

La necesidad de nuevos hormigones para una construcción más sostenible:

LOS GEOPOLÍMEROS

Joan Tejedor Montagud

Grado en Fundamentos de la Arquitectura

Tutor: Manuel Valcuende Paya

Curso: 2018 / 2019 Convocatoria: Octubre 2018



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR DE
ARQUITECTURA

La necesidad de nuevos hormigones para una construcción más sostenible:

LOS GEOPOLÍMEROS

JOAN TEJEDOR MONTAGUD

Trabajo Final de Grado

Grado en Fundamentos de la Arquitectura

Tutor: Manuel Valcuende Payá

Convocatoria: Octubre 2018

Código: CSA-F



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR DE
ARQUITECTURA

Resumen

Actualmente, gracias al hormigón se pueden construir todo tipo de edificios, con múltiples formas, texturas y acabados diferentes. Es el material de construcción más utilizado a nivel mundial. El problema, es que también es un gran contaminante para el planeta. Concretamente, dentro de la composición del hormigón, el cemento es el material que, con diferencia, expulsa más CO₂ a la atmosfera.

Es por esto, que se están llevando a cabo diferentes investigaciones para encontrar un sustitutivo a este material, que sea menos contaminante para el planeta. De estos estudios surge el Geopolímero, un nuevo material, que además se suele formar con residuos de las industrias, ayuda a aprovechar y valorizar materiales que generalmente son subproductos procedentes de las diferentes industrias que se acumulan en los vertederos, transformándolos en algo útil, y además, su emisión de CO₂ es mucho menor que las del Cemento. Trataremos de comprobar si los hormigones hechos a partir de Geopolímeros, dan unos resultados óptimos para poder utilizarse en obra tanto desde el punto de vista resistente como de durabilidad, comparando estos resultados con los obtenidos con un hormigón tradicional.

Palabras Clave

Hormigón, Geopolímero, CO₂, Residuo industrial, Resistencia de compresión, Durabilidad, Ceniza Volante, Escoria.

Resúm

Actualment, gràcies al formigó es poden construir tot tipus d'edificis, amb múltiples formes, textures i acabats diferents. És el material de construcció més utilitzat a nivell mundial. El problema, és que també és un gran contaminant per al planeta. Concretament, dins de la composició del formigó, el ciment és el material que, amb diferència, expulsa més CO₂ a l'atmosfera.

És per això, que s'estan duent a terme diferents investigacions per trobar un substitutiu a aquest material, que siga menys contaminant per al planeta. D'aquests estudis sorgeix el Geopolímer, un nou material, que a més es sol formar amb residus de les indústries, ajuda a aprofitar i valoritzar materials que generalment són subproductes procedents de les diferents indústries que s'emmagatzemen als abocadors, transformant-los en alguna cosa útil, a més, la seva emissió de CO₂ és molt menor que les del ciment. Tractarem de comprovar si els formigons fets a partir de Geopolímers, donen uns resultats òptims per poder utilitzar-se en obra tanto des del punt de vista resistent com de la durabilitat, comparant aquests resultats obtinguts amb un formigó tradicional.

Paraules Clau

Formigó, Geopolímer, CO₂, Residu industrial, Resistència a compressió, Durabilitat, Cendra Volant, Escòria.

Abstract

Currently, thanks to concrete, all types of buildings can be built, with multiple shapes, textures and different finishes. It is the most used construction material worldwide. The problem is that it is also a great pollutant for the planet. Specifically, within the design of concrete, cement is the material that, by difference, expels more CO₂ to the atmosphere.

That is why, they are carrying out different investigations to find a substitute to this material, which is less pollutant for the planet. From these studies arises the Geopolymer, a new material, which is also usually formed with waste from industries. It helps to take advantage of materials that are generally waste, and have no function but to be stored in a landfill, transforming them into something useful, and in addition, their emission of CO₂ is much less than those of cement. We will try to check if the concretes made from Geopolymers give optimal results to be used on construction area, both from the point of view mechanical and durability, comparing these results with those obtained with a traditional concrete.

Key Words

Concrete, Geopolymer, CO₂, Industrial waste, Compressive strenght, Durability, Fly Ash, Slag.

Índice

0	Objetivos y método de trabajo.....	15
1	Introducción.....	19
	1.1_Antecedentes	20
	1.2_¿Que es el Geopolímero?	21
2	Los Geopolímeros.....	23
	2.1_¿Como se crean?	24
	2.2_Materias Primas	26
	2.2.1_Escoria de alto horno	26
	2.2.2_Ceniza Volante	28
	2.2.3_Solución Alcalina	31
3	Dosificaciones.....	33
4	Huella de Carbono.....	41
5	Parte práctica.....	49
	5.1_Preparación de la materia prima	50

Índice

5.2_Preparación de los áridos	56
5.3_Preparación de la solución alcalina	58
5.4_Fabricación de los morteros	60
5.5_Proceso de curado y desmoldado	66
6 Ensayos.....	69
7 Estudio económico.....	93
8 Conclusión.....	97
9 Bibliografía.....	101

0 | Objetivos y método de trabajo

Objetivos

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo el análisis de los geopolímeros, detallar sus posibles composiciones y componentes, y establecer una comparación respecto al hormigón tradicional. La finalidad de este nuevo material es la de algún día poder sustituir al cemento en la composición del hormigón, ya que este es la parte más contaminante de la mezcla, siendo el causante de la mayor cantidad de CO₂ emitida a la atmósfera.

Conforme está el planeta, que ya hay una gran abertura en la capa de ozono, todo el mundo debería enfocar sus investigaciones hacia objetivos similares, e intentar reducir este gran problema que nos afecta a todos. El cambio climático es una realidad, y cada vez irá a peor.

Por eso me pareció muy interesante investigar sobre este nuevo material, y ver si podría llegar a sustituir en algún momento al cemento, igualando como poco, o incluso superando sus características.

En este estudio, se ha trabajado con 4 tipos de geopolímeros, realizados con escoria y con ceniza volante, y 2 morteros de cemento que han servido de referencia. Se ha comparado su resistencia a compresión, durabilidad con ensayos de absorción y porosidad, y sus niveles de PH.

La huella de carbono que es una de los datos más interesantes, lo apporto en base a otras investigaciones al respecto, ya que no fué posible realizar este estudio.

Método de trabajo

En cuanto al cómo trabajamos para obtener todos estos datos, primero comencé con una parte informativa, para dar a conocer estos nuevos materiales, qué son, cómo se componen, qué es la geopolimerización, posibles activadores y activantes para esta transformación, posibles aplicaciones de este nuevo hormigón, etc.

Esta información se extrajo mayoritariamente a través de la búsqueda de información de otros estudios ya realizados sobre el tema, artículos científicos y algunos documentos académicos.

Después de conocer un poco más los geopolímeros, comienza la parte práctica, donde realizamos varios tipos de mortero geopolimerico a base de ceniza volante, y de escoria, posterior a la preparación de las dosificaciones, con su consiguiente molienda de materiales si fuese necesario.

Una vez realizadas estas muestras, se les realizaron pruebas de resistencia a compresión a los 7, y 14 días, durabilidad con ensayos de absorción y porosidad, y niveles de PH.

Y finalmente, con los datos extraídos de las muestras, realizamos una comparativa respecto al hormigón tradicional con cemento portland, para ver si se obtienen resultados similares, o incluso superiores.

1 | Introducción

1.1_Antecedentes

Actualmente el hormigón sigue siendo uno de los materiales más utilizados en el sector de la construcción, ya que ofrece grandes posibilidades para dar formas y acabados diferentes. Se estima, que se consume 1 m^3 de hormigón por persona al año (Albornoz, 2015).

Esta industria es una de las que más residuos de impacto directo al medio ambiente produce, desde el proceso constructivo inicial, hasta el momento de la demolición del edificio.

Uno de los principales materiales utilizados en la construcción es el cemento Portland (OPC), que, a su vez, es uno de los causantes de la emisión de gases de efecto Invernadero. En concreto de generar elevadas cantidades de CO_2 , siendo el causante de entre un 5-7% de las emisiones a nivel mundial (Albornoz, 2015). Esto se debe a la calcinación de la piedra caliza, para obtener el Clinker. Se calcula que 1 tonelada de Clinker, aproximadamente produce 1 tonelada de CO_2 , que se emite directamente a la atmósfera, además de la gran cantidad de energía y recursos consumidos, aproximadamente 1.5 toneladas de materia prima por cada tonelada de Clinker (Segura-Sierpe, 2016).

Por todas estas razones, se están llevando a cabo diferentes investigaciones para intentar disminuir este gran impacto ambiental que causa el cemento. Así por ejemplo, se está investigando un nuevo tipo de cemento que absorba parte de ese CO_2 , y se está buscando un sustitutivo con un menor impacto medioambiental.

Aquí es donde encontramos los geopolímeros, un sustitutivo del cemento, más sostenible, y que está dando unos muy buenos resultados en las investigaciones llevadas a cabo.

1.2_¿Qué es el Geopolímero?

El geopolímero es un nombre dado por Joseph Davidovits, a finales de los años 70, para describir a los polímeros inorgánicos de aluminosilicatos (Omeman, 2007).

Se entiende como cemento geopolimérico a un conglomerante sintético inorgánico, obtenido a partir de aluminosilicatos activados mediante una solución alcalina, dando origen a una reacción química llamada geopolimerización (Albornoz, 2015).

Este nuevo material está teniendo unos grandes resultados en los ensayos que se han realizado. Se ha sometido a comparativa con el hormigón convencional, con resultados variados, pero siempre mucho menores que el hormigón tradicional en cuanto a la emisión de CO₂, del rango de un 26-45% menos (Stengel, 2009).

Además, para la fabricación del geopolímero, se busca disminuir la cantidad de residuos generados por las Industrias. Como fuente de aluminosilicato se están utilizando residuos de los altos hornos, y de las centrales termoeléctricas, tales como la escoria, y la ceniza volante. Estos materiales suelen terminar en un vertedero, almacenándose sin ningún otro uso, pero gracias a este nuevo material, se reutilizarían, y así ayudarían a la sostenibilidad del planeta.

Se han hecho pruebas con diferentes fuentes de aluminosilicato, como la escoria, la ceniza volante, la puzolana natural, la ceniza de cáscaras de arroz, el metacaolín, etc. Tiene muchas variantes, y todas sostenibles. Aunque la que mejores resultados está dando, según estudios ya realizados, es la que se hace con escoria y ceniza volante (Gonzalez, 2012).

2 | Los Geopolímeros

2.1_ Cómo se crean?

Como hemos comentado anteriormente, el geopolímero es una combinación de aluminosilicatos activados mediante una solución alcalina.

Estos materiales tienen unas características concretas muy beneficiosas respecto a las del hormigón tradicional, como unas buenas propiedades mecánicas, gran resistencia química y térmica, y, sobre todo, bajas emisiones de CO_2 en su fabricación (Davidovits, 1994).

Este proceso de combinación química se llama Geopolimerización. Por su complejidad y extensión del proceso, de una forma muy simplificada, podemos decir que el proceso de geopolimerización se produce cuando combinamos:

Agua, fuente de aluminosilicato, y una solución alcalina.

De una forma muy básica, en la *Figura 01*, vemos las fases que ocurren en el proceso de geopolimerización.

Para hacer el mortero de geopolímero, debemos añadir a esta combinación anterior arena. Que posteriormente podemos utilizar para crear un hormigón con menores emisiones de CO_2 y que además, dependiendo de su composición, puede llegar a tener características iguales, o incluso superiores al hormigón tradicional.

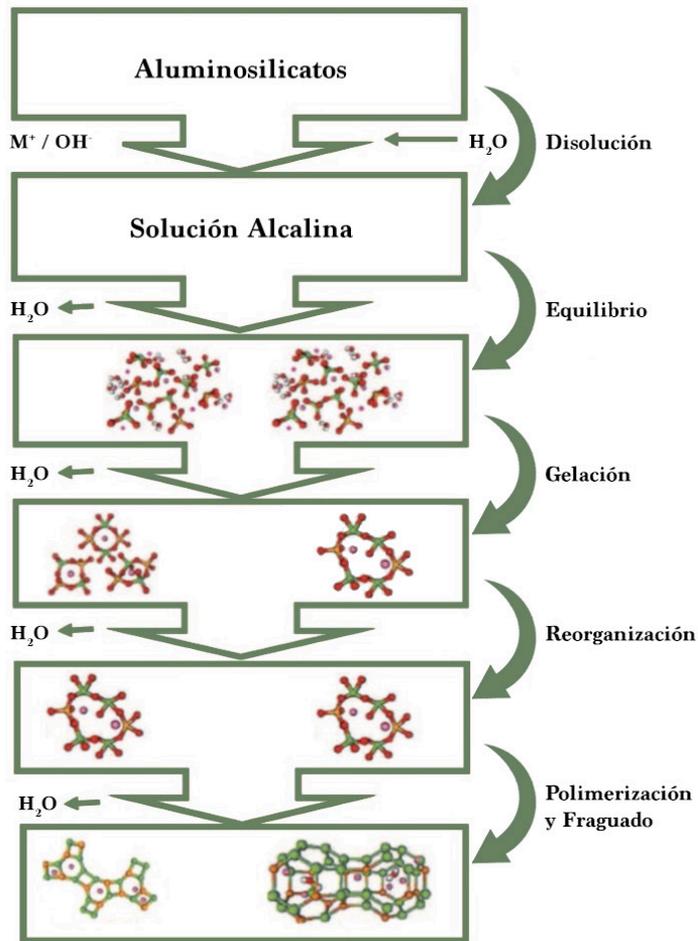


Fig. 01 Modelo simplificado de Geopolimerización

2.2_Materias Primas

Se necesita de los tres elementos comentados anteriormente para la creación del geopolímero. Como materia prima, tenemos los aluminosilicatos, los cuales son la parte más llamativa de estos materiales, ya que generalmente se suelen utilizar residuos industriales como escoria, ceniza volante, metacaolín, ceniza de cáscaras de arroz, etc.

Las que más se están estudiando son la ceniza volante, y la escoria. Ya que además, son los materiales más abundantes y accesibles, porque podemos encontrarlos generalmente en las industrias, y estas no los utilizan. Nos centramos concretamente en estas dos, ya que son las que utilizamos posteriormente en los ensayos.

Para obtener geopolímeros con mejores capacidades mecánicas, es mejor que la materia prima tenga una estructura vítrea, y un tamaño de partícula pequeño (Gonzalez, 2012).

2.2.1_Escoria de alto horno

Estas se obtienen de la industria siderúrgica. En los altos hornos, durante la fundición de las menas para purificar los metales, con las altas temperaturas se desprenden las impurezas de la mena y se separan del metal fundido. De estas impurezas aparece el arrabio y la escoria, que pasan a una balsa donde se separan por diferencia de densidad (Cedex, 2011)^b.

España generó un total de 1.201.518 t de escoria en el 2010, de la cual el 66% fue granulada y el 34% cristalizada (Cedex, 2011)^b.

Como hemos comentado, cuanto más vítreo sea el material, mejor para las características de la Composición. Por ello de estos tipos de escoria, la granulada es la que se enfria rapidamente y queda vitrificada.

Por tanto, un total de 794.526 t al año son utilizables para la fabricación de Geopolímeros en España (datos del 2010).

Con los años se ha ido homogeneizando la variación en la composición de la escoria, llegando a marcar unos valores limites permitidos para su uso en la fabricación de cementos, como vemos en la *Figura 02* (Puertas, 1993).

SiO ₂	= 27-40 %.
Al ₂ O ₃	= 5-33 %.
CaO	= 30-50 %.
MgO	= 1-21 %.
Fe ₂ O ₃	= < 1 %.
S	= < 3 %.
Cr ₂ O ₃	= 0,003-0,007 %.
Cl	= 0,19-0,26 %.
TiO ₂	= < 3 %.
F	= 0,09-0,23 %.
MnO ₂	= < 2 %.
P ₂ O ₅	= 0,02-0,09 %.
Na ₂ O + K ₂ O	= 1-3 %.

Fig. 02 Composición química de las escorias

2.2.2_Ceniza Volante

La normativa española define la ceniza volante como “*polvo fino con partículas principalmente esféricas, cristalinas, originadas por la combustión del carbón pulverizado, con o sin materiales de cocombustión, que tiene propiedades puzolánicas y que está compuesto fundamentalmente de SiO_2 y Al_2O_3* ” (UNE-EN 450-1:2006+A1:2008)

La ceniza volante se obtiene de las centrales termoeléctricas, donde se pulveriza y quema el carbón, y se utiliza el calor desprendido de esta combustión para evaporar agua y poner en movimiento una turbina, generando así electricidad.

Los restos generados por esa combustión pueden ser de dos tipos, ceniza volante o cenizas de hogar. La diferencia entre ambas es el tamaño de sus Partículas. La ceniza volante es la que queda con partículas más finas y con estructura vítrea, siendo la que nos interesa para crear geopolímeros (Albornoz, 2015).

La ceniza generada generalmente se subdivide en un porcentaje aproximado de 20% cenizas de hogar y 80% cenizas volantes. Aproximadamente, las cenizas volantes producidas equivalen al 30% del carbón utilizado en la central termoeléctrica (Cedex, 2011)^a.

Las cenizas volantes están en una clara época de disminución, ya que desde 1999, que la producción total de ceniza fue de 7.890 kt, se ha producido una considerable disminución de la producción de este material. En 2010 los datos son de un total de 1.209 kt, cifra mucho menor, pero, en contraposición, en 1999 la cantidad de esta ceniza que posteriormente fue utilizada, es del 39.5%, y en 2010 del 82%, como podemos ver en la *Tabla 01* (Cedex, 2011)^a.

	ESPAÑA						EUROPA						
	Producidas			Valorizadas			Producidas			Valorizadas			
	Cenizas volant.	Cenizas hogar	Total										
1999	kt	6.654	1.236	7.890	-	-	3.114	37.144	5.622	43.654	-	-	20.669
	%	84,3	15,7	100	-	-	39,5	85	15	100	-	-	55,6
2004	kt	6.513	1.276	7.464	-	-	4.329	43.476	5.840	49.316	22.016	2.295	24.311
	%	83,6	16,4	100	-	-	58	88	12	100	51	39	49
2005	kt	6.388	1.136	7.524	3.960	681	4641	-	-	-	-	-	-
	%	85,2	14,8	100	85,3	14,7	72,6	-	-	-	-	-	-
2006	kt	4.707	1.176	5.283	2.778	569	3.347	40.403	6.137	46.540	20.100	3.106	23.206
	%	88	12	100	83	17	63,3	86,8	13,2	100	86,8	13,4	49,9
2007	kt	5.099	947	6.046	3.271	177	3.448	41.663	5.734	47.397	20.000	2.523	22.523
	%	84,3	15,7	100	93,8	6,2	57	87,9	12,1	100	48	44	47,5
2008	kt	3.071	580	3.651	2.576	179	2.755	37.476	4.850	42.356	17.692	2.418	20.110
	%	84	16	100	93,5	6,4	75,4	88,5	11,5	100	88	12	47,5
2009	kt	1.819	370	2.189	1.465	186	1.651	-	-	-	-	-	-
	%	83,1	16,9	100	88,7	11,3	75,4	-	-	-	-	-	-
2010	kt	916	293	1.209	761	231	992	-	-	-	-	-	-
	%	75,8	24,2	100	76,7	23,3	82	-	-	-	-	-	-

Tabla 01 Producción y valorización de cenizas en España y Europa

Esta reducción tan importante, se debe al aumento del precio de los combustibles, a una mayor conciencia con la gestión, generación, reutilización y reciclaje de residuos, y a una mayor tendencia a la obtención de energía de formas más renovables (Cedex, 2011)^a.

Según la norma ASTM C618, existen tres tipos de ceniza volante. Las de clase N, clase F y clase C.

- Las de clase N (silicocalcáreas), son aquellas puzolanas naturales, que necesitan ser calcinadas para adquirir propiedades aceptables, como algunas arcillas y lutitas (ASTM, 2013).
- Las de clase F (silicoaluminosas), se producen generalmente por la combustión de antracita y carbones bituminosos (de alto poder calorífico), y tienen un contenido de óxido de calcio menor al 10%. El PH puede ser mayor a 10 (Cedex, 2011)^a.
- Las de clase C (sulfocálcicas), se producen por la combustión de lignito y carbón sub-bituminoso (de baja calidad), y tienen más de un 10% de óxido de calcio (Cedex, 2011)^a.

Las cenizas volantes bajas en calcio, con las arcillas calcinadas, son los materiales que más frecuentemente se utilizan en la creación de geopolímeros (Albornoz, 2015).

		Clase N	Clase F	Clase C
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	min%	70	70	50
SO ₃	max%	4	5	5
Humedad	max%	3	3	3
Perdidas en Incineración	max%	10	6	6

Tabla 02 Clasificación de la ceniza volante según ASTM

2.2.3_Solución Alcalina

Los aluminosilicatos que se utilizan para la creación de los geopolímeros, deben ser materiales que tengan un bajo contenido en calcio, por lo que, las soluciones que se deben utilizar para activar estos productos, son las activadoras alcalinas de bajo calcio (Albornoz, 2015).

Las soluciones más utilizadas generalmente, son el Hidróxido de Sodio (NaOH), el Silicato Sódico ($\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$), el Carbonato Sódico (Na_2CO_3) y el Sulfato de Sodio (Na_2SO_4)⁴. Se suelen utilizar estos compuestos ya que son los más “accesibles”. El hidróxido de sodio es el más económico, y el silicato sódico, se suele utilizar en la creación de geopolímeros de base escoria, ya que es la que mayor resistencia a compresión aporta en comparación a otros activadores (González, 2012).

La activación alcalina se trata de un proceso químico en el que un material con alto contenido de Sílice y Aluminio (Aluminosilicatos), se combina con una solución alcalina, las cuales suelen tener un $\text{PH}>7$, tales como las mencionadas en el párrafo anterior, creando una pasta que se endurece en un corto periodo de tiempo (Gutiérrez, 2017).

3 | Dosificaciones

3.1_Dosificaciones

En este apartado, expondré algunas de las dosificaciones que he ido recopilando de otros ensayos ya realizados, donde podremos ver los diferentes rangos de resistencias que pueden llegar a alcanzar estos materiales.

En el trabajo de J.Albornoz Muñoz (2015), encontramos unas dosificaciones para dos hormigones de ceniza volante y dos hormigones convencionales de 30 y 40 Mpa. En los de ceniza volante realiza dos pruebas, utilizando en ambas dos tipos de soluciones activadoras mezcladas, el hidróxido de sodio y el silicato sódico, y en una, utiliza para reducir las cantidades de estos productos un reductor de agua (o plastificante). Las cantidades de la tabla son para 1 m³ de hormigón.

Producto \ Hormigón	HGHD	HGS	H30 Referencial	H40 Referencial
Cemento (Kg/m ³)	-	-	280	360
Cemento volante (Kg/m ³)	408	420	-	-
Solido de Hidróxido de Sodio 14M (Kg/m ³)	41	91	-	-
Solido de Silicato de sodio 2:1 (Kg/m ³)	103	182	-	-
Grava	277	234	-	-
Gravilla	1017	948	990	920
Arena	554	325	900	890
Reductor de agua	6	-	-	-
Agua Extra	22,5	40	140	162

Tabla 03 Dosificaciones 1

La primera prueba con ceniza volante, llamada HGHD, presenta una resistencia de 46 MPa. Y la segunda, llamada HG5, una resistencia de 35 MPa. En un punto posterior, hablaremos sobre el cálculo que realiza sobre la huella de carbono que producen estos 4 tipos de hormigones.

En la tesis de R.González Acuña (2012), realiza ensayos para morteros de ceniza volante, de escoria, y de una combinación de ambas. No deja muy claro la dosificación que utiliza exactamente, solo señala que utiliza diferentes rangos para las relaciones de $S/A=SiO_2/Al_2O_3$, $N/S=Na_2O/SiO_2$, $H/N=H_2O/Na_2O$.

En el caso de la ceniza volante
 $S/A=7.5-9$
 $N/S=0.24$
 $H/N=9-12$

En el caso de la escoria
 $S/A=7-8$
 $N/S=0.15-0.18$
 $H/N=11-14$

Después realizó probetas con contenidos de 100% de Escoria, 100% de Ceniza Volante, 80%E-20%CV, 60%E-40%CV, 40%E-60%CV y 20%E-80%CV.

Sistema	Edad	Compresión (MPa)	Sistema	Edad	Compresión (MPa)
Escoria	3d	90,38	.4E .6CV	3d	36,23
Escoria	7d	91,59	.4E .6CV	7d	34,64
Escoria	14d	97,30	.4E .6CV	14d	31,21
Escoria	28d	92,71	.4E .6CV	28d	34,92
.8E .2CV	3d	52,83	.2E .8CV	3d	39,94
.8E .2CV	7d	66,94	.2E .8CV	7d	31,62
.8E .2CV	14d	61,77	.2E .8CV	14d	45,00
.8E .2CV	28d	69,35	.2E .8CV	28d	44,93
.6E .4CV	3d	47,56	Ceniza	3d	36,34
.6E .4CV	7d	36,55	Ceniza	7d	36,46
.6E .4CV	14d	40,95	Ceniza	14d	39,04
.6E .4CV	28d	47,29	Ceniza	28d	34,52

Tabla 04 Resultados de compresión 1

De estos resultados, hay que destacar que los compuestos formados con solo escoria obtienen unas resistencias mucho mayores que los híbridos y sobretodo que los formados únicamente con ceniza volante, pese a que los resultados de la ceniza no son en absoluto malos, del orden de 34 MPa a los 28 días. También decir, que estos materiales varían algunos MPa hacia arriba o hacia abajo con el paso del tiempo, y que a los 3 días de curado han alcanzado prácticamente su máxima resistencia.

También se observa que la variación de las resistencias con el tiempo es poca a partir de los 3 días. Esto sucede porque la reacción de Geopolimerización es mucho más rápida que el proceso de hidratación de los hormigones tradicionales.

Y en el último ensayo, de A.Gutiérrez Torres (2017), encontramos un ensayo en el que la mezcla es únicamente con escoria. Explica que para todas las mezclas de pastas y morteros utilizó la proporción de 1 parte de escoria, por 2,75 de arena, como indica la Norma Técnica Colombiana NTC 220. La relación escoria-agua varió entre los valores de 0.4, 0.45 y 0.5. Y, por último, para la solución alcalina, utilizo NaOH, Na_2SiO_3 , y silicato de sodio con diferente relación $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$.

Por ejemplo, para la mezcla con NaOH, calcula que porcentaje de esa mezcla es únicamente Na_2O . Y una vez obtenida, explica que, para 1000g de escoria, con una activación del 4% requiere 40g de Na_2O .

$$\begin{array}{l} 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \\ 39.998 \rightarrow 61.997 + 18 \end{array} \quad 40\text{g}(\text{Na}_2\text{O}) \times \frac{39.981 \times 2\text{gNaOH}}{61.997\text{gNa}_2\text{O}} = 51.59\text{gNaOH}$$

Fig. 03 Fórmulas para calcular el contenido de NaOH

Entonces, si la relación escoria/agua es también 0.4, harán falta 400ml para diluir los 51.59g de NaOH (no tiene en cuenta el contenido de agua de NaOH). Por tanto, la dosificación final de mortero de escoria es la siguiente.

Escoria: 1000g
 Arena: 2700g
 NaOH: 51.59g
 Agua: 400ml

Lo que equivale a una concentración de NaOH de 3,22 Molar.

Realizó diferentes pruebas donde variaba la relación agua/escoria, y concluyo que, a una mayor relación, las muestras obtenían una menor resistencia. Por tanto, prosiguió con la menor relación 0.4.

Aumentó ahora la concentración del activante, a 6%, 8% y 10%, correspondientes a una concentración molar de 4,83, 6,44, y 8,05 respectivamente, siendo los mejores resultados los de la concentración del 8%, con resistencias entre 31 y 38 Mpa de los 7 a los 28 días.

ACTIVACIÓN NaOH (Ac/C = 0.4)

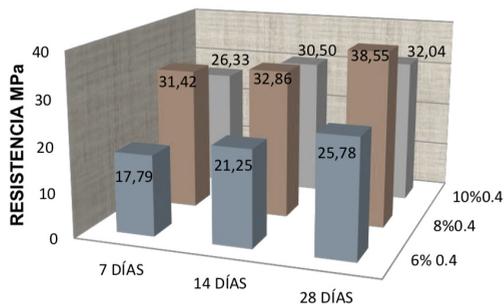


Fig. 04 Resultados de compresión 2

La siguiente prueba con el silicato de sodio se realizó directamente con un curado a 50°C, manteniendo la relación agua/escoria a 0,4, y como antes, variando la concentración. Los mejores resultados fueron los de la concentración al 7%, equivalente a 5,63 Molar.

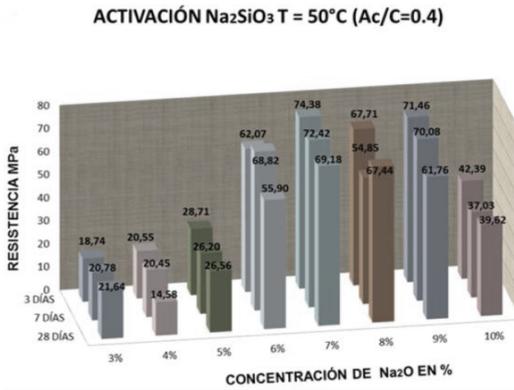


Fig. 05 Resultados de compresión 3

Por último, tenemos los resultados obtenidos de la mezcla con silicato de sodio con diferente relación SiO₂/Na₂O. Variando esta relación desde 0.75 a 1.8. La primera prueba fue con una concentración de NaOH del 5.5% (4,42 Molar), y la mejor relación fué con diferencia la de 1.5, dando resistencias de 64, 65, y 71 Mpa a los 3, 7, y 28 días respectivamente.

Por tanto, una vez obtenidos estos resultados, realizó nuevamente otras muestras con la relación de 1.5 pero diferente concentración de NaOH, y que como podemos ver en la *Figura 06*, vuelve a ser la mejor concentración la del 7% (5,63 Molar).

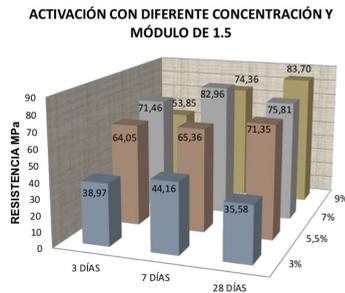


Fig. 06 Resultados de compresión 4

Para terminar, nos muestra una gráfica comparativa de los mejores resultados de cada tipo de muestra, donde podemos ver la gran diferencia de resistencias que adquieren los geopolímeros, dependiendo de cómo están formados. También aparece en esta gráfica un cemento tradicional, para poder compararlo con los geopolímeros, y vemos que la escoria activada con Silicato de Sodio, a solo 3 días, prácticamente duplica la resistencia obtenida con cemento a los 28. Esto ocurre porque como ya hemos comentado, el proceso de geopolimerización es mucho más rápido que el de hidratación de los cementos.

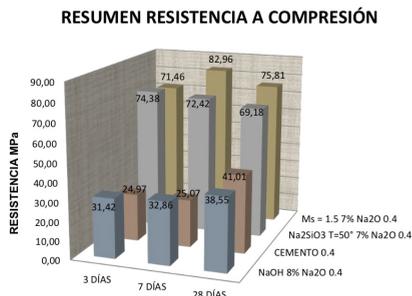


Fig. 07 Resultados de compresión 5

4 | Huella de Carbono

4.1_Huella de Carbono

Hasta ahora hemos explicado qué es un geopolímero, cómo está formado, y hemos comentado un poco sus diferentes resistencias dependiendo de su dosificación.

Pero ahora llegamos al punto donde realmente vamos a ver su papel en la sostenibilidad del planeta. El hormigón que veremos reflejado en estas pruebas es el primero expuesto en el punto anterior, de J.Albornoz Muñoz (2015), formado por ceniza volante y una mezcla de dos activadores. Además de uno en el que utiliza un reductor de agua, y otro sin él.

Este estudio comparará también con unos hormigones tradicionales de referencia, uno de 30 MPa y el otro de 40 MPa.

A continuación, veremos los resultados finales del estudio para 1 m³ de hormigón, de los diferentes hormigones obtenidos, llamados HGHD (con reductor de agua), HG5 (sin reductor de agua), H30 y H40.

Hay que destacar que este es un estudio muy extenso. Tiene en cuenta de cada componente, su producción individual de CO₂, contando tanto la del material propio al combinarse, como las de toda la obtención de este, habiendo pensado si el material llega hasta la fábrica en ferry, en camión, etc.

Primero comenzaremos con las emisiones del hormigón llamado HGHD, en el que se utiliza un reductor de agua, y por tanto menos soluciones alcalinas.

Proceso \ Material Hormigón <u>Geopolimérico</u>	Cantidad (1 m ³)	Kg CO ₂ e (143,45)
Ceniza volante	408 <u>Kg</u>	15,99
Grava	277 <u>Kg</u>	3,78
Gravilla	1017 <u>Kg</u>	10,66
Arena	554 <u>Kg</u>	5,74
Solución <u>NaOH</u>	41 <u>Kg</u>	23,14
Solución Silicato	103 <u>Kg</u>	73,31
Agua extra	22,5 <u>Kg</u>	0,01
Plastificante	6 <u>Kg</u>	7,02
Diesel, burned in building machine (GLO) market for I ECOBASE	22,7 <u>Mj</u>	1,96
Heat, district or industrial, natural gas (RoW) production, al industrial furnace > 100 kW I ECOBASE	16,6 <u>Mj</u>	1,27
<u>Electricidad SIC</u>	4,36 <u>kWh</u>	0,58

Tabla 05 Emisión de CO₂ del hormigón HGHD

Como podemos observar en la tabla, con diferencia, las soluciones alcalinas son los componentes que más CO₂ producen. Por ello, en el sentido de la sostenibilidad, vale la pena utilizar un reductor de agua, ya que reducimos considerablemente la cantidad de soluciones alcalinas necesarias.

Ahora veremos las emisiones del hormigón HG5, el cual no se utiliza ningún reductor de agua.

Proceso \ Material Hormigón Geopolimérico	Cantidad (1 m ³)	Kg CO ₂ e (143,45)
Ceniza volante	420 Kg	16,46
Grava	234 Kg	3,19
Gravilla	948 Kg	9,93
Arena	325 Kg	3,37
Solución NaOH	91 Kg	51,36
Solución Silicato	182 Kg	129,53
Agua extra	40 Kg	0,01
Plastificante	0 Kg	0,00
Diesel, burned in building machine (GLO) market for I ECOBASE	22,7 Mj	1,96
Heat, district or industrial, natural gas (RoW) production, al industrial furnace > 100 kW I ECOBASE	16,6 Mj	1,27
Electricidad SIC	4,36 kWh	0,58

Tabla 06 Emisión de CO₂ del hormigón HG5

Como era de esperar, las emisiones de este hormigón son mayores que las del anterior, ya que está compuesto por mayores cantidades de las soluciones alcalinas.

A continuación, explica que para tener en cuenta las emisiones de estos mismos hormigones, pero sometidos a un curado a altas temperaturas, un estudio anterior decía que se puede asumir un valor de emisión de 39.97 kgCO₂e/m³, que redondea a 40, y nos presenta la siguiente tabla con la comparación de todos los hormigones del estudio.

Como podemos ver, excepto el HG5 con curado a alta temperatura, todos los valores son inferiores al de los hormigones de referencia.

Producto (1 m ³)	Huella de Carbono (Kg CO ₂ e)
Mezcla HGHD	143,5
Mezcla HGHD curado a alta T ^m	183,5
Mezcla HG5	197,2
Mezcla HG5 curado a alta T ^m	237,2
H30 Referencia	230,8
H40 Referencia	289,1

Tabla 07 Emisión de CO₂ de todos los hormigones

Para terminar con este apartado, veremos en esta última tabla una comparativa en porcentajes, en la que se compara el hormigón HGHD, que dio una resistencia de 46 Mpa, con el H40, que sería su equivalente, y el HG5, con una resistencia de 35 Mpa, con el H30.

Producto (1 m ³)	Huella de Carbono (Kg CO ₂ e)	Variación porcentual respecto de mezcla H30 (Δ%)	Variación porcentual respecto de mezcla H40 (Δ%)
Mezcla HGHD	143,5	-38 %	-50 %
Mezcla HGHD curado a alta T ^m	183,5	-21 %	-37 %
Mezcla HG5	197,2	-15 %	-32 %
Mezcla HG5 curado a alta T ^m	237,2	3 %	-18 %
H30 Referencia	230,8	0 %	-20 %
H40 Referencia	289,1	25 %	0 %

Tabla 08 Variación porcentual de la emisión de CO₂ respecto a los hormigones

Solo el HG5 con curado a alta temperatura, presenta un valor superior, y solo un 3% más. Pero si nos ceñimos a los hormigones con un curado al aire, que es normalmente lo que sucede en obra, encontramos que, el HG5, respecto al H30 presenta un 15% menos emisiones, y el HGHD, respecto al H40 presenta una considerable diferencia del 50%.

Adicionalmente, añade también una comparativa respecto al precio de fabricación de cada hormigón.

Hormigón	Coste (\$ / m ³)	Variación porcentual respecto del H30	Variación porcentual respecto del H40
Mezcla HGHD	32.988 \$	-14 %	-27 %
Mezcla HG5	38.929 \$	1 %	-14 %
H30	38.363 \$	0 %	-15 %
H40	45.385 \$	18 %	0 %

Tabla 09 Variación porcentual del coste de fabricación

Volviendo a comparar los mismos hormigones, vemos que el HG5 saldría un 1% más caro respecto al H30, y el HGHD, un 27% más económico respecto al H40.

Esto datos nos dicen que realmente vale la pena utilizar el reductor de agua, ya que eliminas parte de los componentes que más CO₂ emiten, economizas mucho el hormigón realizado, y además, ganas en resistencia.

5 | Parte práctica

5.1 Preparación de la materia prima

Lo primero de todo, fue ver que materiales había disponibles para realizar los geopolímeros. En el laboratorio disponían de escoria y de ceniza volante, así que estos fueron los materiales elegidos para realizar los geopolímeros.

Se pretendía hacer la cantidad de probetas expuestas en la tabla siguiente.

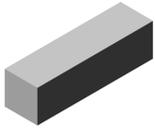
	 4 x 4 x 16 cm 30 Piezas	 10 x 10 x 10 cm 4 Piezas	 Ø10 x 15 cm 6 Piezas
Cemento 32'5 MPa	3	1	1
Cemento 42,5 MPa	3	1	1
Ceniza volante + Hidróxido de Sodio	Curado Natural	6	-
	Curado a alta Tª	3	1
Escoria + Hidróxido de Sodio	Curado Natural	3	1
	Curado a alta Tª	3	1
Escoria + Silicato de Sodio	Wt. ratio = SiO ₂ : Na ₂ O (C. alta Tª)	6	-
	Pentahidratado (C. alta Tª)	3	1

Tabla 10 Número de probetas a realizar

Ante esto, se hicieron los cálculos para ver cuanta cantidad de cada material hacía falta para realizar estas probetas (las dosificaciones se verán en un apartado posterior), y aproximadamente, se necesitaban 6,1 kg tanto de escoria como de ceniza volante, y 3 litros de cada solución activadora.

Una vez decidido esto, se comprobó que la ceniza volante estaba ya en condiciones para ser mezclada con los demás materiales, pero la escoria tenía una granulometría demasiado gruesa. Por tanto, se comenzó con la molienda de esta.

Se comenzó con una molienda manual de la escoria, sobre una pequeña plancha de acero, y variando la forma de aplastarla, con un martillo y con una barra rectangular de acero. Además, después lo único válido era aquella escoria que pasaba por un tamiz de 0.5 mm.



Fig. 08 Molienda manual de escoria



Fig. 09 Tamizado

Tras varias horas, solo se había conseguido uno 100 gramos de escoria que pasaba por el tamiz de 0,5 mm. Por tanto, se optó por utilizar otro método para esta primera fase de molienda.

Se pensó en utilizar la máquina “Micro-Deval”, mostrada en la *Figura 10*. Pero primero, había que meter la escoria en la estufa porque tenía demasiada humedad de estar almacenada, y al día siguiente comenzaría el proceso de molienda con la máquina.

Esta máquina funciona girando los contenedores de metal que se ven en la *Figura 12*, y dentro contienen unas bolas metálicas de diferente tamaño, que van golpeando y aplastando las partículas de escoria que gira en su interior.

Se puso una duración de 1120 vueltas, que su equivalencia en minutos era de unos 10 aproximadamente.



Fig. 10 Máquina Micro-Deval



Fig. 11 Estufa calentando la escoria

Después, se tamizó primero con un tamiz de 2 mm por ejemplo, para que pase la escoria y no las bolas metálicas, y posteriormente se tamiza esa escoria por el de 0.5 mm.

Esta escoria ya tamizada ahora tiene que pasar por otra máquina, llamada “Molino de bolas”, para dejar la escoria con una finura mucho mayor.



Fig. 12 Componente Micro-Deval



Fig. 13 Fases de molienda antes de Molino



Fig. 14 Molino de bolas



Fig. 15 Componente principal de Molino

El molino de bolas es similar al micro-deval, solo que tiene una capacidad mucho menor, y sus componentes en vez de con metal, están hechos con cerámica. El componente principal es el jarrón cerámico que vemos en la *Figura 16*, y dentro de este, hay bolas cerámicas también, que hacen la misma función que en la micro-deval, aplastar y golpear las partículas hasta que queda con una finura similar a la harina. En esta máquina solo se puede poner 300 gr de escoria por vez, ya que si no podría dañar las bolas cerámicas.



Fig. 16 Componentes molino de bolas



Fig. 17 Comparación de finuras antes/después

Funciona también similar a la máquina antes comentada. Se ha de enganchar bien el jarrón con las sujeciones, se cierra, y empieza a girar a gran velocidad. Este proceso duraba 20 minutos exactos, por lo que mientras se terminaba esta, se hacían a la vez dos veces de la micro-deval, para optimizar el tiempo.

Otro problema de esta máquina, además de su pequeña capacidad, es que al ser todo cerámico y con fricción en su interior entre jarrón y bolas, producía gran cantidad de calor. Tras su uso se debe manejar con guantes, ya que el material cerámico queda muy caliente, y además, cada dos usos había que dejarla reposar unos 10-15 minutos por riesgo a su rotura.

Una vez finaliza este proceso, ya obtenemos el material final que podemos utilizar en la mezcla para hacer el geopolímero.

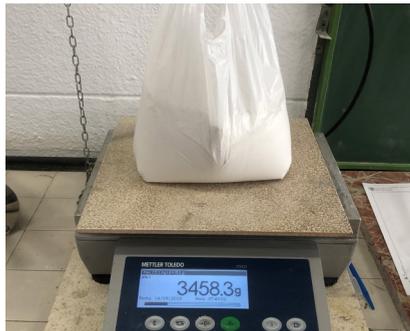


Fig. 18 Escoria final 1



Fig. 19 Escoria final 2

Se obtuvo una cantidad total de 6.5 kg de escoria molida para usar en mezclas.

5.2 Preparación de los áridos

Para la preparación de los áridos, se utilizó la norma UNE EN 196-1, la cual dice que para los morteros se tiene que utilizar una arena normalizada CEN EN 196-1, con la siguiente distribución granulométrica:

Dimensiones malla (mm)	2,00	1,60	1,00	0,5	0,16	0,08
Residuo sobre tamices (%)	0	7±5	33±5	67±5	87±5	99±1

Tabla 11 Distribución granulométrica arena CEN

Como en el laboratorio no se contaba con esos tamices, se adaptó esta tabla a los tamices que había disponibles:

Dimensiones malla (mm)	2,00	1,00	0,5	0,125	0,125 + 0,08
Residuo sobre tamices (%)	0	33	35	20	12

Tabla 12 Distribución granulométrica adaptada

Al no disponer del tamiz de 1,6 mm, se regularizó con el máximo del tamiz de 1 mm, y añadiendo más cantidad del de 0,5 mm. Después frente al de 0,16 mm, utilizamos el siguiente más pequeño disponible que era el de 0,125 mm. Y con el de 0,08 mm, utilizamos una mezcla de lo que retenía y lo que pasaba por el de 0,125 mm, de 90% y 10% respectivamente.

A sabiendas de las cantidades de arena necesarias en las dosificaciones, solo había que sacar los porcentajes de cada tamiz, para tener la cantidad exacta de cada uno para las mezclas.



Fig. 20 Arena retenida en tamiz 1 mm



Fig. 21 Arena retenida en tamiz 0,5 mm



Fig. 22 Arena retenida en tamiz 0,125 mm

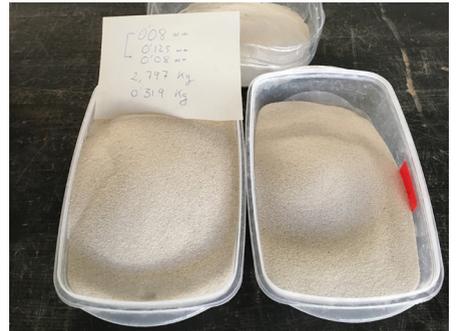


Fig. 23 Arena que pasa por tamiz 0,125 mm



Fig. 24 Arena tamizada y separada



Fig. 25 Tamices utilizados

5.3 Preparación de la solución alcalina

Como ya se ha comentado anteriormente, se utilizaron dos tipos de activadores diferentes, el hidróxido de sodio y el silicato sódico.

Las primeras pruebas se realizaron con el hidróxido de sodio. Primero se realizó la disolución con agua, pero el hidróxido al combinarse desprende mucho calor, por lo que se tuvo que dejar un día para poder hacer la mezcla con los demás materiales.

Después se hicieron las pruebas con el silicato sódico. De este había dos tipos, un silicato sódico en forma líquida, y otro silicato sódico pentahidratado en forma granular.

El líquido hubo que meterlo en estufa para separar el componente del agua, y saber los porcentajes de agua/silicato de la mezcla. Una vez obtenidos estos resultados, se preparó para hacer una disolución de 1 litro de agua/silicato, con 32% de silicato y 68% de agua. Estos son los porcentajes que se utilizaron en todas las mezclas.

Para el granular, fue más fácil ya que en el mismo producto indicaba exactamente su composición, que al ser pentahidratado, se trataba de 1 mol de silicato por 5 de agua. Mirando la tabla periódica se vio a cuantos gramos equivale cada uno, y se sacó la dosificación necesaria de agua y del producto para hacer la disolución de 1 litro nuevamente.

El líquido no hubo ningún problema para hacer la disolución con el agua, en poco tiempo se había mezclado por completo.

Sin embargo, el silicato sódico pentahidratado, al estar en forma granular, no se disolvió bien en el agua. Por lo que primero se probó a mezclarlo igual que el anterior, con una máquina que hace girar un imán dentro del recipiente para mezclar los productos.

Pero este al ser granular obstruía al imán, por lo que se optó por dejarlo esa tarde en la máquina de ultrasonidos.

La máquina con el imán giratorio es muy sencilla, se conecta y tiene una rueda, la cual se gira para establecer la velocidad de rotación del imán.

La máquina de ultrasonidos, se deja el recipiente dentro de ella, y se llena de agua como se ve en la *Figura 27*. Emite un sonido que hace vibrar muy rápido el agua y por tanto lo que contenga el recipiente.

Visto que con los ultrasonidos tampoco mezclaba, se dejó el resto de la tarde y por la noche con otra máquina con imán, pero esta aplicaba calor. Y a la mañana siguiente estaba listo.



Fig. 26 Ambas máquinas trabajando



Fig. 27 Máquina de ultrasonidos

5.4_Fabricación de los morteros

Empezaremos por los morteros de cemento, que fueron los primeros en realizarse. Como ya se ha explicado anteriormente, de cada material se hicieron probetas diferentes, rectangulares, cúbicas, y cilíndricas. Ahora veremos para cada una, y de cada material, las dosificaciones empleadas.

Dosificación del mortero de cemento de 42,5 MPa.

Mortero de cemento resistencia 42,5	
Cemento 32,5	225 gr
Cemento 52,5	225 gr
Agua	225 gr
Árido	1350 gr
a/c 0,5	Probetas rectangulares

Tabla 13 Mortero 42,5 MPa rectangular

Mortero de cemento resistencia 42,5	
Cemento 32,5	225 gr
Cemento 52,5	225 gr
Agua	225 gr
Árido	1350 gr
a/c 0,5	Probeta cilíndrica

Tabla 14 Mortero 42,5 MPa cilíndrico

Mortero de cemento resistencia 42,5	
Cemento 32,5	270 gr
Cemento 52,5	270 gr
Agua	270 gr
Árido	1620 gr
a/c 0,5	Probeta cúbica

Tabla 15 Mortero 42,5 MPa cúbico

Dosificación del mortero de cemento de 32,5 MPa.

Mortero de cemento resistencia 32,5	
Cemento	450 gr
Agua	225 gr
Árido	1350 gr
a/c 0,5	Probetas rectangulares

Tabla 16 Mortero 32,5 MPa rectangular

Mortero de cemento resistencia 32,5	
Cemento	450 gr
Agua	225 gr
Árido	1350 gr
a/c 0,5	Probeta cilíndrica

Tabla 17 Mortero 32,5 MPa cilíndrico

Mortero de cemento resistencia 32,5	
Cemento	540 gr
Agua	270 gr
Árido	1620 gr
a/c 0,5	Probeta cúbica

Tabla 18 Mortero 32,5 MPa cúbico

Dosificación del mortero de escoria + hidróxido de sodio.

Escoria + Hidróxido de sodio	
Adición	600 gr
Disolución	300 gr
Árido	1100 gr
a/c 0,5	Probetas rectangulares

Tabla 19 Mortero E + H rectangular

Escoria + Hidróxido de sodio	
Adición	600 gr
Disolución	300 gr
Árido	1100 gr
a/c 0,5	Probeta cilíndrica

Tabla 20 Mortero E + H cilíndrico

Escoria + Hidróxido de sodio	
Adición	720 gr
Disolución	360 gr
Árido	1320 gr
a/c 0,5	Probeta cúbica

Tabla 21 Mortero E + H cúbico

Dosificación del mortero de escoria + silicato sódico.

Escoria + Silicato sódico	
Adición	600 gr
Disolución	240 gr
Árido	1160 gr
a/c 0,5	Probetas rectangulares

Tabla 22 Mortero E + S rectangular 1

Escoria + Silicato sódico	
Adición	550 gr
Disolución	275 gr
Árido	1350 gr
a/c 0,5	Probetas rectangulares

Tabla 23 Mortero E + S rectangular 2

Dosificación del mortero de escoria + silicato sódico pentahidratado.

Escoria + Silicato sódico pentahidratado	
Adición	550 gr
Disolución	275 gr
Árido	1350 gr
a/c 0,5	Probetas rectangulares

Tabla 24 Mortero E + SP rectangular

Escoria + Silicato sódico pentahidratado	
Adición	550 gr
Disolución	275 gr
Árido	1350 gr
a/c 0,5	Probeta cilíndrica

Tabla 25 Mortero E + SP cilíndrico

Dosificación del mortero de ceniza volante + hidróxido de sodio.

Ceniza volante + Hidróxido de sodio	
Adición	600 gr
Disolución	300 gr
Árido	1100 gr
a/c 0,5	Probetas rectangulares

Tabla 26 Mortero CV + H rectangular 1

Ceniza volante + Hidróxido de sodio	
Adición	600 gr
Disolución	240 gr
Árido	1160 gr
a/c 0,4	Probetas rectangulares

Tabla 27 Mortero CV + H rectangular 2

Ceniza volante + Hidróxido de sodio	
Adición	600 gr
Disolución	240 gr
Árido	1160 gr
a/c 0,4	Probeta cilíndrica

Tabla 28 Mortero CV + H cilíndrica

Una vez conocidas todas las dosificaciones, el proceso para la fabricación de los diferentes morteros es siempre el mismo. Se explicará el proceso de la fabricación del mortero de escoria con el silicato sódico.

Lo primero, es preparar las tres partes de la dosificación, en este caso, la escoria, la disolución agua/silicato, y los áridos con sus dosificaciones granulométricas correspondientes, tal como se ve en la *Figura 28*.

Una vez teniendo esto, hay que humedecer un poco el recipiente donde se va a realizar la mezcla. Lo primero que hay que mezclar, es la disolución con la escoria, y ponerlo en la máquina con la pala giratoria 30 segundos a una velocidad normal. Pasados los 30 segundos, sin dejar de girar la pala, el vertido de los áridos a la mezcla debe durar otros 30 segundos, y dejarlo otros 30 segundos más girando. Después se hace una pausa de 15 segundos, y se vuelve a poner 1 minuto a velocidad rápida.



Fig. 28 Materiales preparados para mezclar

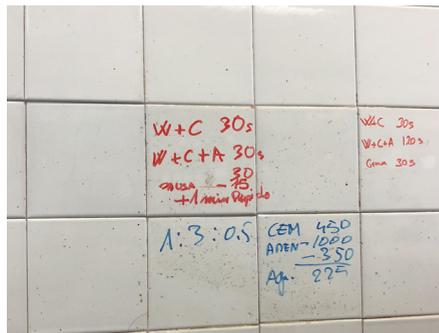


Fig. 29 Tiempos a seguir al mezclar morteros

Cuando se tiene el mortero, se sujeta el molde donde se debe verter, encima de la máquina de golpes. Se tiene que verter en dos tandas, más o menos al 50% del contenido cada una. Tras la primera, se iguala un poco las cantidades de los moldes con las paletas, y se tiene que activar la máquina y pararla tras los 60 golpes. Después se vierte la parte restante del mortero a los moldes, y con las paletas se regulariza e igualan los moldes.



Fig. 30 Máquina giratoria



Fig. 31 Vertido de la mezcla al molde



Fig. 32 Máquina de golpes



Fig. 33 Regulación del molde

5.5_Proceso de curado y desmoldado

Los moldes anteriores son llevados a la cámara de curado, lugar preparado con una temperatura ambiente de 20°C, y una humedad superior al 95%.

Dependiendo de la probeta, se desmoldan las piezas a las 24 horas si es posible, ya que en el caso de la ceniza volante aún no había adquirido rigidez suficiente a las 24 horas y se dejó en el molde. Unas se dejaron en esa cámara, y otras se llevaron a la estufa de curado metidas en un recipiente con agua para mantener la humedad, lugar con una temperatura de 65°C, y humedad de 100%.

Para desmoldarlo se debe golpear con cuidado el molde formado por piezas metálicas, que se van separando poco a poco de las probetas. Hay que llevar cuidado de no dañar las probetas con los golpes. Después se tiene que limpiar bien los moldes para poder reutilizarlos sin restos de los trabajos anteriores.



Fig. 34 Cámara de curado



Fig. 35 Probetas en la cámara



Fig. 36 Estufa de curado 1



Fig. 37 Estufa de curado 2



Fig. 38 Desmoldando las piezas



Fig. 39 Piezas desmoldadas

6 | Ensayos

6.1_ Ensayos a resistencia

Para la realización de estos ensayos, se utilizaron las probetas rectangulares de 40x40x160 mm. Lo primero que se debe hacer, es marcar un área de 16 cm² el centro de la pieza. Esto se realiza porque a la máquina principal, se le añade otro mecanismo que transforma la presión que aplicaría de forma lineal, en una presión cuadrada de 4x4 cm.

Los resultados mostrados serán los de rotura de cada material a los 7 y a los 14 días.

La máquina que realiza la presión, a partir de ahora llamada máquina 1, trabaja como una prensa. Esto quiere decir, que aplasta la probeta desde arriba, hasta que detecta su rotura. Todos estos resultados quedan reflejados en un ordenador con la gráfica de rotura, la fuerza aplicada y la resistencia de las piezas.

A continuación, mostraremos los resultados por materiales, es decir, comenzaremos con los resultados de los morteros de referencia, y después mostraremos los otros morteros sin cemento. Veremos gráficas individuales de su evolución a los 7 y 14 días, y al final se mostrará una gráfica comparativa de todos los materiales.

De cada material se rompieron dos muestras cada día de ensayo. En las pruebas con escoria y silicato sódico, hubo que cambiar de la máquina 1 a la máquina 2, ya que la 1 soporta un máximo de 150 KN aplicados, y hubo que pararla porque casi alcanzó el límite sin romperse la muestra. La máquina 2 funciona de manera inversa, la parte superior es fija, y aplica la carga subiendo la parte de inferior.



Fig. 40 Marcado de las piezas antes de romper



Fig. 41 Transformador de presión



Fig. 42 Máquina 1

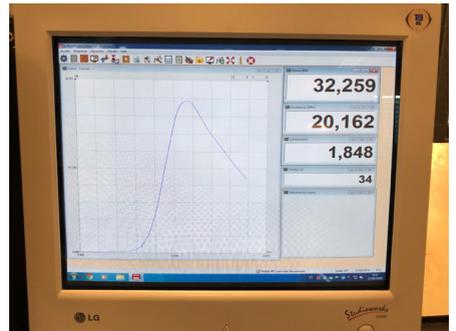


Fig. 43 Registro de datos en ordenador



Fig. 44 Máquina 2

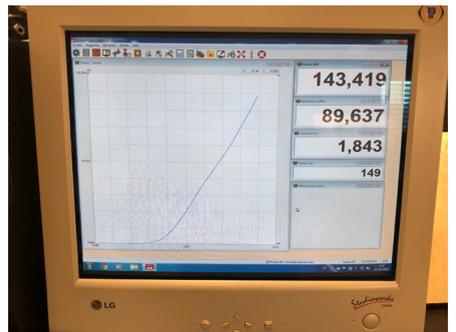


Fig. 45 Parada de la máquina 1

Mortero de cemento de 32,5 MPa.

Resultados de Compresión		
Mortero 32,5 MPa	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)
7 días	32,259	20,162
	33,654	21,034
14 días	37,44	23,40
	37,46	23,41

Tabla 29 Resultados compresión mortero 32,5



Mortero de cemento 42,5 MPa.

Resultados de Compresión		
Mortero 42,5 MPa	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)
7 días	51,335	32,084
	53,44	33,40
14 días	58,52	36,58
	56,34	35,21

Tabla 30 Resultados compresión mortero 42,5



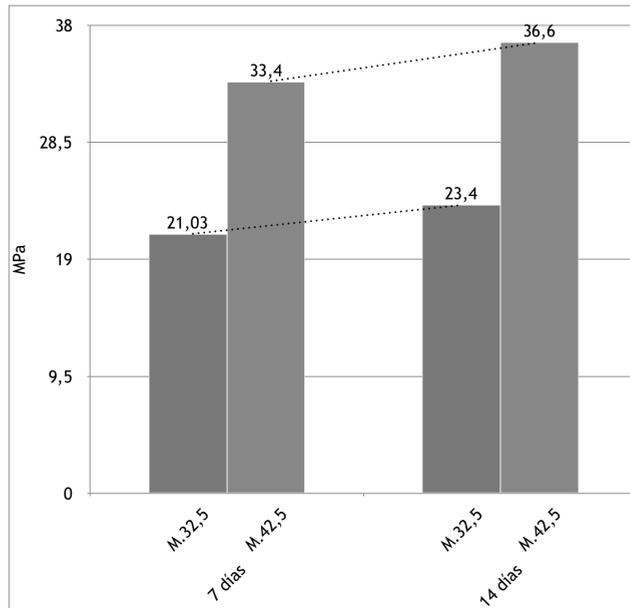


Fig. 46 Gráfica resistencia morteros de referencia

Como se puede ver son unos resultados esperados para estos tipos de morteros ya conocidos. Tienen una evolución creciente, hasta llegar a su valor predeterminado.

Mortero de Escoria + Hidróxido de Sódio, curado natural.

Resultados de Compresión		
Escoria + Hidróxido de sodio curado natural	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)
7 días	38,74	24,212
	39,237	24,523
14 días	47,31	29,57
	46,87	29,29

Tabla 31 Resultados compresión mortero E+H c/natural



Mortero de Escoria + Hidróxido de Sódio, curado a alta temperatura.

Resultados de Compresión		
Escoria + Hidróxido de sodio curado alta T°C	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)
7 días	85,402	53,376
	83,845	52,403
14 días	95,67	59,42
	99,72	62,32

Tabla 32 Resultados compresión mortero E+H c/alta temperatura



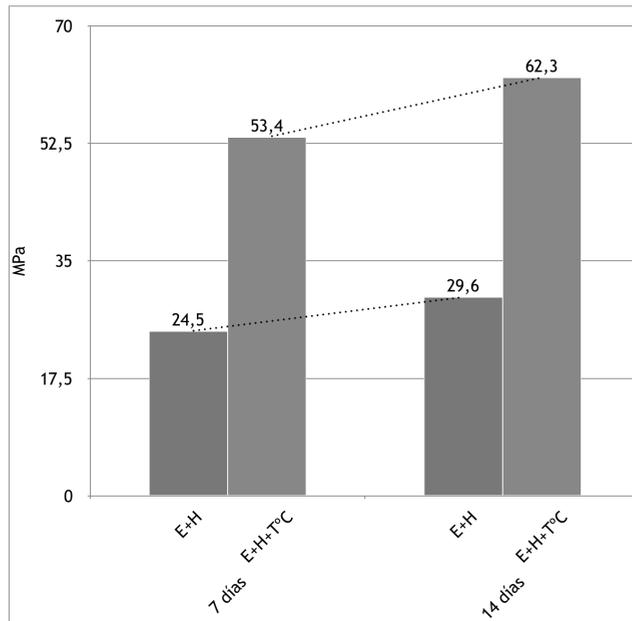


Fig. 47 Gráfica resistencia morteros de E+H

La comparación se debe realizar con los morteros con curado natural, ya que es como se han tratado los de referencia. Por tanto, vemos que a los 7 días adquieren una resistencia semejante a la del mortero convencional, y también tienen una evolución creciente. El curado de alta temperatura vemos que afecta muy positivamente a las muestras, llegando a duplicar su propia resistencia.

Mortero de Escoria + Silicato Sódico - 1, curado a alta temperatura.

Resultados de Compresión		
Escoria + Silicato sódico curado alta T°C - 1	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)
7 días	223,45	139,66
	213,83	133,64
14 días	224,74	140,45
	219,80	133,37



Tabla 33 Resultados compresión mortero E+S 1 c/alta temperatura

Mortero de Escoria + Silicato Sódico - 2, curado a alta temperatura.

Resultados de Compresión		
Escoria + Silicato sódico curado alta T°C - 2	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)
7 días	185,18	115,74
	185,93	116,20
14 días	177,80	111,12
	186,43	116,52

Tabla 34 Resultados compresión mortero E+S 2 c/alta temperatura

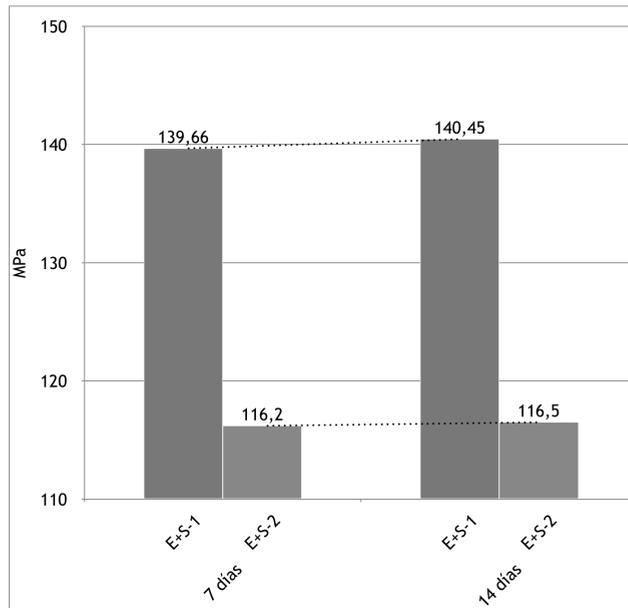


Fig. 48 Gráfica resistencia morteros de E+S

Estas muestras se curaron ambas en alta temperatura, por lo que los resultados no son comparables a los de referencia. En este ensayo es donde hubo que cambiar a la máquina 2, porque la 1 estuvo a punto de alcanzar su máximo permitido. Como vemos, la escoria con el silicato sódico a los 7 días adquiere unas resistencias de más de 100 MPa. Pero aquí no hay una evolución, la variación entre las dos fechas de rotura son mínimas. Esto es porque la reacción de activación de la escoria con el silicato sódico es mucho más rápida que la del cemento con el agua.

Mortero de Escoria + Silicato Sódico Pentahidratado, curado a alta temperatura.

Resultados de Compresión		
Escoria + Silicato sódico pentahidratado curado alta T°C	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)
7 días	172,63	107,90
	170,49	106,56
14 días	177,78	111,25
	180,59	112,87



Tabla 35 Resultados compresión mortero E+SP c/alta temperatura

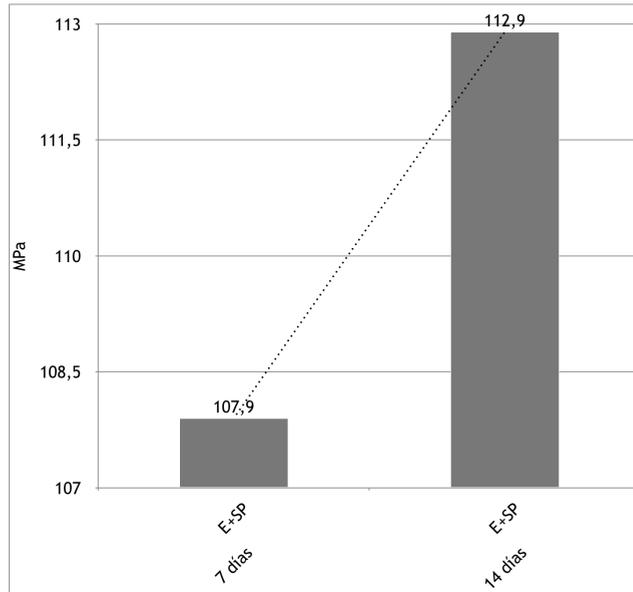


Fig. 49 Gráfica resistencia morteros de E+SP

Esta es otra prueba con escoria curado a alta temperatura, pero con un silicato sódico pentahidratado. Vemos que los resultados no son tan altos como en la prueba anterior, pero están en el mismo rango, más de 100 MPa a los 7 días. Además de una evolución también bastante pequeña.

Mortero de Ceniza volante + Hidróxido de sodio, curado natural.

Resultados de Compresión		
Ceniza volante + Hidróxido de sodio curado natural	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)
7 días	2,097	1,3
	---	---

Tabla 36 Resultados compresión mortero CV+H c/natural



Mortero de Ceniza volante + Hidróxido de sodio, ambos curados.

Resultados de Compresión	14 días	
	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)
Ceniza volante + Hidróxido de sodio		
CV 1 curado natural	9,48	5,93
CV 2 curado natural	7,39	4,62
CV 1 curado alta T°C	35,24	22,02
CV 2 curado alta T°C	57,00	35,62

Tabla 37 Resultados compresión mortero CV+H ambos curados

Esta muestra no llegó a adquirir una resistencia suficiente a los 7 días con un curado natural. Ya en el desmoldado de la pieza se notaba que no tenían una buena resistencia, porque se podía apreciar que estaban muy blandas, y si se rascaba un poco con el dedo se desprendía parte de la muestra. Las huellas quedaban marcadas en la probeta.

De esta muestra había 6 probetas rectangulares, y solo ensayamos una, ya que se obtuvo una resistencia de 1,3 MPa, y se decidió no probar más con estas muestras. Se guardaron unas en la cámara de curado para ver su evolución a los 14 días, y otras en la estufa de curado, para ver si había mejora.

Como vemos a los 14 días, las que se mantuvieron con un curado natural seguían teniendo unas resistencias muy bajas, pero las que se curaron a más temperatura, obtuvieron unos resultados entre 20 y 30 MPa.



Fig. 50 Morteros de CV dañados



Fig. 51 Dedos marcados en las muestras

Mortero de Ceniza volante + Hidróxido de sodio, curado a alta temperatura.

Resultados de Compresión		
Ceniza volante + Hidróxido de sodio curado alta T°C	Fuerza (KN)	Resistencia (MPa)
7 días	87,74	54,837
	84,50	52,812
14 días	108,25	67,66
	109,52	68,45

Tabla 38 Resultados compresión mortero CV+H c/alta temperatura



En cuanto a los morteros de ceniza volante curados a alta temperatura, vemos que sí adquieren unas buenas resistencias en comparación a los que tienen un curado natural. Vemos que tienen una evolución creciente, y que como la escoria adquiere bastante resistencia ya a los 7 días.

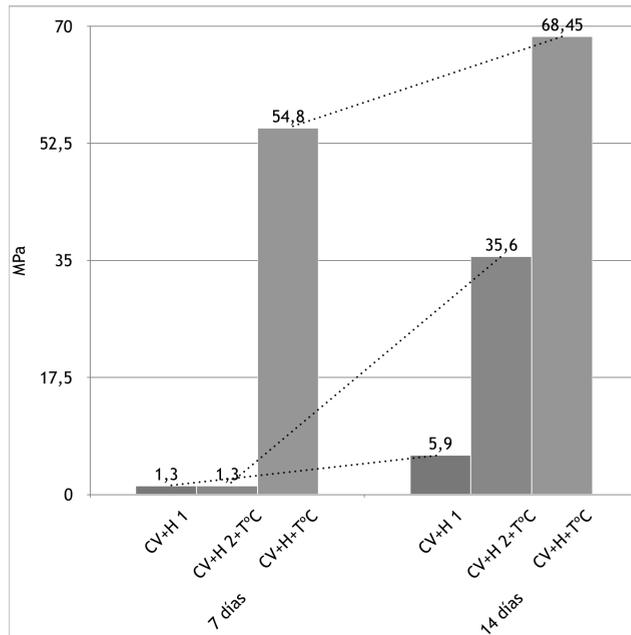


Fig. 52 Gráfica resistencia morteros de CV+H

En la gráfica comparativa, podemos ver las grandes diferencias que se producen cuando existe un curado natural o un curado a alta temperatura. Habría que probar con diferentes dosificaciones para que pueda producirse la geopolimerización más rápido.

Gráfica comparativa entre las muestras con un curado natural.

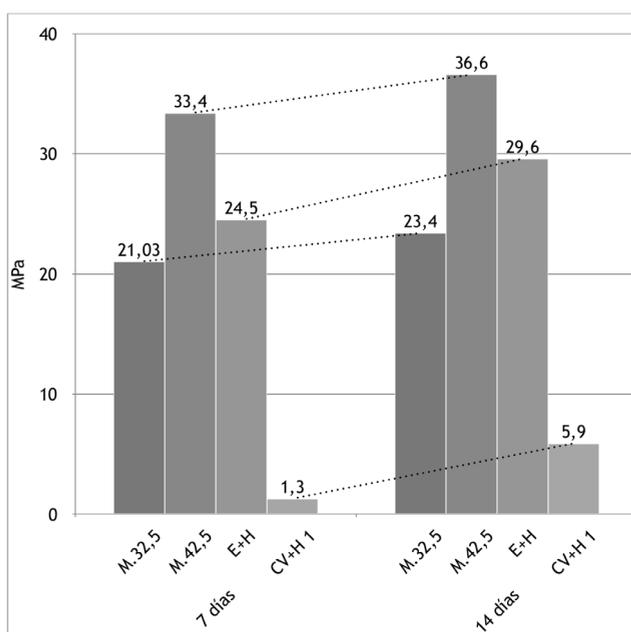


Fig. 53 Gráfica resistencia morteros con curado natural

La ceniza se puede despreciar, ya que los valores son muy inferiores a los otros comparados. Vemos que la escoria adquiere un valor medio entre los morteros de referencia, mayor que el de 32,5 MPa, pero menor que el de 42,5 MPa.

Gráfica comparativa entre las muestras con un curado a alta temperatura.

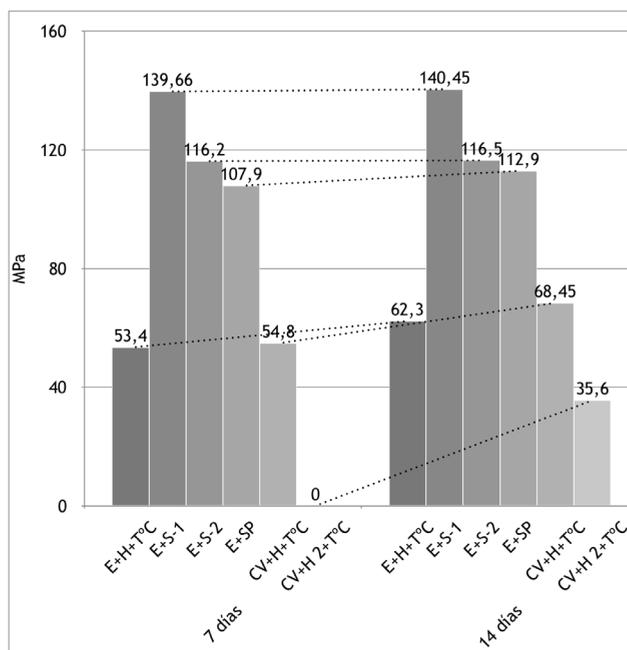


Fig. 54 Gráfica resistencia morteros con curado a alta temperatura

En esta gráfica tenemos dos rangos, el primero el de los aluminosilicatos activados mediante hidróxido de sodio, y los activados con silicato sódico. Los activados con hidróxido de sodio presentan unos rangos entre 50 y 70 MPa, excepto el último de ceniza volante, que como viene de 7 días con un curado natural, parece que no llega a su máximo real, como el que sí ha estado los 14 días con curado a alta temperatura. Y una tendencia creciente. En otro nivel tenemos las escorias activadas con silicato sódico, que pasan todos de los 100 MPa, llegando hasta los 140 MPa. Y su variación es mínima.

6.2_ Ensayos de absorción y porosidad

Para este ensayo, se utilizaron las probetas cúbicas. Las muestras que utilizamos fueron las de mortero de 32,5 MPa, mortero de 42,5 MPa, y las dos de escoria + hidróxido de sodio, con curado natural, y con curado a alta temperatura. Lo primero, fue cortarlas en dos partes.

Después se dejaron en estufa a 60°C durante 72 horas, para eliminar todo el agua o humedad que tuviesen.

Tras las 72 horas de secado, se metieron en el recipiente de cristal que vemos en la *Figura 56*. Este recipiente llevaba bajo del fondo unos minerales que absorben humedad. Se dejaron aquí dentro enfriándose durante 4 horas. Una vez pasado este tiempo, se sacaron y se pesaron para obtener el peso seco de las muestras.

Se volvieron a meter en el recipiente de cristal, esta vez sin los minerales en la parte inferior, y creando un vacío. Y tras 4 horas de vacío, sin romper este vacío, se las satura de agua durante 44 horas.

Transcurrido este tiempo, se sacan del recipiente, y mientras unas permanecen sumergidas en agua, de una en una se deben pesar otra vez en la misma balanza que se pesó la última vez, pero ahora se pesa colgando y sumergida en agua. Con esto obtenemos el peso hidrostático. Se dejaron 5 minutos sumergidas colgando del peso para que todas tuviesen el mismo tiempo para equilibrarse.

Y para terminar, se deben secar superficialmente con un paño las muestras, y volverlas a pesar, obteniendo así el peso de la probeta saturada y superficialmente seca.



Fig. 55 Piezas cúbicas cortadas

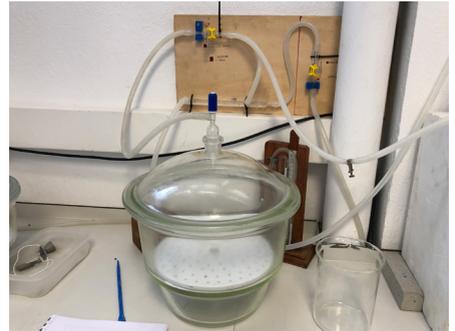


Fig. 56 Recipiente de cristal



Fig. 57 Recipiente saturado y en vacío

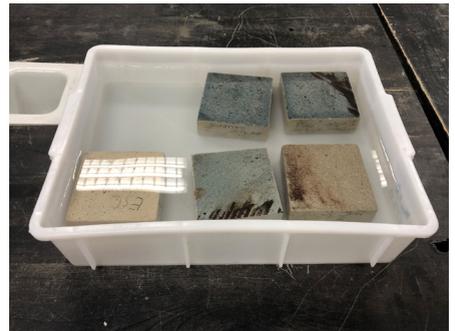


Fig. 58 Probetas sumergidas



Fig. 59 Peso utilizado



Fig. 60 Secado superficial

A continuación veremos una tabla con los resultados de las tres pesadas de las muestras.

Resultados			
	Mseco (gr)	Magua (gr)	Maire (gr)
Mortero 32,5 - 1	1001,88	601,66	1086,44
Mortero 32,5 - 2	978,84	582,03	1057,34
Mortero 42,5 - 1	1017,87	593,07	1073,25
Mortero 42,5 - 2	1009,02	585,31	1060,60
Mortero E+H c/natural - 1	991,09	571,11	1046,15
Mortero E+H c/natural - 2	1015,52	584,57	1072,88
Mortero E+H c/alta T°C - 1	1052,44	601,02	1082,77
Mortero E+H c/alta T°C - 2	1065,81	607,23	1094,22

Tabla 39 Resultados pesadas de las piezas

Según la norma española UNE 83980:2014, las fórmulas para el cálculo de la porosidad y la absorción son las siguientes:

$$\text{Porosidad} = \frac{\text{Maire} - \text{Mseca}}{\text{Maire} - \text{Magua}} \times 100$$

Fig. 61 Fórmula porosidad

$$\text{Absorción} = \frac{\text{Maire} - \text{Mseca}}{\text{Mseca}} \times 100$$

Fig. 62 Fórmula absorción

Donde:

Maire = Peso en probeta saturada y superficialmente seca.

Mseca = Peso seco.

Magua = Peso hidrostático.

Aquí mostramos los resultados de ambas fórmulas.

Resultados		
	Porosidad (%)	Absorción (%)
Mortero 32,5 - 1	17,44	8,44
Mortero 32,5 - 2	16,52	8,02
Mortero 42,5 - 1	11,53	5,44
Mortero 42,5 - 2	10,85	5,11
Mortero E+H c/natural - 1	11,59	5,56
Mortero E+H c/natural - 2	11,75	5,65
Mortero E+H c/alta T°C - 1	6,30	2,88
Mortero E+H c/alta T°C - 2	5,83	2,67

Tabla 40 Resultados fórmulas porosidad/absorción

Podemos ver que con diferencia el material más poroso es el mortero de 32,5 MPa, siendo también el que menores resistencias presenta.

La escoria con curado natural presenta unos valores muy similares a los del mortero de 42,5 MPa, aunque los de este último son un poco menores, y su resistencia también es mayor que la de la escoria. Por lo que parece que a mayor resistencia adquieren mayor porosidad.

Y el último caso, parece que el curado a alta temperatura reafirma lo dicho anteriormente, ya que tiene el doble de resistencia que los morteros de 42,5 MPa, y presenta una porosidad y absorción que es aproximadamente la mitad. Esto parece indicar que a una mayor temperatura de curado, el mortero de escoria compacta más, adquiriendo mayor resistencia y menor absorción y porosidad.

Cuanto menor sea la porosidad y absorción, implica una mayor dificultad para la penetración de agua o demás agentes agresivos externos, por lo que se aumenta la durabilidad del material.

6.3_Ensayos de niveles de pH

Lo primero fue cortar las piezas cilíndricas. Se utilizaron 4 muestras, las dos de referencia, una de escoria, y otra de ceniza volante, estas dos últimas curadas a alta temperatura.

Para el cálculo del pH, se utilizó la prueba de lixiviación in situ. La cual consiste en lo siguiente, teniendo las probetas cilíndricas cortadas con un espesor mínimo de 50 mm y saturadas de agua, se les hace un hueco en el centro con un taladro, de un diámetro de 5mm, y una profundidad aproximada de 25-35 mm.

Después, se introduce un tubo de pvc en el hueco, para poder taparlo posteriormente con un tapón. Se debe sellar bien la junta entre el tubo y la muestra con silicona, por ejemplo.

Una vez hecho esto, se introduce agua destilada en el hueco, y se deja tapado, y en un ambiente con 100% humedad. Y hay que ir llevando un control cada cierto tiempo para ver la evolución del pH en la muestra.

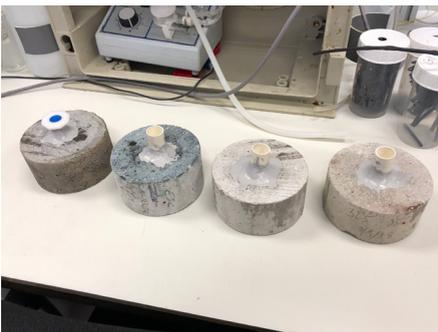


Fig. 63 Muestras preparadas para la prueba



Fig. 64 Control de pH con máquina

A continuación veremos una tabla con los resultados de los controles.

Resultados niveles de PH				
Minutos	P1	P2	P3	P4
30	12,5	13,6	13,3	13,8
111	12,6	13,6	14	13,7
189	12,7	13,7	14	13,7
308	12,7	13,7	13,8	13,7
3990	13,8	13,7	13,8	13,7
4382	13,8	13,7	13,8	13,7

Tabla 41 Resultados control de PH en muestras

Las muestras P1, P2, P3, y P4, corresponden a las probetas de ceniza volante, escoria, mortero de 42,5, y mortero de 32,5 respectivamente.

Como podemos ver, excepto la muestra de ceniza volante, todas adquieren un pH alto desde el inicio, y se mantienen en un valor semejante al primer durante todas las comprobaciones. En cambio, la muestra P1, presenta un pH más bajo, y le cuesta más tiempo alcanzar un valor estable, que si termina siendo como el de las otras probetas.

Aunque la cinética sea distinta, al final del ensayo se consigue en todos los morteros estudiados un pH similar, con lo que en los nuevos morteros sin cemento, el pH altamente básico es similar al de los hormigones convencionales, y propiciaría la creación de la capa de óxido protectora en las armaduras (capa pasiva).

7 | Conclusión

7.1_Conclusión

Tras este trabajo, podemos concluir que estos nuevos materiales sin cemento, son capaces de igualar a los materiales tradicionales fabricados con cemento, tanto en resistencia como en durabilidad.

En cuanto a las resistencias de las muestras, se ha demostrado que adquieren unas resistencias válidas para los trabajos comunes en obra, por lo menos las escorias, ya que con un curado natural adquieren unas resistencias aproximadas a los 30 MPa, y antes de los 28 días. La ceniza volante habría que probar con otras dosificaciones porque con la que nosotros hicimos sin la ayuda de temperatura no llegó a producirse una buena geopolimerización.

Respecto a los materiales curados a alta temperatura, vemos que han adquirido unos valores muy altos en comparación al resto, 140 MPa la que mayor resistencia adquirió, del orden de casi 4 veces las alcanzadas con los morteros de referencia. Aunque esto realmente no sea necesario en la construcción, excepto casos puntuales. Se podría mejorar la dosificación para quizás utilizando menos solución activadora, conseguir también una resistencia más adecuada para el uso cotidiano, y además abaratar el producto.

En los ensayos de pH, también se alcanzaron buenos resultados, ya que se obtuvieron unos valores de pH iguales a los registrados en los morteros de referencia, del orden de 13,7. La muestra de ceniza volante empezó con un pH más bajo, pero terminó adquiriendo un pH igual que el de las demás muestras. Estos resultados nos muestran que en los geopolímeros también se dan las condiciones adecuadas de pH para que se forme una capa de óxido pasivante que proteja las armaduras y evite su corrosión.

En cuanto al tema de la sostenibilidad, de acuerdo con los resultados aportados por otros investigadores, en los geopolímeros se generan hasta un 50% menos de emisiones respecto a los hormigones tradicionales, lo que implicaría una gran disminución de las emisiones totales en el planeta si se comenzasen a utilizar estos materiales.

Económicamente, también hemos visto que sería posible la fabricación de estos materiales, ya que en el caso más favorable que hemos visto, es incluso un 27% más económico fabricarlo, que un hormigón tradicional.

Dados los buenos resultados obtenidos, pero teniendo en cuenta las dificultades técnicas de puesta en obra (al utilizarse disoluciones muy alcalinas y, por lo tanto, peligrosas al contacto con la piel), el uso en obra de los geopolímeros está limitado, si bien podría utilizarse en taller para la construcción de elementos prefabricados.

8 | Bibliografía

8.1_Bibliografía

- 1._ ALBORNOZ MUÑOZ, Juan. Cálculo de la huella de carbono asociada a la elaboración de hormigones geopoliméricos en Chile [en línea]. Santiago, Chile: Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2015 [Fecha consulta: 1 de septiembre 2018]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/134660>
- 2._ ASTM COMMITTEE C-09 ON CONCRETE AND CONCRETE AGGREGATES. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International, 2013.
- 3._ CEDEX-a, 2011. Ficha Técnica: cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar o escorias. En: Cedex [en línea]. Disponible en: <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/B01FDCCB-AC8E-4089-9699-FA-6413FBEE7C/119905/CENIZASVOLANTESDECARBONYCENIZASDEHOGAR.pdf> [consulta: 3 septiembre 2018].
- 4._ CEDEX-b, 2011. Ficha Técnica: Escorias de horno alto. En: Cedex [en línea]. Disponible en: <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/BFF81F23-BDB7-4B5B-85A5-A7ABD2974A42/119856/ESCORIAS-DEHORNOALTO.pdf> [consulta: 2 septiembre 2018].
- 5._ DAVIDOVITS, J., (1994), Alkaline Cements and Concretes, KIEV Ukraine, 1994, Properties of Geopolymer cements, Technical Paper #8, Geopolymer Institute Library, www.geopolymer.org.
- 6._ DE LUXÁN, María Pilar; DE ROJAS, María Isabel Sánchez; SORIA, F. Características de cenizas volantes españolas. Materiales de construcción, 1988, no 209, p. 25-38.

- 7._ GONZÁLEZ ACUÑA, Rolando Enrique. Caracterización de geopolímeros base ceniza volante y escoria granulada de alto horno. 2012. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- 8._ GOURLEY, Terry, (2011). Recommended Practice, Geopolymer Concrete. Concrete Institute of Australia [Consulta: 4 septiembre 2018]. ISBN 1 921093 56 0. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/A_B_M_Kaish/post/Besides_cement_what_other_alternative_binders_do_we_have_in_use_today_and_how_do_they_compare/attachment/59d62e4479197b807798c7af/AS%3A353588623757319%401461313506081/download/Geopolymer-Concrete_2011.pdf.pdf.
- 9._ GUTIÉRREZ TORRES, Arnold Giuseppe, et al. (2017), Obtención y caracterización de geopolímeros sintetizados a partir de la escoria granulada de alto horno como uso alternativo del cemento Portland. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.
- 10._ OMEMAN, Z. (2007). El cemento de geopolímeros en el hormigón. Cemento Hormigón: Revista Técnica: Fabricación, Investigación Y Aplicaciones Del Cemento Y Del Hormigón., (906), 4-19.
- 11._ PUERTAS, F. Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico. Materiales de construcción, 1993, vol. 43, no 229, p. 37-48.

- 12._ SEGURA-SIERPE, Yasna Pamela, et al. Estudios preliminares sobre cemento hidratado para su reutilización en geopolímeros. En DYNA. Universidad Nacional de Colombia, 2016.
- 13._ STENGEL, T., Reger, J., Heinz, D., (2009), LCA of geopolymer concrete - what is the environmental benefit? Proceedings Concrete 09, 24th Biennial Conf Australian Concrete Institute, Sydney, Concrete Institute of Australia, PP. 54-62.
- 14._ UNE-EN 450-1:2006+A1:2008. “Cenizas volantes para hormigón. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad”.

ÍNDICE de figuras

Fig.01 Modelo simplificado de Geopolimerización.

Elaboración propia a partir de la fuente: SEGURA-SIERPE, Yasna Pamela, et al. Estudios preliminares sobre cemento hidratado para su reutilización en Geopolímeros. En DYNA. Universidad Nacional de Colombia, 2016.

Fig.02 Composición química de la escoria.

PUERTAS, F. Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico. Materiales de construcción, 1993, vol. 43, no 229, p. 37-48.

Fig.03 Fórmula para calcular el contenido de NaOH.

GUTIÉRREZ TORRES, Arnold Giuseppe, et al. (2017), Obtención y caracterización de geopolímeros sintetizados a partir de la escoria granulada de alto horno como uso alternativo del cemento Portland. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.

Fig.04 Resultados de compresión 2.

GUTIÉRREZ TORRES, Arnold Giuseppe, et al. (2017), Obtención y caracterización de geopolímeros sintetizados a partir de la escoria granulada de alto horno como uso alternativo del cemento Portland. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.

Fig.05 Resultados de compresión 3.

GUTIÉRREZ TORRES, Arnold Giuseppe, et al. (2017), Obtención y caracterización de geopolímeros sintetizados a partir de la escoria granulada de alto horno como uso alternativo del cemento Portland. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.

Fig.06 Resultados de compresión 4.

GUTIÉRREZ TORRES, Arnold Giuseppe, et al. (2017), Obtención y caracterización de geopolímeros sintetizados a partir de la escoria granulada de alto horno como uso alternativo del cemento Portland. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.

Fig.07 Resultados de compresión 5.

GUTIÉRREZ TORRES, Arnold Giuseppe, et al. (2017), Obtención y caracterización de geopolímeros sintetizados a partir de la escoria granulada de alto horno como uso alternativo del cemento Portland. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá.

Fig.08 Molienda manual de la escoria.

Elaboración propia.

Fig.09 Tamizado.

Elaboración propia.

Fig.10 Máquina Micro-Deval.

Elaboración propia.

Fig.11 Estufa calentando la escoria.

Elaboración propia.

Fig.12 Componente Micro-Deval.

Elaboración propia.

Fig.13 Fases de molienda antes de Molino.

Elaboración propia.

Fig.14 Molino de bolas.

Elaboración propia.

Fig.15 Componente principal de molino.

Elaboración propia.

Fig.16 Componentes molino de bolas.

Elaboración propia.

Fig.17 Comparación de finuras antes/después.

Elaboración propia.

Fig.18 Escoria final 1.

Elaboración propia.

Fig.19 Escoria final 2.

Elaboración propia.

Fig.20 Arena retenida en tamiz 1 mm.

Elaboración propia.

- Fig.21** Arena retenida en tamiz 0,5 mm.
Elaboración propia.
- Fig.22** Arena retenida en tamiz 0,125 mm.
Elaboración propia.
- Fig.23** Arena que pasa por tamiz 0,125 mm.
Elaboración propia.
- Fig.24** Arena tamizada y separada.
Elaboración propia.
- Fig.25** Tamices utilizados.
Elaboración propia.
- Fig.26** Ambas máquinas trabajando.
Elaboración propia.
- Fig.27** Máquina de ultrasonidos.
Elaboración propia.
- Fig.28** Materiales preparados para mezclar.
Elaboración propia.
- Fig.29** Tiempos a seguir al mezclar morteros.
Elaboración propia.
- Fig.30** Máquina giratoria.
Elaboración propia.

Fig.31 Vertido de la mezcla al molde.

Elaboración propia.

Fig.32 Máquina de golpes.

Elaboración propia.

Fig.33 Regulación del molde.

Elaboración propia.

Fig.34 Cámara de curado.

Elaboración propia.

Fig.35 Probetas en la cámara.

Elaboración propia.

Fig.36 Estufa de curado 1.

Elaboración propia.

Fig.37 Estufa de curado 2.

Elaboración propia.

Fig.38 Desmoldando las piezas.

Elaboración propia.

Fig.39 Piezas desmoldadas.

Elaboración propia.

Fig.40 Marcado de las piezas antes de romper.

Elaboración propia.

Fig.41 Transformador de presión.

Elaboración propia.

Fig.42 Máquina 1.

Elaboración propia.

Fig.43 Registro de datos en ordenador.

Elaboración propia.

Fig.44 Máquina 2.

Elaboración propia.

Fig.45 Parada de la máquina 1.

Elaboración propia.

Fig.46 Gráfica resistencia morteros de referencia.

Elaboración propia.

Fig.47 Gráfica resistencia morteros de E+H.

Elaboración propia.

Fig.48 Gráfica resistencia morteros de E+S.

Elaboración propia.

Fig.49 Gráfica resistencia morteros de E+SP.

Elaboración propia.

Fig.50 Mortero de CV dañados.

Elaboración propia.

Fig.51 Dedos marcados en las muestras.

Elaboración propia.

Fig.52 Gráfica resistencia morteros de CV+H.

Elaboración propia.

Fig.53 Gráfica resistencia morteros con curado natural.

Elaboración propia.

Fig.54 Gráfica resistencia morteros con curado a alta temperatura.

Elaboración propia.

Fig.55 Piezas cúbicas cortadas.

Elaboración propia.

Fig.56 Recipiente de cristal.

Elaboración propia.

Fig.57 Recipiente saturado y en vacío.

Elaboración propia.

Fig.58 Probetas sumergidas.

Elaboración propia.

Fig.59 Peso utilizado.

Elaboración propia.

Fig.60 Secado superficial.

Elaboración propia.

Fig.61 Fórmula porosidad.
Elaboración propia.

Fig.62 Fórmula absorción.
Elaboración propia.

Fig.63 Muestras preparadas para la prueba.
Elaboración propia.

Fig.64 Control de pH con máquina.
Elaboración propia.

ÍNDICE de tablas

Tab.01 Producción y valorización de cenizas en España y Europa.
CEDEX-a, 2011. Ficha Técnica: cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar o escorias. En: Cedex [en línea]. Disponible en: <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/B01FDCCB-AC8E-4089-9699-FA6413FBEE7C/119905/CENIZASVOLANTESDECARBONYCENIZASDEHOGAR.pdf> [consulta: 3 septiembre 2018].

Tab.02 Clasificación de la ceniza volante según ASTM.
Elaboración propia a partir de la fuente: ASTM COMMITTEE C-09 ON CONCRETE AND CONCRETE AGGREGATES. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International, 2013.

Tab.03 Dosificaciones 1.

Elaboración propia a partir de la fuente: ALBORNOZ MUÑOZ, Juan. Cálculo de la huella de carbono asociada a la elaboración de hormigones geopoliméricos en Chile [en línea]. Santiago, Chile: Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2015 [Fecha consulta: 1 de septiembre 2018]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/134660>

Tab.04 Resultados de compresión 1.

Elaboración propia a partir de la fuente: GONZÁLEZ ACUÑA, Rolando Enrique. Caracterización de geopolímeros base ceniza volante y escoria granulada de alto horno. 2012. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Tab.05 Emisión de CO₂ del hormigón HGHD.

Elaboración propia a partir de la fuente: ALBORNOZ MUÑOZ, Juan. Cálculo de la huella de carbono asociada a la elaboración de hormigones geopoliméricos en Chile [en línea]. Santiago, Chile: Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2015 [Fecha consulta: 1 de septiembre 2018]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/134660>

Tab.06 Emisión de CO2 del hormigón HG5.

Elaboración propia a partir de la fuente: ALBORNOZ MUÑOZ, Juan. Cálculo de la huella de carbono asociada a la elaboración de hormigones geopoliméricos en Chile [en línea]. Santiago, Chile: Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2015 [Fecha consulta: 1 de septiembre 2018]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/134660>

Tab.07 Emisión de CO2 de todos los hormigones.

Elaboración propia a partir de la fuente: ALBORNOZ MUÑOZ, Juan. Cálculo de la huella de carbono asociada a la elaboración de hormigones geopoliméricos en Chile [en línea]. Santiago, Chile: Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2015 [Fecha consulta: 1 de septiembre 2018]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/134660>

Tab.08 Variación porcentual de la emisión de CO2 respecto a los hormigones convencionales.

Elaboración propia a partir de la fuente: ALBORNOZ MUÑOZ, Juan. Cálculo de la huella de carbono asociada a la elaboración de hormigones geopoliméricos en Chile [en línea]. Santiago, Chile: Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2015 [Fecha consulta: 1 de septiembre 2018]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/134660>

Tab.09 Variación porcentual del coste de fabricación respecto a los hormigones convencionales.

Elaboración propia a partir de la fuente: ALBORNOZ MUÑOZ, Juan. Cálculo de la huella de carbono asociada a la elaboración de hormigones geopoliméricos en Chile [en línea]. Santiago, Chile: Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2015 [Fecha consulta: 1 de septiembre 2018]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/134660>

Tab.10 Número de probetas a realizar.

Elaboración propia.

Tab.11 Distribución granulométrica arena CEN.

Elaboración propia.

Tab.12 Distribución granulométrica adaptada.

Elaboración propia.

Tab.13 Mortero 42,5 MPa rectangular.

Elaboración propia.

Tab.14 Mortero 42,5 MPa cilíndrico.

Elaboración propia.

Tab.15 Mortero 42,5 MPa cúbico.

Elaboración propia.

Tab.16 Mortero 32,5 MPa rectangular.

Elaboración propia.

Tab.17 Mortero 32,5 MPa cilíndrico.

Elaboración propia.

Tab.18 Mortero 32,5 MPa cúbico.

Elaboración propia.

Tab.19 Mortero E + H rectangular.

Elaboración propia.

Tab.20 Mortero E + H cilíndrico.

Elaboración propia.

Tab.21 Mortero E + H cúbico.

Elaboración propia.

Tab.22 Mortero E + S rectangular 1.

Elaboración propia.

Tab.23 Mortero E + S rectangular 2.

Elaboración propia.

Tab.24 Mortero E + SP rectangular.

Elaboración propia.

Tab.25 Mortero E + SP cilíndrico.

Elaboración propia.

Tab.26 Mortero CV + H rectangular 1.

Elaboración propia.

Tab.27 Mortero CV + H rectangular 2.

Elaboración propia.

Tab.28 Mortero CV + H cilíndrica.

Elaboración propia.

Tab.29 Resultados compresión mortero 32,5.

Elaboración propia.

Tab.30 Resultados compresión mortero 42,5.

Elaboración propia.

Tab.31 Resultados compresión mortero E+H c/natural.

Elaboración propia.

Tab.32 Resultados compresión mortero E+H c/alta temperatura.

Elaboración propia.

Tab.33 Resultados compresión mortero E+S 1 c/alta temperatura.

Elaboración propia.

Tab.34 Resultados compresión mortero E+S 2 c/alta temperatura.

Elaboración propia.

Tab.35 Resultados compresión mortero E+SP c/alta temperatura.

Elaboración propia.

Tab.36 Resultados compresión mortero CV+H c/natural.

Elaboración propia.

Tab.37 Resultados compresión mortero CV+H ambos curados.

Elaboración propia.

Tab.38 Resultados compresión mortero CV+H c/alta temperatura.

Elaboración propia.

Tab.39 Resultados pesados de las piezas.

Elaboración propia.

Tab.40 Resultados fórmulas porosidad/absorción.

Elaboración propia.

Tab.41 Resultados control de pH en muestras.

Elaboración propia.

