

Trabajo Fin de Máster

Máster en Ingeniería Ambiental

Compatibilidad de pinturas en matrices geopoliméricas. Síntesis de nuevos materiales de construcción con propiedades mejoradas

Autora: Cristina Cala Martínez

Tutores: Yolanda Luna Galiano

Constantino Fernández Pereira

Dpto. Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Ambiental

Compatibilidad de pinturas en matrices geopoliméricas. Síntesis de nuevos materiales de construcción con propiedades mejoradas

Autora:

Cristina Cala Martínez

Tutores:

Yolanda Luna Galiano

Profesora Titular de Universidad

Constantino Fernández Pereira

Catedrático de Universidad

Dpto. Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Máster: Compatibilidad de pinturas en matrices geopoliméricas. Síntesis de nuevos materiales de construcción con propiedades mejoradas

Autora: Cristina Cala Martínez

Tutores: Yolanda Luna Galiano

Constantino Fernández Pereira

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Nada permanece excepto el cambio.

Agradecer y dedicar esta parte de mi trabajo realizado durante el máster a mi familia, en concreto a mis padres y hermanas.

A mis padres por apoyarme y respetarme en cada paso que he dado, ya fueran pasos acertados o erróneos, y por los valores y espíritu de lucha que me han dado. Gracias por vuestro amor incondicional.

A mis hermanas, por hacerme el camino más fácil, por darme otros puntos de vista que muchas veces no he sido capaz de ver y por darme la oportunidad de creer en mi y yo ser capaz de no decepcionaros.

Mencionar también a mis amigos, la familia que elegimos, por la cantidad de veces que me habéis escuchado quejarme, llorar de tristeza o de alegría. Sobre todo, a esos amigos con los que he compartido este camino. Sin ustedes no hubiera sido lo mismo.

Me despido pensando que no será la última vez que os dedique algún logro, todavía quedan muchos objetivos que cumplir y aventuras que vivir.

Por último, reconocer el excelente trato que Yolanda Luna y Constantino Fernández han tenido conmigo durante la realización de este trabajo, gracias por los conocimientos que me habéis dado y la paciencia en estos tiempos.

Resumen

En nuestro entorno, todos los objetos que nos rodean están pintados. Desde las paredes de las viviendas, muebles, vehículos, hasta las carreteras que transitamos. Gracias a las pinturas se obtienen efectos estéticos a través de los objetos, además de la protección que éstas confieren a los materiales. Queda por tanto de manifiesto la importancia de la industria de la pintura en nuestras vidas.

Un sector importante en el uso de pinturas es el sector de la construcción. Éste además es una de las actividades que más residuos produce, de hecho, los residuos de pintura forman parte de los denominados residuos de construcción y demolición. Otro problema ambiental a añadir, además de la cantidad de residuos que se generan en esta actividad, es el tratamiento que reciben, que en la actualidad no es en muchos casos lo suficientemente apropiado para su aprovechamiento.

Este proyecto se plantea con el objetivo último de minimizar el impacto producido por los residuos de pintura, mediante la obtención de nuevos materiales constructivos que los incluyan, materiales que muestren unas propiedades destacadas, al tanto que reducen los efectos negativos de dichos residuos. En resumen, la incorporación de los residuos de pintura en nuevos productos pretende contribuir a orientar la economía hacia un modelo circular.

Dichos objetivos se van a conseguir gracias al uso de geopolímeros. Estos materiales han ido evolucionando en las últimas décadas y son muy demandados por las bajas emisiones de CO₂ durante su producción.

Por lo tanto, en este estudio se pretende comprobar mediante diversos ensayos físicos y mecánicos si los nuevos materiales de construcción creados con geopolímeros y con pintura cumplen o no con las especificaciones de los materiales a los quieren sustituir.

Abstract

In our environment, all the objects that surround us are painted. From the walls of the houses, furniture, vehicles, to the roads we travel. Thanks to the different types of paint, aesthetic effects are obtained through the objects, in addition to the protection they give to the materials. The importance of the painting industry in our lives is therefore evident.

An important sector in the use of paint is the construction industry. This is also one of the activities that produces the most waste, in fact, paint waste is part of the so-called construction and demolition waste. Another environmental problem to take into account in addition to the amount of waste generated in this activity is the treatment they receive, which in many cases is not appropriate enough for its use.

This project is proposed with the ultimate objective of minimizing the impact produced by paint residues, by obtaining new construction materials that include them, materials that show outstanding properties, while reducing the negative effects of said residues. In summary, the incorporation of paint residues in new products aims to help orient the economy towards a circular model.

These objectives will be achieved thanks to the use of geopolymers. These materials have been evolving in recent decades and they are in high demand due to the low CO₂ emissions during their production.

Therefore, in this study we will pretend to verify through various physical and mechanical tests if the new construction materials created with geopolymers and paint conform or not with the specifications of the material they want to replace.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xviii
Índice de Figuras	xx
1 Introducción	1
2 Antecedentes	3
2.1 <i>Pintura</i>	3
2.1.1 Definición y composición	3
2.1.2 Reología	4
2.1.3 Fabricación	6
2.1.4 Usos	7
2.1.5 Formulación	7
2.1.6 Efectos perjudiciales de la pintura para el medio ambiente	8
2.1.7 Pintura en polvo	10
2.1.8 Residuos de construcción y demolición	11
2.1.9 Empleo de residuos de pintura como materia prima	15
2.2 <i>Geopolímeros</i>	16
2.2.1 Materias primas empleadas para la formación de geopolímeros	16
2.2.2 Geopolimerización	19
2.2.3 Relaciones moleculares para la síntesis de geopolímeros	21
2.2.4 Principales parámetros en la síntesis de los geopolímeros	22
2.2.5 Geopolímeros y zeolitas	22
2.2.6 Propiedades generales de los geopolímeros	23
2.2.7 Aplicaciones	23
3 Desarrollo experimental	29
3.1 <i>Materiales</i>	29
3.1.1 Ceniza Volante	29
3.1.2 Metacaolín	31
3.1.3 Solución activadora	32
3.1.4 Pintura	32
3.2 <i>Elaboración de geopolímeros a menor escala</i>	33
3.2.1 Preparación de soluciones	33
3.2.2 Mezcla de sólido y solución activadora	33
3.2.3 Relleno de los moldes	34
3.2.4 Fraguado y desmolde de las probetas	34
3.3 <i>Elaboración de geopolímeros a mayor escala</i>	35
3.3.1 Preparación de soluciones	35
3.3.2 Mezcla de sólido y solución activadora	35
3.3.3 Relleno de los moldes, fraguado y desmolde de las probetas	35
3.3.4 Preparación de paralelepípedos	35
3.4 <i>Ensayos realizados</i>	36
3.4.1 Estudio de propiedades físicas	36
3.4.2 Estudio de propiedades mecánicas	37

4	Resultados y discusión	41
4.1	<i>Estudio previo</i>	41
4.1.1	Geopolímeros de ceniza Volante	41
4.1.2	Geopolímeros de metacaolín	43
4.2	<i>Estudio a mayor escala</i>	44
4.2.1	Densidad aparente	45
4.2.2	Porosidad	46
4.2.3	Dureza	47
4.2.4	Resistencia a compresión	48
4.2.5	Resistencia a flexión	49
5	Conclusiones	51
	Referencias	52
	Anexo A: Datos del estudio previo	57
	Anexo B: Datos de muestras a mayor escala	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. <i>Aplicaciones de geopolímeros según Si/Al.</i>	24
Tabla 3-1. <i>Composición mayoritaria de la ceniza volante.</i>	30
Tabla 3-2. <i>Datos humedad y pérdida por calcinación.</i>	30
Tabla 3-3. <i>Concentración de elementos traza en la ceniza volante.</i>	30
Tabla 3-4. <i>Composición mineralógica de la ceniza volante.</i>	30
Tabla 3-5. <i>Distribución de tamaño de partículas por percentiles.</i>	31
Tabla 3-6. <i>Composición mayoritaria del metacaolín.</i>	31
Tabla 3-7. <i>Especificaciones silicato sódico.</i>	32
Tabla 3-8. <i>Concentraciones de soluciones activadoras empleadas.</i>	33
Tabla 4-1. <i>Valores porosidad media en muestras geopoliméricas.</i>	46
Tabla 4-2. <i>Valores dureza media en muestras geopoliméricas (Shore C).</i>	48
Tabla 4-3. <i>Valores resistencia a compresión media en muestras geopoliméricas.</i>	49
Tabla A-1. <i>Ensayo a compresión, ceniza volante con distintas soluciones activadoras.</i>	57
Tabla A-2. <i>Ensayo a compresión, ceniza volante con agua con distintas soluciones activadoras.</i>	58
Tabla A-3. <i>Ensayo a compresión, mezcla ceniza volante-pintura con distintas soluciones activadoras.</i>	58
Tabla A-4. <i>Ensayo a compresión, metacaolín con distintas soluciones activadoras.</i>	59
Tabla A-5. <i>Ensayo a compresión, metacaolín con agua con distintas soluciones activadoras.</i>	59
Tabla A-6. <i>Ensayo a compresión, mezcla metacaolín-pintura con distintas soluciones activadoras.</i>	60
Tabla B-1. <i>Cantidades de solución activadora empleadas en estudio previo, teóricas y a mayor escala.</i>	61
Tabla B-2. <i>Ensayos muestras ceniza volante pura fraguadas a temperatura ambiente.</i>	62
Tabla B-3. <i>Ensayos muestras ceniza volante pura fraguadas en estufa (60°C).</i>	63
Tabla B-4. <i>Ensayos muestras ceniza volante + pintura fraguadas a temperatura ambiente.</i>	64
Tabla B-5. <i>Ensayos muestras ceniza volante + pintura fraguadas en estufa (60°C).</i>	65
Tabla B-6. <i>Ensayos muestras metacaolín puro fraguadas a temperatura ambiente.</i>	66
Tabla B-7. <i>Ensayos muestras metacaolín puro fraguadas en estufa (60°C).</i>	67
Tabla B-8. <i>Ensayos muestras metacaolín + pintura fraguadas a temperatura ambiente.</i>	68
Tabla B-9. <i>Ensayos muestras metacaolín + pintura fraguadas en estufa (60°C).</i>	69
Tabla B-10. <i>Ensayos paralelepípedos metacaolín + pintura.</i>	70

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2-1.</i> Fluidos tixotrópicos. A) Representación del esfuerzo de cizalla frente a la tensión de cizalla. B) Representación de la viscosidad frente a la tensión de cizalla.	5
<i>Figura 2-2.</i> Valores tensión de cizalla a lo largo de la vida de una pintura.	5
<i>Figura 2-3.</i> Molino de perlas.	7
<i>Figura 2-4.</i> Emisiones de COVNM (COV no metano) por sector de actividad en Andalucía año 2016.	9
<i>Figura 2-5.</i> Composición de los RCD.	11
<i>Figura 2-6.</i> Ciclo de vida de un RCD.	12
<i>Figura 2-7.</i> Concentración de metal frente a pH.	14
<i>Figura 2-8.</i> Diagrama Pourbaix del hierro.	14
<i>Figura 2-9.</i> Concentración del metal disuelto frente a pH.	15
<i>Figura 2-10.</i> Estructura del caolín.	17
<i>Figura 2-11.</i> Red sialato.	19
<i>Figura 2-12.</i> Tipos de redes poliméricas.	19
<i>Figura 2-13.</i> Estructura de red de los geopolímeros.	20
<i>Figura 2-14.</i> Esquema de geopolimerización.	21
<i>Figura 2-15.</i> Efecto de la contaminación en estatuas.	24
<i>Figura 2-16.</i> Representación de la diferencia de temperatura global en los últimos años a través de 5 bases de datos.	26
<i>Figura 3-1.</i> Ceniza Volante.	29
<i>Figura 3-2.</i> Metacaolín.	31
<i>Figura 3-3.</i> Máquina vibradora.	33
<i>Figura 3-4.</i> A) Molde PVC. B) Molde PVC relleno.	34
<i>Figura 3-5.</i> Muestras de ceniza volante y metacaolín fraguadas.	34
<i>Figura 3-6.</i> Amasadora.	35
<i>Figura 3-7.</i> A) Molde paralelepípedo. B) Molde paralelepípedo relleno.	35
<i>Figura 3-8.</i> Principio de Arquímedes, porosidad.	36
<i>Figura 3-9.</i> Durómetro.	37
<i>Figura 3-10.</i> Equipo de resistencia a compresión.	38
<i>Figura 3-11.</i> Útil de compresión.	38
<i>Figura 3-12.</i> A) Situación antes de romper la muestra. B) Situación tras romper la muestra.	39
<i>Figura 3-13.</i> Útil de flexión.	39
<i>Figura 4-1.</i> Resistencia a compresión ceniza volante sólo con distintas soluciones activadoras (A, B y C).	41
<i>Figura 4-2.</i> Resistencia a compresión ceniza volante con agua con distintas soluciones activadoras (A, B y C).	42
<i>Figura 4-3.</i> Resistencia a compresión ceniza volante-pintura con distintas soluciones activadoras (A, B y C).	42

<i>Figura 4-4.</i> Resistencia a compresión metacaolín sólo con distintas soluciones activadoras.	43
<i>Figura 4-5.</i> Resistencia a compresión metacaolín con agua con distintas soluciones activadoras.	43
<i>Figura 4-6.</i> Resistencia a compresión metacaolín-pintura con distintas soluciones activadoras.	44
<i>Figura 4-7.</i> Carbonatación muestras geopolímeros.	45
<i>Figura 4-8.</i> Densidades CV y MK a temperatura ambiente.	45
<i>Figura 4-9.</i> Densidades CV y MK a 60°C.	46
<i>Figura 4-10.</i> Densidad vs porosidad de muestras fraguadas a temperatura ambiente.	47
<i>Figura 4-11.</i> Densidad vs porosidad de muestras fraguadas a 60°C.	47
<i>Figura 4-12.</i> Representación valores resistencia a compresión en muestras geopoliméricas.	48
<i>Figura 4-13.</i> Adhesión de la ceniza volante a los moldes de paralelepípedos.	49
<i>Figura 4-14.</i> Resistencia a flexión paralelepípedos.	50
<i>Figura 4-15.</i> Resistencia a compresión paralelepípedos.	50

1 INTRODUCCIÓN

La pintura ha ido evolucionando en las diferentes etapas de la historia. En la Prehistoria, los primeros humanos que descubrieron este producto lo hicieron con sustancias naturales como pigmentos de la tierra, carbón o sangre de animales y lo usaban para hacer dibujos en las cavernas. Posteriormente, en la Edad Antigua se empezaron a usar materiales más complejos como pegamento, gelatina, grasas animales o goma y empezaron a usar la pintura para decorar (utensilios, palacios...). En la Edad Media se mejoró las características de este producto con el fin de usarlo como recubrimiento, y se empezaron a usar gomas y ámbar para su fabricación.

En la actualidad, se usan pigmentos sintéticos, resinas y aditivos, entre otros, de tal modo que se obtenga un producto final con resistencia, durabilidad y brillo.

El sector de la construcción es el sector donde se hace el mayor uso de la pintura. Todas las obras de la ingeniería tienen incorporada algún tipo de pintura, ya sea para mejorar la estética, decorando superficies, o para proporcionar protección y durabilidad.

Debido al gran uso que se hace de ésta en el campo de la construcción, es en este punto donde cabe plantearse una cuestión: ¿Es perjudicial para el medioambiente la pintura usada en la construcción? Para poder responder esta pregunta hay que analizar varios aspectos:

El primer aspecto se da durante el proceso de fabricación de las pinturas. Los efectos negativos más destacados durante la fabricación, aunque más adelante se van a especificar con más detalle, son la generación de residuos, la contaminación de suelos y la contaminación atmosférica.

Otro aspecto es la cantidad de componentes químicos peligrosos que contienen las pinturas, tales como plomo, mercurio o estaño. También hay que destacar la cantidad de compuestos de naturaleza orgánica, que tiene como consecuencia la emisión de olores y gases contaminantes.

A pesar de que en la actualidad se intenta mejorar el proceso de obtención y composición de las pinturas para disminuir su peligrosidad, como, por ejemplo, hacer pinturas al agua para disminuir la cantidad de componentes orgánicos, sigue habiendo problemas que mitigar.

Tanto la creciente expansión demográfica como la industrialización ilimitada, combinado con poca planificación ambiental conducen a la generación de miles de toneladas de residuos cada año, principalmente de procesos industriales.

El sector de la construcción es una de las actividades que más residuos genera. En concreto, en España en el año 2017, la construcción fue el segundo sector, por detrás de la industria, que más residuos generó (35.347 miles de toneladas de residuos de construcción y demolición) (*Cuentas medioambientales: Cuenta de los residuos, 2017*).

A pesar de los grandes avances tecnológicos enfocados en la reducción de la generación de residuos, el problema no se erradica, solo se minimiza. Es por ello que la cantidad de residuos producidos en la construcción es otro aspecto importante a la hora de analizar si la pintura en la construcción es perjudicial para el medioambiente, ya que dependerá del proceso de fabricación y de los materiales empleados.

Otro matiz a tener en cuenta es el aspecto económico, ya que será determinante en algunos casos. La pintura tendrá un valor más elevado si se fabrica con materiales primarios que si se fabrican con materiales reciclados.

Es por ello que el objetivo del presente trabajo es obtener nuevos materiales de construcción con propiedades similares al material original a sustituir, pero sin resultar tan dañino para el medioambiente, consiguiendo así reducir los impactos ambientales de la industria de la construcción y producir beneficios económicos.

Para alcanzar dicho objetivo se van a emplear geopolímeros. Los geopolímeros son unos materiales relativamente nuevos y en estudio, que dan alternativas al empleo de materiales primarios en diversos campos, y que se obtienen a través de la reacción de geopolimerización.

En este proyecto, se van a combinar varios geopolímeros con pintura, para producir un material nuevo que se pueda comercializar y con propiedades similares al material a sustituir.

Para hacer un estudio más exhaustivo, se van a modificar algunos parámetros. La finalidad es poder comparar los resultados y ofrecer la elección óptima para el objetivo de este proyecto. Es por ello que una vez obtenidos los productos, se van a medir propiedades tanto mecánicas como físicas.

2 ANTECEDENTES

Para poder comprender el alcance de este proyecto y la parte experimental que representa, en este apartado se expone la necesidad de este estudio, las aplicaciones posibles, así como las compatibilidades entre los materiales ya mencionados.

2.1 Pintura

2.1.1 Definición y composición

La pintura, haciendo referencia al término usado en la construcción, es una mezcla heterogénea que se puede encontrar en forma líquida o en polvo. Al aplicarla sobre una superficie se transforma en una lámina sólida que recubre el área con el fin de proteger y/o decorar.

La composición de una pintura puede variar dependiendo del acabado que se quiera conseguir y de las condiciones de aplicación y secado, pero de manera general la pintura va a contener (Carbonell & Pinturas, 2009):

- Pigmentos.
- Cargas.
- Disolventes.
- Ligante.
- Aditivos.

2.1.1.1 Pigmentos

Los pigmentos son partículas sólidas muy finas (diámetro de 0,001 mm), que se añaden para dar color y brillo a la mezcla y poder de cubrición. El poder de cubrición dependerá del tamaño y concentración de las partículas. Una característica de esta sustancia es que es opaca tanto en estado húmedo como seco.

Los pigmentos pueden ser según su composición, inorgánicos y orgánicos, y según su obtención, natural o sintético.

De manera general, los pigmentos más utilizados se pueden clasificar en:

- Pigmentos cubrientes (blanco de titanio, blanco de zinc, rojo de hierro...)
- Pigmentos anticorrosivos (minio de plomo, cromato de zinc, cianamida de plomo...)
- Pigmentos extendedores (sulfato de bario, yeso, caolín o talco)
- Pigmentos con funciones específicas (antioxidantes, antiincrustantes, ignífugas...)

2.1.1.2 Cargas

Las cargas son sustancias, normalmente inorgánicas, cuyas funciones son, entre otras, aumentar la viscosidad del producto, darle consistencia y estructura. Estas funciones se consiguen gracias a la materia sólida que las cargas añaden a las pinturas. Las sustancias más empleadas suelen ser carbonato cálcico, dolomita, sulfato de bario y silicatos entre otras.

2.1.1.3 Disolventes

Los disolventes son compuestos cuya función es diluir la mezcla, en concreto solubilizar los ligantes, hasta que ésta se vuelva homogénea. Se usa para facilitar la aplicación de la pintura consiguiendo las propiedades reológicas deseadas.

Pueden ser tanto compuestos orgánicos (acetona, acetano, tolueno...) como inorgánicos (agua). El disolvente empleado debe ser capaz de solubilizar el ligante durante el proceso de secado.

2.1.1.4 Ligantes

El ligante es un producto cuya finalidad es mantener unidas todas las sustancias de la mezcla formada una vez la pintura esté seca. Según el ligante usado la pintura tendrá unas propiedades de secado y resistencia determinadas. El ligante más empleado suele ser resina, de naturaleza orgánica.

2.1.1.5 Aditivos

Los aditivos son sustancias que se añaden en pequeñas proporciones para mejorar las características de las pinturas, facilitando su fabricación, aplicación, conservación, estabilidad, etc. Dependiendo de las propiedades que se deseen (antiposos, estabilizante, fungicida, secante, espesante...) se añadirán unos aditivos u otros.

2.1.2 Reología

Antes de seguir adentrándose en el amplio mundo de las pinturas, hay que estudiar un concepto básico de importancia para la fabricación de las pinturas: la reología.

El término reología fue descrito por el profesor Eugene Bingham en 1929, el cuál decía que la reología es el estudio del flujo y deformación de la materia bajo la influencia de una fuerza mecánica (*Jobling, 2007*). El comportamiento reológico de una sustancia se caracteriza por la respuesta que esta sustancia ofrece cuando es sometida a una deformación o esfuerzo externo.

La importancia de la reología en este sector deriva de que dependiendo del valor que ésta tome, las pinturas tendrán unas propiedades u otras, y esto afectará también en la composición de la fórmula y el proceso de fabricación, así como a una diversidad de fenómenos que se encuentran en las pinturas (sedimentación, nivelación, etc).

Dentro del campo de estudio de la reología, la rama que más se analiza, en cuanto a pinturas, es la viscosidad, definiéndose ésta como la propiedad que mide la resistencia que un fluido opone a esfuerzos de cizalla (*Agüera Soriano, 2002*).

Hay que tener en cuenta los tipos de fluidos que existen, ya que cada uno tendrá un perfil reológico u otro, pero de manera general se pueden diferenciar fluidos newtonianos y fluidos no newtonianos.

Los fluidos newtonianos son aquellos en los que la viscosidad es independiente de la fuerza que se aplique, mientras que en los fluidos no newtonianos la viscosidad depende de la temperatura, del gradiente de velocidad y de la naturaleza del fluido. A su vez, los fluidos no newtonianos se dividen en fluidos independientes del tiempo (pseudoplásticos, dilatantes, plásticos), dependientes del tiempo (tixotrópicos y reopéticos) y viscoelásticos.

Tras varios ensayos, se concluyó que las pinturas tienen un comportamiento muy similar al de los fluidos tixotrópicos. Puede llegar a variar el comportamiento reológico al de los fluidos tixotrópicos dependiendo de las características del ensayo (tipo de reómetro, esfuerzo de cizalla aplicada, etc). Estos fluidos se caracterizan por que la viscosidad disminuye a medida que aumenta el tiempo de aplicación del esfuerzo y, además, a medida que disminuye la aplicación, o directamente cesa, de esfuerzo, la viscosidad se vuelve a recuperar (Figura 2-1).

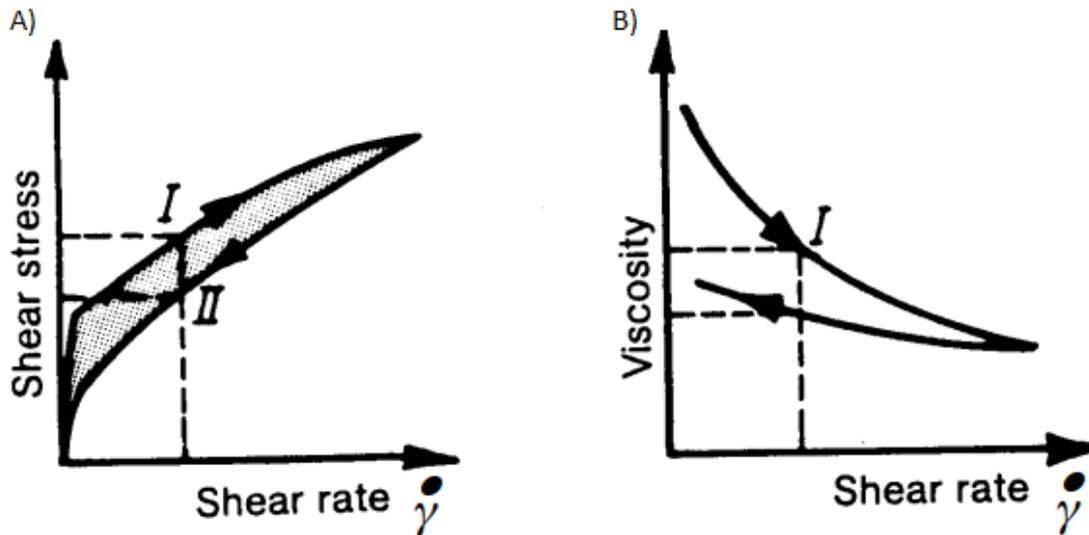


Figura 2-1. Fluidos tixotrópicos. A) Representación del esfuerzo de cizalla frente a la tensión de cizalla. B) Representación de la viscosidad frente a la tensión de cizalla. Fuente: (Han et al., 2007).

Es en este punto, donde habría que definir el concepto tensión de cizalla. La tensión de cizalla o *shear rate* se define como la relación entre la velocidad de la capa superior y el grosor de la película, ambas expresadas en las mismas unidades (Calvo Carbonell, 2014)

$$\gamma = \frac{V}{x} = \frac{\text{m/s}}{\text{m}} = \text{s}^{-1} \quad (\text{Ec. 1})$$

Durante el proceso de obtención de una pintura, el shear rate y la viscosidad sufren cambios. Esto es debido a que influye el nivel de agitación al que el fluido esté expuesto, siendo, por tanto, durante el almacenamiento y transporte las etapas donde tengan una tensión de cizalla casi nula o nula y durante la aplicación y fabricación de la pintura tenga una mayor tensión de cizalla (Figura 2-2).

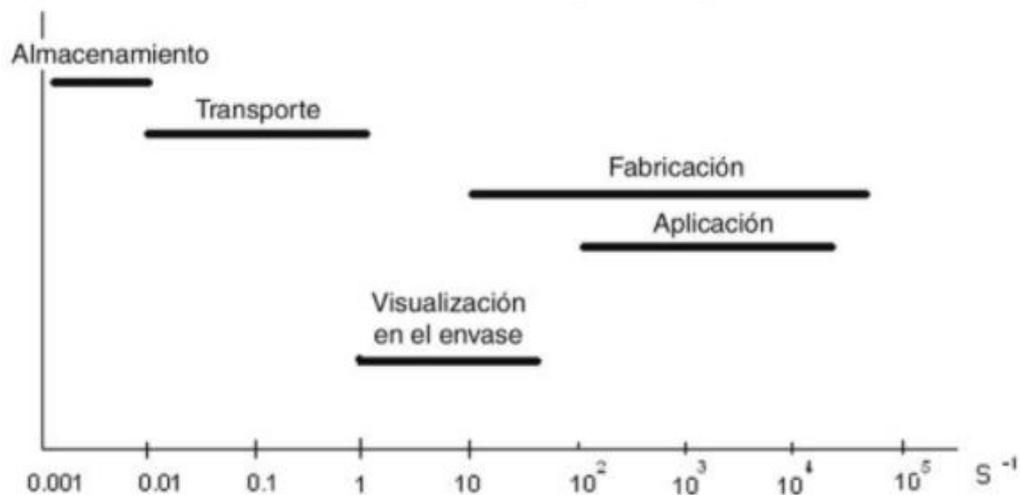


Figura 2-2. Valores tensión de cizalla a lo largo de la vida de una pintura. Fuente: (Calvo Carbonell, 2016).

Es importante destacar la importancia de la viscosidad y del shear rate, ya que así se puede controlar el comportamiento de una pintura en cada etapa de su vida y evitar problemas debido a la falta de agitación como sedimentación o descuelgue.

Es por ello necesario elegir agentes reológicos adecuados dependiendo del uso y aplicación de la pintura, ya que estos agentes van a determinar el comportamiento de la pintura en cuestión. Los agentes reológicos se añaden a la pintura como aditivos y se pueden distinguir:

- Empleados para altos shear rate. La viscosidad se mantiene a pesar del esfuerzo de cizalla y por ello se consigue aplicar mayores espesores de películas y evitar salpicaduras de pintura.
- Empleados para bajo shear rate. La viscosidad disminuye al aplicarle esfuerzos de cizalla por lo que tienen poca resistencia a la difusión de la pintura, pero tienen elevada resistencia al fenómeno de sedimentación.
- Empleados para bajo y alto shear rate. Tiene una combinación de las especificaciones anteriores. El producto tiene poca capacidad de sedimentar en reposo, pero a su vez tiene capacidad espesante para el momento de la extensión de la pintura.

2.1.3 Fabricación

El proceso de fabricación de las pinturas (*Calvo Carbonell, 2016*) es un proceso simple que no requiere de maquinaria compleja, pero se necesita mucha precisión para obtener la mezcla adecuada. Lo que se pretende, básicamente, es estabilizar y dispersar los pigmentos dentro del ligante y esto se consigue en tres pasos:

2.1.3.1 Humectación

En esta fase, el ligante o la mezcla ligante y disolvente, debe impregnar completamente el pigmento e introducirse por las cavidades capilares del mismo, de manera que el ligante desplace el aire que contienen dichas cavidades. Al conseguir desplazar el aire y mojar completamente el pigmento, se va a favorecer la disociación de los agregados que contienen los pigmentos debido a que el propio ligante va a ser el que actúe como lubricante.

2.1.3.2 Molturación

El siguiente paso, denominado molturación, va a consistir en la fracturación de los agregados. Lo que se pretende es separar las sustancias que se han unido en la fase anterior. Este proceso se realiza mediante diferentes tipos de equipos, desde agitadores de alta velocidad hasta molinos tricilíndricos, de perlas, etc.

Los instrumentos utilizados se basan en dos principios:

- El impacto. Se da en el caso de uso de molinos de bolas, dispersores de alta velocidad, etc.
- La fricción. Es el caso de los molinos tricilíndricos, rotor-estator, etc.

Para llevar a cabo una correcta molienda hay que tener en cuenta tres aspectos. El primero es que haya suficiente cantidad de ligante en relación a la cantidad de agregados, para evitar que se produzcan floculaciones una vez molidas, el segundo, tener una viscosidad adecuada para que el molino funcione eficazmente y, por último, controlar la viscosidad durante el proceso para evitar obstrucciones o incluso desperfectos en el molino.

Hay molinos de diferentes estructuras y formas, pero el fundamento de éstos es el mismo. Se hace pasar la mezcla por un recinto cilíndrico, que contiene bolas de circonio, acero o vidrio. Las bolas se empiezan a mover realizando movimientos circulares y con estos se produce el impacto y fricción de la mezcla, produciendo así la rotura de las partículas sólidas que la misma contiene.

En la actualidad, los molinos más utilizados son los de perlas, que utilizan métodos híbridos entre el impacto y la fricción. Los molinos de perlas constan de:

- Cámara de molienda
- Agitador
- Perlas de vidrio

La mezcla se introduce por uno de los extremos de la cámara. El agitador, que está compuesto por discos y barras, empieza a producir movimientos de manera que se produzca la rotura de partículas con mayor diámetro gracias al choque entre ellas y al choque entre las paredes internas del molino.

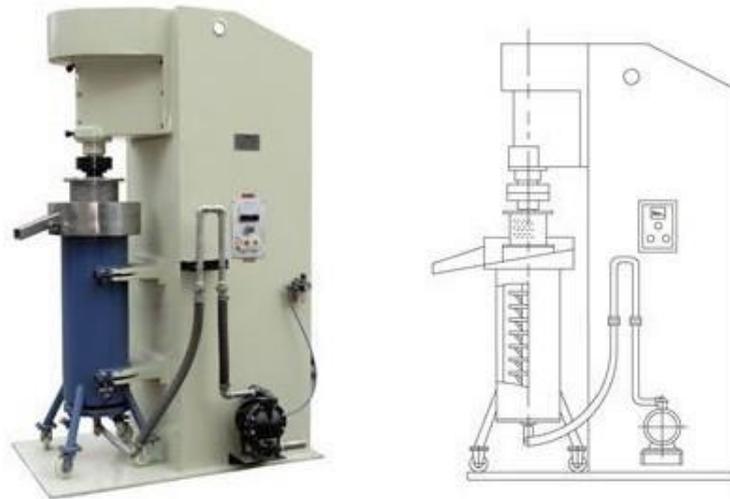


Figura 2-3. Molino de perlas. Fuente: (Mezclador industrial, mezclador del polvo, mezclador de la cinta, dispersor de alta velocidad, molino de pulido, hoja Sigma mezclador, compuestos Smc Bmc máquina fabricantes y proveedores - fábrica de China - MAX mezclador, n.d.)

2.1.3.3 Estabilización

Una vez terminada la molienda, es en esta última etapa donde se añaden el resto de componentes de la pintura y se ajusta la viscosidad. Estas adiciones se realizan en tanques con agitación para conseguir una mezcla homogénea.

2.1.4 Usos

El sector de las pinturas comprende una amplia variedad de productos con numerosos usos, entre los que cabe destacar:

- Pinturas para el sector de la construcción: formado por pintura para interiores, exteriores, de acabado, barnices, imprimaciones, colorantes...
- Pinturas para productos industriales y de consumo: para colorear mobiliario, vehículos, objetos...
- Pinturas para aplicaciones específicas: como por ejemplo las pinturas usadas para la señalización de carreteras, puentes...
- Tintas de impresión: para impresión tipográfica y serigráfica entre otras.

Aunque todas las pinturas van a poseer una cantidad de sustancias en cantidades variables, entre ellas sustancias volátiles y no volátiles la formulación de la pintura variara en función del uso que se le quiera dar a la pintura.

2.1.5 Formulación

Para poder obtener una pintura con las especificaciones que se requiera, es necesario conocer las propiedades intrínsecas de los diferentes componentes de la mezcla, además de prever las reacciones que tienen lugar para evitar defectos en el producto.

Es por ello de gran importancia conocer la formulación de cada mezcla, ya que no se puede aplicar un método en la formulación de una pintura, debido a la cantidad de variables y factores que afectan a la calidad del producto.

La Organización Internacional de Estandarización (*International Organization for Standardization, ISO*) establece a través de la Norma ISO 9000 los pasos que deben cumplirse para asegurar que las características del producto obtenido se adecuan a las características del producto que ha pedido el usuario.

Lo que hay que conocer son las especificaciones que la pintura debe cumplir para cumplir las peticiones de dicho producto en el mercado, entre las que cabe mencionar (*Calvo Carbonell, 2014*):

- Finura del molido
- Densidad de la mezcla
- Viscosidad del producto
- Color
- Poder de cubrición
- Método de aplicación
- Método de secado (al aire, con aporte de calor, por radiación, etc.)
- Resistencia química

Lo fundamental a la hora de la formulación es conocer el uso de la pintura, ya que, según el uso, la superficie pintada estará expuesta a unos factores u otros, por ejemplo, una pintura que esté expuesta en medios agresivos o sea de exterior debe cumplir unas resistencias que no las tendrán la pintura de interior.

Además, añadir que es esencial tener en cuenta el tipo de superficie sobre el que se va a aplicar la pintura.

2.1.6 Efectos perjudiciales de la pintura para el medio ambiente

Se puede definir efecto medioambiental como toda la acción transformadora ocasionada directa o indirectamente por las actividades, productos y servicios de una organización en el medio ambiente, sea perjudicial o beneficiosa (*Fundacion entorno (empresas y medio ambiente), 1998*).

El problema radica en que a lo largo de los años se les han añadido diferentes aditivos a las pinturas para mejorar sus propiedades, como por ejemplo aumentar el brillo, aumentar la durabilidad o que tengan características antiincrustantes.

Los problemas habituales en el sector de la pintura que se intentan remediar mediante cambios en la formulación y composición de ésta son:

- Las pinturas, al contener moléculas de gran tamaño que no se integran completamente sobre la superficie que se aplica, hace que se produzcan grietas sobre estas superficies, disminuyendo así la durabilidad del pintado.
- Como la integración de la pintura en la superficie no es correcta, se crea una capa de pintura, que obstruye los poros de la pared, haciendo a ésta menos transpirable y aumentando así la probabilidad de que se cree musgo.
- La pérdida de color, lo que se traduce en otras palabras a la durabilidad.
- Los disolventes empleados suelen ser de naturaleza orgánica, y por lo general, tóxicos y volátiles, de modo que al aplicar la pintura y durante el secado, se van volatilizando las partículas haciendo así que los seres vivos las inhalen. Dichas partículas son los compuestos orgánicos volátiles.

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) son aquellos hidrocarburos que se presentan en estado gaseoso a la temperatura ambiente normal o que son muy volátiles a dicha temperatura. Se puede considerar como COV aquel compuesto orgánico que a 20°C tenga una presión de vapor de 0.01 kPa o más, o una volatilidad equivalente en las condiciones particulares de uso (*Compuestos orgánicos volátiles, n.d.*).

En la actualidad, existen cientos de sustancias químicas que se consideran COVs, por lo que se deben cuantificar mediante métodos y normas internacionales las concentraciones de éstas en la atmósfera ya que es perjudicial para los seres vivos. El principal método empleado para su eliminación es el uso de filtros de carbón activo. Se hace pasar el aire por el carbón activo y los contaminantes se adsorben sobre él, obteniendo finalmente un aire sin contaminantes. Posteriormente, a través de un cromatógrafo de gases se cuantifica la concentración de COVs.

La presencia de altas concentraciones de COVs pueden causar daños severos, tales como (*Compuestos orgánicos volátiles*, n.d.):

- Destrucción de la capa de ozono. Algunos COVs, como el tetracloruro de carbono, destruyen el ozono, produciéndose así una disminución de la capa de ozono.
- Problemas respiratorios. Algunos COVs (óxidos de nitrógeno) en presencia de luz solar, originan ozono a nivel de suelo (ozono troposférico), que es perjudicial para la salud humana. Además, el ozono troposférico, junto con otras sustancias, forman lo que se denomina smog fotoquímico. El smog es un gas que se forma en la atmosfera mediante unas reacciones complejas y provoca efectos perjudiciales en la salud



- Daños en la vía respiratoria, aunque también puede entrar en el organismo a través de la piel. Además, estos compuestos se bioacumulan en las grasas de los organismos ya que son liposolubles.
- Daños psíquicos (irritabilidad, dificultad de concentración, etc.) y daños renales o daños al sistema nervioso central, ya que algunos COVs son cancerígenos (benceno).

Es necesaria la presencia de dichas sustancias en las pinturas debido a que son las encargadas de disminuir la viscosidad de la mezcla, porque, si ésta no se disminuye, no se podría aplicar sobre las superficies, además de la función de disolver el resto de componentes de la mezcla.

Las fuentes de emisiones de los COVs son diversas, y aunque las principales emisiones provienen de procesos naturales, le sigue el sector de uso de disolventes, sector que hace referencia a la fabricación y empleo de pinturas y barnices compuestas por COVs.

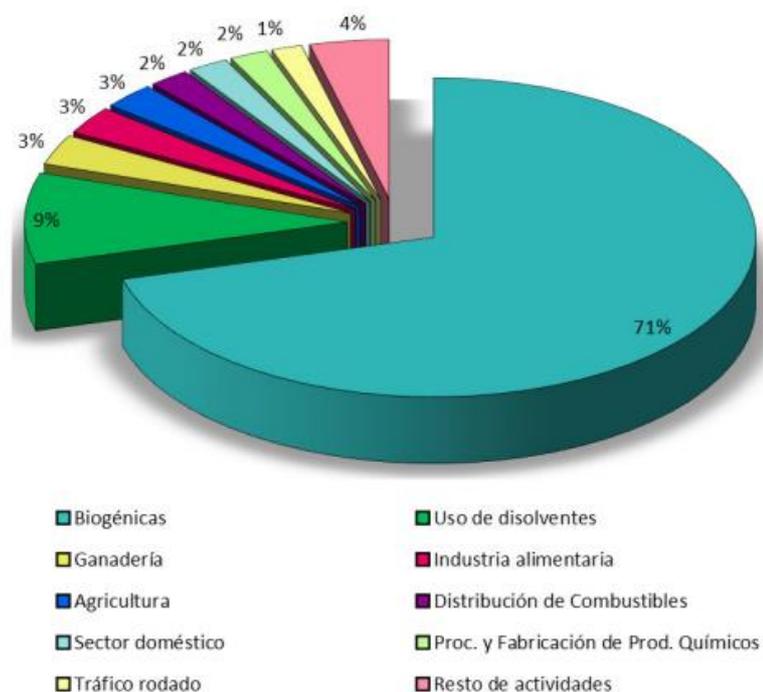


Figura 2-4. Emisiones de COVNM (COV no metano) por sector de actividad en Andalucía año 2016. Fuente: (*ÍNDICE GENERAL*, n.d.).

Otro problema ya mencionado con las pinturas es la pérdida de color, es decir, la durabilidad de las pinturas. Este problema se consigue solventar mediante el empleo de metales pesados. Más específicamente el plomo, que era empleado para fijar el color, para mejorar la resistencia a la corrosión y acelerar el secado.

En algunos países europeos, en los años 70, se empezaron a crear leyes que prohibían el uso de plomo en pinturas por sus efectos perjudiciales sobre el medio ambiente, aunque a día de hoy en algunos países menos desarrollados se sigue empleando este metal y todavía se puede encontrar en viviendas antiguas de los países más desarrollados. Una exposición larga de plomo puede provocar intoxicación severa en los seres vivos, ya que éstos se bioacumulan en el organismo. Actualmente se usan otros pigmentos menos perjudiciales para el medio ambiente intentando mantener las propiedades de fijación de color y durabilidad.

Hay que tener en cuenta que además de la contaminación en sí que provocan las pinturas una vez son aplicadas sobre una superficie debido a la composición de éstas, durante la fabricación de las mismas también se producen efectos perjudiciales sobre el medio ambiente. Se puede provocar contaminación atmosférica (debido a formaciones de polvo cuando se manipulan los componentes sólidos más finos), contaminación de aguas y generación de residuos.

La contaminación mayor durante la fabricación de pinturas se encuentra en la generación de residuos. Estos residuos son generados debido a materiales de embalaje y envases que han sido contaminados son sustancias peligrosas, por la fabricación de lotes que no se ajustan a las especificaciones del producto y no son aptos para la venta, los residuos generados durante el tamizado y por último los residuos que se producen debidos a la limpieza de tuberías y máquinas empleadas lo que provoca un problema de aguas residuales.

Además de las situaciones mencionadas en las que se produce generación de residuos, hay que tener en cuenta que el mayor uso de pintura se da en el sector de la construcción. Dicho sector es uno de los que más residuos genera debido a la creciente demanda en estos últimos años (*Cuentas medioambientales: Cuenta de los residuos*, 2017).

2.1.7 Pintura en polvo

La pintura objeto de estudio en este proyecto pertenece al grupo de pinturas en polvo. La pintura en polvo (*Todo sobre la pintura en polvo.*, n.d.), pintura electrostática o esmalte termoconvertible es un recubrimiento en polvo - exento de solventes - utilizado a nivel industrial con fines decorativos y/o de protección.

Estas tres denominaciones hacen referencia a sus características diferenciales con el resto de pinturas.

Pintura en polvo porque – a diferencia de otros recubrimientos – se presenta en forma de sólido finamente dividido.

Pintura electrostática porque es necesario cargar eléctricamente a las partículas de pintura para que se adhieran correctamente a la pieza a pintar.

Esmalte termoconvertible porque luego de su aplicación sobre la pieza es necesario que la pintura reaccione químicamente para que alcance sus propiedades. Esto se realiza sometiendo las piezas a calor, aunque algunos desarrollos permiten ya “curar” la pintura con luz ultravioleta.

El polvo que conforma el producto está compuesto por resinas – generalmente termofijas – pigmentos, cargas y aditivos. Cada uno de los “ingredientes” descritos cumple una función específica en la pintura. Todos ellos perfectamente homogeneizados y finamente divididos para lograr un acabado perfecto.

2.1.7.1 Variedades de Pintura en Polvo

Hay diferentes clases de pintura electrostática cada una de las cuales pretende dar solución a un problema o uso específico.

Las principales son:

- Epoxi: Pintura ideal para soportar ambientes químicos agresivos. Es indicada para el pintado de tuberías, paneles, rejillas, etc. en contacto con productos químicos agresivos. No es apta para el exterior. Existe una variedad especial, Epoxi Fusion Bonded (FBE) que es utilizada para pintar piezas extrudadas en caliente, sin necesidad de hornear la pintura.
- Poliester: Recubrimiento utilizado para resistencia a la intemperie y luz solar. Existen diferentes variedades según necesidades: Superdurable para máxima duración, PE-TGIC, PE-TGIC FREE (libre de Tgic).

- Poliester - Epoxi: También llamado Híbrido, es indicado para uso general. Un recubrimiento en polvo de fácil aplicación, no es necesario ser un aplicador experto para conseguir un resultado correcto.
- Poliester - Uretano: Resistentes a la humedad y condiciones ambientales, así como a la corrosión. Se suelen utilizar para pintar mobiliario y equipos utilizados al aire libre.
- Acrílico: Hay diferentes clases según se combinen con Uretanos, Epoxis o si se trata de Glicidil Metacrilato (GMA) Se suelen utilizar para el pintado de piezas metálicas - incluyendo automotrices - electrodomésticos y mobiliario metálico.
- Termoplásticos: Aunque formalmente no es pintura termoconvertible, la pintura en polvo termoplástica tiene un aspecto similar y se aplica de igual forma. La gran diferencia es que se reblandece con el calor por lo que solo es útil para ciertos usos.

2.1.7.2 Ventajas ambientales de las pinturas en polvo

Entre las principales ventajas ambientales del uso de las pinturas en polvo cabe destacar:

- No contienen solventes ni se utilizan durante su fabricación.
- No es necesario instalaciones especiales para almacenar las pinturas.
- Su uso no genera lodos o residuos contaminantes que es necesario enviar a tratamiento.
- Hay variedades indicadas para exteriores y con resistencia a los ambientes químicamente agresivos.

2.1.8 Residuos de construcción y demolición

Si residuo es cualquier sustancia u objeto perteneciente a alguna de las categorías que figuran en el anejo de la ley 10/1998 de 21 de abril, del cual su poseedor se desprenda o del que tenga la intención u obligación de desprenderse, se entiende como residuo de construcción y demolición cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo con la definición de residuo, se genera en una obra de construcción o demolición (RD 105/2008, 2008).

Los residuos de construcción y demolición (RCD) proceden, en su mayor parte, de derribos de edificios antiguos, de restos de los materiales de construcción de las obras nuevas y de pequeñas obras de reformas en viviendas o urbanizaciones.

La composición de los RCD puede variar ligeramente, dependiendo del origen y la función que tuvieron los materiales en su antigua obra, pero de manera general van a estar compuestos en un 60-70% por materiales minerales (tierra, hormigón, ladrillo, cerámicos) siendo por tanto el resto cantidades variables de residuos de madera, metal, yesos, plásticos, etc.

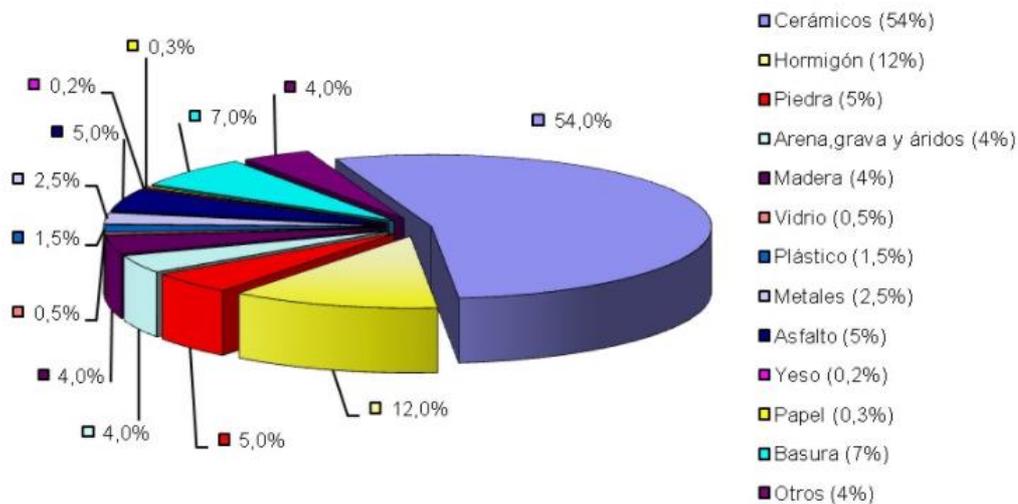


Figura 2-5. Composición de los RCD. Fuente: (Residuos de construcción y demolición | CEDEX, n.d.).

Actualmente el sector de la construcción es el que mayor consumo de energía tiene en la Unión Europea, representando un 40% del total y emitiendo un 36% de las emisiones de CO₂ (*En el punto de mira: la eficiencia energética de los edificios* | Comisión Europea, n.d.). Además, hay que añadir el problema ambiental proveniente de los RCD, no solo por el volumen de generación, si no por el tratamiento que se le aplica en cada caso.

Entre los impactos ambientales que producen la generación de RCD, se destaca la contaminación de suelos y acuíferos en vertederos incontrolados, el deterioro paisajístico y la eliminación de estos residuos sin aprovechar sus recursos valorizables.

Para minimizar los impactos ambientales que producen dicho sector se intenta promover el reciclado de residuos de construcción y demolición, maximizando así los recursos disponibles y reduciendo el consumo de recursos naturales.

Otra manera de conseguir dicho objetivo es modificando la composición de los materiales empleados en la construcción, es decir, obtener materiales que sean menos perjudiciales (durante producción y aplicación) y evitar emplear recursos naturales.

2.1.8.1 Gestión de RCD

En la actualidad, hay muchos protocolos que indican como se debería de realizar una correcta gestión de los RCD. La gestión de dichos residuos se realiza con el objetivo de promover su prevención, reutilización y reciclaje u otras formas de valoración, y el correcto tratamiento de los residuos destinados a eliminación.

De manera general, el ciclo de vida de un RCD viene recogido en el siguiente esquema:

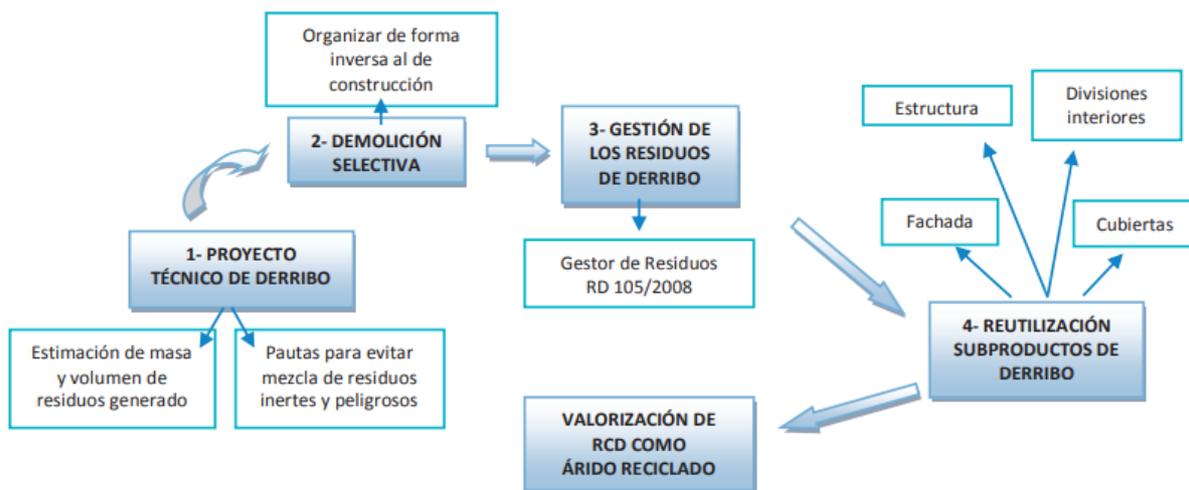


Figura 2-6. Ciclo de vida de un RCD. Fuente: (Pr, n.d.)

En primer lugar, hay que identificar los residuos de la obra para así separarlos según el origen y la recogida. De manera general se van a encontrar (*DOCUMENTO N°6: GESTIÓN DE RESIDUOS*, n.d.):

- Residuos peligrosos: Dichos residuos pueden ser, entre otros, el amianto, alquitrán, los policlorobifenilos, el plomo, componentes electrónicos que contienen mercurio, materiales inertes contaminados, pinturas y barnices, etc. Es necesario separarlos del resto de residuos en los momentos previos a la demolición de la obra ya que pueden ocasionarse reacciones peligrosas, produciendo daños ambientales. La metodología que se sigue es estabilizar/solidificar dichos residuos, aunque según el Estado, éste impartirá una serie de directrices para el tratamiento según qué tipo de residuo peligroso sea.
- Residuos inertes: Estos residuos no suponen un gran riesgo, ya que no presentan transformaciones significativas, ni reaccionan con otros materiales y no son perjudiciales para la salud humana. En esta categoría se pueden encontrar tierras, hormigón, piedras, etc.
- Residuos no peligrosos: Se encuentran maderas, metales, residuos de silvicultura y el resto de materiales que no se encuentran en las categorías anteriores.

Cuanto mejor se separen los residuos de construcción y demolición, más efectivo será la valorización de dichos materiales. Sin embargo, dicha operación depende de las opciones disponibles en el momento de la demolición de la obra (espacio disponible en la obra, maquinaria disponible, así como personal para las operaciones).

En una línea de tratamiento de RCD se dan tres etapas (Pr, n.d.):

1.- Pretratamiento: Esta etapa no siempre es necesaria, y tiene por objetivo mejorar la manejabilidad del residuo, disminuyendo el volumen de aquellos que posean grandes dimensiones. Para ello se emplea un demolidor o martillo vibrante.

2.- Tratamiento primario: Consta de un precibado (cuya función es eliminar tierra y partículas de yeso que van en la fracción fina), una trituración de los residuos y un posterior cribado. Antes de pasar a la siguiente etapa se pasa los residuos por un soplador para eliminar elementos de baja densidad (plásticos) o por una lavadora hidráulica (elimina parpartículas baja densidad por flotación y los finos adheridos a las partículas gruesas por sedimentación).

3.- Tratamiento secundario: Se compone de dos etapas, el triaje manual y el molino de impacto. En el triaje manual, una persona manualmente resita posibles partículas metálicas, de madera, cidrio, plásticos, etc. Seguidamente, con el molino de impacto se obtiene un árido con una granulometría homogénea. Por último, se posee un electroimán para eliminar el acero liberado en el fraccionamiento del residuo.

Hay que añadir que, con el paso de los años, las viviendas se están haciendo con materiales nuevos en el mercado, materiales compuestos y más complejos, dificultando en mayor medida dicha operación de separación.

2.1.8.2 Tratamiento de pinturas y barnices

Como se ha comprobado en el punto anterior y se puede comprobar a través de la Lista Europea de Residuos (LER) (*Gobierno de España, 2002*), las pinturas se clasifican como residuos peligrosos, por el hecho de que contienen disolventes y aditivos perjudiciales para el medio ambiente.

Las acciones que se siguen para el tratamiento de residuos de pinturas y barnices de una obra son:

- Reducir o eliminar las sustancias tóxicas que el residuo posea.
- Recuperar la materia prima para su reutilización.
- Si no se puede reutilizar ni valorizar, depositar en un vertedero cuando el producto sea estable.

De manera general, el tratamiento que se le realiza a los residuos peligrosos que provienen de la construcción es la estabilización/solidificación (tratamiento previo a vertedero).

La estabilización/solidificación (E/S) es una técnica empleada para reducir la peligrosidad de los residuos peligrosos. Se basa en añadir uno o más agentes aglomerantes y aditivos al residuo para reducir la lixiviación de los contaminantes presentes en éste antes de su deposición en el vertedero, convirtiendo así el residuo en menos perjudicial para el medio ambiente (*Spence, R., & Shi, C., 2005*).

La estabilización conlleva una reacción química que hace que los componentes peligrosos del residuo pierdan su peligrosidad, consiguiendo así: limitar solubilidad, reducir toxicidad y disminuir velocidad de migración del contaminante; mientras que con la solidificación se consigue encapsular el residuo formando un sólido más estable, logrando así: aumentar resistencia mecánica y disminuir la permeabilidad de la matriz.

A través de la E/S, lo que se persigue es eliminar los disolventes orgánicos (COVs) y los posibles componentes inorgánicos (metales) que poseen las pinturas. Dependiendo de la naturaleza del contaminante (orgánico o inorgánico) el fundamento de la E/S será diferente. En el caso de los compuestos inorgánicos, el objetivo es convertir dicho compuesto en un compuesto insoluble, mientras que si lo que se pretende es eliminar los compuestos orgánicos, lo que se hace es añadir aditivos que absorban dichos compuestos y así reducir su expansión a través de la matriz del estabilizado.

Por lo tanto, los compuestos empleados en la E/S son (Luna-Galiano, 2013):

- Aglomerantes: reaccionan con el agua que está libre en el residuo, formando un sólido que retiene los elementos tóxicos en la matriz del estabilizado. Se usan aglomerantes inorgánicos (en el caso que se quiera estabilizar residuos inorgánicos) como cemento, cal, scoria, ceniza volante, etc. ó aglomerantes orgánicos como asfaltos, betús, resinas epoxy, etc.
- Aditivos: se usan para iniciar y catalizar las reacciones y mejoran las características del sólido formado. Se usan materiales puzolánicos, cenizas volantes, arcillas, gel de sílice, etc.

En definitiva, en la E/S se usan tanto procesos químicos (reacción química) como procesos físicos. En los procesos químicos se tendrá que controlar el pH, para así neutralizar y bajar la solubilidad del contaminante (figura 2-7), controlar el estado redox, para hacer al material menos tóxico (figura 2-8) y por último controlar la precipitación, para reducir su velocidad de migración entendiéndose como la velocidad a la cual el contaminante se desplaza (figura 2-9).

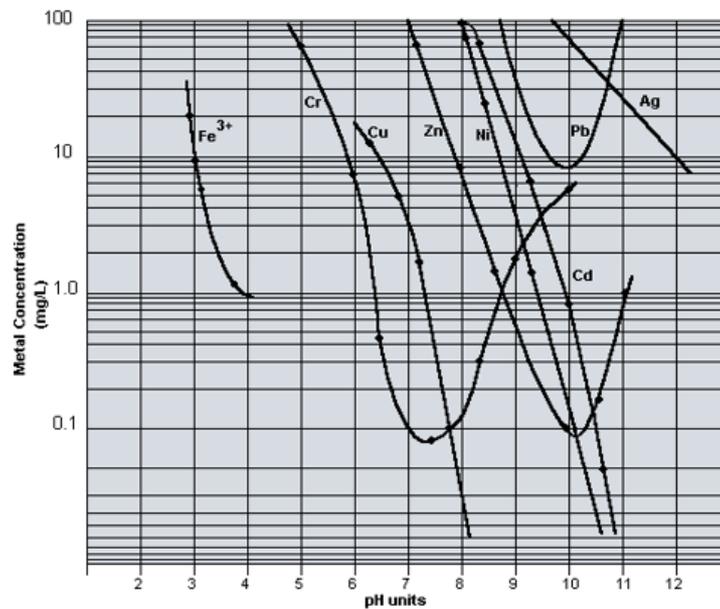


Figura 2-7. Concentración de metal frente a pH. Fuente: (Conner & Hoeffner, 1998).

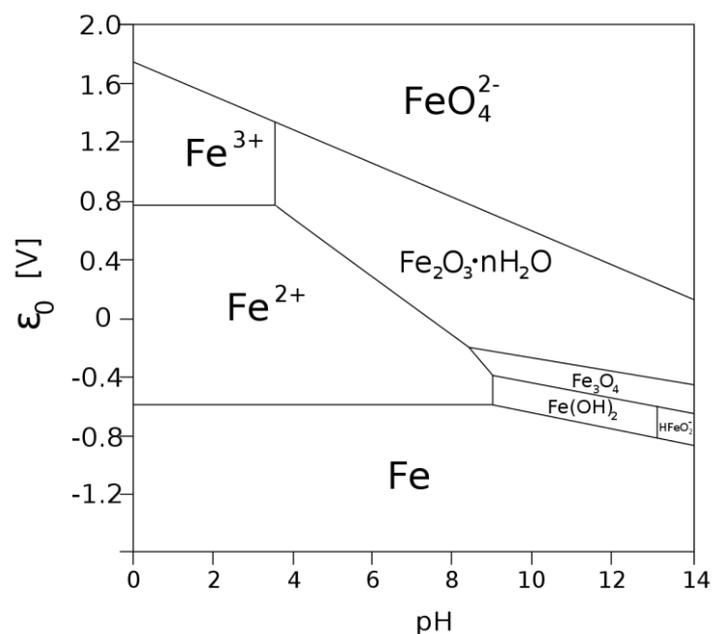


Figura 2-8. Diagrama Pourbaix del hierro. Fuente: (Pourbaix et al., 1997).

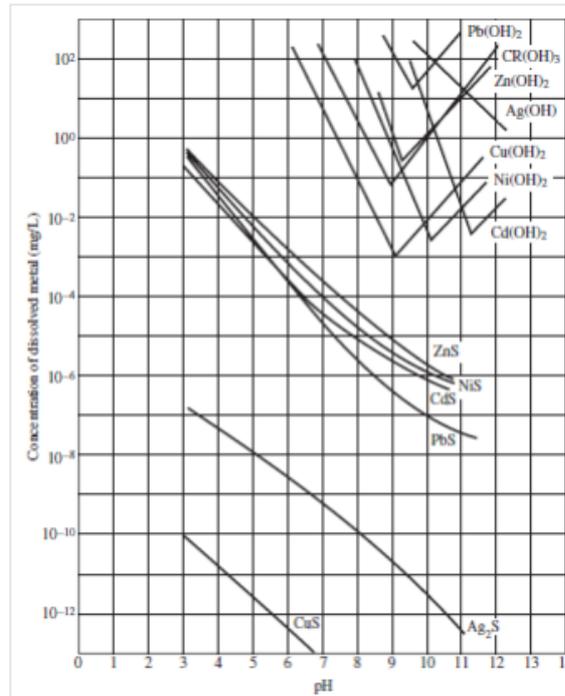


Figura 2-9. Concentración del metal disuelto frente a pH.

Dentro de los procesos físicos se distinguen la adsorción y la encapsulación. Con la adsorción el contaminante queda en la superficie del sólido y con la encapsulación el contaminante queda encapsulado, es decir, queda dentro de la matriz con un recubrimiento de la propia matriz. Para realizar una correcta adsorción hay que estudiar el tamaño, forma y porosidad de la matriz E/S, el pH de la matriz y la concentración de contaminante, mientras que para la encapsulación hay que analizar la porosidad y la permeabilidad de la matriz.

2.1.9 Empleo de residuos de pintura como materia prima

En este apartado se recogen las publicaciones más recientes sobre el empleo de residuos de pintura, quedando por tanto de manifiesto, el aprovechamiento de dicho producto. Este proyecto pretende demostrar la compatibilidad de las pinturas con los geopolímeros y ofrecer un nuevo campo de aplicación para los geopolímeros.

En 2006 (*Basegio & Bergmann, 2006*) se estudió el uso de lodos de pintura como materia prima para la industria de la arcilla roja. Se adicionaron residuos de lodos de pintura en rangos de 0,5 a 5 % en peso a masas cerámicas. La finalidad era poder dar uso a los residuos de lodos de pintura y así reducir el empleo de otras materias primas, siempre y cuando cumpla con los estándares del producto a fabricar. Se demostró que era posible producir materiales cerámicos que contienen residuos de lodos de pintura dentro de sus formulaciones y que cumplan con todos los estándares de los materiales.

La investigación de Nehdi y Arif en 2010 (*Nehdi & Arif, 2010*) pretendía verificar el uso de residuos de pintura de látex en el hormigón de cemento Portland. En dicho estudio, se comprobó la lixiviación de sustancias peligrosas. Se basó en reemplazar parte del agua de la mezcla por los restos de pintura. Tras los ensayos pertinentes (ciclos de congelación-descongelación, ciclos de mojado-secado) para comprobar que el hormigón cumple con las especificaciones, se comprobó que la cantidad de lixiviados eran aceptables. Estos autores, pertenecientes a la Universidad de Western Ontario en Canadá, han desarrollado una tecnología de alto valor añadido para el reciclado de pinturas de látex en hormigones de cemento, a los que han denominado "Hormigones de Pintura" (Painterete).

Otro estudio (*Almesfer et al., 2012*) se centró en los desechos de pintura de látex. Se quiso comprobar el uso de este desecho como aditivo polimérico en el hormigón, debido a similitudes en composición química de ambos materiales. Se obtuvo que, según la cantidad de desecho empleado, el producto obtenido iba a tener unas propiedades u otras y que la cantidad de pintura añadida, reemplazaba al agua que debería contener la mezcla. Se comprobó que materiales con concentraciones en el rango de 8-16% de pintura, tenían buenas propiedades físicas (resistencia a compresión y tracción) y buena trabajabilidad.

La última publicación encontrada (*Dina et al., 2020*) es un análisis de ciclo de vida del uso de residuos de pintura como materia prima para la fabricación de adoquines. Mas concretamente, eran residuos de pintura provenientes de la industria de envases de cosméticos, que, de manera general, son gestionados como residuos peligrosos. Con el análisis de ciclo de vida se estudia el impacto ambiental que se obtiene con el empleo de dicha materia prima. En dicho estudio, se evaluaron varios escenarios, cambiando la composición de la mezcla de residuos de pintura. Se obtuvo que el empleo de residuos de pintura como materia prima para la producción de bloques de pavimentos redujo el impacto negativo sobre en medio ambiente, además de cumplir los estándares de resistencia a la compresión y de absorción de agua de los materiales usados en pavimentos.

2.2 Geopolímeros

Un geopolímero es un polímero inorgánico de aluminosilicato formado como consecuencia de la reacción entre un aluminosilicato sólido y una solución acuosa de silicatos o hidróxidos alcalinos, a temperatura ambiente o a temperatura ligeramente superior (*Davidovits, 1991*).

Aunque fue en la década de los ochenta, Joseph Davidovits, ingeniero y científico francés, quien denominó a estos materiales “geopolímeros”, éstos se descubrieron décadas antes por varios grupos de científicos. Se hallaron tras estudiar la causa de la larga duración de algunas construcciones antiguas, mas en concreto, las pirámides, descubriendo que las estructuras cerámicas contenían en su matriz, radicales alcalinos libres.

Hoy en día, lo que ha llevado, en parte, al gran desarrollo de los geopolímeros ha sido encontrar una alternativa viable y medioambientalmente amigable al cemento Portland. Este cemento se obtiene al someter las materias primas de las que está compuesto (caliza, marga y arcilla) a cocción en hornos a temperaturas superiores a los 1400°C. Tras este proceso, se obtiene el Clinker, que es molido junto con yeso para obtener finalmente el cemento. La preocupación medioambiental surgió debido al gran uso del cemento en la construcción y la cantidad de gases contaminantes (CO₂, NO_x y SO₂) que son emitidas durante el proceso de cocción para la obtención de éste (*Cagiao et al., 2010*).

En cambio, durante el proceso de producción de los geopolímeros se producen bajas emisiones de CO₂, comparándolo con la fabricación del cemento Portland (en torno a un 70% menos), y se obtienen materiales con buenas propiedades, las cuales se detallarán más adelante (*Weil et al., 2009*).

Además, algunas de las materias primas usada para la obtención de los geopolímeros son residuos o subproductos (ceniza volante, escorias de horno...). Con esto se evita la generación de residuos y se impulsa la economía circular.

Aunque parece evidente las grandes ventajas medioambientales del uso de este nuevo material, hay que mencionar una desventaja notable del empleo de geopolímeros. Éstos tienen un coste elevado debido a que usan soluciones alcalinas en vez de agua.

2.2.1 Materias primas empleadas para la formación de geopolímeros

De manera general, para la fabricación de geopolímeros se van a usar como materias primas un sólido de aluminosilicato y una solución acuosa activadora que debe ser alcalina, por lo que generalmente se usan silicatos o hidróxidos.

2.2.1.1 Aluminosilicatos

Es la materia sólida empleada para la geopolymerización. Generalmente se emplean materiales residuales (cenizas, escorias, etc), aunque se pueden emplear minerales naturales, es decir, pueden ser tanto de fuentes naturales como de fuentes residuales. Algunas de las materias primas usadas han podido sufrir un proceso previo de calcinación (materiales calcinados), mientras que otras no (materiales no calcinados). La diferencia básica se da en la estructura que va a poseer el material; si el material es calcinado va a poseer una estructura más amorfa y si el material no es calcinado va a poseer una estructura cristalina.

Como materiales no calcinados se puede encontrar el caolín o los feldespatos y como materiales calcinados el metacaolín, las cenizas volantes o las escorias.

A través de diferentes investigaciones sobre minerales naturales como materias primas para la síntesis de geopolímeros, se dedujo que, de manera general, los minerales con estructura de aluminosilicato son más solubles cuanto mayor es la concentración de la solución alcalina activadora. Además, los minerales de tipo aluminosilicato con un alto grado de solubilidad en medio alcalino suelen aportar una mayor resistencia mecánica una vez obtenido el geopolímero.

- El caolín (*Bartolomé, 1997*) es una arcilla natural, con fórmula química $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$, la cuál presenta una estructura de capas de láminas de alúmina octaédricas y láminas de sílice tetraédricas apiladas alternadamente, con una composición química de 46,5 % SiO_2 , 39,5 % Al_2O_3 y 14% H_2O .

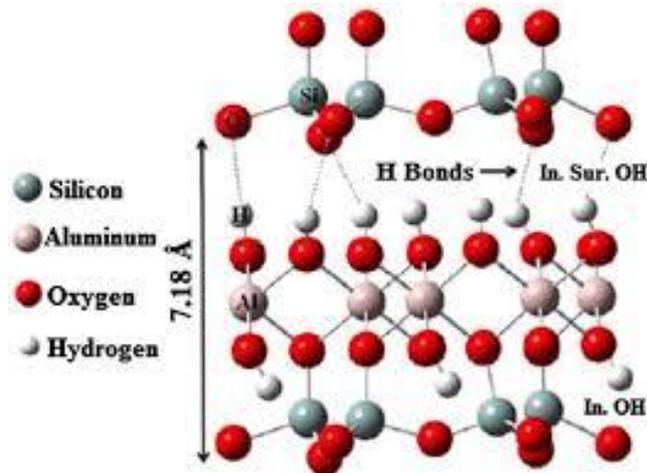


Figura 2-10. Estructura del caolín. Fuente: (*Estudios & Centro, 2017*)

Cuando el caolín es calentado en un rango de temperaturas entre los 650°C y los 900°C pierde los enlaces de iones hidroxilos, produciéndose por tanto una deshidroxilación. Esta calcinación rompe la coordinación octaédrica del aluminio, forzando a éste a adoptar un número de coordinación 4. Tras dicha calcinación, se obtiene un material amorfo con reactividad puzolánica, con mayor superficie específica y un menor grado de cristalinidad. El empleo de un producto u otro dependerá de la escala a la que se produzca. A pequeña escala se suele emplear más el metacaolín porque el caolín necesita la presencia de otro aluminosilicato para formar un geopolímero resistente. Sin embargo, para la producción de metacaolín, durante la calcinación del caolín se emiten ciertas cantidades de CO_2 y es necesaria muchas cantidades de agua, por lo que es más usual el empleo de caolín para mayor escala, como por ejemplo en la construcción.

- La escoria son un residuo que se obtiene tras la fundición de un metal, y, según su origen tendrá una mezcla de diferentes óxidos metálicos. El número de coordinación del aluminio pasa de 6 a 4 durante la preparación del geopolímero con escorias. Diversos estudios (*Oh et al., 2010*) han comparado geopolímeros basados en escoria con los basados en ceniza volante, dando como resultado una mayor resistencia mecánica a los geopolímeros basados en escoria debido a que el calcio en la escoria está más disponible para formar silicato cálcico hidratado. También se ha comprobado que el efecto de la escoria en los geopolímeros dependerá de los activadores alcalinos empleados.
- La ceniza volante (*Luna-Galiano, 2013*) es el subproducto obtenido tras la combustión del carbón y son muy usadas en geopolimerización por su semejanza con los aluminosilicatos naturales. La ceniza volante contiene cantidades apreciables de sílice (40 – 60 %) y alúmina (20 – 30 %) y posee cantidades menores de óxidos de hierro y óxidos de calcio, aunque dependerá de la composición química que tenía el carbón del que provenía. Este material suele presentar una distribución de partícula amplia y generalmente suelen ser partículas esféricas, huecas y no homogéneas. Además, está compuestas tanto por fases cristalinas como por fases amorfas.

2.2.1.2 Soluciones activadoras

Están formadas básicamente por hidróxidos o silicatos alcalinos. La solución activadora tiene dos funciones: diluir los elementos que formaran la red de polisialatos y producir la activación de los enlaces superficiales del material sólido que queda.

Las soluciones con hidróxidos alcalinos más empleadas suelen contener NaOH o KOH. El ion OH^- se disuelve en la alúmina y la sílice mientras que el ión Na^+ o K^+ forman parte de la estructura molecular tetraédrica. Una característica importante es la alcalinidad en estas soluciones, ya que a más alcalinidad la mezcla será más fluida y cuanto menor sea la alcalinidad mayor será la viscosidad (*Khale & Chaudhary, 2007*).

Según diversos estudios (*Cheng & Chiu, 2003*), si la concentración de hidróxidos aumenta en la solución activadora, la resistencia mecánica del geopolímero obtenido será mayor. Sin embargo, también se demostró que, a largo plazo dicha resistencia podría disminuir si se usan cantidades de hidróxidos en exceso, debido al exceso de activadores ya que afectan a la morfología del geopolímero provocando la no uniformidad de las matrices. Finalmente, se dedujo que se debe optimizar la cantidad de hidróxido empleado para obtener el geopolímero, ya que tanto un exceso como un defecto alterará las propiedades principales del geopolímero (morfología, viscosidad y resistencia mecánica).

Hay que destacar la importancia en la elección del elemento que confiere a la solución el carácter básico, ya que el Na^+ y el K^+ tienen distintos comportamientos. La diferencia de tamaños (el radio del sodio es menor) hace que la solución de oligómeros sean de un tamaño u otro lo que se traduce a mayor resistencia o menor.

Las otras posibles soluciones están formadas por silicatos solubles, mediante el uso de soluciones de silicato de sodio (Na_2SiO_3) o silicato de potasio (K_2SiO_3). Hay diversos estudios que analizan el comportamiento del geopolímero si se emplean silicatos solubles, pero las variaciones no se deben a modificaciones del proceso de geopolimerización, éstas se dan por la variación de la cinética de las reacciones químicas durante el proceso.

Para poder determinar la influencia de los silicatos en los materiales poliméricos, diversos ensayos (*Kovalchuk et al., 2008*) demuestran que un mayor contenido de sílice soluble da lugar a un incremento de la fase gel del geopolímero, por lo que produce un aumento de la resistencia mecánica. Sin embargo, con un exceso de la concentración de silicatos y manteniendo la relación $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ constante, se aumenta la viscosidad de la solución y se disminuye el pH, haciendo por tanto que se reduzca el grado de reacción de los materiales sólidos. Por lo tanto, como ocurre con los hidróxidos, es necesario trabajar con concentraciones óptimas de silicatos para obtener geopolímeros con las propiedades deseadas.

2.2.1.3 Otros elementos

La presencia de algunos elementos, como el hierro, calcio o magnesio, y la forma en la que éstos se encuentran en los materiales precursores usados, influyen en el mecanismo de geopolimerización y por consiguiente en las propiedades del geopolímero.

El efecto del calcio sobre los geopolímeros está influenciado por la cantidad de silicato soluble utilizado en las formulaciones, por la alcalinidad de las mismas y por la relación de Si/Al. Si la alcalinidad es baja, se puede formar un gel geopolimérico junto con un gel de silicato cálcico hidratado. Se presume que el gel de silicato cálcico rellena los huecos y poros que hay en el gel geopolimérico, aumentando por tanto la resistencia mecánica de los geopolímeros. Si la alcalinidad es alta, se pueden formar precipitados de hidróxido cálcico extendidos por el gel geopolimérico, lo que produce una apariencia más heterogénea además de afectar a la velocidad de los procesos de disolución/precipitación debido a la bajada del pH por el consumo de OH^- .

Con respecto al hierro, no hay ninguna hipótesis clara sobre su efecto. Se piensa, según algunos estudios, que el hierro puede precipitar como hidróxido férrico, produciendo una disminución de iones hidroxilo y afectando al tiempo de curado y por tanto a las propiedades físicas del geopolímero obtenido.

2.2.2 Geopolimerización

La reacción a través de la cual se obtienen geopolímeros se denomina geopolimerización. Los geopolímeros se sintetizan mezclando un reactivo sólido de naturaleza silico-aluminosa con una solución alcalina activadora. Tras dicha reacción se obtienen cadenas de polímeros como resultado de la unión de los iones silicato y aluminato, lo que da lugar a estructuras tetraédricas de silicato y aluminato, denominadas sialatos (Davidovits, 1999).

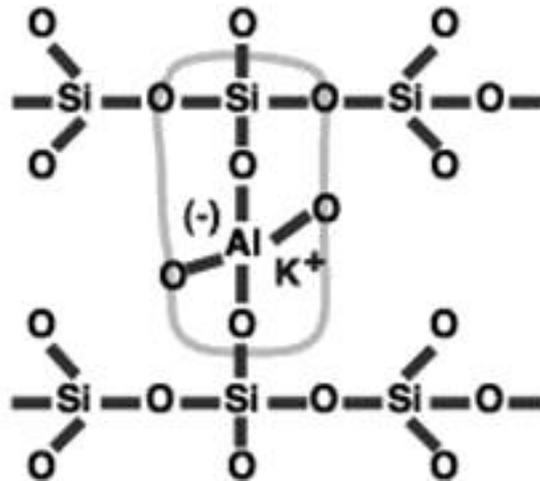


Figura 2-11. Red sialato.

Según Davidovits la fórmula empírica de los geopolímeros es la siguiente (Peter Duxson et al., 2007):

$$M_n(-(SiO_2)_z - AlO_2)_n \cdot wH_2O \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

z: valor entero (1, 2 o 3)

M: catión monovalente

n: grado de policondensación

w: número de moléculas de agua asociadas

Dependiendo del valor de z, se diferencian tres redes posibles. Si z equivale a 1 se forma la red polisiliato, si z vale dos se obtiene la red poli sialato-siloxo y si finalmente z toma el valor de 3 se forma la red poli sialatodisiloxo.

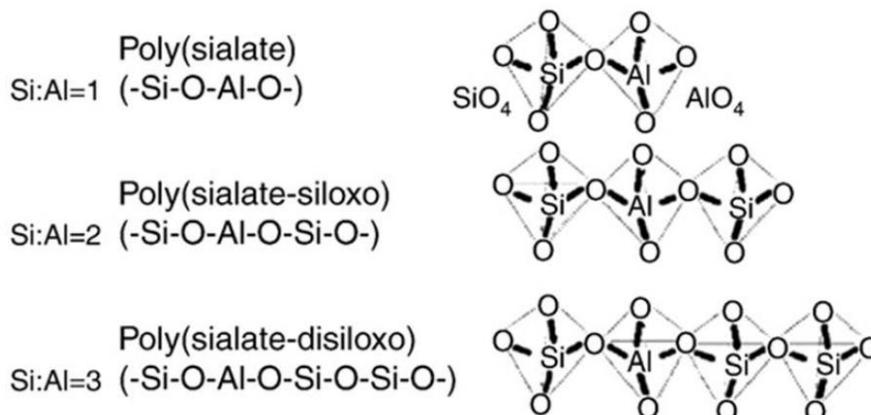


Figura 2-12. Tipos de redes poliméricas.

Con respecto al mecanismo, éste todavía no ha sido determinado completamente, aunque varios científicos han propuesto diferentes teorías de como sería. El modelo que actualmente es más preciso consta de los siguientes pasos (Duxson *et al.*, 2007):

- En el primer paso se produce la disolución de la parte amorfa del aluminosilicato sólido gracias a la solución alcalina activadora. Con esta disolución se consume agua y se forman monómeros de aluminato y silicato debido a la acción de iones hidroxilo.
- Una vez la solución acuosa contiene los monómeros, se forma una mezcla compleja de aluminatos, silicatos y aluminosilicatos en equilibrio, originándose así los primeros oligómeros de aluminosilicatos.
- Cuando empieza a aumentar la concentración de oligómeros, la solución se transforma en un gel debido a la condensación de dichos oligómeros. Dicho gel es una mezcla entre agua y aluminosilicato, aunque para ello es que se libere el agua que se consumio durante la disolución. Este gel se le conoce como gel geopolimérico.
- Una vez formado el gel, se aumentan las conexiones entre las cadenas, apareciendo estructuras de diversas geometrías que enlazan los compuestos.
- Por último, se produce la polimerización (proceso mediante el cual se unen monómeros) y endurecimiento del gel, obteniendo finalmente una estructura inorgánica polimérica, lo que se denomina, geopolímero.

La estructura que se obtendría tras el proceso de geopolimerización se puede observar mejor en 3D en la siguiente figura:

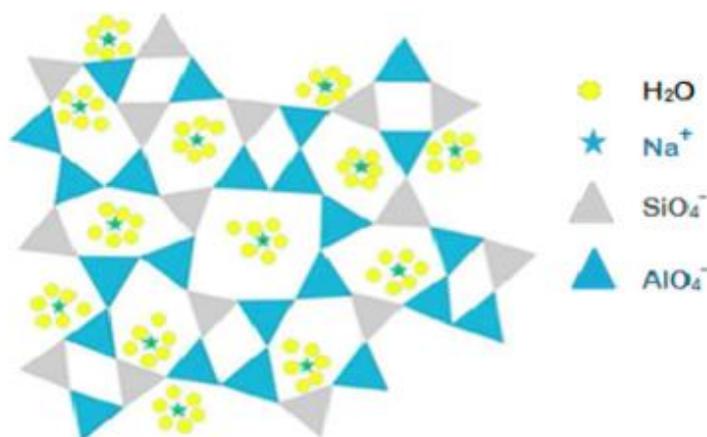


Figura 2-13. Estructura de red de los geopolímeros. Fuente: (*A critical review of geopolymer properties for structural fire-resistance applications* | Elsevier Enhanced Reader, n.d.).

Se puede sintetizar que el proceso de geopolimerización conlleva la disolución, migración y polimerización de especies precursoras de aluminio y silicio, así como una reacción superficial, para obtener finalmente un gel de aluminosilicato. El proceso de geopolimerización se muestra en el siguiente esquema:

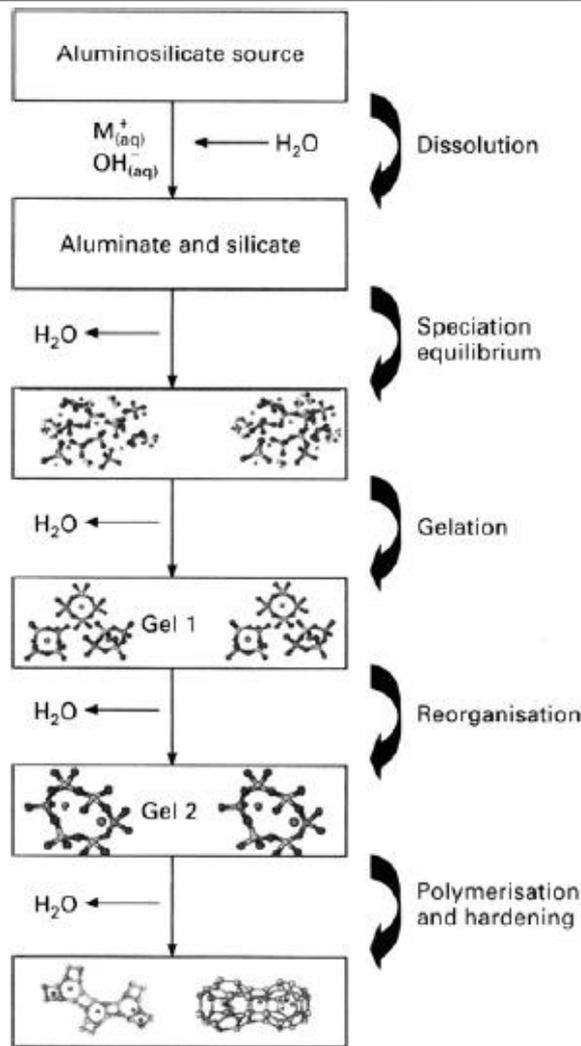


Figura 2-14. Esquema de geopolymerización. Fuente: (Provis & Van Deventer, 2009).

2.2.3 Relaciones moleculares para la síntesis de geopolímeros

Las relaciones moleculares, que en su época describió Davitovits, de las reacciones de geopolymerización son las siguientes (Davidovits, 1982):

- La relación molar $SiO_2 : M_2O$ en soluciones acuosas de silicatos ha de estar comprendida entre 4:1 y 6,6:1, donde M es un catión metálico alcalino.
- El aluminio que debe contener el aluminosilicato ha de ser soluble.
- La relación molar $Al_2O_3 : SiO_2$ ha de estar comprendida entre 1:5,5 y 1:6,5.

Tras el paso de los años se ha ido demostrando que las relaciones descritas por Davidovits son muy limitadas, ya que en la práctica la relación molar Si/Al puede llegar a estar comprendida entre 0,5 y 300, aunque si esa relación es menor que 1 o mayor que 5 se obtienen geopolímeros con peores propiedades mecánicas (Fletcher et al., 2005).

Hay muchas hipótesis que aún no son afirmadas por la corta vida que tienen los geopolímeros, pero sí es claro es que la cantidad de alumina disponible es un parámetro crítico en la sintaxis de los geopolímeros (A. Fernández-Jiménez et al., 2006). En un estudio, Fernández-Jiménez comprobó que los productos geopoliméricos con mayores grados de reacción y resistencias mecánicas fueron aquellos preparados con cenizas volantes, que tenían un mayor contenido de sílice y alumina reactivas y una relación molar Si/Al menor que 2.

También se comprobó que la resistencia mecánica aumentó como consecuencia de la formación de un gel rico en aluminio en la primera etapa y la obtención de un gel rico en silicio en la segunda etapa. Esto es debido a que los enlaces Al-O son más débiles que los enlaces Si-O haciendo que el aluminio se disuelva más rápido que el silicio. Cuando la reacción progresa, los grupos silicato se disuelven más, hasta que se alcanza una concentración de silicato en el medio adecuada para la formación de un gel rico en silicio.

2.2.4 Principales parámetros en la síntesis de los geopolímeros

Varios factores a tener en cuenta a la hora de sintetizar geopolímeros son la humedad relativa, temperatura y tiempo de curado, la concentración alcalina (descrita previamente), el pH, la relación molecular (descrita en el apartado anterior) y la concentración de agua.

- Humedad relativa: se descubrió (*Criado et al., 2010*) que si se mantiene la humedad relativa a más del 90% en moldes herméticos se obtiene un material compacto y denso con buenas propiedades mecánicas, mientras que si se trabaja con baja humedad y el geopolímero está en contacto con el aire, finalmente se obtendrá un sólido poroso, granular y con peores propiedades mecánicas.
- Temperatura y tiempo de curado: este factor depende del aluminosilicato empleado. De manera general, el tiempo de curado tiene lugar entre 2 y 24 horas (*Khale & Chaudhary, 2007*). Con respecto a la temperatura (*Palomo & Palacios, 2003*), para el metacaulín, si el curado es a temperatura ambiente, se va a obtener un geopolímero con mejores propiedades que si es curado a mayores temperaturas, mientras que para la ceniza volante y escorias de alto horno, se necesitan temperaturas en torno a los 60-80°C ya que a temperatura ambiente son poco reactivos.
- Contenido en agua: una mayor cantidad de agua aumenta la trabajabilidad y la homogeneidad del geopolímero, pero al aumentar la concentración de iones OH⁻ disminuye la resistencia a compresión. El geopolímero será más poroso debido a la evaporación de las moléculas, por lo que se obtendrá un geopolímero con peores propiedades mecánicas (*Khale & Chaudhary, 2007*).

2.2.5 Geopolímeros y zeolitas

La formación de geopolímero sigue de manera general los mismos pasos que la formación de las zeolitas. Las zeolitas son aluminosilicatos que contienen iones de distinto tamaño y moléculas de agua con libertad de movimiento, permitiendo así el intercambio iónico (*Xu & van Deventer, 2003*). Las principales diferencias sobre la formación de zeolitas y de geopolímeros son:

- Las zeolitas se forman en sistemas hidrotérmicos cerrados y necesitan menor concentración de especie precursora para su formación (*Van Jaarsveld et al., 1997*).
- La obtención de las zeolitas sigue un mecanismo lento, por lo que suelen cristalizar mientras que los geopolímeros se forman rápidamente obteniendo una estructura amorfa, semiamorfa o microcristalina (*Van Jaarsveld et al., 1997*).
- Para obtener geopolímeros hay que trabajar en temperaturas comprendidas entre la temperatura ambiente y 80°C mientras que para obtener zeolitas, la reacción se da a temperaturas entre 80°C y superiores (*Lin & Hsi, 1995*).
- Gracias a la estructura amorfa de los geopolímeros se obtienen buenos resultados mediante difracción de rayos X y espectroscopía de infrarrojos, en cambio, las zeolitas no tienen tanto éxito en ese campo (*Davidovits, 1994*).
- Las zeolitas necesitan una cantidad mínima de agua para su formación, por lo que de manera general van a necesitar una mayor cantidad de solución alcalina que los geopolímeros (*Fernández-Jiménez et al., 2005*).

2.2.6 Propiedades generales de los geopolímeros

El mayor campo de aplicación de los geopolímeros es en el sector de la construcción, más concretamente como sustituto del cemento Portland, aunque hay diversas aplicaciones además de la mencionada. Es por tanto evidente que dependiendo de las propiedades que tengan dicho material, será destinado para un campo de aplicación u otro. Dichas propiedades son entre otras:

- Baja conductividad térmica (*Duxson et al., 2005*), propiedad que describe la capacidad de un material de transferir el calor.
- Buena resistencia frente a ácidos y sales (*Van Jaarsveld et al., 2002*).
- Baja permeabilidad (*Van Jaarsveld et al., 2002*), propiedad de importancia en cuanto a la inmovilización de sustancias contaminantes.
- Buena resistencia a ciclos de hielo-deshielo (*Davidovits, 1994*). Se trata de un fenómeno cíclico de congelamiento y descongelamiento del agua que contienen los poros del geopolímero en periodos de tiempo determinados, que podrían provocar grietas o fisuras.
- Correcta adhesión a hormigones, acero, vidrio y otros materiales (*Farhan et al., 2020*).
- Gran integridad estructural y elevada resistencia a esfuerzos de compresión (*Farhan et al., 2020*). La resistencia a la compresión es una de las propiedades más valoradas en los geopolímeros ya que hace a este material útil para su empleo en la construcción por tener valores similares a los materiales empleados en este sector. Los geopolímeros pueden llegar a alcanzar valores de hasta 100MPa.
- Gran resistencia a la abrasión (*Farhan et al., 2020*), propiedad que concede los geopolímeros gran resistencia ante la fricción con otro material, haciendo por tanto a los geopolímeros materiales válidos para su empleo como pavimentos y revestimientos.
- Las superficies de estos materiales son suaves al tacto y precisan moldeabilidad. Dicha propiedad hace a los geopolímeros buenos materiales para el moldeado y tallado de objetos artísticos (*Davidovits, 1988-1*).
- Alta resistencia al fuego (*Duxson et al., 2005*) y mínima emisión de gases contaminantes cuando se calientan. También añadir que poseen una buena resistencia a ciclos de hielo-deshielo (*Davidovits, 1991*).
- Bajo consumo de energía y bajas emisiones de gases contaminantes durante su fabricación (*Khale & Chaudhary, 2007*).

Es importante mencionar que no todos los geopolímeros van a poseer las mismas propiedades, éstas dependerán de los materiales empleados y de las condiciones de geopolimerización (por ejemplo, la temperatura). Pero, aunque las propiedades varíen, siguen siendo los geopolímeros un material alternativo a emplear, aunque es un campo de estudio muy actual y que todavía tiene que desarrollarse más.

2.2.7 Aplicaciones

Como ya se ha mencionado, durante los últimos años se ha producido un gran avance tecnológico en el desarrollo de aplicaciones de geopolímeros.

Desde el descubrimiento de los geopolímeros por Joseph Davidovits, estos nuevos materiales, ya sean usados puros, con cargas o reforzados, tienen grandes aplicaciones en diversos campos. Estas aplicaciones se encuentran en las industrias de automoción, fundición y metalurgia, ingeniería civil, construcción, industrias de cerámica y plásticos, gestión de residuos, arte y decoración, rehabilitación de edificios, etc (*Applications – Geopolymer Institute, n.d.*).

Según de la relación Si/Al del geopolímero, el material es más adecuado o no para diversas aplicaciones, y dicha relación entre Si/Al y las aplicaciones viene recogida en la siguiente tabla:

Tabla 2-1. *Aplicaciones de geopolímeros según Si/Al. Fuente: (Davidovits, 1999)*

Si/Al	Aplicaciones más comunes
>3:1	Sellantes y adhesivos
3:1	Moldes de fundición
2:1	Encapsulación de residuos tóxicos
1:1	Aplicaciones cerámicas y material construcción

Han pasado pocos años desde que se descubrió dicho material, es por ello que algunas de las aplicaciones de los geopolímeros aún están en desarrollo, mientras que otras ya están industrializadas. Entre las aplicaciones más comunes se encuentran:

2.2.7.1 Aplicaciones decorativas

Los geopolímeros se descubrieron cuando se estudio de qué material estaban hechas las pirámides de Egipto para tener tal resistencia, y fue el mismo Davidovits el que estudio ese misterio y publicó un libro con sus hipótesis: “Las pirámides: un enigma resuelto”.

También surgen muchas dudas de como en la edad antigua se pudieron hacer materiales tan duros y resistentes, materiales como platos, cuencos, etc. Las dudas surgen en base a como podrían trabajar con piedras tan duras y darles las formas deseadas.

Actualmente, gracias a los geopolímeros se puede restaurar y conservar muchas estatuas, fachadas y monumentos de nuestro Patrimonio Histórico gracias a las láminas flexibles de compuestos de fibra. Éstos son dañados por la contaminación atmosférica, por el deterioro druto de los años y la acción del viento y lluevia, cambios de temperatura, etc. En este sector, los geopolímeros sirven como material de fijación y unión, como adhesivos, para fabricar piedras perdidas o dañadas e incluso para reproducir piezas enteras.

Los geopolímeros son usados en este campo de aplicación porque ofrecen: buena reproducibilidad, belleza de la piedra natural, estabilidad, buen comportamiento húmedo seco, resistencia a rayos UV y buen comportamiento de congelación-descongelación.



Figura 2-15. Efecto de la contaminación en estatuas

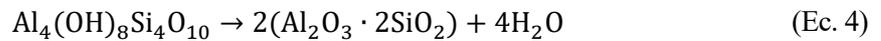
2.2.7.2 Cemento

Es una de las aplicaciones más novedosas ya que permite sustituir el empleo de cemento Portland (*Weil et al., 2009*)(*Torres-Carrasco & Puertas, 2017*). El cemento Portland es un tipo de cemento hidráulico que se realiza con áridos y agua y, con su transformación, se obtiene una masa resistente y dura, denominada hormigón.

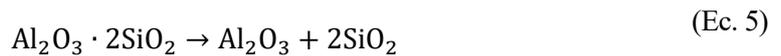
Este cemento es el que más se usa en la construcción debido a sus buenas propiedades, como fraguado rápido, buena adherencia a otros materiales y una buena resistencia. La principal desventaja medioambiental que deriva del uso del cemento Portland es que para su fabricación se someten las materias primas a cocción a temperaturas en torno a los 1400°C, emitiéndose grandes cantidades de gases contaminantes (CO₂, NO_x y SO₂).

Las etapas principales que se producen durante la fabricación del clinker son (*Fases del clinker, n.d.*):

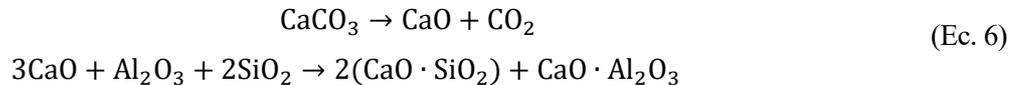
1. Eliminación del agua que tiene el árido (T^a≈200°C)
2. Descomposición de la arcilla para obtener metacaolinita (T^a≈400-750°C)



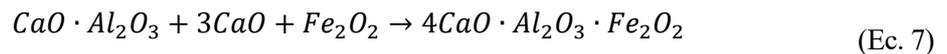
3. Descomposición de la metacaolinita obteniéndose una mezcla de óxidos (T^a≈600-900°C)



4. Descomposición de la caliza (T^a≈600-1000°C)



5. Fijación de cal y óxido de hierro (T^a≈800-1300°C)



Los gases que se emiten para la fabricación del cemento Portland con catalogados como “Gases de Efecto Invernadero (GEI)”, gases que contribuyen al cambio climático, de ahí su gran desventaja medioambiental.

El cambio climático es la variación global del clima de la Tierra. Las señales del cambio climático, como son entre otras el aumento del nivel del mar, el derretimiento de glaciares (todo ello producido por el aumento de la temperatura de la Tierra) y la aparición de fenómenos meteorológicos, se están intensificando durante los últimos años. Como se puede comprobar en la Figura 2-16 la temperatura global del planeta ha ido aumentando, pero ha sido en esta última década cuando se está produciendo un rápido aumento a tener en cuenta.

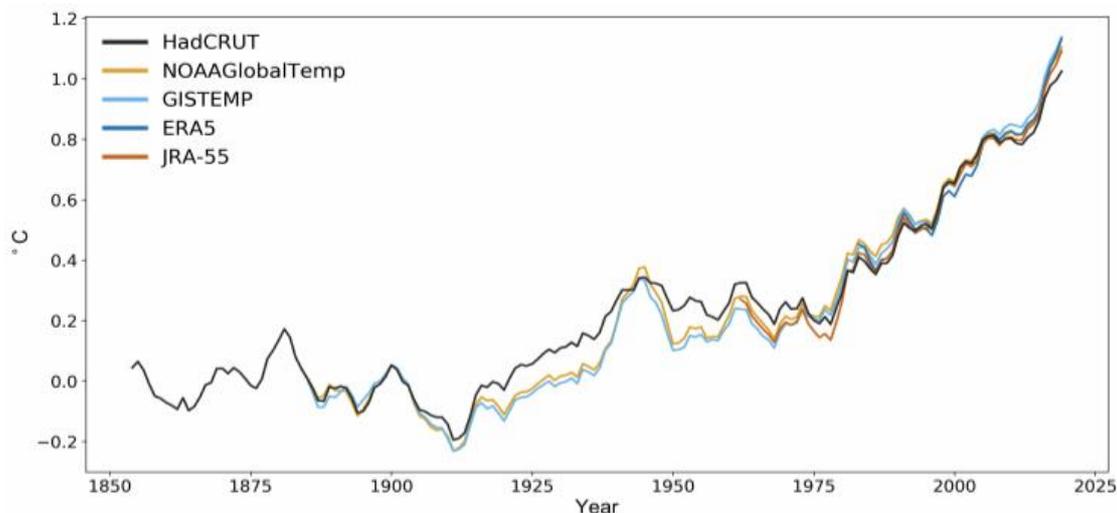


Figura 2-16. Representación de la diferencia de temperatura global en los últimos años a través de 5 bases de datos.
Fuente: (Acuerdo de París | Acción por el Clima, n.d.)

Este aumento de la temperatura global es debido a los grandes avances que ha habido en muchos sectores (transporte, industria, etc.) y por el empleo de materiales que perjudican en mayor medida al medioambiente como, por ejemplo, el empleo del cemento Portland, donde se estima que los procesos de combustión química y térmica involucrados en su producción producen alrededor del 8% de las emisiones mundiales de CO₂ (Chatham House - International Affairs Think Tank, n.d.).

De las diversas maneras que se están estudiando, con el objetivo de sustituir o modificar el proceso para la obtención de un cemento medioambientalmente amigable, cabe destacar el uso de geopolímeros. Los hormigones que se hacen con geopolímeros como materia prima, usan cenizas volantes y álcalis como hidróxido potásico, hidróxido sódico y silicato sódico. Tras varios estudios se ha demostrado que los hormigones geopoliméricos pueden sustituir al cemento Portland debido a sus buenas características y su sostenibilidad (European Commission, n.d.). Las características más representativas son:

- Alta resistencia a esfuerzos de compresión, lo que le hace un material muy apto para la construcción y también con buena resistencia a la tracción.
- Resistencia al fuego y el frío, llegando a aguantar hasta 1200°C.
- Buena resistencia a ataques de ácidos, residuos tóxicos y agua salada.
- Buena oposición a deformaciones.

2.2.7.3 Construcción

Cabe destacar, que, aunque se utiliza mucho este material para la fabricación de un cemento menos perjudicial para el medio ambiente que el cemento Portland, los geopolímeros también se usan en el sector de la construcción para fabricar diversos materiales como ladrillos (Zúñiga, 2018).

Dichos ladrillos se denominan ladrillos geopoliméricos LTGS (Cross-Linking). Se usan los geopolímeros para fabricar los ladrillos porque sus materias primas son baratas y las hay en gran cantidad (tierra arcillosa) y tiene buenas propiedades para cumplir la función de dicho material, como buena resistencia a esfuerzos de compresión, estable al agua, alta resistencia al calor y congelación, etc. Además de emplear materias primas más baratas, durante su fabricación se tiene que calentar la mezcla a temperaturas en torno a 85°C frente a los ladrillos tradicionales que se calientan a 1000°C, por lo que supone un gran ahorro de energía.

2.2.7.4 Estabilización/solidificación de residuos peligrosos

Esta aplicación es relativamente nueva y solo se ha probado a escala de laboratorio debido a que aún está probándose. Aún así, se ha probado ya que con la geopolimerización se puede proporcionar un método seguro y probado para la encapsulación y la contención de sustancias tóxicas, peligrosas y radiactivas que se pueden encontrar en residuos (Luna-Galiano, 2013).

Especialmente, está probado que se pueden retener: metales pesados, uranio, radio, arsénico e hidrocarburos. Con este método empleado en este campo se consigue obtener alta resistencia y durabilidad a largo plazo.

Se hace especial mención a las dos estabilizaciones más probadas. La primera de ellas, la estabilización de cenizas de incineradoras. A diferencia de las cenizas de la combustión del carbón, las cenizas de incineradoras contienen cantidades importantes de contaminantes (metales pesados y compuestos orgánicos). La lixiviación en agua de los sólidos E/S obtenidos (*Lancellotti et al., 2010*) ha demostrado que en el caso del empleo de geopolímeros, la liberación de metales es inferior a si no se emplearan los geopolímeros y que, la liberación de metales se encuentran por debajo de los límites impuestos por la normativa de algunos países para vertederos de residuos no peligrosos.

En otros estudios (*Andini et al., 2011*), se consigue estabilizar mediante geopolímeros una ceniza de incineradora de residuos domésticos y comerciales. Dichos productos muestran un comportamiento menos sensible a la presencia de cloruros y sulfatos en las cenizas de incineradora, aunque la estructura se vio afectada por la presencia de sales solubles.

Por último, destacar el artículo de Shirley y Black (*Shirley & Black, 2011*), donde se fabrican geopolímeros con cenizas volantes de combustión de carbón pulverizado y biomasa con una solución de NaOH residual que contienen alúmina disuelta con el objetivo de estabilizar residuos procedentes del sistema de control de la polución del aire de una incineradora de residuos. Aunque los resultados eran favorables, no se pudieron cumplir los límites para cloruros, por lo que sería necesaria la utilización de algún pre-tratamiento de lavado.

La segunda estabilización que se va a comentar es la estabilización de residuos tóxicos. Algunos estudios (*Khalil & Merz, 1994*), sobre la estabilización/solidificación de residuos que contienen Cs, Mo y Sr mediante geopolímeros indican que el Sr se inmoviliza con eficacia pero que el Cs lixivía en agua rápidamente.

Otros estudios más recientes han conseguido estabilizar residuos radiactivos de baja actividad usando cenizas activadas alcalinamente y cemento Portland. Perera (*Perera et al., 2006*) ha estudiado la estabilización de Cs y Sr, adicionados en forma de nitrato o hidróxidos a geopolímeros basados en cenizas volantes y en metacaolín. En los resultados, se obtuvo que la ceniza volante solo consigue inmovilizar un 1% del Cs y del Sr y el metacaolín consigue inmovilizar un porcentaje menor.

3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este apartado se van a detallar los materiales y métodos empleados para poder comprobar si las propiedades de la mezcla pintura-geopolímero son las deseadas.

3.1 Materiales

En esta sección se van a detallar los materiales empleados durante el desarrollo del proyecto. Como ya se ha descrito anteriormente, para la obtención de un geopolímero es necesario, como mínimo, un material sólido que contenga aluminosilicatos y una solución activadora.

3.1.1 Ceniza Volante

La ceniza volante, según la norma española UNE-EN 450-1:2013, se define como un polvo fino con partículas principalmente esféricas, cristalinas, originadas por la combustión del carbón pulverizado, con o sin materiales de cocombustión, que tiene propiedades puzolanicas y que esta compuesto fundamentalmente de SiO_2 y Al_2O_3 , siendo el contenido de SiO_2 reactivo de al menos el 25% en masa (*UNE-EN 450-1:2013 Cenizas volantes para hormigón. Parte 1: Def...*, n.d.).

La ceniza volante es un subproducto que se obtiene de la combustión del carbón. Se emplea como material sólido por ser una fuente de aluminio y silicado. Durante este proyecto, la ceniza volante usada proviene de la Central Térmica de los Barrios de 550 MW.



Figura 3-1. Ceniza Volante. Fuente: (Origen | CEDEX, n.d.)

De manera general y según diversos estudios (*Catalfamo et al., 1997, Khale & Chaudhary, 2007, Jaarsveld et al., 2003, A. Fernández-Jiménez et al., 2006, Ana Fernández-Jiménez & Palomo, 2003, Hardjito et al., 2005, Antenucci et al., 2009*), las características óptimas que deben tener las cenizas volantes para la síntesis de geopolímeros son:

- Proporción en peso $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ entre 2 y 4,5, aunque esta proporción solo se debe tener en cuenta como indicativo de la composición aproximada de fracciones solubles de sílice y alúmina.
- Porcentaje de materia inquemada menor al 5% peso, debido a que los inquemados aumentan la demanda de agua por su alta superficie específica.
- Contenido de Fe_2O_3 (hematita) inferior al 10% peso. Debido a que elevados contenidos de hematita producen resistencias a compresión relativamente bajas.

- Bajo contenido de CaO, debido a la alta afinidad de éste con el silicato, lo que hace que dificulte la formación del gel geopolimérico. Además, las cenizas volantes bajas en CaO poseen mayores durabilidades en condiciones ácidas.
- Alto contenido de fase mineralógica amorfa. Cuanto mayor sea la cantidad de fase amorfa o vítrea, y por tanto menor la cantidad de fase cristalina, mayor será el grado de reacción.
- Contenidos de sílice reactiva entre el 40 y 50% peso. A mayor contenido de sílice reactiva, mayor formación de gel geopolimérico.
- Distribución de tamaños de partículas amplias, de modo que haya compensación entre las distintas fracciones presentes en la muestra.

La composición química general de la ceniza volante empleada, que viene detallada en la tabla 3-1 y 3-2, se ha obtenido por espectrofotometría de absorción atómica (EAA), después de la digestión de las muestras (ASTM D-3682-78).

Tabla 3-1. Composición mayoritaria de la ceniza volante.

Óxidos	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
% peso	5,83	3,94	1,90	63,90	21,50	0,68	1,70

Tabla 3-2. Datos humedad y pérdida por calcinación.

Humedad 105°C (%)	LOI 750°C (loss on ignition)
0,05	3,32

Los elementos traza se han medido mediante espectroscopia de emisión atómica usando un plasma de acoplamiento inductivo (ICP-AES), cuyas concentraciones se especifican en la siguiente tabla:

Tabla 3-3. Concentración de elementos traza en la ceniza volante.

Elementos traza	As	Mo	Zn	Pb	Co	Cr	Ni	Cu	Ba	Cd	Sn	Hg	Sb	V	Se
Concentración (mg·kg ⁻¹)	24	17	136	47	33	167	102	97	1287	3	6	0,08	6	248	19

Para poder estimar si dicha ceniza volante es válida para su uso en la obtención de geopolímeros, se ha medido la composición mineralógica. Dicha composición se ha obtenido por análisis de difracción de rayos X y ha sido realizado por el Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera (CSIC).

Tabla 3-4. Composición mineralógica de la ceniza volante.

Fase	Amorfa	Cuarzo	Mullita	Hematita	Magnetita	Anhidrita	Illita	Calcita	Microclina
% peso	85	4,6	10	0,5	<0,1	0,2	<0,1	<0,1	<0,1

Por último, cabe mencionar la distribución de tamaños de partículas encontradas. Dicha distribución fue determinada mediante difracción laser (Malvern MASTERSIZER/E) realizada por el Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera (CSIC).

Tabla 3-5. Distribución de tamaño de partículas por percentiles.

Distribución de tamaño de partícula	D10	D50	D90
μm	7,5	36,9	146,7

3.1.2 Metacaolín

El otro material sólido empleado es el metacaolín. El metacaolín es un producto muy estudiado en las últimas décadas por su composición química y debido a su estructura cristalina amorfa.

Es producido tras calcinar el caolín a temperaturas en torno a los 700°C. Este calentamiento o calcinación, rompe la estructura del caolín, donde las capas de sílice y alúmina sufren un reordenamiento de la estructura y una deshidroxilación (pierde en torno al 14% de su masa en enlaces de iones hidroxilos) transformandolo en metacaolín.

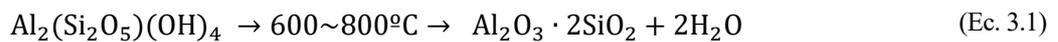


Figura 3-2. Metacaolín

En este proyecto, el metacaolín empleado proviene de Caolín Caobar, S.A., y fue calcinado a 800°C durante 3,5 horas. Es de color blanco tostado y con textura en polvo.

La composición química general de dicho metacaolín viene detallada en la siguiente tabla:

Tabla 3-6. Composición mayoritaria del metacaolín.

Óxidos	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
% peso	0,51	<0,03	0,17	65,23	31,97	0,05	1,28

Es importante hacer mención a que dependiendo de la temperatura a la que se produce la calcinación, las propiedades finales del metacaolín pueden variar. Según algunas investigaciones (Murat & Comel, 1983), las temperaturas óptimas de calcinación se encuentran entre los 700°C y los 800°C, resultando calcinaciones por encima de los 850°C causa de recristalización del metacaolín, con una disminución posterior de la reactividad.

3.1.3 Solución activadora

La solución activadora empleada en este proyecto va a estar compuesta por hidróxido sódico (NaOH) y silicato sódico (NaSil).

La solución de silicato sódico es suministrada por EMD Millipore Corporation y cuyas características se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 3-7. Especificaciones silicato sódico.

SiO ₂ (% peso)	Na ₂ O (% peso)	Na ₂ O/ SiO ₂ (peso)	Densidad 20°C (g/mL)
25,5 - 28,5	7,5 - 8,5	0,294 - 0,298	1,296 - 1,396

Según diversos estudios (*Luna-Galiano, 2013*) la relación óptima entre Na₂O/ SiO₂ para la obtención de geopolímeros debe ser en torno a 0,98. Es por ello que es necesario aumentar la cantidad de Na₂O, y esto se consigue añadiendo hidróxido sódico.

La solución de hidróxido sódico se prepara a partir de pellets de NaOH, suministrados por Panreac Química S.A. Dichos pellets tienen una pureza del 98% p/p y se va a preparar disoluciones de NaOH 8M y cuya densidad es de 1,21 g/m³.

Se va a realizar un estudio previo con tres soluciones activadoras de diferentes concentraciones de NaSi y NaOH para poder comparar las propiedades y elegir la solución activadora que proporcione mejores propiedades a los geopolímeros, y con dicha solución activadora elaborar geopolímeros a mayor escala.

3.1.4 Pintura

La función de este proyecto es estudiar la compatibilidad de las pinturas en matrices geopoliméricas, para ello se va a emplear pintura en polvo.

La pintura seleccionada es pintura en polvo blanca, suministrada por Interpon, serie D1036 y cuyas especificaciones, suministradas por el proveedor son, entre otras:

- Apariencia: brillo muy suave
- Gravedad específica: 1,2 – 1,9 g/cm³
- Flexión (ISO 1519): 5 mm
- Impacto por resistencia (ISO6272:1993): 2,5 J
- Dureza Buchholz (ISO 2815): >80
- Tamaño de partícula adecuado para pulverización electrostática

En un principio, se puede considerar que la pintura actuará en la mezcla como un compuesto inerte, es decir, no va a reaccionar con la solución activadora (la cual solo reacciona en la reacción de geopolimerización con el aluminosilicato sólido). Su función es reducir la concentración de aluminosilicato y actuar como un material de relleno. En un futuro, se pretende además emplear residuos de pinturas en lugar de pintura en polvo para así dar otro uso a dichos residuos.

3.2 Elaboración de geopolímeros a menor escala

3.2.1 Preparación de soluciones

Se van a preparar tres disoluciones diferentes, cada una con unas concentraciones de NaOH y NaSil diferentes:

Tabla 3-8. Concentraciones de soluciones activadoras empleadas.

	V NaSil (mL)	V NaOH 8M (mL)	V total (mL)	Na ₂ O/SiO ₂
Solución activadora A	15	5	20	0,508
Solución activadora B	15	8	23	0,640
Solución activadora C	15	12	27	0,816

La relación entre Na₂O y NaOH en la solución de NaOH 8M es 1 g de Na₂O en 4,67 mL de NaOH.

3.2.2 Mezcla de sólido y solución activadora

A continuación, se siguen dos métodos diferentes para la mezcla del sólido y la solución activadora:

1. Se parte de 75 gramos de sólido, se añade el volumen de disolución indicada en la tabla 3-8 y se añade agua (anotando la cantidad empleada) a la mezcla hasta conseguir el geopolímero.
2. Se parte de 75 gramos de sólido y se añade tanta disolución activadora (anotando la cantidad empleada) como sea necesario hasta conseguir el geopolímero, manteniendo las ratios volumétricas indicados en la tabla 3-8.

Posteriormente, se realiza lo mismo, pero añadiendo a la fase sólida, la pintura. La pintura representará un 10% del total, de modo que se añadiran 7,5 g de pintura + 67,5 g de precursor.

Dichas mezclas se realizan en un recipiente pequeño de plástico y se mezclan con una cucharrilla. Para facilitar la mezcla, se emplea una máquina vibradora (figura 3-3).



Figura 3-3. Máquina vibradora

3.2.3 Relleno de los moldes

Los moldes empleados son de PVC, con un diametro exterior de 40 mm e interior que oscila entre 33 y 34 mm y con una altura de 40 mm. En primer lugar, hay que cerrar una de las dos superficies abiertas para evitar la salida de la mezcla. Es por ello que se emplea papel de parafina en dicha cara, y posteriormente, para aumentar la fuerza de sellado, se coloca encima cinta americana (figura 3-4).

Para facilitar el desmolde de los geopolímeros, se añade desencofrante en el interior.

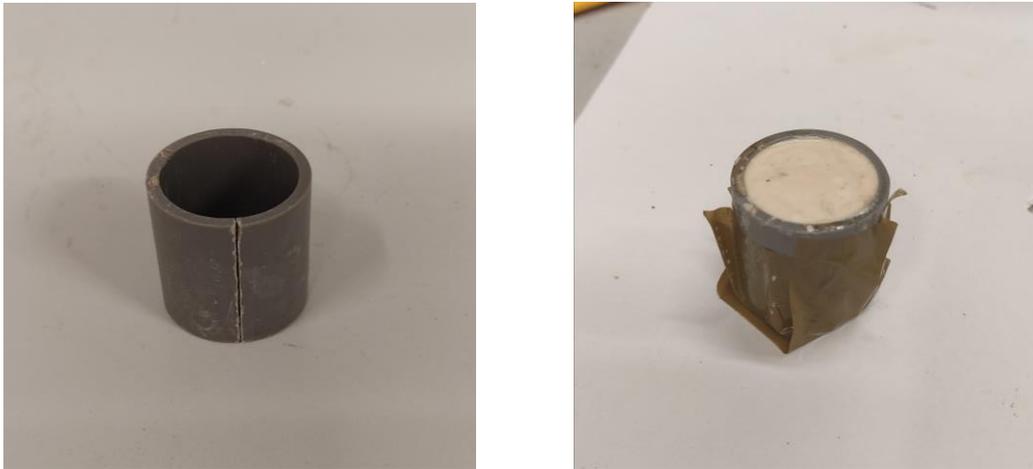


Figura 3-4. A) Molde PVC. B) Molde PVC relleno.

El proceso de relleno de moldes se realiza con la ayuda de la máquina vibradora (Figura 3-3). A medida que se va relleno el molde, gracias a las vibraciones, el geopolímero se extiende sobre toda la superficie del molde con mayor facilidad debido a sus propiedades tixotrópicas, además de eliminar las burbujas de aire que se formen durante dicho proceso.

3.2.4 Fraguado y desmolde de las probetas

El fraguado de las muestras se realizará a dos temperaturas: a temperatura ambiente y a 60 °C (para ello se utilizará una estufa).

Se estima que las muestras que fraguan en estufa tardarán en fraguar aproximadamente cuatro horas, mientras que las que fraguan a temperatura ambiente lo harán en tres o cuatro días.

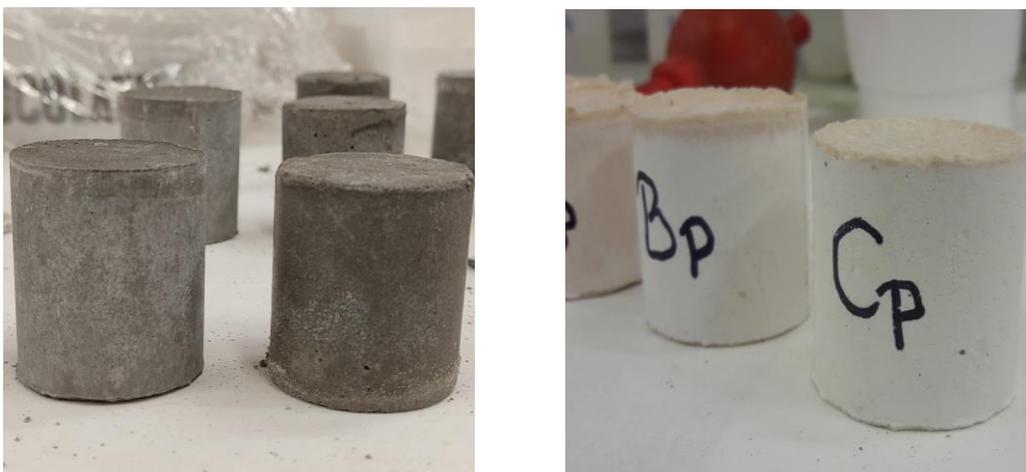


Figura 3-5. Muestras de ceniza volante y metacaolín fraguadas.

Una vez las muestras han fraguado, se procede a desmoldar. En el caso de las muestras que estaban en estufa, es necesario esperar a que alcancen la temperatura ambiente. Una vez desmoldadas, es necesario cubrir las probetas con film transparente para evitar la carbonatación.

3.3 Elaboración de geopolímeros a mayor escala

3.3.1 Preparación de soluciones

Este punto sigue el mismo proceso que el punto 3.2.1, con la excepción que solo se preparará la solución activadora C, debido a que es la que ofrece mejores resultados a obtenido a menor escala (ver apartado siguiente).

3.3.2 Mezcla de sólido y solución activadora

Tras analizar los resultados obtenidos en los ensayos a menor escala, se decide seguir haciendo muestras por el método 2, se mezcla el sólido y la solución activadora sin emplear agua, es decir, se añade tanta solución activadora como haga falta hasta conseguir un material con propiedades tixotrópicas (el geopolímero).

En esta ocasión, como se van a emplear mayores cantidades, se hace necesario el uso de una amasadora eléctrica. La batidora empleada es de la marca Kitchen Aid, modelo 5KPM5 (figura 3-6).



Figura 3-6. Amasadora

3.3.3 Relleno de los moldes, fraguado y desmolde de las probetas

En el proceso de relleno de moldes, se sigue el mismo procedimiento que el punto 3.2.3, relleno de moldes a menor escala.

En el siguiente paso, fraguado y desmolde, también se procede igual que con las pruebas realizadas a menor escala (punto 3.2.4).

3.3.4 Preparación de paralelepípedos

Los paralelepípedos se realizan con la función de medir la resistencia a flexión que van a tener los geopolímeros. Para ello se emplea un molde de acero (figura 3-7), que dará paralelepípedos de dimensiones 160,5x40x40 mm.



Figura 3-7. A) Molde paralelepípedo. B) Molde paralelepípedo relleno.

Partiendo del geopolímero, el proceso de relleno del paralelepípedo es parecido al relleno de los moldes de PVC. En primer lugar, se añade desencofrante en las 5 caras del molde. Seguidamente se va añadiendo el geopolímero poco a poco y dándole golpes, bien con la mano o con un martillo a las paredes de acero, para que se expanda bien por toda la superficie. Cuando el molde esté relleno, se pone el molde en la máquina vibradora, para eliminar las burbujas de aire y conseguir una correcta distribución de la mezcla.

El fraguado también es a temperatura ambiente y en estufa a 60°C, con la diferencia que, debido al aumento de tamaño de la muestra, el tiempo de fraguado aumenta.

3.4 Ensayos realizados

En este apartado se van a describir los ensayos que se han llevado a cabo. Dichos ensayos se han realizados transcurridos 28 días desde que las muestras fraguaron.

Antes de comenzar, se lija con papel de lija las caras de las probetas. Posteriormente, a todas las probetas se miden las dimensiones y el peso. Las medidas de altura y diámetro se obtienen con un pie de rey mientras que el peso se obtiene con una balanza analítica. Con los paralelepípedos se procede igual, se lija la cara expuesta, se miden las dimensiones y se pesan.

3.4.1 Estudio de propiedades físicas

3.4.1.1 Densidad aparente

La densidad aparente de un material es la relación entre el volumen y el peso seco, incluyendo huecos y poros que contenga dicho material.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Se mide usando la norma UNE-EN 12390-7:2020/AC:2021. Dicho dato, por tanto, se obtiene pesando cada muestra y calculando su volumen.

3.4.1.2 Porosidad

La porosidad es una propiedad de los materiales que indica la cantidad de huecos vacíos que hay presentes en dicho material. Es decir, la porosidad está relacionada con la permeabilidad de una sustancia de absorber líquidos o gases.

Para poder obtener la porosidad del material se va a seguir el principio de Arquímedes.

$$V_{Total} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \quad (\text{Ec. 3.3})$$

$$V_{Total} = V_{Hueco} + V_{Sólido} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

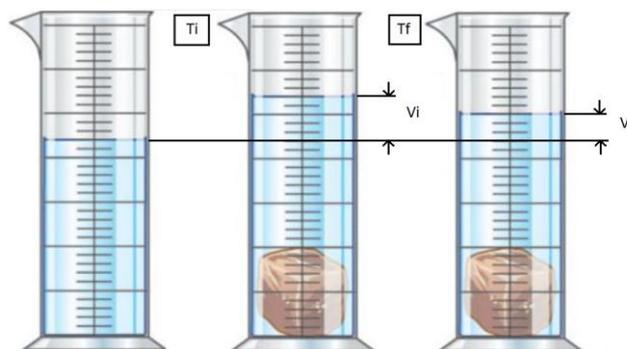


Figura 3-8. Principio de Arquímedes, porosidad.

$$\varepsilon = \frac{V_{Hueco}}{V_{Total}} = \frac{V_i - V_f}{V_i} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

3.4.2 Estudio de propiedades mecánicas

3.4.2.1 Dureza superficial

La dureza es la resistencia de los materiales a ser rayado o penetrado, es decir, se esta midiendo la cohesion entre los átomos de dicho material. La normativa a seguir es la UNE-EN 12859:2012.

La dureza superficial de las probetas se ha medido con un durómetro shore c de la marca alemana Bareiss.

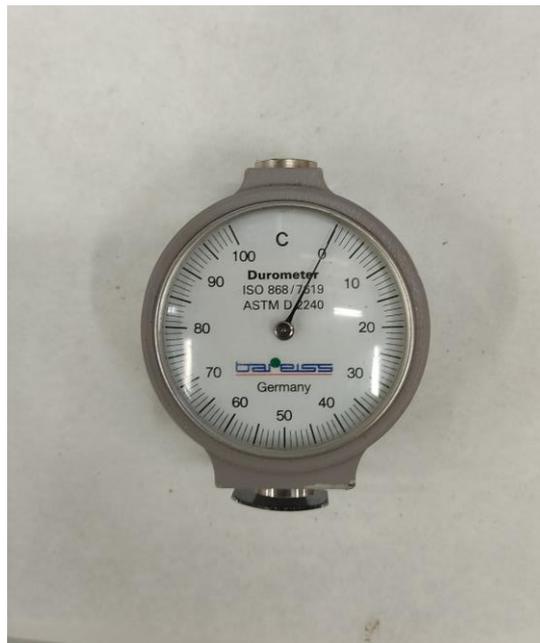


Figura 3-9. Durómetro

Para realizar el ensayo, se presiona la punta de acero del reloj contra las caras de la probeta. Como la medida dependerá de la fuerza con la que se presione, se realizan varias medidas de cada cara. Se descartan los valores que presenten una dispersión superior al 10%.

3.4.2.2 Resistencia a compresión

De los ensayos mecánicos aplicables en el campo de la construcción, la resistencia a compresión es el ensayo más usado para evaluar el grado de solidificación alcanzado. Es decir, este ensayo nos va a proporcionar que presión es capaz de soportar un material antes de llegar a su límite de rotura.

La resistencia a compresión se ha obtenido según la norma ASTM C39/39. Dicha norma establece que la resistencia a compresión se determinará mediante la aplicación de una fuerza de compresión normal a la superficie de una muestra, midiendo la tensión aplicada hasta que se produzca la rotura o deformación de la muestra.

Para dicho ensayo se ha usado un equipo de marca Tinius Olsen, modelo TO31EDG (figura 3-10), capaz de ejercer una presión de 2000 kN.



Figura 3-10. Equipo de resistencia a compresión

Dicho equipo está compuesto por una bomba hidráulica, un visualizador controlador del sistema y la zona de carga. Se cuenta con dos útiles, uno para compresión y otro para flexión.

Para realizar el ensayo se siguen los siguientes pasos:

- En primer lugar, es fundamental asegurar que las caras son planas y horizontales, debido a que, si la superficie tiene irregularidades, el valor de carga podría no ser válido.
- Se elige el útil de compresión.

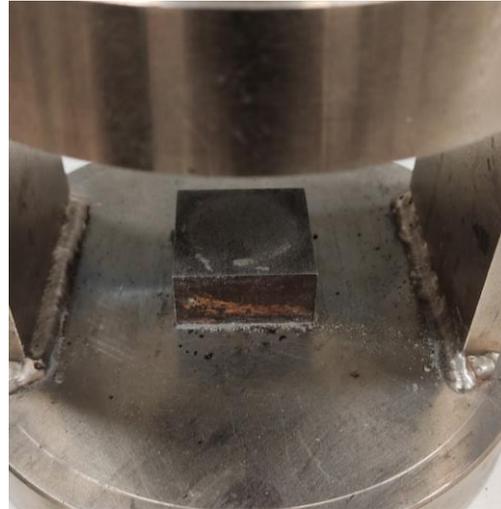


Figura 3-11. Útil de compresión

- Se enciende la máquina y se mete la muestra de modo que quede centrada en el útil.
- Se gira la manivela de la derecha baja (figura 3-9) en sentido de las agujas del reloj.
- Se presiona el botón verde y se pulsa el botón RUN.
- Se espera que la probeta haya roto, y si la maquina no se para sola, se debe pulsar el botón de STOP para evitar que supere la carga máxima. Cuando se haya anotado el valor de resistencia, se vuelve a poner en la posición inicial la manivela de la derecha baja y ya se puede sacar la muestra rota.

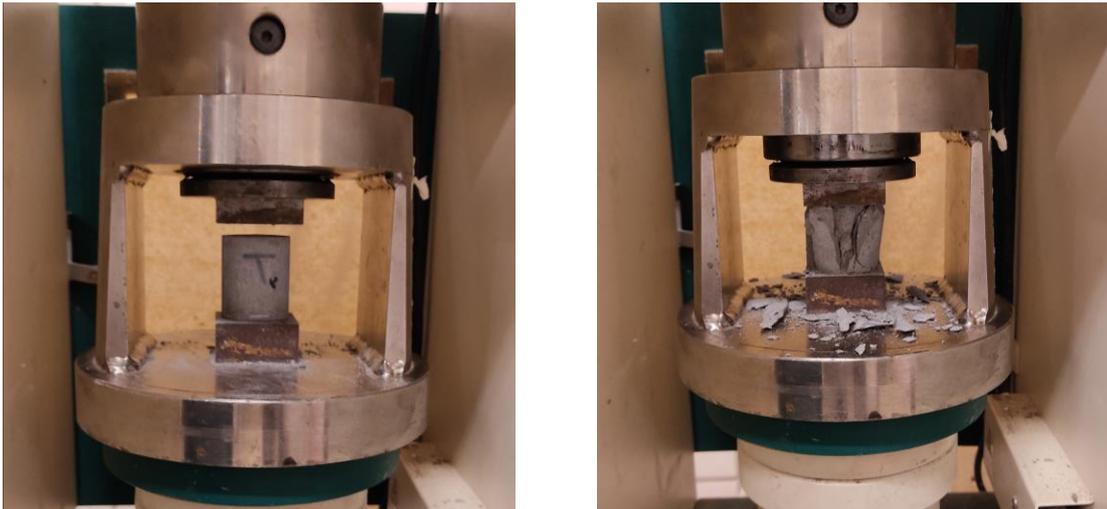


Figura 3-12.A) Situación antes de romper la muestra. B) Situación tras romper la muestra.

El dato de resistencia se da en kN, por lo que, haciendo uso de la siguiente ecuación, se obtiene la resistencia a compresión en MPa.

$$R_c = \frac{F}{S} \cdot 10^{-3} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Donde:

R_c = Resistencia a compresión (MPa)

F = Fuerza aplicada (kN)

S = Área transversal probeta (mm^2)

3.4.2.3 Resistencia a flexión

Este último ensayo, se aplica únicamente a los paralelepípedos. Se realiza con el mismo equipo usado para resistencia a compresión. La normativa a seguir es la norma española UNE-EN 12390-5:2009.

Se siguen los mismos pasos, con la diferencia que se emplea en esta ocasión otro útil (figura 3-13).

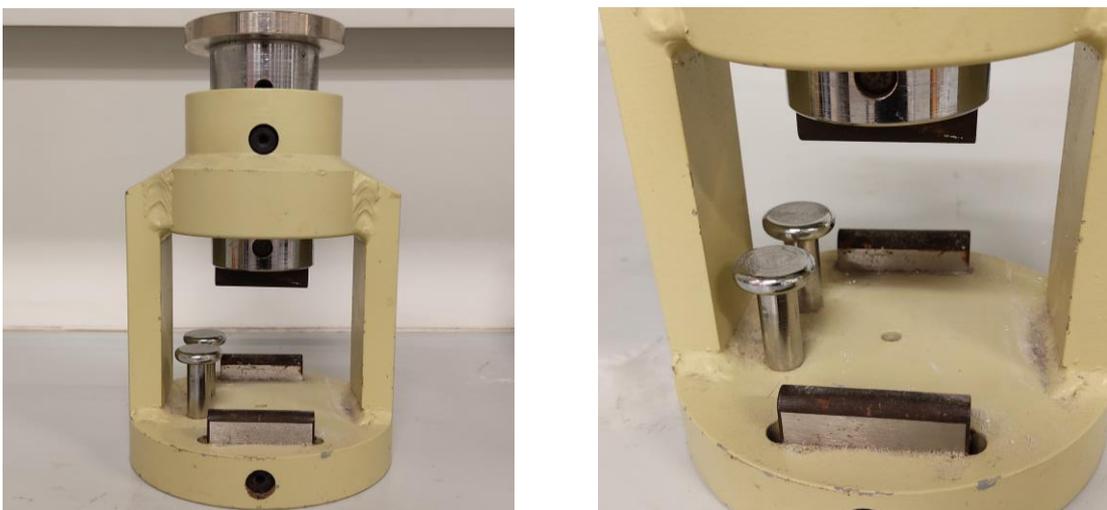


Figura 3-13. Útil de flexión

El paralelepípedo se coloca lo más centrado posible y pegando la cara lateral a los dos tubos de acero laterales. Para este ensayo se procede igual que como el ensayo a compresión, ya que se emplea la misma máquina.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Estudio previo

Como ya se ha mencionado, se han fabricado varias muestras a pequeña escala cambiando el proceso de fabricación para determinar cuál tiene valores más elevados de resistencia a compresión. En concreto, se han realizado:

- Geopolímeros de aluminosilicato a temperatura ambiente y a 60°C.
- Geopolímeros de aluminosilicato con agua a temperatura ambiente y a 60°C.
- Geopolímeros de mezcla aluminosilicato-pintura a temperatura ambiente y a 60°C.

Las cantidades de reactivos empleados, así como los datos de las probetas (peso y dimensiones) y los valores obtenidos de resistencia, se encuentran en el anexo A. A continuación, se analizan los valores obtenidos para ceniza volante y para metacaolín.

4.1.1 Geopolímeros de ceniza Volante

En el caso de que se emplee ceniza volante sola (figura 4-1), se observa como dicho material tiene mayor valor, aunque la variación no es muy significativa, de resistencia a compresión si es fraguado a 60°C en cada solución, y siendo la que tiene mejores valores, la solución C, es decir, la que posee un mayor ratio molar $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ (0,816) (Izquierdo et al., 2009).

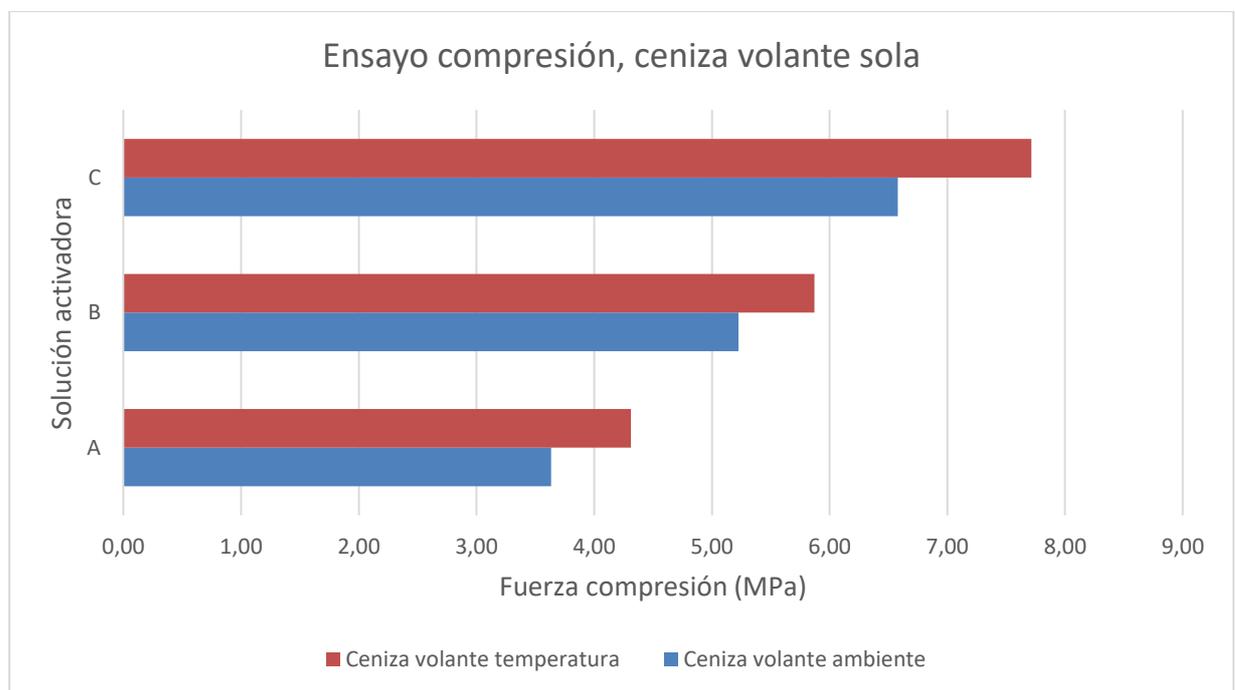


Figura 4-1. Resistencia a compresión ceniza volante sólo con distintas soluciones activadoras (A, B y C).

Si a la ceniza volante se le añade la cantidad justa de solución, y se adiciona el resto de agua (figura 4-2), se ve un comportamiento diferente al descrito anteriormente. La resistencia a compresión baja considerablemente debido a los poros que deja el agua en el geopolímero. Lo que si cumple es que la solución C es la que sigue mostrando los mejores valores de resistencia a compresión.

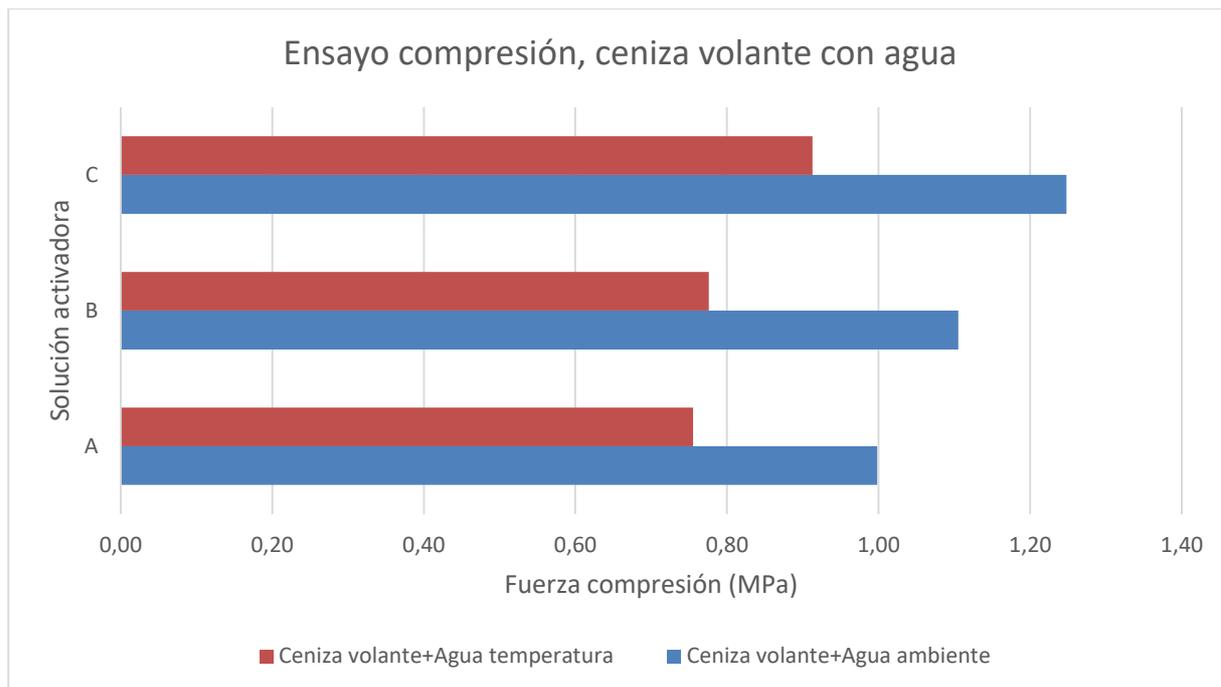


Figura 4-2. Resistencia a compresión ceniza volante con agua con distintas soluciones activadoras (A, B y C).

Cuando se añade un 10% de pintura y no se emplea agua (figura 4-3), las muestras fraguadas a 60°C tienen mejores valores de resistencia y se cumple, como en los anteriores casos, que la solución C es la que da al material más resistencia a compresión.

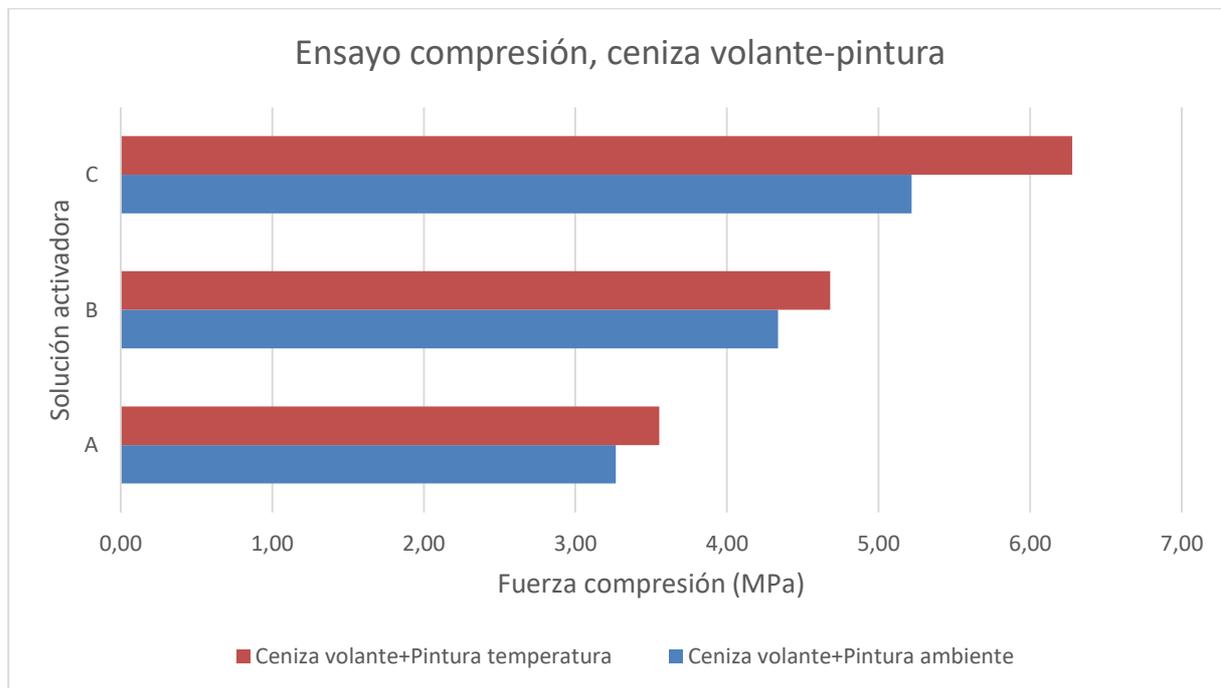


Figura 4-3. Resistencia a compresión ceniza volante-pintura con distintas soluciones activadoras (A, B y C).

De manera general, en el caso de empleo de ceniza volante como aluminosilicato, se aprecia un mejor comportamiento cuando las muestras son fraguadas a 60°C aunque tienen valores muy similares, a excepción de cuando se emplea agua que ocurre al contrario y, además, se obtienen valores muy bajos de resistencia. Respecto a la solución activadora, en todos los ensayos se obtuvieron mejores resultados con el empleo de la solución activadora C.

Por lo tanto, para las muestras a mayor escala de ceniza volante, se van a fabricar los geopolímeros sin el empleo de agua y solo se realizarán con la solución activadora C.

4.1.2 Geopolímeros de metacaolín

En el caso de que se emplee metacaolín solo (figura 4-4), se observa como dicho material tiene mayor valor de resistencia a compresión si es fraguado a temperatura ambiente en cada solución que si es fraguado a 60°C (Palomo & Palacios, 2003), y siendo la que tiene mejores valores las que emplean la solución C.

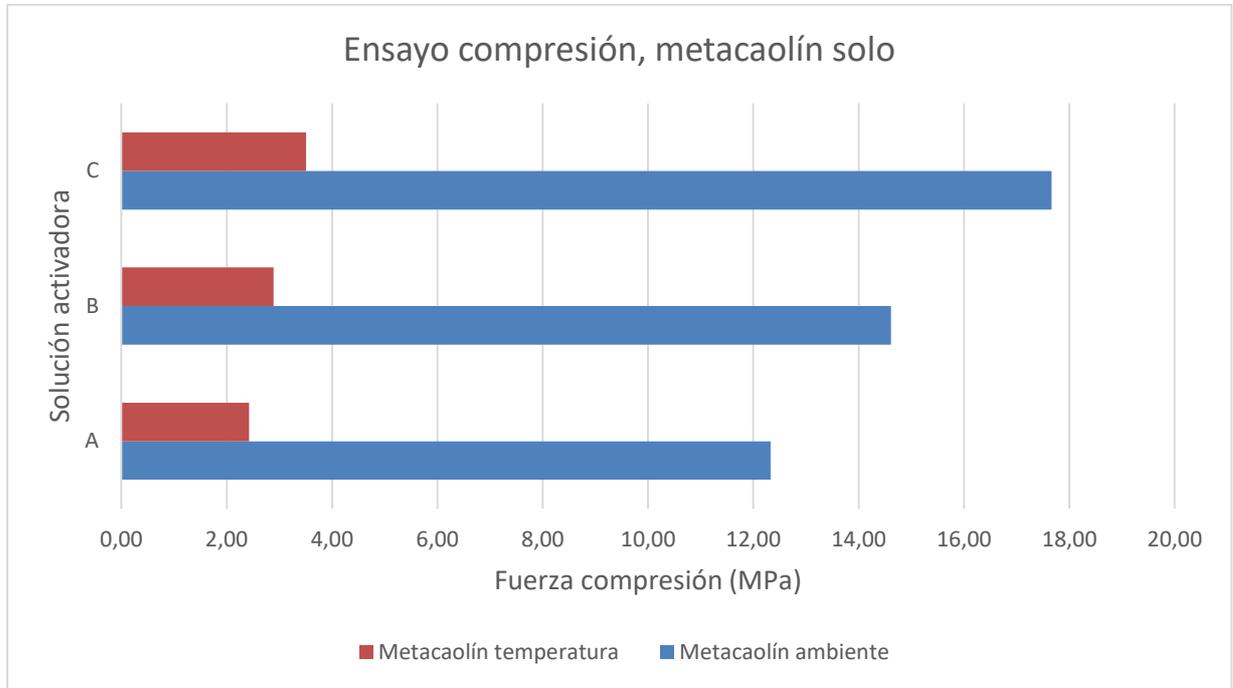


Figura 4-4. Resistencia a compresión metacaolín sólo con distintas soluciones activadoras.

Si al metacaolín se le añade la cantidad justa de solución, y se adiciona el resto de agua (figura 4-5), se ve un comportamiento igual al que tuvo la ceniza volante en dicho caso. Las muestras fraguadas a temperatura ambiente tienen mayor valor de resistencia a compresión y la solución C es la que tiene mejores valores.

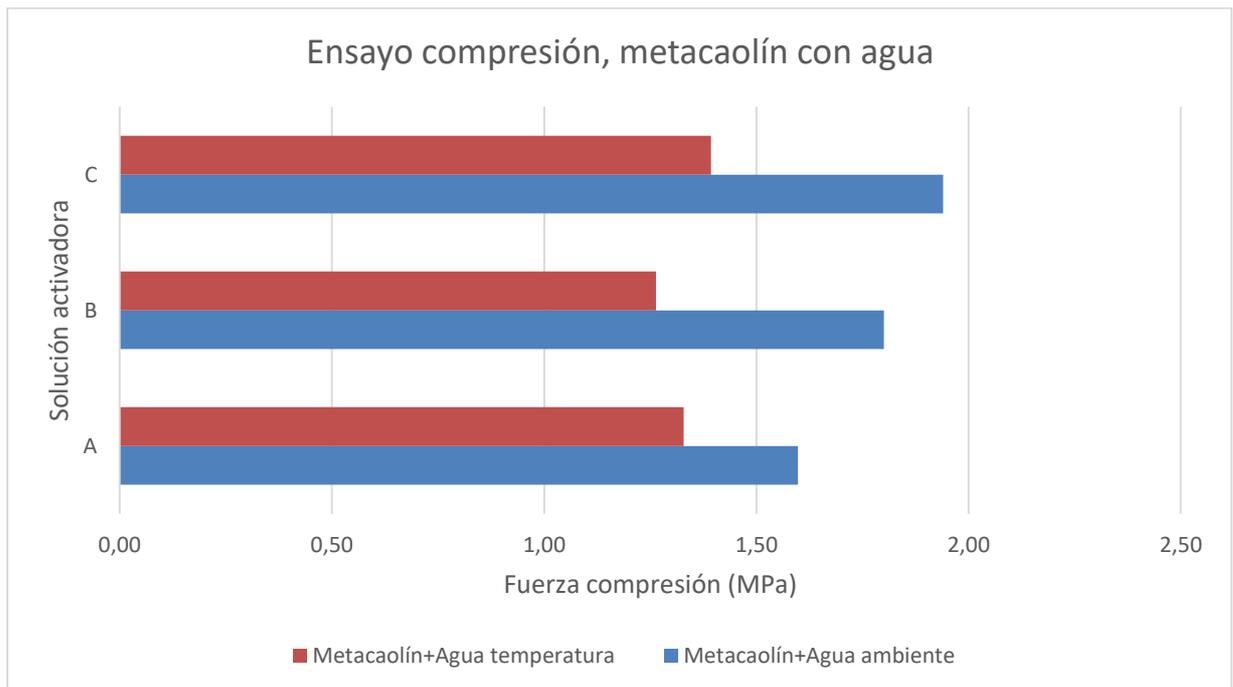


Figura 4-5. Resistencia a compresión metacaolín con agua con distintas soluciones activadoras.

Cuando se añade un 10% de pintura y no se emplea agua (figura 4-6), las muestras fraguadas a temperatura ambiente tienen mejores valores de resistencia y se cumple, como en los anteriores casos, que la solución C es la que da al material con mas resistencia a compresión.

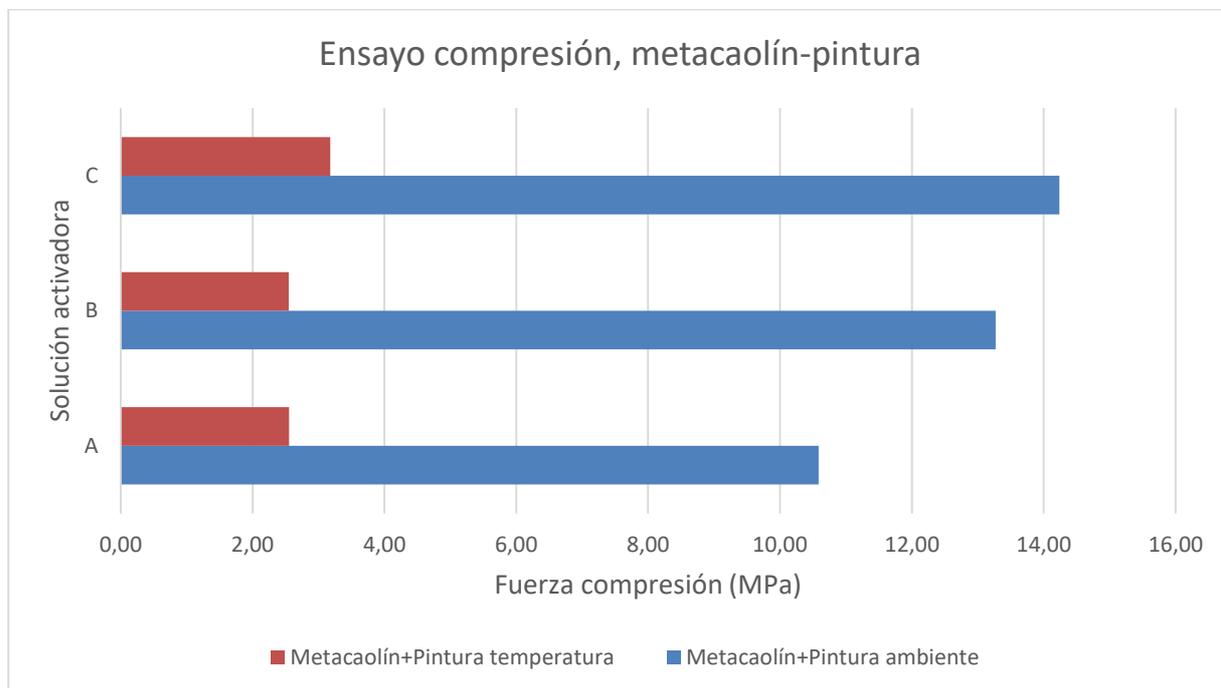


Figura 4-6. Resistencia a compresión metacaolín-pintura con distintas soluciones activadoras.

De manera general, en el caso de empleo de metacaolín como aluminosilicato, se aprecia un mejor comportamiento cuando las muestras son fraguadas a temperatura ambiente, y como ocurría con la ceniza volante, las muestras que se realizaban con agua obtienen valores muy bajos de resistencia. Respecto a la solución activadora, en todos los ensayos se obtuvo mejores resultados con el empleo de la solución activadora C.

Por lo tanto, para las muestras a mayor escala de metacaolín, se van a realizar sin el empleo de agua y solo se realizarán con la solución activadora C.

4.2 Estudio a mayor escala

Se han fabricado a mayor escala geopolímeros de ceniza volante y geopolímeros de metacaolín usando la solución activadora con una relación molar $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ de 0,816 para seguir estudiándolos en profundidad.

Para poder hacer una comparativa y comprobar que la pintura es compatible en matrices geopoliméricas, se han fabricado geopolímeros puros (100% aluminosilicato) y geopolímeros con 10% en peso de pintura y el resto de aluminosilicato.

Se han fabricado 10 probetas de cada aluminosilicato y de cada temperatura de fraguado. En el anexo B se encuentran los datos relativos a ellas.

Cabe mencionar en este punto, un aspecto ya mencionado, y de interés en el proceso de fabricación del geopolímero, que es el recubrimiento con film transparente de las muestras para evitar que, en contacto con el aire, se carbonaten. Durante el desarrollo de este proyecto, algunas muestras se carbonataron, quedando por tanto inutilizadas. En las fotografías de la figura 4-7 se muestra el aspecto de dichos geopolímeros.

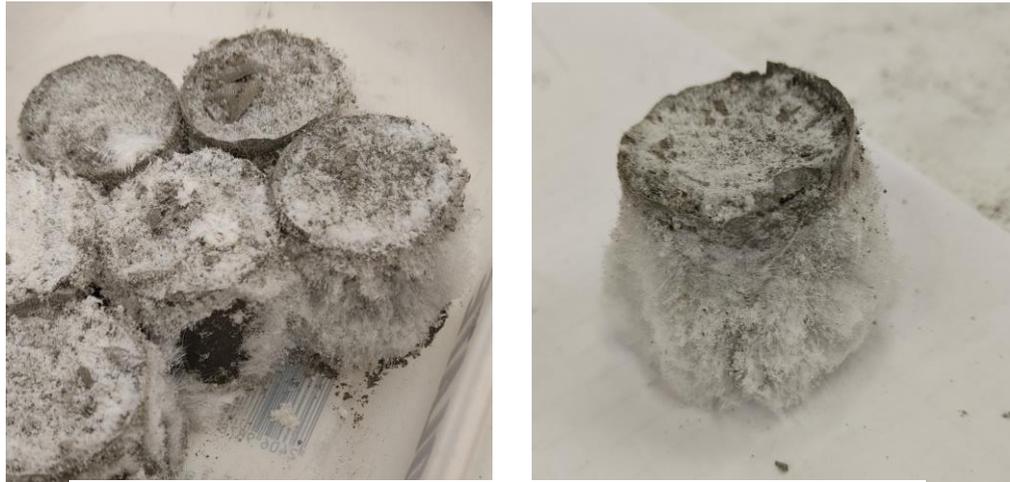


Figura 4-7. Carbonatación muestras geopolímeros.

A continuación, se muestran los datos medios de los ensayos realizados a los geopolímeros.

4.2.1 Densidad aparente

Para ambos aluminosilicatos, se cumple que cuando el geopolímero es puro tiene una densidad ligeramente superior que el geopolímero compuesto por pintura-aluminosilicato. Se comprueba que la densidad del geopolímero con ceniza volante es mayor que la del geopolímero con metacaolín, aunque la diferencia es ínfima.

En el caso de la ceniza volante, la diferencia entre el compuesto puro y la mezcla pintura-geopolímero, es de 1,85 %, mientras que para el metacaolín la diferencia es de 4,04 %.

Comparando ambas gráficas, se comprueba que, según la temperatura de curado, la densidad varía, siendo mayor la densidad para ambos aluminosilicatos cuando fraguan a temperatura ambiente (Palomo & Palacios, 2003)(Khale & Chaudhary, 2007).

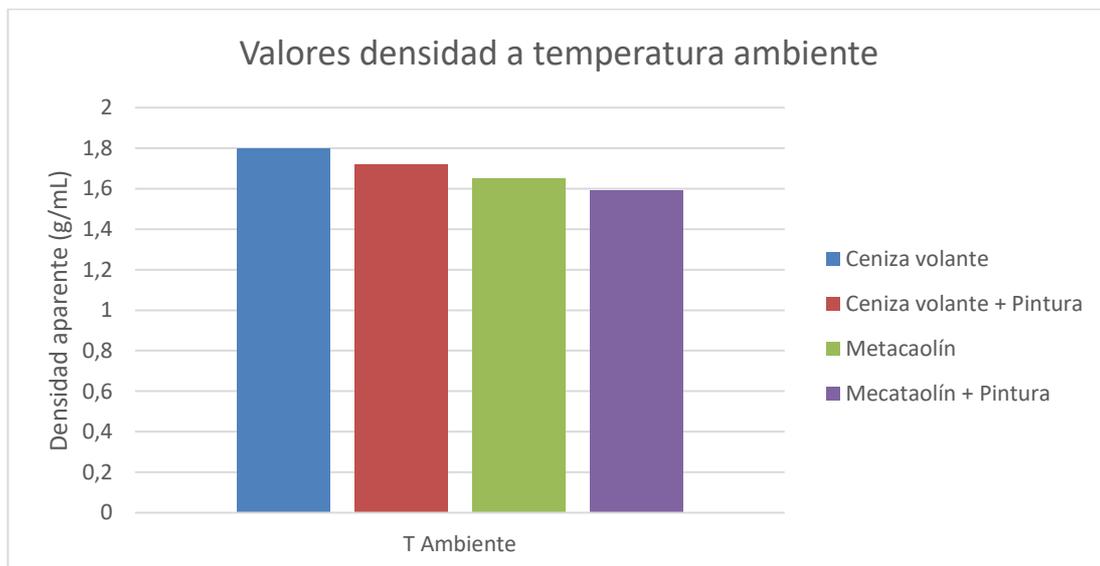


Figura 4-8. Densidades CV y MK a temperatura ambiente.

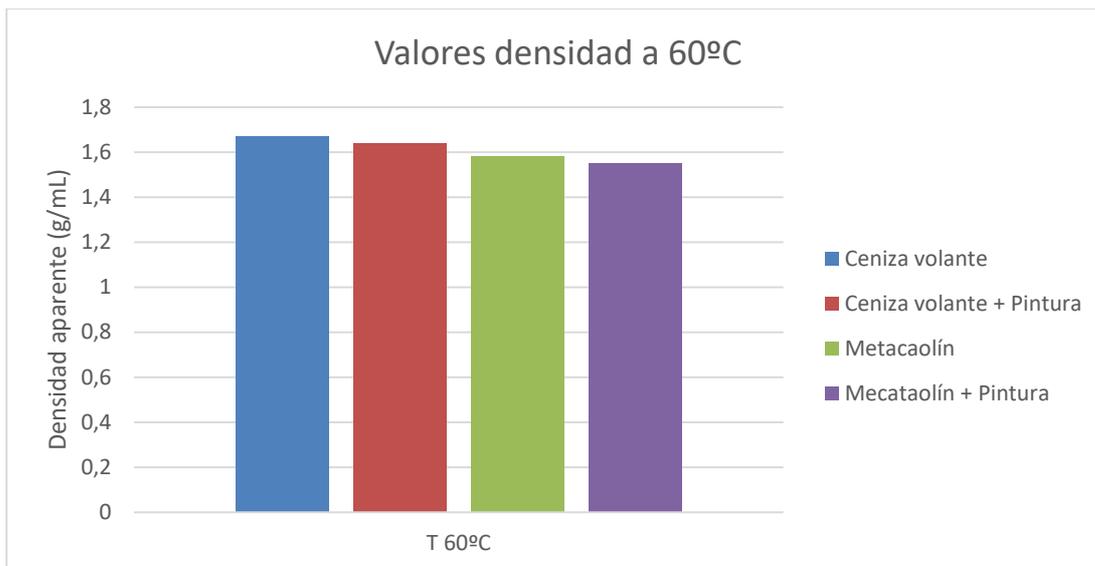


Figura 4-9. Densidades CV y MK a 60°C.

4.2.2 Porosidad

En el caso de la porosidad se cumple en todos los casos que a mayor densidad menor porcentaje de porosidad y que cuando las muestras fraguan a temperatura ambiente, poseen menor porosidad, aunque la diferencia entre las diferentes muestras es muy baja.

Tabla 4-1. Valores porosidad media en muestras geopoliméricas.

	Porosidad (%)	
	T 60°C	T Ambiente
Ceniza volante	1,33	1,31
Ceniza volante + Pintura	1,50	1,48
Metacaolín	2,10	2,07
Metacaolín + Pintura	2,22	2,20

Para poder analizar la correlación entre densidad y porosidad, se han elaborado las siguientes gráficas. Se pueden comprobar lo descrito anteriormente, que, a mayor densidad, menor porcentaje de porosidad tienen las muestras.

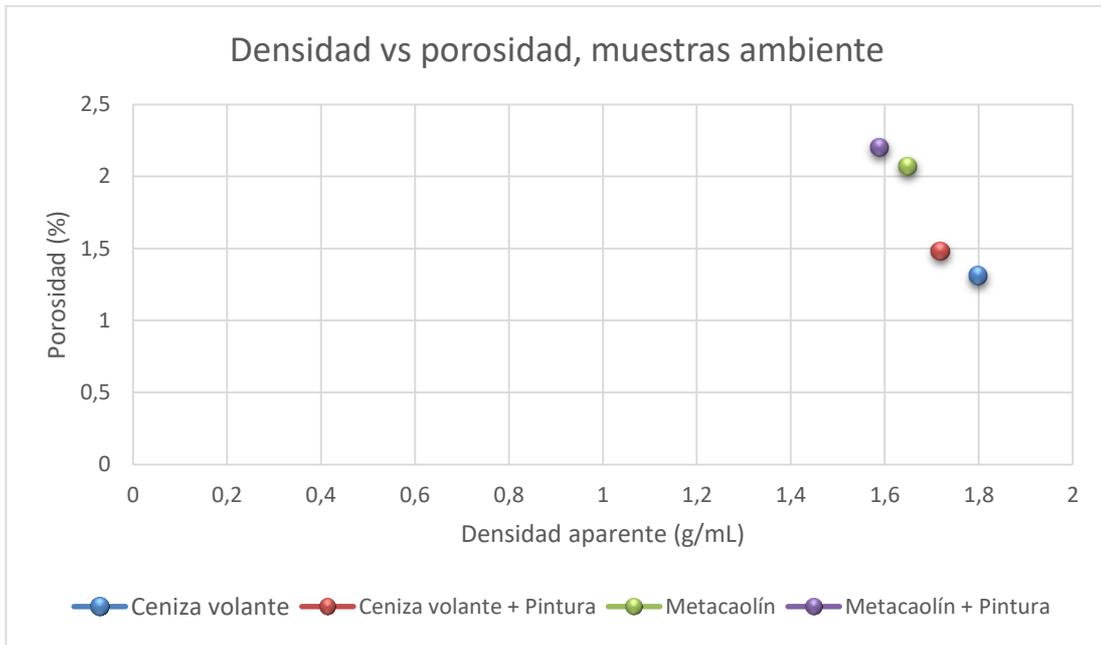


Figura 4-10. Densidad vs porosidad de muestras fraguadas a temperatura ambiente.

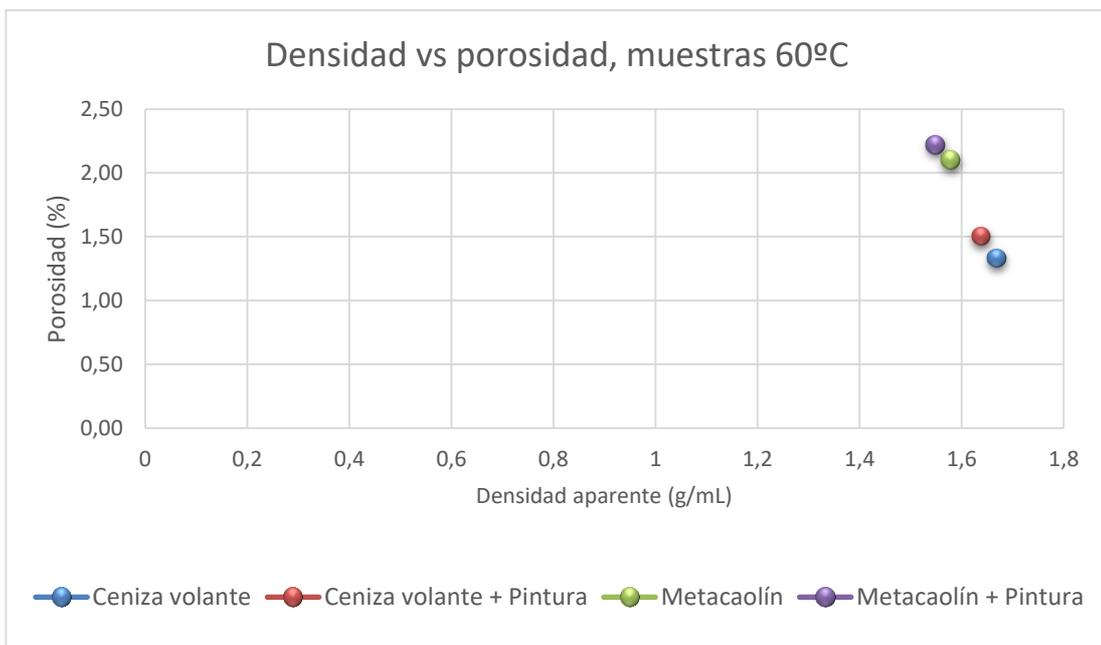


Figura 4-11. Densidad vs porosidad de muestras fraguadas a 60°C.

4.2.3 Dureza

En el caso de la dureza, se cumple en todos los casos, que a mayor densidad menor porcentaje de porosidad y por tanto mayor dureza, aunque la diferencia en los valores de dureza entre las diferentes muestras es mínima.

Tabla 4-2. Valores dureza media en muestras geopoliméricas (Shore C).

	Dureza	
	T 60°C	T Ambiente
Ceniza volante	82	79
Ceniza volante + Pintura	79	75
Metacaolín	73	85
Metacaolín + Pintura	71	83

4.2.4 Resistencia a compresión

Para la resistencia a compresión, se cumple que las muestras con el aluminosilicato sólo poseen valores mayores de esta propiedad, aunque no hay una diferencia muy significativa. En el caso de metacaolín hay una diferencia de un 15 % entre el metacaolín puro y la mezcla con pintura y en el caso de la ceniza volante hay una diferencia de 20,8 %.

Para la ceniza volante, cuando las muestras fraguan en estufa, a 60°C, poseen mayor resistencia a compresión, aunque con poca diferencia de valor de las muestras que fraguan a temperatura ambiente (20 %). Esto es debido a que la temperatura de curado acelera la reacción de geopolimerización. Sin embargo, en el caso del metacaolín sucede todo lo contrario. Las muestras secadas a temperatura ambiente poseen mayor resistencia a compresión que las fraguadas en estufa, y entre ambas hay una gran diferencia (78,6 %). Este hecho está demostrado en varios estudios (Bernal *et al.*, 2012)(Burciaga-Díaz *et al.*, 2015) y es debido a que el gel geopolimérico sufre una transformación después de exponer las muestras a altas temperaturas, esto ocurre como consecuencia de una reorganización microestructural por la deshidratación de los productos. A pesar de todo, los valores obtenidos de resistencia a compresión para el metacaolín a temperatura de 60°C no eran los esperados ya que no se considera una temperatura tan alta como para afectar en negativo al valor de la resistencia a compresión.

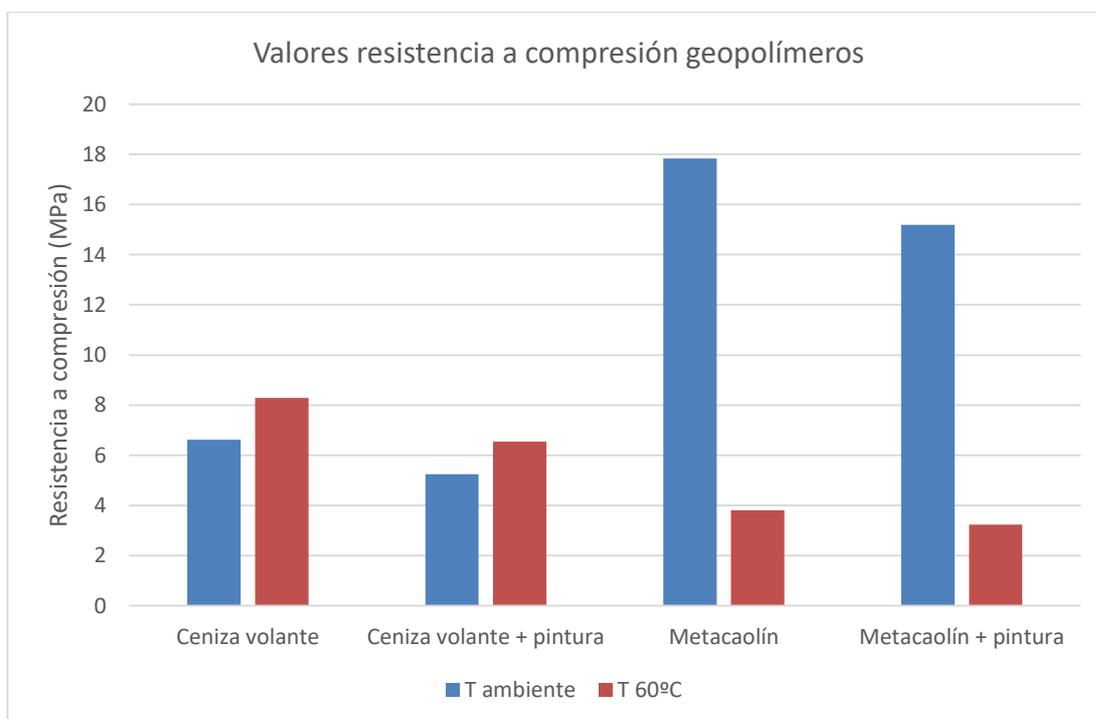


Figura 4-12. Representación valores resistencia a compresión en muestras geopoliméricas.

A continuación, se adjunta una tabla con los valores representados:

Tabla 4-3. Valores resistencia a compresión media en muestras geopoliméricas.

	Resistencia a compresión (MPa)		Diferencia fraguado(%)
	T ambiente	T 60°C	
Ceniza volante	6,62	8,29	20,14
Ceniza volante + pintura	5,25	6,55	19,85
Metacaolín	17,83	3,81	78,63
Metacaolín + pintura	15,19	3,23	78,74
Diferencia CV - CV+P (%)	20,69	20,99	
Diferencia MK - MK+P (%)	14,81	15,22	

4.2.5 Resistencia a flexión

Para hacer el ensayo a flexión, hay que fabricar paralelepípedos y éstos se hacen en los moldes de acero de la figura 3-6. En un primer momento, se hace con ambos aluminosilicatos, ceniza volante y metacaolín, pero tras el fraguado, cuando se procede a desmoldar, se aprecia la gran adhesión que tiene la ceniza volante ante dicha superficie (figura 4-11), por lo que es imposible de realizar dicho ensayo con la ceniza volante.



Figura 4-13. Adhesión de la ceniza volante a los moldes de paralelepípedos.

Como se puede comprobar, los valores de resistencia a flexión son bajos si se comparan con los de compresión, pero con valores normales en estos tipos de materiales. Se cumple que la muestra secada a temperatura ambiente es más resistente que la secada en estufa a 60°C.

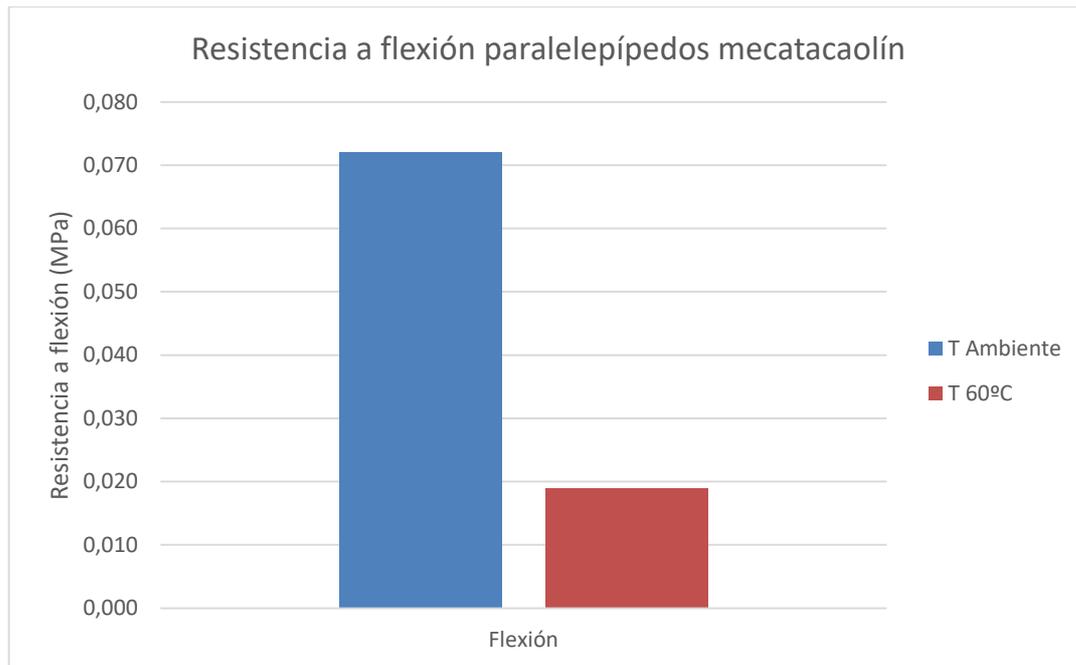


Figura 4-14. Resistencia a flexión paralelepípedos.

En el caso de la compresión, se observa una gran diferencia en los valores obtenidos en paralelepípedos y los obtenidos en probetas. En paralelepípedos es mucho menos debido a la superficie. La altura a la que se aplica la fuerza es de 40 mm en el caso de paralelepípedos y una media de 38 mm en el caso de probetas, pero al ser la superficie del paralelepípedo mayor, se obtiene un valor de resistencia menor.

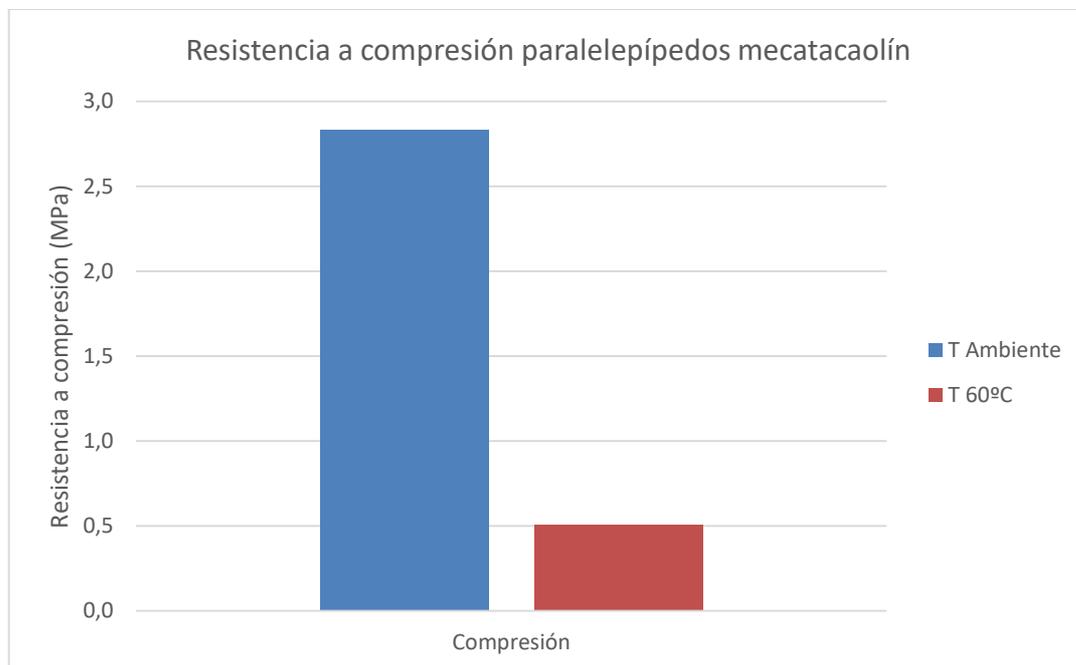


Figura 4-15. Resistencia a compresión paralelepípedos.

5 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten indicar que ha sido posible la creación de matrices geopoliméricas cuya composición es un 10% pintura y un 90% en peso aluminosilicato con propiedades aptas para el empleo de dichos materiales en diversos sectores, como el de la construcción

Más específicamente, se puede concluir que:

- Los geopolímeros que se hicieron con agua y pequeñas cantidades de solución activadora, han tenido malos resultados.
- A pesar de que el geopolímero cuya composición es 100% aluminosilicato obtiene mejores resultados, el geopolímero cuya composición es 10% pintura y 90% aluminosilicato tiene propiedades muy similares, por lo que los materiales con dicha composición son aptos.
- En el caso de la ceniza volante, cuando dicho material es secado en estufa, a 60°C, éste posee mejores propiedades que cuando es secado a temperatura ambiente.
- Por el contrario, los geopolímeros de metacaolín tienen mejores propiedades cuando el secado es a temperatura ambiente que cuando se secan en estufa (60°C).
- La introducción de la pintura en las matrices geopoliméricas con CV produce una reducción mayor de sus propiedades mecánicas que en el caso de las matrices geopoliméricas con MK. Este hecho nos lleva a concluir que parece existir una mayor compatibilidad entre la pintura y las matrices con MK, tanto en muestras fraguadas a temperatura ambiente como en las fraguadas a 60 °C.
- Aunque dichos materiales podrían ser usados para cualquier aplicación de las mencionadas en este proyecto, se ha enfocado a comprobar las propiedades mecánicas, mas específicamente la resistencia a compresión, para poder conseguir el objetivo de dicho proyecto, sintetizar nuevos materiales de construcción.

Cabe señalar que, aunque en este proyecto solo se han realizado geopolímeros con un 10% de pintura, habría que ampliar dicho estudio y aumentar la concentración de pintura. Habría que comprobar hasta que punto de adición de pintura los resultados son válidos, y ésto dependerá de la aplicación posterior que tenga el geopolímero.

También hay que indicar que, aunque la intención inicial era emplear residuos de pintura en las matrices geopoliméricas, no se pudo conseguir y por ello se empleó pintura en polvo. Los resultados se extrapolarían debido a que la pintura es un inerte en la matriz, por lo que se puede presuponer que el geopolímero actuaría igual con residuos de pintura que con la propia pintura.

Por lo tanto, tras la experimentación llevada a cabo, cabe señalar algunos aspectos a mejorar:

- Sustituir la pintura en polvo por residuos de pintura y comprobar que el geopolímero tiene las mismas propiedades.
- Aumentar la cantidad de pintura hasta el punto que cumpla con las especificaciones del material.
- Por último, adicionar pequeñas cantidades de agua, sin que llegue a perjudicar las características del material, para así no emplear tanta solución activadora.

REFERENCIAS

A critical review of geopolymers properties for structural fire-resistance applications | Elsevier Enhanced Reader. (s. f.). Recuperado 25 de agosto de 2020, de <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0950061819315041?token=B680EF0F63774FC7A10F68D7BD95C866313928079D59AAE447F318D3DDC529D27908AB89C1D02BB3E3C9378C85255CF4>

Acuerdo de París | Acción por el Clima. (s. f.). Recuperado 27 de agosto de 2020, de https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es

Agüera Soriano, J. (2002). *Mecánica de fluidos incomprensibles y turbomáquinas hidráulicas.* http://cataleg.upc.edu/record=b1237299~S1*cat

Almesfer, N., Haigh, C., & Ingham, J. (2012). Cement & Concrete Composites Waste paint as an admixture in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 34(5), 627-633. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.001>

Andini, S., Cioffi, R., Colangelo, F., Ferone, C., Montagnaro, F., & Santoro, L. (2011). Characterization of Geopolymer Materials Containing MSWI Fly Ash and Coal Fly Ash. *Advances in Science and Technology*, 69, 123-128. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AST.69.123>

Antenucci, D., Philippart, C., Lorenzi, G., Davidovits, J., Fernández-Pereira, C., Galiano, Y. L., Querol, X., Moreno, N., Izquierdo, M., Alvarez, E., Fonte, O., Plana, F., Nugteren, H., Butselaar, V., & Schouten, L. (2009). Understanding and mastering coal fired ashes geopolymerisation process in order to turn potential into profit (GEOASH). En *Research Fund for Coal and Steel Understanding.*

Applications – Geopolymer Institute. (s. f.). Recuperado 26 de agosto de 2020, de <https://www.geopolymer.org/applications/>

Bartolomé, J. F. (1997). El Caolín: composición, estructura, génesis y aplicaciones. *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*, 36(1), 7-20.

Basegio, T., & Bergmann, C. P. (2006). *Electrostatic painting residues as an alternative raw material for red clay industry.* *Basegio 2004*, 537-544. <https://doi.org/10.1177/0734242X06067322>

Bernal, S. A., Mejía de Gutiérrez, R., Ruiz, F., Quiñones, H., & Provis, J. L. (2012). Desempeño a temperaturas altas de morteros y hormigones basados en mezclas de escoria/metacaolín activadas alcalinamente. *Materiales de Construcción*, 62(308), 471–488. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.01712>

Burciaga-Díaz, O., Escalante-García, J. I., & Magallanes-Rivera, R. X. (2015). Resistencia a la compresión y evolución microestructural de geopolímeros base metacaolín expuestos a alta temperatura. *Revista ALCONPAT*, 5(1), 58–72. <https://doi.org/10.21041/ra.v5i1.77>

Cagiao, J., Breixo, V., Mejjide, G., Doménech, J. L., Salvador, Q., Mainar, G., Gutiérrez, H., Fernando, L., Abella, M., Belén, M., & Fonteboa, G. (2010). *P Á á g i in na a I* || 206 || *Autores.*

Calvo Carbonell, J. (2014). *Pinturas y barnices: tecnología básica.* Ediciones Diaz de Santos. <https://elibro.net/es/lc/bibliotecaus/titulos/62972>

Calvo Carbonell, J. (2016). *Pinturas y recubrimientos: introducción a su tecnología.* Ediciones Diaz de Santos. <https://elibro.net/es/lc/bibliotecaus/titulos/53176>

CARBONELL, J. C., & PINTURAS. (2009). *PINTURAS Y RECUBRIMIENTOS Introducción a su tecnología.* <http://ediciones.diazdesantos.es>

Catalfamo, P., Di Pasquale, S., Corigliano, F., & Mavilia, L. (1997). Influence of the calcium content on the coal fly ash features in some innovative applications. *Resources, Conservation and Recycling*, 20(2), 119-125. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(97\)00013-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-3449(97)00013-X)

Chatham House - International Affairs Think Tank. (s. f.). Recuperado 27 de agosto de 2020, de <https://www.chathamhouse.org/>

Cheng, T.-W., & Chiu, J. P. (2003). Fire-resistant geopolymer produce by granulated blast furnace slag. *Minerals Engineering*, 16, 205-210. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00008-6)

Compuestos orgánicos volátiles. (s. f.). Recuperado 21 de agosto de 2020, de https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/act-emis/compuestos_organicos_volatiles.aspx

Conner, J. R., & Hoeffner, S. L. (1998). A Critical Review of Stabilization/Solidification Technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 28(4), 397-462. <https://doi.org/10.1080/10643389891254250>

Criado, M., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2010). Alkali activation of fly ash. Part III: Effect of curing conditions on reaction and its graphical description. *Fuel*, 89(11), 3185-3192. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.03.051>

Cuentas medioambientales: Cuenta de los residuos. (2017).

Davidovits, J. (1991). Geopolymers - Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1633-1656. <https://doi.org/10.1007/BF01912193>

Davidovits, J. (1991). Geopolymers. *Journal of thermal analysis*, 37(8), 1633-1656. <https://doi.org/10.1007/BF01912193>

Davidovits, Joseph. (1982). *Mineral polymers and methods od making them*. 1-6.

Davidovits, Joseph. (1994). Properties of Geopolymer Cements. *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, 131-149.

Davidovits, Joseph. (1999). Chemistry of geopolymeric systems, terminology. *Geopolymer*, 99(292), 9-39.

Dina, A., Citra, P., Purwanto, P., & Soenoko, H. R. (2020). *Life Cycle Assessment and Quality of Utilization of Paint Waste as a Raw Material of Paving Block*. 21(2), 89-94.

DOCUMENTO Nº6: GESTIÓN DE RESIDUOS. (s. f.).

Duxson, P., Lukey, G. C., Separovic, F., & Van Deventer, J. S. J. (2005). Effect of alkali cations on aluminum incorporation in geopolymeric gels. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44(4), 832-839. <https://doi.org/10.1021/ie0494216>

Duxson, Peter, Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of materials science*, 42(9), 2917-2933.

Duxson, Peter, Provis, J. L., Lukey, G. C., Mallicoat, S. W., Kriven, W. M., & Van Deventer, J. S. J. (2005). Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 269(1-3), 47-58. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.06.060>

En el punto de mira: la eficiencia energética de los edificios | Comisión Europea. (s. f.). Recuperado 21 de agosto de 2020, de https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-feb-17_es

Estudios, D. De, & Centro, D. L. (2017). *Universidad Autónoma de Nuevo León*. 25241.

European Commission. (s. f.). Recuperado 27 de agosto de 2020, de <https://cordis.europa.eu/article/id/239529-safe-and-sustainable-geopolymer-concrete/es>

Farhan, K. Z., Johari, M. A. M., & Demirboğa, R. (2020). Assessment of important parameters involved in the synthesis of geopolymer composites: A review. En *Construction and Building Materials* (Vol. 264). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120276>

Fases del clínker. (s. f.). Recuperado 27 de agosto de 2020, de <https://sites.google.com/site/grupocmateriales/home/introduccion/que-es-el-clinker-fases-del-clinker>

Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., & Criado, M. (2005). Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: A descriptive model. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1204-1209. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.021>

Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., Sobrados, I., & Sanz, J. (2006). The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. *Microporous and Mesoporous Materials*, 91(1-3), 111-119. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.11.015>

Fernández-Jiménez, Ana, & Palomo, A. (2003). Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. *Fuel*, 82, 2259-2265. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00194-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00194-7)

Fletcher, R. A., MacKenzie, K. J. D., Nicholson, C. L., & Shimada, S. (2005). The composition range of aluminosilicate geopolymers. *Journal of the European Ceramic Society*, 25(9), 1471-1477. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2004.06.001>

Fundacion entorno (empresas y medio ambiente). (1998). *Informe medio ambiental del sector p i n t u r a s y b a r n i c e s*. file:///C:/Users/Usuario/Downloads/A0100085.pdf

Galiano, Y. L. (2013). *ESTUDIO DE LA ESTABILIZACIÓN / SOLIDIFICACIÓN*.

Gobierno de España. (2002). Lista Europea de Residuos (LER). *Boletín Oficial del Estado*, 99, 33. <http://www.cma.gva.es/areas/residuos/res/CER2002a.PDF>

Han, C. D., Slattery, J. C., Geschke, D., Schramm, G., Shenoy, a. V., Saini, D. R., & Publishers, K. A. (2007). A Practical Approach to Rheology and Rheometry. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 199(Part_1), xxii, 709 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Hardjito, D., Wallah, S., Sumajouw, D. M. J., & Rangan, B. (2005). Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Australian Journal of Structural Engineering*, 6, 77-86. <https://doi.org/10.1080/13287982.2005.11464946>

ÍNDICE GENERAL. (s. f.).

Izquierdo, M., Querol, X., Davidovits, J., Antenucci, D., Nugteren, H., & Fernández-Pereira, C. (2009). Coal fly ash-slag-based geopolymers: Microstructure and metal leaching. *Journal of Hazardous Materials*, 166(1), 561-566. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.063>

Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J., & Lukey, G. C. (2003). The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers. *Materials Letters*, 57, 1272-1280. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)00971-0](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00971-0)

Jobling, A. (2007). An introduction to rheology H. A. Barnes, J. F. Hutton and K. Walters, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1989. pp. v + 199, Price \$6050/Dfl 115.00. ISBN 0-444-87469-0. *Polymer International*, 25(1), 61-61. <https://doi.org/10.1002/pi.4990250112>

Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of materials science*, 42(3), 729-746.

Khalil, M. Y., & Merz, E. (1994). Immobilization of intermediate-level wastes in geopolymers. *Journal of Nuclear Materials*, 211(2), 141-148. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-3115\(94\)90364-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-3115(94)90364-6)

- Kovalchuk, G., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2008). Alkali-activated fly ash. Relationship between mechanical strength gains and initial ash chemistry. *Materiales de Construcción*, 58(291 SE-Research Articles), 35-52. <https://doi.org/10.3989/mc.2008.v58.i291.101>
- Lancellotti, I., Kamseu, E., Michelazzi, M., Barbieri, L., Corradi, A., & Leonelli, C. (2010). Chemical stability of geopolymers containing municipal solid waste incinerator fly ash. *Waste Management*, 30(4), 673-679. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.032>
- Lin, C.-F., & Hsi, H.-C. (1995). Resource Recovery of Waste Fly Ash: Synthesis Of Zeolite-like Materials. *Environmental Science & Technology*, 29(4), 1109-1117. <https://doi.org/10.1021/es00004a033>
- Mezclador industrial, mezclador del polvo, mezclador de la cinta, dispersor de alta velocidad, molino de pulido, hoja Sigma mezclador, compuestos Smc Bmc máquina fabricantes y proveedores - fábrica de China - MAX mezclador.* (s. f.). Recuperado 15 de abril de 2021, de <http://www.mixermanufacture.com/>
- Murat, M., & Comel, C. (1983). Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals III. Influence of calcination process of kaolinite on mechanical strengths of hardened metakaolinite. *Cement and Concrete Research*, 13(5), 631-637. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-8846\(83\)90052-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-8846(83)90052-2)
- Nehdi, M. L. (2010). *Paintcrete leachability in fresh water and marine environments*. 2(May). <https://doi.org/10.1680/warm.2010.163.2.59>
- Oh, J. E., Monteiro, P. J. M., Jun, S. S., Choi, S., & Clark, S. M. (2010). The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers. *Cement and Concrete Research*, 40(2), 189-196. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.010>
- Origen | CEDEX.* (s. f.). Recuperado 23 de enero de 2021, de <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/24/diciembre-2011/19/-origen.html>
- Palomo, A., & Palacios, M. (2003). Alkali-activated cementitious materials: Alternative matrices for the immobilisation of hazardous wastes: Part II. Stabilisation of chromium and lead. *Cement and Concrete Research*, 33, 289-295. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00964-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00964-X)
- Perera, D. S., Vance, E. R., Aly, Z., Davis, J., & Nicholson, C. L. (2006). Immobilization of Cs and Sr in geopolymers with Si/Al molar ratio of ~ 2. *Ceramic Transactions*, 176, 91.
- Pourbaix, M., Zhang, H., & Pourbaix, A. (1997). Presentation of an Atlas of chemical and electrochemical equilibria in the presence of a gaseous phase. *Materials Science Forum*, 251-254, 143-148. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.251-254.143>
- Pr, D. E. B. (s. f.). *GESTIÓN Y TRATAMIENTO DEMOLICIÓN*.
- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications*. Elsevier.
- RD 105/2008. (2008). Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. *Boletín Oficial del Estado*, 38, de 13 febrero, 7724-7730. <https://www.boe.es/boe/dias/2008/02/13/pdfs/A07724-07730.pdf>
- Residuos de construcción y demolición | CEDEX.* (s. f.). Recuperado 21 de agosto de 2020, de <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/35/residuos-de-construccion-y-demolicion/>
- Shirley, R., & Black, L. (2011). Alkali activated solidification/stabilisation of air pollution control residues and co-fired pulverised fuel ash. *Journal of Hazardous Materials*, 194, 232-242. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.07.100>
- Todo sobre la pintura en polvo.* (s. f.). Recuperado 5 de mayo de 2021, de <https://pinturaenpolvo.org/>

Torres-Carrasco, M., & Puertas, F. (2017). La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros . En *Revista ingeniería de construcción* (Vol. 32, pp. 5-12). scielocl .

UNE-EN 450-1:2013 Cenizas volantes para hormigón. Parte 1: Def... (s. f.). Recuperado 23 de enero de 2021, de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0051480>

Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., & Lorenzeni, L. (1997). The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: part I. Theory and applications. *Minerals Engineering*, 10(7), 659-669.

Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., & Lukey, G. C. (2002). The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers. *Chemical Engineering Journal*, 89(1-3), 63-73. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00025-6](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00025-6)

Weil, M., Dombrowski, K., & Buchwald, A. (2009). 10 - Life-cycle analysis of geopolymers. En J. L. Provis & J. S. J. B. T.-G. van Deventer (Eds.), *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering* (pp. 194-210). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9781845696382.2.194>

Xu, H., & van Deventer, J. S. J. (2003). Effect of Source Materials on Geopolymerization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(8), 1698-1706. <https://doi.org/10.1021/ie0206958>

Zúñiga, A. (2018). *Ciencia e ingeniería de nuevos materiales en la fabricación mejorados tecnológicamente*. 1-260.

ANEXO A: DATOS DEL ESTUDIO PREVIO

Tabla A-1. *Ensayo a compresión, ceniza volante con distintas soluciones activadoras.*

CENIZA VOLANTE								
Solución activadora	Ceniza volante (g)	Solución activadora (mL)	Peso probeta (g)	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Superficie (mm ²)	Fuerza (kN)	Fuerza (MPa)
A ambiente	75	35	48,55	38,20	33,80	897,27	3,26	3,63
A 60°C			47,35	36,50	33,50	881,41	3,80	4,31
B ambiente	75	33	46,95	32,80	33,30	870,92	4,55	5,22
B 60°C			48,17	35,50	33,90	902,59	5,30	5,87
C ambiente	75	32	47,45	33,00	33,50	881,41	5,80	6,58
C 60°C			45,98	33,50	33,50	881,41	6,80	7,71

Tabla A-2. Ensayo a compresión, ceniza volante con agua con distintas soluciones activadoras.

CENIZA VOLANTE con AGUA									
Solución activadora	Ceniza volante (g)	Solución activadora (mL)	Agua (mL)	Peso probeta (g)	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Superficie (mm ²)	Fuerza (kN)	Fuerza (MPa)
A ambiente	75	20	13	39,20	35,5	33,5	881,41	0,88	1,00
A 60°C				43,15	37	33,1	860,49	0,65	0,76
B ambiente	75	23	11	43,26	37,5	33,6	886,68	0,98	1,11
B 60°C				41,23	36,8	33,4	876,16	0,68	0,78
C ambiente	75	27	10	41,18	36,7	33,5	881,41	1,10	1,25
C 60°C				41,60	36,8	33,4	876,16	0,80	0,91

Tabla A-3. Ensayo a compresión, mezcla ceniza volante-pintura con distintas soluciones activadoras.

CENIZA VOLANTE + PINTURA									
Solución activadora	Ceniza volante (g)	Pintura (g)	Solución activadora (mL)	Peso probeta (g)	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Superficie (mm ²)	Fuerza (KN)	Fuerza (MPa)
A ambiente	67,5	7,5	33	46,15	34,6	33,5	881,41	2,88	3,27
A 60°C				46,22	34,7	33,6	886,68	3,15	3,55
B ambiente	67,5	7,5	32	48,56	37,5	33,4	876,16	3,80	4,34
B 60°C				48,45	37,3	33,6	886,68	4,15	4,68
C ambiente	67,5	7,5	30	48,10	36,5	33,5	881,41	4,60	5,22
C 60°C				48,17	36,8	33,4	876,16	5,50	6,28

Tabla A-4. *Ensayo a compresión, metacaolín con distintas soluciones activadoras.*

METACAOLÍN									
Solución activadora	Metacaolín	(g)	Solución activadora (mL)	Peso probeta (g)	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Superficie (mm ²)	Fuerza (kN)	Fuerza (MPa)
A ambiente	75		78	42,11	38,50	33,40	876,16	10,80	12,33
A 60°C				43,20	40,00	33,20	865,70	2,10	2,43
B ambiente	75		65	41,93	38,60	33,00	855,30	12,50	14,61
B 60°C				41,45	38,40	33,20	865,70	2,50	2,89
C ambiente	75		52	41,66	37,80	33,10	860,49	15,20	17,66
C 60°C				39,33	37,90	33,50	881,41	3,09	3,51

Tabla A-5. *Ensayo a compresión, metacaolín con agua con distintas soluciones activadoras.*

METACAOLÍN con AGUA									
Solución activadora	Metacaolín (g)	Solución activadora (mL)	Agua (mL)	Peso probeta (g)	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Superficie (mm ²)	Fuerza (kN)	Fuerza (MPa)
A ambiente	75	20	35	32,20	37,60	33,40	876,16	1,40	1,60
A 60°C				35,83	38,00	33,20	865,70	1,15	1,33
B ambiente	75	23	30	36,27	37,90	33,00	855,30	1,54	1,80
B 60°C				35,93	38,50	33,60	886,68	1,12	1,26
C ambiente	75	27	26,5	32,40	34,60	33,50	881,41	1,71	1,94
C 60°C				34,91	36,10	33,80	897,27	1,25	1,39

Tabla A-6. *Ensayo a compresión, mezcla metacaolín-pintura con distintas soluciones activadoras.*

METACAOLÍN + PINTURA									
Solución activadora	Metacaolín (g)	Pintura (g)	Solución activadora (mL)	Peso probeta (g)	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Superficie (mm ²)	Fuerza (kN)	Fuerza (MPa)
A ambiente	67,5	7,5	75	43,93	35,50	33,80	897,27	9,50	10,59
A 60°C				39,37	37,80	33,50	881,41	2,25	2,55
B ambiente	67,5	7,5	60	42,45	39,60	33,30	870,92	11,56	13,27
B 60°C				40,89	39,40	33,90	902,59	2,30	2,55
C ambiente	67,5	7,5	48	43,58	37,80	33,50	881,41	12,55	14,24
C 60°C				42,64	38,60	33,50	881,41	2,80	3,18

ANEXO B: DATOS DE MUESTRAS A MAYOR ESCALA

Tabla B-1. *Cantidades de solución activadora empleadas en estudio previo, teóricas y a mayor escala.*

	Estudio previo		Mayor escala teórico		Mayor escala real	
	Cantidad aluminosilicato	Cantidad solución C	Cantidad aluminosilicato	Cantidad solución C	Cantidad aluminosilicato	Cantidad solución C
Ceniza volante	75	32	1000	427	1000	385
Ceniza volante + Pintura	67,5 + 7,5	30	900 + 100	400	900 + 100	350
Metacaolín	75	52	1000	693	1000	655
Metacaolín + Pintura	67,5 + 7,5	48	900 + 100	640	900 + 100	553

Tabla B-2. *Ensayos muestras ceniza volante pura fraguadas a temperatura ambiente.*

CENIZA VOLANTE										
Secado	Muestra	Peso (g)	Diametro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Superficie (mm ²)	Densidad (g/mL)	Dureza	Fuerza (kN)	Fuerza (MPa)
Ambiente	1	59,95	34,00	36,60	33,23	907,92	1,80	75	6,30	6,94
	2	59,52	33,80	35,50	31,85	897,27	1,87	80	6,15	6,85
	3	57,91	33,50	36,80	32,44	881,41	1,79	82	5,80	6,58
	4	47,12	33,60	31,00	27,49	886,68	1,71	83	5,96	6,72
	5	57,15	33,60	36,80	32,63	886,68	1,75	81	5,15	5,81
	6	58,25	33,80	36,50	32,75	897,27	1,78	82	-	-
	7	58,65	33,80	35,40	31,76	897,27	1,85	79	5,80	6,46
	8	58,37	33,90	36,20	32,67	902,59	1,79	80	6,15	6,81
	9	58,91	33,70	36,40	32,47	891,97	1,81	78	6,08	6,82
	10	59,15	34,00	35,90	32,59	907,92	1,81	74	-	-

Tabla B-3. *Ensayos muestras ceniza volante pura fraguadas en estufa (60°C).*

CENIZA VOLANTE										
Secado	Muestra	Peso (g)	Diametro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Superficie (mm ²)	Densidad (g/mL)	Dureza	Fuerza (kN)	Fuerza (MPa)
Estufa (60°C)	1	53,36	33,50	36,30	32,00	881,41	1,67	83	8,15	9,25
	2	55,74	33,60	36,50	32,36	886,68	1,72	79	6,80	7,67
	3	53,68	33,90	36,00	32,49	902,59	1,65	85	-	-
	4	50,09	33,80	34,00	30,51	897,27	1,64	82	7,90	8,80
	5	55,15	34,00	38,00	34,50	907,92	1,60	83	7,50	8,26
	6	56,15	34,00	38,60	35,05	907,92	1,60	80	-	-
	7	58,50	33,80	37,50	33,65	897,27	1,74	78	6,50	7,24
	8	58,34	33,50	38,40	33,85	881,41	1,72	86	6,91	7,84
	9	59,12	33,70	39,10	34,88	891,97	1,70	80	7,60	8,52
	10	57,45	33,80	39,20	35,17	897,27	1,63	81	7,82	8,72

Tabla B-4. *Ensayos muestras ceniza volante + pintura fraguadas a temperatura ambiente.*

CENIZA VOLANTE + PINTURA										
Secado	Muestra	Peso (g)	Diametro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Superficie (mm ²)	Densidad (g/mL)	Dureza	Fuerza (kN)	Fuerza (MPa)
Ambiente	1	58,31	34,00	37,80	34,32	907,92	1,70	71	5,80	6,39
	2	58,11	33,80	37,50	33,65	897,27	1,73	70	4,81	5,36
	3	58,26	33,90	38,00	34,30	902,59	1,70	75	4,95	5,48
	4	59,63	34,00	38,50	34,95	907,92	1,71	79	4,15	4,57
	5	58,20	33,50	38,00	33,49	881,41	1,74	81	4,13	4,69
	6	58,28	34,00	38,00	34,50	907,92	1,69	74	4,58	5,04
	7	60,30	34,00	39,00	35,41	907,92	1,70	76	3,76	4,14
	8	54,70	33,90	36,50	32,94	902,59	1,66	77	-	-
	9	57,98	33,50	37,00	32,61	881,41	1,78	72	5,60	6,35
	10	57,34	33,60	36,80	32,63	886,68	1,76	78	-	-

Tabla B-5. *Ensayos muestras ceniza volante + pintura fraguadas en estufa (60°C).*

CENIZA VOLANTE + PINTURA										
Secado	Muestra	Peso (g)	Diametro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Superficie (mm ²)	Densidad (g/mL)	Dureza	Fuerza (kN)	Fuerza (MPa)
Estufa (60°C)	1	59,41	33,50	39,50	34,82	881,41	1,71	73	-	-
	2	59,24	34,00	39,80	36,14	907,92	1,64	82	5,50	6,06
	3	59,86	33,90	39,80	35,92	902,59	1,67	75	6,88	7,62
	4	59,66	33,70	40,00	35,68	891,97	1,67	83	6,15	6,89
	5	58,63	34,00	40,50	36,77	907,92	1,59	82	5,36	5,90
	6	58,98	34,00	39,30	35,68	907,92	1,65	81	5,10	5,62
	7	59,00	33,80	40,60	36,43	897,27	1,62	80	5,39	6,01
	8	58,00	34,00	40,00	36,32	907,92	1,60	76	4,91	5,41
	9	56,88	33,60	39,40	34,94	886,68	1,63	75	-	-
	10	55,41	33,80	39,00	34,99	897,27	1,58	78	7,98	8,89

Tabla B-6. *Ensayos muestras metacaolín puro fraguadas a temperatura ambiente.*

METACAOLÍN										
Secado	Muestra	Peso (g)	Diametro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Superficie (mm ²)	Densidad (g/mL)	Dureza	Fuerza (kN)	Fuerza (MPa)
Ambiente	1	60,73	33,30	41,50	36,14	870,92	1,68	91	15,09	17,33
	2	55,45	33,80	37,50	33,65	897,27	1,65	76	-	-
	3	55,30	33,70	38,00	33,89	891,97	1,63	85	14,69	16,47
	4	58,43	33,90	39,00	35,20	902,59	1,66	82	17,85	19,78
	5	56,20	34,00	37,80	34,32	907,92	1,64	79	-	-
	6	57,15	34,00	38,10	34,59	907,92	1,65	78	16,15	17,79
	7	56,25	33,60	38,50	34,14	886,68	1,65	87	15,80	17,82
	8	55,15	33,70	38,20	34,07	891,97	1,62	88	16,34	18,32
	9	57,60	33,50	39,20	34,55	881,41	1,67	90	15,34	17,40
	10	58,20	34,00	39,70	36,04	907,92	1,61	77	16,12	17,75

Tabla B-7. *Ensayos muestras metacaolín puro fraguadas en estufa (60°C).*

METACAOLÍN										
Secado	Muestra	Peso (g)	Diametro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Superficie (mm ²)	Densidad (g/mL)	Dureza	Fuerza (kN)	Fuerza (MPa)
Estufa (60°C)	1	55,65	33,90	39,30	35,47	902,59	1,57	63	3,02	3,35
	2	54,50	34,00	39,00	35,41	907,92	1,54	65	3,47	3,82
	3	57,65	34,00	40,00	36,32	907,92	1,59	74	3,02	3,33
	4	53,15	33,80	38,50	34,54	897,27	1,54	71	3,15	3,51
	5	54,50	33,60	37,10	32,90	886,68	1,66	79	-	-
	6	55,82	33,80	37,50	33,65	897,27	1,66	76	-	-
	7	53,12	33,90	37,90	34,21	902,59	1,55	68	3,59	3,98
	8	53,47	33,70	38,50	34,34	891,97	1,56	67	4,15	4,65
	9	54,64	34,00	37,90	34,41	907,92	1,59	72	3,88	4,27
	10	54,83	34,00	39,20	35,59	907,92	1,54	77	3,25	3,58

Tabla B-8. *Ensayos muestras metacaolín + pintura fraguadas a temperatura ambiente.*

METACAOLÍN + PINTURA										
Secado	Muestra	Peso (g)	Diametro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Superficie (mm ²)	Densidad (g/mL)	Dureza	Fuerza (kN)	Fuerza (MPa)
Ambiente	1	55,34	33,80	38,50	34,54	897,27	1,60	86	15,30	17,05
	2	56,93	33,50	40,00	35,26	881,41	1,61	85	12,88	14,61
	3	57,42	33,40	39,40	34,52	876,16	1,66	81	13,91	15,88
	4	53,66	34,00	38,30	34,77	907,92	1,54	87	-	-
	5	55,00	34,00	38,10	34,59	907,92	1,59	80	11,87	13,07
	6	58,24	33,90	40,50	36,55	902,59	1,59	79	10,55	11,69
	7	57,60	33,80	40,10	35,98	897,27	1,60	81	17,92	19,97
	8	55,85	33,80	40,00	35,89	897,27	1,56	78	9,87	11,00
	9	57,29	33,70	40,10	35,77	891,97	1,60	77	-	-
	10	56,73	34,00	40,10	36,41	907,92	1,56	80	16,57	18,25

Tabla B-9. *Ensayos muestras metacaolín + pintura fraguadas en estufa (60°C).*

METACAOLÍN + PINTURA										
Secado	Muestra	Peso (g)	Diametro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Superficie (mm ²)	Densidad (g/mL)	Dureza	Fuerza (kN)	Fuerza (MPa)
Estufa (60°C)	1	57,34	34,00	40,10	36,41	907,92	1,57	68	-	-
	2	58,22	33,50	41,00	36,14	881,41	1,61	65	2,35	2,67
	3	58,82	33,40	41,00	35,92	876,16	1,64	69	2,60	2,97
	4	57,33	34,00	40,60	36,86	907,92	1,56	72	2,91	3,21
	5	55,60	34,00	40,80	37,04	907,92	1,50	75	3,15	3,47
	6	55,42	33,90	40,50	36,55	902,59	1,52	76	-	-
	7	54,21	33,80	40,40	36,25	897,27	1,50	71	3,55	3,96
	8	56,15	34,00	40,70	36,95	907,92	1,52	70	3,24	3,57
	9	55,21	33,70	40,40	36,04	891,97	1,53	68	2,98	3,34
	10	56,85	34,00	40,80	37,04	907,92	1,53	83	2,45	2,70

Tabla B-10. *Ensayos paralelepípedos metacaolín + pintura.*

PARALELEPÍPEDO - METACAOLÍN + PINTURA												
Secado	Muestra	Peso (g)	Altura (mm)	Anchura (mm)	Longitud (mm)	Volumen (cm ³)	Superficie (mm ²)	Densidad (g/mL)	FLEXIÓN		COMPRESIÓN	
									Fuerza (kN)	Fuerza (MPa)	Fuerza (kN)	Fuerza (MPa)
Ambiente	1	425,15	40,00	40,00	160,50	256,80	28880	1,66	1,94	0,067	42,00	2,91
	2	426,26	40,00	40,00	160,50	256,80	28880	1,66	2,19	0,076	39,60	2,74
Estufa 60°C	3	419,92	40,00	40,00	160,50	256,80	28880	1,64	0,62	0,021	7,93	0,55
	4	420,61	40,00	40,00	160,50	256,80	28880	1,64	0,49	0,017	6,76	0,47