

Trabajo de Investigación para Estudiantes de Intercambio.

# **Desarrollo de nuevos hormigones de geopolímeros a partir de subproductos industriales activados alcalinamente.**

**Memoria**

**Autor:** Alán Martínez Mendoza  
**Director:** Pablo Pujadas Álvarez  
**Convocatoria:** enero 2022



Escuela Técnica Superior  
de Ingeniería Industrial de Barcelona



## Resumen

El presente documento es un trabajo de investigación para estudiantes de intercambio desarrollado en Barcelona, España. El principal objetivo de éste es el desarrollo de nuevos geopolímeros activados alcalinamente para uso en aplicaciones estructurales a partir de diferentes subproductos industriales y de la industria del reciclado urbano. A lo largo de este trabajo se describen los procesos tanto experimentales, como de investigación que se llevaron a cabo en el tiempo transcurrido desde septiembre 2021 hasta enero 2022, periodo durante el cual se fabricaron geopolímeros como muestras de mortero y hormigón utilizando distintos desechos industriales y de la industria del reciclado urbano como precursores para poder crear estas muestras y estudiar sus características y su resistencia a la compresión principalmente. Todos los procedimientos fueron llevados a cabo en el laboratorio de la Universidad Politécnica de Cataluña. De igual manera, se definen algunos conceptos teóricos básicos para poder comprender el documento, se explica la importancia del desarrollo de nuevos geopolímeros para la sociedad y el medio ambiente actual. Además, se muestran los diseños de mezcla que se siguieron para el desarrollo de los nuevos geopolímeros, se muestra el trabajo de investigación comparando artículos de distintos autores para analizar a fondo los materiales, composición química, procedimientos y de más que se utilizan para el desarrollo de nuevos geopolímeros en la actualidad con el fin de comenzar a crear éstos para cada vez ir descubriendo nuevas alternativas para utilizar recursos y acciones más sostenibles que minimicen los impactos en el medio ambiente que nuestra sociedad hoy en día está ocasionando.

# Sumario

|   |           |
|---|-----------|
| <b>RESUMEN .....</b>                                      | <b>2</b>  |
| <b>SUMARIO .....</b>                                      | <b>3</b>  |
| .....   | 4         |
| <b>1. GLOSARIO .....</b>                                  | <b>5</b>  |
| <br>  |           |
| <b>2. INTRODUCCIÓN .....</b>                              | <b>6</b>  |
| 2.1. Objetivos del proyecto .....                         | 7         |
| 2.2. Alcance del proyecto .....                           | 7         |
| <br>  |           |
| <b>3. TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....</b>                  | <b>8</b>  |
| 3.1. Análisis de gráficos.....                            | 8         |
| 3.2. Gráfico 1.....                                       | 8         |
| 3.3. Gráfico 2.....                                       | 9         |
| 3.4. Gráfico 3.....                                       | 9         |
| 3.5. Gráfico 4.....                                       | 10        |
| 3.6. Gráfico 5.....                                       | 10        |
| 3.7. Gráfico 6.....                                       | 11        |
| 3.8. Gráfico 7.....                                       | 11        |
| 3.9. Gráfico 8.....                                       | 12        |
| 3.10. Gráfico 9.....                                      | 12        |
| Anexo Gráficos.....                                       |           |
| <br>  |           |
| <b>4. ANEXO TRABAJO EXPERIMENTAL DE LABORATORIO .....</b> | <b>13</b> |
| 4.1. Procedimiento sesión 22/09/21 .....                  | 13        |
| 4.2. Procedimiento sesión 29/09/21 .....                  | 17        |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.3. Procedimiento sesión 20/10/21 ..... | 23        |
| 4.4. Procedimiento sesión 29/10/21 ..... | 31        |
| 4.5. Procedimiento sesión 03/11/21 ..... | 36        |
| 4.6. Procedimiento sesión 22/12/21 ..... | 44        |
| <br>                                     |           |
| <b>CONCLUSIONES .....</b>                | <b>51</b> |
| .....                                    | 52        |
| <b>AGRADECIMIENTOS.....</b>              | <b>53</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>                | <b>54</b> |
| .....                                    | 56        |

# 1. Glosario

[1] Geopolímero: término que abarca una clase de materiales sintéticos aluminosilicatos, con uso potencial en una serie de ámbitos, esencialmente como un reemplazo para el cemento Portland y avanzados materiales compuestos de alta tecnología, las aplicaciones de cerámica o como una forma de piedra artificial.

[2] Clínter: producto en forma de gránulos o pequeñas bolas, de entre 0,5-25 mm, principalmente, que se forma a partir de la calcinación de caliza, arcilla y otros componentes minoritarios, a temperaturas que oscilan entre los 1350-1450 °C. Estos gránulos, triturados y mezclados con yeso y diferentes adiciones, permiten fabricar los distintos tipos de cemento y posteriormente, hormigón.

[3] Precursor: sustancia indispensable o necesaria para producir otra mediante una reacción química.

[4] Activador alcalino: compuestos que, ya sea en estado líquido o sólido, son capaces de generar en el medio una basicidad lo suficientemente elevada como para hidrolizar satisfactoriamente los aluminosilicatos de partida.

[5] Material puzolánico: sustancias naturales o subproductos industriales que tiene un amorfo o parcialmente cristalino y consisten en sílice, silico-aluminatos, o una combinación de estos.

## 2. Introducción

La fabricación de cemento se ha desarrollado durante mucho tiempo y hace contribuciones significativas al progreso de la civilización humana. Sin embargo, la industria del cemento tiende a ser de las más contaminantes ya que cuenta con un consumo muy alto de energía debido a las altas temperaturas necesarias para quemar el clínker y a su mayor emisión de gases contaminantes, en consecuencia, mayor daño ambiental. El consumo de energía ha representado más del 10% del consumo total de energía industrial y se espera que aumente con la tasa de producción de cemento en el futuro. Además, la industria del cemento produce grandes cantidades de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Aproximadamente se emite una tonelada de CO<sub>2</sub> en la fabricación de una tonelada de cemento. Esto significa que la industria de fabricación de cemento produce aproximadamente entre el 5% y el 8% de la contaminación mundial causada por la emisión de CO<sub>2</sub>, y además se utiliza una gran cantidad de minerales naturales durante el proceso de fabricación del cemento. China es el principal país productor de cemento y produjo 700 millones de toneladas de cemento en 2014, lo que representó más del 50% de la producción total de cemento. Por lo tanto, todos estos efectos negativos empujan a la industria a buscar aglutinantes alternativos más ecológicos que puedan reemplazar parcial o totalmente al cemento Portland ordinario.

La investigación sobre conservación ambiental y estrategias ambientalmente sostenibles está ganando atención debido a la necesidad de reducir el uso de recursos naturales no renovables y promover un futuro sostenible. El cambio climático a escala global impulsa la búsqueda de recursos y acciones más sostenibles que minimicen los impactos en el medio ambiente. Por lo tanto, la ciencia de la sostenibilidad debe desarrollarse continuamente para una mayor conservación de los ecosistemas y una sociedad más sostenible.

El geopolímero propuesto en la década de 1970 ha atraído una atención significativa en los últimos veinte años. Tiene una estructura tridimensional amorfa y se describe como un tipo de aglutinante relativamente nuevo que se produce mediante la activación alcalina de materiales ricos en aluminosilicatos. Cualquier material puzolánico que tenga una rica fuente de sílice y alúmina en una fase amorfa y sea soluble en un activador alcalino puede ser la base de un geopolímero para la geopolimerización, una amplia gama de materiales de desecho reciclados, como las cenizas volantes, cenizas volcánicas, cenizas de cáscara de arroz, escoria, relaves de los hornos de hierro, metacaolín, vidrio, ladrillo y más pueden utilizarse como base para geopolímeros. Estos materiales han ganado aceptación e interés debido a sus excelentes propiedades físicas, mecánicas y térmicas. Se descubrió que una de las ventajas de los geopolímeros sobre los aglutinantes de cemento Portland ordinarios era su estabilidad térmica superior, con una mayor retención de resistencia después de la exposición a altas temperaturas, dependiendo del precursor de partida y del tipo de activador alcalino. De igual manera tienen propiedades de durabilidad superiores, como resistencia a los sulfatos, resistencia a los ácidos, al fuego y penetrabilidad del ion cloruro. Su aplicación da como resultado beneficios ambientales

y económicos derivados de la aplicación de residuos y subproductos como material precursor.

El reciclaje de residuos es un método para lograr una producción limpia y sostenible adoptando actualmente en muchas industrias. La gestión de residuos contribuye significativamente al desarrollo sostenible. La reutilización de residuos provoca una menor pérdida de recursos y genera beneficios económicos. Las propias empresas pueden utilizar sus residuos o ponerlos a disposición para su reutilización por otras empresas, teniendo así una gestión de residuos más eficiente. El principal objetivo de la reutilización de residuos es ahorrar recursos y energía y generar menos perturbaciones ambientales. De esta forma, las empresas estarán más cerca de una producción más limpia y menos dañina. El impacto del uso de residuos es grande porque tiene implicaciones políticas y económicas. Además de aportar beneficios sociales y medioambientales.

## **2.1. Objetivos del proyecto**

El principal objetivo de este proyecto es el desarrollo de nuevos geopolímeros activados alcalinamente para uso en aplicaciones estructurales a partir de diferentes subproductos industriales y de la industria del reciclado urbano, principalmente utilizando como precursores una mezcla de vidrio, cerámica y papel. De igual manera, comprobar su resistencia a la compresión y aprender sobre los distintos diseños de mezcla que hay en este tema relativamente nuevo.

## **2.2. Alcance del proyecto**

El alcance de este proyecto es investigar los distintos procedimientos que distintos autores llevan a cabo hoy en día para el desarrollo de nuevos geopolímeros, con el fin de analizar si existen correlaciones entre algunos de sus métodos o parámetros que utilizan en su desarrollo para ponerlo en práctica durante el trabajo experimental y corroborar si estas nuevas alternativas son eficaces para convertir nuestra sociedad en una mucho más sostenible, tratando de limitar el uso de recursos naturales no renovables, y reciclando y reutilizando los residuos de las grandes industrias que se producen.

### 3. Trabajo de investigación

En este apartado se incluye como anexo la Tabla 1, en la cual se pueden observar 10 distintos artículos de diferentes autores, los cuales detallan los métodos y procedimientos que siguen para desarrollar geopolímeros utilizando vidrio o derivados de éste como material precursor, pues las muestras que se llevan a cabo más adelante en el trabajo experimental fueron en su mayoría hechas utilizando una mezcla de vidrio, cerámico y papel (VCP) como precursor. La Tabla 1 tiene como objetivo mostrar el origen, la composición química y algunas características como la densidad, tamaño promedio de partícula y superficie específica del precursor utilizado por cada autor, así como el activador alcalino y la concentración que utiliza para el desarrollo del geopolímero. De la misma manera, especifica la relación líquido/sólido, la temperatura de curado, humedad, la estructura (amorfa/cristalina), y la resistencia a la compresión que tiene el geopolímero desarrollado y el tiempo en días en que se realizó tal prueba. Todo esto con el fin de realizar varios gráficos y analizar si existen algunas tendencias a seguir o correlaciones entre los parámetros y diseños de mezcla que llevan a cabo hoy en día los distintos autores para lograr una mayor resistencia.

#### 3.1. Análisis de gráficos

En los anexos se encuentran varios gráficos, todos basados en los 10 artículos mostrados en la Tabla 1. Cada gráfico muestra su coeficiente de correlación "R", el cual indica si los parámetros del eje "x" influyen a los parámetros del eje "y" que es la resistencia a la compresión, y de igual manera cada uno muestra la ecuación de su línea de tendencia.

#### 3.2. Gráfico 1: relación líquido/sólido (l/s) contra resistencia a la compresión

La relación líquido/sólido (l/s) es uno de los parámetros más importantes pues influye considerablemente en la resistencia final de la muestra de mortero u hormigón. Expresa la relación que existe entre el peso del líquido utilizado en la mezcla (agua) y el peso del sólido (precursor). Dado que el peso del agua utilizada siempre debe ser menor que el peso del precursor, el resultante es menor que la unidad. Una relación líquido/sólido baja, conduce a un hormigón de mayor resistencia que una relación líquido/sólido alta. Pero cuanto más alta sea esta relación, el hormigón será mas trabajable. A este parámetro se le debe dar mucha importancia pues un exceso de agua lleva a que las partículas lleguen a un punto en el que no absorben más agua, por lo que quedan espacios vacíos en los que nada actúa. La falta de agua no permite que las partículas se hidraten lo suficiente por lo que no cumple la función aglomerante. Como se puede ver en el Gráfico 1 más adelante, su coeficiente de correlación R es de 0.0176, el cual se encuentra muy por debajo del 0.7 indicando que no existe una tendencia

clara de relación entre como la relación líquido/sólido puede influenciar a la resistencia a la compresión, pues los resultados de los artículos investigados varían bastante. Aun así, se puede ver que el valor de la relación líquido/sólido se encuentra alrededor de entre 0.3-0.5 en la mayoría de los casos.

### **3.3. Gráfico 2: Concentración molar del activador contra la resistencia a la compresión**

La concentración del activador alcalino es una de las variables fundamentales en el proceso de geopolimerización, ya que la solubilidad del aluminosilicato se incrementa con el aumento en la concentración del ion hidróxido y con ello puede contribuir a obtener materiales con una resistencia mecánica más elevada. Generalmente, la resistencia a la compresión de los hormigones incrementa con la concentración de la molaridad del activador. No obstante investigadores han reportado comportamientos contrarios en donde la utilización de un activador a una concentración de 12 M permitió producir materiales con una mayor resistencia mecánica que aquellos obtenidos a una concentración de 18 M.

El Gráfico 2 muestra un coeficiente de correlación R con un valor de 0.5922, el cual se acerca bastante al 0.7 para confirmar que existe una tendencia de relación entre estos parámetros. Así pues, debido a que el valor de R no llega al 0.7 no es posible confirmar que los valores de la concentración molar del activador tengan una influencia sobre la resistencia a la compresión, sin embargo, al analizar la gráfica se puede observar que las muestras con los valores más altos de la resistencia a la compresión son los que igualmente cuentan con los valores más altos de concentración molar.

### **3.4. Gráfico 3: porcentaje de sustitución del precursor contra la resistencia a la compresión**

El cemento ordinario es el material conglomerante por excelencia, es capaz de endurecerse después de interactuar químicamente con el agua del mezclado en un proceso conducido como fraguado, siendo la fuente de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas del hormigón. Sin embargo, como se expuso en la introducción la fabricación de éste es sumamente contaminante y es por ello que se busca sustituirlo utilizando otro precursor para que al activarse alcalinamente sea capaz de unificar los agregados pétreos y arena en una sola mezcla consistente y brindarle las propiedades fisicoquímicas y mecánicas necesarias para que sea resistente. El Gráfico 3 compara el porcentaje de sustitución del precursor contra la resistencia a la compresión, cuenta con un coeficiente de correlación R muy bajo con un valor de 0.0015, el cual indica que no existe una influencia del porcentaje de sustitución en la resistencia a la compresión, pues los resultados de los artículos investigados varían significativamente y no muestran una línea de tendencia

clara.

### **3.5. Gráfico 4: tamaño promedio de la partícula ( $\mu\text{m}$ ) del precursor contra la resistencia a la compresión**

Cuando se fabrica hormigón de manera tradicional, utilizando cemento como componente aglutinante, se tiene especial cuidado con el tamaño de partícula de éste pues él determina en gran medida la velocidad de hidratación, el desarrollo de calor de hidratación, la retracción y la adquisición de resistencia de la muestra. El Gráfico 4 muestra el tamaño promedio de la partícula del precursor utilizado ( $\mu\text{m}$ ) comparándolo con la resistencia a la compresión, cuenta con un coeficiente de correlación R de 0.252, el cual está por debajo de 0.7, con esta información se puede decir que el tamaño promedio de la partícula del precursor utilizado no tiene influencia directa en los resultados de la resistencia a la compresión de las muestras pues los resultados de los artículos investigados varían bastante y no muestran una línea de tendencia clara, esto puede ser debido a que este tema apenas se encuentra en fase de desarrollo e investigación y muchos autores llevan a cabo experimentos con distintos tamaños de partícula pues aún no está establecido el tamaño óptimo para desarrollar un geopolímero de la mejor manera.

### **3.6. Gráfico 5: superficie específica ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) contra resistencia a la compresión**

La superficie específica es una propiedad de los sólidos la cual es la relación entre el área superficial total y la masa de sólido. Es una magnitud científica derivada que puede ser utilizada para determinar el tipo y propiedades de un material. Tiene gran influencia en el comportamiento de los materiales, particularmente en su reactividad química, pues tiene relación con la velocidad de las reacciones y también tiene importancia en el análisis de la adsorción. A medida que incrementa la finura de un material, incrementa su superficie específica, por lo que, de manera inversa, este parámetro sirve como un indicador de la finura. El Gráfico 5 compara la superficie específica ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) del precursor utilizado con la resistencia a la compresión, cuenta con un coeficiente de correlación R de 0.3316 el cual se encuentra por debajo de 0.7, indicando que no existe una correlación clara entre los parámetros establecidos en el gráfico y por ende no es posible determinar si los valores de la superficie específica son capaces de influenciar a los resultados de la resistencia a la compresión de los experimentos llevados a cabo en los artículos.

### **3.7. Gráfico 6: temperatura de curado (°C) contra resistencia a la compresión**

El curado del hormigón es uno de los principales medios para garantizar que el material alcance sus propiedades deseables, es un proceso mediante el cual se producen las reacciones químicas de hidratación de los componentes del cemento, principalmente silicatos y aluminatos para transformar la pasta de cemento fresco en una masa firme y dura con poder aglutinante. Este proceso es de suma importancia para el desarrollo de muestras de mortero u hormigón, ya que la temperatura condiciona enormemente la velocidad de este proceso. Cuando la temperatura es muy alta, el proceso de fraguado se inicia muy rápidamente, ya que se produce una desecación acelerada de la mezcla lo que puede llevar a pérdidas de resistencia, fisuración y un alto grado de retracción. Por otro lado, las temperaturas reducidas pueden llevar a procesos de fraguado extremadamente largos. El Gráfico 6 compara la temperatura de curado (°C) con la resistencia a la compresión de las muestras llevadas a cabo en los distintos artículos, cuenta con un coeficiente de correlación R de 0.0175, el cual está por debajo de 0.7 significando que no existe una correlación entre estos parámetros y no hay una línea de tendencia clara. Sin embargo, se puede observar que la mayoría de los artículos utilizan temperaturas de curado de entre 20-40 °C que han dado resultados exitosos para las pruebas de resistencia a la compresión.

### **3.8. Gráfico 7: temperatura de curado (°C) según los distintos autores**

El Gráfico 7 muestra la temperatura de curado (°C) según los distintos autores de la Tabla 1, con el fin de visualizar gráficamente las tendencias para el desarrollo de geopolímeros en la actualidad. Analizando el gráfico se puede observar que no todos los autores siguen una misma temperatura de curado, pero en su mayoría se basan en temperaturas que rondan entre los 23-25 °C. Algunos otros utilizan temperaturas más altas para el curado, pues aun no se ha podido establecer un valor óptimo para la temperatura de este proceso.

### **3.9. Gráfico 8: relación líquido/sólido (l/s) según los distintos autores**

El Gráfico 8 muestra la relación líquido/sólido (l/s) según los distintos autores de la Tabla 1. Como se describió en el apartado 3.2, la relación líquido/sólido es un parámetro de alta importancia que influye en la resistencia final de la muestra. Analizando el Gráfico 8 se puede observar fácilmente que existe una tendencia a seguir para los valores de relación líquido/sólido, pues en su mayoría los autores utilizan valores que rondan el 0.5 para el desarrollo de geopolímeros en la actualidad.

### **3.10. Gráfico 9: tamaño promedio de la partícula ( $\mu\text{m}$ ) del precursor según los distintos autores**

El Gráfico 9 muestra el tamaño de partícula ( $\mu\text{m}$ ) de los precursores utilizados según los distintos autores. Este valor es muy variado en los distintos artículos pues el material que se utiliza como precursor son de distintos orígenes y siguen distinta metodología de trituración para lograr un material sumamente fino. Se puede decir que actualmente no existe una tendencia a seguir para el tamaño de partícula de los precursores para el desarrollo de geopolímeros en la actualidad.

Anexo Gráficos

Tabla 1: Información y características de la preparación de geopolímeros según distintos autores

| ID | Autor                                | Ref   | origen  | SiO <sub>2</sub> | Fe2O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | CaO   | MgO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | LOI  | Activador                | NaOH | WG(H <sub>2</sub> O) | WG(SiO <sub>2</sub> ) | WG(Na <sub>2</sub> O) | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | +glass | concentración o proporción | L/S  | sustitución | Temperatura de curado(°C; tiempo) | Temperatura de curado (°C) | Humedad                             | Humedad (%)                         | Densidad          | tamaño promedio | tamaño promedio (µm) | superficie específica m <sup>2</sup> /g | fc (MPa, días) | fc    | días                     | amorfo/cristalino |        |        |        |
|----|--------------------------------------|---|---|------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------|------|--------------------------------|------|--------------------------|------|----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|--------|----------------------------|------|-------------|-----------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|-----------------|----------------------|---|----------------|-------|--------------------------|-------------------|--------|--------|--------|
| 1  | Xi Jiang 2020                        | <a href="https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120579">https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120579</a> | botellas de vidrio de desechos municipales                  | 72.68            | 0.78              | 0.5              | 10.6              | 11.84 | 1.69 | 1.57                           | 0.07 | NaOH                     | NaOH |                      |                       |                       |                                 |        |                            | 10 M | 10          | 0.45                              | 10                         | 60 °C por 24 horas; después a 20 °C | 20                                  | 95                | 95              |                      | 18.21                                   | 18.21          |       | 51.23                    | 28                | Amorfo |        |        |
|    |                                      |   |   | 72.68            | 0.78              | 0.5              | 10.6              | 11.84 | 1.69 | 1.57                           | 0.07 | NaOH                     | NaOH |                      |                       |                       |                                 |        |                            |      | 10 M        | 10                                | 0.45                       | 20                                  | 60 °C por 24 horas; después a 20 °C | 20                | 95              | 95                   |   | 18.21          | 18.21 |                          | 53.22             | 28     | Amorfo |        |
|    |                                      |   |   | 72.68            | 0.78              | 0.5              | 10.6              | 11.84 | 1.69 | 1.57                           | 0.07 | NaOH                     | NaOH |                      |                       |                       |                                 |        |                            |      | 10 M        | 10                                | 0.45                       | 30                                  | 60 °C por 24 horas; después a 20 °C | 20                | 95              | 95                   |   | 18.21          | 18.21 |                          | 48.75             | 28     | Amorfo |        |
| 2  | Nathália Cristina Gomes Siveira 2022 | <a href="https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100379">https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100379</a>               | subproducto de Bend Glass Comercio e Indústria.             | 70.5             | 0.2               | 0.2              | 11.9              |       | 0.8  | 1.1                            |      | NaOH                     | NaOH |                      |                       |                       |                                 |        |                            |      | 4M          | 4                                 | 0.5                        | 40                                  | 24 °C por 28 días                   | 24                |                 |                      |   | 21             | 21    | 0.031                    | 3.33              | 28     | Amorfo |        |
|    |                                      |   |   | 70.5             | 0.2               | 0.2              | 11.9              |       | 0.8  | 1.1                            |      | NaOH                     | NaOH |                      |                       |                       |                                 |        |                            |      |             | 8M                                | 8                          | 0.5                                 | 40                                  | 24 °C por 28 días | 24              |                      |   |                | 21    | 21                       | 0.031             | 3.4    | 28     | Amorfo |
|    |                                      |   |   | 70.5             | 0.2               | 0.2              | 11.9              |       | 0.8  | 1.1                            |      | NaOH                     | NaOH |                      |                       |                       |                                 |        |                            |      |             | 4M                                | 4                          | 0.5                                 | 39                                  | 24 °C por 28 días | 24              |                      |   |                | 21    | 21                       | 0.031             | 4.65   | 28     | Amorfo |
|    |                                      |   |   | 70.5             | 0.2               | 0.2              | 11.9              |       | 0.8  | 1.1                            |      | NaOH                     | NaOH |                      |                       |                       |                                 |        |                            |      |             | 8M                                | 8                          | 0.5                                 | 39                                  | 24 °C por 28 días | 24              |                      |   |                | 21    | 21                       | 0.031             | 4.27   | 28     | Amorfo |
|    |                                      |   |   | 70.5             | 0.2               | 0.2              | 11.9              |       | 0.8  | 1.1                            |      | NaOH                     | NaOH |                      |                       |                       |                                 |        |                            |      |             | 4M                                | 4                          | 0.5                                 | 38                                  | 24 °C por 28 días | 24              |                      |   |                | 21    | 21                       | 0.031             | 5.67   | 28     | Amorfo |
|    |                                      |   |   | 70.5             | 0.2               | 0.2              | 11.9              |       | 0.8  | 1.1                            |      | NaOH                     | NaOH |                      |                       |                       |                                 |        |                            |      |             | 8M                                | 8                          | 0.5                                 | 38                                  | 24 °C por 28 días | 24              |                      |   |                | 21    | 21                       | 0.031             | 5.75   | 28     | Amorfo |
| 3  | Huseyin Ulugol 2021                  | <a href="https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124358">https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124358</a>         | desechos de construcción y demolición                       | 73.4             | 0.18              | 0.08             | 12.8              | 10.9  | 0.18 | 1.27                           | 0.29 | NaOH                     | NaOH |                      |                       |                       |                                 |        |                            |      | 10%         |                                   | 0.48                       | 100                                 | 85 °C; 72 horas                     | 85                |                 |                      |   | 16.9           | 16.9  |                          | 37                | 3      | Amorfo |        |
|    |                                      |   |   | 73.4             | 0.18              | 0.08             | 12.8              | 10.9  | 0.18 | 1.27                           | 0.29 | NaOH                     | NaOH |                      |                       |                       |                                 |        |                            |      |             | 12%                               |                            | 0.51                                | 100                                 | 105 °C; 72 horas  | 105             |                      |   |                | 16.9  | 16.9                     |                   | 29     | 3      | Amorfo |
|    |                                      |   |   | 73.4             | 0.18              | 0.08             | 12.8              | 10.9  | 0.18 | 1.27                           | 0.29 | NaOH                     | NaOH |                      |                       |                       |                                 |        |                            |      |             | 15%                               |                            | 0.55                                | 100                                 | 115 °C; 24 horas  | 115             |                      |   |                | 16.9  | 16.9                     |                   | 30     | 1      | Amorfo |
| 4  | Ruizhe Si 2020                       | <a href="https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119303">https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119303</a> | polvo de vidrio residual de la empresa Vitro Minerals, Inc. | 56.27            | 0.1               | 1.63             | 11.2              | 9     | 0.82 | 20.42                          |      | NaOH + silicato de sodio |      | 62.40%               | 28.70%                | 8.90%                 |                                 |        |                            |      | 0.78        |                                   | 5                          | 23 °C; 24 horas                     | 23                                  |                   |                 |                      | 7.5                                     | 7.5            | 1.89  | 36.5, 41.3 ; 3 y 28 días | 41.3              | 28     | Amorfo |        |
|    |                                      |   |   | 56.27            | 0.1               | 1.63             | 11.2              | 9     | 0.82 | 20.42                          |      | NaOH + silicato de sodio |      | 62.40%               | 28.70%                | 8.90%                 |                                 |        |                            |      | 0.78        |                                   | 10                         | 23 °C; 24 horas                     | 23                                  |                   |                 |                      | 7.5                                     | 7.5            | 1.89  | 34.4, 37.9; 3 y 28 días  | 37.9              | 28     | Amorfo |        |
|    |                                      |   |   | 56.27            | 0.1               | 1.63             | 11.2              | 9     | 0.82 | 20.42                          |      | NaOH + silicato de sodio |      | 62.40%               | 28.70%                | 8.90%                 |                                 |        |                            |      | 0.78        |                                   | 20                         | 23 °C; 24 horas                     | 23                                  |                   |                 |                      | 7.5                                     | 7.5            | 1.89  | 29.6, 34.1; 3 y 28 días  | 34.1              | 28     | Amorfo |        |

|    |  |  |       |      |      |       |       |      |       |      |         |      |        |        |  |  |  |  |     |     |      |      |       |  |                        |  |   |                |      |      |       |       |                                  |                               |                                |  |        |        |        |
|----|--|--|-------|------|------|-------|-------|------|-------|------|---------|------|--------|--------|--|--|--|--|-----|-----|------|------|-------|--|------------------------|--|---|----------------|------|------|-------|-------|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--|--------|--------|--------|
| 5  | Sina Dadsetan 2021<br><a href="https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121168">https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121168</a>                  | desecho de un centro de clasificación "Tricentris"   | 73.08 | 0.36 | 0.68 | 13.21 | 11.02 | 1.24 | 2.43  | 0    | NaOH    | NaOH |        |        |  |  |  |  | 12M | 12  | 0.45 | 25   | 24 °C | 24   |                        |  |   | 2450           |      |      | 0.382 |       | 55                               | 90                            | Amorfo                         |  |        |        |        |
|    |  |  | 73.08 | 0.36 | 0.68 | 13.21 | 11.02 | 1.24 | 2.43  | 0    | NaOH    | NaOH |        |        |  |  |  |  |     | 12M | 12   | 0.45 | 50    | 24 °C  | 24                     |  |   |                | 2450 |      |       | 0.382 |                                  | 28                            | 90                             | Amorfo   |        |        |        |
| 6  | Hasan Rashidian-Dezfouli 2021<br><a href="https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121549">https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121549</a>       | polvo fino producido al moler fibra de vidrio  | 47.72 | 0.34 | 0.1  | 0.67  | 19.62 | 2.27 | 10.36 |      | NaOH    | NaOH |        |        |  |  |  |  |     |     |      | 0.33 | 100   | 60 °C por 24 horas, después a temperatura ambiente           | 60                     |  |   |                | 2600 | 4    | 4     | 1.02  |                                  | 79, 78, 82; 3, 7 y 28 días    | 82                             | 28   | Amorfo |        |        |
| 7  | Meysam Pourabbas Bilondi 2018<br><a href="https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.049">https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.049</a>       | desechos de vidrio posteriormente triturados y luego pulverizados  | 72.59 | 0.4  | 0.53 | 12.49 | 11.17 | 1.22 | 1.58  | 0.26 | NaOH    | NaOH |        |        |  |  |  |  |     |     |      |      | 25    | 25 °C; 7, 28 y 91 días                                       | 25                     |  |   |                | 2400 | 75   | 75    |       | 0.75, 1.75, 2.1; 7, 28 y 91 días | 2.1                           | 91                             | Amorfo   |        |        |        |
|    |  |  | 72.59 | 0.4  | 0.53 | 12.49 | 11.17 | 1.22 | 1.58  | 0.26 | NaOH    | NaOH |        |        |  |  |  |  |     |     |      |      |       | 9  | 25 °C; 7, 28 y 91 días | 25   |   |                |      | 2400 | 75    | 75    |                                  | 0.70, 1.3, 2; 7, 28 y 91 días | 2                              | 91   | Amorfo |        |        |
|    |  |  | 72.59 | 0.4  | 0.53 | 12.49 | 11.17 | 1.22 | 1.58  | 0.26 | NaOH    | NaOH |        |        |  |  |  |  |     |     |      |      |       |  | 9                      | 25 °C; 7, 28 y 91 días                                       | 25  |                |      |      | 2400  | 75    | 75                               |                               | 0.6, 0.9; 7 y 28 días          | 0.9  | 28     | Amorfo |        |
| 8  | Yiyuan Zhang 2020<br><a href="https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122970">https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122970</a>                           | elaborado mediante la molenda de botellas de vidrio reciclado procedentes de estación de recolección de basura en Shanghai | 70.3  | 0.82 |      | 11.21 | 10.64 | 0.96 | 2.2   |      | KOH     |      |        |        |  |  |  |  |     |     |      |      | 100   | 50 °C, 80 °C, 100 °C; las primeras 24 horas, después a 20 °C | 80                     |  |   |                |      | 41.9 | 41.9  |       | 1, 11, 8; 50 °C, 80 °C; 7 días   | 11                            | 7                              | Amorfo   |        |        |        |
|    |  |  | 70.3  | 0.82 |      | 11.21 | 10.64 | 0.96 | 2.2   |      | KOH     |      |        |        |  |  |  |  |     |     |      |      |       |  | 100                    | 50 °C, 80 °C, 100 °C; las primeras 24 horas, después a 20 °C | 80  |                |      |      |       | 41.9  | 41.9                             |                               | 2, 15, 9; 50 °C, 80 °C, 100 °C | 15   | 28     | Amorfo |        |
|    |  |  | 70.3  | 0.82 |      | 11.21 | 10.64 | 0.96 | 2.2   |      | KOH     |      |        |        |  |  |  |  |     |     |      |      |       |  |                        | 100  | 20 °C, 50 °C, 80 °C, 100 °C; las primeras 24 horas, después a 20 °C | 80             |      |      |       |       | 41.9                             | 41.9                          |                                | 5, 6, 16, 10; 20 °C, 50 °C, 80 °C, 100 °C; 56 días | 16     | 56     | Amorfo |
| 9  | Keoma do Carmo e Sina Defaveri 2019<br><a href="https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.181">https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.181</a> | residuo de material aislante para tuberías y hornos de pellets   | 43.7  | 12   |      |       | 19.7  |      | 17.6  | 5.4  | NaOH    | NaOH |        |        |  |  |  |  |     |     |      |      |       | 10   | 100 °C; 7 días         | 100  |   |                |      | 2596 | 71.95 | 45    | 0.555                            |                               | 35.7                           | 7  | Amorfo |        |        |
|    |  |  | 43.7  | 12   |      |       | 19.7  |      | 17.6  | 5.4  | NaOH    | NaOH |        |        |  |  |  |  |     |     |      |      |       |  |                        | 10   | 100 °C; 7 días  | 100            |      |      |       | 2596  | 71.95                            | 45                            | 0.555                          |  | 19.7   | 7      | Amorfo |
|    |  |  | 43.7  | 12   |      |       | 19.7  |      | 17.6  | 5.4  | NaOH    | NaOH |        |        |  |  |  |  |     |     |      |      |       |  |                        |  | 10  | 100 °C; 7 días | 100  |      |       |       | 2596                             | 71.95                         | 45                             | 0.555  |        | 41.9   | 7      |
| 10 | Patrick N. Lemounga<br><a href="https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103792">https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103792</a>                   | lana de vidrio suministrada por ISOVER Saint-Gobain, Finlandia   | 63.4  | 1    | 0.6  | 16.1  |       | 2.5  | 1.9   |      | Na2SiO3 |      | 47.60% | 51.50% |  |  |  |  |     |     |      |      | 80    | 60 °C 24 horas; después 22 °C 6 días                         | 22                     | 25%  | 25  |                |      | 10   | 10    |       |                                  | 20                            | 7                              | Amorfo   |        |        |        |

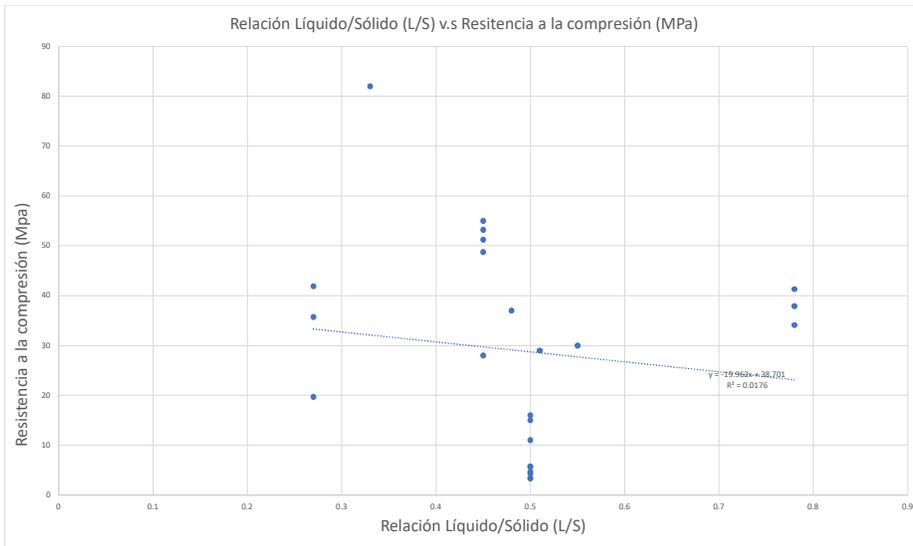


Gráfico 1: Relación líquido/sólido (L/S) v.s Resistencia a la compresión (MPa)

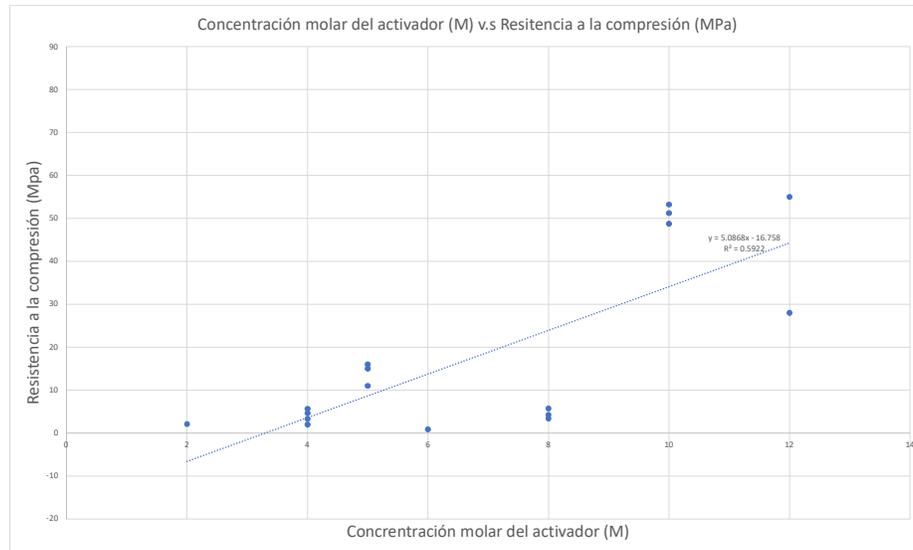


Gráfico 2: Concentración molar del activador (M) v.s Resistencia a la compresión (MPa)

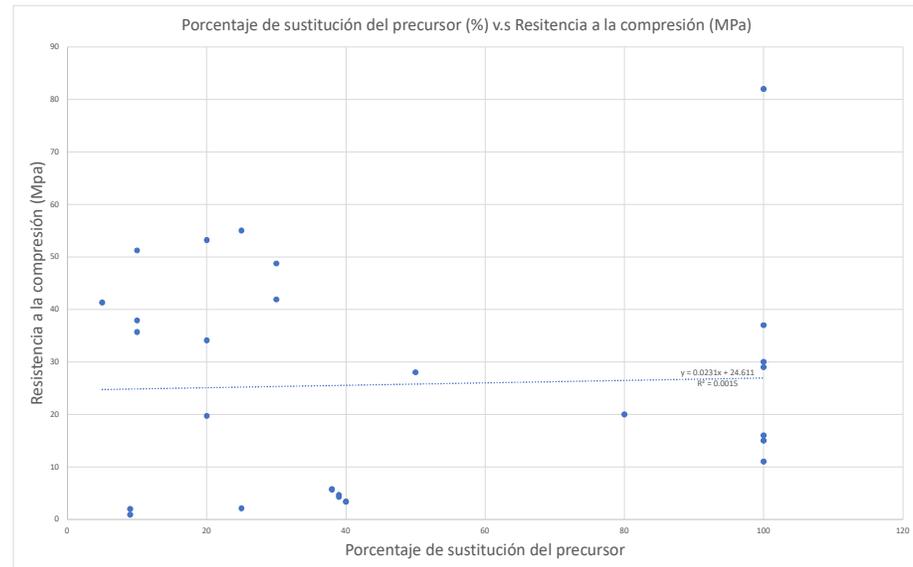


Gráfico 3: Porcentaje de sustitución del precursor (%) v.s Resistencia a la compresión (MPa)

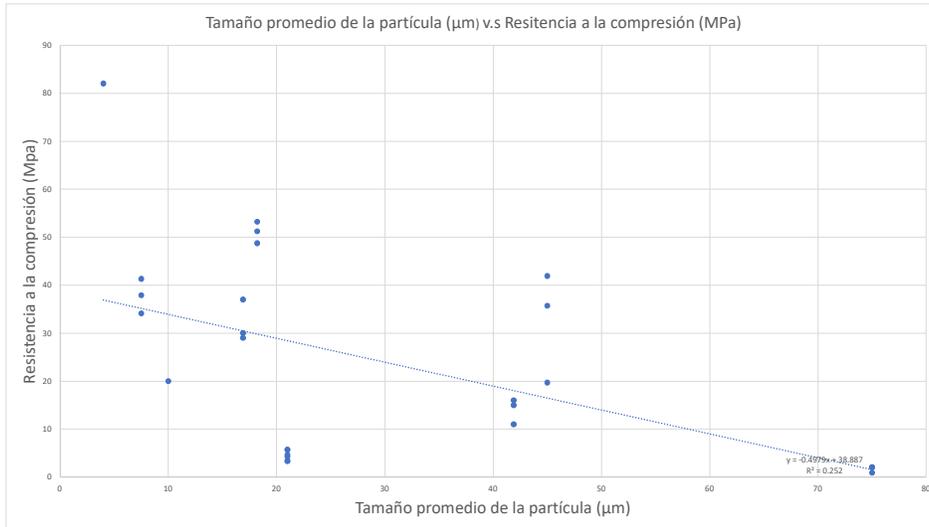


Gráfico 4: Tamaño promedio de la partícula (µm) v.s Resistencia a la compresión (MPa)

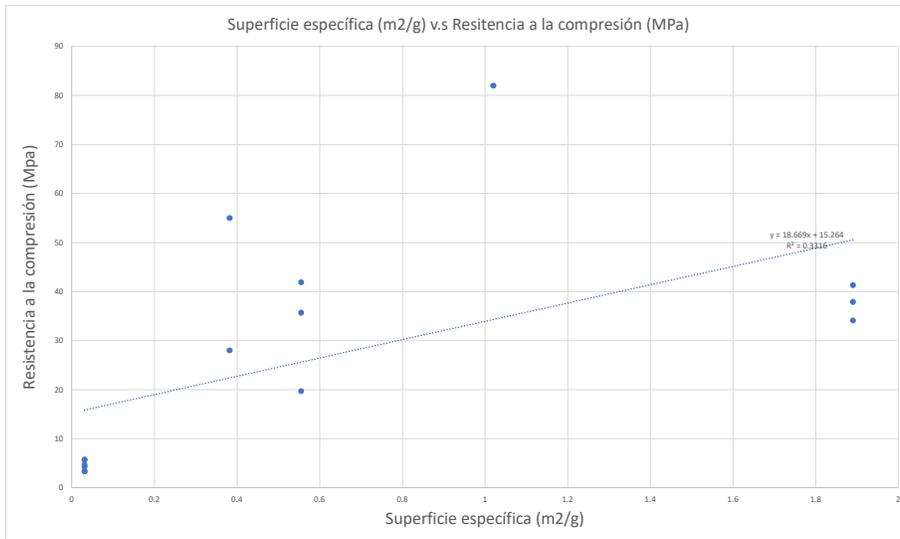


Gráfico 5: Superficie específica (m2/g) v.s Resistencia a la compresión (MPa)

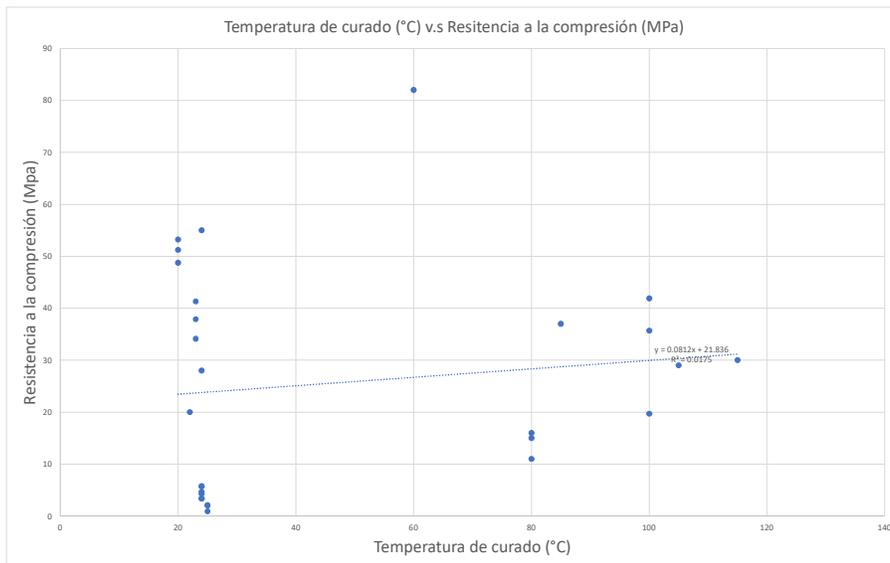


Gráfico 6: Temperatura de curado (°C) v.s Resistencia a la compresión (MPa)

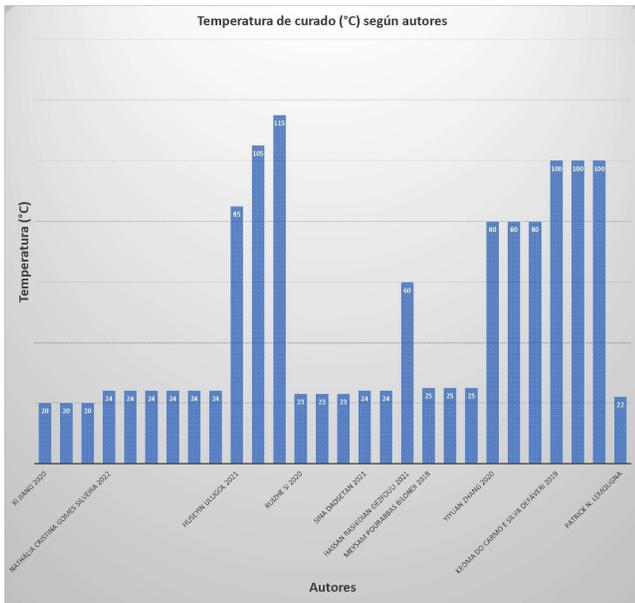


Gráfico 7: Temperatura de curado (°C) según los distintos autores de la Tabla 1.

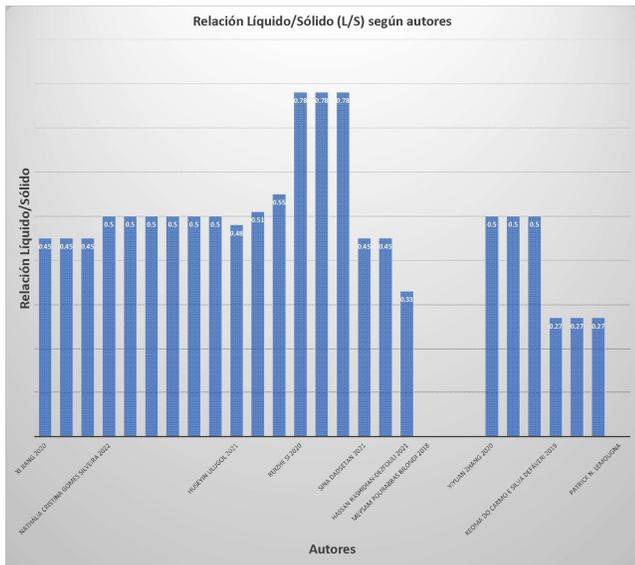


Gráfico 8: Relación Líquido/Sólido (L/S) según los distintos autores de la Tabla 1.

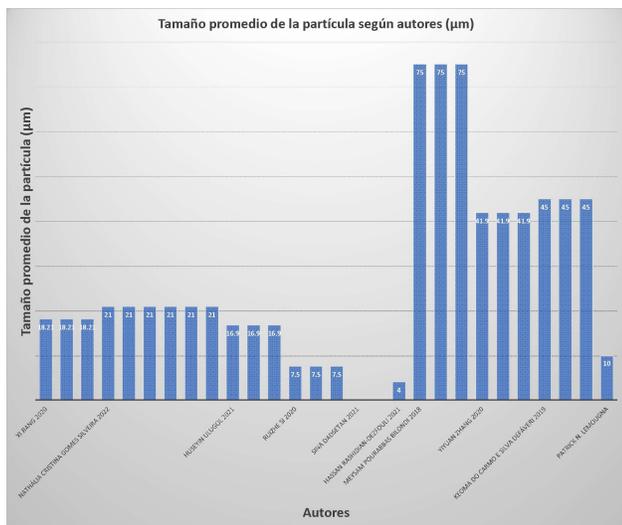


Gráfico 9: Tamaño promedio de la partícula (µm) según los distintos autores de la Tabla 1.

## 4. Anexo trabajo experimental de laboratorio.

A lo largo de este apartado se describen cada una de las sesiones llevadas a cabo en el laboratorio de la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España en las cuales se hicieron muestras de geopolímeros. En cada sesión se detalla el diseño de mezcla que se siguió, el material utilizado, el procedimiento, notas, resultados y observaciones que se tomaron durante el desarrollo de la sesión y de igual manera un registro fotográfico para cada una de ellas.

### 4.1. Procedimiento sesión 22/09/21

#### *Diseño de mezcla*

| Material    | Precursor | Cemento | Agua      | Arena      | Adición activa | Filler | Grava | Fibras | Aditiv. 1 | Aditiv. 2 | Activador             | WG       |
|-------------|-----------|---------|-----------|------------|----------------|--------|-------|--------|-----------|-----------|-----------------------|----------|
| kg          | 1200      |         | 420+100   | 1200       |                |        |       |        |           |           |                       | 12 ml    |
| Descripción | VCP       |         | destilada | Normensand |                |        |       |        |           |           | NaOH PanReac® pellets | EssentQ® |

Tabla 2. Diseño de mezcla sesión 22/09/21

**Actividades realizadas:** 5 vigas de mortero utilizando como aglutinante vidrio muy fino, con dimensiones 16 x 4 x 4 cm.

#### **Material utilizado:**

- VCP (vidrio, cerámica y papel): 1200 gr.
- Arena: 1200 gr.
- Agua: 420 + 100 mL\*
- Water glass (WG): 12 mL.

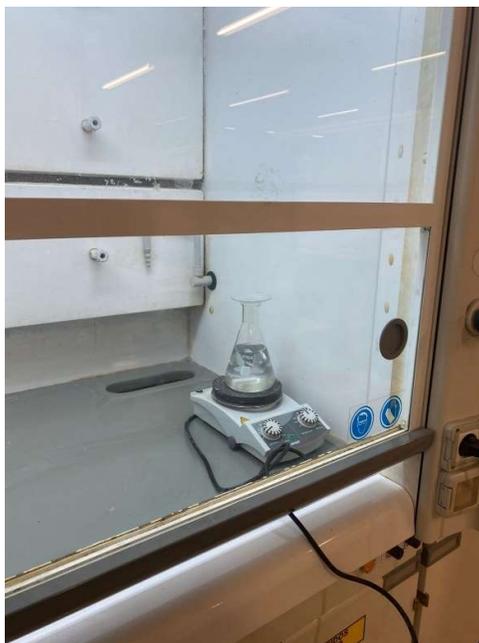
#### **Procedimiento:**

- Se revolvió el precursor (VCP) + el agua por 30 segundos en velocidad lenta.
- Se revolvió otros 30 segundos en velocidad lenta la mezcla anterior.
- Se revolvió la mezcla anterior (VCP + agua) con la arena y 100 mL más de agua debido a que la mezcla se veía muy seca, por 30 segundos en velocidad lenta.
- Se volvió a revolver la mezcla anterior (VCP + agua + arena) por 60 segundos ahora en velocidad rápida.

#### **Notas:**

- 5 vigas de 16 x 4 x 4 cm.
- Se agregaron 100 mL más de agua debido a que la mezcla se veía muy seca.
- Al finalizar la mezcla quedó muy líquida.

## REGISTRO FOTOGRÁFICO



**Fig. 4. 1.** Mezcla del activador: agua destilada + water glass + NaOH

---



**Fig. 4. 2.** Así es como se entregan los residuos de los contenedores de basura (vidrio, cerámica y papel).

---



| **Fig. 4. 3.** VCP (vidrio, cerámico y papel) y ladrillo muy fino para utilizarlo como aglutinante.

---



| **Fig. 4. 4.** Ensayo de mesa de flujo del mortero hecho con precursor VCP + agua + arena.

---



| **Fig. 4. 5.** Mortero ya en las vigas sometiéndose a 60 golpes para posteriormente meterlo al horno.

---

## 4.2. Procedimiento sesión 29/09/21

(VCP-12\*-0.38-M)

Responsable: Alan y Yineth Lugar: Lab. B1

1. Desencofrado de 5 vigas, marcar, sellar y almacenar en cámara de curado (o botar si no fraguó correctamente).
2. Limpiar moldes.

### *Diseño de mezcla*

| Material    | Precursor | Cemento | Agua      | Arena      | Adición activa | Filler | Grava | Fibras | Aditiv. 1 | Aditiv. 2 | Activador             | WG       |
|-------------|-----------|---------|-----------|------------|----------------|--------|-------|--------|-----------|-----------|-----------------------|----------|
| kg          | 1200      |         | 420+40    | 1200       |                |        |       |        |           |           |                       | 12 ml    |
| Descripción | VCP       |         | destilada | Normensand |                |        |       |        |           |           | NaOH PanReac® pellets | EssentQ® |

Tabla 3. Diseño de mezcla sesión 29/09/21

### 3. Mezclado:

- I. vidrio + el activador: 30 s.
- II. vidrio + el agua: 30 s, velocidad lenta.
- III. Agregar la arena.
- IV. vidrio + activador + arena: 30 s en velocidad lenta.
- V. Despegar manualmente para evitar partes secas en el fondo: 30 s.
- VI. vidrio + activador + arena: 60 s velocidad rápida.

4. Ensayo: Mesa de flujo ASTM C1611: 25 vueltas en 20 s.
5. Llenar moldes: 5 vigas 16\*4\*4 cm
6. Compactación: 60 golpes en mesa compactadora.
7. Sellar con papel plástico y papel aluminio.
8. Ingresar en horno a 75°C.

## NOTAS:

- Las muestras sacadas en 1 estuvieron una semana en el horno, se pegaron demasiado al molde, pero muestran una apariencia resistente.
- Del procedimiento en 3 la mezcla quedó con muy buena apariencia.
- Del procedimiento en 3 debe incrementarse la cantidad de material para llenar 6 vigas.

## REGISTRO FOTOGRÁFICO



**Fig.** 4. 6. Desencofrado de vigas del 22/09/21.



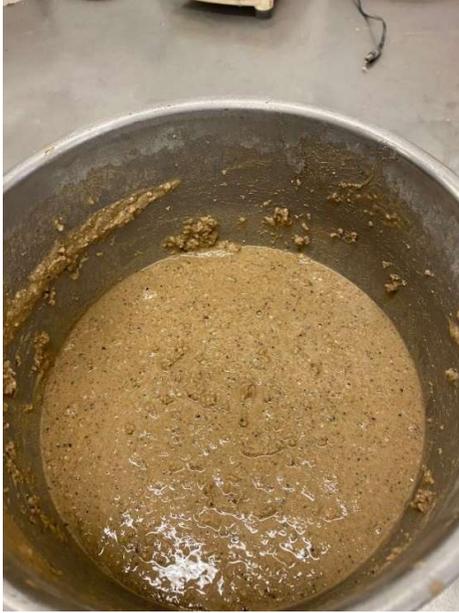
| **Fig. 4. 7.** Una de las 5 vigas resultó fracturada debido a que se pegaron mucho al molde

---



| **Fig. 4. 8.** Vigas envueltas en plástico para que siga reaccionando el activador y posteriormente meterlas al cuarto de curado.

---



| **Fig. 4. 9.** Mezcla de mortero utilizando precursor VCP (vidrio, cerámica y papel) con dosificación de arriba.

---



| **Fig. 4. 10.** Yo introduciendo la mezcla en el molde para realizar el ensayo de mesa de flujo.

---



**Fig.** 4. 11. Ensayo de mesa de flujo para el mortero.

---



**Fig.** 4. 12. Ensayo de mesa de flujo del mortero después de los 25 golpes en 20 segundos

---



**Fig.** 4. 13. Llenando moldes de vigas de 16 x 4 x 4 cm.

---



**Fig.** 4. 14. Las 5 vigas introducidas en el horno a 70 °C selladas con papel plástico y papel aluminio.

---

### 4.3. Procedimiento sesión 20/10/21

(CEM-0.38-M)

Responsable: Alan y Yineth Lugar: Lab. B1

Actividad Previa: prueba de resistencia a flexión y compresión de las vigas hechas el 22/09/21, con un tiempo de fraguado de 28 días.

Resultados:

| Prueba: | Flexión: | Compresión: |
|---------|----------|-------------|
| Viga 1: | 1,57 kN  | -           |
| Viga 2: | 1,79 kN  | 47,13 kN    |

Tabla 4. Resultados de pruebas de resistencia a flexión y compresión de las vigas del 22/09/21.

#### *Diseño de mezcla*

| Material    | Precursor | Cemento    | Agua      | Arena      | Adición activa | Filler | Grava | Fibras | Aditiv. 1 | Aditiv. 2 | Activador | WG |
|-------------|-----------|------------|-----------|------------|----------------|--------|-------|--------|-----------|-----------|-----------|----|
| kg          |           | 1200       | 420+40    | 1200       |                |        |       |        |           |           |           |    |
| Descripción |           | CEM 42.5 R | destilada | Normensand |                |        |       |        |           |           |           |    |

Tabla 5. Diseño de mezcla sesión 20/10/21

#### 1. Mezclado:

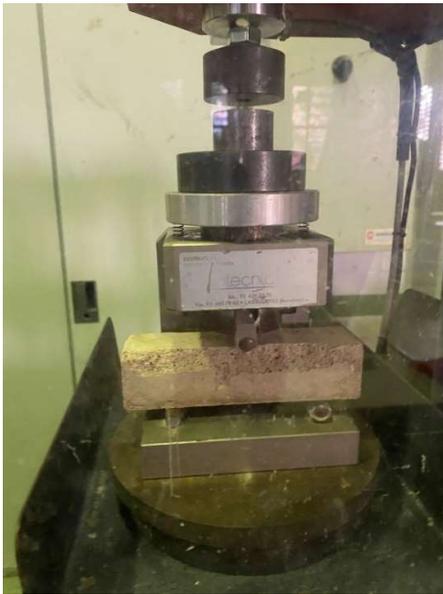
- I.cemento + agua: 30 s.
- II.cemento + el agua: 30 s, velocidad lenta.
- III.Agregar la arena.
- IV.cemento + agua + arena: 30 s en velocidad lenta.
- V.Despegar manualmente para evitar partes secas en el fondo: 30 s.
- VI.cemento + agua + arena: 60 s velocidad rápida.

2. Ensayo: Mesa de flujo ASTM C1611: 25 vueltas en 20 s.
3. Llenar moldes: 3 vigas 16\*4\*4 cm
4. Compactación: 60 golpes en mesa compactadora.
5. Sellar con papel plástico.

### NOTAS:

- 3 vigas de mortero hecho con cemento, arena y agua de 16 \*4 \*4 cm.
- Todo en orden, ningún evento extraordinario.
- Sobró mezcla como para otra viga.

### REGISTRO FOTOGRÁFICO



**Fig. 4. 15.** Sometiendo viga fraguada hace 28 días a prueba de flexión.



**Fig. 4. 16.** Momento en que la viga falló, soportó 1,57 kN

---



**Fig. 4. 17.** Sometiendo viga 2 fraguada hace 28 días a prueba de flexión

---



**Fig. 4. 18.** Viga 2 fracturada, soportó 1,79 kN a flexión

---



**Fig. 4. 19.** Sometiendo la misma viga 2 a prueba de compresión.

---



**Fig.** 4. 20. Momento en el que la viga 2 falló, soportó 47,13 kN.

---



**Fig.** 4. 21. Ensayo de mesa de flujo para el mortero.

---



| **Fig. 4. 22.** Mezcla de mortero hecho con cemento, agua y arena siguiendo la dosificación de arriba.

---



| **Fig. 4. 23.** Ensayo de mesa de flujo de mortero después de 25 golpes en 20 segundos.

---



| **Fig.** 4. 24. Sometiendo las 3 vigas ya en el molde a 60 golpes en máquina compactadora.

---



| **Fig.** 4. 25. Resultado de las 3 vigas de mortero después de los 60 golpes en máquina compactadora.

---



Fig. 4. 26. Las 3 vigas selladas con papel plástico.

---

## 4.4. Procedimiento sesión 29/10/21

(VCP-12\*-0.38-M 40°C)

Responsable: Alan y Yineth Lugar: Lab. B1

### Diseño de 2 mezclas

| Material    | Precurso<br>r | Cement<br>o | Agua       | Arena          | Adició<br>n<br>activa | Fille<br>r | Grav<br>a | Fibra<br>s | Aditiv<br>. 1 | Aditiv<br>. 2 | Activador                 | WG           |
|-------------|---------------|-------------|------------|----------------|-----------------------|------------|-----------|------------|---------------|---------------|---------------------------|--------------|
| kg          | 1200          |             | 420+4<br>0 | 1200           |                       |            |           |            |               |               |                           | 12 ml        |
| Descripción | VCP           |             | destilada  | Normensan<br>d |                       |            |           |            |               |               | NaOH PanReac<br>® pellets | EssentQ<br>® |

Tabla 6. Diseño de mezcla sesión 29/10/21

#### 1. Mezclado:

- I. vidrio + el activador: 30 s.
- II. vidrio + el agua: 30 s, velocidad lenta.
- III. Agregar la arena.
- IV. vidrio + activador + arena: 30 s en velocidad lenta.
- V. Despegar manualmente para evitar partes secas en el fondo: 30 s.
- VI. vidrio + activador + arena: 60 s velocidad rápida.

2. Ensayo: Mesa de flujo ASTM C1611: 25 vueltas en 20 s.
3. Llenar moldes: 5 vigas 16\*4\*4 cm
4. Compactación: 60 golpes en mesa compactadora.
5. Sellar con papel plástico y papel aluminio.
6. Ingresar en horno a 40°C.
7. Repetir e ingresar al horno a 75°C.

## NOTAS:

- Primero la mezcla se veía muy seca.
- Le agregamos más agua y después estaba muy líquida.
- La consistencia de la mezcla se veía más viscosa.
- Creemos que la dosificación no fue la correcta debido a que la báscula no está bien calibrada y no funciona correctamente.

## REGISTRO FOTOGRÁFICO



**Fig. 4. 27.** Mezcla de mortero utilizando precursor VCP (vidrio, cerámica y papel) con dosificación de arriba.



**Fig. 4. 28.** Preparación de ensayo de mesa de flujo para la mezcla.

---



**Fig. 4. 29.** Ensayo de mesa de flujo de la mezcla de mortero después de los 25 golpes en 20 segundos.

---



**Fig. 4. 30.** Mortero ya colocado en el molde para vigas.

---



**Fig. 4. 31.** Mezcla de mortero utilizando precursor VCP (vidrio, cerámico y papel) la cual creemos que no se hizo correctamente debido a que la balanza no estaba bien calibrada.

---



**Fig. 4. 32.** Desencofrado de vigas hechas el 20/10/2021.

---

## 4.5. Procedimiento sesión 03/11/21

(VCP-12\*-0.38-M 40°C, 70°,100°) (TC-12\*-0.38-M 60)

Responsable: Alan y Yineth Lugar: Lab. B1

*Diseño de 2 mezclas VCP (M1 y M2)\**

| Material    | Precursor | Cemento | Agua      | Arena      | Adición activa | Aditiv. 1 | Aditiv. 2 | Activador             | WG       |
|-------------|-----------|---------|-----------|------------|----------------|-----------|-----------|-----------------------|----------|
| g           | 1200      |         | 420+40    | 1200       |                |           |           | 100                   | 12 ml    |
| Descripción | VCP       |         | destilada | Normensand |                |           |           | NaOH PanReac® pellets | EssentQ® |

Tabla 7. Diseño de mezcla sesión 03/11/21

### 1. Mezclado:

- I. vidrio + el activador: 30 s.
  - II. vidrio + el agua: 30 s, velocidad lenta.
  - III. Agregar la arena.
  - IV. vidrio + activador + arena: 30 s en velocidad lenta.
  - V. Despegar manualmente para evitar partes secas en el fondo: 30 s.
  - VI. vidrio + activador + arena: 60 s velocidad rápida.
- 
2. Ensayo: Mesa de flujo ASTM C1611: 25 vueltas en 20 s.
  3. Llenar moldes: 3 vigas 16\*4\*4 cm (sobrante para 2 vigas).
  4. Compactación: 60 golpes en mesa compactadora.
  5. Sellar con papel plástico y papel aluminio.
  6. Ingresar en horno a 70°C.
  7. Repetir e ingresar al horno a 40°C y 100° con la mezcla sobrante de los dos procedimientos.
  8. Repetir reemplazando el VCP por Testillo e ingresar al horno a 40°C y 100° con la mezcla sobrante de los dos procedimientos.

### NOTAS:

- M1= VCP-12\*-0.38-M= 70°C □ su consistencia se veía muy bien.
- M2= VCP-12\*-0.38-M= 40°C □ buena consistencia, pero más fluida que M1.
- M3= sobrante M1 y M2= 100°C □ menos fluida que M1 y probablemente M2.
- M4= con TC en lugar de VCP= 70°C □ Buena consistencia.

\* Se prepararon 3 vigas denominadas M3 con el sobrante de M1 y M2. Se preparó otra mezcla exactamente igual, pero reemplazando el VCP por TC (Testillo), ésta última muestra fue denominada M4 y se ingresó a 70°C.

\* Sobró para 2 vigas más de M3 y 1 viga más de M4 las cuales se dejaron afuera.

### REGISTRO FOTOGRÁFICO



| **Fig. 4. 33.** Primera mezcla de mortero utilizando precursor VCP (vidrio, cerámica y papel) con dosificación de arriba.

---



| **Fig.** 4. 34. Ensayo de mesa de flujo de la primera mezcla de mortero después de los 25 golpes en 20 segundos.

---



| **Fig.** 4. 35. Ensayo de mesa de flujo de la segunda mezcla de mortero utilizando precursor VCP (vidrio, cerámico, papel).

---



| **Fig. 4. 36.** Mortero ya en el molde de las vigas sometiéndose a los 60 golpes en máquina.

---



| **Fig. 4. 37.** Ensayo de mesa de flujo de conjunto de la primera y la segunda mezcla de mortero.

---



**Fig. 4. 38.** Primeras 3 vigas colocadas en el horno a 70 °C.

---



**Fig. 4. 39.** Mortero de la segunda mezcla colocado en el molde de las vigas.

---



| **Fig. 4. 40.** Tercera mezcla utilizando como precursor testillo (menor a 0,75 mm) siguiendo la misma dosificación de arriba.

---



| **Fig. 4. 41.** Ensayo de mesa de flujo de la tercera mezcla utilizando como precursor testillo.

---



**Fig. 4.42.** Mortero hecho utilizando como precursor testillo ya en el molde de las vigas, sellado con plástico para meterlo al horno a 70 °C.

---



**Fig. 4.43.** Lo que sobró de las mezclas tanto de la que se hizo con VCP (vidrio, cerámica y papel) y la que se hizo con testillo se acomodó en otro molde de vigas las cuales se dejaron afuera.

---

Muestras 3/10/21

|   |          |              |        |                    |
|---|----------|--------------|--------|--------------------|
| 1 | 1200 g   | Arena        | 30s    | 2 y 3              |
| 2 | 1200 g   | Grana Vidrio | 30s    | 2 y 3 mix          |
| 3 | 420+40 g | Agua         | 30s    | 1,2 y 3 mix        |
| 4 | 100 g    | NaOH         | Raspar |                    |
| 5 | 12 g     | WG           | 60s    | 1,2 y 3 mix Rapido |

Guardado a M1-70° M2-40° Mix  
M1M2=100°

Una mezcla adicional M3 con  
Testillo a  $\geq 0,075$  mm (menor)

M3 = 70°C

Nota: Solo para 2 vigas que se dejan  
fuera  
M2 - estaba mas fluida

**Fig.** 4. 44. Notas escritas durante el desarrollo de la práctica.

## 4.6. Procedimiento sesión 22/12/21

(UHPC-35kg/m<sup>3</sup>-PVA)

Responsable: Yineth García; Ayudante: Alan Martínez Lugar: Sótano Lab. C1

### Diseño de mezcla

|               | Cemento               | Agua    | Arena                   | Adición activa             | Filler            | Fibras                         | Aditivo 1                                  | Aditivo 2  |
|---------------|-----------------------|---------|-------------------------|----------------------------|-------------------|--------------------------------|--|--|
| <b>Unidad</b> | Cemento CEMEX I 52,5R | -       | Arena Sílice SF 0.3/0.4 | Nanosilice MasterRoc MS685 | Filler BETOFLOW-D | Fibra PVA BASF MASTERFIBER 400 | Super plastificante Master Glenium ACE 425 | Aditivo Reductor de retracción BASF Masterlife SRA 2 |
| Kg            | 39,18                 | 4,98    | 53,41                   | 2,79                       | 9,79              | 1,71                           | 1,47 (1,75-1,94)                           | 0,39   |
| g             | 39176,46              | 4982,88 | 53413,72                | 2791,32                    | 9794,12           | 1713,97                        | 1469,12                                    | 391,76   |

Tabla 8. Diseño de mezcla sesión 22/12/21

### 1. Detalles Probetas

#### Prismáticas 3

|   |       |   |
|---|-------|---|
| a | 0,075 | m |
| b | 0,075 | m |
| L | 0,275 | m |

#### Cilíndricas 6

|   |      |   |
|---|------|---|
| D | 0,15 | m |
| L | 0,3  | m |

#### Cúbicas 3

|   |      |   |
|---|------|---|
| a | 0,15 | m |
|---|------|---|

### EQUIPOS

- Amasadora de eje vertical de >47 litros de capacidad
- Prensa Universal de Ensayos (UTM)
- Prensa IBERTEST
- Máquina de ensayo de flexión. Prensa INSTRON 8505
- Cono de Abrams, embudo en V, caja L, tamiz 5 mmØ
- 6 Moldes cilíndricos de 150x300 mm
- 3 Moldes cúbicos de 150 mm
- 3 Moldes prismáticos de 75x75x275 mm

1. Mezclado:
  - I. Cemento + arena + filler seco: 1 min.
  - II. Agregar agua + aditivos: 4-6 min (dependiendo de la consistencia).
  - III. Agregar fibras 2 min.
  
2. Repetir con corrección de aditivo 4.5% wc y/o 5% wc (1,75-1,94 kg)
3. Ensayos hormigón auto-compactante:
  - Slump-flow: Medir el tiempo que tarda en alcanzar un diámetro de 50 cm, (3 a 6 s), medir el diámetro final (65 y 75 cm).
  - Embudo en V (UNE-EN 12350-9:2011): Una vez llenado con hormigón fresco sin compactar se mide los segundos que tarda en vaciarse (6-12 s).
  - Segregación por tamiz (UNE-EN 12350-11:2010): Se deja reposar el hormigón 15 min, se anota si hay segregación visible. Se mide el % de masa que pasa el tamiz de 5 mm después de 2 min.
  
4. Llenar moldes.
5. Compactación: (no compactar)
6. Si no es auto-compactante repetir con corrección de aditivo 4.5% wc y/o 5% wc (1,75-1,94 kg).
7. Almacenar en cámara de curado 21°C y 50% HR.
8. Desencofrado: 02/11/21
9. Ensayos mecánicos 28 días (29/12/21)
  - Resistencia a compresión UNE-EN 12390-3
  - Resistencia a flexión residual UNE-EN 14651
  - Ensayo Barcelona, tracción indirecta UNE 83515.

#### **Resultados y Observaciones:**

- Ensayo Slump-Flow:  
D1= 81 cm y un tiempo de 4,4 segundos en alcanzar los 50 cm
  
- Ensayo Embudo en V:  
T1= 14,32 segundos  
T2= 14,00 segundos
  
- Le faltó agua a la mezcla (se le agregaron 2 litros más de agua).
- La mezcla se veía con exceso de fibra.
- En el ensayo del escurrimiento no se pudo determinar el diámetro 2 (d2) debido a que se deformó el flujo (d1= 81 cm).
- El tiempo en el que el flujo alcanzó el círculo de 500 mm fue de 4,4 segundos.
- El ensayo del embudo en V se realizó 2 veces consecutivas y el tv1 fue de 14,32 segundos y el tv2 fue de 14 segundos.
- El ensayo de segregación por tamiz no se llevó a cabo.

## REGISTRO FOTOGRÁFICO



**Fig. 4.45.** Fibra y cemento utilizado para la mezcla.

---



**Fig. 4.46.** Betoflow y arena utilizada para la mezcla.

---



**Fig. 4. 47.** Aditivos utilizados para la mezcla.

---



**Fig. 4. 48.** Equipo utilizado para el ensayo Embudo en V.

---



**Fig.** 4. 49. Mezcla en la revolvedora.



**Fig.** 4. 50. Como se puede observar la mezcla se ve seca.



**Fig.** 4. 51. Mezcla después de agregarle 2 litros de agua más.

---



**Fig.** 4. 52. Ensayo Slump Flow, el flujo se deformó.

---



| **Fig.** 4.53. Preparación para ensayo embudo en V, se observa que la mezcla tiene exceso de fibra.

---



| **Fig.** 4.54. Ensayo Embudo en V.

---

## Conclusiones

Al llegar al final de este trabajo de investigación queda claro que los desechos y subproductos industriales y de la industria del reciclado urbano, son materiales que al activarse alcalinamente son capaces de crear geopolímeros suficientemente resistentes para su utilización en aplicaciones estructurales, siendo éstos una gran alternativa de sustitución sobre el cemento Portland ordinario, el cual como se mencionó anteriormente, contribuye en gran proporción a la emisión de gases de efecto invernadero, sobre todo emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

En los gráficos ilustrados en los anexos se pueden ver las líneas de tendencia con su respectivo coeficiente de correlación (R), debido a que el valor de este coeficiente es menor que 0,7 en todos los casos, se puede concluir que no existen tendencias claras entre los parámetros establecidos en los gráficos y por ende los parámetros investigados no tienen influencia sobre la resistencia a la fuerza de compresión de los geopolímeros desarrollados. Esto puede ser debido a que los diseños de mezcla son diferentes para cada autor y de igual manera los procedimientos son diversos ya que al ser un tema relativamente nuevo apenas se encuentra en la fase de experimentación y la metodología ideal aun no esta clara ni establecida. El Gráfico 2, compara la concentración molar del activador con la resistencia a la fuerza de compresión, éste es el que tiene el coeficiente de correlación más alto de los gráficos con un valor de  $R=0,5922$ , no llega a 0,7 para confirmar que existe una correlación entre los parámetros del gráfico, pero sí que se acerca y analizándolo se puede observar que, en su mayoría, entre más alta es la concentración molar del activador es más resistente a las fuerzas de compresión. Otra tendencia que cabe resaltar es que la mayoría de los autores utilizan el hidróxido de sodio (NaOH) como activador alcalino, el cual ha dado resultados exitosos. Los Gráficos 7, 8 y 9 comparan los parámetros que utiliza cada autor de la Tabla 1, analizando éstos y buscando tendencias se puede concluir que no existe una temperatura de curado óptima que todos los autores sigan, pero sí que en su mayoría se basan en la “temperatura ambiente” de entre 23-25 °C, y cuando son sometidas a temperaturas más elevadas posteriormente igual se dejan curar a la misma “temperatura ambiente”. Sobre la relación líquido/sólido es fácil distinguir la tendencia de que los autores en su mayoría utilizan un valor que ronda alrededor del 0.5 para esta relación y hasta el momento ha dado resultados exitosos. Por último, el tamaño promedio de la partícula del precursor utilizado para el desarrollo de geopolímeros sí que varía, debido a que el material utilizado como precursor tienden a ser de diferentes orígenes, a pesar de que en esta investigación se buscaron solamente geopolímeros desarrollados a partir de residuos de vidrio, la metodología para su trituración es distinta en cada caso y el tamaño óptimo aún no es definido ni establecido.

Algunas de las pruebas que se llevaron a cabo a lo largo del trabajo experimental, fueron las de resistencia a fuerzas de flexión y compresión de los mismos geopolímeros desarrollados en el laboratorio. Los resultados fueron interesantes ya que las vigas de dimensiones 16 x 4 x 4 cm hechas con un precursor mezcla de vidrio, cerámico y papel, utilizando NaOH como activador

alcalino y fraguadas por 28 días resistieron 1,79 kN a flexión como máximo, y 47,13 kN a compresión.

Con estos resultados se puede confirmar que los geopolímeros desarrollados se pueden utilizar para aplicaciones estructurales, solamente en los casos que se demande una resistencia de valores menores a los que resultaron las pruebas para garantizar la seguridad de los usuarios, como puede ser en aplicaciones para la construcción de ciclovías. Debido a la alta demanda de reservaciones en el laboratorio que se llevaron a cabo las pruebas, y al tiempo de duración de la estancia de investigación, no se pudieron hacer más pruebas de este tipo a los geopolímeros desarrollados. Aun así, las pruebas llevadas a cabo fueron exitosas y sus resultados son de gran utilidad.

Este trabajo de investigación es un ejemplo de cómo se puede poner en práctica conocimientos de temáticas relativamente nuevas y que se necesitan empezar a llevar a cabo en nuestra sociedad lo más antes posible, pues estamos acabando con los recursos naturales no renovables de nuestro planeta. El hecho de que material desperdicio de muchas industrias, reciclado urbano, subproducto de demolición y construcción, desechos que anteriormente pensábamos que no servían para nada y simplemente terminaban ocupando espacio en vertederos, sea ahora una oportunidad de alternativa para usarse y comenzar a reemplazar materiales con alta demanda de la sociedad que solamente perjudican al medio ambiente explotando los recursos naturales no renovables de nuestro planeta, es una gran esperanza para la población actual y futura. Pues cada vez la sociedad se ve más obligada a tomar acciones más sostenibles en todos los aspectos, ya que las consecuencias de las malas acciones que hemos llevado a cabo por muchísimos años se están presentando ahora de manera exponencial y no se pueden ignorar.

## Agradecimientos

Para la elaboración del presente trabajo de investigación para estudiante de intercambio, quiero agradecer en especial al profesor Pablo Pujadas Álvarez por aceptar ser mi director y apoyarme a lo largo del presente, al profesor Ignacio Segura Pérez por recibirme y guiarme durante mi estancia de investigación, y por último a Yineth Paola García Díaz por ser mi tutora , mentora y orientarme en todas las sesiones del desarrollo de geopolimeros y en la realización del presente trabajo de investigación.

De la misma manera, me gustaría agradecer principalmente a mis padres y familia que se encuentran en México, por darme la gran oportunidad de poder hacer esta increíble estancia de investigación en Barcelona, España.

## Bibliografía

- [1] Xi Jiang, Rui Xiao, Yuetan Ma, Miaomiao Zhang, Yun Bai, Baoshan Huang, Influence of waste glass powder on the physico-mechanical properties and microstructures of fly ash-based geopolymer paste after exposure to high temperatures, *Construction and Building Materials*, Volume 262, 2020, 120579, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120579>. ;(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820325848>)
- [2] Nathália Cristina Gomes Silveira, Maysa Lorena Figueiredo Martins, Augusto Cesar da Silva Bezerra, Fernando Gabriel da Silva Araújo, Ecological geopolymer produced with a ternary system of red mud, glass waste, and Portland cement, *Cleaner Engineering and Technology*, Volume 6,2022, 100379, ISSN 2666-7908, <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100379>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790821003396>)
- [3] Hüseyin Ulugöl, Anil Kul, Gürkan Yıldırım, Mustafa Şahmaran, Alper Aldemir, Diogo Figueira, Ashraf Ashour, Mechanical and microstructural characterization of geopolymers from assorted construction and demolition waste-based masonry and glass, *Journal of Cleaner Production*, Volume 280, Part 1, 2021, 124358, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124358>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620344036>)
- [4] Ruizhe Si, Shuaicheng Guo, Qingli Dai, Jiaqing Wang, Atomic-structure, microstructure and mechanical properties of glass powder modified metakaolin-based geopolymer, *Construction and Building Materials*, Volume 254, 2020, 119303, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119303>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820313088>)
- [5] Sina Dadsetan, Hocine Siad, Mohamed Lachemi, Mustafa Sahmaran, Extensive evaluation on the effect of glass powder on the rheology, strength, and microstructure of metakaolin-based geopolymer binders, *Construction and Building Materials*, Volume 268, 2021, 121168, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121168>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182033172X>)
- [6] Hassan Rashidian-Dezfouli, Prasada Rao Rangaraju, Study on the effect of selected parameters on the alkali-silica reaction of aggregate in ground glass fiber and fly ash-based geopolymer mortars, *Construction and Building Materials*, Volume 271, 2021, 121549, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121549>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820335534>) Meysam Pourabbas Bilondi, Mohammad Mohsen Toufigh, Vahid Toufigh, Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils, *Construction and Building Materials*, Volume 170, 2018, Pages 302-313, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.049>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818305324>)
- [7] Yiyuan Zhang, Rui Xiao, Xi Jiang, Wenkai Li, Xingyi Zhu, Baoshan Huang, Effect of particle

size and curing temperature on mechanical and microstructural properties of waste glass-slag-based and waste glass-fly ash-based geopolymers, Journal of Cleaner Production, Volume 273, 2020, 122970, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122970>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620330158>)

- [8] Keoma do Carmo e Silva Defáveri, Letícia Figueiredo dos Santos, José Maria Franco de Carvalho, Ricardo André Fiorotti Peixoto, Guilherme Jorge Brigolini, Iron ore tailing-based geopolymer containing glass wool residue: A study of mechanical and microstructural properties, Construction and Building Materials, Volume 220, 2019, Pages 375-385, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.181>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819313601>)
- [9] Patrick N. Lemougna, Adeolu Adediran, Juho Yliniemi, Arnold Ismailov, Erkki Levanen, Pekka Tanskanen, Paivo Kinnunen, Juha Roning, Mirja Illikainen, Thermal stability of one-part metakaolin geopolymer composites containing high volume of spodumene tailings and glass wool, Cement and Concrete Composites, Volume 114, 2020, 103792, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103792>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946520302985>)
- [10] <https://www.arqhys.com/construccion/geopolimeros.html>
- [11] <https://www.cemex.es/productos-y-soluciones/clinker>
- [12] [https://www.definiciones-de.com/Definicion/de/precursor\\_quimico.php](https://www.definiciones-de.com/Definicion/de/precursor_quimico.php)
- [13] [https://es.wikipedia.org/wiki/Comportamiento\\_puzol%C3%A1nico](https://es.wikipedia.org/wiki/Comportamiento_puzol%C3%A1nico)
- [14] <https://1library.co/article/activador-alcalino-factores-determinantes-torno-proceso-activaci%C3%B3n-alcalina.qv840g0z>
- [15] [https://es.wikipedia.org/wiki/Relaci%C3%B3n\\_agua-cemento](https://es.wikipedia.org/wiki/Relaci%C3%B3n_agua-cemento)
- [16] <http://maestriaconcreto.com/images/TFM/EDRM.pdf>
- [17] <https://nuevatecnologiasymateriales.com/wp-content/uploads/2017/09/13.pdf>
- [18] <https://www.becosan.com/es/que-es-el-cemento-en-la-construccion/>
- [19] <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/category/cemento/propiedades-fisicas-del-cemento>
- [20] <https://1library.co/article/superficie-espec%C3%ADfica-par%C3%A1-metros-materiales-propiedades-relacionadas-l.yevr1v4z>
- [21] [https://es.wikipedia.org/wiki/Superficie\\_espec%C3%ADfica](https://es.wikipedia.org/wiki/Superficie_espec%C3%ADfica)

[22] <https://www.comprahormigon.com/blog/2018/03/fracuado-del-hormigon-temperatura-tiempo/>