



UNIVERSIDAD
DE CÓRDOBA



UNIVERSIDAD
DE GRANADA

**Máster en Tecnologías Avanzadas de Materiales para la
Construcción Sostenible**

Trabajo Fin de Máster

**APLICACIÓN DE CENIZAS DE FONDO
DE BIOMASAS DE OLIVO Y EUCALIPTO
ACTIVADAS ALCALINAMENTE PARA
LA FABRICACIÓN DE MATERIALES
BASE CEMENTO**

Autor:

Reinier Rodríguez Hernández

Tutores:

Dr. Francisco Agrela Sainz

Dra. Julia Rosales García

Córdoba, 2023

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis directores de tesis, la profesora Julia Rosales García y al profesor Francisco Agrela Sainz, por su orientación, apoyo y valiosas sugerencias a lo largo de todo este proceso.

No puedo dejar de reconocer la generosidad, entrega y labor formativa de todos los profesores del Máster, lo que permitió llevar a cabo este estudio de manera efectiva y con visiones tan acordes a los tiempos actuales.

Mi sincero agradecimiento se extiende a mis compañeros de laboratorio y colegas de investigación, cuya colaboración y confianza hicieron que este camino fuera más llevadero y enriquecedor.

De igual forma, reconozco la formación impartida por mi tutora de prácticas Isabel Mármol de Grupo PUMA S.L. y su confianza en mí.

A mis amigos y familiares, les estoy agradecido por su apoyo emocional y comprensión durante esta etapa de mi vida. Su aliento fue fundamental en los momentos más desafiantes.

Por último, pero no menos importante, dedico este trabajo a mi madre, hermana y en especial a mi pareja, por su amor incondicional, sacrificio y constante inspiración. Este logro es un reflejo de sus valores y enseñanzas.

Resumen

En un mundo cada vez más enfocado en la sostenibilidad y la gestión responsable de los recursos naturales, la utilización de residuos de diferentes industrias se presenta como una necesidad inevitable. Dentro de estos, los residuos de biomásas, lejos de considerarse como desechos, pueden transformarse en valiosos recursos para su aplicación en el campo de la construcción. Esta investigación se centra en explorar cómo las cenizas de fondo de biomásas de olivo y eucalipto procedentes de Extremadura, Linares y Puente Genil, activadas alcalinamente, pueden ser empleadas de manera efectiva en la producción de materiales de construcción, con un enfoque particular en la creación de geopolímeros, morteros y hormigones, respondiendo a la creciente demanda de soluciones constructivas sostenibles.

A partir de los ensayos de laboratorio correspondientes se hace, primeramente, una caracterización de las cenizas de fondo de biomásas concluyendo en su potencial como materiales cementicios suplementarios. Igualmente se evalúan los efectos de la activación con Hidróxido de Sodio, Metasilicato Disódico y Silicato de Sodio, de estas cenizas a partir del análisis de factores como la molaridad, las condiciones de curado, diferentes porcentajes de sustitución de cemento y varias composiciones con la incorporación de cenizas de alto horno.

Se conformaron geopolímeros con excelentes prestaciones mecánicas, destacando las muestras que incorporaron cenizas de alto horno en su composición. Según el análisis de los morteros se evidenció que al usar cenizas de fondo de biomásas activadas alcalinamente se logran mejores resultados a compresión en comparación con los morteros conformados con las cenizas sin activadores. Por otro lado, en hormigones, la mayor adición de este tipo de residuos generó resistencias más bajas en comparación con la muestra control, así como mayores porcentajes de absorción - porosidad y hormigones más ligeros.

Palabras Claves: CFB, activadores, geopolímeros, morteros, hormigones.

Abstract

In a world increasingly focused on sustainability and responsible management of natural resources, the utilization of waste from different industries is an unavoidable necessity. Within these, biomass residues, far from being considered as waste, can be transformed into valuable resources for application in the construction field. This research focuses on exploring how alkaline activated bottom ashes of olive and eucalyptus biomasses from Extremadura, Linares and Puente Genil can be effectively employed in the production of building materials, with a particular focus on the creation of geopolymers, mortars and concretes, responding to the growing demand for sustainable building solutions.

Based on the corresponding laboratory tests, a characterization of biomass bottom ashes is carried out, concluding on their potential as supplementary cementitious materials. Likewise, the effects of activation with Sodium Hydroxide, Disodium Metasilicate and Sodium Silicate of these ashes are evaluated from the analysis of factors such as molarity, curing conditions, different percentages of cement substitution and several compositions with the incorporation of blast furnace ashes.

Geopolymers with excellent mechanical performance were formed, highlighting the samples that incorporated blast furnace ashes in their composition. According to the analysis of the mortars, it was shown that by using alkaline activated biomass bottom ashes, better compression results were achieved compared to mortars made with ashes without activators. On the other hand, in concretes, the greater addition of this type of waste generated lower resistances compared to the control sample, as well as higher percentages of absorption-porosity and lighter concretes.

Key words: BBA, activators, geopolymers, mortars, concretes.

Contenido

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Abstract.....	iii
Introducción	1
Contexto y justificación	1
Objetivos de la investigación	3
Metodología	3
Estructura del trabajo.....	4
1. Fundamentos Teóricos	6
1.1 Biomasa y cenizas de biomasa	6
1.2 Propiedades físico-químicas de las cenizas de biomasa	9
1.3 Activación alcalina de cenizas de biomasa	13
2. Materiales	15
2.1 Cementos	15
2.2 Áridos Naturales	16
2.3 Arena Normalizada	17
2.4 Cenizas de Fondo de Biomasa (CFB)	17
2.5 Cenizas de Alto Horno (CAH).....	19
2.6 Activadores	20
Hidróxido de Sodio	20
Metasilicato Disódico (Sólido).....	21
Silicato de Sodio (Solución Comercial).....	21
2.7 Aditivos	22
3. Métodos	23
3.1 Procesamiento de CFB.....	25
3.2 Geopolímeros	26
3.2.1 Dosificación	28
3.2.2 Amasado y conformación de probetas	29
3.2.3 Resistencia a Compresión (UNE-EN 12390-32020).....	30
3.2.4 Difracción de Rayos X (UNE-EN 196-1:2004).....	31
3.2.5 Fluorescencia de Rayos X (UNE-EN 15309:2008).....	32
3.3 Morteros.....	33

3.3.1 Dosificación	34
3.3.2 Amasado y conformación de probetas	35
3.3.3 Resistencia a Flexión (UNE-EN 12390-5:2020)	36
3.3.4 Resistencia a Compresión (UNE-EN 12390-3:2020).....	37
3.4 Hormigones	37
3.4.1 Dosificación	38
3.4.2 Amasado y conformación de probetas	38
3.4.3 Resistencia a Compresión (UNE-EN 12390-3:2020).....	40
3.4.4 Flexotracción (UNE-EN 12390-5:2020)	40
3.4.5 Retracción (UNE-EN 12390-16:2020)	41
3.4.6 Densidad, absorción y porosidad (UNE 83980:2014).....	41
3.4.7 Penetración de agua (UNE-EN 12390-8:2020)	42
3.4.8 Carbonatación (UNE-EN 12390-10:2019)	43
4. Resultados y Análisis.....	44
4.1 Geopolímeros	44
4.1.1 Resistencia a Compresión.....	44
4.1.2 Difracción de Rayos X	50
4.1.3 Fluorescencia de Rayos X.....	52
4.1.4 Conclusiones parciales de los geopolímeros.....	53
4.2 Morteros.....	54
4.2.1 Resistencia a Flexión.....	54
4.2.2 Resistencia a Compresión	56
4.2.3 Conclusiones parciales de los morteros	59
4.3 Hormigones	61
4.3.1 Resistencia a Compresión.....	61
4.3.2 Flexotracción	62
4.3.3 Retracción.....	63
4.3.4 Densidad, absorción y porosidad.....	64
4.3.5 Penetración de agua.....	65
4.3.6 Carbonatación	65
4.3.7 Conclusiones parciales de los hormigones.....	66
5. Conclusiones	68
6. Sugerencias	72
7. Referencias.....	73

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de los Biocombustibles 2022.....	7
Figura 2. Cementos utilizados a) CEM I b) CEM IV	16
Figura 3. Áridos naturales. a) A/N 0-6mm b) A/N 6-12mm c) A/N 11-22mm.....	16
Figura 4. Arena Normalizada.....	17
Figura 5. Geolocalización de las fuentes de CFB.....	17
Figura 6. Geolocalización CAH.....	20
Figura 7. Ficha técnica del Hidróxido de Sodio. [55]	21
Figura 8. Ficha técnica del Metasilicato. [56].....	21
Figura 9. Ficha técnica Solución de Silicato de Sodio. [55].....	22
Figura 10. Esquema de la investigación.....	23
Figura 11. Esquema general de la metodología de la investigación	25
Figura 12. Metodología para el análisis de las CFB en geopolímeros	26
Figura 13. CFB procesadas sin lavar. a) CFB-E b) CFB-L c) CFB-PG	26
Figura 14. Nomenclatura y leyenda para las mezclas de geopolímeros	27
Figura 15. Signos de eflorescencia en geopolímeros con 14M.....	27
Figura 16. Amasado y confección de probetas de geopolímeros a) CFB-E b) CFB-L c) CFB-PG	30
Figura 17. Ensayo a compresión de los geopolímeros.....	31
Figura 18. Muestras para DRX y Difractómetro de Rayos X.....	32
Figura 19. Nomenclatura y leyenda para las mezclas de morteros.....	33
Figura 20. Amasado y confección de probetas de morteros a) Amasado b) Curado x 24h c) Probetas desmoldadas	36
Figura 21. Resistencia a flexión de morteros	36
Figura 22. Resistencia a compresión de los morteros.....	37
Figura 23. Nomenclatura y leyenda para las amasadas de hormigones.....	38
Figura 24. Conformación de probetas de los hormigones.....	39
Figura 25. Resistencia a compresión de los hormigones	40
Figura 26. Flexotracción en hormigones	40
Figura 27. Retracción en hormigones a) Medición de la retracción b) Curado en seco c) Curado en agua	41
Figura 28. Determinación de la Densidad y Absorción de los hormigones	42

Figura 29. Penetración de agua en hormigones.....	42
Figura 30. Indicador de fenolftaleína para la carbonatación de hormigones. Curado Húmedo (izquierda) y Curado en CO ₂ (derecha) a) HREF b) H25PG c) H25PGML....	43
Figura 31. Resistencia a compresión a los 28 días de los geopolímeros con NaOH...	46
Figura 32. Resistencia a compresión a los 28 días de los geopolímeros activados con NaOH, Metasilicato y Silicato	47
Figura 33. Evolución de la resistencia a compresión con el tiempo de los geopolímeros para los diferentes activadores.....	49
Figura 34. DRX para las CFB-E	50
Figura 35. DRX para las CFB-L.....	51
Figura 36. DRX para las CFB-PG.....	51
Figura 37. Resistencia a flexión de morteros sin activadores a los 28 días	55
Figura 38. Resistencia a flexión de morteros con 50% CFB y activadores a los 28 días	56
Figura 39. Resistencia a compresión de morteros sin activadores a los 28 días	58
Figura 40. Resistencia a compresión de morteros con 50% CFB y activadores a los 28 días	59
Figura 41. Resistencia a compresión de los hormigones	62
Figura 42. Flexotracción en hormigones a los 28 días	62
Figura 43. Retracción en hormigones.....	63

Índice de Tablas

Tabla 1. Propiedades físico-químicas de algunas CFB [30].....	12
Tabla 2. Ensayos de caracterización de CFB.....	18
Tabla 3. Caracterización CFB.....	18
Tabla 4. Componentes mayoritarios CAH	20
Tabla 5. Especificaciones de los aditivos [57]	22
Tabla 6. Dosificación de los geopolímeros con NaOH	28
Tabla 7. Dosificación de los geopolímeros con NaOH + Metasilicato Disódico	28
Tabla 8. Dosificación de los geopolímeros con NaOH + Silicato de Sodio	29
Tabla 9. Muestras para DRX y FRX	32
Tabla 10. Dosificación de los morteros de referencia.....	34
Tabla 11. Dosificación de morteros para un 50% de sustitución del cemento	34
Tabla 12. Dosificación en peso (kg) de las amasadas de hormigones	38
Tabla 13. Relación de probetas por amasada de hormigón	39
Tabla 14. Resistencia a compresión de geopolímeros activados con NaOH.....	44
Tabla 15. Resistencia a compresión de geopolímeros activados con NaOH + Metasilicato Disódico	45
Tabla 16. Resistencia a compresión de geopolímeros activados con NaOH + Silicato de Sodio.....	45
Tabla 17. Principales componentes (mass%) identificados por FRX en geopolímeros	52
Tabla 18. Resistencia a flexión de morteros sin activadores.....	54
Tabla 19. Resistencia a flexión de los morteros con 50% de sustitución y activación alcalina.....	54
Tabla 20. Resistencia a compresión de morteros sin activadores	57
Tabla 21. Resistencia a compresión de los morteros con 50% de sustitución y activación alcalina.....	57
Tabla 22. Resistencia a compresión y flexotracción de los hormigones	61
Tabla 23. Retracción en hormigones.....	63
Tabla 24. Densidad, absorción y porosidad de hormigones.....	64
Tabla 25. Penetración de agua en hormigones.....	65
Tabla 26. Frente de carbonatación de los hormigones	66

Introducción

Contexto y justificación

La economía circular como perspectiva económica emergente, está ganando cada vez más importancia en los discursos tanto de líderes políticos como empresariales, así como en las políticas económicas y medioambientales a nivel global. Este enfoque representa un cambio radical en la forma en que se concibe la economía, y ha sido respaldado por acciones concretas enmarcadas en The European Green Deal [1], la estrategia integral para hacer que Europa sea climáticamente neutra para 2050. Más concretamente, el Plan de Acción para la Economía Circular [2] aprobado por la Comisión Europea en marzo de 2020, representa una guía en esta materia con el objetivo central de prolongar la permanencia de los recursos en la economía de la Unión Europea durante el máximo tiempo posible. Dentro de este plan, se promueve la eficiencia energética, la descarbonización de la construcción, así como la promoción de materiales de construcción bajos en carbono y otros.

La importancia de esta transformación en la economía se hace evidente en el fomento de un enfoque que va más allá de la típica manera de producir y consumir en línea recta. En su lugar, se promueve un ciclo donde los recursos son utilizados, reciclados y reutilizados, logrando así, optimizar su aprovechamiento.

La continua urbanización y el crecimiento de la población mundial han llevado a una mayor demanda de materiales de construcción y demás servicios, lo que a su vez ha ejercido presión sobre los recursos naturales y ha contribuido significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero, por lo que la sostenibilidad y la conservación del medio ambiente han adquirido una

importancia crucial. En este contexto, la búsqueda de alternativas ecológicas y sostenibles se ha convertido en un objetivo primordial para ingenieros, científicos y expertos en la construcción, convirtiendo al sector constructivo en uno de los sectores cruciales para materializar la transición hacia una economía circular a través de la investigación y la innovación.

Según datos del Instituto de la Ingeniería de España, la biomasa es la fuente de energía autóctona más importante en Europa desde 2016, por delante de los combustibles fósiles, y cada año, la biomasa forestal aumenta en unos 46 millones de metros cúbicos, de los que España solo aprovecha un 40%, por debajo de la media europea que es del 61% [3]. De acuerdo con los números y las políticas actuales y futuras, la biomasa como fuente de generación de energía tiene un gran potencial de crecimiento en los próximos años, sin embargo, esta producción genera, como todas, un volumen importante de residuos que terminan en los vertederos, convirtiéndose en un problema de contaminación ambiental.

Una de las áreas de investigación que ha surgido con fuerza es la utilización de este tipo de residuos, en particular las cenizas de fondo de biomasa (CFB), en la producción de materiales de construcción. Estas cenizas, que solían ser consideradas desechos, están ganando reconocimiento como valiosos recursos en la industria de la construcción y su potencial radica en la capacidad de reemplazar parcialmente materiales tradicionales, como el cemento o los áridos naturales, en la formulación de hormigones y otros compuestos utilizados en la construcción.

La presente investigación aborda la correlación de estos dos conceptos: la economía circular y la industria de la construcción, explorando cómo el enfoque sostenible puede transformar la forma en la que conciben y abordan los procesos constructivos, la selección de materiales y la gestión de residuos en el sector, particularmente a través de la valorización y aplicación de cenizas de fondo de biomasa activadas alcalinamente en la formulación de materiales de construcción, y más específicamente en la producción de materiales a base de cementos. Los objetivos propuestos para el desarrollo del trabajo son los siguientes.

Objetivos de la investigación

Objetivo Principal:

1. Establecer parámetros de referencia para la aplicación y aprovechamiento de cenizas de fondo provenientes de la combustión de biomásas de olivo y eucalipto, activados alcalinamente en la sustitución de cemento para la formulación de geopolímeros, morteros y hormigones como una búsqueda de alternativas eficientes y sostenibles.

Objetivos Específicos:

1. Realizar un análisis comparativo de las diferentes técnicas de activación, tanto mecánicas como químicas, aplicadas a los residuos de biomásas de olivo y eucalipto, con el fin de determinar la más adecuada en función de sus propiedades y su potencial de valorización.
2. Evaluar el comportamiento físico químico, las condiciones de curado de geopolímeros a partir de diferentes porcentajes de concentración tanto de los activadores químicos como de cenizas de fondo de biomásas.
3. Conformar morteros que incorporen diferentes sustituciones de los productos activados, enfocándose en la obtención de prestaciones mecánicas óptimas y características idóneas para una posible salida comercial.
4. Formular y desarrollar un hormigón con alto grado de sustitución de cemento por los residuos activados provenientes de biomásas de olivo y eucalipto con el objetivo de evaluar su desempeño mecánico, su durabilidad y su eficiencia ecológica como hormigón para pavimentos rurales y ciclovías.

Metodología

Con los objetivos centrales planteados se diseña una metodología a través de la cual se logren los resultados deseados. Primeramente, se hace una revisión bibliográfica de la literatura científica y técnica de las cenizas de biomásas y su uso en matrices cementicias para la formulación de geopolímeros, morteros y

hormigones, así como las diferentes técnicas, métodos de activación, precursores y activadores para entender el estado actual del conocimiento, conocer los avances previos en el campo y establecer una base sólida de investigación. A continuación, se hace una caracterización de los materiales a utilizar para determinar, entre otros parámetros, las propiedades clave de los residuos que pueden influir en la reactividad alcalina y el rendimiento en los productos finales.

Para evaluar aspectos como la resistencia mecánica, la durabilidad y la eficiencia de la activación se diseñan mezclas utilizando los residuos activados para producir geopolímeros en diferentes concentraciones y condiciones de curado, realizando los ensayos pertinentes a Resistencia a Compresión, Difracción de Rayos X y Fluorescencia, así como el estudio de las condiciones de curado para las diferentes cenizas de biomásas. De forma similar, pero sin incluir los ensayos químicos, se realizan morteros a base de cementos con sustituciones de este por CFB y se ensayan sus prestaciones mecánicas, incluyendo la Resistencia a Flexión.

Finalmente se formulan hormigones con un alto contenido de las CFB en sustitución del cemento, evaluando la trabajabilidad, el desempeño mecánico y la durabilidad a través de los ensayos de Resistencia a Compresión, Resistencia a Flexotracción, Densidad y Absorción, Retracción, Penetración de Agua y Carbonatación.

Estructura del trabajo

La presente investigación se organiza en cuatro capítulos principales. Un primer capítulo, denominado “Fundamentos Teóricos”, tiene como objetivo establecer los pilares conceptuales de la investigación, donde se exponen las percepciones esenciales, incluyendo el empleo de biomásas de olivo y eucalipto y la generación de subproductos como las cenizas volantes y, especialmente, las cenizas de fondo. Se profundiza en los métodos de activación alcalina, tanto químicos como mecánicos, y se analiza la función de los activadores en este proceso. Además, se explora la aplicación de estas cenizas en matrices

cementicias tales como geopolímeros, morteros y hormigones, resaltando su potencial como alternativas ecológicas. También se realiza un estado del arte, revisando investigaciones previas en el campo para identificar avances, desafíos y oportunidades presentes.

El segundo capítulo, “Materiales”, se centra en la descripción detallada de los materiales utilizados y las técnicas de ensayo empleadas en el estudio. Se presenta una exposición completa de los materiales, desde las cenizas de fondo de biomásas de olivo y eucalipto hasta los activadores químicos, cementos y áridos usados.

Seguidamente, en el tercer capítulo, denominado “Métodos”, se detallan las consideraciones generales y los métodos de ensayo utilizados para evaluar propiedades físicas y químicas, tales como la resistencia mecánica, durabilidad y absorción de agua en los materiales de construcción desarrollados.

El cuarto capítulo, “Resultados y análisis”, presenta y analiza los resultados obtenidos de los diferentes ensayos experimentales, comparando y contrastándolos con las investigaciones anteriores en pos de resaltar los avances y contribuciones.

Por último, se resumen las revelaciones claves de la investigación y se extraen conclusiones, haciendo hincapié en las implicaciones y aplicaciones en la industria de la construcción, y así concebir recomendaciones para investigaciones futuras, señalando áreas que podrían ser exploradas en profundidad para ampliar aún más el conocimiento en este campo.

1. Fundamentos Teóricos

1.1 Biomasa y cenizas de biomasa

La biomasa se define como la fracción biodegradable de los productos, residuos y desechos de origen biológico procedentes de actividades agrarias, incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal, de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos, incluidos los residuos industriales y municipales de origen biológico [4].

En el contexto energético, la biomasa puede considerarse como la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. Estos recursos biomásicos pueden agruparse de forma general en agrícolas y forestales. También se considera biomasa la materia orgánica de las aguas residuales y los lodos de depuradora, así como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y otros residuos derivados de las industrias [5].

Con el fin de promover el desarrollo del sector de la Bioenergía en España, la Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa (AVEBIOM) cubre toda la cadena de valor de la biomasa, dando visibilidad y apoyo a los distintos proyectos. Según su informe [6] se identifican 163 centros de fabricación de biocombustibles sólidos con capacidad para fabricar cada año cantidades considerables de pellet, astilla y hueso, así como de garantizar el suministro de energía renovable en todo el país. La Figura 1 muestra la distribución de estos centros para España y Portugal en 2022

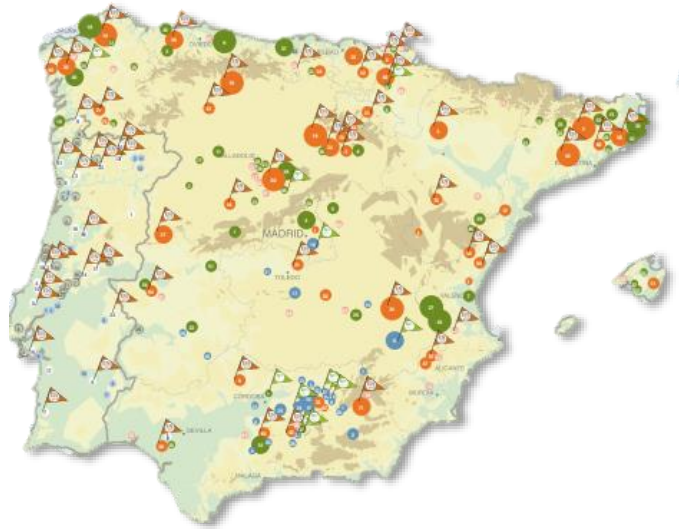


Figura 1. Mapa de los Biocombustibles 2022

La biomasa es considerada como una fuente de energía renovable porque su producción y consumo pueden ser sostenibles, siempre y cuando se maneje de manera adecuada y se renueve de forma continua. En España, se emplean principalmente tres tecnologías para transformar las materias primas biomásicas en energía eléctrica y térmica: la gasificación, la biodigestión y la combustión.

- **Gasificación:** Implica someter la biomasa a temperaturas muy elevadas (entre 800-1300°C) en presencia de cantidades limitadas de oxígeno, lo suficiente para permitir una combustión incompleta. Dependiendo de si se utiliza aire u oxígeno puro, se obtienen dos productos diferentes. En el primer caso, se genera un gas llamado gasógeno o gas pobre, que puede utilizarse para producir electricidad y vapor. En el segundo caso, cuando se emplea oxígeno y vapor de agua en un gasificador, se obtiene gas de síntesis.
- **Biodigestión:** Los procesos biológicos se fundamentan en la acción de diversos tipos de microorganismos que descomponen las moléculas en compuestos más simples con una alta densidad de energía. Estos métodos son especialmente efectivos cuando se trata de biomasa con un alto contenido de humedad. Los más conocidos entre ellos son la fermentación alcohólica, que produce etanol, y la digestión anaerobia, que genera metano. La digestión anaerobia implica la descomposición de la biomasa mediante bacterias en ausencia de oxígeno. Este proceso se

puede aplicar en explotaciones de ganadería intensiva mediante la instalación de digestores o fermentadores.

- **Combustión:** En este proceso, la biomasa se somete a altas temperaturas (entre 600-1300°C) en presencia de entre un 20-40% de oxígeno. Este método es el tradicional para generar calor en aplicaciones domésticas, producción industrial de calor y generación de energía eléctrica. Normalmente, la combustión se lleva a cabo en sistemas compuestos por un horno, una caldera y un turbogenerador.

Durante el proceso de combustión, se generan dos tipos principales de residuos: cenizas volantes y cenizas de fondo. Las cenizas volantes son finas y ligeras, y se elevan con los gases de combustión. En la mayoría de los casos se capturan utilizando equipos de control de emisiones, como precipitadores electrostáticos o filtros de mangas, para evitar su liberación al medio ambiente. Las cenizas volantes a menudo se utilizan como material de relleno en aplicaciones de construcción [7], [8]. Por otro lado, las cenizas de fondo son más pesadas y caen a la base de la caldera durante la combustión. Estas cenizas son ricas en minerales y compuestos químicos, lo que las convierte en un subproducto valioso del proceso de generación de energía, pudiéndose utilizar de diversas maneras, dependiendo de sus propiedades químicas y físicas [9]. Un ejemplo de su uso es en la mejora de suelos agrícolas o la fabricación de biofertilizantes aprovechando los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, como el potasio y el fósforo que tienen en su composición. La fabricación de materiales de construcción es otra variante en la cual, las CFB son una materia prima importante a considerar para la transición del sector hacia una producción cada vez más sostenible y la eficiencia energética [10].

Diversos tipos de CFB, como la proveniente de la cáscara de arroz [11], [12], el bambú [13], [14] y el bagazo [15], exhiben una considerable capacidad puzolánica, convirtiéndolas en candidatas idóneas para reemplazar parcialmente al cemento en la producción de morteros y cementos, así como para sustituir las cenizas de carbón convencionales en aplicaciones similares [16].

Numerosos estudios respaldan la viabilidad de utilizar tanto cenizas volantes de biomasa (CVB) como CFB en la fabricación de morteros y hormigones, no solo

como sustitutos del aglomerante, sino también como sustitutos de los áridos [17]–[20]. Igualmente, cabe destacar que el potencial de las cenizas de biomasa no se limita únicamente a su aplicación en cementos y hormigones convencionales, algunas investigaciones han identificado este material como un precursor prometedor en la preparación de cementos [21]–[23] o geopolímeros activados con álcalis [24], [25].

Existen múltiples ventajas ambientales y económicas derivadas de emplear los residuos de la combustión de biomasa en la producción de cementos, hormigones y geopolímeros, que respaldan el interés en la utilización de estas cenizas, por ejemplo:

- **Circularidad:** Se aprovechan los residuos que originalmente estaban destinados a ser depositados en vertederos, transformándolos en recursos valiosos en lugar de desechos.
- **Conservación de recursos naturales:** Al sustituir parte de las materias primas tradicionales con residuos de composición similar, se reduce la demanda de recursos naturales.
- **Mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero:** Los residuos ingresan a los procesos de producción con un balance de emisiones neutro, ya que han alcanzado el final de su ciclo de vida. Reemplazar el cemento y los agregados por cenizas de biomasa contribuye a evitar las emisiones asociadas a la producción de estos materiales, lo que a su vez reduce las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero.
- **Ausencia de residuos al final del proceso:** La incorporación de las cenizas a los productos finales garantiza que no se genere ningún residuo adicional al final del proceso de valorización.

1.2 Propiedades físico-químicas de las cenizas de biomasa

En el proceso de combustión de biomasa en una central de energía, el tipo de biomasa utilizada es el factor principal que influye en las características de las cenizas tanto de aquellas que, debido a su tamaño reducido, son arrastradas por la corriente de aire de la combustión como de las depositadas en el fondo del

horno. Sin embargo, se identifican otros factores que también desempeñan un papel significativo en la determinación de las propiedades de estas cenizas como son:

- La naturaleza y/o composición de las biomásas. Esto incluye la especie de árbol o cultivo agrícola de origen, la proporción de corteza del árbol, el tipo de biomasa, la presencia de materia inorgánica (tierra, lodo) que pueda estar presente.
- El tratamiento previo aplicado a los insumos, que puede incluir procesos como la trituración, el tamizado, la eliminación de impurezas como hierros en el caso de madera reciclada, y la adición de aditivos en el caso de la biomasa agrícola.
- El tipo de proceso térmico empleado (combustión directa, gasificación, biodigestión)
- El tamaño de las astillas, la eficiencia y temperatura de la combustión, ya que cuando las astillas son más grandes, tienden a generar un mayor número de residuos no quemados durante el proceso.
- El método de recuperación de las cenizas, que puede incluir la mezcla o no de las cenizas fondo con las cenizas volantes.
- La elección del equipo de combustión, que puede incluir tecnologías como lecho fluidizado, horno de parrilla, horno de lecho fijo u horno pulverizado.
- El tratamiento de los gases de combustión, que puede implicar la utilización de filtros en la salida, ciclones o precipitadores electrostáticos para la captura de las cenizas volantes.
- El uso de técnicas de pos tratamiento, que a veces implican la mezcla con otros productos químicos para extraer componentes que puedan dar lugar a reacciones no deseadas o la trituración y el tamizado para obtener un tamaño de partícula adecuado para su posterior valorización.

Es importante considerar que, en el caso de las biomásas agrícolas, éstas suelen contener cantidades significativas de sílice, cloro y potasio, para lo que se añaden compuestos químicos como el carbonato cálcico (CaCO_3) con el objetivo de prevenir la formación de ácido clorhídrico o ácido sulfúrico durante la combustión. Estos aditivos tienen un impacto directo en la composición de las

cenizas, especialmente en las CFB, al igual que los aglutinantes naturales usados para darle forma a los pellets de biomasa [26].

Los equipos de combustión, como las parrillas, los lechos fluidizados y los hornos pulverizadores, no solo afectan la distribución de peso de las cenizas, sino también su calidad y tamaño [27]. Por ejemplo, se ha observado que las CVB generadas por los lechos fluidizados contienen menos bioelementos (Cr, Ni, Pb y Zn), que se traduce en un mejor comportamiento para los análisis de lixiviación en comparación con las CVB producidas en hornos de parrilla. Por otro lado, en las plantas de energía que utilizan la tecnología de combustión directa mediante sistemas de parrilla, la generación de residuos se compone de aproximadamente un 80% de CFB y un 20% de CVB [27].

En la Tabla 1 se recogen las principales propiedades físico-químicas de algunas CFB de diferentes biomasa estudiadas.

Como puede observarse, la composición química de las CFB varía considerablemente según las temperaturas de combustión y el tipo de biomasa, como se comentó anteriormente, resultando en la presencia de diferentes fases que afecta a la densidad y la capacidad de absorción de las partículas.

Las cenizas son sólidos químicamente heterogéneos y amorfos, tienen una superficie hidrófila, son partículas muy porosas y de textura franco limosa, características que la hacen un potencial adsorbente de CO₂ [28].

Por lo general, las cenizas de biomasa forestal y los residuos de la industria del olivo tienen altos porcentajes de CaO y SiO₂ [29], y en menor medida, óxidos de magnesio, aluminio y potasio. La composición mineral de las cenizas de plantas con períodos reproductivos largos, es muy diferente de las de plantas cosechadas varias veces al año, como los cereales, debido a la dinámica de flujo de nutrientes con el suelo, estos últimos contienen mayores cantidades de óxidos, especialmente de potasio y fósforo [30].

Tabla 1. Propiedades físico-químicas de algunas CFB [30]

Origin of BBA	Wood Biomass (Fir chips)	Forest Biomass (Eucalyptus Bark)	Olive Waste and Wood Biomass	Olive Waste and Wood Biomass	Olive Waste and Wood Biomass	Wood Biomass and Waste Paper Sludge	Wood Chips and Cocoa Shell	Olive Waste and Wood Biomass	Olive Waste and Wood Biomass	Olive Waste and Wood Biomass	Olive Waste and Wood Biomass	Wheat, Rye, Oat, Corn Straw and Straw Waste	Olive Trimblings
Physical Properties													
Density SSD (kg/dm ³)	2.60	2.65	1.67	1.86	2.02	2.31	2.52	1.97	2.46	1.82	2.35	2.35	
Absortion (%) Water	-	-	19.00	21.18	19.9	5.25	-	26.60	20.11	31.99	-	-	
Size (mm)	-	-	0-2	0-4	0-2	0-1	0-0.6	0-10	0-10	0-10	0-0.1	0-0.1	
Chemical properties													
CaO (%)	48.40	17.15	19.75	16.57	-	23.7	8.3	23.9	23.48	22.88	29.96	9-12	31.41
SiO ₂ (%)	14.80	72.18	48.20	55.50	-	44.8	10.2	52	53.79	46.79	27.87	49-64	6.84
K ₂ O (%)	11.10	5.54	15.78	7.67	-	2	32.2	18.8	17.20	17.71	23.22	-	12.31
MgO (%)	9.90	1.96	3.94	2.64	-	2	15.8	1.4	1.86	1.52	4.05	-	2.45
SO ₃ (%)	-	-	-	-	-	4.6	1.3	-	-	-	0.76	-	0.14
Fe ₂ O ₃ (%)	-	-	-	-	-	4.8	2.8	0.7	1.15	1.29	3.59	-	1.39
Al ₂ O ₃ (%)	3.20	2.29	1.42	5.39	-	11.5	1.6	1.9	0.40	0.43	4.34	-	2.73
TiO ₂ (%)	-	-	-	-	-	-	0.29	0.2	0.08	0.08	0.35	-	-
Na ₂ O (%)	1.00	0.88	0.51	0.28	-	1.8	-	0.2	0.26	0.20	0.35	-	0.11
LOI (%)	-	-	-	-	-	1.9	15.3	-	15.50	-	-	-	42.00
Soluble Sulphate (%)	-	-	0.27	0.31	0.47	-	-	0.41	0.39	0.35	-	-	-
Organic matter content (%)	-	-	5.26	4.34	3.06	-	-	4.12	4.89	4.85	-	-	-

1.3 Activación alcalina de cenizas de biomasa

La activación alcalina es un proceso químico fundamental que transforma las cenizas de fondo de biomasa en aglutinantes [31], que pueden ser utilizados en la producción de materiales de construcción sostenibles y funcionales, como los geopolímeros. Este proceso es esencial para aprovechar al máximo el potencial de las CFB [32] y convertirlas en una alternativa al cemento Portland o como sustitutas de áridos naturales.

La manipulación de varios parámetros durante el proceso de activación alcalina puede influir en las propiedades finales del material resultante. Estos parámetros incluyen la concentración y el tipo de agente alcalino, la relación agua-cenizas, la temperatura y el tiempo de curado [16], [33]. Ajustar estos factores cuidadosamente permite controlar la resistencia mecánica, la porosidad y la durabilidad del material [34], entre otras propiedades.

Los materiales resultantes de la activación alcalina, como los geopolímeros, exhiben propiedades mecánicas que pueden ser comparables o incluso superiores a las del cemento Portland convencional [35]. Además de su resistencia mecánica, estos materiales son conocidos por su durabilidad y resistencia al fuego [36], lo que los hace adecuados para una variedad de aplicaciones en la construcción.

La clasificación de los aglutinantes activados por álcalis se basa en la composición de los materiales precursores, lo que influye directamente en la naturaleza de las fases formadas en su estructura. La principal diferencia entre los distintos grupos radica en la cantidad de calcio presente en el sistema [10].

En los sistemas de aluminosilicato activados por álcalis con bajo contenido de calcio, conocidos como geopolímeros, el producto de reacción principal es un gel de tipo aluminosilicato alcalino [37]. Por otro lado, los sistemas activados por álcalis con alto contenido de calcio generan un gel de hidrato de aluminosilicato de calcio [38]. Para llevar a cabo esta activación alcalina, se utilizan sustancias comunes como NaOH [15], [33], KOH [39] e incluso la combinación de NaOH y Na₂SO₃ como activadores [36], [40], [41]. Estas sustancias desempeñan un papel fundamental en el proceso de formación de los materiales activados alcalinamente y determinan en gran medida sus propiedades finales [10].

La inclusión del metasilicato disódico y el silicato de sodio como activadores en combinación con el NaOH aporta una dinámica química y funcional al proceso de geopolimerización de las cenizas de fondo de biomásas.

El metasilicato disódico, al ser introducido en la mezcla, proporciona una fuente adicional de sílice, que es fundamental para la formación de la estructura de geopolímero [42]. La sílice actúa como un precursor que reacciona con los álcalis presentes, incluyendo el hidróxido de sodio, para formar enlaces Si-O-Al en la matriz del geopolímero. Esta contribución adicional de sílice aumenta la disponibilidad de reactivos para la reacción y, potencialmente, favorece la formación de estructuras más densas y resistentes [43].

El silicato de sodio, por su parte, es una fuente rica en sílice y álcalis, lo que lo convierte en un activador multifacético [44], [45]. Su inclusión puede influir en la velocidad y la cinética de la reacción, ya que proporciona componentes reactivos en mayor cantidad. Esto podría acelerar la formación de enlaces y estructuras tridimensionales, aunque un control adecuado de la proporción y la concentración es crucial para evitar efectos no deseados [46].

2. Materiales

Los materiales utilizados en este estudio, tanto en la línea de investigación de geopolímeros como en morteros y hormigones son los siguientes:

- Cemento Portland tipo CEM I
- Cemento Puzolánico tipo CEM IV
- Árido Natural
- Arena Normalizada
- Cenizas de Biomosas de Eucalipto de Extremadura (CFB-E)
- Cenizas de Biomosas de Olivo de Linares (CFB-L)
- Cenizas de Biomosas de Olivo de Puente Genil (CFB-PG)
- Escoria de Alto Horno (EAH)
- Hidróxido de Sodio
- Metasilicato Disódico (Sólido)
- Silicato Líquido (Solución Comercial)
- Aditivo Sikament – 242HW
- Aditivo Sika Viscocrete 6003 NG

A continuación, se hace una descripción de cada uno de ellos, presentando sus principales componentes, procedencia y características más relevantes.

2.1 Cementos

Se usan dos tipos de cementos procedentes de Cementos Portland Valderrivas. Se opta por el uso de un CEM I para que con la adición de cenizas de biomosas poder lograr las características de un CEM IV.

- Cemento Portland tipo CEM I R-RS 3 de resistencia media – alta 42,5 MPa a 28 días, con resistencia inicial elevada y resistente a los sulfatos (Figura 2a).

- Cemento puzolánico tipo CEM IV/B (V) 42,5 N-LH/SR con adición de ceniza volante (V) de resistencia media 42,5 Mpa a 28 días, con resistencia inicial normal (N). Cemento de bajo calor de hidratación (LH) y resistente a sulfatos (SR) (Figura 2b).



Figura 2. Cementos utilizados a) CEM I b) CEM IV

2.2 Áridos Naturales

Los agregados naturales utilizados proceden de Áridos y Hormigones Carbonell SL, empresa ubicada en Córdoba, dedicada a la fabricación, almacenamiento, compra y venta al por mayor y por menor, importación y exportación, distribución, comercialización y transporte de toda clase de áridos y hormigones. Como agregado fino se utilizó Arena Natural (AN) de tamaño 0/4mm, el agregado grueso es Grava Gruesa Natural de 11/22mm y Grava Mediana Natural de 6/12mm como se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Áridos naturales. a) A/N 0-6mm b) A/N 6-12mm c) A/N 11-22mm

2.3 Arena Normalizada

La arena normalizada (Figura 4) según DIN EN 196-1, de Beckum, Alemania fue usada para la conformación de los morteros. Los tamaños de grano se encuentran en el rango de entre 0,08 y 2,00 milímetros. El grado máximo de humedad de la arena es del 0,2% y está empaquetada en bolsas con un peso de 1.350 (± 5) gramos.



Figura 4. Arena Normalizada

2.4 Cenizas de Fondo de Biomásas (CFB)

Para la investigación se tomaron muestras de residuos de cenizas de fondo de tres centrales de biomásas del sur de España, específicamente cenizas de la combustión de desechos principalmente de eucalipto de Extremadura (CFB-E), y dos tipos de cenizas procedentes de la quema y procesamiento de restos de olivo de Linares (CFB-L) y Puente Genil (CFB-PG). La Figura 5 muestra la geolocalización de la procedencia de estas materias primas.

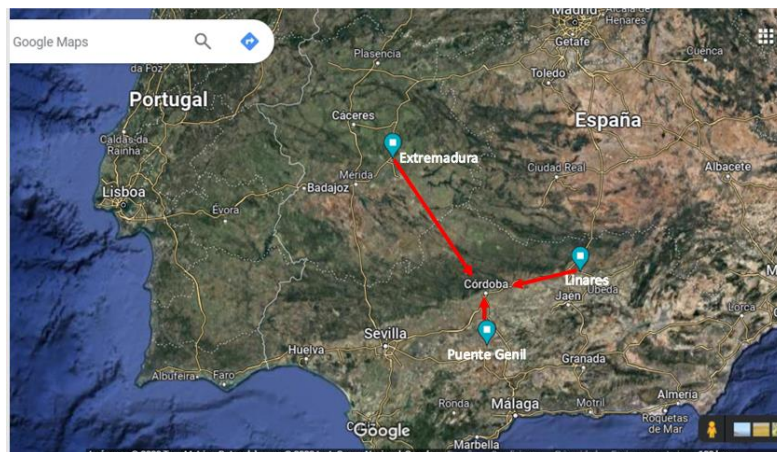


Figura 5. Geolocalización de las fuentes de CFB

Las CFB fueron analizadas para evaluar su composición y propiedades. Los ensayos incluyeron aspectos como la granulometría, densidad y absorción, componentes mayoritarios, índice de lajas, solubilidad de sulfatos en agua y ácido, equivalente de arena, coeficiente de friabilidad y cloruros solubles en agua. Estos estudios y sus resultados se detallan en la Tabla 2 y Tabla 3, respectivamente.

Tabla 2. Ensayos de caracterización de CFB

Ensayo	Norma	CFB		
		CFB-E	CFB-L	CFB-PG
Granulometría	UNE-EN 933-1:2012	X	X	X
Componentes Mayoritarios	UNE-EN 196-2:2014	X	X	X
Densidad y Absorción	UNE-EN 1097-6:2014	X	X	X
Lajas	UNE-EN 933-3:2012	X		X
Sulfatos Solubles en Agua y Ácido	UNE 103201:2019	X	X	X
Equivalente de Arena	UNE-EN 933-8:2012		X	X
Coeficiente de Friabilidad	UNE 146404:2018		X	X
Cloruros Solubles	UNE-EN 1774-1:2009		X	X

A continuación, la Tabla 3 recoge los resultados de los ensayos mencionados.

Tabla 3. Caracterización CFB

Ensayo	CFB			
	CFB-E	CFB-L	CFB-PG	
Componentes Mayoritarios (%)	Si	15,91	14,65	17,10
	Ca	21,09	22,65	19,52
	Al	3,10	2,69	3,49
	K	19,29	19,81	18,76
	Mg	2,84	3,39	2,27
	Fe	2,52	2,24	2,80
	Na	2,15	2,69	1,51
	Mn	0,05	0,05	0,05
Densidad (g/cm ³)	1,926	1,911	2,012	
Absorción (%)	10,31	19,90	19,56	
Lajas (%)	4,68	-	9,44	
Sulfatos Solubles en Agua (%)	0,0012	0,0030	0,0006	
Sulfatos Solubles en Ácido (%)	0,0017	0,0033	0,0057	
Equivalente de Arena (%)	-	67,00	69,83	
Coeficiente de Friabilidad (%)	-	20,00	24,93	
Cloruros Solubles en Agua (g/100g)	-	0,0023	0,0025	

El análisis de los resultados demuestra contenidos significativos de calcio, potasio y sílice, lo que brinda indicios alentadores sobre la utilidad de las cenizas como materiales cementicios suplementarios. La presencia de calcio, componente esencial en la producción de cemento, podría contribuir a fortalecer las propiedades mecánicas y la durabilidad de los materiales [47], [48]. El análisis sugiere que las cenizas con alto contenido de potasio podrían ser adecuadas para reacciones de activación alcalina, lo que abriría la posibilidad de desarrollar materiales cementicios alternativos con menor huella de carbono y mayores propiedades de durabilidad, así como la alta presencia de sílice abre la puerta a la formación de geles y compuestos cementicios que, en conjunto, favorecen la unión de las distintas fases mejorando las propiedades de resistencia y estabilidad de los resultados finales [49]–[51].

Las densidades entre 1.91 y 2.01g/cm³ caracterizan a estas cenizas como ligeras en comparación con otros materiales comúnmente utilizados, lo que influye directamente en la ligereza de los productos finales. Por otro lado, los altos porcentajes de absorción exhibidos por estos residuos, entre 10 y 19.9%, pueden tener implicaciones en la porosidad y el comportamiento higroscópico de los materiales, así como que representan un alerta a la hora de configurar la relación agua/cemento en las mezclas, aspectos significativos en la evaluación de su rendimiento en condiciones reales de construcción [52].

Considerando estos resultados, se concluye que las cenizas de fondo de biomásas poseen propiedades que las hacen promisorias para su incorporación en la industria de la construcción como materiales cementicios suplementarios a través de la activación alcalina. En el desarrollo de la presente investigación se analizarán estas cuestiones.

2.5 Cenizas de Alto Horno (CAH)

En este caso, se utilizó ceniza molida de alto horno de la empresa Lafarge Holcim, Carbonera Almería (Figura 6). La escoria granulada de alto horno es un subproducto del enfriamiento de la escoria de fundición. Se ha utilizado anteriormente en la fabricación de cementos, ya que es capaz de limitar el calor de hidratación del material cementante. El rápido enfriamiento de este subproducto lo hace muy amorfo, lo que beneficia la activación alcalina [53].

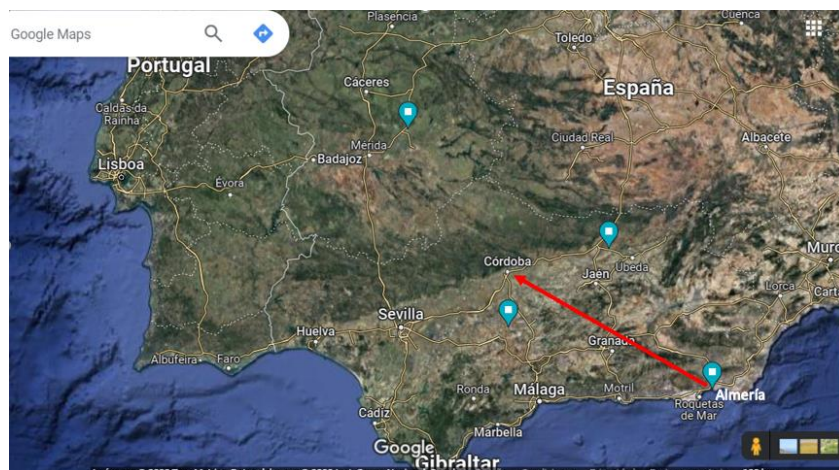


Figura 6. Geocalización CAH

Su composición química depende de las materias primas utilizadas en el proceso de fabricación del hierro, conteniendo principalmente óxidos de calcio, silicio y aluminio, como se expresa en la Tabla 4.

Tabla 4. Componentes mayoritarios CAH

Componentes Mayoritarios (%) [54]									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TAN ₃	K ₂ O	Densidad (kg/dm ³)	Absorción de agua (%)
CAH	49.10	28.33	5.20	7.81	2.12	0.33	0.91	1.28	4.35

2.6 Activadores

Para la evaluación de las propiedades y prestaciones de las cenizas de fondo de biomásas y su incorporación en geopolímeros, morteros y hormigones se trabajó con tres activadores distintos.

Hidróxido de Sodio

Se utilizó Hidróxido de Sodio SOHY-M0P-5K0 Sodium Hydroxide AGR en microperlas bajas en metales, de fabricación en Barcelona por Labbox Labware, S.L. La ficha técnica se muestra en la Figura 7.

Formula: NaOH
Name: Caustic Soda
M.W: 40,00
CAS: 1310-73-2
EC: 215-185-5
EC INDEX: 011-002-00-6
UN: 1823
IMDG: 8 II UN 1823
ADR: 8 II UN 1823 (E)
IATA: 8 II UN 1823




SPECIFICATIONS	
Assay	≥ 99.0%
Sodium carbonate (Na ₂ CO ₃)	≤ 0.4%
Iron (Fe)	≤ 0.001%
Sodium sulfate (Na ₂ SO ₄)	≤ 0.012%
Arsenic (As)	≤ 0.0001%
Sodium chloride (NaCl)	≤ 0.03%
Mercury (Hg)	≤ 0.00005%
Nickel (Ni)	≤ 0.005%
Lead (Pb)	≤ 0.00005%
Calcium (Ca)	≤ 0.001%
Chromium (Cr)	≤ 0.0002%
Silicon (Si)	≤ 0.002%

Figura 7. Ficha técnica del Hidróxido de Sodio. [55]

Metasilicato Disódico (Sólido)

El metasilicato en estado sólido usado fue el Metasilicato Disódico (IUC4DSN11) comercializado por Industrias Químicas del Ebro S.A. de Zaragoza, España. Su ficha técnica se expone en la Figura 8.



Valores promedios	
Forma	Sólido granular
Color	Blanco
Densidad aparente (g/l)	850
pH (1% en agua)	12.4
Composición química (%)	
SiO ₂	28.6
Na ₂ O	29.1
H ₂ O	42.3
Relación molar SiO ₂ /Na ₂ O	1.0
Granulometría (%)	
2000 - 250 µm	95
250 - 125 µm	4
< 125 µm	1

Figura 8. Ficha técnica del Metasilicato. [56]

Silicato de Sodio (Solución Comercial)

Fue usado una solución de Silicato de Sodio en su versión comercial SOTS-00P-1K0 GLP, de fabricación en Barcelona por Labbox Labware, S.L. En la Figura 9 se muestran sus principales características.

Formula : $\text{Na}_2\text{O} \cdot n \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Name : Sodium trisilicate solution, Water glass
CAS : 1344-09-8
EC : 215-687-4



SPECIFICATIONS	
Appearance	Colourless-grey liquid
Molar module $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$	2.4 - 2.6
Silica (SiO_2) and Sodium oxide (Na_2O)	$\geq 39\%$
Density at 20 °C	1.45 - 1.48g/ml
Iron Oxide (Fe_2O_3)	$\leq 0.01\%$
Calcium oxide (CaO)	$\leq 0.1\%$
Viscosity (20 °C)	$\geq 100\text{cP}$
Substances insoluble in water, filtered glass	$\leq 0.02\%$
Substances insoluble in water, sedimented glass	$\leq 0.1\%$

Figura 9. Ficha técnica Solución de Silicato de Sodio. [55]

2.7 Aditivos

Se usan dos tipos de aditivos, su información básica se recoge en la Tabla 5.

- Sikament®-242 HW, aditivo plastificante, especialmente indicado para hormigones fabricados en plantas de hormigón preparado o en plantas de obra. No contiene cloruros y no ejerce ninguna acción corrosiva sobre las armaduras.
- Sika® ViscoCrete®-6003 NG, superplastificante de nueva generación y altas prestaciones para hormigones preparados tanto en planta de hormigón como en obra.

Tabla 5. Especificaciones de los aditivos [57]

Producto	Densidad	PH	Dosificación Recomendada
Sikament – 242HW	1.11 ± 0.01 kg/l at 20 °C	5.0 ± 1.0 at +20 °C	-
Sika Viscocrete 6003 NG	1.065 - 1.085 kg/l	-	0,4% - 1,8%

3. Métodos

Tal como se mencionó previamente, el presente estudio se centró en la evaluación de las cenizas de fondo de biomásas con activación alcalina para su aplicación en materiales base cementos. Esta investigación se desarrolla en tres fases, una primera fase en la que se evalúan las diferentes CFB con activador alcalino comprobando diferentes soluciones alcalinas, tratamientos, dosificaciones y ambientes de curado. Acorde a los resultados obtenidos se seleccionan las mejores mezclas y se lleva a cabo la segunda fase de la investigación, en la que se sustituye cemento en la fabricación de morteros activados en seco. En la tercera fase de la investigación, se combina la mezcla activada con áridos naturales para fabricar hormigón con bajo contenido en cemento. La Figura 10 muestra el esquema de la investigación desarrollada.

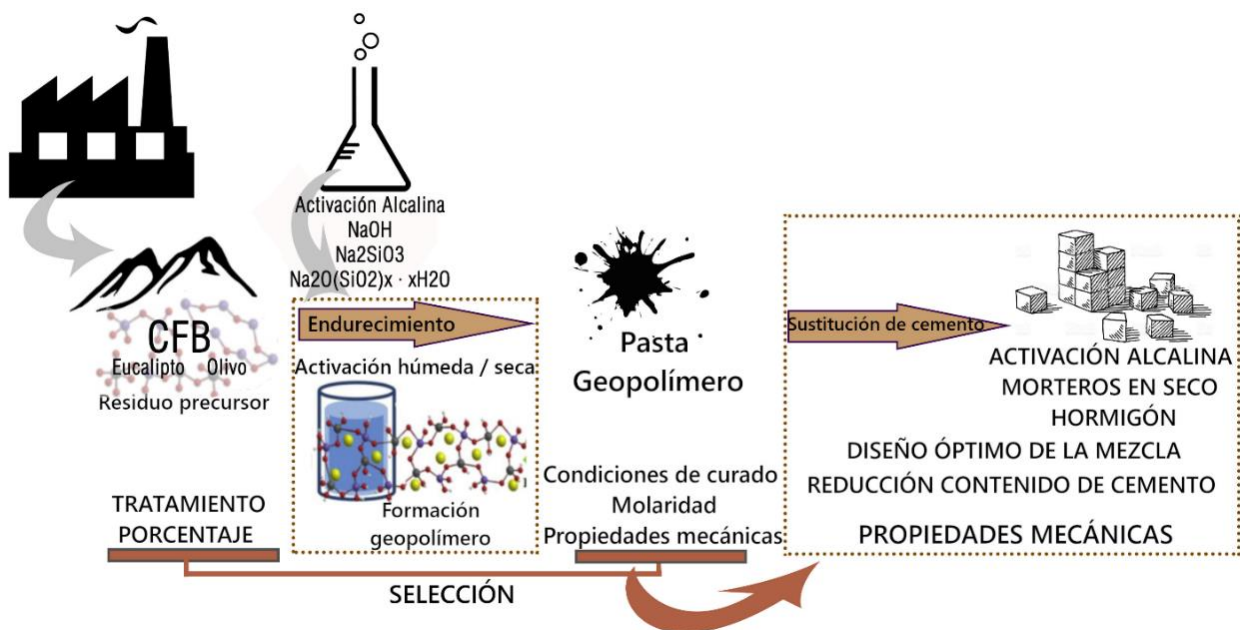


Figura 10. Esquema de la investigación

El esquema desarrollado en la primera actividad de la investigación se muestra en la Figura 11, señalando los aspectos clave a considerar en cada fase, entre ellos:

- **Activadores alcalinos y sus efectos:** Se analizaron distintos activadores alcalinos, y su impacto en las características físicas y químicas de los nuevos materiales desarrollados. Estos activadores desempeñan un papel crucial al iniciar reacciones químicas que conducen a la formación de compuestos estables en los materiales resultantes. La elección del activador influye en la resistencia, durabilidad y otras propiedades esenciales del material.
- **Molaridad:** La concentración molar de los activadores alcalinos tiene un impacto directo en la velocidad y la intensidad de las reacciones químicas. Al evaluar diferentes molaridades se pudo comprender cómo la concentración afecta la formación de los enlaces y la estructura del material final.
- **Porcentaje de sustitución de cemento:** Se investigaron distintos porcentajes de reemplazo del cemento convencional por las cenizas de biomásas activadas. Este parámetro es fundamental para determinar la cantidad de cenizas que se puede incorporar sin dañar las propiedades globales del material. Se busca encontrar un equilibrio entre el uso eficiente de las cenizas y las características deseadas del producto.
- **Combinaciones de sustitución y evaluación de residuos:** Se exploran varias combinaciones de sustitución y se evaluaron diversos tipos de residuos de biomásas. Cada tipo de biomasa tiene una composición única, lo que afecta su comportamiento durante el proceso de activación y, en última instancia, en las propiedades del material. Evaluar múltiples combinaciones brinda una visión más completa de las posibles aplicaciones y limitaciones de estas cenizas.

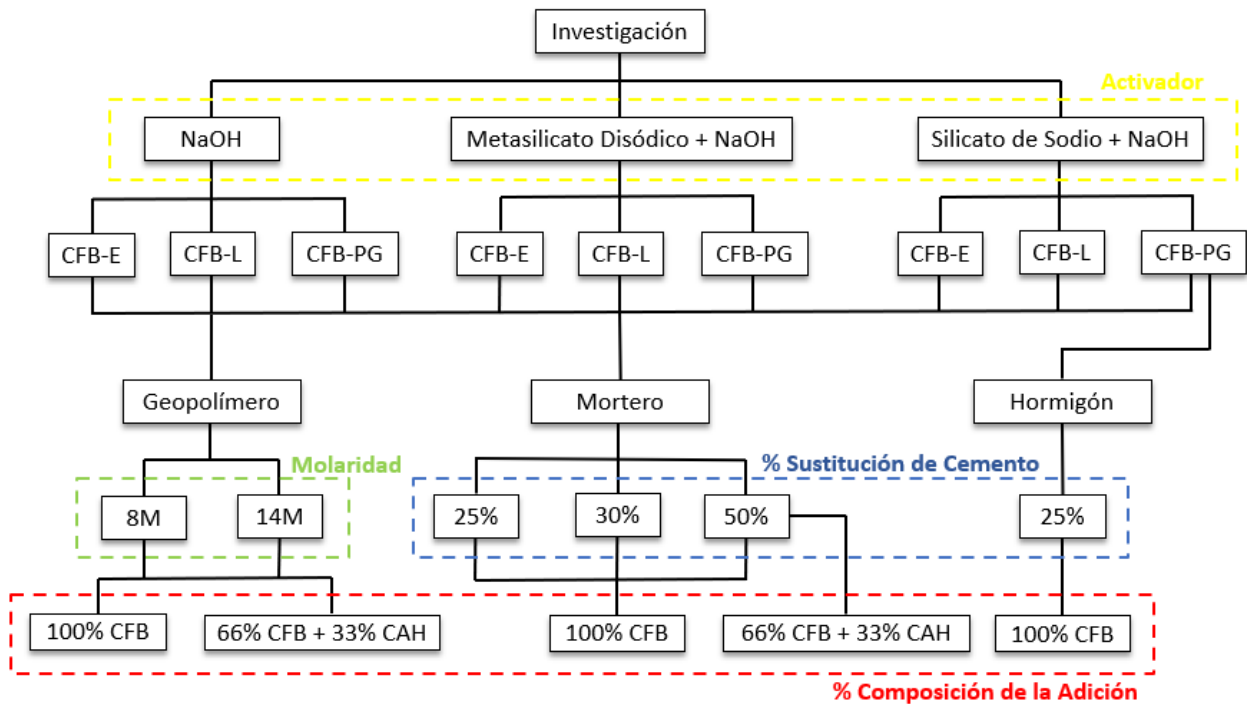


Figura 11. Esquema general de la metodología de la investigación

3.1 Procesamiento de CFB

Las cenizas de fondo de biomasa fueron procesadas mecánicamente para lograr un material homogéneo y más fino con el objetivo de incorporarlas en mezclas para la producción de morteros y hormigones en sustitución del cemento. Esta decisión estuvo basada en estudios anteriores que demuestran que a medida que las cenizas resultantes de la combustión de biomasa se vuelven más finas, su capacidad para generar reactividad aumenta significativamente [58]–[61]. Es decir, aumenta su capacidad para participar en procesos químicos y físicos ya que presentan una mayor área superficial en comparación con las partículas más grandes, lo que les permite interactuar más eficientemente con otros compuestos y materiales en su entorno [48].

De igual forma, se llevó a cabo un análisis bajo dos condiciones distintas en la conformación de geopolímeros: una utilizando las cenizas en su estado original, y la otra después de un proceso de lavado. Este enfoque permitió evaluar cómo las propiedades de las cenizas cambian en función de si se someten a un proceso de lavado o no (Figura 12).

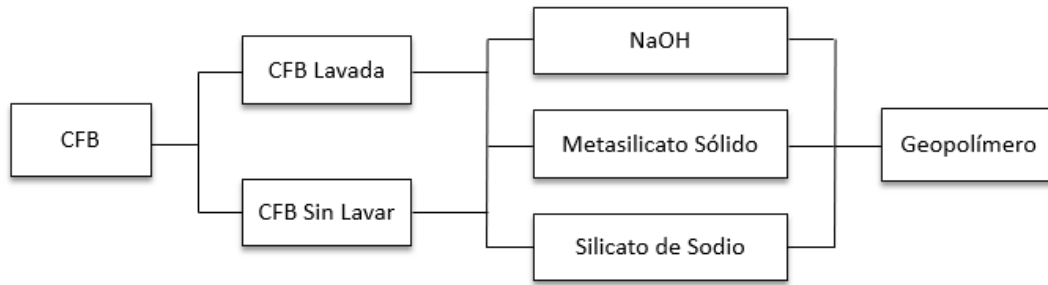


Figura 12. Metodología para el análisis de las CFB en geopolímeros

Las cenizas, tanto lavadas como no lavadas fueron secadas en la estufa durante 24 horas a una temperatura de 60°C, las que posteriormente se procesaron en una trituradora de mandíbulas. Sin embargo, la finura de las cenizas no fue suficiente ya que quedaba demasiado material retenido en el tamiz 0,063mm por lo que se utilizó un segundo proceso de molienda, esta vez con un molino de bolas con una configuración de ocho bolas y 6000 vueltas, el cual fue efectivo y se logró un material completamente homogéneo y fino que pasó por el tamiz 0,063mm como se observa en la Figura 13.



Figura 13. CFB procesadas sin lavar. a) CFB-E b) CFB-L c) CFB-PG

3.2 Geopolímeros

Con la finalidad de evaluar la resistencia estructural, la durabilidad y el rendimiento global de los procesos de activación, se elaboran combinaciones de materiales utilizando los seis tipos de CFB (tres lavadas y tres sin lavar) y los tres activadores. Estas mezclas se utilizan para producir geopolímeros en diferentes composiciones al adicionar CAH; y variando conjuntamente el grado de molaridad.

Se consideran dos composiciones a estudiar: la primera con un 100% de CFB y la segunda preparada con un 66% de CFB + 33% de CAH. Se diseñan las mezclas igualmente para dos concentraciones molares diferentes: 8M y 14M. En total se realizan 36 muestras, las cuales se agrupan en función del activador usado para su mejor comprensión.

La nomenclatura y la leyenda a seguir para designar las mezclas de geopolímeros es la siguiente (Figura 14).

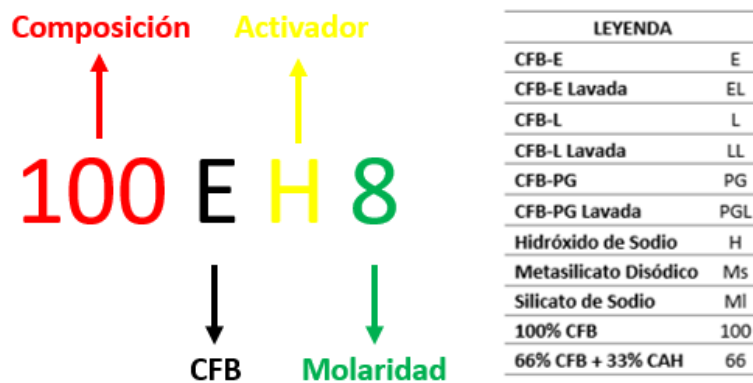


Figura 14. Nomenclatura y leyenda para las mezclas de geopolímeros

Después de un análisis preliminar de las muestras, se decidió considerar los ensayos restantes con una molaridad de 8M, ya que los especímenes de 14M presentaron valores de resistencia a compresión inferiores a los de las muestras de 8M y, además comenzaron a mostrar evidencia de un exceso de sodio a través de la eflorescencia como se muestra en la Figura 15.



Figura 15. Signos de eflorescencia en geopolímeros con 14M

3.2.1 Dosificación

En el caso de la activación con Hidróxido de Sodio, se testearon 18 mezclas cuya dosificación se especifica en la Tabla 6.

Tabla 6. Dosificación de los geopolímeros con NaOH

Molar	Mezcla	Dosificación			
		CFB (g)	CAH (g)	NaOH (g)	H ₂ O (g)
14M	100 EH-14	300	-	54,6	100
	100 ELH-14	300	-	54,6	100
	100 LH-14	300	-	54,6	125
	100 LLH-14	300	-	54,6	125
	100 PGH-14	300	-	54,6	140
	100 PGLH-14	300	-	54,6	140
8M	100 EH-8	300	-	31,2	100
	100 ELH-8	300	-	31,2	100
	100 LH-8	300	-	31,2	125
	100 LLH-8	300	-	31,2	125
	100 PGH-8	300	-	31,2	140
	100 PGLH-8	300	-	31,2	140
14M	66 EH-14	200	100	54,6	180
	66 LH-14	200	100	54,6	180
	66 PGH-14	200	100	54,6	200
8M	66 EH-8	200	100	31,2	150
	66 LH-8	200	100	31,2	150
	66 PGH-8	200	100	31,2	170

La activación de las CFB con la combinación de NaOH y Metasilicato Disódico fue evaluada a partir de nueve muestras (Tabla 7).

Tabla 7. Dosificación de los geopolímeros con NaOH + Metasilicato Disódico

Molar	Mezcla	Dosificación				
		CFB (g)	CAH (g)	Metasilicato (g)	NaOH (g)	H ₂ O (g)
8M	100 EMs-8	300	-	58	31,2	100
	100 ELMs-8	300	-	58	31,2	100
	100 LMs-8	300	-	58	31,2	120
	100 LLMs-8	300	-	58	31,2	120
	100 PGMs-8	300	-	58	31,2	120
	100 PGLMs-8	300	-	58	31,2	120
8M	66 EMs-8	200	100	58	31,2	100
	66 LMs-8	200	100	58	31,2	120
	66 PGMs-8	200	100	58	31,2	120

De igual forma la Tabla 8 muestra la dosificación de los nueve geopolímeros con NaOH y Silicato de Sodio.

Tabla 8. Dosificación de los geopolímeros con NaOH + Silicato de Sodio

Molar	Mezcla	Dosificación				
		CFB (g)	CAH (g)	Silicato de Sodio (ml)	NaOH (g)	H ₂ O (g)
8M	100 EML-8	300	-	82	31,2	18
	100 ELML-8	300	-	82	31,2	18
	100 LML-8	300	-	82	31,2	40
	100 LLML-8	300	-	82	31,2	40
	100 PGML-8	300	-	82	31,2	40
	100 PGLML-8	300	-	82	31,2	40
8M	66 EML-8	200	100	82	31,2	18
	66 LML-8	200	100	82	31,2	40
	66 PGML-8	200	100	82	31,2	40

3.2.2 Amasado y conformación de probetas

Las materias primas se mezclaron en una amasadora mecánica durante dos minutos en estado sólido hasta lograr una mezcla sólida homogénea. Pasado este tiempo, se añadió lentamente la solución activadora, llegando a un tiempo de vertido y mezclado lento de un minuto. Luego se realizó el amasado a velocidad rápida mezclando por otros tres minutos, logrando así siete minutos de mezclado para cada serie de geopolímeros.

Una vez realizado el amasado, la mezcla geopolimérica se vierte sobre recipientes de polietileno, lentamente y dando pequeños golpes para conseguir una mejor compactación del geopolímero en el molde (Figura 16). Posteriormente, los moldes fueron trasladados a la estufa donde fueron curados a 40°C durante 24h. Transcurrido el tiempo, se desmoldan y curan a temperatura ambiente (22 °C y humedad relativa del 57%) durante 28 días. Las dimensiones de las probetas son 28cm de largo y sección de 1,5x1,5cm. Para el caso de las muestras de CFB de eucalipto, la temperatura de curado varió, siendo de 100°C por 24h, debido a que pasadas 48h en la estufa a 40°C seguían sin poder desmoldarse con una consistencia gelatinosa. Esta variación de temperatura en el curado inicial se tuvo en cuenta también para las muestras 100PGML-8 y

66LMs-8 como una forma de evaluar y comparar el comportamiento de los geopolímeros con diferentes tratamientos térmicos.

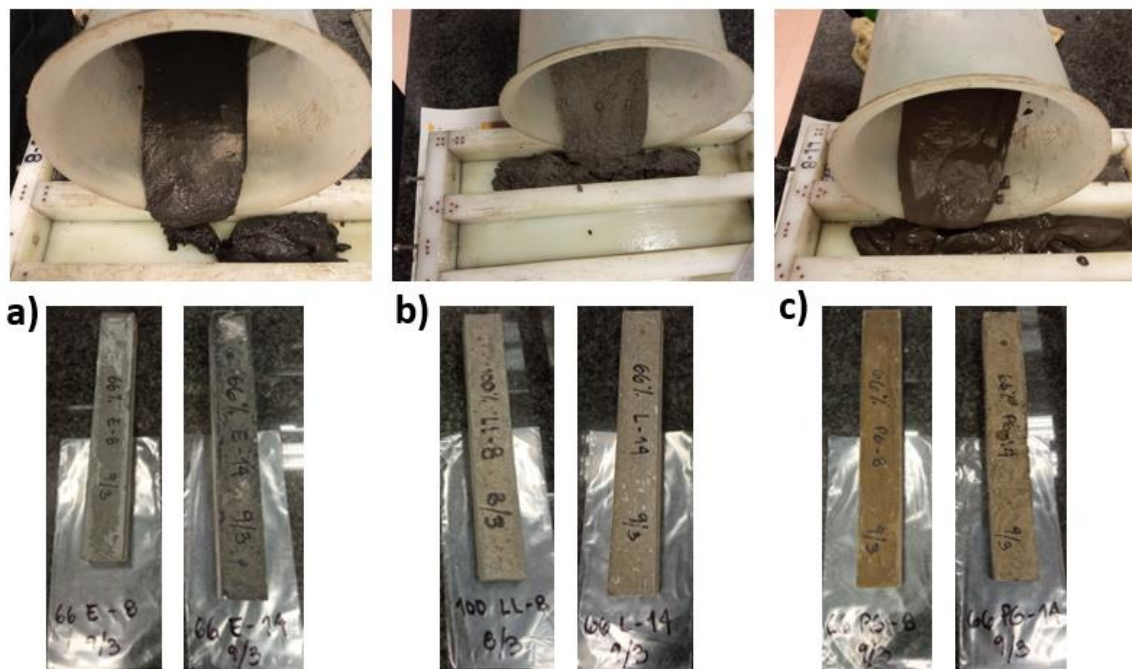


Figura 16. Amasado y confección de probetas de geopolímeros a) CFB-E b) CFB-L c) CFB-PG

3.2.3 Resistencia a Compresión (UNE-EN 12390-32020)

La evaluación de la posible activación de las CFB se realizó mediante un estudio de la resistencia a la compresión de las pastas fabricadas a los 7, 14, 21 y 28 días. Cada probeta se ensaya centrándola lateralmente con relación a los platos de la prensa hidráulica y longitudinalmente de forma que la base del prisma no sobresalga de los platos más de unos 10mm. Se aumenta la carga uniformemente a una velocidad de 2400 ± 200 N/s durante todo el tiempo de aplicación de la carga hasta la rotura, y se establece en el caso de geopolímeros una configuración para pastas delicadas (Figura 17).



Figura 17. Ensayo a compresión de los geopolímeros

3.2.4 Difracción de Rayos X (UNE-EN 196-1:2004)

La Difracción de los Rayos X (DRX) es un método de ensayo no destructivo potente para determinar un cierto rango de características físicas y químicas de los materiales como son: el tipo y cantidades de fases presentes, la estructura y la textura cristalográfica. El procedimiento empleado para el ensayo fue el siguiente.

Los restos de las probetas luego de hacer el ensayo a compresión se muelen y se hacen pasar por el tamiz 0,063mm para incrementar el número de partículas en la muestra y para minimizar los efectos de la micro absorción entre partículas de diferente composición y tamaño. Posteriormente se rellenan los porta muestras y se proceden a analizar los resultados en un Difractómetro de Rayos X D8 DISCOVER (Bruker). En la Figura 18, se observan algunas de las muestras procesadas y el equipo usado.



Figura 18. Muestras para DRX y Difractómetro de Rayos X

Tanto para el ensayo DRX como para el de FRX se toman 10 muestras de referencia que se recogen en la Tabla 9. La selección de las mismas estuvo influenciada por el mayor contenido de CFB para identificar y valorar los componentes productos de la activación, además de incluir la muestra con mejor rendimiento mecánico (*).

Tabla 9. Muestras para DRX y FRX

Ensayo	No.	Muestra	Activador
DRX FRX	1	100 EH-8	NaOH
	2	100 LH-8	
	3	100 PGH-8	
	4	100 EMs-8	Metasilicato + NaOH
	5	100 LMs-8	
	6	100 PGMs-8	
	7	100 EML-8	Silicato + NaOH
	8	100 LML-8	
	9	100 PGML-8	
	10	66 PGML-8*	

3.2.5 Fluorescencia de Rayos X (UNE-EN 15309:2008)

El Anexo A de la norma UNE-EN 15309:2008, proporciona el método de determinación de Fluorescencia de Rayos X (XRF) para materiales sólidos y líquidos tales como residuos, lodos y suelos, que permite una caracterización total de los elementos a nivel semicuantitativo. En este análisis, la etapa de

preparación de la muestra es crucial ya que la calidad en la preparación de la misma influye significativamente en la exactitud de los resultados. Por tanto, se preparan comprimidos de los restos de geopolímeros ensayados para el análisis cuantitativo del contenido total de ciertos elementos en diferentes matrices. Estos restos fueron molidos y tamizados hasta obtener material más fino que el tamiz 0.063mm. Las pastillas conformadas fueron ensayadas en un espectrómetro secuencial por dispersión de longitud de onda ZSX Primus IV de Rigaku. La referencia de las muestras escogidas se muestra en la Tabla 9.

3.3 Morteros

Respondiendo al tercer objetivo específico de la presente investigación, se elaboran 28 mezclas de morteros de tres probetas cada una para evaluar las características mecánicas en su estado endurecido como la resistencia a compresión y flexión. Los morteros se diseñan con las CFB sin tratamiento de lavado, es decir, tres tipos de biomasas para los tres activadores. La incorporación de las CFB en las muestras se manifiesta con la sustitución parcial del cemento, evaluando tres porcentajes de sustitución (25, 30 y 50%) para composiciones de 100% CFB y se incluye el análisis de un 66% de CFB + 33% de CAH para el caso del 50% de sustitución, esto puede observarse de manera más sencilla en el esquema general de la investigación de la Figura 11.

La nomenclatura y la leyenda a seguir para designar las mezclas de morteros es la siguiente (Figura 19).

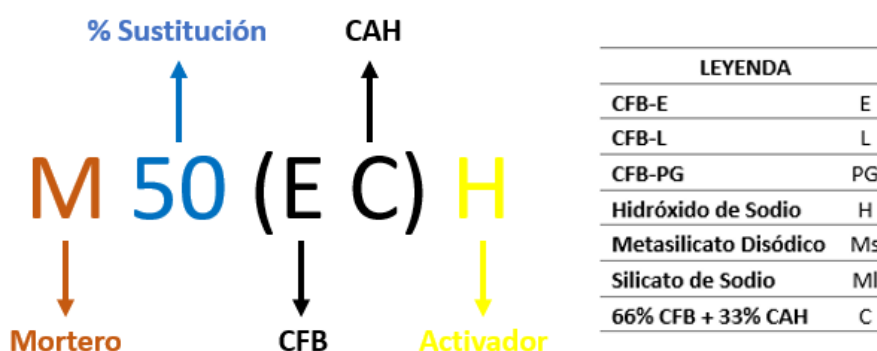


Figura 19. Nomenclatura y leyenda para las mezclas de morteros

3.3.1 Dosificación

Para la mejor comprensión, las dosificaciones se recogen en dos tablas, diferenciando los 10 morteros a utilizar de puntos de referencias (Tabla 10) y los 18 de la sustitución de cemento del 50% y con adiciones de CAH (Tabla 11).

Tabla 10. Dosificación de los morteros de referencia

Sustitución	Mezcla	Dosificación			
		CFB (g)	CEM I (g)	Arena (g)	H ₂ O (g)
0%	M Ref	-	450	1350	225
	M25E	112,5	337,5	1350	225
25%	M25L	112,5	337,5	1350	225
	M25PG	112,5	337,5	1350	225
30%	M30E	135	315	1350	225
	M30L	135	315	1350	225
	M30PG	135	315	1350	225
50%	M50E	225	225	1350	260
	M50L	225	225	1350	260
	M50PG	225	225	1350	260

Tabla 11. Dosificación de morteros para un 50% de sustitución del cemento

Activador	Mezcla	Dosificación							
		CFB (g)	CAH (g)	CEM I (g)	Arena (g)	H ₂ O (g)	NaOH (g)	Metasilicato (g)	Silicato (ml)
NaOH	M50EH	225		225	1350	275	23,4		
	M50LH	225		225	1350	275	23,4		
	M50PGH	225		225	1350	275	23,4		
	M50(EC)H	148,5	76,5	225	1350	275	23,2		
	M50(LC)H	148,5	76,5	225	1350	275	23,2		
	M50(PGC)H	148,5	76,5	225	1350	275	23,2		
	M50EMS	225		225	1350	275	23,4	43,5	
Metasilicato Disódico + NaOH	M50LMS	225		225	1350	275	23,4	43,5	
	M50PGMS	225		225	1350	275	23,4	43,5	
	M50(EC)MS	148,5	76,5	225	1350	275	23,2	28,7	
	M50(LC)MS	148,5	76,5	225	1350	275	23,2	28,7	
	M50(PGC)MS	148,5	76,5	225	1350	275	23,2	28,7	
	M50(PGC)MS	148,5	76,5	225	1350	275	23,2	28,7	

Silicato de Sodio + NaOH	M50EML	225		225	1350	210	23,4	61,5
	M50LML	225		225	1350	210	23,4	61,5
	M50PGML	225		225	1350	210	23,4	61,5
	M50(EC)ML	148,5	76,5	225	1350	230	23,2	40,6
	M50(LC)ML	148,5	76,5	225	1350	230	23,2	40,6
	M50(PGC)ML	148,5	76,5	225	1350	230	23,2	40,6

3.3.2 Amasado y conformación de probetas

El método de amasado fue similar al de los geopolímeros explicado anteriormente, pero con la particularidad de los tiempos de mezclado y las condiciones de curado.

Primeramente, las materias primas sólidas (cemento, CFB, CAH) y el agua junto a los activadores se mezclan en la amasadora mecánica durante 30 segundos a una velocidad lenta. Pasado este tiempo, y sin modificar la velocidad, se añadió lentamente la arena normalizada durante 30 segundos más. Luego se realizó el amasado a velocidad rápida mezclando por otros 30 segundos, a continuación 90 segundos de reposo y finalmente otros 60 segundos de amasado en velocidad rápida, logrando así cuatro minutos de mezclado para cada serie de morteros.

Una vez realizado el amasado, la mezcla se vierte en moldes metálicos, en dos capas y con 60 golpes en 60 segundos cada capa en la mesa de sacudidas para conseguir una mejor compactación. Posteriormente, los moldes fueron trasladados a la cámara húmeda durante 24h. Transcurrido el tiempo, se desmoldan (Figura 20) y curan en la propia cámara húmeda con valores de temperatura $20 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa de $97 \pm 2\%$ durante 28 días. Las dimensiones de las probetas son 16cm de largo y sección de 4x4cm.

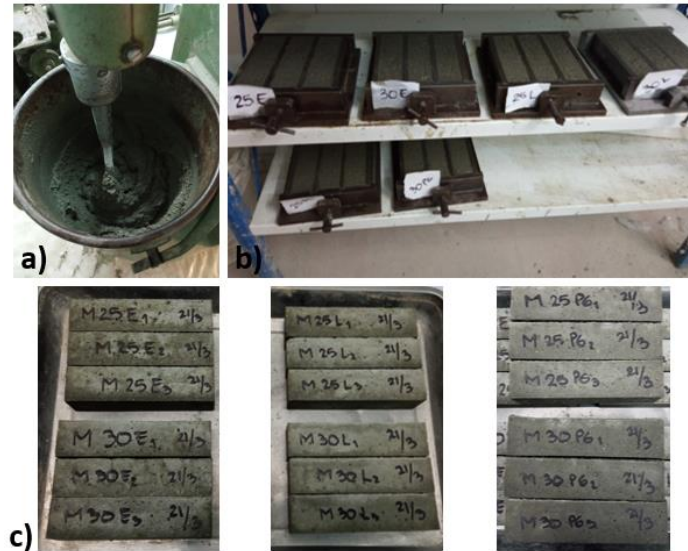


Figura 20. Amasado y confección de probetas de morteros a) Amasado b) Curado x 24h c) Probetas desmoldadas

3.3.3 Resistencia a Flexión (UNE-EN 12390-5:2020)

Para evaluar la resistencia a flexión se utiliza el método de carga de los tres puntos, colocando la probeta en el dispositivo de ensayo correctamente centrada con su eje longitudinal en ángulo recto con los ejes longitudinales de los rodillos superiores e inferiores y comprobando que la dirección de la carga es perpendicular a la dirección de hormigonado de la probeta. Se aplica la carga verticalmente y se incrementa uniformemente a razón de ± 10 N/s hasta la rotura (Figura 21). Las muestras fueron ensayadas a los 7, 14, 21 y 28 días.



Figura 21. Resistencia a flexión de morteros

3.3.4 Resistencia a Compresión (UNE-EN 12390-3:2020)

El procedimiento es el mismo que el descrito en la Sección 3.2.3 referente a la resistencia a la compresión de los geopolímeros. De igual forma se mide la resistencia a la rotura a los 7, 14, 21 y 28 días (Figura 22). Solamente se considera en este caso, la configuración del Software que se establece para las características de las probetas de hormigón.

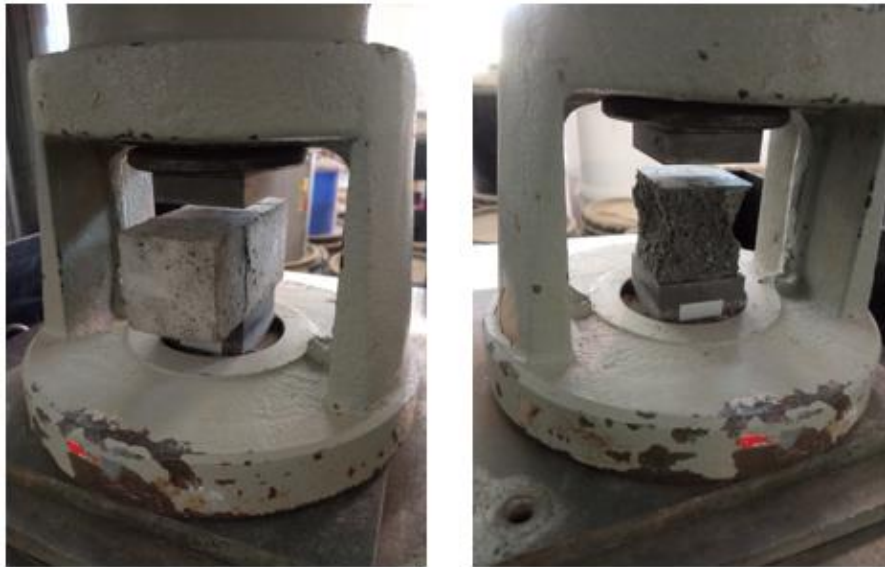


Figura 22. Resistencia a compresión de los morteros

3.4 Hormigones

Luego de haber ensayado y analizado las diferentes combinaciones de cenizas de fondo de biomásas y los activadores químicos seleccionados, se decide optar por los residuos sin tratamiento de lavado de las biomásas procedentes de Puente Genil y activados a partir del Silicato de Sodio para la conformación de hormigones con un 25% de sustitución de cemento y su posterior evaluación de las propiedades físico-mecánicas como hormigón para pavimentos en ciclovías (Figura 11).

Se hacen tres amasadas, la primera como forma de control sin ninguna sustitución del cemento, una segunda sustituyendo un 25% del cemento por CFB-PG sin activador químico y finalmente una amasada con el 25% de cemento sustituido por CFB-PG, pero esta vez, con la adición del activador seleccionado.

En la Figura 23 se muestra la nomenclatura y leyenda usada para la confección de las amasadas de hormigones.

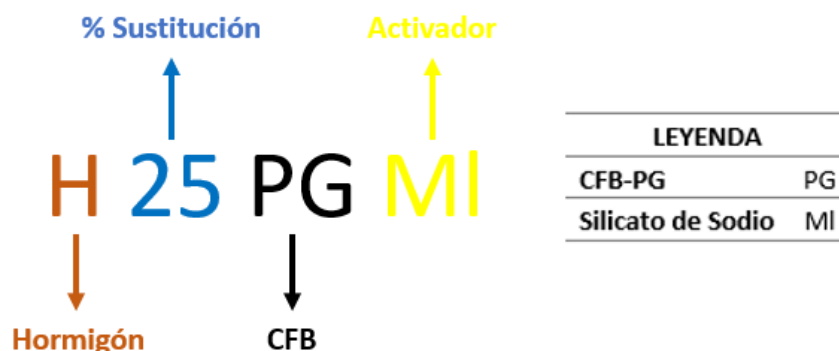


Figura 23. Nomenclatura y leyenda para las amasadas de hormigones

3.4.1 Dosificación

La Tabla 12 recoge la dosificación de las tres amasadas que se diseñaron.

Tabla 12. Dosificación en peso (kg) de las amasadas de hormigones

AMASADA	CEMENTO			ARIDO NATURAL			AGUA	ADITIVO		Activador
	CEM I	CEM IV	CFB	AN 0/4	AN 6/12	AN 11/22		SIKAMENT®-242 HW	SIKA VISCOCRETE 6003 NG	
HREF	-	375,00	-	915,00	325,00	625,00	157,50	1,13	3,00	-
H25PG	281,25	-	81,65	915,00	325,00	625,00	177,52	1,27	3,38	-
H25PGMI	281,25	-	81,65	915,00	325,00	625,00	133,14	1,27	3,38	44,38

3.4.2 Amasado y conformación de probetas

Las mezclas se realizan en una amasadora mecánica, y se usa el mismo método de mezclado para todas las amasadas. Primeramente, se añadieron las fracciones gruesas del árido natural, seguidas de las fracciones más finas, el cemento y las cenizas de fondo (en caso de corresponder), estas materias primas se homogenizan durante cinco minutos. Transcurrido el tiempo establecido se agrega una porción, previamente preparada, de agua y el

activador diluido en ella, dejando mezclar por unos tres minutos. Finalmente se agrega el resto del agua con los aditivos igualmente diluidos en su interior y se deja amasar por cinco minutos.

El siguiente paso es comprobar la consistencia del hormigón, para lo cual se utiliza un Cono de Abrams, para luego proceder al llenado y vibrado de los moldes a conformar (Figura 24). Después de 24h, las muestras se desmoldan y se curan en la Cámara de Curado Húmedo a una temperatura de $20 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa de $97 \pm 2\%$ durante 28 días.



Figura 24. Conformación de probetas de los hormigones

En cada amasada se conformaron un total de 22 probetas, cuyas dimensiones se exponen en la Tabla 13.

Tabla 13. Relación de probetas por amasada de hormigón

Probeta	Cantidad
Cúbica 10x10x10	15
Cilíndrica 30x15	1
Prismática 40x10x10	2
Prismática 28x4x4	4

3.4.3 Resistencia a Compresión (UNE-EN 12390-3:2020)

Se usó la misma configuración de ensayo descrita en la sección 3.3.4 de los morteros, solo que esta vez se comprimieron probetas cúbicas de 10x10x10cm (Figura 25). Los ensayos se previeron a los 7 y 28 días.



Figura 25. Resistencia a compresión de los hormigones

3.4.4 Flexotracción (UNE-EN 12390-5:2020)

La evaluación de la resistencia a la flexotracción se llevó a cabo utilizando las muestras prismáticas con dimensiones de 40x10x10cm, después de su curado en la Cámara Húmeda por 28 días.

El proceso de prueba, descrito en la UNE-EN 12390-5:2020, consiste en aplicar una carga que genera flexión en las muestras hasta que estas se rompen. La máquina de prensado y el cabezal garantizan que la fuerza se aplique en ángulo recto a la superficie de la muestra (Figura 26).



Figura 26. Flexotracción en hormigones

3.4.5 Retracción (UNE-EN 12390-16:2020)

Se midió la contracción de las probetas de 28cm de largo y sección de 4x4cm. Estas probetas incluyen dos piezas de metal incrustadas en el mortero que sirven como puntos de referencia para las mediciones. Los cambios en sus longitudes se determinan a partir del comparador de longitudes, que consta de una estructura de acero ajustable en altura y un micrómetro de alta precisión con una exactitud de 0,003 mm (Figura 27a). Para calibrar el equipo, se emplea una barra de acero. Las medidas fueron tomadas a edades de 1, 3, 7 y 28 días para dos condiciones de curado distintas (curado en seco y curado sumergido en agua) como se muestra en la Figura 27b y 27c.

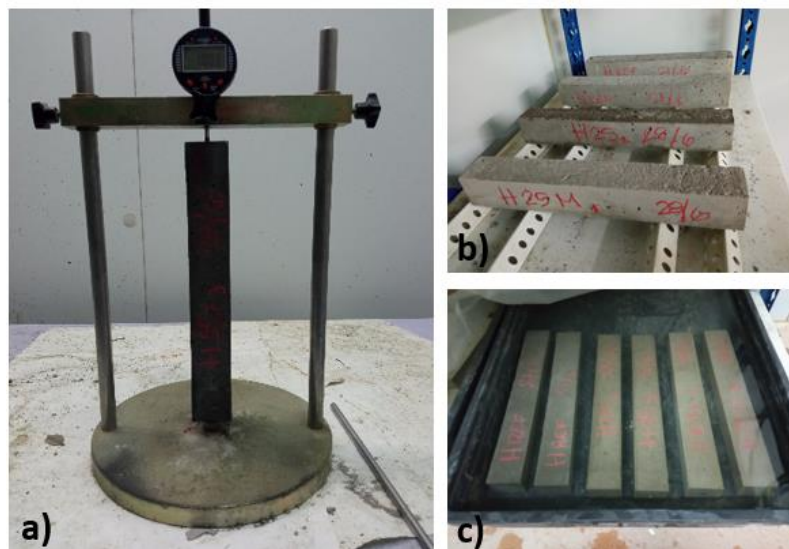


Figura 27. Retracción en hormigones a) Medición de la retracción b) Curado en seco c) Curado en agua

3.4.6 Densidad, absorción y porosidad (UNE 83980:2014)

Según la norma UNE 82980: 2014, para llevar a cabo este ensayo, se requiere un entorno de trabajo con una temperatura de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa mínima del 45%. El proceso consta de varias etapas (Figura 28), se comienza midiendo un primer peso (M1) de la probeta antes de cualquier inmersión para luego de sumergida en agua durante 48 horas obtener el peso M2. Posteriormente se introduce en agua hirviendo por 5h y se deja atemperar para medir M3. Para obtener el peso M4, se utiliza una balanza con peso hidrostático. Las mediciones se realizan a los 28 días de amasadas las muestras cúbicas de 10x10x10cm.



Figura 28. Determinación de la Densidad y Absorción de los hormigones

3.4.7 Penetración de agua (UNE-EN 12390-8:2020)

Para la evaluación de la penetración del agua, se usan las probetas cilíndricas de 30x15cm después de los 28 días de curado húmedo. El procedimiento, descrito en la UNE-EN 12390-8:2020, consiste en poner en contacto la base inferior del cilindro con agua, a una presión de 500 ± 50 kPa por 72 horas. Pasado ese tiempo se rompe la probeta por el método brasileño y se mide la penetración del agua que se observa a simple vista, haciendo una media de los valores medidos (Figura 29).



Figura 29. Penetración de agua en hormigones

3.4.8 Carbonatación (UNE-EN 12390-10:2019)

Este ensayo se realiza a muestras de hormigón para dos condiciones de curado distintas, un curado dentro de la cámara de carbonatación por 28 días después de pasadas 24h desde el amasado y, la segunda condición, después de 28 días de curado en condiciones húmedas para permitir que los cementos se hidraten lo más posible, las probetas cúbicas de 10x10x10cm se sitúan en la cámara de carbonatación por otros 28 días. Para ambos métodos las mezclas se ubican de manera que permitan que el aire circule libremente alrededor de las cuatro caras que se someterán a ensayo. Dentro de la cámara la concentración de CO₂ es de $5 \pm 0,2\%$, con una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad relativa de $57 \pm 3\%$. Pasado el tiempo establecido se procede a medir el frente de carbonatación en las caras del cubo mediante un indicador fenolftaleína que se vuelve incoloro en las secciones carbonatadas (Figura 30).

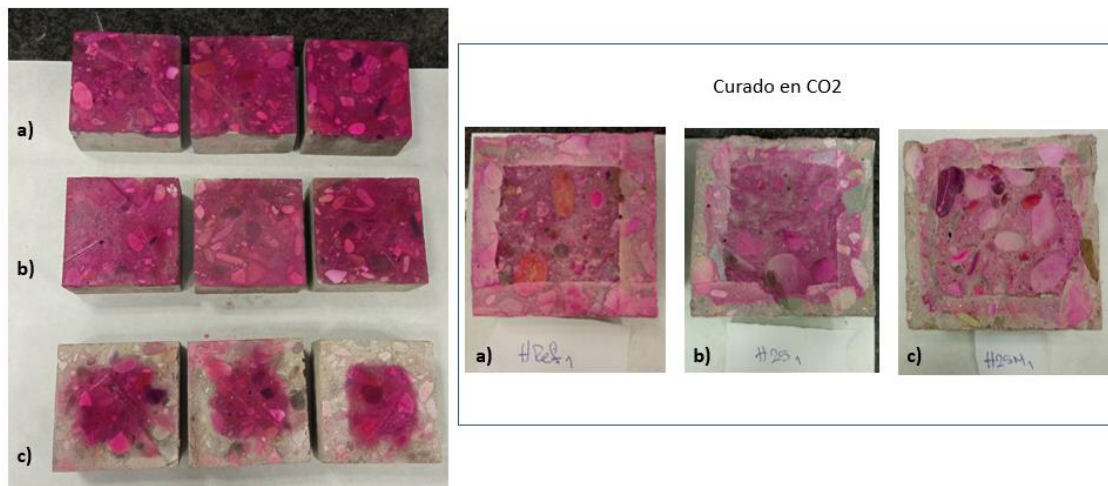


Figura 30. Indicador de fenolftaleína para la carbonatación de hormigones. Curado Húmedo (izquierda) y Curado en CO₂ (derecha) a) HREF b) H25PG c) H25PGML

4. Resultados y Análisis

4.1 Geopolímeros

4.1.1 Resistencia a Compresión

Las mezclas curadas según las especificaciones del epígrafe 3.2.2, fueron ensayadas a compresión a los 7, 14, 21 y 28 días arrojando los datos contenidos en las Tablas 14, 15 y 16, para los activadores NaOH, Metasilicato Disódico y Silicato de Sodio respectivamente.

Tabla 14. Resistencia a compresión de geopolímeros activados con NaOH

Molaridad	Mezcla	Resistencia a Compresión (MPa)			
		7 días	14 días	21 días	28 días
14M	100 EH-14	7,50	8,06	9,52	9,81
	100 ELH-14	4,20	4,52	4,70	4,89
	100 LH-14	1,40	1,90	2,65	3,19
	100 LLH-14	1,30	1,35	1,58	1,91
	100 PGH-14	5,20	5,70	5,84	6,87
	100 PGLH-14	1,00	1,10	1,56	1,89
8M	100 EH-8	3,30	4,25	4,33	8,05
	100 ELH-8	2,90	7,00	7,70	8,07
	100 LH-8	3,40	3,74	4,03	4,40
	100 LLH-8	2,75	2,80	3,20	4,19
	100 PGH-8	8,40	8,92	10,34	14,39
	100 PGLH-8	0,80	1,13	1,50	2,34
14M	66 EH-14	6,00	6,38	8,85	10,67
	66 LH-14	3,88	4,50	5,40	7,94
	66 PGH-14	6,20	7,52	9,10	12,15
8M	66 EH-8	5,00	5,20	6,33	9,09
	66 LH-8	11,40	13,82	14,28	16,43
	66 PGH-8	13,00	13,60	17,46	21,72

Tabla 15. Resistencia a compresión de geopolímeros activados con NaOH + Metasilicato Disódico

Molaridad	Mezcla	Resistencia a Compresión (MPa)			
		7 días	14 días	21 días	28 días
8M	100 EMs-8	8,13	8,24	8,78	9,33
	100 ELMs-8	7,91	8,26	8,59	8,93
	100 LMs-8	1,50	1,89	2,10	2,51
	100 LLMs-8	1,51	1,93	2,26	2,83
	100 PGMs-8	5,70	8,00	10,49	11,43
	100 PGLMs-8	2,10	2,50	3,29	4,02
	66 EMs-8	21,79	22,48	23,01	23,12
	66 LMs-8	21,02	21,56	22,37	22,85
	66 PGMs-8	19,20	19,36	19,45	19,70

Tabla 16. Resistencia a compresión de geopolímeros activados con NaOH + Silicato de Sodio

Molaridad	Mezcla	Resistencia a Compresión (MPa)			
		7 días	14 días	21 días	28 días
8M	100 EML-8	23,58	23,75	24,36	24,86
	100 ELMl-8	22,48	22,96	24,12	24,70
	100 LML-8	13,68	14,51	16,32	16,41
	100 LLMl-8	3,66	4,82	5,23	6,50
	100 PGMl-8	29,56	30,84	32,14	34,55
	100 PGLMl-8	9,95	10,10	10,26	10,30
	66 EML-8	53,50	55,87	58,02	58,82
	66 LML-8	48,10	49,25	51,69	52,21
	66 PGMl-8	52,30	62,90	70,56	76,80

A continuación, se analizan una serie de aspectos como son: el tratamiento de las CFB, el propio origen de las CFB, la influencia de la molaridad, la composición de las mezclas y la temperatura de curado, así como el desempeño de los productos finales con los diferentes activadores.

Inicialmente se habían concebido dos molaridades para la conformación de las mezclas, 14M y 8M, sin embargo, con el primer análisis de las resistencias a compresión de las pastas conformadas con NaOH se decidió desechar la variante para 14M. Los resultados mostraron resistencias a los 28 días entre un 19% y un 54% más altas cuando se usó una concentración de 8M, las mayores

diferencias se evidencian en los residuos de Linares y Puente Genil, tanto para las combinaciones con 100% CFB como para las de 66% CFB. Se puede ver de forma más clara en la Figura 31.

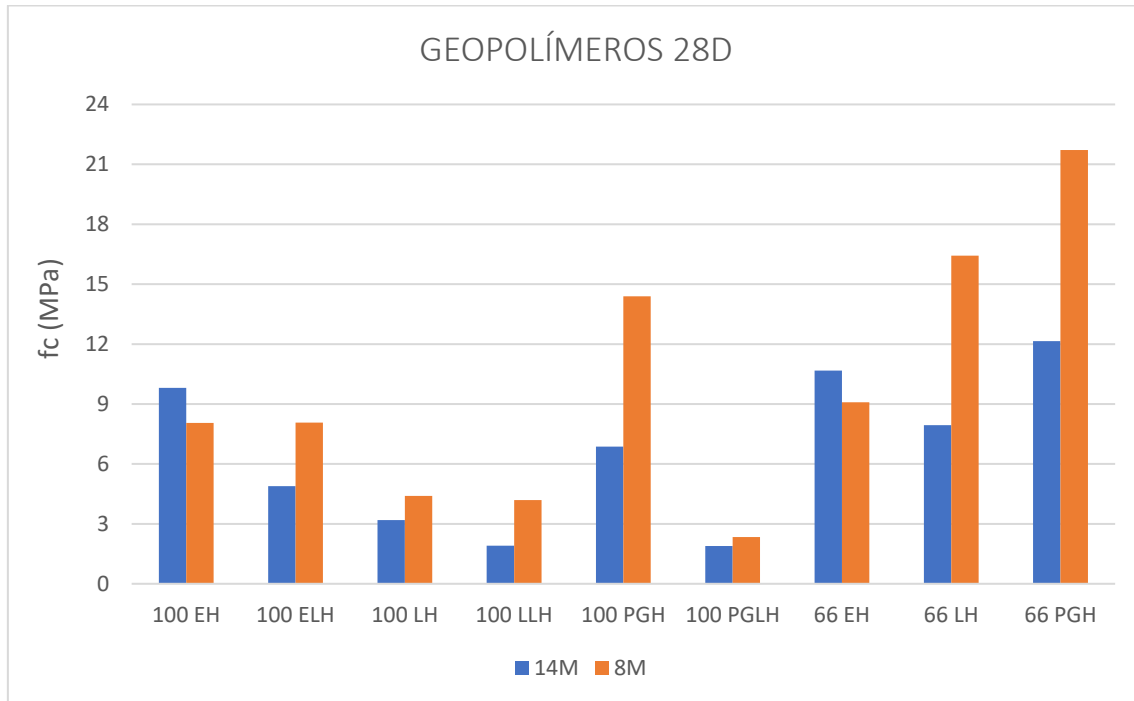


Figura 31. Resistencia a compresión a los 28 días de los geopolímeros con NaOH

Para explicar el comportamiento de las pastas, en primer lugar, es esencial tener en cuenta que una mayor molaridad implica una concentración más alta de reactivos [60], lo que, a primera vista, podría indicar una mayor disponibilidad de materiales para la formación de enlaces químicos y estructuras tridimensionales [10] en la matriz del geopolímero, sin embargo, esta lógica aparente puede verse contrarrestada por efectos adversos. Una alta molaridad puede llevar a una mayor viscosidad de la mezcla [60], lo que dificultaría la homogeneización de los reactivos y la distribución uniforme de partículas, resultando en aglomerados o zonas heterogéneas locales en la matriz del geopolímero, debilitando su estructura y reduciendo su resistencia. Igualmente podría verse afectada la cinética de la reacción, haciendo que ocurra una formación acelerada de estructuras menos densas y menos enlazadas, y por consiguiente menos resistentes.

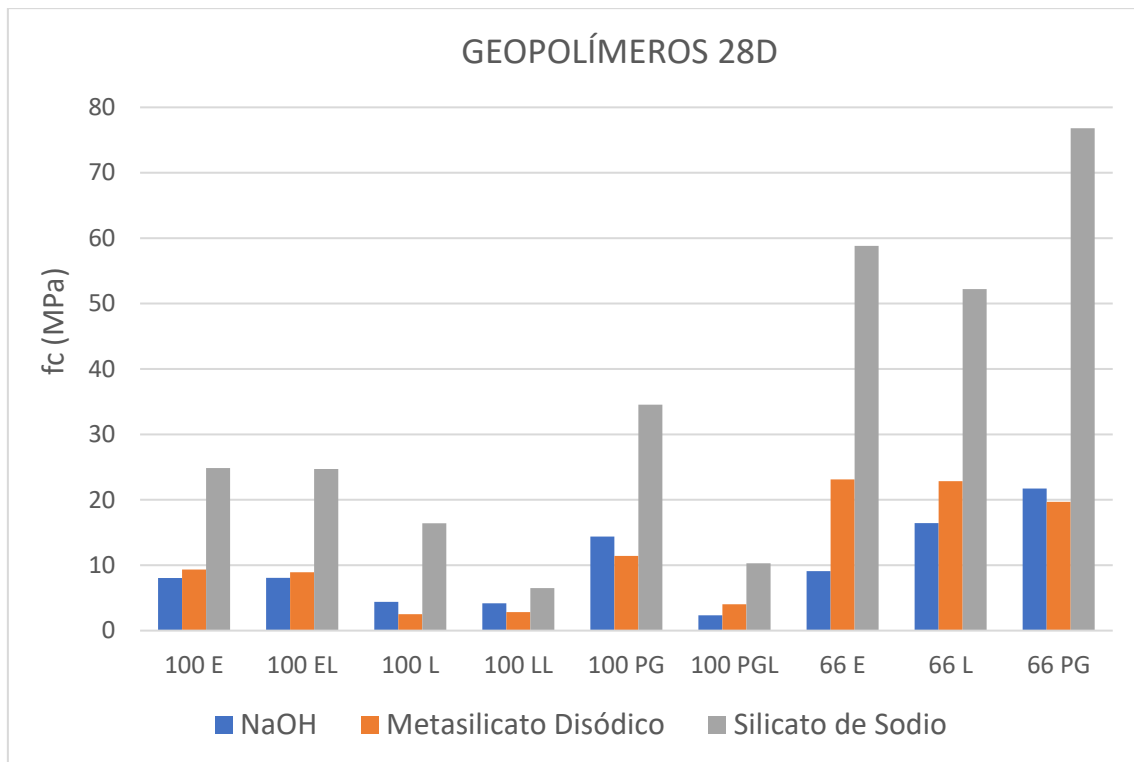


Figura 32. Resistencia a compresión a los 28 días de los geopolímeros activados con NaOH, Metasilicato y Silicato

La Figura 32 presenta los valores de resistencia a compresión a los 28 días para los diferentes geopolímeros formulados incluyendo los tres activadores. En relación a los dos enfoques aplicados para tratar las cenizas provenientes de biomásas de fondo (cenizas lavadas y cenizas sin lavar), se realiza la siguiente evaluación.

Para el caso de los residuos procedentes de Linares y Puente Genil el lavado inicial de las cenizas conllevó a un descenso, en todas las edades (Figura 33), de las resistencias alcanzadas por las mezclas en comparación con las de cenizas sin tratamiento, esto puede deberse a que, durante el lavado, ciertos minerales o componentes alcalinos presentes en las cenizas se hayan eliminado o reducido su concentración [62]. La ausencia o disminución de los mismos contribuye a la pobre formación de enlaces y estructuras químicas cruciales en la matriz del geopolímero [63], lo que resulta en una disminución de la resistencia. Por otro lado, las CFB-E mostraron resultados similares de resistencias para todas las edades, prácticamente sin variabilidad entre los datos para los dos tratamientos. Estos resultados en las CFB-E pueden estar

condicionados por el curado térmico inicial al que fueron sometidas todas las mezclas con este tipo de cenizas [28], [36], [64].

Respecto a los tratamientos térmicos iniciales, la muestra 100PGML-8, que estuvo bajo las condiciones de curado inicial de 100°C fue la mezcla con mejor rendimiento dentro de las composiciones de 100% CFB con 34.55MPa a los 28 días, seguida de las pastas 100EML-8 y 100ELML-8 con 24.86 y 24.70MPa respectivamente. El aumento en la resistencia a la compresión a una temperatura de curado elevada se puede atribuir a una mayor disolución de los elementos reactivos presentes en los precursores sólidos, lo que provoca un aumento en la velocidad de reacción y, como consecuencia, un alto grado de geopolimerización [60]. Para el caso de la combinación de 66% CFB + 33% CAH, la mezcla curada a 100°C (66LMS-8) tuvo una resistencia promedio, 22.85MPa, en relación con las demás muestras del lote.

Continuando el análisis, se puede concluir, que el mejor rendimiento estuvo asociado al uso de la combinación de Silicato de Sodio y de Hidróxido de Sodio como activadores tanto en las mezclas diseñadas con 100% CFB como en las que se sustituyó un 33% de CAH, con valores de 34.55 y 76.80MPa respectivamente. Estas pastas fueron preparadas a partir de CFB-PG, destacándose como la mejor de las cenizas de fondo de biomásas analizadas, para la mayoría de los casos de estudios, seguidas de las CFB-E y por último de las CFB-L.

Evidentemente las combinaciones de 66% CFB + 33% CAH resultaron las más beneficiosas en términos de resistencias. Las cenizas volantes aportan sílice y alúmina [36], mientras que las CFB tributan aluminosilicatos y otros reactivos, permitiendo una reacción química más completa y formando una matriz sólida. Además, las cenizas volantes suelen contener partículas finas y microesferas huecas que actúan como microagregados [8] que mejoran la densidad y la microestructura de la matriz del geopolímero, aumentando así la resistencia global del material [36].

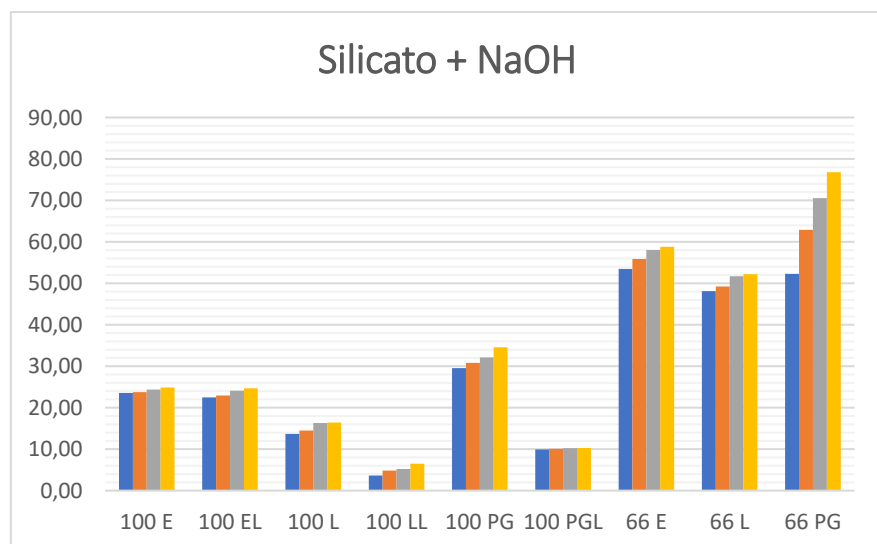
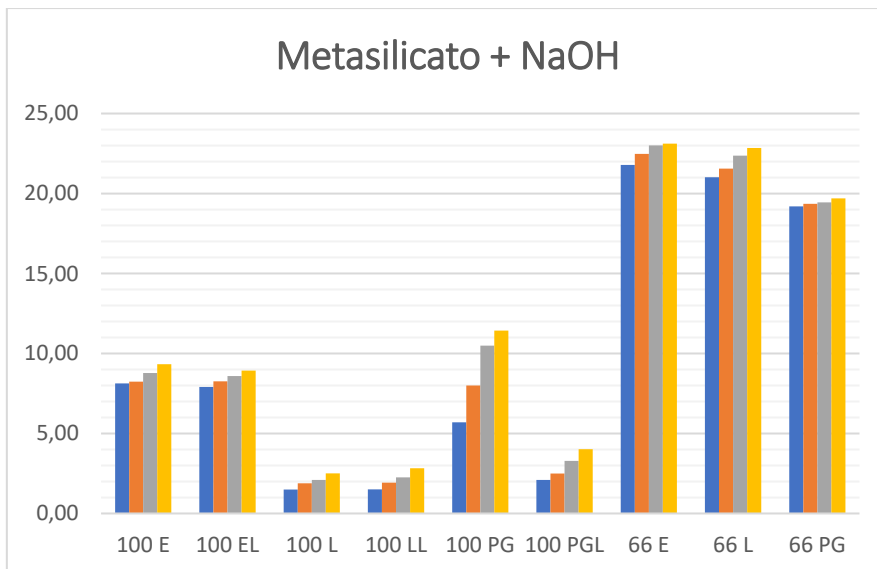
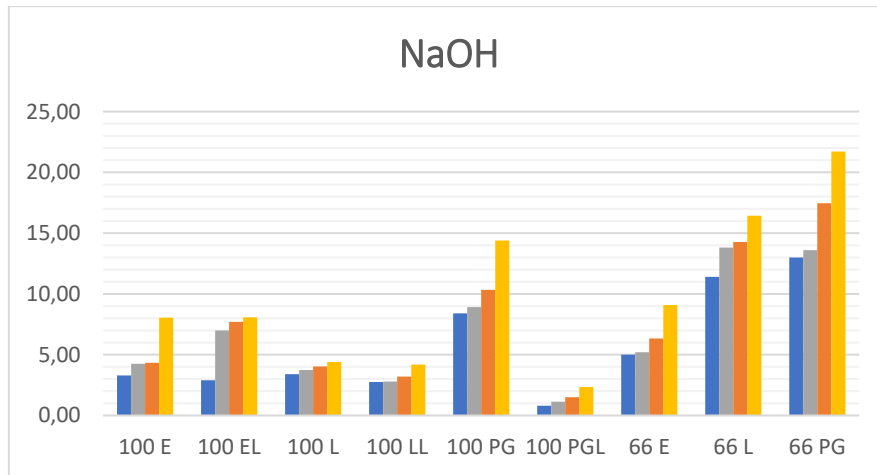


Figura 33. Evolución de la resistencia a compresión con el tiempo de los geopolímeros para los diferentes activadores

La ganancia de resistencia de las pastas con relación al tiempo, para cada activador, se puede analizar también en la Figura 33. Se destaca, cómo los especímenes con la incorporación de Metasilicato y Silicato de Sodio tuvieron una resistencia inicial a los 7 días de aproximadamente el 95% de sus resistencias finales. Es decir, que la sílice y álcalis adicionales incorporados por el Metasilicato y el Silicato de Sodio, aceleraron la formación de los enlaces y las estructuras en los primeros días [40], fomentando una matriz más densa y resistente en una etapa temprana, caso contrario a lo evidenciado cuando se utilizó como único activador el NaOH, obteniendo resultados más escalonados a medida que pasaba el tiempo.

4.1.2 Difracción de Rayos X

El software DifraccEva se utilizó para el análisis y la interpretación de los datos obtenidos de la Difracción de Rayos X, junto a los resultados de la Fluorescencia de Rayos X recogidos en la Tabla 17. Las muestras se agruparon por tipo de biomasa, mostrándose los difractogramas en las Figuras 34, 35 y 36 para las CFB-E, CFB-L y CFB-PG, respectivamente.

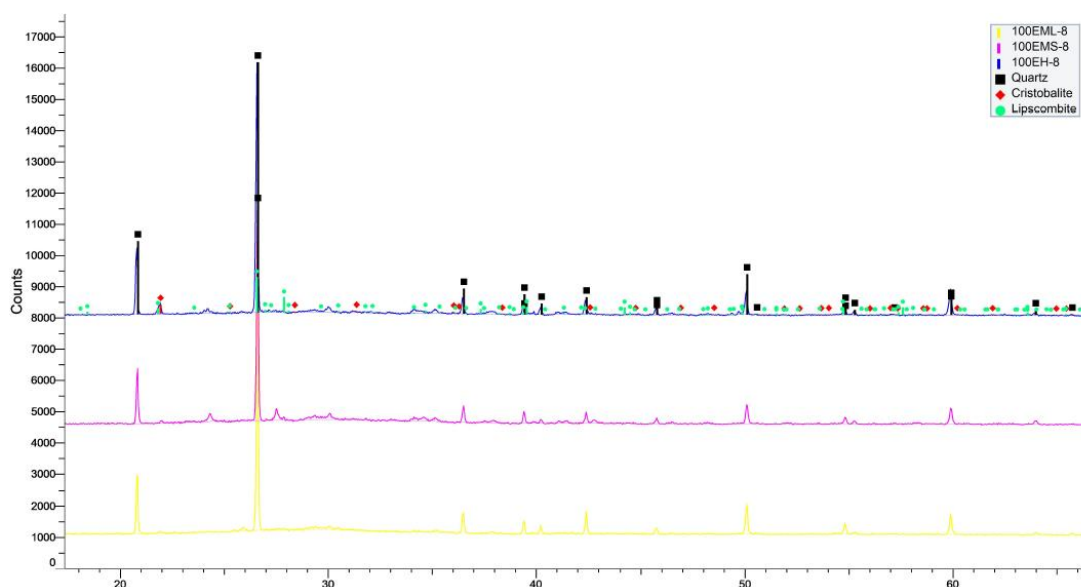


Figura 34. DRX para las CFB-E

Las pastas conformadas por CFB-E, independientemente de su combinación con uno u otro activador, presentaron en su composición diferentes tipos de cuarzos destacándose en el pico principal. Se puede expresar que los geopolímeros a

base de CFB-E son materiales ligeramente amorfos que contienen cuarzo y cristobalita entre sus componentes principales.

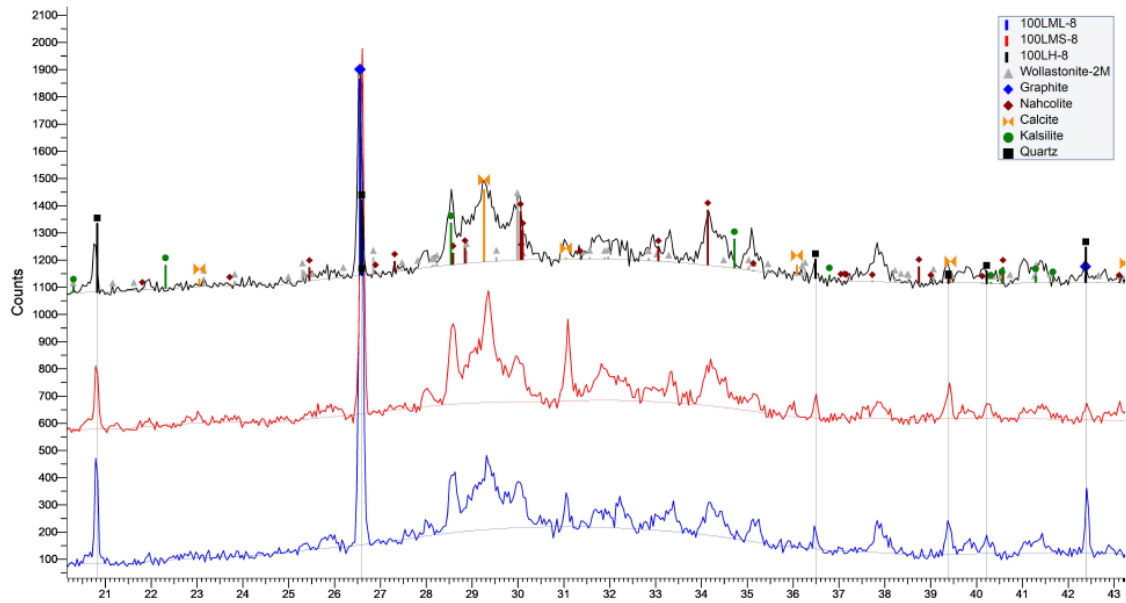


Figura 35. DRX para las CFB-L

Para las mezclas de CFB-L el principal compuesto identificado fue el grafito, sin embargo, la lógica lleva a razonar que es más probable que sean minerales de calcita, ya que se usan materiales ricos en calcio, a que sean estructuras hexagonales tipo grafito. Por tanto, los geopolímeros con cenizas de Linares presentan picos que son una combinación de cuarzo y calcita, identificándose, además, wollastonita y nahcolita. Se evidencian sus características amorfas.

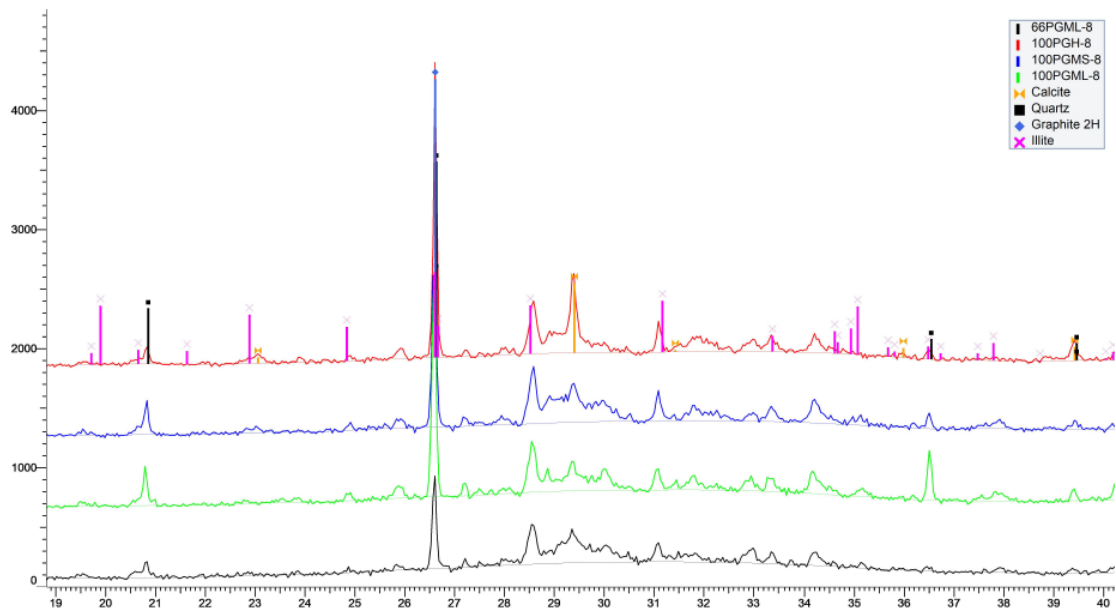


Figura 36. DRX para las CFB-PG

Al igual que con las anteriores cenizas, en el caso de las CFB-PG se forman materiales amorfos con picos que están compuestos por cuarzo y calcita, y otros silicatos como la illita.

De forma general se han formado geopolímeros amorfos, pero se necesita otra tipología de ensayos como Análisis Térmico Diferencial, Termogravimetría o FTIR para la identificación de sus fases.

4.1.3 Fluorescencia de Rayos X

En la Tabla 17 se resumen los principales componentes identificados en los geopolímeros a través de FRX. En las muestras analizadas se detectan en mayor rango sílice, sodio y calcio respectivamente, los cuales varían sus proporciones en función de las adiciones de uno u otro activador. Por ejemplo si se analizan las cenizas activadas con silicato de sodio puede apreciarse que las concentraciones medias de potasio y calcio se triplican al compararlas con las muestras activadas solamente con NaOH, mientras que el sodio y el silicio disminuyen ligeramente sus proporciones.

Tabla 17. Principales componentes (mass%) identificados por FRX en geopolímeros

Elementos	Muestras									
	100 EH-8	100 LH-8	100 PGH-8	100 EMS-8	100 LMS-8	100 PGMs-8	100 EML-8	100 LML-8	100 PGML-8	66 PGML-8*
CO₂	59,30	59,80	61,80	55,50	54,90	55,30	56,10	55,60	53,60	55,30
Si	15,60	15,80	18,10	11,00	12,10	12,30	10,60	11,00	12,50	12,20
Na	12,80	13,80	11,00	12,90	13,20	12,50	6,79	10,50	11,50	9,38
Ca	4,31	3,25	3,00	10,10	9,61	9,68	13,00	11,00	10,20	12,90
Al	2,98	3,17	2,21	1,75	1,66	1,77	2,36	2,12	2,17	2,50
K	2,37	2,02	1,84	4,87	4,72	4,64	6,73	5,95	6,14	4,00
Fe	1,43	1,15	1,09	1,04	0,96	0,98	1,46	1,27	1,24	0,89
Mg	0,55	0,45	0,46	1,40	1,65	1,63	1,60	1,27	1,41	1,75
P	0,19	0,13	0,14	0,95	0,80	0,82	0,89	0,79	0,77	0,49
Ti	0,19	0,17	0,17	0,17	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	0,16
Cl	0,12	0,11	0,04	0,06	0,04	0,06	0,11	0,14	0,08	0,13
S	0,08	0,07	0,06	0,04	0,04	0,04	0,09	0,08	0,08	0,21
Mn	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04
Cr	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
Sr	0,01	0,01	0,01	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03

4.1.4 Conclusiones parciales de los geopolímeros

1. Una mayor molaridad repercute negativamente en la resistencia a compresión de los geopolímeros activados con NaOH a los 28 días.
2. Para todas las edades, las pastas conformadas por CFB-L y CFB-PG presentaron resistencias a compresión inferiores cuando las CFB fueron sometidas a un lavado inicial, evidenciando una pérdida de elementos esenciales para las reacciones de geopolimerización.
3. El tratamiento térmico de 100°C x 24h al cual fueron sometidas las mezclas con CFB-E, además de las pastas 100PGM_L-8 (la de mejor rendimiento con un 100%CFB) fue efectivo al presentar mayores valores de resistencias a compresión frente a otras muestras con un tratamiento de 40°C x 24h.
4. La combinación de los activadores NaOH y Silicato de Sodio se hizo notar como la mejor al evaluar la compresión tanto en pastas con un 100% CFB como en las que se incorporó un 66%CFB + 33%CAH.
5. Los geopolímeros con CFB-PG presentaron las resistencias a compresión más altas en la mayoría de los casos, seguidos de los conformados con CFB-E y CFB-L respectivamente.
6. La incorporación de CAH al diseño de las mezclas aumentó los resultados de los productos finales.
7. Las gran mayoría de las reacciones de geopolimerización para las pastas con Metasilicato Disódico y Silicato de Sodio se desarrollaron en los primeros siete días de amasadas las mezclas, presentando para esa fecha aproximadamente el 95% de la resistencia a compresión evaluada a los 28 días.
8. A partir de la DRX y FRX se identificaron materiales generalmente amorfos en los que se formaron silicatos como el cuarzo y carbonatos como la calcita.

4.2 Morteros

4.2.1 Resistencia a Flexión

Las Tablas 18 y 19, recogen los valores para 7, 14, 21 y 28 días de las resistencias a flexión de los morteros de referencia sin activadores y los morteros diseñados con un 50% de sustitución del cemento con los tres tipos de activadores, respectivamente.

Tabla 18. Resistencia a flexión de morteros sin activadores

% Sustitución	Mezcla	Resistencia a Flexión (MPa)			
		7D	14D	21D	28D
0%	M Ref	7,46	10,54	12,23	15,55
25%	M25E	3,73	5,20	8,16	10,43
	M25L	3,92	6,84	8,02	9,19
	M25PG	4,08	5,71	6,88	8,75
30%	M30E	3,93	6,95	8,86	9,68
	M30L	2,96	5,25	6,63	8,46
	M30PG	2,97	5,06	7,13	8,68
50%	M50E	4,10	6,62	9,04	11,30
	M50L	3,99	6,27	7,89	9,34
	M50PG	3,40	4,23	6,38	7,95

Tabla 19. Resistencia a flexión de los morteros con 50% de sustitución y activación alcalina

Activador	Mezcla	Resistencia a Flexión (MPa)			
		7D	14D	21D	28D
NaOH	M50EH	4,85	4,96	5,56	6,43
	M50LH	4,39	4,44	5,01	5,93
	M50PGH	4,32	4,93	5,12	5,71
	M50(EC)H	5,69	6,26	6,98	7,34
	M50(LC)H	4,89	5,36	6,25	6,88
	M50(PGC)H	5,20	5,91	6,54	7,06
Metasilicato Sólido	M50EMS	3,00	3,20	3,59	4,03
	M50LMS	3,34	3,57	4,03	4,83
	M50PGMS	3,65	4,01	4,26	4,49
	M50(EC)MS	4,91	5,20	5,36	5,55
	M50(LC)MS	3,86	4,78	5,42	5,92
	M50(PGC)MS	4,68	4,99	5,32	5,62

Metasilicato Líquido	M50EML	3,93	4,17	4,22	4,64
	M50LML	3,59	3,98	4,20	4,37
	M50PGML	3,27	3,86	4,20	4,51
	M50(EC)ML	4,22	4,99	5,13	5,81
	M50(LC)ML	4,54	5,23	5,60	6,02
	M50(PGC)ML	4,74	5,16	5,82	6,17

Al hacer un primer análisis de las resistencias en los morteros de referencia sin el uso de activadores, se puede observar en la Figura 37 como el uso de diferentes sustituciones de CFB hace que la resistencia a flexión se reduzca [62], [65] entre un 22% y un 49% con respecto a la muestra de control, valores esperados ya que se sustituye entre un 25 y un 50% del cemento. Más específicamente, los dos picos de diferencias se dieron cuando se sustituyó un 50% del cemento por CFB, obteniéndose valores de 7.95MPa al usar CFB-PG y 11.30MPa cuando se incorporaron CFB-E, siendo en este caso, la mezcla M50E, la mejor combinación cuando se tiene en cuenta la flexión en morteros sin activación.

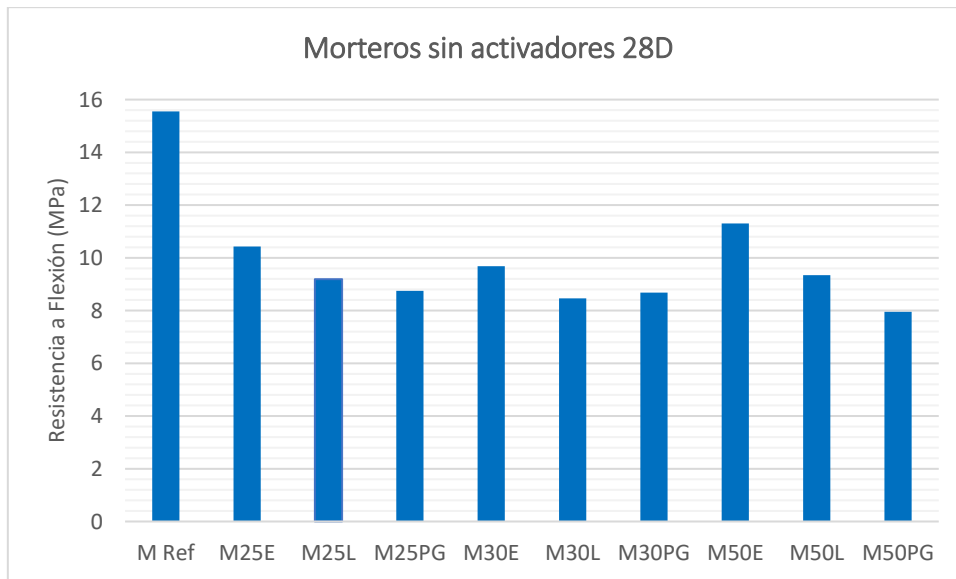


Figura 37. Resistencia a flexión de morteros sin activadores a los 28 días

Para los casos de los morteros que incluyen las sustituciones del 50% CFB y el uso de activadores, todas las mezclas mostraron más de un 50% de pérdidas con relación al mortero de referencia, valores descendentes también fueron encontrados en otras investigaciones [66]–[68]. Los morteros que incorporaron además CAH en sus composiciones presentaron los mejores valores para cada

tipo de activador, destacándose el uso del Hidróxido de Sodio (Figura 38), con el que se alcanzaron resistencias a flexión entre los 7.34MPa y los 6.88MPa a los 28 días. Las mezclas activadas a partir del NaOH sin la adición de CAH son también destacables por la similitud de valores con las mezclas que, si contenían CAH, para este caso la muestra M50EH fue la que más sobresalió con 6.43MPa.

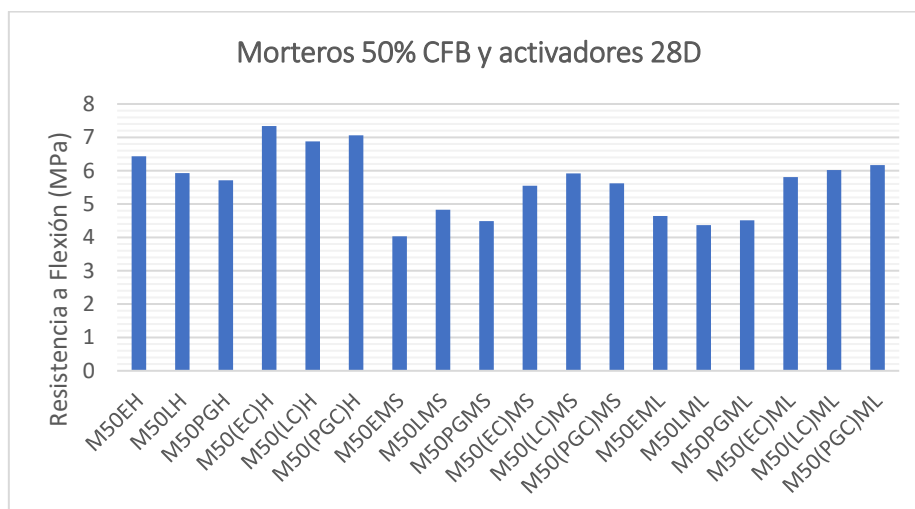


Figura 38. Resistencia a flexión de morteros con 50% CFB y activadores a los 28 días

Al emplear un activador y reducir el porcentaje de cemento al 50%, se observa una disminución en la resistencia para todas las mezclas, esto podría mejorarse con la implementación de un proceso de curado particularmente a altas temperaturas, como se evidenció en las pastas, lo que explica la falta de un incremento significativo en las resistencias.

4.2.2 Resistencia a Compresión

Las mediciones de las resistencias a compresión a 7, 14, 21 y 28 días de los morteros de referencia sin activadores, así como de los morteros con sustituciones del 50% del cemento y la incorporación de CAH se muestran en las Tablas 20 y 21, respectivamente.

Tabla 20. Resistencia a compresión de morteros sin activadores

% Sustitución	Mezcla	Resistencia a Compresión			
		7D	14D	21D	28D
0%	M Ref.	38,62	39,75	40,26	41,84
	M25E	29,31	29,63	30,89	32,56
25%	M25L	24,63	27,32	28,88	29,75
	M25PG	17,06	18,38	21,47	23,94
30%	M30E	22,38	23,71	26,65	29,34
	M30L	22,25	23,02	25,92	28,16
	M30PG	17,13	19,44	22,38	24,56
50%	M50E	12,84	14,31	15,03	16,18
	M50L	7,81	10,64	12,58	13,36
	M50PG	7,13	8,72	9,32	11,74

Tabla 21. Resistencia a compresión de los morteros con 50% de sustitución y activación alcalina

Activador	Mezcla	Resistencia a Compresión (MPa)			
		7D	14D	21D	28D
NaOH	M50EH	6,23	7,16	8,59	10,36
	M50LH	5,98	6,97	8,16	9,69
	M50PGH	5,89	6,92	7,94	9,71
	M50(EC)H	8,54	10,11	12,06	14,75
	M50(LC)H	8,25	10,72	12,03	13,64
	M50(PGC)H	7,03	9,56	10,38	12,78
Metasilicato Sólido	M50EM _s	4,11	4,53	5,68	6,81
	M50LM _s	6,46	7,08	7,13	9,51
	M50PGM _s	5,00	6,43	5,81	9,58
	M50(EC)M _s	7,54	8,72	9,76	10,68
	M50(LC)M _s	8,39	9,44	9,17	12,14
	M50(PGC)M _s	6,42	7,27	8,42	13,89
Metasilicato Líquido	M50EM _L	6,99	8,21	8,50	10,78
	M50LM _L	6,45	7,23	8,28	9,83
	M50PGM _L	6,34	7,97	8,73	12,23
	M50(EC)M _L	11,28	12,10	13,43	16,07
	M50(LC)M _L	10,79	11,93	13,87	15,17
	M50(PGC)M _L	11,07	12,88	15,01	16,98
100%	M Ref.	38,62	39,75	40,26	41,84

Al analizar los datos, se infiere que la sustitución de CFB por cemento repercute de manera negativa y progresiva, a medida que aumentan los porcentos de sustitución de residuos, en la resistencia a compresión de los morteros con respecto a la mezcla de referencia [58], [69]–[71]. Para los casos sin el uso de activadores, la utilización de CFB-E tuvo los mejores resultados en comparación a las CFB-L y CFB-PG, presentando a los 28 días: 32.56MPa, 29.34MPa y 16.18MPa para sustituciones de 25, 30 y 50% respectivamente (Figura 39).



Figura 39. Resistencia a compresión de morteros sin activadores a los 28 días

En la Figura 40, se pueden observar las resistencias a compresión a los 28 días de los morteros que incluyen sustituciones en el orden de 50% del cemento, con adiciones de CAH y activadores alcalinos. Al igual que en el análisis de la flexión, las muestras con mejores rendimientos fueron las que incorporaron en su diseño CAH, estos resultados fueron similares para los tres activadores utilizados. De un total de 18 muestras, nueve sobrepasaron el valor del mortero de referencia M50PG (11.74MPa), ocho estuvieron muy cerca de alcanzar ese número y solo una presentó valores muy inferiores (M50EMs con 6.81MPa), por lo que puede evidenciarse que el uso de CFB activadas alcalinamente en morteros beneficia la ganancia de resistencias a compresión de las muestras. La mezcla que más destacó fue M50(PGC)ML con 16.98MPa a los 28 días

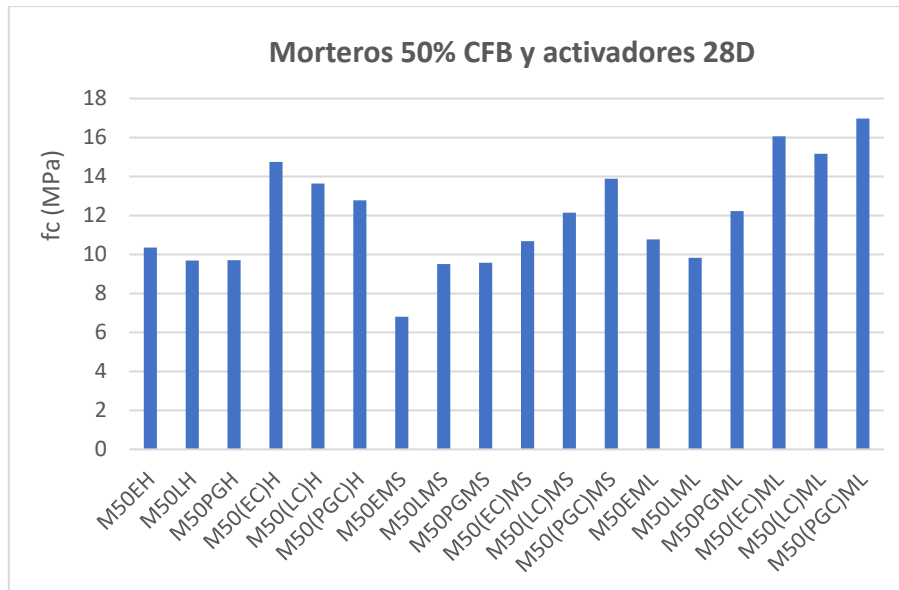


Figura 40. Resistencia a compresión de morteros con 50% CFB y activadores a los 28 días

En esta situación, se puede apreciar que al reemplazar el 50% del cemento por una CFB activadas, se obtienen valores de resistencia a compresión más elevados en comparación con la sustitución del 50% sin activación. Esto indica que la activación desempeña un papel crucial en mejorar las propiedades de resistencia del material, lo que respalda la elección de utilizar activadores en el proceso de formulación de los materiales.

4.2.3 Conclusiones parciales de los morteros

1. La sustitución de cemento por CFB sin ningún activador para conformar morteros influye de forma negativa en los valores de resistencias a flexión y a compresión de las muestras después de 28 días.
2. Un mayor grado de sustitución de cemento por CFB en los morteros se ve reflejado en un aumento de la pérdida de las resistencias a compresión a los 28 días. Sin embargo, cuando se analizan los esfuerzos a flexión la tendencia es contraria, mostrando mejores valores los morteros con un 50% de CFB.
3. Tanto para las muestras sin activadores como para las activadas, el uso de las CFB-E resultó en los mejores rendimientos a flexión, seguidos de las CFB-PG y por último de las CFB-L. En los ensayos a compresión las CFB-E también destacaron como influyentes de los más altos valores

junto a las CFB-PG, principalmente en aquellas mezclas que incorporaron CAH en sus composiciones.

4. En cuanto a los activadores usados, todos los morteros con la adición solo de NaOH evidenciaron los mejores resultados a flexión. En el caso de la compresión los activadores que más destacaron fueron el Silicato de Sodio y el NaOH cuando en las mezclas estuvieron presentes las CAH.
5. Se evidenció que al usar CFB activadas alcalinamente se logran mejores resultados a compresión en comparación con los morteros conformados con CFB sin activadores.

4.3 Hormigones

4.3.1 Resistencia a Compresión

La Tabla 22 recoge los datos de las resistencias a Compresión y Flexotracción para las tres amasadas de hormigón diseñadas. Los resultados presentados no son del todo alentadores, sin embargo se propone, como se comenta más adelante en la sección “Sugerencias”, la evaluación de distintos factores como el porcentaje a sustituir de cemento, la relación agua/cemento, el propio método de amasado, condiciones de curado, etc.

Tabla 22. Resistencia a compresión y flexotracción de los hormigones

Muestra	Compresión (MPa)		Flexotracción (MPa)
	7D	28D	28D
H Ref.	31,75	53,47	6,62
H25PG	18,23	18,74	3,30
H25PGM_L	10,22	10,42	3,26

En la Figura 41 se representan los valores de resistencias a compresión para las amasadas. Es evidente la reducción drástica de resistencia que se produce cuando se sustituye un 25% del cemento por CFB. En comparación con el hormigón de referencia, las muestras con CFB sin activador representan un 65% de pérdidas mientras que cuando se añade Silicato de Sodio los valores caen cerca de un 80%, presentando 10,42MPa a los 28 días para la amasada H25PGM_L. Los resultados obtenidos están en consonancia con otras investigaciones del tema [69], [72]. En los hormigones con sustituciones de CFB, las resistencias iniciales representaron aproximadamente el 98% de las resistencias a los 28 días, mientras que en la amasada de referencia la ganancia entre los 7 y 28 días es más escalonada.

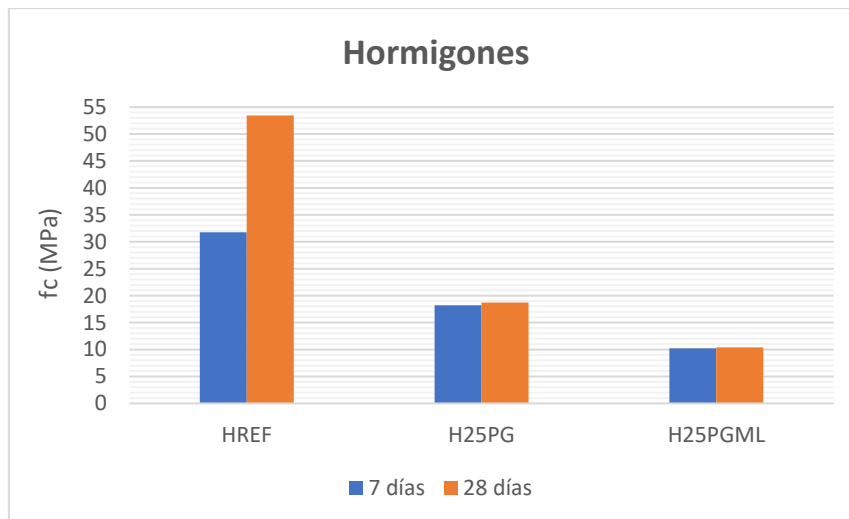


Figura 41. Resistencia a compresión de los hormigones

4.3.2 Flexotracción

La Flexotracción es analizada como la característica más importante a la hora de conformar y evaluar hormigones para pavimentos. Con relación a los resultados, graficados en la Figura 42, no se evidencian prácticamente diferencias entre la adición o no del Silicato de Sodio como activador, ya que las muestras H25PG y H25PGML presentan 3,30 y 3,26MPa a los 28 días, siendo un 50% menores que el valor de la muestra H REF (6,62MPa).

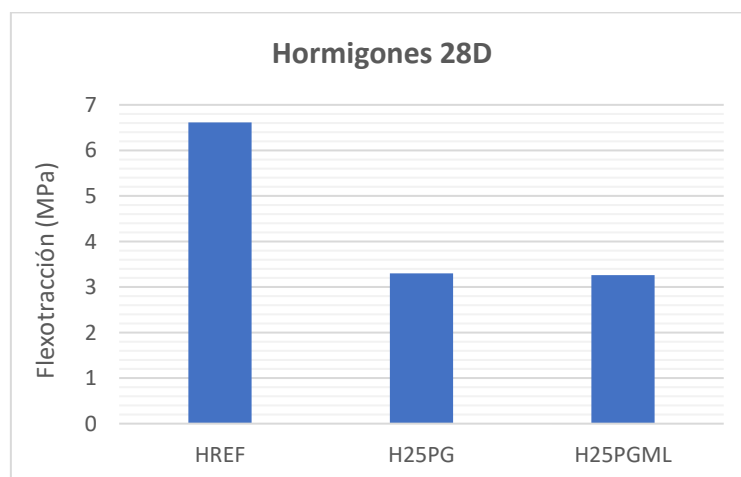


Figura 42. Flexotracción en hormigones a los 28 días

De acuerdo a la normativa técnica, las pruebas específicas de Flexotracción en las probetas para verificar su capacidad de resistencia deben encontrarse en el rango de 3,5 a 4,5MPa a los 28 días. Por tanto, el diseño adoptado en esta investigación para los hormigones con sustituciones de 25% del cemento por

CFB no cumple con estos requerimientos, siendo ínfimas las diferencias respecto a la norma. Como una forma de obtener mejores resultados podría evaluarse un porcentaje menor de sustituciones, la combinación de otros activadores, un método diferente de agregar y mezclar los activadores o la incorporación de cenizas volantes para lograr un mayor grado de puzolanidad.

4.3.3 Retracción

En la Tabla 23, se muestran los valores de retracción medidos a cada amasada para 1, 3, 7 y 28 días, tanto en condiciones secas como húmedas.

Tabla 23. Retracción en hormigones

Mezcla	Cámara Seca (S)				Cámara Húmeda (H)			
	1D	3D	7D	28D	1D	3D	7D	28D
HREF	1,816	1,787	1,601	1,595	1,940	1,809	1,904	1,925
H25PG	1,787	1,679	1,275	1,189	0,653	0,554	0,638	0,603
H25PGML	1,294	1,178	1,234	1,119	1,110	0,939	1,011	0,988

La Figura 43 grafica la evolución de la retracción desde el primer día de amasado hasta los 28 días, en función de las condiciones de curado. Tras el análisis, la retracción en probetas de hormigón se manifiesta de manera gradual a medida que pasa el tiempo en ambas condiciones de curado, ya sea en seco o sumergidas en agua.

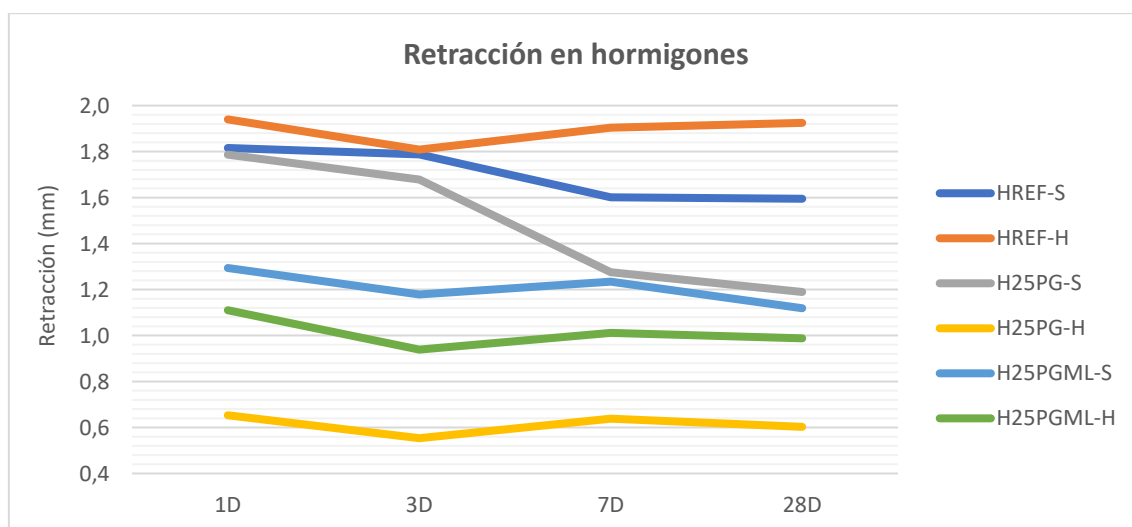


Figura 43. Retracción en hormigones

Para el caso de los hormigones que fueron curados en condiciones secas, los mismos presentaron un comportamiento más pronunciado, con una velocidad de

retracción más rápida en los primeros siete días y que disminuyó gradualmente. Dentro de este grupo, la mezcla H25PGML fue la que presentó menores valores de retracción seguida de la muestra que incorporó las CFB sin activación (H25PG).

Al referirse a los hormigones curados en condiciones húmedas, estos muestran una evolución de la retracción mucho menos pronunciada que los curados en seco. El uso de las CFB con y sin activador, influyó en la menor contracción de las muestras en comparación con la amasada de referencia, presentando valores entre un 48.7 y 68.7% de la mezcla de control, respectivamente.

De forma general, las probetas en condiciones húmedas exhibieron una retracción menor que las curadas en ambiente seco, siendo las muestras H25PG y H25PGML las que mejores resultados presentaron.

4.3.4 Densidad, absorción y porosidad

En la Tabla 24 se resumen los resultados después de haber sido ensayadas las muestras de hormigones según la UNE 83980:2014.

Tabla 24. Densidad, absorción y porosidad de hormigones

Mezcla	Absorción (%)	Densidad en seco (g/cm ³)	Porosidad accesible al agua (%)
HREF	3,8	2,292	9,0
H25PG	5,5	2,080	12,1
H25PGML	8,9	2,078	20,3

El uso de CFB en sustitución del cemento para la conformación de hormigones hace que los productos finales presenten densidades menores en términos de un 9% en comparación al hormigón de referencia. Más específicamente las CFB sin activación muestran resultados de un hormigón con 2.080g/cm³ sin diferencia con las CFB activas con las que se produjo un hormigón de 2.078g/cm³.

En cuanto a la absorción y la porosidad accesible al agua, sustituir cemento por CFB hace que se incrementen sus porcentajes, por ejemplo, la porosidad va desde 9% para el control hasta 12.1% para H25PG y 20.3% en el caso de H25PGML. Esto puede comprobarse en otros estudios [61], [73].

4.3.5 Penetración de agua

El ensayo realizado, ratificó los resultados de absorción y porosidad, mostrando que en la mezcla H25PGML el agua penetró 11.10mm de media, en la H25PG se promediaron 8.10mm, mientras que en la muestra control el líquido no penetró, es decir que el uso de CFB en hormigones aumenta la penetración de agua [52]. La Tabla 25 recoge los datos.

Tabla 25. Penetración de agua en hormigones

Mezcla	Penetración de Agua (mm)
HREF	0
H25PG	8.10
H25PGML	11.10

El análisis de estos resultados, junto a los de absorción y porosidad revelan la necesidad de abordar la cuestión de la penetración del agua y las consecuencias potenciales que deben considerarse en el diseño y la aplicación bajo condiciones de exposición al agua. Uno de los aspectos clave es la posible exposición a ciclos de hielo y deshielo que podría afectar en la resistencia mecánica causando daños a la estructura, incluyendo la formación de fisuras y el desprendimiento de la superficie. La acción del agua puede igualmente desencadenar reacciones químicas no deseadas, como la lixiviación o la disolución de compuestos en el hormigón.

4.3.6 Carbonatación

Luego de estar 28 días en la cámara de carbonatación, las muestras son evaluadas para la medición de la profundidad de penetración del CO₂ en las mismas. Según el indicador de fenolftaleína utilizado, a medida que se incorporan CFB a los hormigones es mayor la profundidad de carbonatación en las muestras. Los valores medios de carbonatación para la mezclas fueron de 7.10 y 8.10mm en H25PG y H25PGML respectivamente, mientras que para la muestra control no hubo ningún signo de carbonatación. Los datos se muestran en la Tabla 26.

Para la segunda condición, el curado húmedo, las probetas de referencia y las de H25PG no presentaron vestigios de carbonatación como se observó en la Figura 30, por otro lado, el hormigón H25PGML si evidenció un proceso de carbonatación con una media de 20.9mm de penetración en todas sus caras siendo aproximadamente un 61.2% mayor que cuando se curó la misma mezcla en un ambiente rico en CO₂.

Tabla 26. Frente de carbonatación de los hormigones

Mezcla	Frente de carbonatación (mm)	
	Curado CO ₂	Curado Húmedo
HREF	0	0
H25PG	7.10	0
H25PGML	8.10	20.90

El mayor grado de penetración del CO₂ pudiera estar relacionado directamente con la mayor porosidad presentada por estos productos, lo que se reconoce en otras investigaciones [74], [75].

4.3.7 Conclusiones parciales de los hormigones

1. Las sustituciones de cemento por CFB hacen que se produzca una reducción de los valores de resistencias en hormigones, y se acentúan más cuando se agrega Silicato de Sodio como activador alcalino.
2. Los hormigones que incorporan CFB como sustitutos del cemento logran valores de resistencias iniciales de aproximadamente el 98% de las resistencias finales.
3. Cuando se incorporan CFB en hormigones para suplir las cantidades de cemento, las resistencias a Flexotracción se ve afectada con respecto a la muestra de referencia. No existen diferencias en el comportamiento de las mezclas cuando se agregan las cenizas activadas y las no activadas.
4. La retracción en probetas de hormigón se manifiesta de manera gradual a medida que pasa el tiempo en ambas condiciones de curado, ya sea en seco o sumergidas en agua.

5. Se pudo comprobar que la incorporación de CFB redujo los valores de retracción para las dos condiciones estudiadas.
6. La incorporación de CFB a hormigones reduce, aproximadamente, un 9% los valores de densidad de los productos finales.
7. Las muestras con sustituciones de CFB activadas son las que presentan los valores máximos en cuanto a absorción y porosidad.
8. La penetración de agua y la carbonatación se ven igualmente afectadas por la utilización de CFB activas o no al conformar hormigones.

5. Conclusiones

De forma general, se han obtenido resultados que respaldan la búsqueda de alternativas eficientes y sostenibles en la formulación y producción de geopolímeros, morteros y hormigones destacando la importancia de factores como la concentración del activador, las condiciones de tratamiento térmico, la procedencia de las CFB y la sinergia entre activadores para lograr propiedades físico-mecánicas óptimas y contribuir a un enfoque más eco-eficiente en la industria de materiales de construcción.

1. En cuanto a los geopolímeros puede resumirse que:

Se observó como una mayor molaridad del activador, en particular el hidróxido de sodio, tuvo un impacto negativo en la resistencia a compresión de los geopolímeros a los 28 días, sugiriendo que la concentración del activador debe ser cuidadosamente controlada para lograr propiedades mecánicas óptimas en este tipo de materiales.

Se encontró, además, que las pastas elaboradas con CFB-L y CFB-PG mostraron resistencias a compresión más bajas cuando las CFB fueron sometidas a un lavado inicial, indicando una pérdida de elementos esenciales para las reacciones de geopolimerización durante el proceso de lavado.

El tratamiento térmico a 100°C durante 24 horas, aplicado a las mezclas con CFB-E, demostró ser efectivo al proporcionar mayores valores de resistencia a compresión en comparación con las muestras tratadas a 40°C durante el mismo tiempo.

La combinación de activadores NaOH y silicato de sodio se identificó como la más efectiva tanto en pastas con un 100% de CFB como en aquellas con una combinación del 66% de CFB y 33% de CAH. En cuanto a las CFB utilizadas, se

comprobó que las pastas con CFB-PG presenten las resistencias a compresión más altas en la mayoría de los casos, seguidas de las pastas con CFB-E y CFB-L, resaltando la influencia de la procedencia, tratamiento y generación de las CFB en las propiedades finales de los geopolímeros.

La incorporación de CAH en el diseño de las mezclas contribuyó a mejorar los resultados de los productos finales, lo que indica que esta adición puede ser beneficiosa para las propiedades de los geopolímeros.

Además, se identificó que la mayoría de las reacciones de geopolymerización en las pastas con metasilicato disódico y silicato de sodio ocurrieron en los primeros siete días de amasado, alcanzando aproximadamente el 95% de la resistencia a compresión evaluada a los 28 días, esto subraya la importancia de un proceso de curado adecuado durante los primeros días.

Por último, el análisis por DRX y FRX reveló la presencia de materiales generalmente amorfos en los cuales se formaron silicatos como el cuarzo y carbonatos como la calcita, proporcionando información sobre la composición y estructura de los geopolímeros desarrollados, sin embargo, no es suficiente con estos ensayos y se propone hacer un estudio más detallado incluyendo otras técnicas.

2. Con respecto a los morteros se concluye que:

La sustitución de cemento por CFB en la formulación de morteros sin la adición de activadores ejerce un impacto negativo en las resistencias a flexión y compresión de las muestras después de 28 días.

Se encontró, además, que a medida que aumenta el grado de sustitución de cemento por CFB en los morteros, se incrementa la pérdida de resistencia a compresión a los 28 días, aunque la tendencia es contraria en los esfuerzos de flexión, donde los morteros con un 50% de CFB mostraron un mejor desempeño.

En cuanto a las características de las CFB, se observa que con la incorporación de las cenizas de biomasa provenientes de eucalipto (CFB-E) los morteros presentaron los mejores resultados en términos de resistencia a flexión, seguidas de las CFB-PHG y, en último lugar, las CFB-L, esta tendencia se

mantuvo tanto en muestras sin activadores como en las activadas, y se destacó especialmente en los ensayos de compresión cuando se incorporan CAH en las mezclas.

En relación con los activadores utilizados, se encontró que los morteros con la adición exclusiva de NaOH tuvieron los mejores resultados en resistencia a flexión.

Por otro lado, en las pruebas de compresión, los activadores más efectivos fue la combinación del Silicato de Sodio y el NaOH, especialmente cuando se incluyeron CAH.

Finalmente, se destacó que el uso de CFB activadas alcalinamente condujo a un aumento significativo en las resistencias a compresión en comparación con los morteros que contenían CFB sin activadores.

3. Para los hormigones conformados:

Se ha evidenciado como la sustitución de cemento por CFB conlleva una reducción en los valores de resistencia de los hormigones, y esta reducción se acentúa aún más cuando se utiliza Silicato de Sodio como activador alcalino. Sin embargo, es importante destacar que los hormigones que incorporan CFB como sustituto del cemento logran valores de resistencia iniciales que alcanzan aproximadamente el 98% de las resistencias finales.

En cuanto a las resistencias a Flexotracción, se observa que se ven afectados en comparación con la muestra de referencia cuando se incorporan CFB, y no se han encontrado diferencias significativas en el comportamiento de las mezclas cuando se agregan CFB activadas o no activadas.

Igualmente, se ha comprobado que la retracción en probetas de hormigón se manifiesta gradualmente a lo largo del tiempo, tanto en condiciones de curado en seco como sumergidas en agua, y la incorporación de CFB reduce los valores de retracción en ambas condiciones.

Con relación a la densidad de los productos finales, la inclusión de CFB reduce aproximadamente un 9%, lo que se traduce en hormigones más ligeros.

Por otro lado, las muestras con sustituciones de CFB activadas presentan valores máximos en cuanto a absorción y porosidad, lo que sugiere un mayor grado de permeabilidad en estos productos.

Finalmente, tanto la penetración de agua como la carbonatación se ven afectadas por la utilización de CFB, ya sean activadas o no, en la formulación de hormigones.

6. Sugerencias

Con base en las conclusiones obtenidas para los ensayos de los hormigones, se proponen dos recomendaciones para la mejora y el aprovechamiento de estos materiales.

1. Optimización de las proporciones y procesos de fabricación

Dado que los hormigones presentaron resistencias a compresión por debajo de los estándares requeridos para su uso en carreteras y ciclovías, se sugiere una revisión detallada de las proporciones de las mezclas, así como de los procesos de fabricación. Esto incluye la formulación de nuevas dosificaciones que permitan aumentar la resistencia, en las que, por ejemplo, se varíen las cantidades de CFB o de los activadores alcalinos. Además, se podría considerar la implementación de técnicas de mezclado más eficientes y/o métodos de curado específicos para mejorar la calidad de los hormigones.

2. Exploración de aplicaciones ambientales y valorización de los residuos

Dado que los ensayos revelaron valores significativamente altos de porosidad, absorción y carbonatación en los hormigones, se abre una interesante perspectiva ambiental. Estos materiales podrían ser considerados como candidatos para actuar como captadores de CO₂. Para ello, se podrían investigar métodos de carbonatación, como la mineralización de las CFB, curados en ambientes ricos en CO₂ o incluso la inserción deliberada del CO₂ en el proceso de amasado. La mineralización de las cenizas podría permitir, además, de su uso como sustitutos parciales de los áridos naturales en la fabricación de hormigones, lo que contribuiría a la producción de materiales más sostenibles y con emisiones netas negativas de CO₂, fomentando así la ecoeficiencia y la responsabilidad ambiental en la industria de la construcción.

Estas recomendaciones buscan no solo mejorar la calidad de los hormigones producidos a partir de CFB, sino también explorar nuevas aplicaciones y direcciones ambientales para estos materiales, contribuyendo así a un enfoque más sostenible y eficiente en la construcción de infraestructuras.

7. Referencias

- [1] “Green Deal: clave para una UE climáticamente neutra y sostenible,” 2023. Accessed: Aug. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20200618STO81513/green-deal-key-to-a-climate-neutral-and-sustainable-eu>
- [2] “Plan de Acción para la Economía Circular,” Mar. 2020. Accessed: Aug. 10, 2023. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_20_420
- [3] Instituto de la Ingeniería de España, “Biomasa y Aprovechamiento Forestal,” Dec. 2022, Accessed: Aug. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.iies.es/single-post/conclusiones-de-la-jornada-biomasa-y-aprovechamiento-forestal>
- [4] “Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo -de 11 de diciembre de 2018- Relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables,” 2018.
- [5] APPA Renovables, “Biomásas.” <https://www.appa.es/> (accessed Sep. 01, 2023).
- [6] AVEBIOM, “Mapa de los Biocombustibles 2022. España y Portugal,” 2022.
- [7] P. Ren, T. C. Ling, and K. H. Mo, “CO₂ pretreatment of municipal solid waste incineration fly ash and its feasible use as supplementary cementitious material,” *J Hazard Mater*, vol. 424, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2021.127457.
- [8] C. M. A. Fontes, R. B. Silva, and P. R. L. Lima, “Characterization and Effect of Using Bottom and Fly Ashes from Co-combustion of Cocoa Waste as Mineral Addition in Concrete,” *Waste Biomass Valorization*, vol. 10, no. 1, pp. 223–233, Jan. 2019, doi: 10.1007/s12649-017-0031-x.
- [9] CEDEX, “Cenizas procedentes de la incineración de biomásas.” <https://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/23/diciembre-2014/valorizacion/10/aplicaciones.html> (accessed Jul. 20, 2023).
- [10] G. J. B. Silva, V. P. Santana, and M. Wójcik, “Investigation on mechanical and microstructural properties of alkali-activated materials made of wood biomass ash and glass powder,” *Powder Technol*, vol. 377, pp. 900–912, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.powtec.2020.09.048.
- [11] K. Kaur, J. Singh, and M. Kaur, “Compressive strength of rice husk ash based geopolymer: The effect of alkaline activator,” *Constr Build Mater*, vol. 169, pp. 188–192, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.200.
- [12] D. B. Istuque, J. Payá, L. Soriano, M. V. Borrachero, J. Monzó, and M. M. Tashima, “The role of dissolved rice husk ash in the development of binary blast

- furnace slag-sewage sludge ash alkali-activated mortars,” *Journal of Building Engineering*, vol. 52, Jul. 2022.
- [13] R. Rodríguez Hernández, “El bambú como refuerzo en materiales compuestos para la construcción,” Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, 2017. Accessed: Sep. 01, 2023. [Online]. Available: <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/8894>
- [14] M. J. B. Moraes *et al.*, “Production of bamboo leaf ash by auto-combustion for pozzolanic and sustainable use in cementitious matrices,” *Constr Build Mater*, vol. 208, pp. 369–380, May 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.007.
- [15] D. Eliche-Quesada, A. Calero-Rodríguez, E. Bonet-Martínez, L. Pérez-Villarejo, and P. J. Sánchez-Soto, “Geopolymers made from metakaolin sources, partially replaced by Spanish clays and biomass bottom ash,” *Journal of Building Engineering*, vol. 40, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.102761.
- [16] M. M. Alonso, C. Gascó, M. M. Morales, J. A. Suárez-Navarro, M. Zamorano, and F. Puertas, “Olive biomass ash as an alternative activator in geopolymer formation: A study of strength, durability, radiology and leaching behaviour,” *Cem Concr Compos*, vol. 104, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103384.
- [17] F. Agrela, M. Cabrera, M. Martín Morales, M. Zamorano, and M. Alshaaer, “Biomass fly ash and biomass bottom ash,” *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*, pp. 23–58, 2019, Accessed: Sep. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780081024805000026>
- [18] M. Cruz-Yusta, I. Mármol, J. Morales, and L. Sánchez, “Use of olive biomass fly ash in the preparation of environmentally friendly mortars,” *Environ Sci Technol*, vol. 45, no. 16, pp. 6991–6996, Aug. 2011, Accessed: Sep. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-80051745169&origin=inward&txGid=b33f0de4351f3289a5d54a25a6898a07>
- [19] A. De Rossi, L. Simão, M. J. Ribeiro, D. Hotza, and R. F. P. M. Moreira, “Study of cure conditions effect on the properties of wood biomass fly ash geopolymers,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 7518–7528, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.05.047.
- [20] R. Rajamma *et al.*, “Biomass fly ash effect on fresh and hardened state properties of cement based materials,” *Compos B Eng*, vol. 77, pp. 1–9, 2015, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.03.019.
- [21] B. S. Thomas, J. Yang, K. H. Mo, J. A. Abdalla, R. A. Hawileh, and E. Ariyachandra, “Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: A comprehensive review,” *Journal of Building Engineering*, vol. 40. Elsevier Ltd, Aug. 01, 2021. doi: 10.1016/j.job.2021.102332.
- [22] L. Mo, F. Zhang, D. K. Panesar, and M. Deng, “Development of low-carbon cementitious materials via carbonating Portland cement–fly ash–magnesia blends

- under various curing scenarios: a comparative study,” *J Clean Prod*, vol. 163, pp. 252–261, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.01.066.
- [23] A. B. Ayobami, “Performance of wood bottom ash in cement-based applications and comparison with other selected ashes: Overview,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 166. Elsevier B.V., Mar. 01, 2021. doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105351.
- [24] F. Farooq *et al.*, “Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review,” *Construction and Building Materials*, vol. 306. Elsevier Ltd, Nov. 01, 2021. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124762.
- [25] V. Jayanthi *et al.*, “Innovative use of micronized biomass silica-GGBS as agro-industrial by-products for the production of a sustainable high-strength geopolymer concrete,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01782.
- [26] S. Tinaut Rodríguez and J. F. San José Alonso, “ANÁLISIS DEL USO DE CENIZAS DE BIOMASA EN HORMIGONES ECO-EFICIENTES EN EL ÁMBITO DE LA ECONOMÍA CIRCULAR,” UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, Valladolid, 2022.
- [27] D. Boulday and Marcovecchio F, “Valorización de las cenizas de la combustión de biomasa. Revisión de depósitos y procesos asociados,” 2016.
- [28] S. A. Lira Zúñiga, “CAPTURA DE CO₂ EN CENIZAS DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA,” PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE ESCUELA DE INGENIERÍA, Santiago de Chile, 2017.
- [29] A. M. Mohamed, B. A. Tayeh, Y. I. Abu Aisheh, and M. N. A. Salih, “Utilising olive-stone biomass ash and examining its effect on green concrete: A review paper,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 24, pp. 7091–7107, May 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.05.039.
- [30] M. Cabrera, J. L. Díaz-López, F. Agrela, and J. Rosales, “Eco-efficient cement-based materials using biomass bottom ash: A review,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 22. MDPI AG, pp. 1–23, Nov. 02, 2020. doi: 10.3390/app10228026.
- [31] E. Ossoli, F. Volpintesta, P. Stabile, A. Reggiani, C. Santulli, and E. Paris, “Upcycling of composite materials waste into geopolymer-based mortars for applications in the building sector,” *Mater Lett*, vol. 333, 2023, doi: 10.1016/j.matlet.2022.133625.
- [32] S. Arafa, A. Milad, N. I. M. Yusoff, N. Al-Ansari, and Z. M. Yaseen, “Investigation into the permeability and strength of pervious geopolymer concrete containing coated biomass aggregate material,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 15, pp. 2075–2087, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.09.045.
- [33] M. Liu, R. Hu, Y. Zhang, C. Wang, and Z. Ma, “Effect of ground concrete waste as green binder on the micro-macro properties of eco-friendly metakaolin-based geopolymer mortar,” *Journal of Building Engineering*, vol. 68, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.JOBE.2023.106191.

- [34] E. Bonet-Martínez, P. García-Cobo, L. Pérez-Villarejo, E. Castro, and D. Eliche-Quesada, "Effect of olive-pine bottom ash on properties of geopolymers based on metakaolin," *Materials*, vol. 13, no. 4, Feb. 2020, doi: 10.3390/ma13040901.
- [35] L. Silvestro, T. P. Scolaro, A. S. Ruviano, G. T. dos Santos Lima, P. J. P. Gleize, and F. Pelisser, "Use of biomass wood ash to produce sustainable geopolymeric pastes," *Constr Build Mater*, vol. 370, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130641.
- [36] K. C. Reddy and K. V. L. Subramaniam, "Investigation on the roles of solution-based alkali and silica in activated low-calcium fly ash and slag blends," *Cem Concr Compos*, vol. 123, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104175.
- [37] T. Luukkonen, Z. Abdollahnejad, J. Yliniemi, P. Kinnunen, and M. Illikainen, "One-part alkali-activated materials: A review," *Cement and Concrete Research*, vol. 103. Elsevier Ltd, pp. 21–34, Jan. 01, 2018. doi: 10.1016/j.cemconres.2017.10.001.
- [38] A. Autef, E. Joussein, G. Gasgnier, and S. Rossignol, "Feasibility of aluminosilicate compounds from various raw materials: Chemical reactivity and mechanical properties," *Powder Technol*, vol. 301, pp. 169–178, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.powtec.2016.06.001.
- [39] "Un material activado alcalino 100% a base de residuos mediante el uso de ceniza de biomasa de hueso de aceituna (OBA) y escoria de alto horno (BFS)," 2017.
- [40] K. C. Reddy, C. Gudur, and K. V. L. Subramaniam, "Study on the influences of silica and sodium in the alkali-activation of ground granulated blast furnace slag," *Constr Build Mater*, vol. 257, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119514.
- [41] J. G. Jang, N. K. Lee, and H. K. Lee, "Fresh and hardened properties of alkali-activated fly ash/slag pastes with superplasticizers," *Constr Build Mater*, vol. 50, pp. 169–176, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.048.
- [42] S. A. Bernal, R. San Nicolas, J. S. J. Van Deventer, and J. L. Provis, "Water content modifies structural development of sodium metasilicate-activated slag cementitious agents," *ALCONPAT*, vol. 5, Apr. 2015.
- [43] D. C. Valderrama Buitrago, "Evaluación de las Propiedades Físico-Mecánicas de Morteros con la Adición de Caucho Molido," Universidad Antonio Nariño, Bogotá, 2022.
- [44] S. Soumya Pradhan, U. Mishra, S. Kumar Biswal, and Parveen, "Mechanical and microstructural study of slag based alkali activated concrete incorporating RHA," *Constr Build Mater*, vol. 400, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132685.
- [45] Y. Ding, J. G. Dai, and C. J. Shi, "Mechanical properties of alkali-activated concrete: A state-of-the-art review," *Constr Build Mater*, vol. 127, pp. 68–79, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.121.
- [46] K.-D. Tran Thi, M.-C. Liao, and D.-H. Vo, "The characteristics of alkali-activated slag-fly ash incorporating the high volume wood bottom ash: Mechanical properties and microstructures," *Constr Build Mater*, vol. 394, Aug. 2023,

Accessed: Sep. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/record/display.uri?origin=citedby&eid=2-s2.0-85164284381&noHighlight=false&relpos=1>

- [47] S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, and C. G. Vassileva, "An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification," *Fuel*, vol. 105. pp. 40–76, Mar. 2013. doi: 10.1016/j.fuel.2012.09.041.
- [48] M. Rahmanihezaki and A. Hemmati, "A review of mineral carbonation by alkaline solidwaste," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 121. Elsevier Ltd, Dec. 01, 2022. doi: 10.1016/j.ijggc.2022.103798.
- [49] S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, and C. G. Vassileva, "An overview of the composition and application of biomass ash.: Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges," *Fuel*, vol. 105. pp. 19–39, Mar. 2013. doi: 10.1016/j.fuel.2012.10.001.
- [50] M. J. R. Hinojosa, A. P. Galvín, F. Agrela, M. Perianes, and A. Barbudo, "Potential use of biomass bottom ash as alternative construction material: Conflictive chemical parameters according to technical regulations," *Fuel*, vol. 128, pp. 248–259, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2014.03.017.
- [51] D. Vaičiukynienė, D. Nizevičienė, A. Kantautas, A. Kielė, and V. Bocullo, "Alkali Activated Binders Based on Biomass Bottom Ash and Silica By-Product Blends," *Waste Biomass Valorization*, vol. 12, no. 2, pp. 1095–1105, Feb. 2021, doi: 10.1007/s12649-020-01042-0.
- [52] M. G. Beltrán, F. Agrela, A. Barbudo, J. Ayuso, and A. Ramírez, "Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates," *Constr Build Mater*, vol. 72, pp. 231–238, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.019.
- [53] S. MORENO, M. CABRERA, F. AGRELA, R. RODRIGUEZ, and J. ROSALES, "Application of different techniques of mechanical and alkaline activation of biomass bottom ash for use in mortars," Córdoba: II International Córdoba Eco-Concrete Conference, 2023.
- [54] J. Rosales, F. Agrela, J. L. Díaz-López, and M. Cabrera, "Alkali-activated stainless steel slag as a cementitious material in the manufacture of self-compacting concrete," *Materials*, vol. 14, no. 14, Jul. 2021, doi: 10.3390/ma14143945.
- [55] "Labkem." <https://esp.labbox.com/etiqueta/labkem/> (accessed Aug. 15, 2023).
- [56] "Industrias Químicas del Ebro S.A." <https://www.iqe.es/productos/nasil-metasilicato-silicatos-solubles> (accessed Aug. 15, 2023).
- [57] "Sika." <https://esp.sika.com/es/construccion/construir/Aditivos-hormigon-mortero.html> (accessed Aug. 15, 2023).
- [58] K.-D. Tran Thi, M.-C. Liao, and D.-H. Vo, "The characteristics of alkali-activated slag-fly ash incorporating the high volume wood bottom ash: Mechanical

- properties and microstructures,” *Constr Build Mater*, vol. 394, p. 132240, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132240.
- [59] J. Ye *et al.*, “Development of Ultrafine Mineral Admixture from Magnesium Slag and Sequestration of CO₂,” *Buildings*, vol. 13, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/buildings13010204.
- [60] M. A. Gómez-Casero, L. Pérez-Villarejo, E. Castro, and D. Eliche-Quesada, “Effect of steel slag and curing temperature on the improvement in technological properties of biomass bottom ash based alkali-activated materials,” *Constr Build Mater*, vol. 302, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124205.
- [61] E. E. Teker Ercan, A. Cwirzen, and K. Habermehl-Cwirzen, “The Effects of Partial Replacement of Ground Granulated Blast Furnace Slag by Ground Wood Ash on Alkali-Activated Binder Systems,” *Materials*, vol. 16, no. 15, Aug. 2023, doi: 10.3390/ma16155347.
- [62] J. Rosales, M. Cabrera, M. G. Beltrán, M. López, and F. Agrela, “Effects of treatments on biomass bottom ash applied to the manufacture of cement mortars,” *J Clean Prod*, vol. 154, pp. 424–435, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.024.
- [63] L. U. D. Tambara Júnior, M. Taborda-Barraza, M. Cheriaf, P. J. P. Gleize, and J. C. Rocha, “Effect of bottom ash waste on the rheology and durability of alkali activation pastes,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00790.
- [64] E. Ozcelikci *et al.*, “A comprehensive study on the compressive strength, durability-related parameters and microstructure of geopolymer mortars based on mixed construction and demolition waste,” *J Clean Prod*, vol. 396, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136522.
- [65] M. G. Beltrán, A. Barbudo, F. Agrela, J. R. Jiménez, and J. De Brito, “Mechanical performance of bedding mortars made with olive biomass bottom ash,” *Constr Build Mater*, vol. 112, pp. 699–707, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.065.
- [66] P. Wang *et al.*, “Study on preparation and performance of alkali-activated low carbon recycled concrete: Corn cob biomass aggregate,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 23, pp. 90–105, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.12.164.
- [67] M. D. L. Garcia and J. Sousa-Coutinho, “Strength and durability of cement with forest waste bottom ash,” *Constr Build Mater*, vol. 41, pp. 897–910, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.081.
- [68] B. Carrasco-Hurtado, F. A. Corpas-Iglesias, N. Cruz-Pérez, J. Terrados-Cepeda, and L. Pérez-Villarejo, “Addition of bottom ash from biomass in calcium silicate masonry units for use as construction material with thermal insulating properties,” *Constr Build Mater*, vol. 52, pp. 155–165, Feb. 2014, Accessed: Sep. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84889646753&origin=reflist>

- [69] C. Jiménez Sánchez, “Optimización de uso de cenizas y lava volcánica procedentes de la Isla de la Palma en materiales en base cemento,” Universidad de Córdoba, Córdoba, 2022.
- [70] M. Cabrera, F. Agrela, J. Ayuso, A. P. Galvin, and J. Rosales, “Feasible use of biomass bottom ash in the manufacture of cement treated recycled materials,” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 49, no. 8, pp. 3227–3238, Aug. 2016, doi: 10.1617/s11527-015-0715-2.
- [71] J. Rosales, M. G. Beltrán, M. Cabrera, A. Velasco, and F. Agrela, “Feasible Use of Biomass Bottom Ash as Addition in the Manufacture of Lightweight Recycled Concrete,” *Waste Biomass Valorization*, vol. 7, no. 4, pp. 953–963, Aug. 2016, doi: 10.1007/s12649-016-9522-4.
- [72] J. Rosales García, “ESTUDIO DE ESCORIAS DE ACERO INOXIDABLE PARA SU APLICACIÓN EN LA FABRICACIÓN DE CEMENTO Y HORMIGONES SOSTENIBLES,” Universidad de Córdoba, Córdoba, 2015.
- [73] J. M. Medina, I. F. Sáez del Bosque, M. Frías, M. I. Sánchez de Rojas, and C. Medina, “Durability of new blended cements additioned with recycled biomass bottom ASH from electric power plants,” *Constr Build Mater*, vol. 225, pp. 429–440, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.176.
- [74] G. M. Cuenca-Moyano, M. Cabrera, M. López-Alonso, M. J. Martínez-Echevarría, F. Agrela, and J. Rosales, “Design of lightweight concrete with olive biomass bottom ash for use in buildings,” *Journal of Building Engineering*, vol. 69, p. 106289, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.JOBE.2023.106289.
- [75] H. Justnes, J. Skocek, T. A. Østnor, C. J. Engelsen, and O. Skjølvold, “Microstructural changes of hydrated cement blended with fly ash upon carbonation,” *Cem Concr Res*, vol. 137, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106192.