmente de óxido de calcio reactivo ( $\text{CaO}$ ), dióxido de silicio reactivo ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). El resto contiene óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y otros compuestos.

La composición química de las escorias es muy parecida a la de las cenizas volantes y depende fundamentalmente del tipo de carbón utilizado. Se pueden clasificar según su componente mayoritario, en silíceas, si se trata de  $\text{SiO}_2$ , o calcáreas, si se trata de  $\text{CaO}$ .

#### 1.4.3. Efectos en el hormigón

Los efectos que producen las cenizas en el hormigón (CEDEX, 2.011) se relacionan a continuación:

- *Fraguado:* aumenta los tiempos iniciales y finales de fraguado.
- *Trabajabilidad:* reduce la cantidad de agua necesaria para obtener una docilidad equivalente a la de un hormigón sin cenizas. Produce un aumento de plasticidad y una mayor cohesión.
- *Exudación:* generalmente se reduce, debido al aumento de finos y al menor contenido de agua.
- *Aptitud para el bombeo:* se consigue un aumento; el uso de cenizas como árido suplementario hace al hormigón más cohesivo y con menos tendencia a la segregación y exudación.
- *Calor de hidratación:* la sustitución parcial de cemento por cenizas reduce el calor generado durante el proceso de hidratación del cemento.
- *Resistencias mecánicas:* su uso produce un retardo en las resistencias iniciales, pero iguala o aumenta las resistencias a edades posteriores.



- *Protección de las armaduras:* siempre que se tomen las medidas adecuadas, el hormigón no planteará problemas respecto a la corrosión de las armaduras.
- *Resistencia a los sulfatos:* el uso de cenizas volantes en el hormigón aumenta su resistencia al ataque de los sulfatos, aunque en las condiciones más severas de exposición, se requerirá el uso de cemento Pórtland resistente a los sulfatos.
- *Reacción álcali-sílice:* el uso de adecuadas cantidades de cenizas volantes puede reducir la reacción con los áridos y disminuir o eliminar la expansión nociva del hormigón (CEDEX, 2.011).

### 1.5. Código estructural

El Código Estructural (España. Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, 2.021) establece únicamente la utilización de las cenizas volantes y el humo de sílice como adiciones al hormigón en el momento de su fabricación.

Para utilizarlas como adición al hormigón, deberá emplearse un cemento tipo CEM I. Las adiciones pueden utilizarse como componentes del hormigón siempre que se justifique su idoneidad para su uso, produciendo el efecto deseado sin modificar negativamente sus características, ni representar peligro para su durabilidad, ni para la corrosión de las armaduras.

En hormigón pretensado podrá emplearse adición de cenizas volantes cuya cantidad no podrá exceder del 20 % del peso de cemento, o humo de sílice cuyo porcentaje no podrá exceder del 10 % del peso del cemento.

En aplicaciones concretas de hormigón de alta resistencia, fabricado con cemento tipo CEM I, se permite la adición simultánea de cenizas volantes y humo de sílice, siempre que el porcentaje del segundo no sea superior al 10 % y que el porcentaje total de ambos no sea superior al 20 %, en ambos casos respecto al peso del cemento.

## 2. OBJETIVOS

Este Trabajo Fin de Grado tiene como objetivos:

- Obtener datos relevantes sobre el estado de la técnica actual para la dosificación y desempeño mecánico de hormigones y morteros geopoliméricos.
- Analizar la relación entre la densidad de materiales precursores de aglomerantes (*binders*); la densidad de áridos finos y de áridos gruesos; la densidad de la solución alcalina activadora; y, como parámetro fundamental, la resistencia a la compresión medida, tras diferentes días de curación, de 439 dosificaciones de hormigones geopolimérico y 50 dosificaciones de morteros geopolimérico.

### 3. METODOLOGÍA

Se describen en este capítulo apartado los materiales y los métodos empleados para la elaboración de este trabajo, de tal forma que se pueda garantizar la repetibilidad de los mismos.

#### 3.1. Bases de datos

Tras acceder a la *Web of Science*, propiedad de *Clarivate Analytics* y anteriormente conocida como *Web of Knowledge*, e introducir en *topic* la palabra clave *geopolymeryc* junto al operador booleano *and* y la palabra clave *concrete*, por un lado, y, *mortar*, por otro, se obtuvieron 1.144 y 430 artículos científicos respectivamente indexados a la *Web of Science*. La búsqueda se limitó al periodo de tiempo comprendido entre el año 2.012 y al año 2.022; es decir, 10 años.

La Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT), fundación pública dependiente del Ministerio de Ciencia e Innovación, es quien gestiona la licencia de *Web of Science* para todo el sistema de I+D+I español, del que forma parte la Universidad de León.

#### 3.2. Artículos científicos

Para confeccionar este Trabajo Fin de Grado, de un total de 1.574 artículos científicos, se seleccionaron 23. En la tabla 2 se exponen los autores, el título, la revista científica y año de publicación, así como el origen geográfico de los mismos.

De esos 23 artículos científicos, 22 son de hormigones geopoliméricos y 1, el número 13 de la tabla 2, de morteros geopoliméricos.

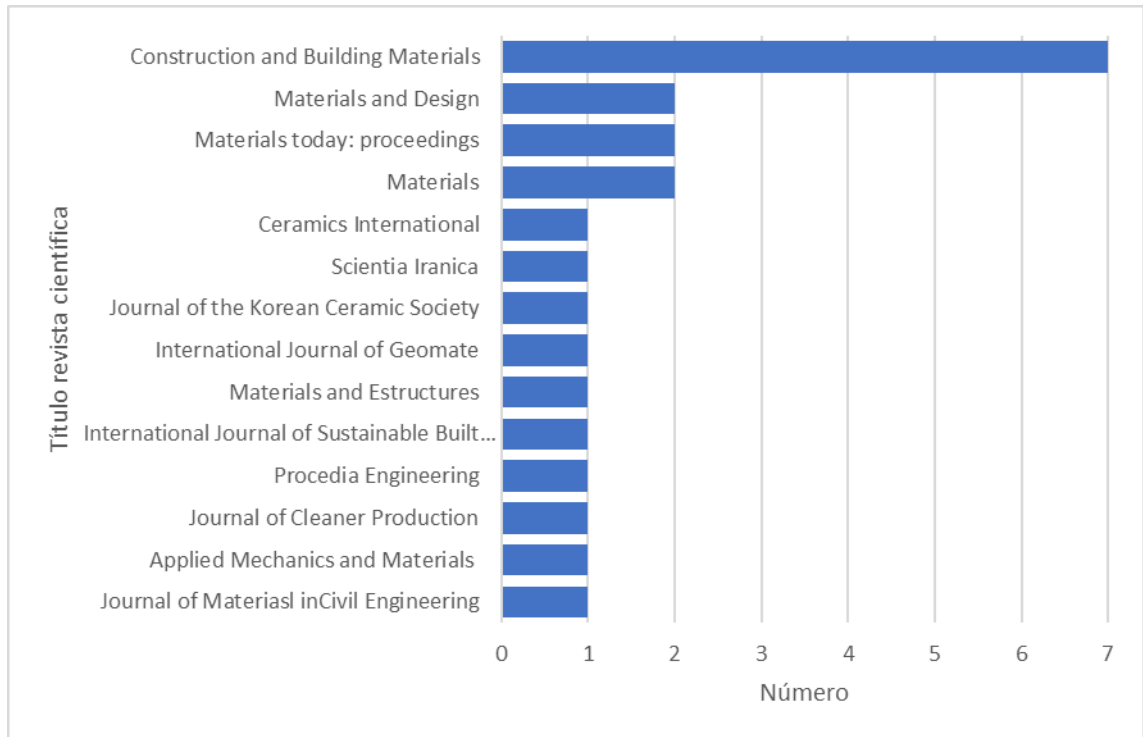
Tabla 2. Artículos científicos.

Artículo	Autores	Título	Revista científica	Año publicación	País	Continente
1	Abdulrahman, H. Muhamad, R. Visintin, P. and Shukri, A.A.	Mechanical properties and bond stress-slip behaviour of fly ash geopolymer concrete	Construction and Building Materials	2.022	Malasia Australia	Asia Oceanía
2	Aly, A. M. El – Feky, M. S. Kohail, M. and Nasr, E – S. A. R.	Performance of geopolymer concrete containing recycled rubber	Construction and Building Materials	2.019	Egipto	Asia
3	Aslani, F. ASCE, M. Deghani, A, and Asif, Z.	Development of Lightweight Rubberized Geopolymer Concrete by Using Polystyrene and Recycled Crumb-Rubber Aggregates	Journal of Materials in Civil Engineering	2.020	Australia	Oceanía
4	Bellum, R.R. Muniraj, K. and Madduru, S.R.C.	Influence of slag on mechanical and durability properties of fly ash-based geopolymer concrete	Journal of the Korean Ceramic Society	2.020	India	Asia
5	Chindaprasirt, P. and Chalee, W.	Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site	Construction and Building Materials	2.014	Tailandia	Asia
6	Deb, P. S. Nath, P. and Sarjer, P. K.	The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature	Materials and Design	2.014	Australia	Oceanía
7	Gunasekara, C. Law, D.W. and Setunge, S.	Long term permeation properties of different fly ash geopolymer concretes	Construction and Building Materials	2.016	Australia	Oceanía
8	Gupta, N. Gupta, A. Saxena, K. K. Shukla, A. and Goyal, S.K.	Mechanical and durability properties of geopolymer concrete composite at varying superplasticizer dosage	Materials today: proceedings	2.021	India	Asia
9	Husin, N. A. Bayuaji, R. Tajunninsa, Y. Darmawan, M. S. and Subprobo, P.	Performance of high calcium fly ash based geopolymer concrete in chloride environment	International Journal of Geomate	2.020	Indonesia	Asia
10	Joseph, B. and Mathew, G.	Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete	Scientia Iranica	2.012	India	Asia
11	Mehta, A. and Siddique, R.	Properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete incorporating OPC as partial replacement of fly ash	Construction and Building Materials	2.017	India	Asia
12	Metha, A. Siddique, R. Sing, B.P. Aggoun, S. Lagód, G. and Barnat – Hunek, D.	Influence of various parameters on strength and absorption properties of fly ash based geopolymer concrete designed by Taguchi method	Construction and Building Materials	2.017	India Francia Polonia	Asia Europa

13	Mijarsh, M. J. A. Megat Johari, M. A. and Ahmad, Z. A.	Synthesis of geopolymer from large amounts of treated palm oil fuel ash: Application of the Taguchi method in investigating the main parameters affecting compressive strength	Construction and Building Materials	2.014	Malasia Libia	Asia África
14	Nuruddin, M. F. Memon, F. A. Shafiq, N. and Demie, S.	Drying Shrinkage of Fly Ash-Based Self-Compacting Geopolymer Concrete	Applied Mechanics and Materials	2.014	Malasia Etiopía	Asia África
15	Okoye, F. N. Prakash, S. and Singh, N.B.	Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume	Journal of Cleaner Production	2.017	India	Asia
16	Ramujee, K. and PothaRaju, M.	Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Composites	Materials today: proceedings	2.017	India	Asia
17	Sarker, P.K. Haque, R. and Ramgolam, K.V.	Fracture behaviour of heat cured fly ash based geopolymer concrete	Materials and Design	2.013	Australia	Oceanía
18	Shaikh, F.U.A.	Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates	International Journal of Sustainable Built Environment	2.016	Australia	Oceanía
19	Valizadeh, A. Aslani, F. Asif, Z. and Roso, M.	Development of Heavyweight Self-Compacting Concrete and Ambient-Cured Heavyweight Geopolymer Concrete Using Magnetite Aggregates	Materials	2.019	Australia	Oceanía
20	Vora, P. R. and Dave, U. V.	Parametric Studies on Compressive Strength of Geopolymer Concrete	Procedia Engineering	2.013	India	Asia
21	Waqas, R.M. Butt, F. Danish, A. Alqurashi, M. Mosaberpanah, M.A. Masood, B. and Hussein, E.E.	Influence of Bentonite on Mechanical and Durability Properties of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete with Natural and Recycled Aggregates	Materials	2.021	Pakistán Arabia Saudí Turquía Egipto	Asia
22	Xie, T. and Ozbakkaloglu, T.	Behavior of low-calcium fly and bottom ash-based geopolymer concrete cured at ambient temperature	Ceramics International	2.015	Australia	Oceanía
23	Yost, J. R. Radlinska, A. Ernst, S. and Salera, M.	Structural behavior of alkali activated fly ash concrete. Part 1: mixture design, material properties and sample fabrication	Materials and Estructures	2.013	EEUU	América

### 3.2.1. Títulos de las revistas científicas

En la figura 3 se exponen los diferentes títulos de las 23 revistas científicas



**Figura 3. Número de revistas científicas utilizadas para elaborar el TFG.**

La revista *Construcción and Building Materials*, cuya portada se muestra en la figura 4, ha sido la revista científica en la que se han publicado 7 artículos científicos. *Materials and Design*, *Materials today: proceedings* y *Materials*, le siguen con 2 cada una. El resto, 10, han publicado 1 cada una.

Estas revistas científicas son las que habitualmente publican artículos científicos del área de conocimiento de las ciencias de la construcción y de la ciencia e ingeniería de materiales.

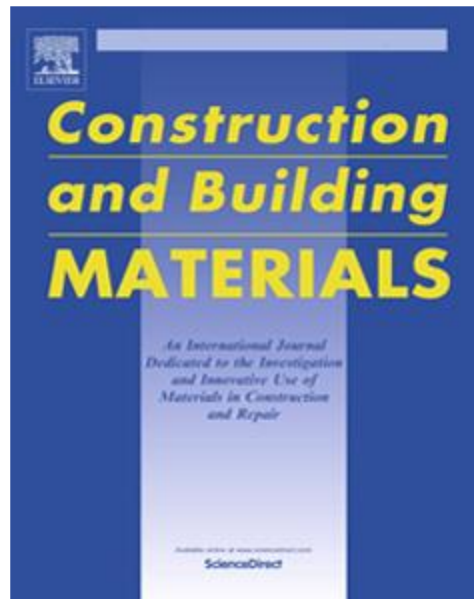


Figura 4. Portada de la revista *Construction and Building Materials*.

Fuente: Metha *et al.*, 2017

### 3.2.2. Rango temporal de publicación de los artículos científicos

Los artículos científicos seleccionados fueron publicados en las revistas científicas en un espacio temporal de 10 años, desde el año 2012 hasta el año 2022. Del año 2018 no hay ninguno. En la figura 5 se representa la distribución temporal de los mismos.

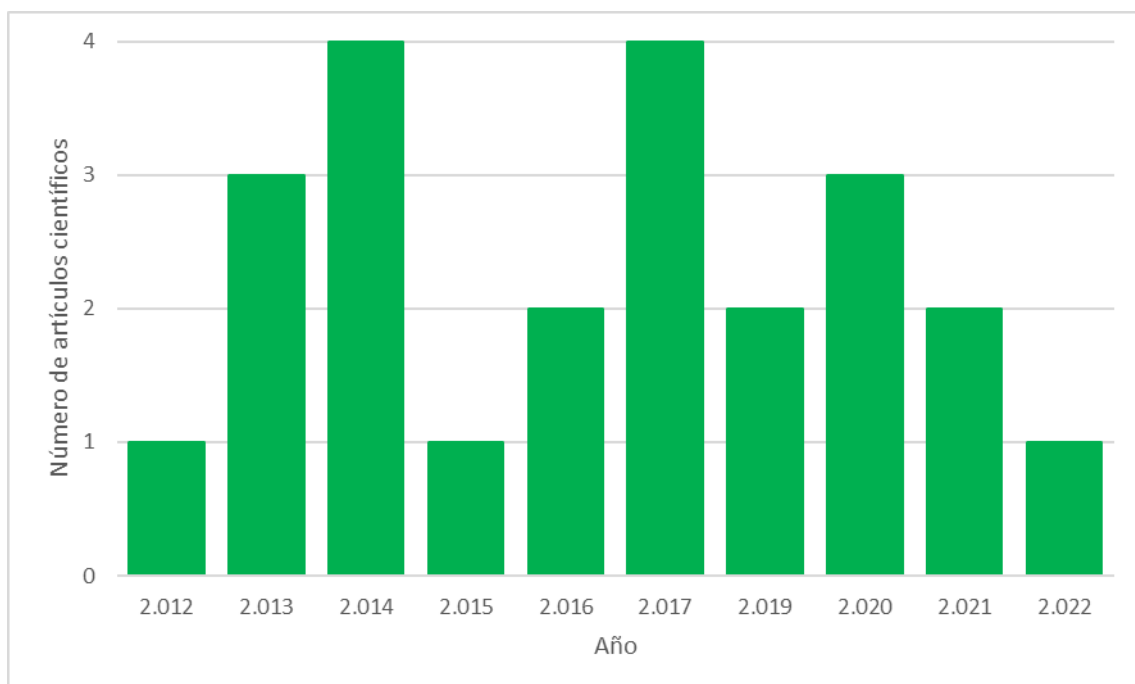
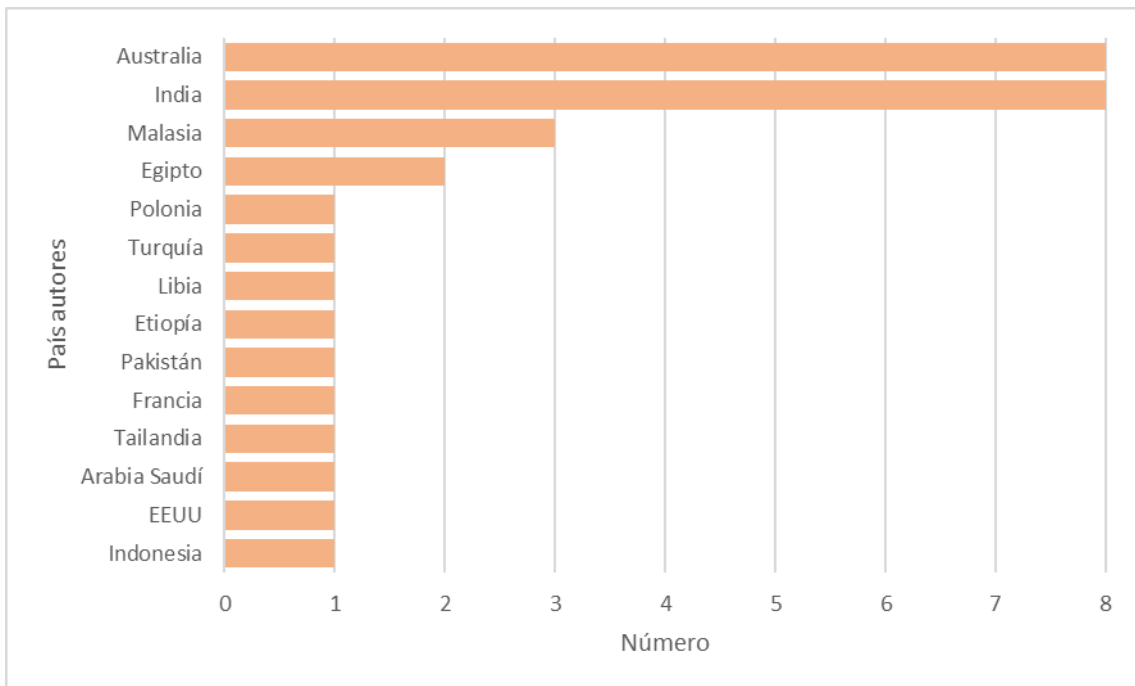


Figura 5. Año de publicación de los artículos científicos en las revistas científicas.

Los años que más artículos científicos se publicaron fueron el 2.014 y el 2.017: 4. Por el contrario, los años 2.012, 2.015 y 2.022 fueron los que menos: 1.

### 3.2.3. Origen geográfico de los artículos científicos: países y continentes

14 son los países a los que pertenecen los autores de los artículos científicos. En la figura 6 se muestran los países detalladamente.



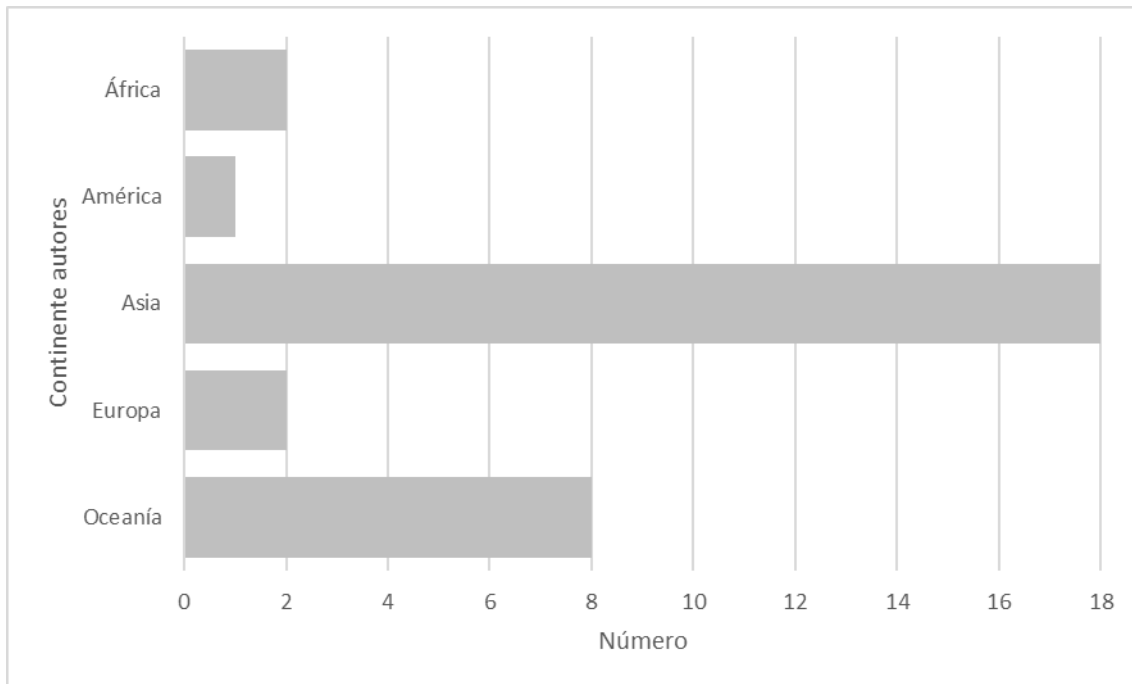
**Figura 6. Relación de los países de los autores de los artículos científicos.**

Australia y la India son los países que más autores aportan, 8 cada uno; Malasia, 3; Egipto, 2; el resto, 1 cada uno.

Que Australia sea el país al que más autores pertenecen, junto a la India, se puede justificar, al menos hasta el año 2.016, debido al elevado número de centrales térmicas con las que cuenta el país (Gunasekara, 2.016).

En cuanto a los continentes, existe representación de todos ellos. La figura 7 lo ilustra





**Figura 7. Relación de los continentes de los autores de los artículos científicos.**

Asia es el continente más numeroso en cuanto a autores, 18; Oceanía, 8; África y Europa, 2; y América, 1.

La justificación de que el continente que más artículos firma sea Asia se debe, en parte, a que es el principal productor de aceite de palma (Mijarsh, 2.014)

### **3.3. Análisis de los datos**

El análisis estadístico se ha realizado mediante la hoja de cálculo *Microsoft Excel*. Todos los resultados se han obtenido a través de este *software*.

Por una parte, se ha estimado de forma individual el valor mínimo, medio y máximo de varios parámetros de cada uno de los 23 artículos científicos que figuran en el ANEXO de este Trabajo Fin de Grado.

Por otro parte, se ha calculado de forma conjunta la media aritmética, la desviación típica y el error estándar de la media aritmética de una serie de parámetros de todos los artículos referidos a hormigones geopoliméricos (22), por un lado, y, por otro, los del único artículo de morteros geopoliméricos. Posteriormente se efectuó una regresión lineal simple.

### 3.3.1. Media aritmética

La media aritmética se define como la suma de cada uno de los valores muestrales dividida por el número de observaciones realizadas:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}.$$

La media es la medida de tendencia central más utilizada y de más fácil interpretación. Corresponde al “centro de gravedad” de los datos de la muestra. Su principal limitación es que está muy influenciada por los valores extremos y, en este caso, puede no ser un fiel reflejo de la tendencia central de la distribución (Pastor – Barriuso, 2.012).

### 3.3.2. Desviación típica

Según Pastor – Barriuso (2.012), la medida de dispersión más utilizada es la desviación típica o desviación estándar, que se define como la raíz cuadrada de la varianza:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

y, en consecuencia, presenta las mismas unidades que la variable original. Al igual que la media, la desviación típica está influenciada por valores muy extremos (gran desviación respecto de la media), que inflarían la estimación resultante, no siendo un buen reflejo de la dispersión global de los datos.

### 3.3.3. Error estándar de la media aritmética

El error estándar de la media muestral permite cuantificar el grado de incertidumbre en la estimación de una media a partir de una muestra de tamaño  $n$ .

Así, una vez seleccionada una muestra concreta, la media aritmética facilitará una estimación insesgada de la media poblacional y el error de dicha estimación vendrá determinado por (Pastor – Barriuso, 2.012):

$$s/\sqrt{n}.$$

### 3.3.4. Regresión lineal simple

Pastor – Barriuso (2.012), afirma que la regresión lineal estudia la variación en el nivel medio de la variable respuesta  $Y$  a medida que cambia la variable explicativa  $X$ , estableciendo así una direccionalidad en la relación entre dichas variables.

El modelo de regresión lineal asume que la media de la variable respuesta  $Y$  cambia linealmente con la variable explicativa  $X$ ; esto es, para un valor fijo  $x$  de la variable explicativa, el valor esperado de la variable respuesta es

$$E(Y|x) = \beta_0 + \beta_1 x,$$

donde  $\beta_0$  y  $\beta_1$  son la constante y la pendiente de la recta de regresión, respectivamente.

Para medir el grado de fiabilidad o bondad del ajuste del modelo a un conjunto de datos se utiliza el coeficiente de determinación  $R^2$ .

Sus límites se encuentran entre el 0 y el 1. Un coeficiente de determinación igual a 1 significa que el ajuste lineal es perfecto, mientras que si es igual a 0 indica que no hay representatividad del modelo lineal.

## 4. RESULTADOS

Una vez descrita la metodología, en el ANEXO se detallan el total de las dosificaciones obtenidas de los 23 artículos científicos en 23 tablas.

### 4.1. Análisis individual de los 23 artículos científicos

En este apartado se analizan, de forma individual, los valores paramétricos mínimos, medios y máximos de los materiales precursores de los aglomerantes (*binders*), de los áridos, de la solución alcalina, del tiempo de curado y de la resistencia a la compresión de cada uno de los 23 artículos científicos.

#### 4.1.1. *Materiales precursores de aglomerantes (binders)*

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos. No se han tratado las cenizas de combustión del aceite de palma tratado, artículo 13 (tabla 24), por no ser significativamente estadísticas en este subapartado.

**Tabla 3. Valores mínimos, medios y máximos de los *binders* por artículo.**

Artículo	Materiales precursores aglomerantes ( <i>binders</i> ) (kg/m <sup>3</sup> )											
	Cemento Pórtland			Humo de sílice			Cenizas volantes			Escorias		
	Mín.	Med.	Máx.	Mín.	Med.	Máx.	Mín.	Med.	Máx.	Mín.	Med.	Máx.
1	-	-	-	-	-	-	400	468	525	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	500	500	500
3	-	-	-	-	-	-	225	248,8	270	180	201,2	225
4	-	-	-	-	-	-	190	266	342	38	114	190
5	-	-	-	-	-	-	390	390	390	-	-	-
6	366,4	406,2	446	-	-	-	320	352	400	0	48	80
7	-	-	-	-	-	-	412	416	420	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	0	99,5	199	199	298,5	398
9	-	-	-	-	-	-	468	495,3	550	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	254,5	337,5	420,6	-	-	-
11	0	46,5	93	-	-	-	217	263,5	310	-	-	-
12	15,9	39,8	63,6	-	-	-	254,4	278,3	302,1	-	-	-
13	-	-	-	160	291,2	480	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	40	40	40	360	380	400	-	-	-
15	0	100	400	0	40	80	0	270	400	-	-	-
16	327	376,7	408,9	-	-	-	327	376,7	408,9	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-	408	408	408	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	408	408	408	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-	360	360	360	40	40	40
20	-	-	-	-	-	-	428	429,6	444	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	340	382,6	425	-	-	-
22	0	36,4	400	-	-	-	0	265,9	475	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	493	493	493	-	-	-

Las figuras 8, 9, 10 y 11 representan gráficamente lo que se ha plasmado en la tabla 3.

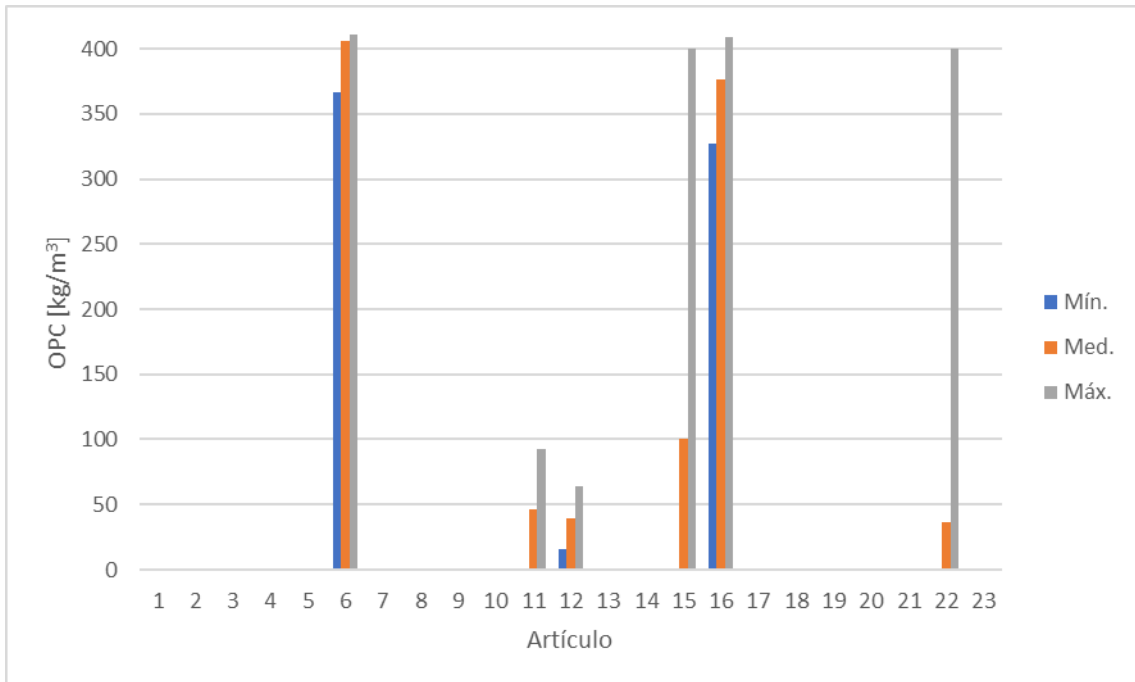


Figura 8. Relación de los valores máximos, medios y mínimos de cemento Pórtland por artículo.

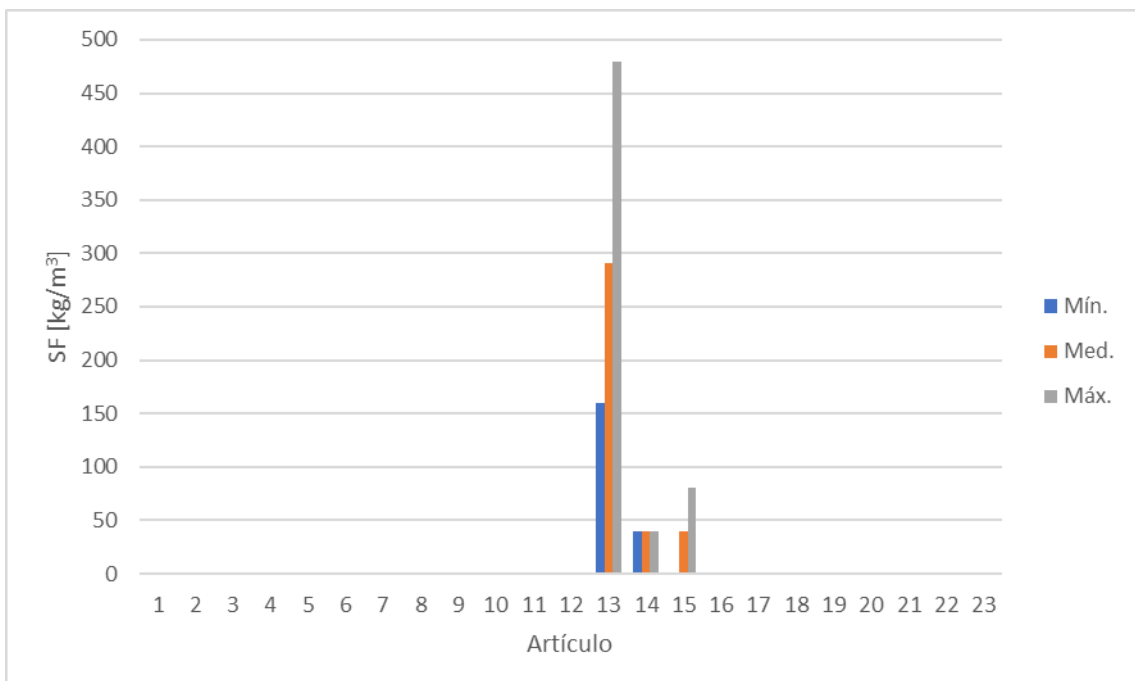


Figura 9. Relación de los valores mínimos, medios y máximos de humo de sílice por artículo.

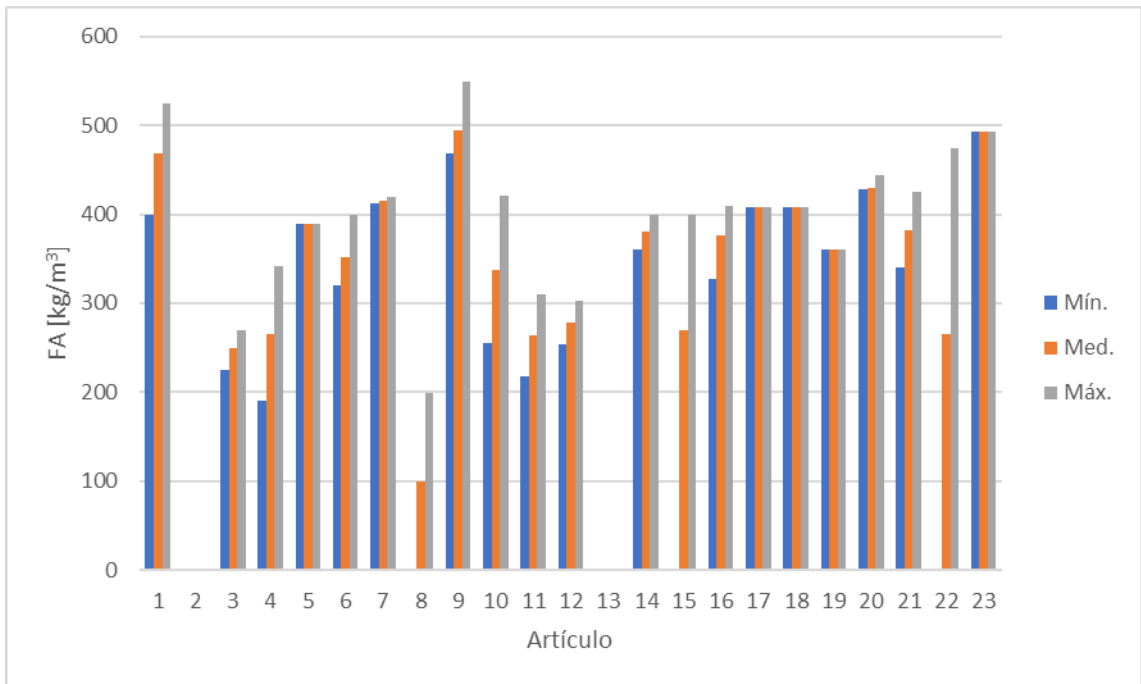


Figura 10. Relación de los valores máximos, medios y mínimos de cenizas volantes por artículo.

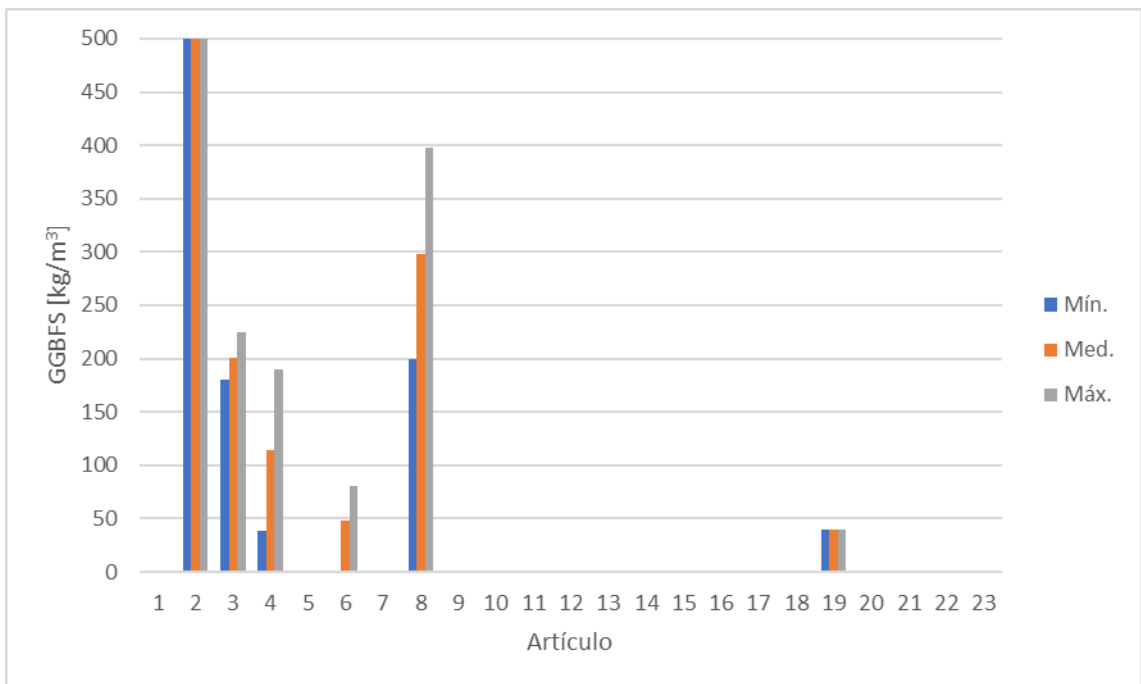


Figura 11. Relación de los valores máximos, medios y mínimos de escorias por artículo.

#### 4.1.2. Áridos

Las dosificaciones del artículo 13 no tienen áridos gruesos por tratarse de morteros geopoliméricos. En la tabla 4 se pueden observar el conjunto de valores paramétricos.

**Tabla 4. Valores mínimos, medios y máximos de los áridos finos y gruesos por artículo.**

Artículo	Áridos (kg/m <sup>3</sup> )					
	Finos			Gruesos		
	Mín.	Med.	Máx.	Mín.	Med.	Máx.
1	707	707	707	1.060	1.060	1.060
2	367	446	525	682,5	828,8	975
3	328,5	372,5	409,5	922,5	1235,2	1476
4	570	570	570	1.140	1.140	1.140
5	585	585	585	1.092	1.092	1.092
6	651	670,7	768	1.054	1.187,7	1.222
7	693	699,3	706	918	927	936
8	636	636	636	1202	1202	1202
9	446,2	596,7	672	1.008	1.013,9	1.025,7
10	555,7	625,2	694,7	1.032	1.161	1.290
11	649	649	649	1.204	1.204	1.204
12	662	662	662	1.230	1.230	1.230
13	8.240	8.486,4	8.800	-	-	-
14	850	850	850	950	950	950
15	554	554	554	1.293	1.293	1.293
16	554	624,3	672	1.201,2	1.247,7	1.294
17	647	647	647	1.201	1.201	1.201
18	554	554	554	1.231	1.232,5	1.234
19	650	650	650	1.210	1.493	1.692
20	630	630	630	1.170	1.170	1.170
21	640	640	640	1.080	1.140	1.200
22	529	545,1	567	1.235	1.275,7	1.329
23	659	659	659	988	988	988

En las figuras 12 y 13 se aprecia que el valor discordante es el referido al artículo 13. Es el que más densidad de árido fino tiene de todos los artículos, llegando casi a los 9.000 kg/m<sup>3</sup>; sin embargo, no contiene nada de árido grueso.

La elevada densidad de los áridos finos del artículo 13 se debe a que se ha utilizado una ratio de dosificación muy elevada. Esto se justifica porque se han empleado las cenizas de combustión del aceite de palma tratado como binder, en vez de los *binders* geopoliméricos habituales (cenizas volantes y escorias). Se ha tenido que añadir gran cantidad de *binder* y, por tanto, mucha arena.

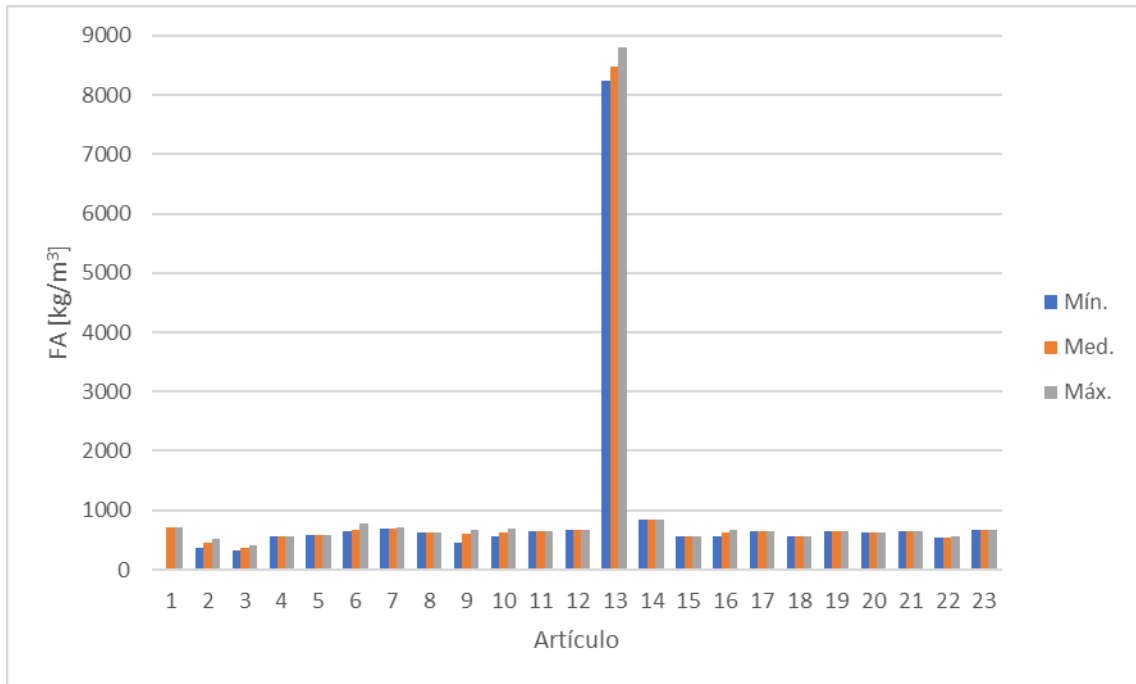


Figura 12. Relación de los valores máximos, medios y mínimos de árido fino por artículo.

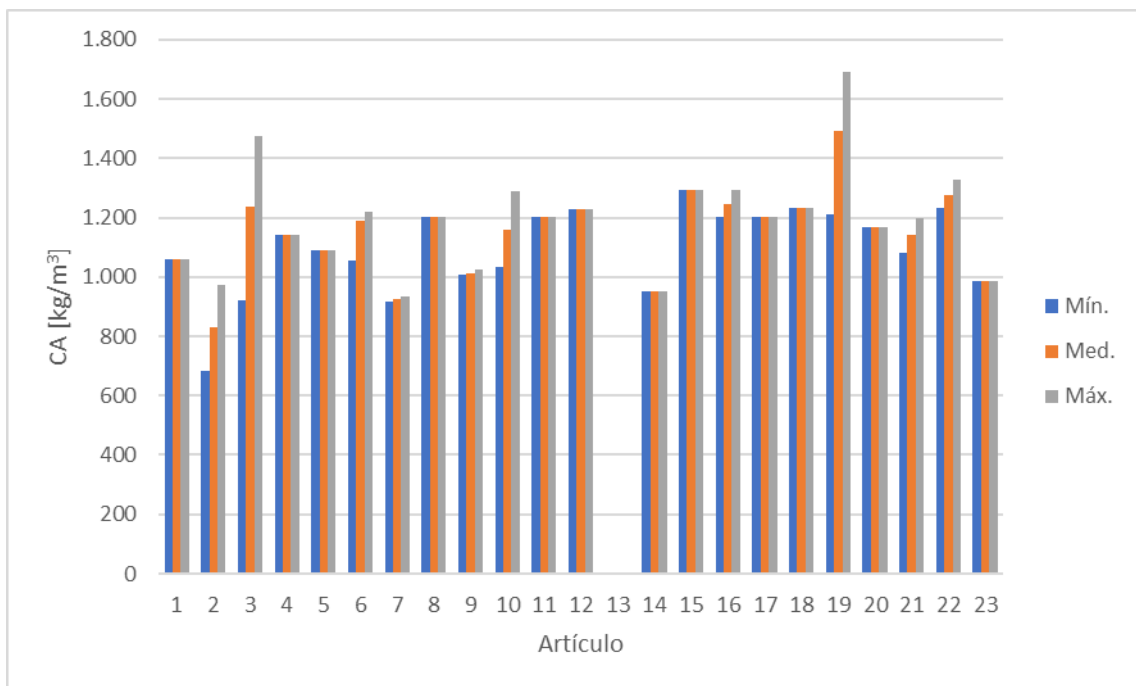


Figura 13. Relación de los valores máximos, medios y mínimos de árido grueso por artículo.



#### 4.1.3. Solución alcalina

La tabla 5 relaciona las densidades tanto del silicato de sodio como del hidróxido de sodio con los 23 artículos científicos.

**Tabla 5. Valores mínimos, medios y máximos de la solución alcalina.**

Artículo	Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )					
	Silicato de sodio			Hidróxido de sodio		
	Mín.	Med.	Máx.	Mín.	Med.	Máx.
1	96	96	96	64	64	64
2	75,53	75,53	75,53	195,2	195,2	195,2
3	103,5	134,3	193,5	40,5	51,3	76,5
4	108,57	115,36	122,14	43,43	46,15	48,86
5	167	167	167	67	67	67
6	84	97,3	114,3	40	50,7	64
7	241	291,8	342	39	65,3	92
8	-	-	-	-	-	-
9	61,86	75,3	96,41	31,97	46,4	55,94
10	139,99	188,1	231,31	139,99	188,1	231,31
11	171	171	171	171	171	171
12	175	175	175	175	175	175
13	1.040	1.542,4	2.000	720	1.139,2	1.760
14	143	143	143	57	57	57
15	0	84,8	113	0	33,8	45
16	102,22	107,8	112,64	40,89	46,8	54,33
17	93	96,3	103	62	64	68
18	118	118	118	47	47	47
19	114,3	114,3	114,3	45,7	45,7	45,7
20	111	120,1	122	44	49,3	57
21	107	107	107	53	53	53
22	0	162,5	240	0	162,5	240
23	149	149	149	16,5	16,5	16,5

Del artículo 8 no se ha podido extraer información relativa a la densidad de la solución alcalina. Los artículos 11 y 12 no diferencian el silicato de sodio del hidróxido de sodio en la solución alcalina; por tanto, se ha considerado la misma densidad para ambos. En Las figuras 14 y 15 se observan las representaciones gráficas de la tabla 5. Como en el subapartado anterior, el artículo 13 vuelve a ser el discordante: el valor de la densidad mínima, máxima y, por tanto, media, superan notablemente al resto.

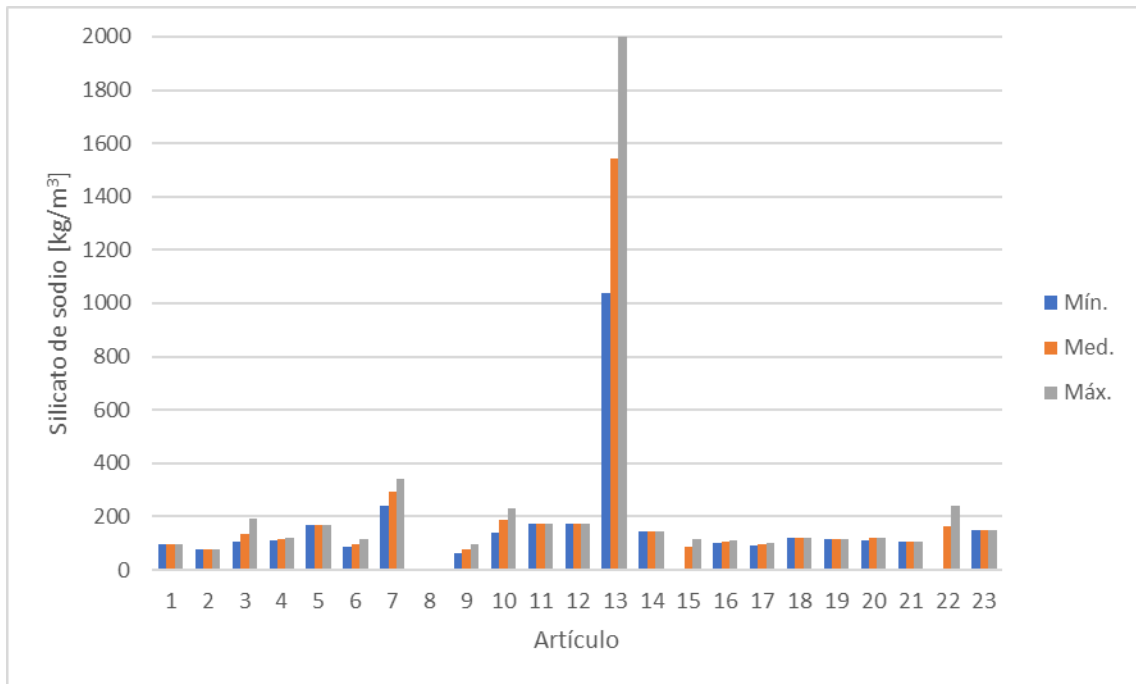


Figura 14. Relación de los valores máximos, medios y mínimos de silicato de sodio por artículo.

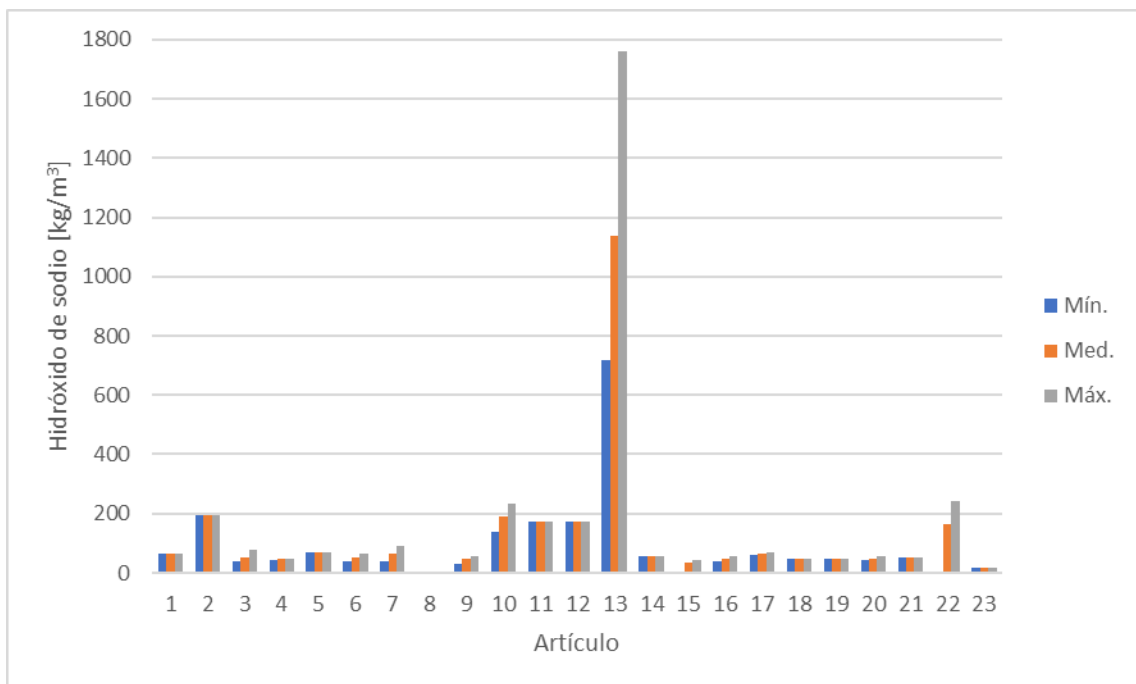


Figura 15. Relación de los valores máximos, medios y mínimos de silicato de sodio por artículo.

#### 4.1.4. Tiempo de curado

El tiempo de curado de las dosificaciones de los 23 artículos se muestran en la tabla 6.

**Tabla 6. Valores mínimos, medios y máximos del tiempo de curado por artículo.**

Artículo	Tiempo de curado (días)		
	Mín.	Med.	Máx.
1	7	17,5	28
2	28	44,0	60
3	3	14,4	28
4	7	17,5	28
5	28	561,5	1095
6	7	72,2	180
7	3	98,6	365
8	7	17,5	28
9	7	16,3	28
10	3	12,7	28
11	3	98,6	365
12	7	7	7
13	1	3,7	7
14	28	28	28
15	1	35,6	90
16	28	28	28
17	28	28	28
18	7	17,5	28
19	7	17,5	28
20	1	1,6	2
21	3	40,3	90
22	7	40,3	70
23	1	51	150

Destacan los artículos 5, y 7 y 11, por tener tiempos de curado máximos de hasta 3 años y 1 año respectivamente. La figura 16 lo representa.

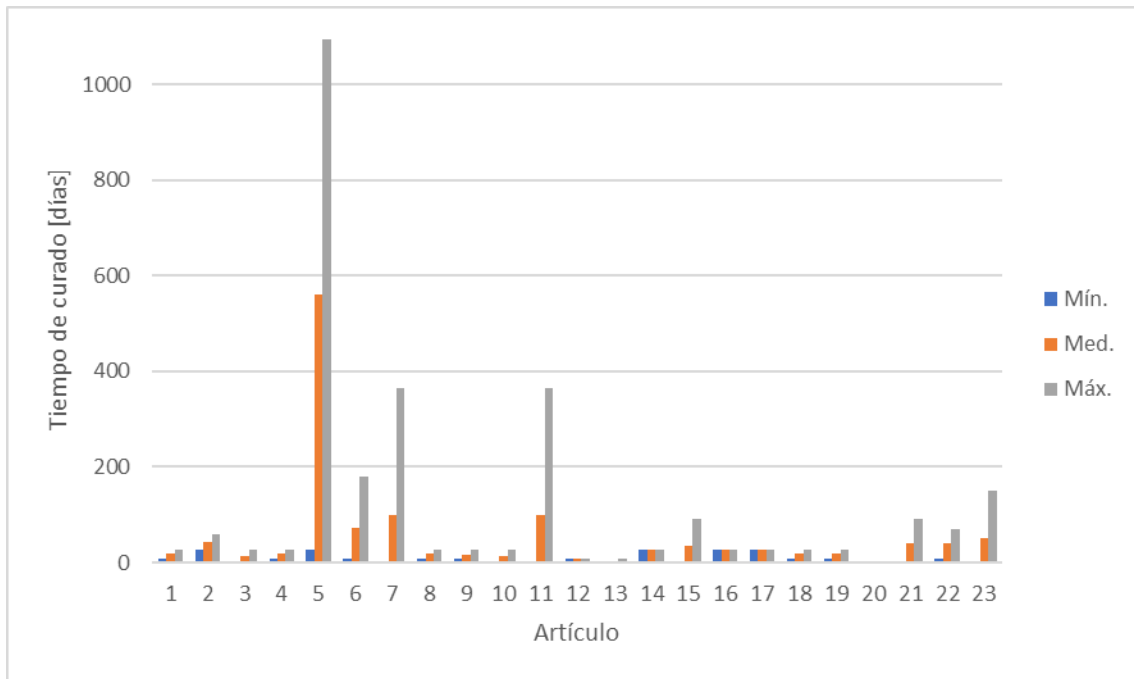


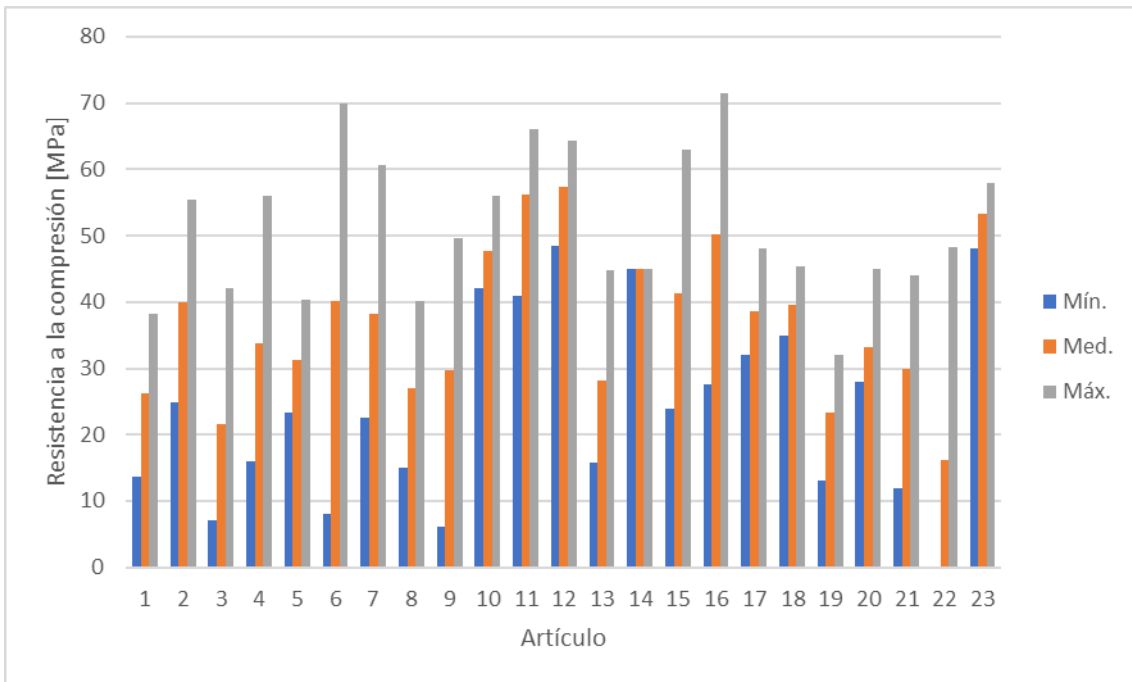
Figura 16. Relación de los valores máximos, medios y mínimos del tiempo de curado por artículo.

#### 4.1.5. Resistencia a la compresión

Los valores de la resistencia a la compresión se indican en la tabla 7. Asimismo, la figura 17 representa los valores plasmados en la citada tabla.

**Tabla 7. Valores mínimos, medios y máximos de la resistencia a la compresión por artículo.**

Artículo	Resistencia a la compresión (MPa)		
	Mín.	Med.	Máx.
1	13,7	26,3	38,2
2	24,8	39,9	55,4
3	7,0	21,6	42,1
4	16,0	33,7	56,0
5	23,4	31,3	40,3
6	8,0	40,1	70,0
7	22,5	38,2	60,7
8	15,1	27,1	40,2
9	6,2	29,8	49,7
10	42,0	47,7	56,0
11	41,0	56,2	66,0
12	48,4	57,3	64,4
13	15,7	28,1	44,7
14	45,0	45,0	45,0
15	24,0	41,4	63,0
16	27,5	50,3	71,4
17	32,0	38,7	48,0
18	35,0	39,5	45,3
19	13,0	23,4	32,0
20	28,0	33,2	45,0
21	12,0	30,0	44,0
22	0,2	16,2	48,2
23	48,0	53,3	58,0



**Figura 17. Relación de los valores máximos, medios y mínimos de la resistencia a la compresión por artículo.**

## 4.2. Análisis global de los 23 artículos científicos

En este apartado se analizan de forma global la media aritmética, la desviación típica y el error estándar de la media aritmética de los parámetros de las 439 dosificaciones de hormigón geopolimérico, por un lado, y, por otro, de las 50 dosificaciones de mortero geopolimérico. Asimismo, se efectuó una regresión lineal simple que analizó diferentes variables en función de si eran hormigones (figuras 18, 19, 20, 21 y 22) o morteros geopoliméricos (figuras 23, 24, 25 y 26).

### 4.2.1. *Hormigones geopoliméricos*

Para el análisis estadístico, cuyos resultados se muestran en la tabla 8, se ha tenido en cuenta lo siguiente:

- *Binders*: se analizan en conjunto, no de forma separada. Se ha considerado que los *binders*, a efectos estadísticos, son la suma de cenizas volantes y de escorias, por ser las más representativas.

No se tienen en cuenta las dosificaciones del cemento Pórtland, que aparecen en 6 artículos: 6, 11, 12, 15, 16 y 22, porque son dosificaciones de referencia que han servido para establecer comparativas únicamente en esos artículos científicos.

- Áridos: se han analizado de forma separada los finos de los gruesos.
- Solución alcalina: se ha considerado que la solución alcalina es la suma del silicato de sodio y del hidróxido de sodio.

**Tabla 8. Análisis estadístico global de los hormigones geopoliméricos.**

Parámetro	Muestra	Media	Desviación	Error	
<b>Binders (kg/m<sup>3</sup>): cenizas volantes + escorias</b>	411	387,4	101,8	5,0	
<b>Áridos (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Finos</b>	414	609,4	89,8	4,4
	<b>Gruesos</b>	414	1.157,7	133,2	6,5
<b>Solución alcalina (kg/m<sup>3</sup>): Silicato de sodio + hidróxido de sodio</b>	381	184,5	64,5	23,1	
<b>Tiempo de curado (días)</b>	414	56,8	140,0	6,9	
<b>Resistencia a la compresión (MPa)</b>	395	36,2	15,9	0,8	

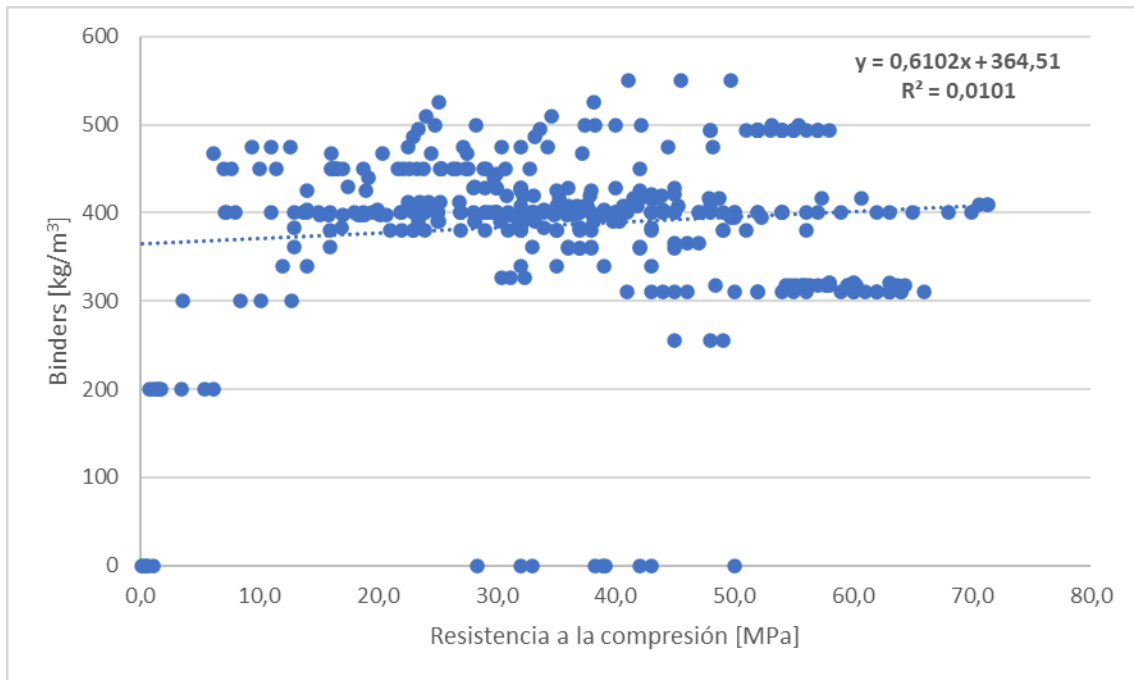


Figura 18. Relación entre las variables *binders* y resistencia a la compresión.

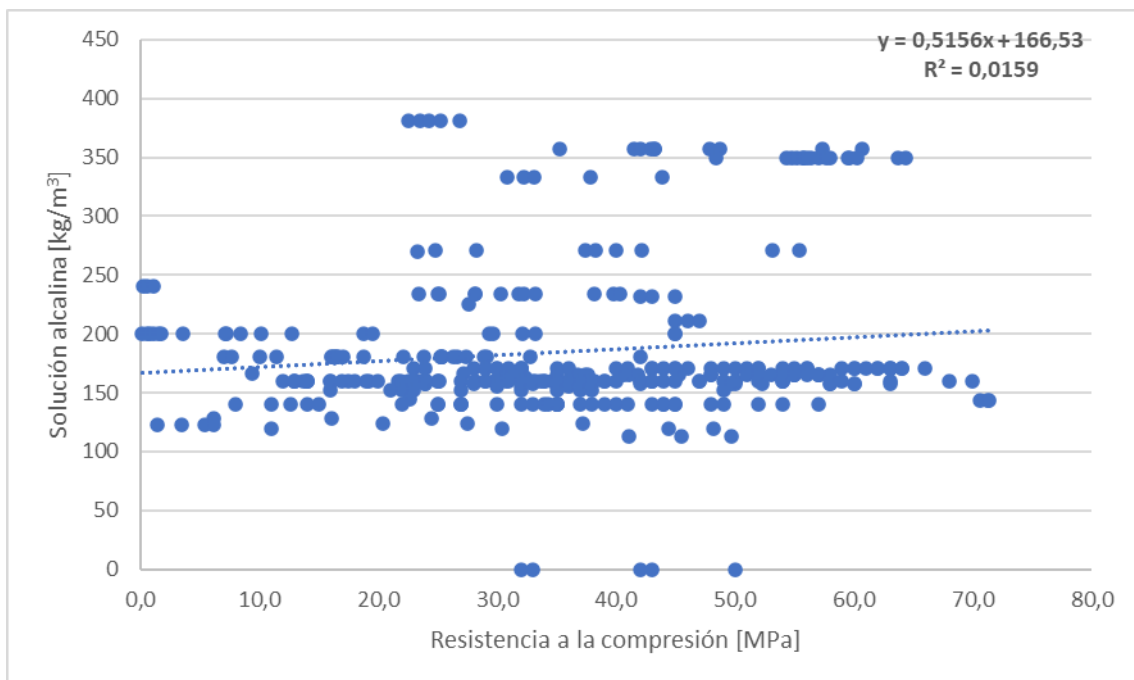


Figura 19. Relación entre las variables solución alcalina y resistencia a la compresión.



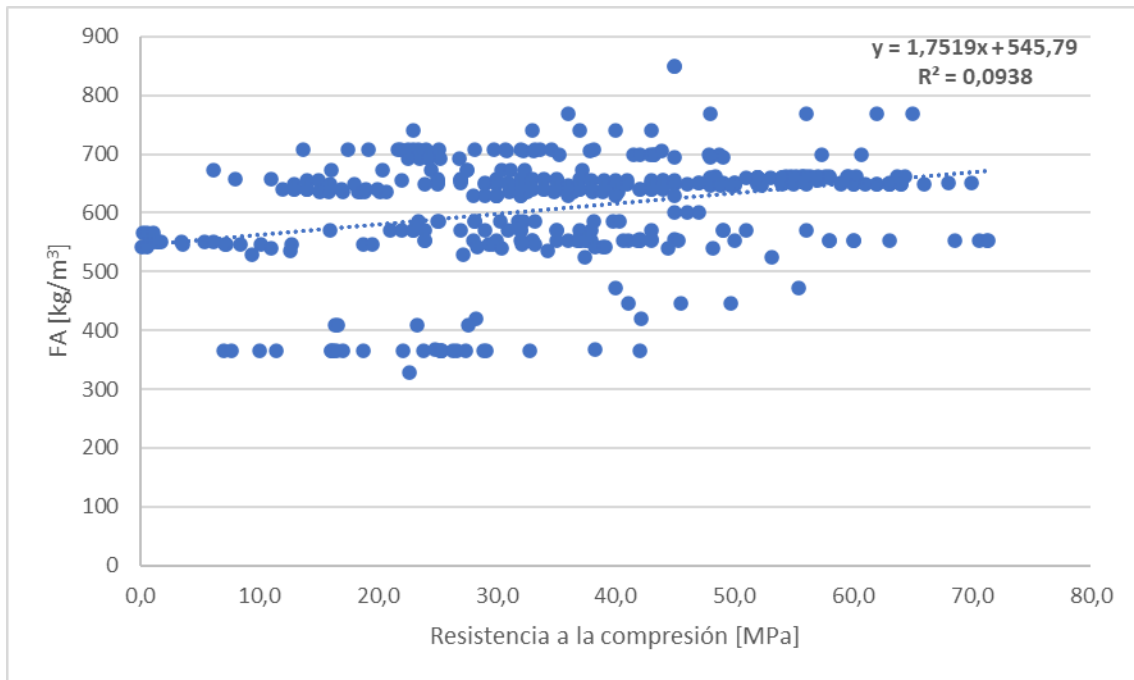


Figura 20. Relación entre las variables áridos finos y resistencia a la compresión.

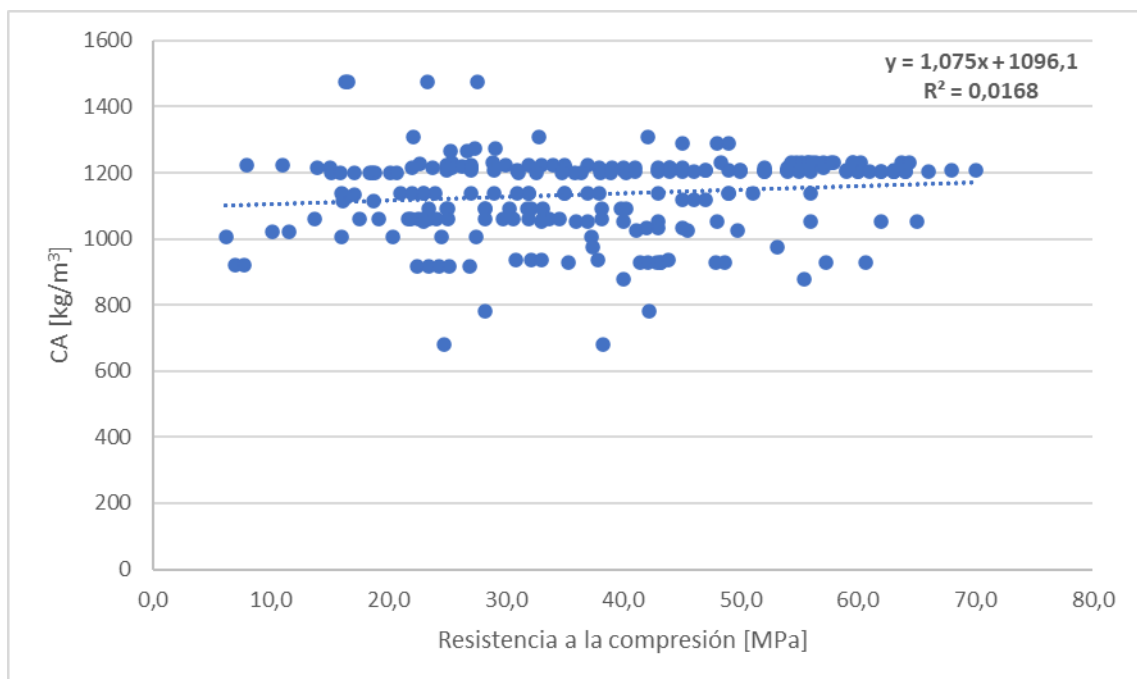


Figura 21. Relación entre las variables áridos gruesos y resistencia a la compresión.

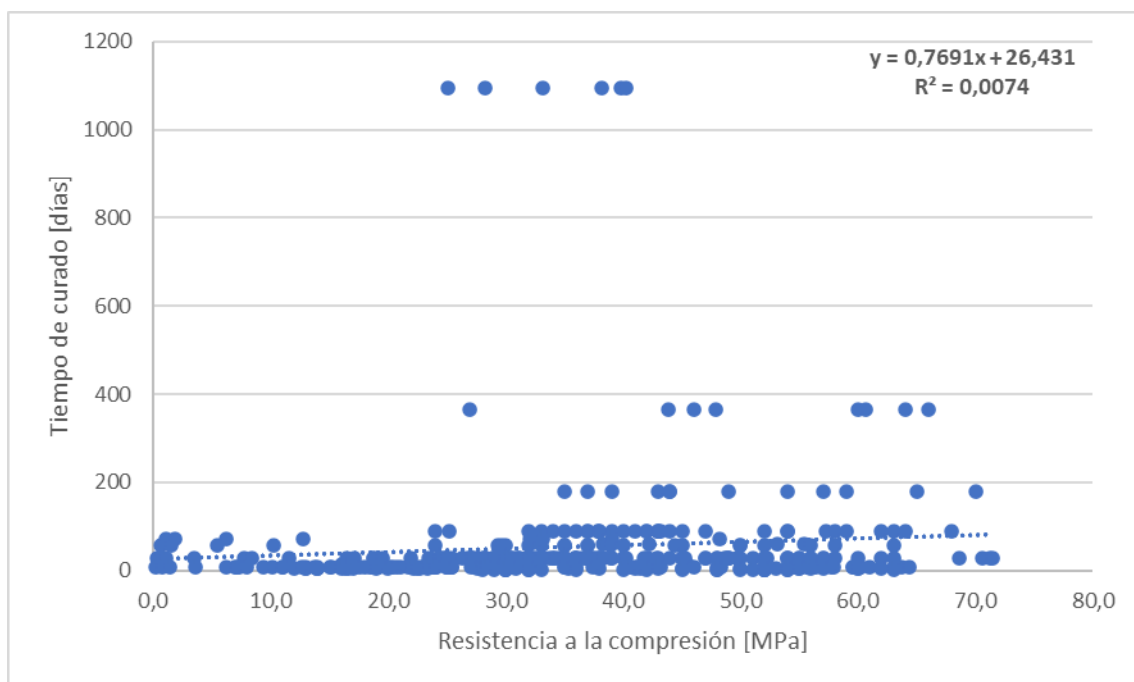


Figura 22. Relación entre las variables tiempo de curación y resistencia a la compresión.

En la tabla 9 se muestra el análisis de regresión al que se han sometido las 439 dosificaciones de hormigón geopolimérico.

Tabla 9. Análisis de regresión simple de los hormigones geopoliméricos.

Figura	Variable X	Variable Y	Recta de regresión	R <sup>2</sup>
18	Resistencia a la compresión (MPa)	Binders	$y = 0,6102x + 364,51$	0,0101
19		Áridos finos	$y = 0,5156x + 166,53$	0,0159
20		Áridos gruesos	$y = 1,7519x + 545,79$	0,0938
21		Solución alcalina	$y = 1,075x + 1.096,1$	0,0168
22		Tiempo de curado	$y = 0,7691x + 26,431$	0,0074

Del análisis de la tabla 9, se observa que todas las rectas de regresión tienen pendiente positiva y que sus coeficientes de determinación se encuentran en el rango [0,0074 - 0,0938].

#### 4.2.2. Morteros geopoliméricos

Solamente hay un único artículo científico referido a morteros geopoliméricos: el 13 (tabla 24).

Para el análisis de los datos, cuyos resultados se muestran en la tabla 10, se ha tenido en cuenta lo siguiente:

- *Binders*: en este artículo, como *binders*, solamente se han utilizado humo de sílice y cenizas de combustión de aceite de palma tratado.
- Áridos: al ser un mortero, solo hay áridos finos.
- Solución alcalina: se ha considerado que la solución alcalina es la suma del silicato de sodio y del hidróxido de sodio.

**Tabla 10. Análisis estadístico global de los morteros geopoliméricos.**

Parámetro	Muestra	Media	Desviación	Error
<b>Binders (kg/m<sup>3</sup>): humo de sílice + cenizas de combustión de aceite de palma tratado</b>	27	4.204	122,2	23,5
<b>Áridos (kg/m<sup>3</sup>): finos</b>	27	8.418	120,2	23,1
<b>Solución alcalina (kg/m<sup>3</sup>): Silicato de sodio + hidróxido de sodio</b>	27	2.773	94,1	18,1
<b>Tiempo de curado (días)</b>	27	4	2,5	0,5
<b>Resistencia a la compresión (MPa)</b>	27	25	5,6	1,1

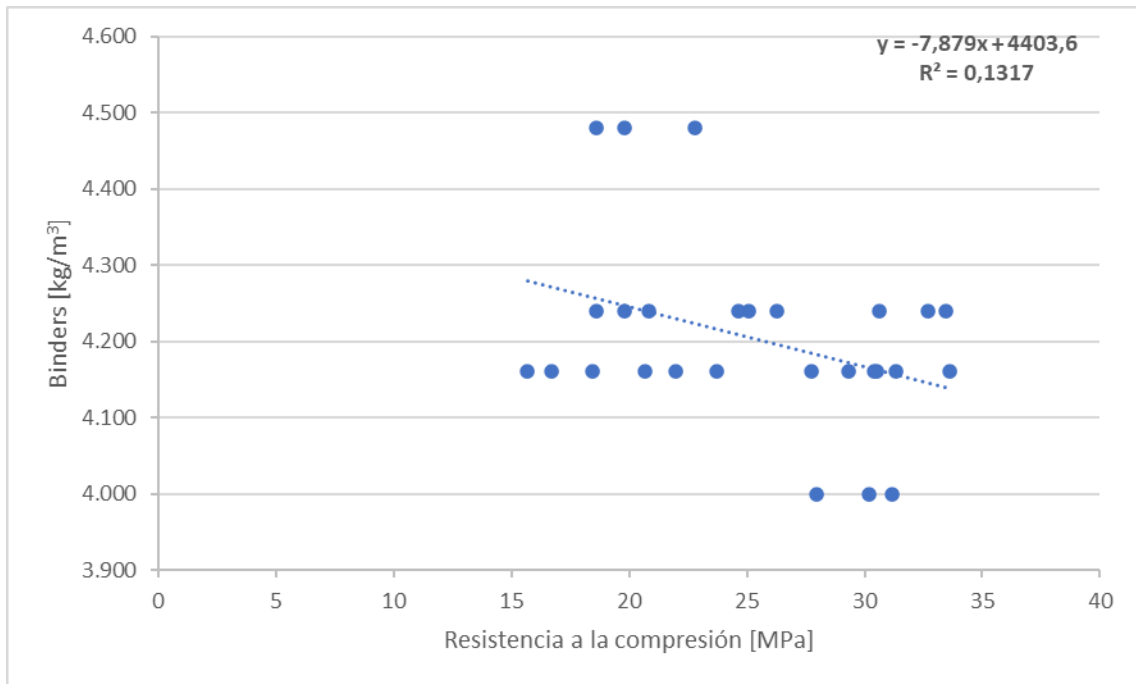


Figura 23. Relación entre las variables *binders* y resistencia a la compresión.

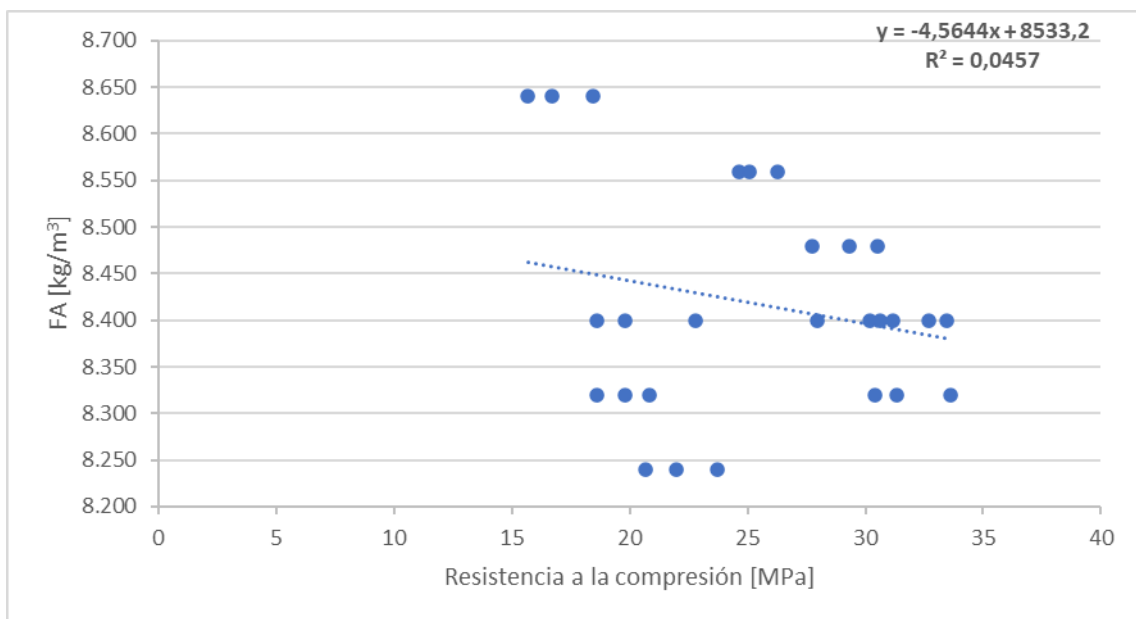


Figura 24. Relación entre las variables áridos finos y resistencia a la compresión.

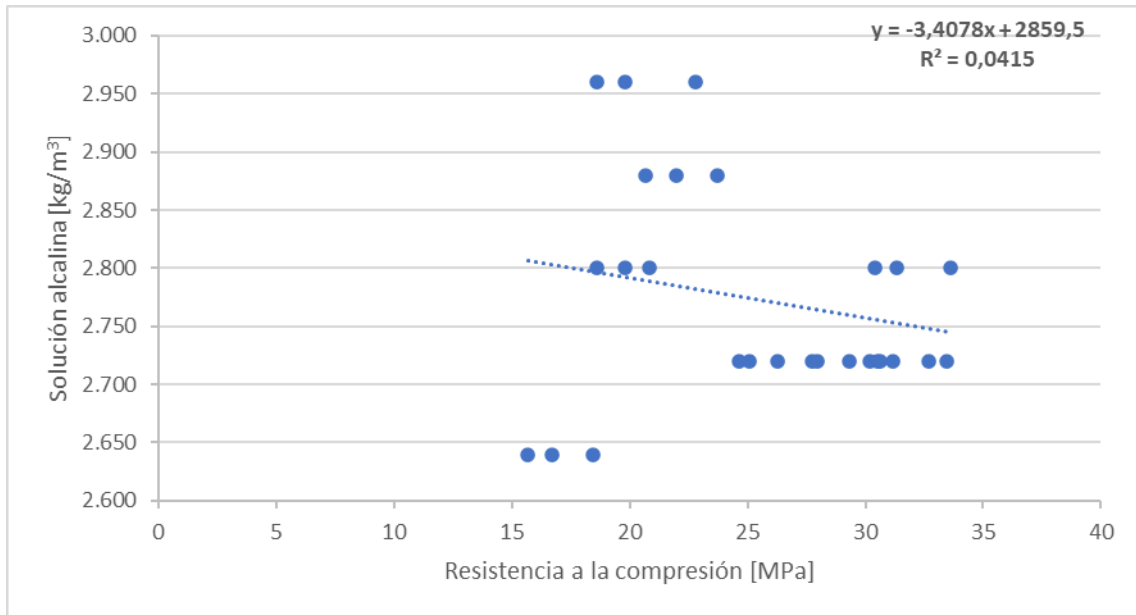


Figura 25. Relación entre las variables solución alcalina y resistencia a la compresión.

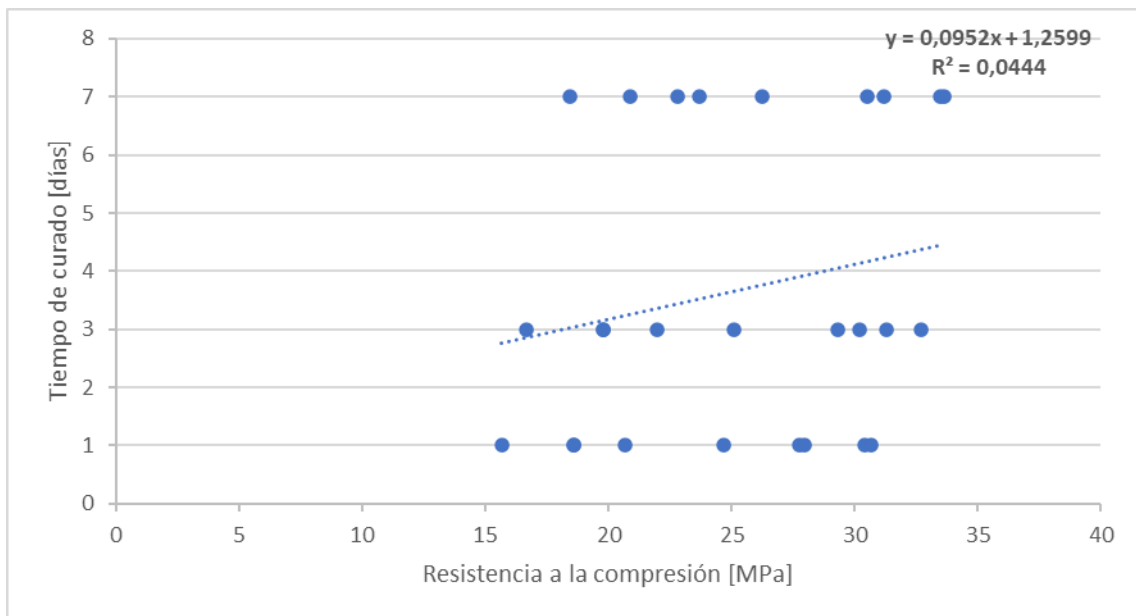


Figura 26. Relación entre las variables tiempo de curación y resistencia a la compresión.

En la tabla 11 se muestra el análisis de regresión al que se han sometido las 50 dosificaciones de mortero geopolimérico.

**Tabla 11. Análisis de regresión simple de los morteros geopoliméricos.**

Figura	Variable X	Variable Y	Recta de regresión	R <sup>2</sup>
23	Resistencia a la compresión (MPa)	<i>Binders</i>	$y = -7,879x + 4.403,6$	0,1317
24		Áridos finos	$y = -4,5644x + 8.533,2$	0,0457
25		Solución alcalina	$y = -3,4078x + 2.859,5$	0,0415
26		Tiempo de curado	$y = 0,0952x + 1,2599$	0,0444

Del análisis de la tabla 11, se observa que las rectas de regresión de las figuras 23, 24 y 25 tienen pendiente negativa, mientras que la de la figura 26 es positiva. Sus coeficientes de determinación se encuentran en el rango [0,0415 - 0,1317].

## 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

- **Hormigones geopoliméricos:**
  - El valor medio de las densidades de las cenizas volantes más las escorias, como **binders** más utilizados, de los hormigones geopoliméricos ( $387,4 \text{ kg/m}^3$ ) es muy parecido al de los **binders** de un hormigón convencional ( $300 - 400 \text{ kg/m}^3$ ) (España. Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, 2.021).
  - Los valores medios de las densidades de los **áridos finos y gruesos** ( $609,4 \text{ kg/m}^3$  y  $1.157,7 \text{ kg/m}^3$  respectivamente) se encuentran dentro de los rangos de los valores medios establecidos para los hormigones convencionales ( $600 - 700 \text{ kg/m}^3$  y  $1.000 - 1.200 \text{ kg/m}^3$  respectivamente) (Arroyo Portero, *et al.*, 2.018).
  - La media de las **resistencias a la compresión** de los hormigones geopoliméricos (36,2 MPa) es ligeramente superior a la de un hormigón convencional (30 – 35 MPa) (España. Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, 2.021).

La resistencia a la compresión a 90 días es, prácticamente, la que va a tener a 365 días (1 año). Entre el primer y el tercer año apenas se incrementa.

En el primer mes alcanza el 70 – 80 % de la resistencia a la compresión que tendrá al año; al tercer mes alcanza el 75 – 90 %; del tercer mes al año, el 95 – 100 %.

La forma de endurecimiento del hormigón no sigue un patrón lineal: los primeros días endurece a una velocidad muy rápido, pero esa velocidad de endurecimiento no se mantiene con el tiempo.

- **Morteros geopoliméricos**
  - La existencia de menos estudios de morteros geopoliméricos respecto de los hormigones geopoliméricos se debe, posiblemente, a que el interés en su producción no es tan relevante como en el caso de hormigones. Los morteros no necesitan, en la mayoría de sus aplicaciones, tanta resistencia como los hormigones y esa, probablemente, sea una de las razones por las que los estudios no se han centrado tanto en los morteros.
  - La cantidad de *binder*, típicamente cemento Pórtland, que se usa en un mortero convencional para revestir es 1 parte por 6 partes de árido, qué es menos que la que se usa en un hormigón convencional.
- **Análisis estadístico global:**
  - Los datos obtenidos no son “comunes” a una población estadística agrupada; por tanto, parece lógico que pueda haber desviaciones muy grandes. En los artículos científicos, cada autor ha seguido un criterio propio para la dosificación, amasado y curado. Esto se debe a que los hormigones y morteros geopoliméricos, al ser “relativamente nuevos”, no se encuentran estandarizados en las normas nacionales o internacionales, como sí lo están los hormigones y morteros convencionales. Sería conveniente que se estableciese una cierta normalización, aunque fuese solo de tipo informativo, para intentar que este tipo de materiales tuviesen unos parámetros definidos de dosificación.
- **Rectas de regresión:**
  - Los coeficientes de determinación de las 9 nuevas rectas de regresión se encuentran más próximos a 0 que a 1. Estos resultados indican que el ajuste no es perfecto y que el cálculo no logra modelar los datos con precisión.



- Gran cantidad de valores se alejan bastante de los valores medios: generan mucho ruido; por tanto, los ajustes de las rectas de regresión no son los esperados para las conclusiones expuestas anteriormente.
- Se propone, como una ampliación de este Trabajo Fin de Grado, eliminar aquellos valores paramétricos de las propiedades del conjunto de dosificaciones que se vayan muy por encima y/o muy por debajo de los valores medios; y acotar esos valores a los rangos de los valores estándar de las propiedades del hormigón convencional, para realizar un nuevo ajuste que respalde las conclusiones obtenidas.

Teniendo en cuenta que la finalidad de los geopolímeros es la de aprovechar determinados subproductos de origen industrial y agrícola como *binders*, para disminuir la producción de cemento Pórtland y así mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub>, queda demostrado que se obtiene un material cuyo desempeño mecánico es similar al de un material convencional.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Abdulrahman, H., Muhamad, R., Visintin, P. and Shukri, A.A. (2.022) “Mechanical properties and bond stress-slip behaviour of fly ash geopolymer concrete”, *Construction and Building Materials*, 327, 126.909.

Aly, A. M., El – Feky, M. S., Kohail, M. and Nasr, E – S. A. R. (2.019) “Performance of geopolymer concrete containing recycled rubber”, *Construction and Building Materials*, (207), pp. 136 – 144.

Arroyo Portero, J.C., Moran Cabre, F. y García Meseguer, A. (2.018) *Jiménez Montoya – Esencial. Hormigón Armado*. Madrid: Cinter Divulgación Técnica.

Aslani, F., ASCE, M., Deghani, A. and Asif, Z. (2.020) “Development of Lightweight Rubberized Geopolymer Concrete by Using Polystyrene and Recycled Crumb-Rubber Aggregates”, *Journal of. Materials in. Civil. Engineering.*, 32(2).

Bellum, R.R., Muniraj, K. and Madduru, S.R.C. (2.020) “Influence of slag on mechanical and durability properties of fly ash-based geopolymer concrete”, *Journal of the Korean Ceramic Society*, (57), pp. 530–545.

Clarivate Analytics (2.022) *Página web de la Web of Science*. Disponible en: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/basic-search> (Accedido: 20 de noviembre de 2.022).

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) (2.011) *Cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar o escorias*. Madrid: Ministerio de Fomento y Ministerio de Medio Ambiente.

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) (2012) *Humo de sílice*. Madrid: Ministerio de Fomento y Ministerio de Medio Ambiente.

Chindaprasirt, P. and Chalee, W. (2.014) “Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site”, *Construction and Building Materials*, (63), pp. 303–310.

Deb, P. S., Nath, P. and Sarjer, P. K. (2.014) “The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature”, *Materials and Design* (62), pp. 32 – 39.

Diccionario Español de Ingeniería (2.022) *Página web de la Real Academia de Ingeniería*. Disponible en: <https://diccionario.raing.es/es/lema/hormig%C3%B3n> (Accedido: 26 de diciembre de 2.022).

España. Ministerio de la Presidencia (2.016) “Real Decreto 256/2.016, de 10 de junio, por el que se aprueba la Instrucción para la recepción de cementos (RC-16)”, *Boletín Oficial del Estado, 25 de junio de 2.016* (153), pp. 45.755 – 45.824.

España. Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática (2.021) “Real Decreto 470/2.021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural”, *Boletín Oficial del Estado, 10 de agosto de 2.021* (190), pp. 97.664 – 99.452.

Fernández-Jiménez, A., Palomo Sánchez, A. (2.009) “Propiedades y aplicaciones de los cementos alcalinos”, *Ingeniería & Construcción* (24), pp. 213 – 232.

Gunasekara, C., Law, D.W. and Setunge, S. (2.016) “Long term permeation properties of different fly ash geopolymer concretes”, *Construction and Building Materials*, (124), pp. 352 – 362.

Gupta, N., Gupta, A., Saxena, K. K., Shukla, A. and Goyal, S.K. (2.021) “Mechanical and durability properties of geopolymer concrete composite at varying superplasticizer dosaje”, *Materials Today: Proceedings*, (44), pp. 12 – 16.

Hardjito, D. and Rangan, B.V. (2.005) “Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete”. Perth: Faculty of Engineering. Curtin University of Technology.

Husin, N. A., Bayuaji, R., Tajunninsa, Y., Darmawan, M. S. and Subprobo, P. (2.020) “Performance of high calcium fly ash based geopolymer concrete in chloride environment”, *International Journal of Geomate*, (19), pp. 107 – 113.

Joseph, B. and Mathew, G. (2.012) "Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete", *Scientia Iranica*, 19 (5), pp. 1188–1194.

Lizán Jimenez, J., Paya Bernabeu, J. J., Borrachero Rosado, M.V., Bonilla Salvador, M. M. y Monzó Balbuena, J. M. (2.014) "*Utilización de residuos en hormigones geopoliméricos para uso en bloques de bajo coste económico y medioambiental*". Valencia: Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón. Universitat Politècnica de Valencia.

Mejía de Gutiérrez, R., Rodríguez Erich, D. y Villaquirán-Caicedo, M. A. (2.015) "Evaluación microestructural de geopolímeros basados en metacaolín y fuentes alternativas de sílice expuestos a temperaturas altas", *Ingeniería Investigación y Tecnología* (15), pp. 113 – 122.

Mehta, A., and Siddique, R. (2.017) "Properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete incorporating OPC as partial replacement of fly ash", *Construction and Building Materials*, (150), pp. 792 – 807.

Metha, A., Siddique, R., Sing, B.P., Aggoun, S., Lagód, G. and Barnat – Hunek, D. (2.017) "Influence of various parameters on strength and absorption properties of fly ash based geopolymer concrete designed by Taguchi method", *Construction and Building Materials*, (150), pp. 817 – 824.

Mijarsh, M. J. A., Megat Johari, M. A. and Ahmad, Z. A. (2.014) "Synthesis of geopolymer from large amounts of treated palm oil fuel ash: Application of the Taguchi method in investigating the main parameters affecting compressive strength", *Construction and Building Materials* (52), pp. 473 – 481.

Nuruddin, M. F., Memon, F. A., Shafiq, N. and Demie, S. (2.014), "Drying Shrinkage of Fly Ash-Based Self-Compacting Geopolymer Concrete", *Applied Mechanics and Materials*, (567), pp 362-368.

Okoye, F. N., Prakash, S. and Singh, N.B. (2.017) "Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume", *Journal of Cleaner Production*, (149), pp. 1.062-1.067.

Pastor – Barriuso, R. (2.012) *Bioestadística*. Madrid: Escuela Nacional de Sanidad y Centro Nacional de Epidemiología – Instituto de Salud Carlos III.

Ramujee, K. and PothaRaju, M. (2.017) "Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Composites", *Materials Today: Proceedings*, (4), pp. 2.937 – 2.945.

Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (2.006) *Diccionario Esencial de las Ciencias*.

Ryu, G.S., Lee, Y. B., Koh, K.T. and Chung, Y. S. (2.013) "The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators", *Construction and Building Materials* (47), pp. 409 – 418.

Sarker, P.K., Haque, R. and Ramgolam, K.V. (2.013) "Fracture behaviour of heat cured fly ash based geopolymer concrete", *Materials and Design*, (44), pp. 580–586.

Shaikh, F.U.A. (2.016) "Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates", *International Journal of Sustainable Built Environment*, (5), PP. 277 – 287.

Sistema Español de Inventario de Emisiones: Metodologías de estimación de emisiones (2.020) *Página web del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/metodologias-estimacion-emisiones/> (Accedido: 4 de enero de 2.023).

Valizadeh, A., Aslani, F., Asif, Z. and Roso, M. (2.019) "Development of Heavyweight Self-Compacting Concrete and Ambient-Cured Heavyweight Geopolymer Concrete Using Magnetite Aggregates", *Materials*, 12, 1.035.

Vora, P. R. and Dave, U. V. (2.013) "Parametric Studies on Compressive Strength of Geopolymer Concrete", *Procedia Engineering*, (51), pp. 210 – 219.

Waqas, R.M., Butt, F., Danish, A., Alqurashi, M., Mosaberpanah, M.A., Masood, B. and Hussein, E.E. (2.021) "Influence of Bentonite on Mechanical and Durability Properties of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete with Natural and Recycled Aggregates", *Materials*, 14, 7.790.

Xie, T. and Ozbakkaloglu, T. (2015) "Behavior of flow-calcium fly ash based geopolymer concrete cured at ambient temperature", *Ceramics International*, (41), pp. 5945–5958.

Yost, J. R., Radlinska, A., Ernst, S. and Salera, M. (2013) "Structural behavior of alkali activated fly ash concrete. Part 1: mixture design, material properties and sample fabrication", *Materials and Structures*, (46), pp. 435 – 447.

## 7. ANEXO

### NOTA:

En *binders*, OPC hace referencia a cemento Pórtland ordinario; FA a cenizas volantes; GGBFS a escorias; SF a humo de sílice; TPOFA a cenizas de combustión del aceite de palma tratado.

En *áridos*, FA significa áridos finos; CA, áridos gruesos.

Tabla 12. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 1.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )	Áridos (kg/m <sup>3</sup> )		Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )		Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	FA	FA	CA	Silicato de sodio	Hidróxido de sodio		
1	525	707	1.060	96	64	7	25,1
	525	707	1.060	96	64	28	38,2
	510	707	1.060	96	64	7	24,1
	510	707	1.060	96	64	28	34,6
	495	707	1.060	96	64	7	23,4
	495	707	1.060	96	64	28	33,7
	487	707	1.060	96	64	7	23,0
	487	707	1.060	96	64	28	33,2
	475	707	1.060	96	64	7	22,6
	475	707	1.060	96	64	28	32,0
	450	707	1.060	96	64	7	21,7
	450	707	1.060	96	64	28	30,7
	440	707	1.060	96	64	7	19,2
	440	707	1.060	96	64	28	29,8
	430	707	1.060	96	64	7	17,5
	430	707	1.060	96	64	28	28,2
	400	707	1.060	96	64	7	13,7
	400	707	1.060	96	64	28	21,9

Tabla 13. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 2.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )	Áridos (kg/m <sup>3</sup> )		Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )		Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	GGBFS	FA	CA	Silicato de sodio	Hidróxido de sodio		
2	500	525	975	75,53	195,204	28	37,4
	500	525	975	75,53	195,204	60	53,13
	500	472	877,5	75,53	195,204	28	40
	500	472	877,5	75,53	195,204	60	55,4
	500	420	780	75,53	195,204	28	28,3
	500	420	780	75,53	195,204	60	42,2
	500	367	682,5	75,53	195,204	28	24,8
	500	367	682,5	75,53	195,204	60	38,3



Tabla 14. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 3.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )		Áridos (kg/m <sup>3</sup> )		Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )		Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	GGBFS	FA	FA	CA	Silicato de sodio	Hidróxido de sodio		
3	180	270	328,5	1.228,5	103,5	40,5	3	22,7
	225	225	409,5	1.476	130,5	49,5	3	16,4
	225	225	409,5	1.476	130,5	49,5	3	16,6
	225	225	409,5	1.476	162	63	3	27,6
	225	225	409,5	1.476	193,5	76,5	3	23,3
	198	252	364,5	1.309,5	130,5	49,5	3	22,1
	198	252	364,5	1.309,5	130,5	49,5	7	32,8
	198	252	364,5	1.309,5	130,5	49,5	28	42,1
	198	252	364,5	1.215	130,5	49,5	7	23,8
	198	252	364,5	1.215	130,5	49,5	28	25,4
	198	252	364,5	1.116	130,5	49,5	7	16,1
	198	252	364,5	1.116	130,5	49,5	28	18,8
	198	252	364,5	1.021,5	130,5	49,5	7	10,1
	198	252	364,5	1.021,5	130,5	49,5	28	11,5
	198	252	364,5	922,5	130,5	49,5	7	7,0
	198	252	364,5	922,5	130,5	49,5	28	7,7
	198	252	364,5	1.273,5	130,5	49,5	7	27,4
	198	252	364,5	1.273,5	130,5	49,5	28	29,1
	198	252	364,5	1.233	130,5	49,5	7	25,4
	198	252	364,5	1.233	130,5	49,5	28	28,9
	198	252	364,5	1.264,5	130,5	49,5	7	25,3
	198	252	364,5	1.264,5	130,5	49,5	28	26,7
	198	252	364,5	1.219,5	130,5	49,5	7	25,4
	198	252	364,5	1.219,5	130,5	49,5	28	26,3
198	252	364,5	1.134	130,5	49,5	7	16,1	
198	252	364,5	1.134	130,5	49,5	28	17,1	
198	252	364,5	1.125	130,5	49,5	7	16,3	
198	252	364,5	1.125	130,5	49,5	28	16,5	

Tabla 15. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 4.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )		Áridos (kg/m <sup>3</sup> )		Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )		Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	GGBFS	FA	FA	CA	Silicato de sodio	Hidróxido de sodio		
4	38	342	570	1.140	108,57	43,43	7	16,0
	38	342	570	1.140	108,57	43,43	28	27,0
	76	304	570	1.140	108,57	43,43	7	21,0
	76	304	570	1.140	108,57	43,43	28	37,0
	114	266	570	1.140	108,57	43,43	7	22,0
	114	266	570	1.140	108,57	43,43	28	35,0
	152	228	570	1.140	108,57	43,43	7	23,0
	152	228	570	1.140	108,57	43,43	28	38,0
	190	190	570	1.140	108,57	43,43	7	32,0
	190	190	570	1.140	108,57	43,43	28	49,0
	38	342	570	1.140	122,14	48,86	7	23,0
	38	342	570	1.140	122,14	48,86	28	29,0
	76	304	570	1.140	122,14	48,86	7	24,0
	76	304	570	1.140	122,14	48,86	28	31,0
	114	266	570	1.140	122,14	48,86	7	32,0
	114	266	570	1.140	122,14	48,86	28	49,0
	152	228	570	1.140	122,14	48,86	7	35,0
	152	228	570	1.140	122,14	48,86	28	51,0
190	190	570	1.140	122,14	48,86	7	43,0	
190	190	570	1.140	122,14	48,86	28	56,0	

Tabla 16. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 5.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )	Áridos (kg/m <sup>3</sup> )		Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )		Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	FA	FA	CA	Silicato de sodio	Hidróxido de sodio		
5	390	585	1.092	167	67	28	23,4
	390	585	1.092	167	67	1.095 (3 años)	25,1
	390	585	1.092	167	67	28	25,0
	390	585	1.092	167	67	1.095 (3 años)	28,2
	390	585	1.092	167	67	28	28,2
	390	585	1.092	167	67	1.095 (3 años)	33,2
	390	585	1.092	167	67	28	31,8
	390	585	1.092	167	67	1.095 (3 años)	39,8
	390	585	1.092	167	67	28	32,2
	390	585	1.092	167	67	1.095 (3 años)	40,3
	390	585	1.092	167	67	28	30,3
	390	585	1.092	167	67	1.095 (3 años)	38,2

Tabla 17. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 6.

Artículo	Binders (kg/m³)			Áridos (kg/m³)		Solución alcalina (kg/m³)		Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	GGBFS	FA	OPC	FA	CA	Silicato de sodio	Hidróxido de sodio		
6	40	360	-	651	1.209	114,3	45,7	7	27,0
	40	360	-	651	1.209	114,3	45,7	28	40,0
	40	360	-	651	1.209	114,3	45,7	56	45,0
	40	360	-	651	1.209	114,3	45,7	90	47,0
	40	360	-	651	1.209	114,3	45,7	180	49,0
	80	320	-	651	1.209	114,3	45,7	7	31,0
	80	320	-	651	1.209	114,3	45,7	28	47,0
	80	320	-	651	1.209	114,3	45,7	56	50,0
	80	320	-	651	1.209	114,3	45,7	90	54,0
	80	320	-	651	1.209	114,3	45,7	180	59,0
	40	360	-	651	1.209	96	64	7	25,0
	40	360	-	651	1.209	96	64	28	43,0
	40	360	-	651	1.209	96	64	56	50,0
	40	360	-	651	1.209	96	64	90	52,0
	40	360	-	651	1.209	96	64	180	54,0
	80	320	-	651	1.209	96	64	7	29,0
	80	320	-	651	1.209	96	64	28	54,0
	80	320	-	651	1.209	96	64	56	63,0
	80	320	-	651	1.209	96	64	90	68,0
	80	320	-	651	1.209	96	64	180	70,0
	0	400	-	658	1.222	100	40	7	11,0
	0	400	-	658	1.222	100	40	28	25,0
	0	400	-	658	1.222	100	40	56	30,0
	0	400	-	658	1.222	100	40	90	33,0
	0	400	-	658	1.222	100	40	180	35,0
	40	360	-	655	1.216	100	40	7	15,0
	40	360	-	655	1.216	100	40	28	27,0
	40	360	-	655	1.216	100	40	56	35,0

40	360	-	655	1.216	100	40	90	38,0
40	360	-	655	1.216	100	40	180	39,0
80	320	-	655	1.216	100	40	7	22,0
80	320	-	655	1.216	100	40	28	35,0
80	320	-	655	1.216	100	40	56	40,0
80	320	-	655	1.216	100	40	90	43,0
80	320	-	655	1.216	100	40	180	44,0
0	400	-	658	1.222	84	56	7	8,0
0	400	-	658	1.222	84	56	28	27,0
0	400	-	658	1.222	84	56	56	32,0
0	400	-	658	1.222	84	56	90	34,0
0	400	-	658	1.222	84	56	180	37,0
40	360	-	655	1.216	84	56	7	14,0
40	360	-	655	1.216	84	56	28	27,0
40	360	-	655	1.216	84	56	56	35,0
40	360	-	655	1.216	84	56	90	41,0
40	360	-	655	1.216	84	56	180	44,0
80	320	-	655	1.216	84	56	7	25,0
80	320	-	655	1.216	84	56	28	45,0
80	320	-	655	1.216	84	56	56	52,0
80	320	-	655	1.216	84	56	90	54,0
80	320	-	655	1.216	84	56	180	57,0
-	-	446	768	1.054	-	-	7	36,0
-	-	446	768	1.054	-	-	28	48,0
-	-	446	768	1.054	-	-	56	56,0
-	-	446	768	1.054	-	-	90	62,0
-	-	446	768	1.054	-	-	180	65,0
-	-	366.4	740	1.054	-	-	7	23,0
-	-	366.4	740	1.054	-	-	28	33,0
-	-	366.4	740	1.054	-	-	56	37,0
-	-	366.4	740	1.054	-	-	90	40,0
-	-	366.4	740	1.054	-	-	180	43,0

Tabla 18. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 7.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )	Áridos (kg/m <sup>3</sup> )		Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )		Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	FA	FA	CA	Silicato de sodio	Hidróxido de sodio		
7	416	699	927	292	65	3	41,5
	416	699	927	292	65	7	43,2
	416	699	927	292	65	28	48,7
	416	699	927	292	65	90	57,3
	416	699	927	292	65	365	60,7
	416	699	927	292	65	3	35,3
	416	699	927	292	65	7	42,1
	416	699	927	292	65	28	42,9
	416	699	927	292	65	90	43,2
	416	699	927	292	65	365	47,9
	420	706	936	241	92	3	30,9
	420	706	936	241	92	7	32,2
	420	706	936	241	92	28	33,1
	420	706	936	241	92	90	37,8
	420	706	936	241	92	365	43,9
	412	693	918	342	39	3	22,5
	412	693	918	342	39	7	23,5
	412	693	918	342	39	28	24,3
	412	693	918	342	39	90	25,2
	412	693	918	342	39	365	26,9

Tabla 19. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 8.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )		Áridos (kg/m <sup>3</sup> )		Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )		Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	GGBFS	FA	FA	CA	Silicato de sodio	Hidróxido de sodio		
8	398	-	636	1.202	-	-	7	18,6
	398	-	636	1.202	-	-	28	36,4
	398	-	636	1.202	-	-	7	18,9
	398	-	636	1.202	-	-	28	38,1
	398	-	636	1.202	-	-	7	20,2
	398	-	636	1.202	-	-	28	38,9
	398	-	636	1.202	-	-	7	20,7
	398	-	636	1.202	-	-	28	40,2
	199	199	636	1.202	-	-	7	15,1
	199	199	636	1.202	-	-	28	31,1
	199	199	636	1.202	-	-	7	15,9
	199	199	636	1.202	-	-	28	32,6
	199	199	636	1.202	-	-	7	17,1
	199	199	636	1.202	-	-	28	34,8
	199	199	636	1.202	-	-	7	18,4
	199	199	636	1.202	-	-	28	35,9

Tabla 20. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 9.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )	Áridos (kg/m <sup>3</sup> )		Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )		Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	FA	FA	CA	Silicato de sodio	Hidróxido de sodio		
9	468	672	1.008	96,41	31,97	7	6,16
	468	672	1.008	96,41	31,97	14	16,08
	468	672	1.008	96,41	31,97	28	24,50
	468	672	1.008	67,49	55,94	7	20,39
	468	672	1.008	67,49	55,94	14	27,53
	468	672	1.008	67,49	55,94	28	37,25
	550	446,15	1.025,65	61,86	51,28	7	41,07
	550	446,15	1.025,65	61,86	51,28	14	45,53
	550	446,15	1.025,65	61,86	51,28	28	49,70

Tabla 21. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 10.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )	Áridos (kg/m <sup>3</sup> )		Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )	Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	FA	FA	CA			
10	420,57	555,73	1.031,99	231,31	3	42
	420,57	555,73	1.031,99	231,31	7	43
	420,57	555,73	1.031,99	231,31	28	45
	365,16	602,04	1.117,99	210,84	3	45
	365,16	602,04	1.117,99	210,84	7	46
	365,16	602,04	1.117,99	210,84	28	47
	309,85	648,35	1.203,99	170,41	3	52
	309,85	648,35	1.203,99	170,41	7	54
	309,85	648,35	1.203,99	170,41	28	56
	254,54	694,66	1.289,99	139,99	3	45
	254,54	694,66	1.289,99	139,99	7	48
	254,54	694,66	1.289,99	139,99	28	49



Tabla 22. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 11.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )		Áridos (kg/m <sup>3</sup> )		Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )	Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	FA	OPC	FA	CA			
11	310	-	649	1.204	171	3	41,0
	310	-	649	1.204	171	7	43,0
	310	-	649	1.204	171	28	44,0
	310	-	649	1.204	171	90	45,0
	310	-	649	1.204	171	365	46,0
	279	31	649	1.204	171	3	50,0
	279	31	649	1.204	171	7	52,0
	279	31	649	1.204	171	28	55,0
	279	31	649	1.204	171	90	59,0
	279	31	649	1.204	171	365	60,0
	248	62	649	1.204	171	3	62,0
	248	62	649	1.204	171	7	63,0
	248	62	649	1.204	171	28	63,0
	248	62	649	1.204	171	90	64,0
	248	62	649	1.204	171	365	66,0
	217	93	649	1.204	171	3	60,0
	217	93	649	1.204	171	7	61,0
	217	93	649	1.204	171	28	62,0
	217	93	649	1.204	171	90	63,0
	217	93	649	1.204	171	365	64,0

Tabla 23. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 12.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )		Áridos (kg/m <sup>3</sup> )		Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )	Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	FA	OPC	FA	CA			
12	302,1	15,9	662	1.230	175	7	48,36
	302,1	15,9	662	1.230	175	7	54,79
	302,1	15,9	662	1.230	175	7	56,37
	302,1	15,9	662	1.230	175	7	55,69
	286,2	31,8	662	1.230	175	7	54,31
	286,2	31,8	662	1.230	175	7	55,24
	286,2	31,8	662	1.230	175	7	59,57
	286,2	31,8	662	1.230	175	7	57,94
	270,3	47,7	662	1.230	175	7	57,06
	270,3	47,7	662	1.230	175	7	60,24
	270,3	47,7	662	1.230	175	7	55,76
	270,3	47,7	662	1.230	175	7	59,53
	254,4	63,6	662	1.230	175	7	57,69
	254,4	63,6	662	1.230	175	7	63,67
	254,4	63,6	662	1.230	175	7	64,39
	254,4	63,6	662	1.230	175	7	56,02

Tabla 24. Parámetros de las dosificaciones de morteros geopoliméricos del artículo 13.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )		Áridos (kg/m <sup>3</sup> )	Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )		Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	SF	TPOFA	FA	Silicato de sodio	Hidróxido de sodio		
13	160	4.000	8.240	1.920	960	1	20,65
	160	4.000	8.240	1.920	960	3	21,98
	160	4.000	8.240	1.920	960	7	23,7
	320	3.920	8.320	1.840	960	1	18,60
	320	3.920	8.320	1.840	960	3	19,80
	320	3.920	8.320	1.840	960	7	20,86
	400	3.760	8.640	1.040	1.600	1	15,67
	400	3.760	8.640	1.040	1.600	3	16,69
	400	3.760	8.640	1.040	1.600	7	18,42
	160	4.320	8.400	1.200	1.760	1	18,59
	160	4.320	8.400	1.200	1.760	3	19,79
	160	4.320	8.400	1.200	1.760	7	22,79
	320	3.840	8.320	2.000	800	1	30,39
	320	3.840	8.320	2.000	800	3	31,31
	320	3.840	8.320	2.000	800	7	33,63
	320	3.840	8.480	1.360	1.360	1	27,74
	320	3.840	8.480	1.360	1.360	3	29,33
	320	3.840	8.480	1.360	1.360	7	30,52
	240	4.000	8.400	1.920	800	1	30,65
	240	4.000	8.400	1.920	800	3	32,70
	240	4.000	8.400	1.920	800	7	33,45
	240	3.760	8.400	1.600	1.120	1	27,94
	240	3.760	8.400	1.600	1.120	3	30,19
	240	3.760	8.400	1.600	1.120	7	31,19
320	3.920	8.560	1.120	1.600	1	24,66	
320	3.920	8.560	1.120	1.600	3	25,10	
320	3.920	8.560	1.120	1.600	7	26,25	

160	3.920	8.400	1.360	1.360	1	17,81
160	3.920	8.400	1.360	1.360	3	18,97
160	3.920	8.400	1.360	1.360	7	20,18
400	3.920	8.400	1.680	1.120	1	18,69
400	3.920	8.400	1.680	1.120	3	19,90
400	3.920	8.400	1.680	1.120	7	20,18
320	3.760	8.560	1.520	1.040	1	32,73
320	3.760	8.560	1.520	1.040	3	33,72
320	3.760	8.560	1.520	1.040	7	35,86
320	3.600	8.480	1.840	720	1	37,77
320	3.600	8.480	1.840	720	3	39,97
320	3.600	8.480	1.840	720	7	42,15
400	3.760	8.400	1.920	800	1	18,91
400	3.760	8.400	1.920	800	3	19,80
400	3.760	8.400	1.920	800	7	20,92
480	3.440	8.800	1.200	1.200	1	27,71
480	3.440	8.800	1.200	1.200	3	29,20
480	3.440	8.800	1.200	1.200	7	31,94
160	3.600	8.640	1.520	960	1	36,95
160	3.600	8.640	1.520	960	3	38,26
160	3.600	8.640	1.520	960	7	39,77
240	4.000	8.320	1.680	1.120	1	26,2
240	4.000	8.320	1.680	1.120	3	28,27
240	4.000	8.320	1.680	1.120	7	29,55
240	3.760	8.480	1.760	880	1	30,65
240	3.760	8.480	1.760	880	3	31,98
240	3.760	8.480	1.760	880	7	34,91
240	4.160	8.320	1.440	1.440	1	19,9
240	4.160	8.320	1.440	1.440	3	20,85
240	4.160	8.320	1.440	1.440	7	23,43
160	3.760	8.480	1.840	720	1	30,21
160	3.760	8.480	1.840	720	3	33,01

	160	3.760	8.480	1.840	720	7	35,02
	400	3.600	8.640	1.680	800	1	31,8
	400	3.600	8.640	1.680	800	3	33,57
	400	3.600	8.640	1.680	800	7	35,63
	400	3.520	8.720	1.040	1.520	1	24,38
	400	3.520	8.720	1.040	1.520	3	26,29
	400	3.520	8.720	1.040	1.520	7	28,6
	320	3.760	8.560	1.360	1.360	1	26,65
	320	3.760	8.560	1.360	1.360	3	27,77
	320	3.760	8.560	1.360	1.360	7	30,55
	320	3.680	8.560	1.680	880	1	41,82
	320	3.680	8.560	1.680	880	3	42,62
	320	3.680	8.560	1.680	880	7	44,74
	240	3.680	8.640	1.040	1.600	1	27,26
	240	3.680	8.640	1.040	1.600	3	28,70
	240	3.680	8.640	1.040	1.600	7	31,44

Tabla 25. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 14.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )		Áridos (kg/m <sup>3</sup> )		Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )		Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	FA	SF	FA	CA	Silicato de sodio	Hidróxido de sodio		
14	400	-	850	950	143	57	28	45
	360	40	850	950	143	57	28	45

Tabla 26. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 15.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )			Áridos (kg/m <sup>3</sup> )		Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )		Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	SF	FA	OPC	FA	CA	Silicato de sodio	Hidróxido de sodio		
15	-	400	-	554	1.293	113	45	1	33,0
	-	400	-	554	1.293	113	45	3	30,0
	-	400	-	554	1.293	113	45	28	28,0
	-	400	-	554	1.293	113	45	56	24,0
	-	400	-	554	1.293	113	45	90	24,0
	40	360	-	554	1.293	113	45	1	42,0
	40	360	-	554	1.293	113	45	3	38,0
	40	360	-	554	1.293	113	45	28	36,0
	40	360	-	554	1.293	113	45	56	37,0
	40	360	-	554	1.293	113	45	90	37,0
	80	320	-	554	1.293	113	45	1	63,0
	80	320	-	554	1.293	113	45	3	60,0
	80	320	-	554	1.293	113	45	28	60,0
	80	320	-	554	1.293	113	45	56	58,0
	80	320	-	554	1.293	113	45	90	58,0
	-	-	400	554	1.293	-	-	1	50,0
	-	-	400	554	1.293	-	-	3	43,0
	-	-	400	554	1.293	-	-	28	42,0
	-	-	400	554	1.293	-	-	56	33,0
	-	-	400	554	1.293	-	-	90	32,0

Tabla 27. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 16.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )		Áridos (kg/m <sup>3</sup> )		Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )		Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	FA	OPC	FA	CA	Silicato de sodio	Hidróxido de sodio		
16	327	-	672	1.248	108,67	54,33	28	30,4
	327	-	672	1.248	108,67	54,33	28	31,2
	327	-	672	1.248	108,67	54,33	28	32,4
	394,3	-	646,8	1.201,2	112,64	45,06	28	50,0
	394,3	-	646,8	1.201,2	112,64	45,06	28	49,69
	394,3	-	646,8	1.201,2	112,64	45,06	28	52,28
	408,9	-	554	1.294	102,22	40,89	28	71,2
	408,9	-	554	1.294	102,22	40,89	28	70,6
	408,9	-	554	1.294	102,22	40,89	28	71,4
	-	327	672	1.248	-	-	28	27,5
	-	394,3	646,8	1.201,2	-	-	28	48,8
	-	408,9	554	1.294	-	-	28	68,6

Tabla 28. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 17.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )	Áridos (kg/m <sup>3</sup> )		Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )		Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	FA	FA	CA	Silicato de sodio	Hidróxido de sodio		
17	408	647	1.201	93	62	28	32
	408	647	1.201	93	62	28	36
	408	647	1.201	103	68	28	48

Tabla 29. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 18.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )	Áridos (kg/m <sup>3</sup> )		Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )		Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	FA	FA	CA	Silicato de sodio	Hidróxido de sodio		
18	408	554	1233	118	47	7	41,1
	408	554	1233	118	47	28	45,3
	408	554	1231	118	47	7	40,6
	408	554	1231	118	47	28	41,8
	408	554	1232	118	47	7	37,4
	408	554	1232	118	47	28	37,6
	408	554	1234	118	47	7	35,0
	408	554	1234	118	47	28	36,8

Tabla 30. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 19.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )		Áridos (kg/m <sup>3</sup> )		Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )		Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	GGBFS	FA	FA	CA	Silicato de sodio	Hidróxido de sodio		
19	40	360	650	1.210	114,3	45,7	7	16
	40	360	650	1.210	114,3	45,7	28	29
	40	360	650	1.474	114,3	45,7	7	24
	40	360	650	1.474	114,3	45,7	28	32
	40	360	650	1.596	114,3	45,7	7	13
	40	360	650	1.596	114,3	45,7	28	25
	40	360	650	1.692	114,3	45,7	7	18
	40	360	650	1.692	114,3	45,7	28	30



Tabla 31. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 20.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )	Áridos (kg/m <sup>3</sup> )		Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )		Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	FA	FA	CA	Silicato de sodio	Hidróxido de sodio		
20	428	630	1.170	122	49	1	30
	444	630	1.170	111	44	1	30
	428	630	1.170	114	57	1	40
	428	630	1.170	122	49	1	28
	428	630	1.170	122	49	2	32
	428	630	1.170	122	49	2	32
	428	630	1.170	122	49	2	30
	428	630	1.170	122	49	2	29
	428	630	1.170	122	49	2	36
	428	630	1.170	122	49	2	45

Tabla 32. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 21.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )	Áridos (kg/m <sup>3</sup> )		Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )		Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	FA	FA	CA	Silicato de sodio	Hidróxido de sodio		
21	425	640	1.200	107	53	3	19,0
	425	640	1.200	107	53	28	38,0
	425	640	1.200	107	53	90	42,0
	404	640	1.200	107	53	3	20,0
	404	640	1.200	107	53	28	39,0
	404	640	1.200	107	53	90	44,0
	383	640	1.200	107	53	3	17,0
	383	640	1.200	107	53	28	37,0
	383	640	1.200	107	53	90	43,0
	361	640	1.200	107	53	3	16,0
	361	640	1.200	107	53	28	36,0
	361	640	1.200	107	53	90	42,0
	340	640	1.200	107	53	3	14,0
	340	640	1.200	107	53	28	35,0
	340	640	1.200	107	53	90	43,0
	425	640	1.080	107	53	3	14,0
	425	640	1.080	107	53	28	32,0
	425	640	1.080	107	53	90	35,0
	404	640	1.080	107	53	3	14,0
	404	640	1.080	107	53	28	34,0
	404	640	1.080	107	53	90	36,0
	383	640	1.080	107	53	3	13,0
	383	640	1.080	107	53	28	34,0
	383	640	1.080	107	53	90	37,0
361	640	1.080	107	53	3	13,0	
361	640	1.080	107	53	28	33,0	
361	640	1.080	107	53	90	38,0	
340	640	1.080	107	53	3	12,0	

	340	640	1.080	107	53	28	32,0
	340	640	1.080	107	53	90	39,0

Tabla 33. Parámetros de las dosificaciones de hormigones geopoliméricos del artículo 22.

Artículo	Binders (kg/m <sup>3</sup> )		Áridos (kg/m <sup>3</sup> )		Solución alcalina (kg/m <sup>3</sup> )	Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
	FA	OPC	FA	CA			
22	-	400	542	1.265	0	7	28,4
	-	400	542	1.265	0	28	38,3
	-	400	542	1.265	0	56	38,9
	-	400	542	1.265	0	70	39,1
	-	-	567	1.325	240	7	-
	-	-	567	1.325	240	28	0,3
	-	-	567	1.325	240	56	0,6
	-	-	567	1.325	240	70	1,1
	-	-	543	1.269	200	7	0,2
	-	-	543	1.269	200	28	0,6
	-	-	543	1.269	200	56	-
	-	-	543	1.269	200	70	-
	200	-	550	1.269	200	7	0,8
	200	-	550	1.269	200	28	1,1
	200	-	550	1.269	200	56	1,5
	200	-	550	1.269	200	70	1,8
	200	-	550	1.329	123	7	1,4
	200	-	550	1.329	123	28	3,5
	200	-	550	1.329	123	56	5,4
	200	-	550	1.329	123	70	6,2
300	-	547	1.280	200	7	3,6	
300	-	547	1.280	200	28	8,4	
300	-	547	1.280	200	56	10,2	
300	-	547	1.280	200	70	12,7	

	400	-	547	1.280	200	7	7,3
	400	-	547	1.280	200	28	18,8
	400	-	547	1.280	200	56	29,3
	400	-	547	1.280	200	70	32,1
	400	-	547	1.280	200	7	7,1
	400	-	547	1.280	200	28	19,5
	400	-	547	1.280	200	56	29,7
	400	-	547	1.280	200	70	33,2
	475	-	539	1.253	119	7	11,0
	475	-	539	1.253	119	28	30,4
	475	-	539	1.253	119	56	44,4
	475	-	539	1.253	119	70	48,2
	475	-	535	1.248	140	7	12,6
	475	-	535	1.248	140	28	34,3
	475	-	535	1.248	140	56	-
	475	-	535	1.248	140	70	-
	475	-	529	1.235	166	7	9,4
	475	-	529	1.235	166	28	27,2
	475	-	529	1.235	166	56	-
	475	-	529	1.235	166	70	-



	493	659	988	149	16.5	28	57
	493	659	988	149	16.5	1	54
	493	659	988	149	16.5	1	52
	493	659	988	149	16.5	1	51
	493	659	988	149	16.5	3	56
	493	659	988	149	16.5	3	55
	493	659	988	149	16.5	3	52
	493	659	988	149	16.5	28	58
	493	659	988	149	16.5	28	55
	493	659	988	149	16.5	28	52