



Desarrollo de un cemento híbrido activado alcalinamente (AACM) con una matriz compuesta a partir de residuos de demolición y construcción (RCD) y adición de cemento Portland ordinario (OPC), para determinar su capacidad de uso en aplicaciones del sector de la construcción.

Angelica María Cardoza Herrera

Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Ingeniería de Materiales

Director

Henry Alonso Colorado Lopera, Doctor (PhD)

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Materiales

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	Cardoza Herrera [1]
Referencia	[1] A. Cardoza Herrera, “Desarrollo de un cemento híbrido activado alcalinamente (AACM) con una matriz compuesta a partir de residuos de demolición y construcción (RCD) y adición de cemento Portland ordinario (OPC), para determinar su capacidad de uso en aplicaciones del sector de la construcción”
Estilo IEEE (2020)	Tesis de maestría, Maestría en Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.



Maestría en Ingeniería de Materiales, Cohorte XII.

Grupo de Investigación Cements, Ceramics and Composites (CCComposites).



Centro de documentación ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidade de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: Jhon Jairo Arboleda Céspedes

Decano/director: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Augusto Enrique Salazar Jiménez

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedico profundamente este título a mi madre Aurora Herrera quien es mi motor, gracias por levantarme cada vez que me daba por vencida, por todo el apoyo brindado, por sus consejos y motivación, porque sin ellos no hubiera sido posible alcanzar esta meta.

A mi papá, mis hermanos, mis tíos, primos, amigos, y a todas las personas que de una manera u otra participaron durante mi formación, gracias por estar en cada momento de mi vida en donde los he necesitado.

Agradecimientos

Agradecer a Dios quien es mi proveedor en la vida, y a la virgen por ser mi protección en todo momento.

TABLA DE CONTENIDO

I. RESUMEN	10
II. ABSTRACT	12
III. INTRODUCCIÓN	13
A. Descripción del problema.....	13
B. Justificación e hipótesis	16
C. Objetivos.....	18
1) Objetivo general:.....	18
2) Objetivos específicos:	18
IV. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	19
A. Marco teórico	19
B. Estado del arte	24
V. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	29
A. Tipo de investigación	29
1) Técnicas de recolección de información.....	29
2) Recolección de la materia prima.....	30
B. Preparación de las probetas	31
1) Elaboración del activador alcalino	31
2) Elaboración de probetas.....	33
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
A. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	37
1) Resultados DRX de los residuos	37
2) Morfología de los residuos	41

3) Determinación de la distribución de tamaño de partícula	42
B. RESULTADOS DE RESISTENCIA PARA LOS CEMENTOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE.....	44
1) Resultados de resistencia a compresión AAC	45
2) Resultados de resistencia a flexión AAC	52
C. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS CEMENTOS ACTIVADOS.	53
1) Análisis del porcentaje de absorción de las probetas.....	53
2) Análisis morfológico de las probetas AAC de residuo de ladrillo	56
3) Análisis morfológico de las probetas AAC de residuo de concreto	62
4) Análisis morfológico de las probetas AAC de residuo mixto	64
D. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS PARA EL RESIDUO DE LADRILLO	67
1) Modelo de primer orden con interacción. Anova	68
E. RESULTADOS DE RESISTENCIA A DEL CEMENTO HIBDRIDO DE RCD LADRILLO CON ADICIÓN DE CEMENTO PORTLAND.....	72
1) Resistencia a compresión de los cementos activados con adicción de OPC.	72
2) Resultados de resistencia a flexión de las muestras	74
F. ANÁLISIS FÍSICO DEL CEMENTO HÍBRIDO	75
1) Difracción de rayos X de AACH.....	75
2) Análisis morfológico SEM del cemento híbrido	81
G. ANÁLISIS ANOVA DEL CEMENTO HÍBRIDO.....	82
VII. CONCLUSIONES	83
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

LISTA DE TABLAS

TABLA I. IMPACTOS DEL RCD [20].	16
TABLA II. PORCENTAJE DE PARTICIPACIÓN DE MATERIALES DE RCD O RCD EN PESO WT% [33].	19
TABLA III. PROCESAMIENTO DE MATERIALES GEOPOLIMÉRICOS [46].	25
TABLA IV. PROPORCIONES DE ACTIVADOR PARA REALIZAR PROBETAS.	32
TABLA V. ACTIVADOR ALCALINO EN OTRAS PROPORCIONES [62].	33
TABLA VI. DISEÑO DE EXPERIMENTOS AAC	35
TABLA VII. FASES CRISTALINAS DE RCD DE RESIDUO DE LADRILLO	39
TABLA VIII. FASES CRISTALINAS DEL RESIDUO DE CONCRETO	40
TABLA IX. RESULTADOS DE RESISTENCIAS PROMEDIOS A COMPRESIÓN DE LAS DIFERENTES PROBETAS	45
TABLA X. RESULTADOS DE RESISTENCIA A FLEXIÓN.	52
TABLA XI. PORCENTAJE DE ABSORCIÓN DE AGUA DE LAS PROBETAS.	55
TABLA XII. PRUEBA DE NORMALIDAD DE LOS RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN	67
TABLA XIII. RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL AACH	73
TABLA XIV. RESULTADOS DE RESISTENCIA A FLEXIÓN PARA LAS PROBETAS CON RESIDUO DE LADRILLO.	75
TABLA XV. FASES PRESENTES EN LA PASTA DE CEMENTO.	78
TABLA XVI. FASES PRESENTES EN LA PASTA DE CEMENTO ACTIVADO B4Y.	78
TABLA XVII. FASES PRESENTES EN LA MUESTRA BOPC10.	79
TABLA XVIII. FASES PRESENTES EN LA MUESTRA BOPC20.	80
TABLA XIX. FASES PRESENTES EN LA MUESTRA BOPC30.	80

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Generación anual de desechos de construcción y demolición. Fuente [14].	14
Fig. 2. RCD reciclado por país con respecto a su generación. Fuente [15]	15
Fig. 3. Proceso de geopolimerización. Fuente [42].	23
Fig. 4. Disposición inicial de los residuos de construcción y demolición.	30
Fig. 5. Partículas de RCD pulverizado. a) RCD de ladrillo b) RCD de concreto.	31
Fig. 6. Activador alcalino utilizado de la marca Protokimica	32
Fig. 7. Probetas AAC para ensayo de resistencia a compresión.	34
Fig. 8. Difractograma de las muestras a) residuo de ladrillo b) residuo de concreto.	38
Fig. 9. Morfología de los residuos a) Residuo de ladrillo b) residuo de concreto.	42
Fig. 10. Análisis de distribución del tamaño de partícula a) RCD de residuos de ladrillo b) RCD residuos de concreto.	43
Fig. 11. Probeta con residuo mixto sin solidificar	44
Fig. 12. Resultados de resistencia a compresión con diferente relación de activador a) Relación Y 60/40 Hidróxido de sodio/Silicato de sodio b) Relación X 70/30 Hidróxido de sodio/Silicato de sodio.	46
Fig. 13. Resultados de resistencia a compresión RCD de residuo de ladrillo con relación de activador Y 60/40 Hidróxido de sodio/Silicato de sodio.	47
Fig. 14. Resultados de resistencia a compresión RCD de residuo de ladrillo con relación de activador X 70/30 Hidróxido de sodio/Silicato de sodio.	48
Fig. 15. Resultados de resistencia a compresión RCD concreto con relación de activador 60/40 Hidróxido de sodio/Silicato de sodio.	49
Fig. 16. Resultados de resistencia a compresión RCD concreto con relación de activador 70/30 Hidróxido de sodio/Silicato de sodio.	50
Fig. 17. Resultados de resistencia a compresión RCD mixto con relación de activador Y 60/40 Hidróxido de sodio/Silicato de sodio.	51
Fig. 18. Resultados de resistencia a compresión RCD mixto con relación de activador X 70/30 Hidróxido de sodio/Silicato de sodio.	51

Fig. 19. Resultados de resistencia a flexión para las probetas a) relación de activador Y 60/40 Hidróxido de sodio/Silicato de sodio b) relación de activador X 70/30 Hidróxido de sodio/Silicato de sodio.	53
Fig. 20. Diferentes probetas sometidas al ensayo de absorción de agua.....	54
Fig. 21. Resultados del porcentaje de absorción para las muestras 70/30 en relación activador hidróxido de sodio/ silicato de sodio.....	56
Fig. 22. Resultados del porcentaje de absorción para las muestras 60/40 en relación activador hidróxido de sodio/ silicato de sodio.....	56
Fig. 23. Morfología de los cementos activados de residuo de ladrillos con una relación activador X 70/30. a) 40% en peso del residuo b) 50 % en peso del residuo c) 60% en peso del residuo.	58
Fig. 24. Morfología de los cementos activados de residuo de ladrillos con una relación activador Y 60/40. a) 40% en peso del residuo b) 50 % en peso del residuo c) 60% en peso del residuo.	60
Fig. 25. Morfología de los cementos geopoliméricos de residuos de ladrillos con activador Z 80/20 y 40% en peso de polvo.....	61
Fig. 26. Morfología de los cementos activados de residuo de concretos con una relación activador X 70/30. a) 40% en peso del residuo b) 50 % en peso del residuo c) 60% en peso del residuo. ...	63
Fig. 27. Morfología de los cementos activados de residuo de concretos con una relación activador Y 60/40. a) 40% en peso del residuo b) 50 % en peso del residuo c) 60% en peso del residuo. ...	64
Fig. 28. Morfología de los cementos activados de residuos mixtos con una relación activador X 70/30. a) 40% en peso del residuo b) 50 % en peso del residuo.	65
Fig. 29. Morfología de los cementos activados de residuo mixtos con una relación activador Y 60/40. a) 40% en peso del residuo b) 50 % en peso del residuo.	66
Fig. 30. Efectos de las variables evaluadas sobre la resistencia a compresión	69
Fig. 31. Resultado del modelo a) grafico de superficie de respuesta b) grafico de contornos.	71
Fig. 32. Resultados de los residuos aleatorios.....	71
Fig. 33. Resultados de resistencia a compresión de los cementos con adición de OPC	73
Fig. 34. Análisis XRD de los cementos activados y el material de muestra (pasta de cemento)...	76
Fig. 35. DRX de residuo de ladrillo comparado con DRX de cemento activado B4Y.....	77
Fig. 36. Imágenes DRX de los cementos activados a base de residuos. a) Bopc10 b) Bopc20 c) Bopc30.	82

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

AAC	Cemento activado alcalinamente.
AACH	Cemento híbrido activado alcalinamente.
Bopc	Cementos con adición de OPC.
B	Residuos de ladrillo.
C	Residuos de concreto.
DRX	Difracción de rayos X.
M	Residuos mixtos.
OPC	Cemento Portland ordinario.
RCD	Residuos de demolición y construcción.
SEM	Microscopía electrónica de barrido.
UdeA	Universidad de Antioquia

I. RESUMEN

El proceso de fabricación del cemento Portland Ordinario (OPC) emite grandes cantidades de gases contaminantes a la atmósfera como CO₂, contribuyendo a la agudización de las consecuencias del “efecto invernadero”, se estima que por cada tonelada de OPC fabricado se producen cerca de 0,85 a 1 tonelada de CO₂ [1]. En Colombia cemento Portland del tipo 1 es el más comercializado representando un 75% de la demanda total del país [2], mientras que en el mundo el cemento es el segundo material más utilizado después del agua [3]. Las industrias fabricantes OPC son también unas de las mayores consumidoras de energía, la cantidad mínima de energía necesaria para procesar una tonelada de Clinker es de 1,76 GJ a 7,3 GJ, dependiendo del tipo de proceso utilizado por la empresa [4]. El elevado consumo energético para la fabricación del OPC junto con las emisiones de CO₂ a la atmosfera, genera la necesidad de investigar acerca de nuevos cementos o procesos, capaces de sustituir de manera parcial o total la generación actual del cemento Portland.

A la par con la anterior problemática, se le suma la dificultad con la disposición de los residuos generados al finalizar el “ciclo de vida” de este cemento o de otros tipos de materiales (ladrillos, cerámica, madera), llamados residuos de construcción y demolición (RCD), los cuales están contaminando el medio ambiente, y afectan directamente el aire, el suelo, y el agua, debido a la su inapropiada gestión. Algunos autores estiman que los residuos sólidos generados por actividades de construcción y demolición (RCD) estarán cerca de las 27 billones de tn³ para el año 2050 [3]. Se estima que los RCD representan el 50% de la masa de residuos sólidos urbanos en el mundo [5].

En este proyecto se planteó el desarrollo de un nuevo material aglomerante (cemento híbrido activado alcalinamente AACH) el cual está formado por residuos de construcción y demolición (RCD) activados alcalinamente con hidróxido de sodio y silicato de sodio en solución acuosa y con una adicción parcial de cemento Portland ordinario (OPC), con el fin de mejorar el proceso de fraguado y las propiedades mecánicas, y así se determinará su capacidad de uso en el sector de la construcción y desarrollo de obras civiles. Fueron analizadas las propiedades del AACH mediante difracción de rayos X (DRX), microscopia electrónica de barrido (SEM), absorción de agua,

resistencia a compresión y resistencia a flexión. Para la validación los datos fueron corroborados mediante el análisis estadístico con la metodología superficie de respuesta, se predijo el mejor resultado de resistencia a compresión de los CAA de residuo de ladrillo. Se obtuvo un AACH con una resistencia promedio de 106 MPa.

Palabras clave — **Cemento activado, material activado, cemento híbrido, activación alcalina, residuos de construcción y demolición, material geopolimérico, OPC, RCD.**

II. ABSTRACT

The manufacturing process of Ordinary Portland Cement (OPC) emits large amounts of CO₂ and other polluting gases into the atmosphere, contributing to exacerbate the consequences of the "greenhouse effect". It is estimated that for each ton of OPC manufactured close 0.85 to 1 ton of CO₂ are produced. In Colombia, type 1 Portland cement is the most commercialized, representing 75% of the country's total demand. In the world, cement is the second most used material after water. The OPC manufacturing industries are also one of the largest consumers of energy, the minimum amount of energy needed to process a ton of Clinker is from 1.76 GJ to 7.3 GJ, depending on the type of process used by the company. The high energy consumption for the manufacture of OPC together with the CO₂ emissions into the atmosphere, generates the need to investigate new materials and processes capable of partially or totally replacing the current generation of cement.

It is not easy to deal with the disposal of the waste generated at the end of the "life cycle" of cement or other types of construction materials (bricks, ceramics, wood) known as construction and demolition waste (RCD). Authors estimate that the solid waste generated by RCD activities will be close to 27 billion tn³ by the year 2050.

In this project, the development of a new binder material (AACH alkaline activated hybrid cement) was proposed, which is composed of alkaline activated RCD, with sodium hydroxide and sodium silicate in aqueous solution, and additions of Ordinary Portland cement (OPC). The main idea is to improve the setting process and mechanical properties, and thus determine its feasibility in the civil engineering sector. AACH properties were analyzed by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), water absorption, compressive strength, and flexural strength. The data were corroborated by statistical analysis with the response surface methodology. A AACH with a compressive strength of 106 MPa was obtained.

Keywords — Geopolymer cement, alkaline activation, construction and demolition waste, geopolymer material, OPC, RCD.

III. INTRODUCCIÓN

A. Descripción del problema

El cemento Portland ordinario (OPC) es un material ampliamente utilizado, dada su confiabilidad y a sus características ya establecidas, las cuales se adaptan con gran cobertura a la mayoría de las necesidades comunes que demanda el sector civil, militar y de infraestructura actual; pero la producción de este cemento implica un elevado consumo energético, acompañado de grandes emisiones de CO₂ a la atmósfera, según cifras establecidas por estudios realizados por Davidovits, la producción de 1 tonelada de cemento genera aproximadamente de 0,85 a 1,0 toneladas de CO₂ [1]. La generación de CO₂ debido a la producción de cemento Portland se estima que alcanza las 2 mil millones de ton/año, lo cual corresponde al 10% de las emisiones antropogénicas en todo el mundo [6], estas emisiones se estiman que crezcan alrededor de 1 % o un 1,5 % cada año, cifras que son altamente preocupantes [7]. En cuanto al consumo energético la cantidad mínima necesaria para procesar una tonelada de Clinker es de 1,76 GJ a 7,3 GJ, dependiendo del tipo de proceso utilizado por la empresa [4], convirtiendo este proceso de fabricación en uno de los más grandes consumidores de energía. Debido a la conciencia creciente de las anteriores cifras y al desarrollo de la responsabilidad empresarial sostenible con el medio ambiente y la salud de la sociedad, se han encaminado variados esfuerzos académicos hacia la investigación de nuevos cementos o procesos [6], [8]–[12], capaces de sustituir de manera parcial o total la generación actual del cemento Portland, contribuyendo a la sostenibilidad que posibilite la sustentabilidad del sector industrial.

De manera paralela, en el mundo ha surgido la urgencia de la gestión de residuos sólidos reutilizables, procedentes del desarrollo urbanístico de las urbes, el cual es cada vez más intensivo y extensivo sobre superficies cada vez menos disponibles o aptas para ello. Existe una gran

preocupación por la cantidad de desechos generados en la industria de construcción, los llamados “residuos de construcción y demolición (RCD)” o CDW, por sus siglas en inglés *construccion and demolition waste*, se estima que se produce en España cerca de 1 tonelada por habitante por año de estos residuos [13] y que representan del 30% al 40% de los residuos del mundo [14].

En la Figura 1 se puede apreciar la cantidad de RCD generados por algunos países en millones de toneladas, se destaca como mayor emisor de residuos el país chino, siguiéndole Estados Unidos y Alemania [14]. En la Figura 2 se aprecia el porcentaje reciclado de RCD con respecto a la cantidad generada por país, en la cual se puede apreciar que muchos países desarrollados escatiman esfuerzos en el reciclaje de los RCD, mientras que otros están un poco atrasados en esta tarea como lo es Francia, Suecia y Alemania [15]. En Colombia el aprovechamiento de los RCD se realiza en un porcentaje inferior al 50% [16], y se generan cerca de 22 millones de toneladas por año, siendo la ciudad de Bogotá una de las principales generadoras, a pesar de que existen normativas sobre el reciclaje y la reutilización de los RCD [17], son pocos los esfuerzos dirigidos sobre la gestión de estos residuos [18].

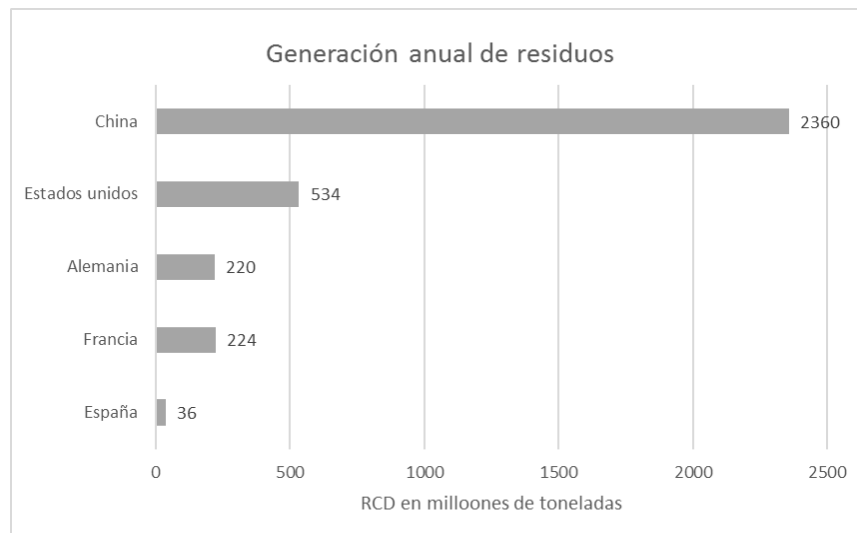


Fig. 1. Generación anual de desechos de construcción y demolición. Fuente [14].

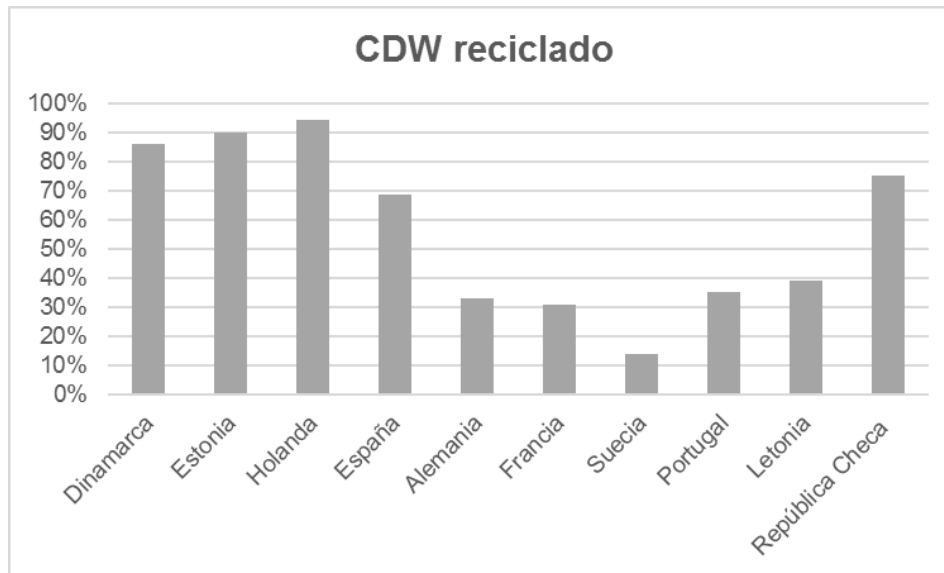


Fig. 2. RCD reciclado por país con respecto a su generación. Fuente [15]

Estos residuos RCD están contaminando el ambiente causando variaciones en el paisaje, afectando directamente el suelo, aire, agua, algunas de las afectaciones posibles causadas por la mala disposición de los RCD se resumen en la Tabla 1. A su vez, estos desechos podrían representar pérdida de recursos potenciales al desechar elementos que aún tenían la capacidad de utilizarse en diferentes procesos. En Colombia, específicamente en Medellín, un estudio del 2018 determinó que un 95% de estos residuos podría ser empleado para la construcción de placa suelo-cemento [19], lo cual es una alternativa que aporta poco valor económico en la reutilización de estos desechos, pues no aprovecha las aún presentes bondades del material, paralelamente se han usado los RCD en tamaño grueso como agregado reciclado para la fabricación de concreto en el cual han obtenido buenos resultados; sin embargo, los residuos finos no poseen buena aceptación para estas aplicaciones dando como resultados propiedades mecánicas pobres, entre otros, debido principalmente a la alta porosidad presentada en las partículas del desecho. Existe un gran vacío reglamentario sobre la responsabilidad de los generadores de estos tipos de residuos, encrudecido por el casi nulo apalancamiento estatal para la construcción de alternativas que deriven en una inclusión de los RCD en el sistema productivo e industrial del país o el desarrollo de nuevos

procesos y materias primas capaces de servir a los requerimientos estructurales del mercado de la construcción [20].

TABLA I.
IMPACTOS DEL RCD [20].

Componentes	Impactos RCD
Agua	Deterioro de la calidad del agua subterránea y superficial
Suelo	Cambio del uso de suelo
Aire	Emisión de polvos
Fauna	Proliferación de fauna nociva
Flora	Modificación de la cubierta vegetal
Socioeconómico	Impacto visual Disminución del valor económico del sitio Formación de asentamientos irregulares Obstrucción de vías de comunicación y del sistema de alcantarillado

B. Justificación e hipótesis

Una de las nuevas alternativas que se han estado estudiando en cuanto sustitutos parciales del cemento Portland son aquellos materiales procedentes de la activación alcalina de aluminosilicatos [21]–[25], dentro los subproductos más estudiados para la activación alcalina son las cenizas volantes y escorias de alto horno [9], [26]–[30], a futuro el suministro de estos materiales serán un problema dado la disminución en la extracción del hierro y la disminución de las plantas de combustión de carbón, por lo cual se deben dirigir esfuerzos para encontrar nuevos aglomerantes sustitutos parciales o completos del OPC. Una de las características principales de estos cementos activados son las buenas propiedades mecánicas con bajos calores de hidratación, pero al ser un material aún en desarrollo posee baja inserción en el mercado [8], [9].

Mediante la activación alcalina es posible aprovechar los RCD finos debido a su contenido de aluminosilicatos y así darles valor agregado al transformarlos en aglomerantes, logrando utilizar los residuos e integrándolos de nuevo a la cadena productiva, los productos finales de la activación alcalina pueden variar desde cristalinidades totalmente amorfas hasta altamente alcalinas [31]. Algunas investigaciones indican que los mejores rendimientos mecánicos de los geopolímeros se logran mediante el curado térmico (40° y 80° C) lo cual es una restricción para las aplicaciones en campo [6].

Con el adelanto del presente proyecto se pretende aportar conocimiento para el desarrollo de un cemento híbrido (RCD-OPC) el cual estará constituido de material activado alcalinamente a base de RCD con hidróxido de sodio y silicato de sodio en solución acuosa, buscando la mejor proporción del mismo con las propiedades mecánicas más altas, para así poder adicionarle parcialmente contenido de OPC con el fin de aumentar dichas propiedades y eliminar la limitante del curado térmico, contribuyendo a la formación de un cemento económico y sostenible aplicando el concepto de economía circular y la sostenibilidad en la industria de la construcción. Además, se pretende encontrar una formulación idónea entre activador/RCD y OPC la cual haga más atractivo el desarrollo de diferentes elementos del sector de la construcción en pro de la economía circular, esto debido a la variabilidad que puede presentarse dentro del diseño de los materiales activados alcalinamente.

C. Objetivos

1) Objetivo general:

Desarrollar un cemento híbrido activado alcalinamente a partir de RCD, con adición de cemento Portland ordinario (OPC), que ofrezca características similares o superiores a las presentes en cementos OPC para su utilización en obras de infraestructura civil.

2) Objetivos específicos:

- Caracterizar las propiedades físicas y químicas de los residuos de construcción y demolición.
- Determinar las proporciones del residuo y el activador alcalino del material activado para obtener la mezcla con mejores propiedades de resistencia a la compresión.
- Definir la dosificación del cemento híbrido de RCD activado alcalinamente con adición de OPC buscando la mejor resistencia a la compresión.
- Evaluar las propiedades físicas obtenidas del cemento híbrido activado alcalinamente, determinando su adherencia o no a los estándares presentes en la normativa colombiana.

 IV. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

A. Marco teórico

Residuos de construcción y demolición (RCD): La composición de estos residuos es muy heterogénea, están formados principalmente por mezclas de áridos, hormigones, piedra, materiales cerámicos, gravas y arenas, suelo y, en menor medida, metales, vidrios y plásticos, entre otros [32]. En la Tabla 2, podemos observar los diferentes materiales que componen estos residuos, siendo el principal los residuos de ladrillos, azulejos y otros cerámicos.

TABLA II.
PORCENTAJE DE PARTICIPACIÓN DE MATERIALES DE RCD O RCD EN PESO
WT% [33].

Material	Porcentaje (%)
Ladrillos, azulejos, y otros cerámicos	54
Hormigón	12
Basura	7
Piedra	5
Asfalto	5
Arena, grava y otros áridos	4
Madera	4
Metales	2.5
Plásticos	1.5
Vidrio	0.5
Papel	0.3
Yeso	0.2
Otros	4

La carbonatación de algunos desechos de RCD permite la transformación de los silicatos y aluminatos cálcicos hidratados en carbonato cálcico y sílice/alúminas amorfas, lo cual convierte estos desechos en materiales aptos a ser utilizados en la activación alcalina, un ejemplo de ello son los residuos de ladrillo rojo los cuales contienen un agudo contenido de SiO_2 (49.9 %) y Al_2O_3 (16.6 %) [32]. El 80% de los RCD está formado por residuos de ladrillos, mortero, el hormigón, la cerámica [15], es por eso que estas 4 son el principal foco de atención.

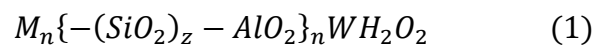
Activación alcalina: Es una tecnología que involucra la reacción química entre un precursor de aluminosilicatos sólido y un activador alcalino, a temperatura ambiente, lo que proporciona un producto endurecido [34]. Los activadores alcalinos pueden ser hidróxidos alcalinos, silicatos, carbonatos, sulfatos, aluminatos u óxidos, fundamentalmente cualquier sustancia soluble que pueda suministrar cationes de metales alcalinos, aumentar el pH de la mezcla de reacción y acelerar la solución del precursor sólido [35].

Se pueden utilizar activadores sólidos como sulfato de sodio y carbonato de sodio (Na_2SO_4 - Na_2CO_3), los cuales permiten la producción de un geopolímero o material activado por procesos tradicionales. El rendimiento mecánico obtenido usando los activadores sólidos es más bajo que el obtenido usando NaOH , lo cual se asocia con la diferencia en el pH de las soluciones [6]. Los hidróxidos y silicatos alcalinos forman valores de pH más altos, los activadores óptimos generalmente empleados en la activación de aluminosilicatos son aquellos con valores de pH similares a una solución de NaOH al 8M [35].

La activación alcalina incluye la condensación y polimerización de iones ortosilicatos que son considerados como hipotéticos monómeros. Generalmente, la reacción involucra: disolución, transporte y policondensación [36]. Las sales álcali o hidróxidos alcalinos fueron clasificadas en 6 grupos según su composición química, los cuales son: hidróxidos alcalinos MOH , sales de ácidos débiles M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO , etc. Silicatos $\text{M}_2\text{OnH}_2\text{O}$, aluminatos $\text{M}_2\text{OnAl}_2\text{O}_3$, aluminosilicatos $\text{M}_2\text{OAl}_2\text{O}_3(2-6)\text{SiO}_2$ y sales de ácidos fuertes M_2SO_4 [37].

Geopolímero y/o cementos activados: El término geopolímeros fue acuñado por primera vez por Davidovits en 1972. Davidovits definió los geopolímeros como materiales de estructura amorfa y tridimensional, que se producen por una reacción química llamada geopolimerización [36]. Una definición más amplia los define como un material activado con álcali, referente a cualquier aglutinante alcanzado por una reacción entre una fuente de metal alcalino (sólido o soluble) y un polvo de silicato [35]. Los geopolímeros también son conocidos como cementos activados, concreto de polímeros inorgánicos, aluminosilicatos vitreos de baja temperatura, geocementos, entre otros, [38], aunque existen polémicas por la diferencia de cada término, sin embargo, todos los términos se refieren a la reacción de un precursor rico en aluminosilicatos que se logra activar mediante una fuente alcalina.

Los materiales geopoliméricos o activados alcalinamente se representan en términos de un modelo polimérico que produce productos con la fórmula empírica mostrada en la ecuación. Donde M es un catión (sodio, potasio o calcio), n es un grado de policondensación y z es 1, 2 o 3 [39].



Se han identificado dos tipos de materiales activados dependientes de la cantidad de calcio del sólido, entre ellos se encuentra los llamados gel C-A-S-H y el gel N-A-S-H. Cuando se tiene una materia prima rica en calcio, el material resultante es del tipo C-A-S-H, por el contrario, si dicha materia prima es baja en calcio el geopolímero resultante será del tipo N-A-S-H [39]. Otros autores separan los geopolímeros de los cementos activados alcalinamente por la presencia de calcio en el producto final, para un geopolímero se apreciaría un gel de aluminosilicatos de sodio o potasio, mientras que un cemento activado alcalinamente se encuentra calcio hidratado en su estructura (C-A-S-H) [40].

El gel tipo C-A-S-H, es similar al gel generado en el hidrato de OPC (gel C-S-H), pero con proporciones más bajas de CaO / SiO₂. Este producto de reacción acompaña a la formación de subproductos, como la hidrotalcita y zeolitas, sin embargo, la estructura y composición del gel

C-A-S-H depende de la naturaleza del activador utilizado. El producto formado empleando NaOH como activador tiene mayor relación CaO / SiO₂ y una estructura más organizada que el formado por activadores basados en hidratos de silicato de sodio [35].

El gel N-A-S-H contiene tetraedros de sílice y aluminio aleatoriamente a lo largo de cadenas poliméricas reticuladas que forman una cadena tridimensional. La reticulación de las cadenas proporciona cavidades adecuadas para acomodar los cationes alcalinos, compensando así el déficit de carga generado al reemplazar una sílice por un aluminio. Los subproductos de la reacción son las zeolitas (hidroxisodalita, zeolita tipo P, la chabacita dominante en sodio, la zeolita Y y la faujasita) [35].

Básicamente un cemento activado o geopolímero es un material rico en aluminosilicatos con estructura total o parcialmente amorfa, que se sintetiza a partir de una fuente alcalina para obtener un aglutinante de bajo costo y elevada resistencia [41]

La geopolimerización o activación alcalina es un proceso que consta de etapas, inicialmente se disuelve la parte amorfa del aluminosilicatos, seguido del consumo de agua durante el proceso que a su vez forma monómeros de aluminato y silicato, mediante iones hidroxilo, reorganizándose y dispersando los iones. Posteriormente, una vez los monómeros están en medio acuoso, se forma una mezcla de aluminatos, silicatos, y aluminosilicatos, creándose los primeros oligómeros de aluminosilicatos. Cuando se ha formado el gel se produce la recolocación surgiendo las cadenas y con ellas la estructura del material. Por último, ocurre el proceso de policondensación de las partes solubles y formación de los productos hidratados, que finaliza con el endurecimiento [36].

En la Figura 3 se presenta el mecanismo de reacción de los geopolímeros, aunque el modelo se presenta de forma lineal, estos procesos están conectados y ocurren simultáneamente. Inicialmente, se muestra la disolución de la fuente sólida de aluminosilicatos por hidrólisis alcalina (consume agua) que produce especies de aluminato y silicato, la disolución de aluminosilicatos amorfos es rápida a un pH alto y crea una solución de aluminosilicatos

sobresaturada. Una vez en solución, las especies liberadas por disolución se incorporan a la fase acuosa, que ya puede contener silicato presente en la solución activadora, así, se forma una mezcla de silicato, aluminato y aluminosilicatos [42]. El tiempo para que se forme el gel continuo en la solución de aluminosilicatos sobresaturada fluctúa considerablemente según diferentes condiciones (composición de la solución, procesamiento de la materia prima y condiciones de síntesis). Después de la gelificación, el sistema continúa reorganizándose a medida que aumenta la conectividad de la red de gel, dando como resultado el geopolímero o cemento activado alcalinamente [42].

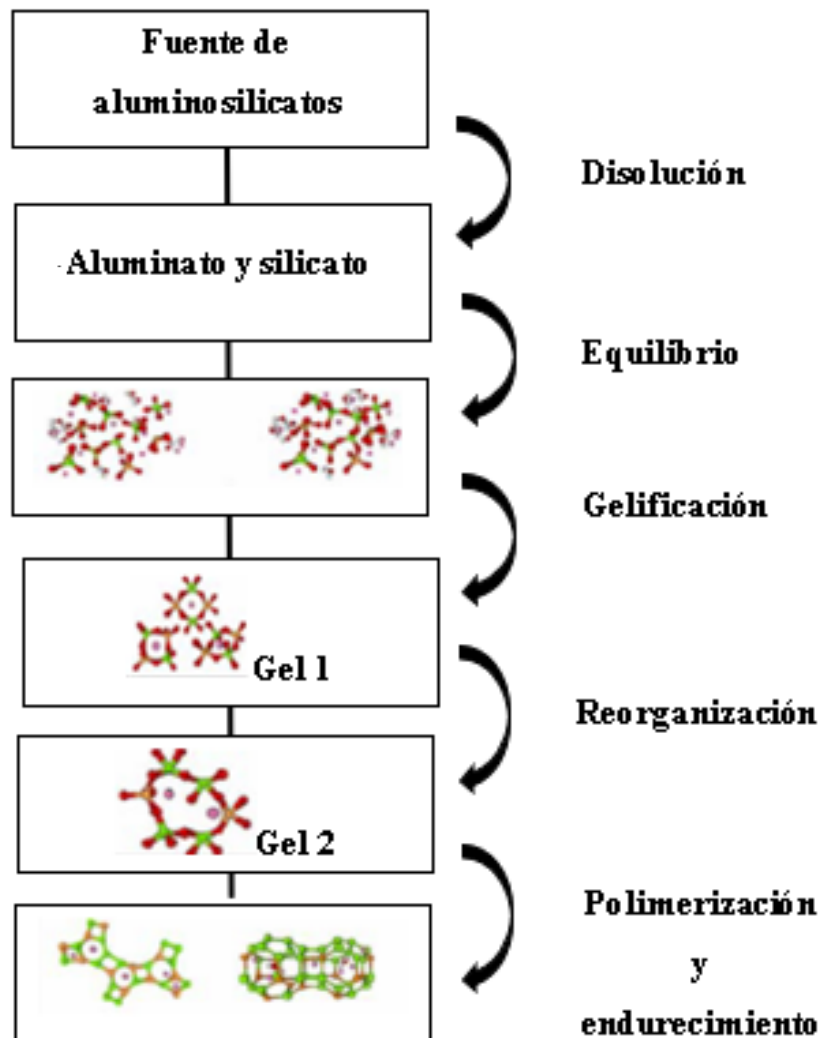


Fig. 3. Proceso de geopolimerización. Fuente [42].

Entre las materias primas generalmente utilizadas para la formación de geopolímeros se encuentran escorias granuladas de alto horno, escorias no ferrosas, ceniza volante de carbón, metacaolín, entre otras, siendo estas las más populares [38].

Las propiedades de los geopolímeros suelen compararse con las del OPC, Davidovits encontró que dentro de estas propiedades se resaltaban la resistencia alta a edad temprana, buena resistencia a ciclos de congelamiento y descongelamiento, inmovilización de materiales peligrosos [43], también se han encontrado alta resistencia a elevadas temperaturas [26], resistencia a ácidos y cloruros, entre otras [44], [45].

B. Estado del arte

A nivel mundial existen proyectos en los cuales se ha desarrollado cemento híbrido a base de diferentes materiales, en el contexto de esta investigación el principal foco de la revisión bibliográfica son los cementos híbridos compuestos a partir de materiales activados alcalinamente, a continuación, se exponen algunas investigaciones previas que contribuyen para el desarrollo de este proyecto.

En 2014, T. Suwan Et al., estudiaron la adición de OPC al geopolímero con base en cenizas volantes activado con hidróxido de sodio y silicato de sodio, con el fin de disminuir el tiempo de curado generalmente por el calor del geopolímero (defecto de este para aplicaciones en campo). Durante su investigación utilizaron diferentes porcentajes para la combinación del cemento híbrido al igual que diferentes procedimientos (secuencia de mezcla). Los autores mantuvieron una relación de agua cemento de 0,25 (w/c) y una relación de silicato de sodio hidróxido de sodio de 1.5 en masa (SS/SH), así mismo, una relación de solución alcalina a cenizas volantes de 0.40 (A/FA). De los diferentes resultados los autores concluyeron que el procedimiento de preparación también tiene incidencia en el tiempo de fraguado y resistencia mecánica (los procesamientos utilizados en la investigación se muestran en la tabla 3), el cemento híbrido se obtuvo mediante el proceso B; como resultados finales y satisfactorios los

autores obtuvieron resistencia mecánica de 21.91 MPa para la probeta de 50/50, la microestructura del cemento híbrido (GeOPC) también mejora con una mayor formación del gel amorfo (C-S-H) al adicionar el cemento parcialmente al geopolímero, igualmente como resultado se evidenció una disminución del tiempo de fraguado de más de 24 horas a 4 horas o a 1,5 horas o 1/2 respectivamente 5%, 10%, 30% de OPC [46]. En Otras investigaciones realizadas por Josphe D Et al, encuentran resistencias de 100-125 Mpa para geopolímero a base de roca que los 28 días [1], la cual es una resistencia bastante alta.

TABLA III.
PROCESAMIENTO DE MATERIALES GEOPOLIMÉRICOS [46].

Proceso A	Proceso B	Proceso C
Cenizas Volantes + NaOH ↓ 90 s Silicato de sódio ↓ 90 s Pasta de cemento	Cenizas volantes ↓ Silicato de sódio + NaOH ↓ 90 s/90s Pasta de cemento	Cenizas volantes + NaOH + Silicato de sódio ↓ Agua ↓ 90 s/90s Pasta de cemento

Molina Et al., en 2016 se evaluaron una relación de 80/20 geopolímero y OPC respectivamente en la fabricación de mortero, en esta investigación se estudiaron las propiedades mecánicas y térmicas del cemento híbrido con la finalidad de darle una aplicación en estructuras altamente resistentes al fuego, los activadores alcalinos fueron hidróxido de sodio (reactivo de grado analítico de Merck) y silicato de sodio, las muestras se prepararon con una relación de 1:2,75 de aglomerante y arena respectivamente. Dentro de los resultados de este estudio se destacan que la adición de 20% de peso de OPC aumenta significativamente las propiedades mecánicas, cerca de 150% y 288% a edades de 28 y 360 días, igualmente con esta adición no se requiere el curado térmico, una de las principales desventajas del material geopolimérico ensayado, igualmente el comportamiento térmico de ambos cementos presentan buenos rendimientos

ensayados a temperatura de 700 °C con resistencias residual de 113,3 % y 92 % para el sistema híbrido y el geopolímero respectivamente, lo cual se traduce en la viabilidad de usar estos materiales en aplicaciones que requieran la resistencia a temperatura [9].

Shehab Et al, en Egipto en el 2016, se realizó una investigación basada en la mezcla de material geopolimérico fabricado a partir de cenizas volantes activadas con adición de OPC como solución a la problemática ambiental de CO₂ en la producción de cemento Portland, el autor evalúa las características mecánicas y encuentra que la relación de 50% en peso de OPC al material geopolimérico es la más favorable para su estudio, debido a que los valores de resistencia a la compresión, resistencia a la adherencia, resistencia a la tracción por separación y resistencia a la flexión son mejores en comparación con las otras proporciones del material desarrollado [8].

Robayo-Salazar Et al, en Cali en 2016 se lleva a cabo una investigación la cual involucra la utilización de RCD a base de ladrillo de arcilla roja con 10% en peso de OPC para la fabricación de mortero manualmente, con el material desarrollado se fabricaron adoquines, tejas y bloques y fueron ensayados basándose en la Normativa Técnica Colombiana. Los autores obtuvieron propiedades superiores a las mínimas establecidas por la NTC [47]. En otro estudio se logró demostrar que porcentajes muy altos de OPC pueden causar un endurecimiento repentino y afectar la mezcla de los componentes [6].

Błaszczński Et al., en 2017, prueban la resistencia a compresión de diversas probetas de cemento híbrido a base de material geopolimérico y cemento Portland, donde encuentra que los cementos solo a base de material geopolimérico alcanzan una resistencia de 50 a 70 MPa y el OPC solo se encontraba en un rango de 40 MPa, mientras que la combinación de ambos materiales muestran un incremento de 70 a 90 MPa según la proporción utilizada de adición porcentual de OPC [48], estos resultados demuestran la mejora de los cementos híbridos activados alcalinamente en comparación con el cemento tradicional y el cemento a base de material geopolimérico [47], [48].

Al igual que el trabajo anterior, en India, en 2017 se realizó una investigación acerca de este mismo material geopolimérico (a base de cenizas volantes) con bajo contenido de calcio con la adición OPC, en donde los diferentes autores encuentran los mejores resultados para la adición de 20% en peso, con esta adición de OPC al material geopolímero se redujo la absorción de agua, porosidad, y permeabilidad, al igual que se mejoró la microestructura del material [49]. Esta investigación de Mehta Et al., resulta concorde a estudios anteriores llevados a cabo en Chile, donde el autor adiciona al cemento cenizas volantes, con el cual logra disminuir la adición de agua, pero aumenta el tiempo de fraguado del material [50]. Similar con los resultados obtenidos de la investigación hecha por Kaja Et al., los cuales estudiaron este mismo sistema híbrido y encuentran que el tiempo de fraguado aumenta significativamente al adicionar el cemento Portland en proporciones de 5 y 10% en peso [51].

En 2017, M. Torres en España enumero las principales ventajas por las cuales las investigaciones en la última década se han centrado en estudiar los cementos por álcali, en las cuales destaca las excelentes prestaciones mecánicas desde muy temprana edad (20 horas), reducciones entre el 60% y 70% de emisiones de dióxido de carbono y gasto energético, la utilización de materiales sin valor alguno para la sociedad (desechos), resistencia a ataques con sulfatos, ambientes ácidos, e inmovilizadores de ciertos desechos radiactivos [35].

En Barranquilla en 2017, en un artículo llamado “Residuos de construcción y demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad desde su modelo de gestión” el autor es motivado por la gran cantidad de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) como problemática ambiental en la ciudad y realiza un panorama de la actualidad que se vive con los residuos. En este artículo se presentan los resultados de un estudio elaborado a aproximadamente 75 obras de la ciudad, los autores realizaron encuestas en temas sobre manejo, tratamiento y disposición final de los residuos, al igual que identificaron inadecuadas prácticas de gestión de los desechos, así mismo los autores expresan que la cantidad de residuos del concreto, la madera, el ladrillo y los materiales cerámicos es mucho mayor con respecto a los otros que componen los desechos de RCD [52], siendo entonces estos en los cuales se debería concentrar los mayores esfuerzos. Este trabajo de Pacheco Et al., es un punto de partida para investigar con estos tipos de RCD al intentar darles valor agregado, incorporándolos de nuevo a la sociedad y aprovechar al máximo sus virtudes [52].

Cao Et al., se estudió un geopolímero a base de cenizas volantes, con la adición de cemento de aluminato de calcio (CAC) en proporciones de 5, 10 y 20 %, el autor varió la molaridad del activador y a su vez la relación activador-aglutinante, los mejores resultados de resistencia a compresión (56.2 MPa) se encontraron para un reemplazo de 10% de CAC, una molaridad de 14 M, y una relación activador/aglutinante de 35% por lo cual los autores recomiendan esta proporción para la construcción [53]. En otro estudio Reig et al., fabrican un geopolímero a base de residuos de ladrillos de arcilla roja adicionando CAC para estudiar su efecto, el reemplazo fue de 0 a 50% en peso del cemento, y el activador utilizado fue NaOH y silicato de sodio, obteniendo resultados de resistencia de 50MPa con una relación de 40% de CAC a los 3 días de curado, y resultados similares con la adición de 20% a los 28 días [54], además de este resultado, los autores también manifiestan el aceleramiento de la activación alcalina en temperatura ambiente de los geopolímero al adicionar el cemento, lo cual es significativamente importante y hace aún más atractiva esta mezcla.

En Medellín (Colombia) en 2018, se estudiaron las propiedades físicas, mineralógicas y energéticas de los residuos locales de mampostería de ladrillo y bloque - separadores de mortero, roturas cerámicas, y suelo de pobres características geotécnicas proveniente de residuos de excavación para la identificación de su uso potencial, los autores determinan que para su caso de estudio los residuos de excavación y mampostería de bloques, pueden ser usados hasta un 95% en la construcción de placa suelo-cemento [19]. Otros autores en Bogotá (Colombia) en 2021, utilizaron el RCD como relleno y con neumáticos de vehículos reciclados para la formación de capas de pavimento en caminos rurales, teniendo resultados positivos con estos residuos[55]. La construcción de placas de sub -suelo o la utilización de RCD como material de relleno, es una alternativa para estos residuos, pero les da poco valor agregado al no aprovechar las posibles virtudes que aún tienen estos materiales [56], por eso se cree que una de las mejores soluciones para estos desechos es la utilización para la fabricación de cemento geopoliméricos mediante la activación alcalina.

V. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

A. Tipo de investigación

En este proyecto se realizará una investigación de laboratorio de tipo experimental, la cual se ocupa de la orientación dirigida a los cambios y desarrollos. El control adecuado es el factor esencial del método utilizado. En esta investigación se presenta la manipulación de variables no comprobadas, en condiciones controladas, con el fin de describir la situación, manipulando las variables a través del razonamiento hipotético-deductivo en el cual emplearemos muestras representativas y un diseño experimental como estrategia de control a través de una metodología cuantitativa, se efectuará una medición sistemática y el análisis estadístico como característica para analizar los datos a través de varias fases. Existen tres variables principales; Tipo de RCD, relación hidróxido/silicato y relación líquido/sólido.

El análisis estadístico se realizará con el software R, mediante la metodología de superficie de respuesta con una confiabilidad del 0.05.

1) Técnicas de recolección de información

La técnica utilizada en este proyecto es la observación científica, la cual consiste en la indagación sistemática, dirigida a estudiar los aspectos más significativos de los objetos, hechos, situaciones sociales o personas en el contexto donde se desarrollan normalmente; permitiendo la comprensión de la verdadera realidad del fenómeno [57].

Se observará y analizará el comportamiento del Cemento híbrido a partir de RCD activado alcalinamente con adición porcentual variable de OPC que es objeto de estudio para determinar su viabilidad en la industria de la construcción y el desarrollo de obras civiles.

Materia prima

2) *Recolección de la materia prima*

En la Figura 4 se pueden apreciar las materias primas que se utilizaron para la preparación del material activado alcalinamente, los cuales fueron residuo de ladrillo y residuo de concreto. Los RCD se recogieron de una escombrera ubicada en la comuna 8 (Villa Hermosa - Medellín), los residuos se clasificaron para asegurar que la variabilidad del residuo no afecte los resultados finales del cemento activado alcalinamente.

Los RCD consisten en residuos de ladrillo y bloques de concreto con mortero adherido, los RCD de tamaño grueso (50 Kg) se disgregaron primero en pedazos pequeños de forma manual, posteriormente ambos materiales fueron triturados mediante una trituradora de mandíbula durante 4 horas para el hormigón y 1 hora para el ladrillo, luego los residuos fueron molidos en un molino de bolas para aumentar su finura y superficie de contacto durante 30 minutos [58], hay resultados que demuestran que la molienda larga mejoran la reactividad y las estructuras cristalinas promoviendo la formación de un gel rico en sílice, lo que a su vez mejora la resistencia del cemento activado de RCD [31].



Fig. 4. Disposición inicial de los residuos de construcción y demolición.

Ambos materiales se molieron a menos de $100\ \mu\text{m}$ posterior fue pasada por una malla Tyles 200 (menor a $75\ \mu\text{m}$) para estandarizar el tamaño de partícula, y por recomendaciones de estudios anteriores [59]. Cada muestra ya pulverizada (Figura 5), se pesó por partes iguales, las muestras fueron sometidas a temperatura de 100 grados por 48 horas para eliminar el exceso de humedad [60]. Las muestras se sometieron a difracción de Rayos X (DRX) para conocer las fases cristalinas, y a SEM para visualizar su morfología.



Fig. 5. Partículas de RCD pulverizado. a) RCD de ladrillo b) RCD de concreto.

Los residuos de demolición y construcción generalmente están constituidos por filos, tienen una composición química dependiendo de donde provienen, principalmente su composición está compuesta de SiO_2 .

B. Preparación de las probetas

1) Elaboración del activador alcalino

Como activador alcalino se utilizó hidróxido de sodio (NaOH) en formas irregulares, de color blanco inoloro, soluble en agua y en contacto con ella libera una gran cantidad de calor, y silicato de sodio (Na_2SiO_3) transparente inoloro y viscoso, ambos productos de la marca ProtoKimica, utilizando estudios de otros investigadores [6]. Se realizaron tres tipos de mezclas diferentes del activador alcalino combinando el hidróxido de sodio previamente preparado con el silicato de sodio, cada relación de activador se dejó reposar a temperatura ambiente durante 24 horas antes de realizar. En la Figura 6 se puede apreciar el hidróxido y el silicato empleado de la marca ProtoKimica. El silicato de sodio con una cantidad de 31,71 – 33,67 de Sílice y una relación de 1:3 de $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_3$, usado como fuente adicional de SiO_2 para ajustar las relaciones molares propuestas en el estudio.



Fig. 6. Activador alcalino utilizado de la marca Protokimica

Para la preparación del hidróxido de sodio, la molaridad se mantuvo en 8 M, siguiendo metodologías empleadas por otros autores [61], El hidróxido de sodio se dejó reposar durante 24 horas a temperatura ambiente antes de ser mezclado con el silicato de sodio puro. En la Tabla 4 se pueden observar las diferentes proporciones.

TABLA IV.
PROPORCIONES DE ACTIVADOR PARA REALIZAR PROBETAS.

Relación de activador	Cantidad hidróxido de sodio (wt%)	Cantidad silicato de sodio (wt%)
70/30	70	30
60/40	60	40
80/20	80	20

También se realizaron otros tipos de activadores siguiendo la metodología del autor Bassani et al., [62], la cual se pueden observar en la Tabla 5. La metodología utilizada por ese autor consistió en adicionar

agua destilada al silicato de sodio antes de mezclar con el hidróxido de sodio, los resultados de los cementos activados fueron pobres debido a que las probetas no secaron y fue imposible desmoldar.

La activación alcalina es un proceso complejo en el cual la primera etapa es la disolución del sílice y la alúmina del precursor que generalmente se realiza bajo altas concentraciones de NaOH [63].

TABLA V.
ACTIVADOR ALCALINO EN OTRAS PROPORCIONES [62].

Molaridad del hidróxido de sodio	Cantidad de hidróxido de sodio en peso wt%	Cantidad de silicato de sodio en peso wt%	Cantidad de agua adicional adicionada al silicato
25	60	40	25%
8	60	40	4%

2) Elaboración de probetas

Para la fabricación de probetas se utilizaron los diferentes activadores alcalinos con las materias primas B = residuo de ladrillo C= residuo de Concreto, M= residuo Mixto (50% residuo de ladrillo, 50% residuo de concreto). Las muestras se amasaron manualmente durante 5 minutos y posteriormente fueron depositadas en moldes, los cuales fueron cubiertos según recomiendan varios autores para conservar la humedad [64], [65], vibro compactadas por 5 minutos para eliminar los espacios vacíos, todos los especímenes se desmoldaron después de 24 horas y se almacenaron durante 28 días a temperatura ambiente. En la Tabla 6 se pueden apreciar la cantidad de sólido y las diferentes probetas. El error promedio de la masa de las probetas es de 0.016% asociado al error de la gramera.

En la Figura 7, se pueden observar algunos de los AAC. Las probetas con relación activadora 80/20 no lograron los procesos de disolución, evitando la solidificación por el alto contenido de hidróxido de sodio en la relación activadora, como se explicó antes, altas concentraciones de NaOH inhiben la reacción de activación [63], el bajo contenido de silicato de sodio también es un problema en la síntesis

del AAC [63]. Existe un rango flexible en el tiempo de fraguado de las diferentes probetas dado la dosis de activador y las proporciones de hidróxido de sodio/silicato de sodio [66].

Para la codificación se decidió nombrar de la siguiente manera:

- Cantidad de sólido en la muestra en peso 40% = 4, 50% = 5, 60% = 6.
- Relación activadora 70/30=X, 60/40 =Y, 80/20 = Z
- B = Residuo de ladrillo
- C= Residuo de concreto
- M = residuo mixto (50% ladrillo, 50% concreto)



Fig. 7. Probetas AAC para ensayo de resistencia a compresión.

TABLA VI.
DISEÑO DE EXPERIMENTOS AAC

Nombre	Tipo RCD	Cantidad de RCD (wt%)	Cantidad de activador alcalino (wt%)	Relación de activador Hidróxido de sodio/Silicato de sodio	Cantidad de probetas
B4X	Residuo de ladrillo B	40	60	70/30	5
B4Y			60	60/40	5
B4Z			60	80/20	5
B5X		50	50	70/30	5
B5Y			50	60/40	5
B5Z			50	80/20	5
B6X		60	40	70/30	5
B6Y			40	60/40	5
B6Z			40	80/20	5
C4X	Residuo de concreto C	40	60	70/30	5
C4Y			60	60/40	5
C4Z			60	80/20	5
C5X		50	50	70/30	5
C5Y			50	60/40	5
C5Z			50	80/20	5
C6X		60	40	70/30	5
C6Y			40	60/40	5
C6Z			40	80/20	5
M4X	Residuo Mixto M	40	60	70/30	5
M4Y			60	60/40	5
M4Z			60	80/20	5
M5X		50	50	70/30	5
M5Y			50	60/40	5
M5Z			50	80/20	5
B6X		60	40	70/30	5
M6Y			40	60/40	5
M6Z			40	80/20	5

Otras variables que se tuvieron en cuenta fue la temperatura ambiente, con fluctuación máxima de 3 grados entre el rango de 24-27 grados.

Al mejor resultado de resistencia a compresión de las probetas anteriores se les adicionó parcialmente entre 10, 20 y 30% de OPC basados en resultados de otros autores, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas [6].

Las probetas fueron pesadas en una gramera AWS-600 con capacidad de 600gramos y graduación de 0.1 gramos con un error de 0.016%, posteriormente todas las probetas fueron ensayadas después de 28 días en la Máquina universal marca shimadzu modelo autograph AGX Plus capacidad de celda de 100 KN resolución 1/500 con una capacidad de 50 kN a una velocidad de deformación de 1 mm/min, y se usaron cinco muestras para cada caso, después de cada ensayo, las probetas fueron guardadas para su caracterización.

Para identificar las fases presentes se utilizó un ensayo de difracción de rayos X (DRX) en los residuos y las pastas activadas alcalinamente seleccionadas basándonos en el ensayo de resistencia a compresión. Los análisis se realizaron en difractómetro de rayos x (DRX) Malvern- PANalytical modelo empyrean 2012, con detector Píxel 3D y fuente de Co ($\lambda=1.790307$) a 40kV y 40mA; Goniómetro: Omega/2 theta y configuración de la plataforma: reflexión transmisión spinner girando a 4 rpm. El paso fue de $0,05^\circ$ y un tiempo por paso de 50s. Los análisis cualitativos y cuantitativos se realizaron con la ayuda del software HighScore Plus y Match!2 siguiendo la metodología Rietveld.

Para observar la microestructura de cada probeta se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido (termoiónico) JEOL-JSM 6490LV de la Universidad de Antioquia (UdeA) con un voltaje de aceleración de 20Kv.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de caracterización de los residuos estudiados en este proyecto, así como de las probetas fabricadas.

A. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La caracterización se llevó a cabo mediante análisis de DRX y SEM, los resultados se presentan a continuación.

1) Resultados DRX de los residuos

Se llevó a cabo el ensayo de rayos X para evaluar la presencia de aluminosilicatos de ambas muestras. Inicialmente, se verificó que ambas muestras contenían una cantidad importante de sílice y alúmina, dando viabilidad a la activación alcalina. Los resultados de los dos residuos muestran una estructura semi cristalina, lo cual es una característica común en materiales con predominancia cuarzo [62]. Ambas muestras presentan principalmente Si, O y Ca. [67], lo cual nos permite realizar la activación alcalina posibilitando la formación de geles tipo C-A-S-H[3]. Una estructura rica en sílice y alúmina finalmente permite producir materiales activados alcalinamente [3].

La calcita está presente en ambas muestras, con un pico de intensidad fuerte a 35° en el residuo de concreto en comparación con el residuo de ladrillo. Este pico intenso es atribuido a la presencia de agregados ricos en calcio y cemento residual, en la Figura 8 se puede observar varias fases de aluminosilicatos como albita, clinocloro, moscovita, hematita, estantita, y cristobalita.

Se encontraron silicatos del grupo mica confirmando el potencial para la activación alcalina de ambos residuos [62]. Los minerales del grupo de los filosilicatos tipo mica presentan mayor

reactividad en condiciones alcalinas y favorece la formación de la fase de sinterización [60], [61], [68].

La Figura 8a y 8b, muestran los Difractograma y las fases presentes en las muestras de residuo de ladrillo y residuo de concreto respectivamente, en la tabla 7 y 8 se enuncian las fases identificadas y cuantificadas mediante el método de Rietveld con un parámetro de refinamiento WR de 8,8 %. Las fases identificadas para el residuo de ladrillo fueron: cuarzo, hematita, calcita y moscovita, hematita, albita, cristobalita, enstatita, yeso y ettringita, los resultados indican una fase predominante del cuarzo y la calcita en ambas muestras, el alto contenido de cuarzo promueve la formación de un gel rico en sílice, lo que a su vez mejora la resistencia del cemento activado alcalinamente de RCD, otros autores informan que el cuarzo podría generar más tetraedros reactivos de Si en el AAC [31].

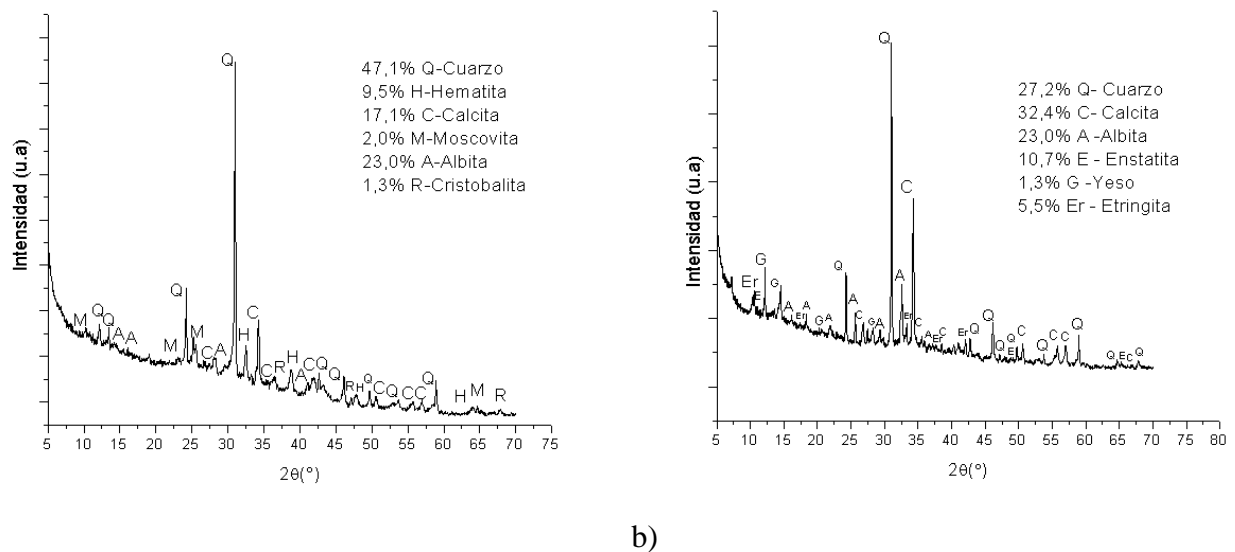


Fig. 8. Difractograma de las muestras a) residuo de ladrillo b) residuo de concreto.

Fases similares de los residuos fueron encontradas en otras investigaciones [69]–[72]. Otros autores han encontrado que el residuo de ladrillo está compuesto en promedio por 49,9% de SiO_2 y 16,6% de Al_2O_3 [73], mientras que los residuos de concreto presentan un bajo contenido de SiO_2 y de Al_2O_3 , pero

un contenido alto de CaO (65,2%) es por esto que la formación de geles es mínimo, dando como resultados resistencias máximas de 9,5Mpa [74]. El hidróxido de calcio o portlandita en altas proporciones dada su naturaleza, tiene efectos negativos como procesos de expansión y ruptura [75].

TABLA VII.
FASES CRISTALINAS DE RCD DE RESIDUO DE LADRILLO

Fases cristalinas	wt%	Cristal	Fórmula
Cuarzo	47.1	Triagonal	SiO ₂
Calcita	17.1	Triagonal	CaCO ₃
Moscovita	2.0	Monoclínico	M-KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂
Hematita	9.5	Triagonal	Fe ₂ O ₃
Albita	23.0	Triclínico	NaAlSi ₃ O ₈
Cristobalita	1.3	Tetragonal	SiO ₂

El cuarzo fue la fase más presente en el residuo de ladrillo, con 12 picos, con un 47,1% de estructura trigonal, más 1,3% de estructura tetragonal correspondiente a la Cristobalita la cual aparece cuando la sílice amorfa es sometida a temperatura, fase muy común en los ladrillos. Otros autores han encontrado que la cantidad de contenido de óxido de calcio (CAO) en el precursor se tiende a posibilitar la formación del cemento activado alcalinamente mejorando sus propiedades mecánicas [74], el Óxido de calcio es más susceptible a disolverse bajo el efecto de polarización de OH⁻ y puede asociarse a la formación de geles tipo C-A-S-H [55].

En la Figura 8b se logran apreciar las fases presentes en la muestra de residuo de concreto. Las fases se han identificaron y cuantificaron mediante el método de Rietveld con un parámetro WR de 8,7% las siguientes fases: Cuarzo, albita, calcita, estantita, yeso y ettringita, coincidiendo con otros autores [12], [39], [61]. En el caso de esta muestra residuo de concreto se encuentran fases predominantes similares a la muestra residuo de ladrillo, el yeso se usa como activador en el cemento, por lo que también se pueden observar los picos de difracción de la ettringita en los productos de hidratación [76].

TABLA VIII.
FASES CRISTALINAS DEL RESIDUO DE CONCRETO

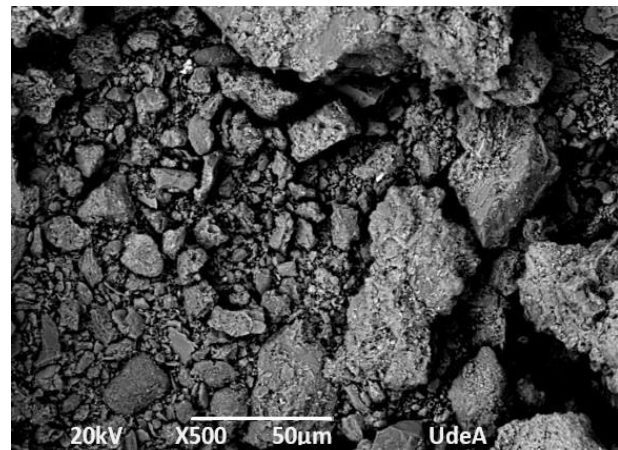
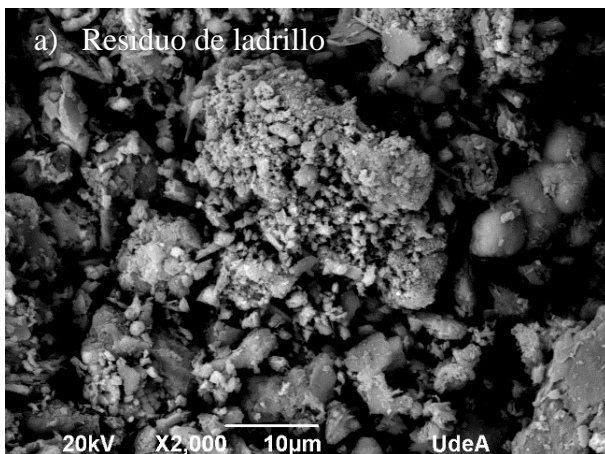
Fases cristalinas	wt%	Sistema cristalino	Fórmula
Cuarzo	27.2	Hexagonal	SiO ₂
Calcita	32.4	Hexagonal	CaCO ₃
Estantita	10.7	ortorrómbico	MgSiO ₃
Ettringita	5.5	Hexagonal	Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ 26 H ₂ O
Yeso	1.3	monoclínico	CaS ₄ 2H ₂ O
Albite	23.0	Triclínico	NaAlSi ₃ O ₈

Los RCD por su gran contenido de calcio tienden a formar silicato de calcio hidratado como producto de la reacción [77]. Valores similares se han encontrado en otras investigaciones [78], [79]. El calcio libre permite la formación del gel tipo C-A-S-H, el calcio mejora la velocidad de reacciones geopoliméricas a temprana edad [58], [80].

2) Morfología de los residuos

La morfología de los residuos se puede observar en la Figura 9, estos residuos presentan partículas irregulares de diferentes tamaños, en ambos casos, los granos de arista viva son el resultado de los procesos de trituración y molienda.

En la Figura 9 se pueden observar la morfología de ambos residuos, en la figura 9b (residuos de concretos) se observan partículas afiladas e irregulares y partículas sueltas, mientras que en la morfología del residuo de ladrillo (Figura 9a) se observó la aglomeración de partículas que pueden actuar como fase ligante de los polvos más finos. Ambos residuos muestran partículas refinadas, con tendencia esférica que aumentará el área de contacto y mejorará la reacción de activación alcalina, dando como resultados mejor resistencia a compresión y mayor consumo de hidróxido de calcio [76]. También se pueden ver en ambos residuos partículas aglomeradas causadas por la molienda, resultados similares fueron encontrados por otros autores e incluso utilizando otros precursores. [3], [25] Los minerales encontrados en los residuos fueron presentados en el análisis DRX.



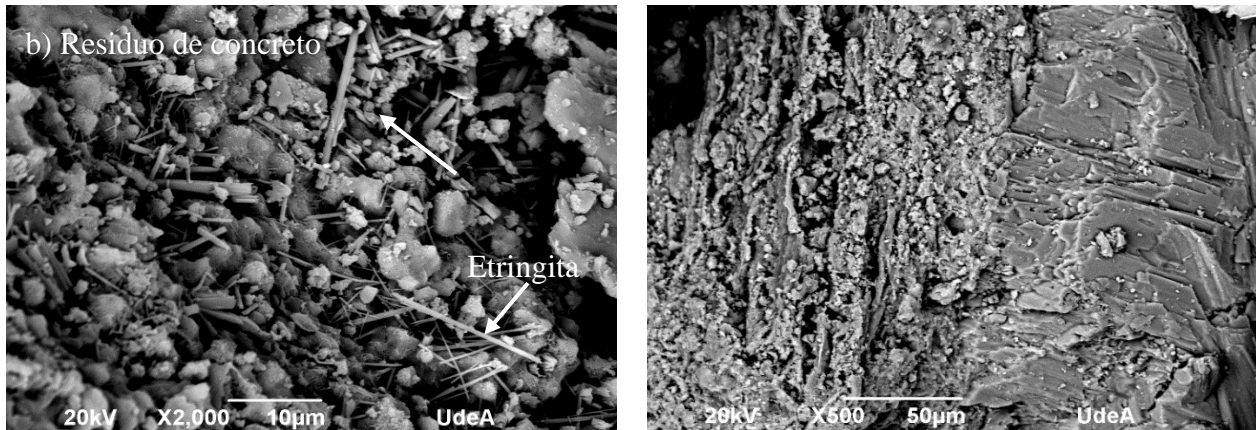


Fig. 9. Morfología de los residuos a) Residuo de ladrillo b) residuo de concreto.

3) Determinación de la distribución de tamaño de partícula

A continuación, se muestra la distribución de tamaño de partícula en la Figura 10a y 10b para ambos residuos, la determinación del tamaño de partícula se realizó mediante el SEM apoyados en el software OringinPro e ImageJ. El análisis de distribución del tamaño de partícula de los RCD compuesto por residuos de ladrillo determinó un tamaño promedio de $5\mu\text{m}$ con un error de aproximado de 1,2. Se han encontrado estudios anteriores en los cuales, entre menor tamaño de partícula, mayores propiedades mecánicas [81] gracias a la formación acelerada de las reacciones de activación, mientras que las partículas más grandes solo se alcanzan a activar de manera parcial [82], las partículas finas del precursor tienen una mejor reactividad y pueden formar una estructura más densa [27], [60], [62], [76], [83]–[86], la finura en los cementos influye generalmente en el desarrollo de resistencia, en el tiempo de fraguado, en la manejabilidad, entre otros [87], los puntos de nucleación (tamaño de partícula fino) permiten una velocidad de reacción en la activación y su vez, una disminución de los tiempos de fraguado del material [88].

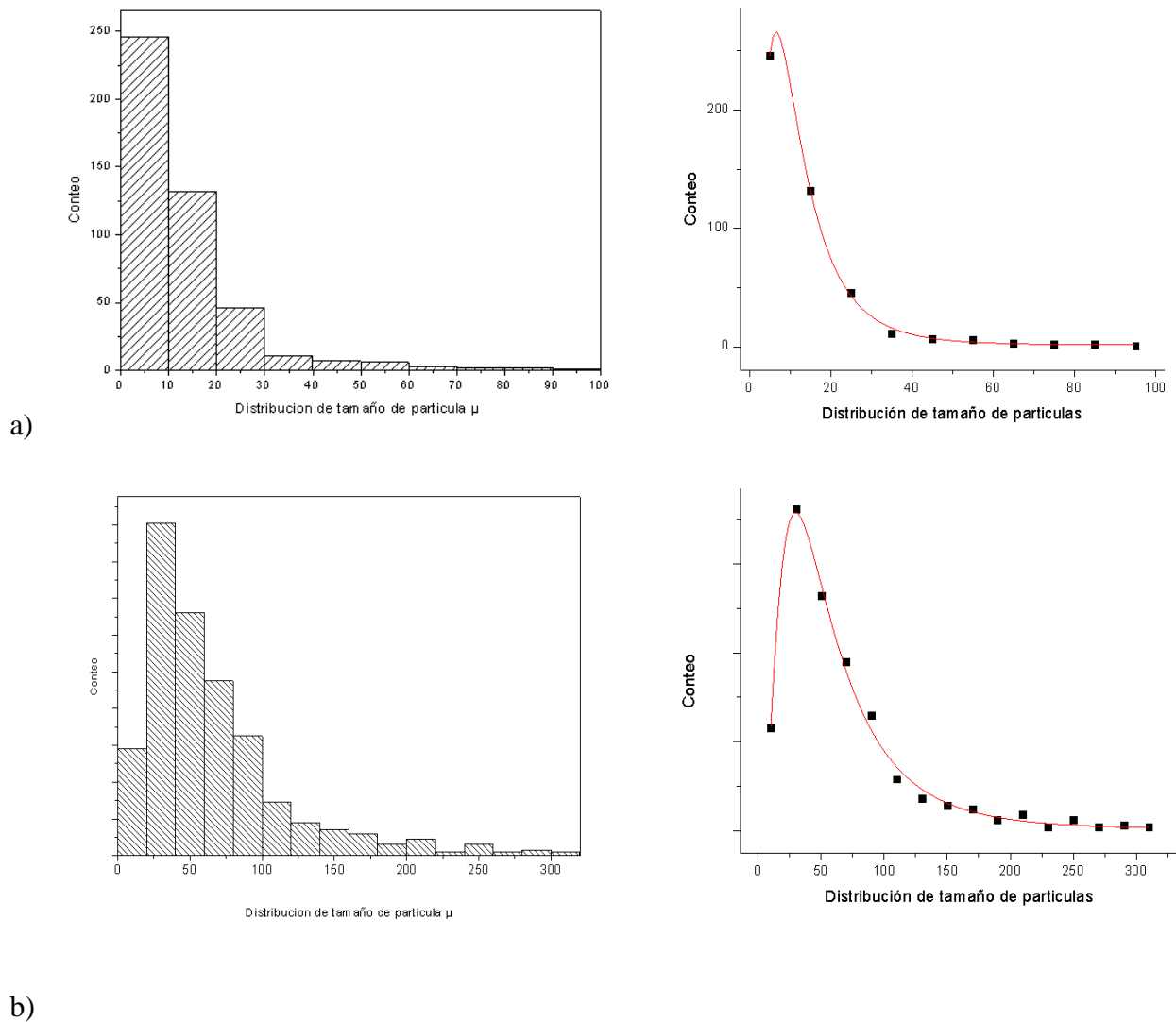


Fig. 10. Análisis de distribución del tamaño de partícula a) RCD de residuos de ladrillo b) RCD residuos de concreto.

Las partículas finas de RCD por lo general tienden a llenar vacíos entre las partículas más gruesas, produciendo un material menos poroso y un material más denso [89]–[91]. Estudios demuestran que el menor tamaño de partícula provoca una mejor reacción de polimerización consecuencia de un mayor área superficial [81] y una unión más fuerte de las partículas [74].

El análisis de la distribución del tamaño de partícula para el RCD de residuos de concreto (figura 10b) muestra rango de tamaño mayor para las partículas de residuo de concreto obteniendo $30\mu\text{m}$ con un error de 1,5. La longitud promedio de la ettringita es de $3.3\mu\text{m}$. Estas partículas de residuo

de concreto tienen un tamaño mucho mayor que las del residuo del ladrillo, esto se debe a que el residuo de concreto es un material más duro que el residuo de ladrillo y al someterse a la molienda las partículas no se lograron triturar todas las partículas a un menor tamaño.

B. RESULTADOS DE RESISTENCIA PARA LOS CEMENTOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE

A continuación, se detallan los resultados de las probetas ensayadas, sometidas a un esfuerzo de compresión y a un esfuerzo de flexión para cada una de ellas, las probetas con residuo mixto (60% cantidad de polvo RCD) no se lograron ensayar dado a que no solidificaron (ver figura 11), debido a la limitada cantidad de activador (40%) e influenciado por la heterogeneidad del tamaño de partícula del residuo, por lo cual se necesitaría investigar una relación de activador alcalino para lograr realizar este tipo de probetas y posteriormente ser ensayadas.



Fig. 11. Probeta con residuo mixto sin solidificar.

Algunas investigaciones otorgan información sobre los AAC como un material con alta capacidad de soporte de carga y absorción de energía [3]. Otros autores encontraron para altos contenidos de NaOH (Hidróxido de sodio) disminución en las propiedades mecánicas asociadas a la inhibición en las velocidades de disolución, por otro lado, los contenidos altos de silicato de sodio podrían

aumentar las propiedades mecánicas [63]. Otros autores afirman que a mayores cantidades de NaOH (hidróxido de sodio) se produce el efecto de eflorescencia, donde el álcali reacciona con el CO₂ de la atmosfera [37], lo que es una falla estética en el material.

1) Resultados de resistencia a compresión AAC

Los resultados de resistencia a compresión se presentan en la Tabla 9 y en la Figura 12 para todas las materias primas con diferentes relaciones de activador y cantidad de sólido. En la Tabla 9 se aprecian los resultados promedios en Megapascuales de resistencia a compresión para todas las probetas, junto con las desviaciones estándar, resultados similares fueron obtenidos por otros autores [12], [60]–[62], [68], [92].

TABLA IX.
RESULTADOS DE RESISTENCIAS PROMEDIOS A COMPRESIÓN DE LAS DIFERENTES
PROBETAS

Probeta	Resistencia promedio a compresión MPa	Desviación estándar
B5Z	1.253	0.08
C4Y	7.55	1.02
C5Y	6.95	0.46
C6Y	6.18	0.33
C4X	15.95	1.73
C5X	16.53	2.32
C6X	19.06	4.31
B4Y	33.11	1.24
B5Y	20.37	3.41
B6Y	13.27	4.54
B4X	10.30	2.56
B5X	18.63	3.37
B6X	23.72	1.76
M4Y	6.76	0.64
M5Y	5.065	0.49
M6Y	-	-
M4X	9.557	3.48
M5X	19.59	3.41
M6X	-	-

Los resultados de resistencia a compresión muestran una mejor interacción de activación alcalina con los residuos de ladrillo, esto es debido a la mayor cantidad de aluminosilicatos presentes necesarios para la activación alcalina y corroborados mediante el ensayo de difracción de rayos X,

otros autores encontraron resultados similares [93]. La resistencia más baja en los residuos de concreto podría deberse a una pérdida en el equilibrio del sistema en función del pH y el contenido de calcio en la pasta, como se explicó anteriormente [28], también puede deberse a la presencia de cemento hidratado y carbonatado el cual aumenta el requerimiento líquido y afecta las propiedades mecánicas [3]. La mayor resistencia se obtuvo en una relación 60/40 de activador.

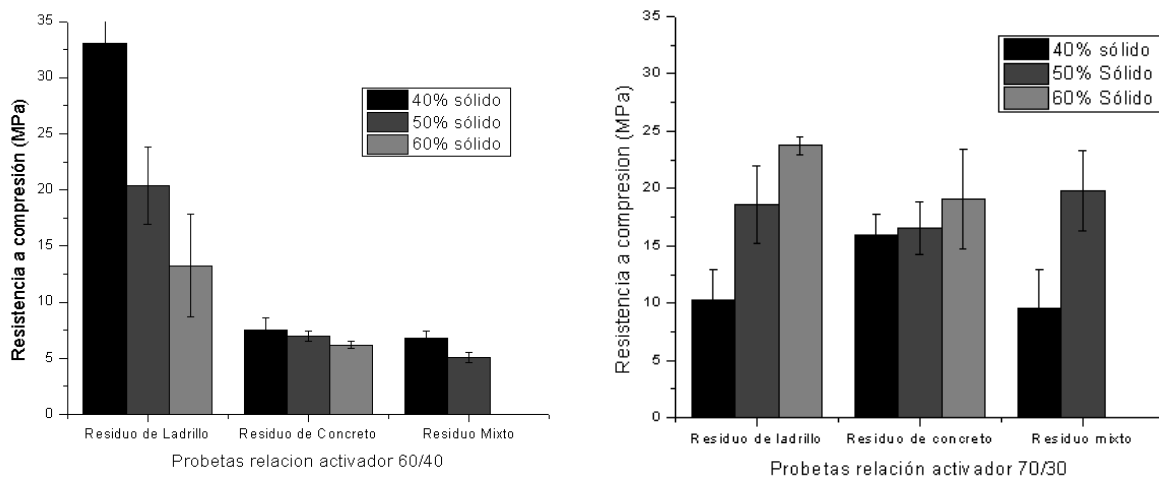


Fig. 12. Resultados de resistencia a compresión con diferente relación de activador a) Relación Y 60/40 Hidróxido de sodio/Silicato de sodio b) Relación X 70/30 Hidróxido de sodio/Silicato de sodio.

Los resultados arrojan que la mayoría de los AAC tienen propiedades (por encima de 5Mpa) para ser utilizado en unidades de mampostería estructural de perforación horizontal (ladrillos y bloques), según la NTC 4017[94], por encima de los 18Mpa las probetas se adecuan para unidades de perforación vertical, aproximadamente todas las probetas de residuo de ladrillo cumplen con esta característica excepto la muestra B4X, en las imágenes SEM se puede observar varias partículas sin activar en esta muestra razón a lo que se atribuye la pobre resistencia mecánica, mientras que por encima de los 19.6Mpa los resultados indican que se pueden utilizar para fabricación de unidades de mampostería macizas para la cual cumplen las probeta B4Y y B6X.

Probetas con residuo de ladrillo

En la Figura 13 y 14 se pueden observar las probetas realizadas con residuos de ladrillo. Se obtuvo un máximo de resistencia promedio a compresión de 33,10 MPa con una relación 60/40 de activador y un 40% de cantidad de sólido (residuo de ladrillo), el valor más bajo para los resultados de resistencia obtenido fue para una relación de activador 70/30 y una cantidad de sólido del 40%, resultados similares obtuvieron otros autores, donde demostraron la actividad puzolánica de los residuo de ladrillos [6], [60], [76], [95].

Las probetas con residuo de ladrillo tienen un comportamiento similar a las probetas con residuo de concreto y al residuo mixto, en la cual, al aumentar la cantidad de silicato de sodio en la relación de activador alcalino, se requiere un menor contenido de sólido en la muestra para alcanzar mejores propiedades mecánicas.

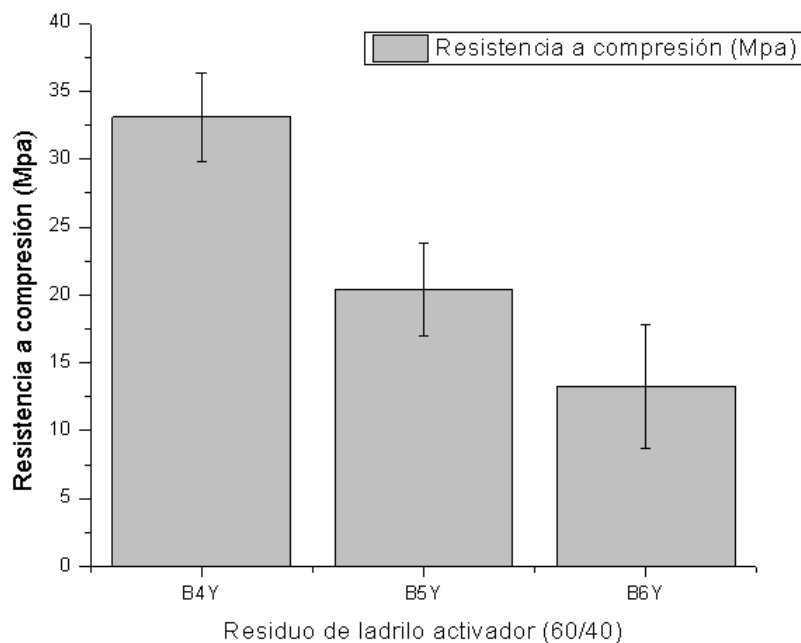


Fig. 13. Resultados de resistencia a compresión RCD de residuo de ladrillo con relación de activador Y 60/40 Hidróxido de sodio/Silicato de sodio.

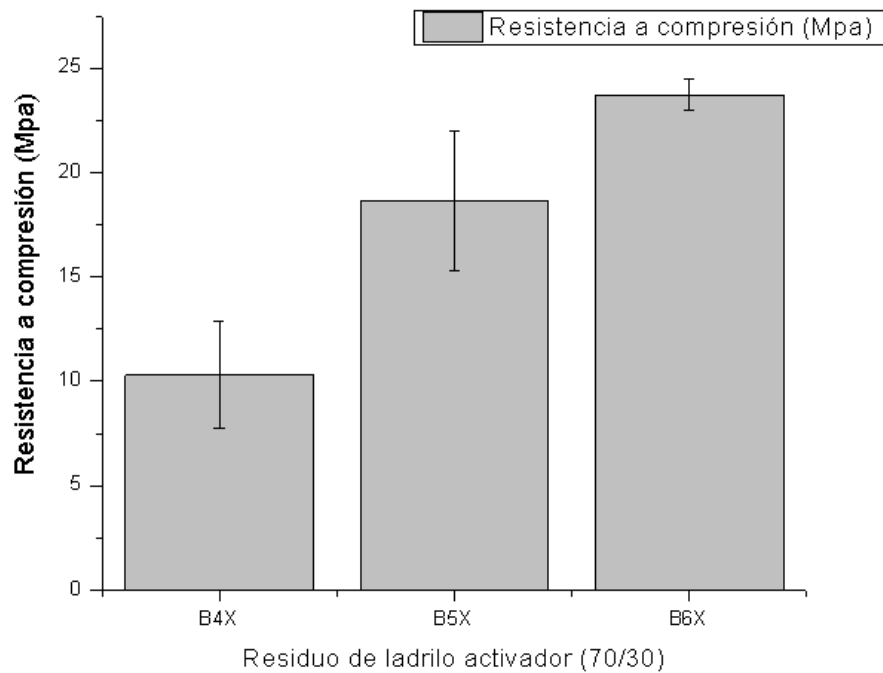


Fig. 14. Resultados de resistencia a compresión RCD de residuo de ladrillo con relación de activador X 70/30 Hidróxido de sodio/Silicato de sodio.

Probetas con residuo de concreto

En la Figura 15 y 16, se encuentran los resultados para las probetas realizadas con residuo de concreto. Se obtuvo un máximo de resistencia a compresión de 19.06 MPa con una relación 70/30 de activador y un 60% de cantidad de sólido (residuo de concreto). El valor más bajo para los resultados de resistencia a compresión obtenido para las probetas fue para una relación de activador 60/40 y una cantidad de sólido del 60%.

Como se puede observar en la gráfica, al variar la relación de activador se modifica la cantidad de sólido necesaria. En una relación 70/30 se tiene menor cantidad de silicato de sodio, por lo cual se necesita mayor cantidad de sólido para alcanzar mayores resistencias, por razones de estabilidad

termodinámica [35]. Al aumentar la cantidad de silicato de sodio se obtienen mejores propiedades mecánicas, otros autores encontraron resultados similares [63].

La disminución en la resistencia en los AAC a base de residuos de concreto se debe posiblemente al sodio presente en el sistema, lo que inhibe las reacciones o disuelve los productos de hidratación ya formados [94].

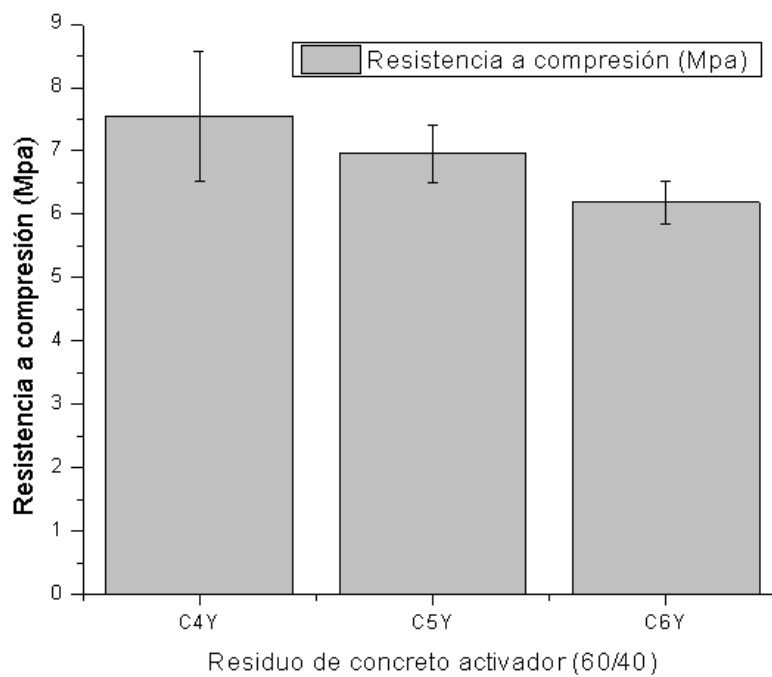


Fig. 15. Resultados de resistencia a compresión RCD concreto con relación de activador 60/40 Hidróxido de sodio/Silicato de sodio.

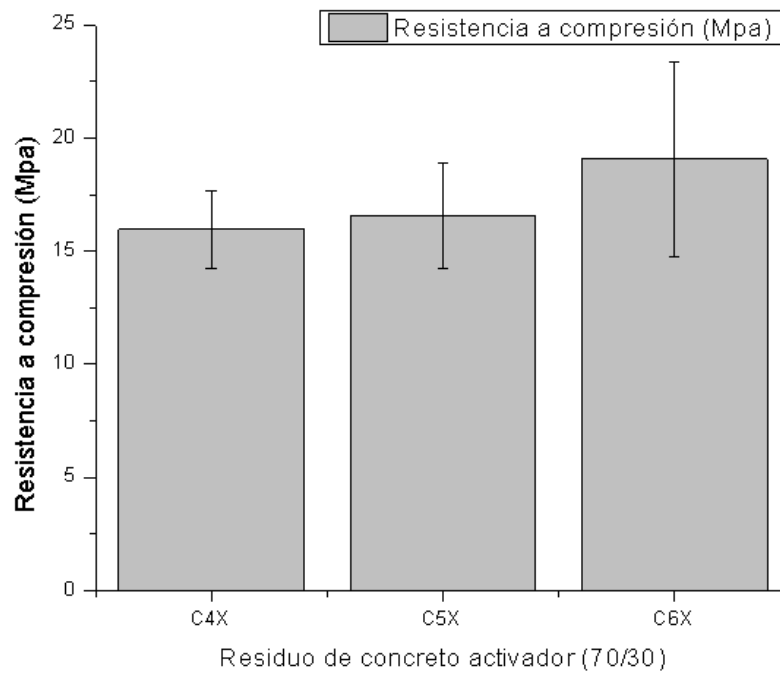


Fig. 16. Resultados de resistencia a compresión RCD concreto con relación de activador 70/30 Hidróxido de sodio/Silicato de sodio.

Probetas con residuo mixto

En la Figura 17 y 18, se observan los resultados de resistencia a compresión para las probetas con residuos mixtos (50% residuo de ladrillo y 50% residuo de cemento) junto con las diferentes proporciones de relaciones de activador. Para el porcentaje 60% de la cantidad de sólido (residuo mixto) no se logró hacer una pasta homogénea, pues la cantidad de polvo presente absorbía la parte líquida, como se explicó anteriormente. La mayor resistencia a la compresión de los residuos mixtos se obtuvo para una relación 70/30 de activador y una cantidad de sólido de 50%, tal como se puede observar en las Figuras 17 y 18, las probetas de residuo mixto tienden a seguir un comportamiento similar a este residuo de concreto. Estas probetas presentaron una desviación estándar bastante alta debido a la heterogeneidad en los residuos.

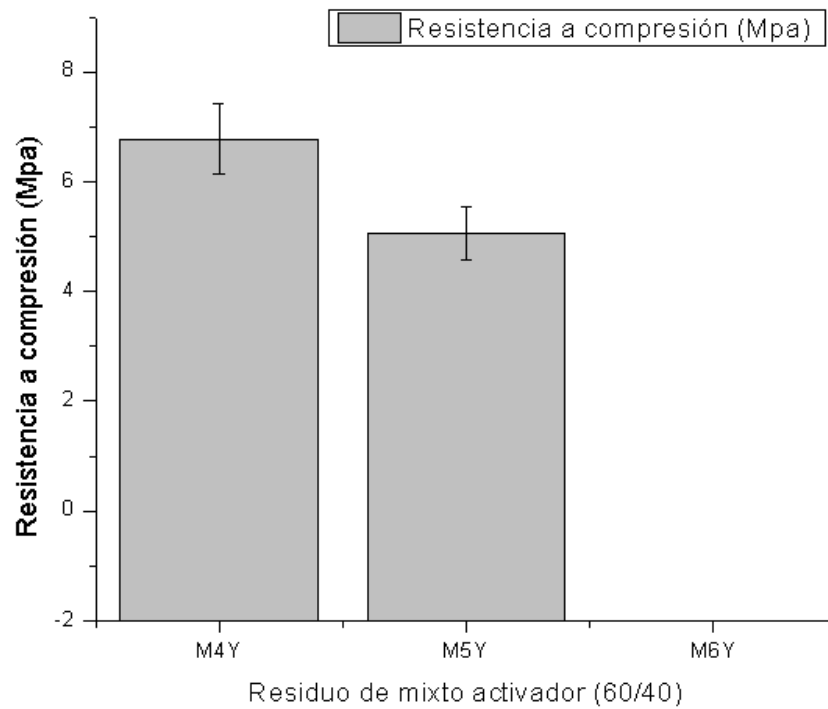


Fig. 17. Resultados de resistencia a compresión RCD mixto con relación de activador Y 60/40 Hidróxido de sodio/Silicato de sodio.

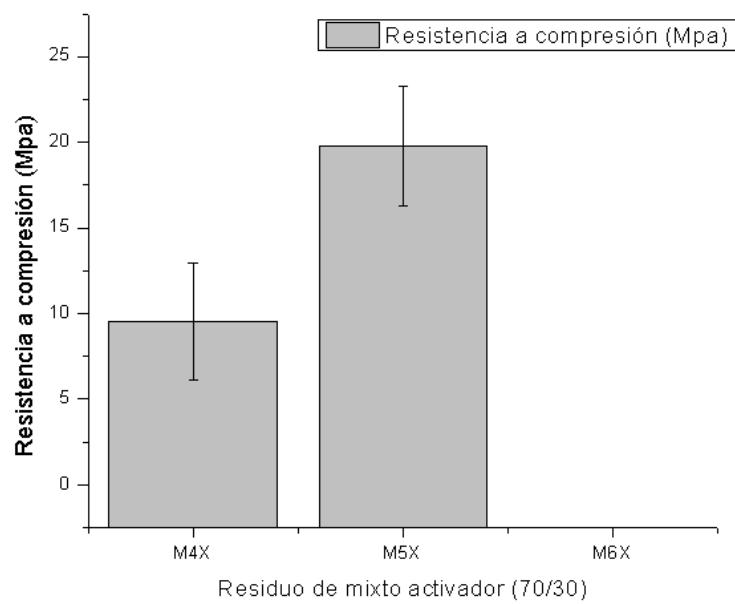


Fig. 18. Resultados de resistencia a compresión RCD mixto con relación de activador X 70/30 Hidróxido de sodio/Silicato de sodio.

2) Resultados de resistencia a flexión AAC

En la Tabla 10 podemos apreciar los resultados de resistencia a flexión obtenidos para cada uno de los AAC.

TABLA X.
RESULTADOS DE RESISTENCIA A FLEXIÓN.

Probeta	Resistencia a flexión	Desviación estándar
B5Z	-	-
C4Y	6.57	0.45
C5Y	6.30	0.21
C6Y	5.95	0.16
C4X	9.54	0.53
C5X	9.72	0.67
C6X	10.44	1.21
B4Y	13.75	0.679
B5Y	10.78	0.895
B6Y	5.097	1.57
B4X	7.67	0.980
B5X	10.32	0.943
B6X	11.64	0.186
M4Y	6.22	0.30
M5Y	5.38	0.26
M6Y	-	-
M4X	7.39	1.27
M5X	10.63	0.913
M6X	-	-

El máximo valor obtenido para la resistencia a flexión es de 13,75 para la probeta de residuo de ladrillo con una proporción en polvo 40% y una relación activadora 60/40, resultados similares se han obtenido en otros estudios [12], [60], [62]. En la Figura 19 podemos observar los resultados para todas las probetas.

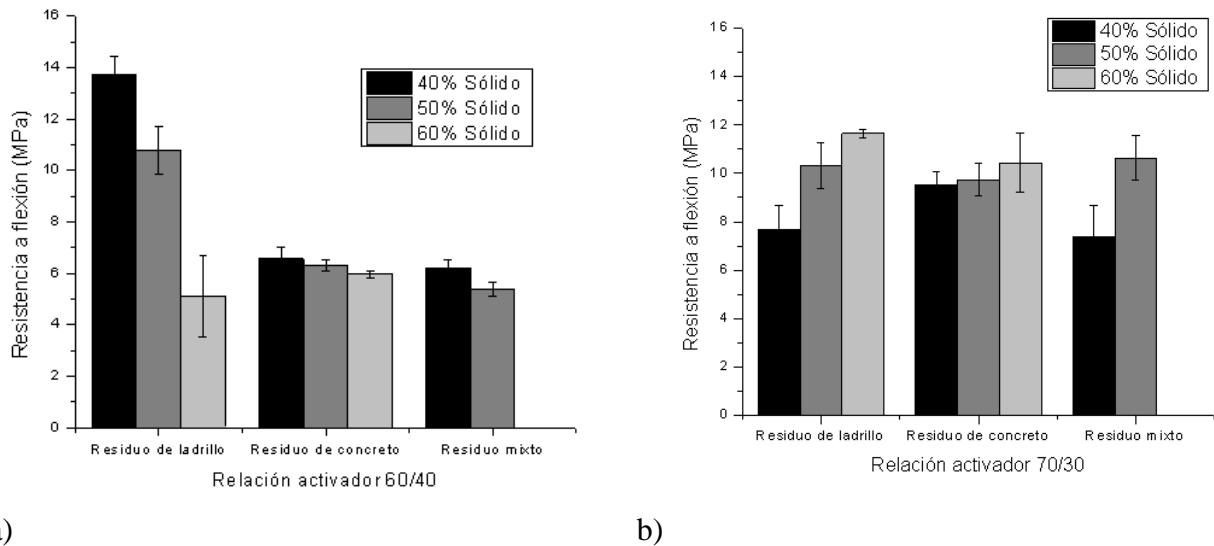


Fig. 19. Resultados de resistencia a flexión para las probetas a) relación de activador Y 60/40 Hidróxido de sodio/Silicato de sodio b) relación de activador X 70/30 Hidróxido de sodio/Silicato de sodio.

C. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS CEMENTOS ACTIVADOS.

En el siguiente enunciado se muestran los análisis morfológicos de las probetas ensayadas y los resultados del ensayo de absorción de agua.

1) Análisis del porcentaje de absorción de las probetas

Se determinó un resultado máximo de 20% de absorción de agua para las probetas [96], en la Figura 20 se observan algunas probetas sometidas a ensayo de absorción, las probetas que obtuvieron un valor por encima o cerca a este porcentaje no obtuvieron buenas propiedades mecánicas, incluso propiedades de menos de 3Mpa, esto debido a que la adición de agua en el AAC. En la Tabla 11 se pueden apreciar los resultados obtenidos de absorción de agua.



Fig. 20. Diferentes probetas sometidas al ensayo de absorción de agua.

El ensayo de absorción se llevó a cabo colocando las muestras en un horno tipo mufla a 110°C grados centígrados durante 24 horas, luego se tomó su peso inicial, posteriormente las probetas fueron sumergidas en agua durante 24 horas, y luego se pesaron para obtener su peso inicial, con estos datos se calculó el porcentaje de absorción de agua con la siguiente ecuación.

$$\text{Absorción} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} * 100\%$$

TABLA XI.
PORCENTAJE DE ABSORCIÓN DE AGUA DE LAS PROBETAS.

Probeta	% de absorción promedio de agua	Desviación estándar
C4Y	17	0.0877
C5Y	18	0.0125
C6Y	18	0.0225
C4X	15	0.0710
C5X	14	0.006
C6X	15	0.009
B4Y	14	0.0270
B5Y	14	0.2931
B6Y	17	0.0443
B4X	17	0.0150
B5X	14	0.0618
B6X	14	0.0930
B4Z	-	-
M4Y	18	0.0530
M5Y	20	0.0810
M6Y	-	-
M4X	15	0.0760
M5X	14	0.0450
M6X	-	-

En las Figuras 21 y 22, se observan los resultados del porcentaje de absorción promedio para cada muestra, las probetas que obtuvieron porcentajes altos de absorción dan resultados más bajos en los ensayos mecánicos. Estructuras menos porosas conducen a una menor absorción de agua [68].

Según la normativa técnica colombiana, todos los especímenes cumplen con los parámetros máximos para la fabricación de ladrillos o cementos híbridos. [94].

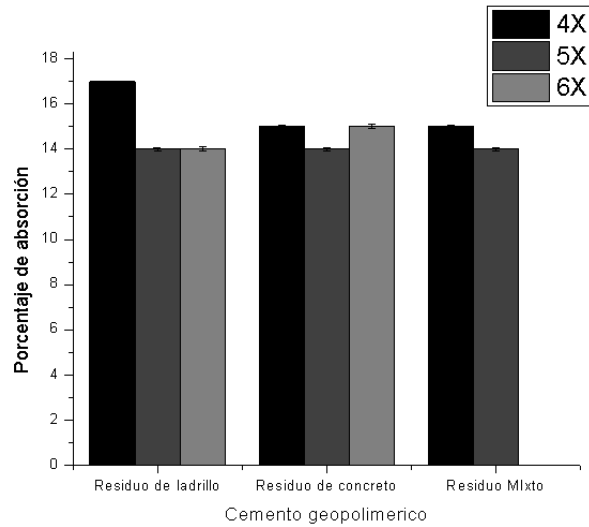


Fig. 21. Resultados del porcentaje de absorción para las muestras 70/30 en relación activador hidróxido de sodio/silicato de sodio

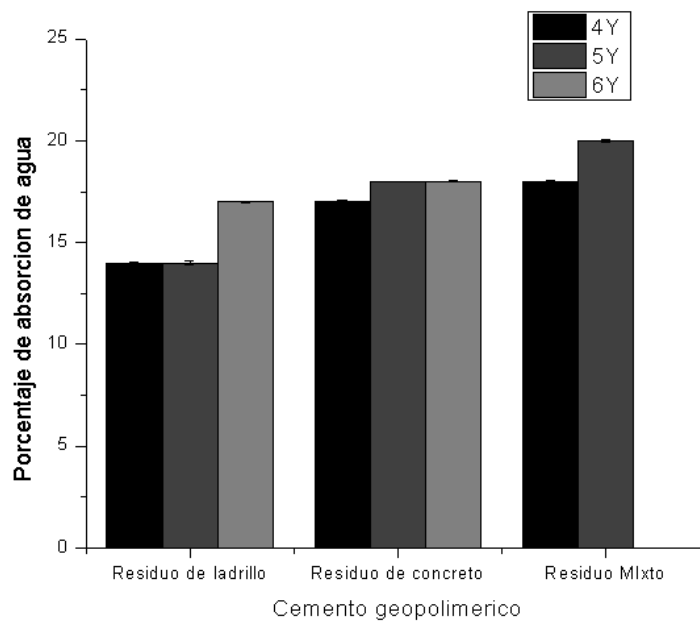


Fig. 22. Resultados del porcentaje de absorción para las muestras 60/40 en relación activador hidróxido de sodio/silicato de sodio.

2) Análisis morfológico de las probetas AAC de residuo de ladrillo

Se analizó la morfología superficial endurecida de las 7 muestras de AAC después de someterlas al ensayo de resistencia a compresión para las probetas con residuo de ladrillo, las cuales se presentan en la Figura 23, 24 y 25 respectivamente. En la Figura 23 correspondiente a las probetas con una relación activador X (70/30) se puede observar que a medida que aumenta la cantidad de sólido en la muestra, la reacción de activación aumenta pudiéndose observar la formación de geles C-A-S-H, junto con una matriz más compacta y homogénea, lo cual repercute finalmente en la resistencia mecánica de la muestra, fenómeno que ocurre contrario para una relación activador Y (60/40) mostrada en la figura 24, en la cual la formación de geles se presenta de manera más notoria en las probetas con menor contenido de sólido, esto es debido a la mayor adicción de silicato de sodio, se puede observar que a medida que aumenta la cantidad de sólido en la muestra la matriz se vuelve poco compacta y voluminosa. Los geles C-A-S-H son los responsables de la armazón de la pasta y la resistencia mecánica de las muestras [75]

Como se observa en la Figura 23, las muestras consisten en fases parcialmente reaccionadas o sin reaccionar, como cuarzo, calcita, albita, moscovita, que también estaban presentes en las materias primas la cual es corroborado más adelante con el análisis FTIR. En la Figura 23c se pueden observar las grietas generadas durante el ensayo de resistencia a compresión.

Hasta el momento no existe un método definitivo y preciso para determinar cuantitativamente la cantidad de material no reaccionado en una muestra particular [92]. En las morfologías de las tres muestras se logra observar partículas de RCD sin reaccionar, y microporos, dando lugar a una activación incompleta. Las superficies porosas y no homogéneas en los todos los casos se atribuye al carácter vítreo de los silicatos y aluminatos presentes el AAC [97].

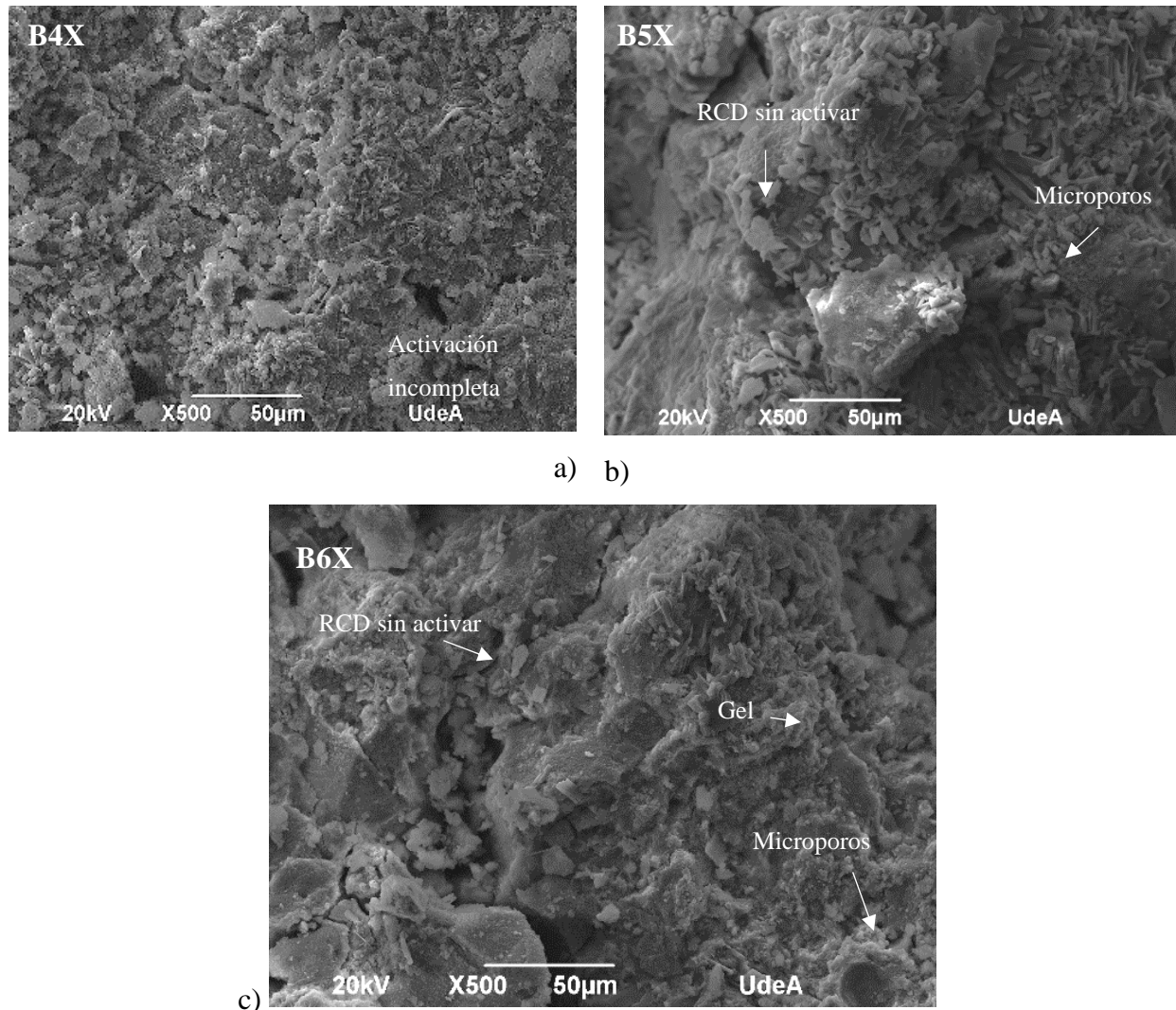


Fig. 23. Morfología de los cementos activados de residuo de ladrillos con una relación activador X 70/30. a) 40% en peso del residuo b) 50 % en peso del residuo c) 60% en peso del residuo.

En la figura 24 se observa las muestras con una relación activador Y (60/40). En estas muestras al aumentar la cantidad de polvo se observa que dejan de ser tan compactas y los geles tienden a desaparecer. Esto podría ser debido a la saturación de residuo en la mezcla, siendo demasiado para lograr activar la disolución de la sílice y la alúmina, sin suficiente solución alcalina la geopolimerización se vio obstaculizada [25].

En los ensayos mecánicos de resistencia a compresión se puede observar mayor resistencia de las probetas con morfología más compacta. La Figura 24c exhibe una microestructura que de material sin reaccionar, correspondiente a la baja resistencia mecánica [92], en la Figura 24a se puede observar la formación de un gel C-A-S-H en forma de panal [25], las imágenes SEM reportadas concuerdan con el comportamiento mecánico reportado para las mezclas.

En la Figura 24a se observar una alta formación de gel C-A-S-H en la superficie de la matriz cementante, mientras que en la Figura 24c se puede observar la ettringita sin reaccionar presente debido a la falta de activación, lo cual es corroborado con los resultados de resistencia.

En la activación alcalina se forman cadenas de calcio muy similares a los productos de hidratación del OPC, pero algunos tetraedros de Si, unidos a la estructura del calcio, son reemplazados por tetraedros de Al, lo que permite la formación de enlaces cruzados entre diferentes cadenas dando mayor rigidez y resistencia a la estructura [98].

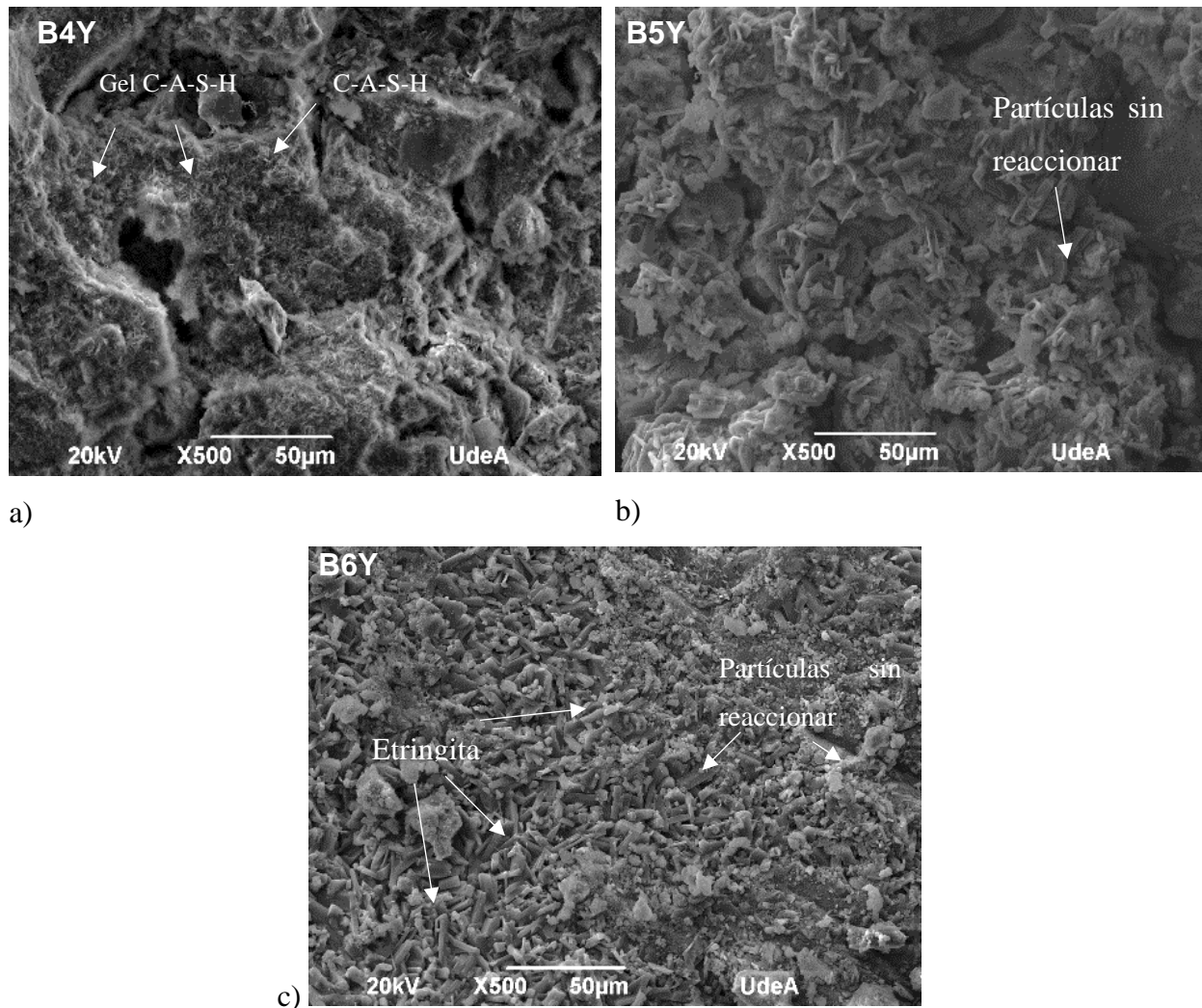


Fig. 24. Morfología de los cementos activados de residuo de ladrillos con una relación activador Y 60/40. a) 40% en peso del residuo b) 50 % en peso del residuo c) 60% en peso del residuo.

La adición de mayor cantidad de silicato de sodio (40%) causa un aumento de la relación $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ocasionando un cambio del sistema químico con estructuras complejas y que dan lugar a un sistema polimérico tridimensional lo que a su vez aumenta las propiedades mecánicas de los AAC [63], esto se corrobora con los resultados de resistencia a compresión.

La morfología de la probeta con cantidad de activador Z (80/20) se puede observar en la Figura 25, en la que se puede ver partículas sueltas, sin activar. Esta probeta con 40% de cantidad de polvo fue la única que logro moldearse para la cantidad Z de activador.

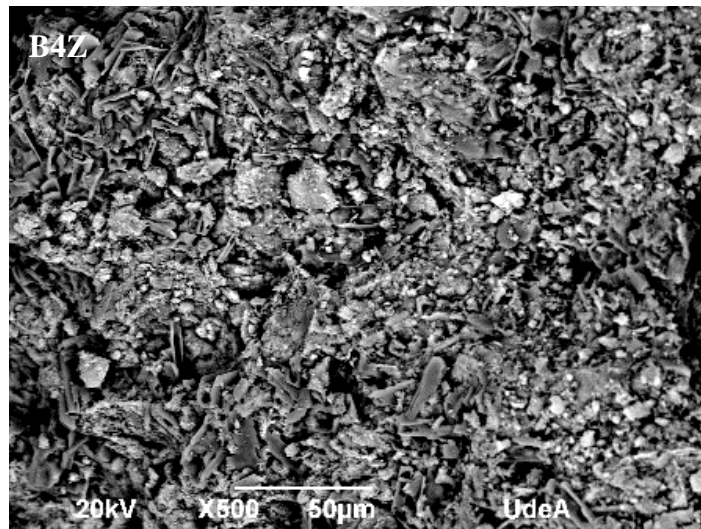


Fig. 25. Morfología de los cementos geopoliméricos de residuos de ladrillos con activador Z 80/20 y 40% en peso de polvo.

En la Figura 25 se observa una microestructura completamente diferente a las anteriores, ya que se pueden ver demasiados granos sueltos (sin reaccionar), lo cual ocasiona una pasta altamente porosa y poco homogénea, lo que nos indica una reacción pobre de las materias primas, lo que es afín con la baja resistencia mecánica de estas probetas, la cantidad de gel producido no fue suficiente para densificar la matriz y la unión fue bastante débil, lo que resultó en una estructura quebradiza

En general, hay matrices donde se aprecian menores granos individuales las cuales conducen a mejores resultados mecánicos, mientras que las probetas que presentan vacíos y poros podrían indicar baja reacción de activación lo que conlleva a menores resultados de resistencia mecánica [55]. En todos los SEM exceptuando la Figura 25 (no hay matriz), podemos observar una matriz grisácea la cual es esencialmente el gel C-A-S-H [99].

3) Análisis morfológico de las probetas AAC de residuo de concreto

Se analizó la morfología superficial endurecida de las 6 muestras de AAC después de someterlas al ensayo de resistencia a compresión para las probetas con residuo de concreto, las cuales se presentan en la Figura 26 y 27 respectivamente.

En la Figura 26 se muestran las superficies de fracturas de las muestras endurecidas del AAC a base de residuo de concreto con una relación de activador X (70/30). A diferencia de las probetas con residuos de ladrillo, en las probetas con residuos de concreto se evidenció la formación de geles desde el porcentaje más bajo de cantidad de sólido en la muestra, esto posiblemente es debido a la cantidad más alta de Ca presente en el residuo lo cual posibilita la formación de geles tipo C-A-S-H. En todas las microestructuras se pueden observar partículas sin disolver las cuales están incrustadas en la matriz del AAC, debido al tamaño de partícula [100].

En todas las probetas se pueden observar las fisuras originadas por el ensayo de resistencia a compresión. Las imágenes SEM de AAC de residuo de concreto mostraron que el gel C-A-S-H estaba rodeado por algunos granos de residuos, lo que indicaba una hidratación incompleta [25].

Como se informó anteriormente en los análisis SEM del cemento activado de residuo de ladrillo, para todos los SEM del cemento activado de residuo de concreto, la matriz grisácea es esencialmente el gel de C-A-S-H [99].

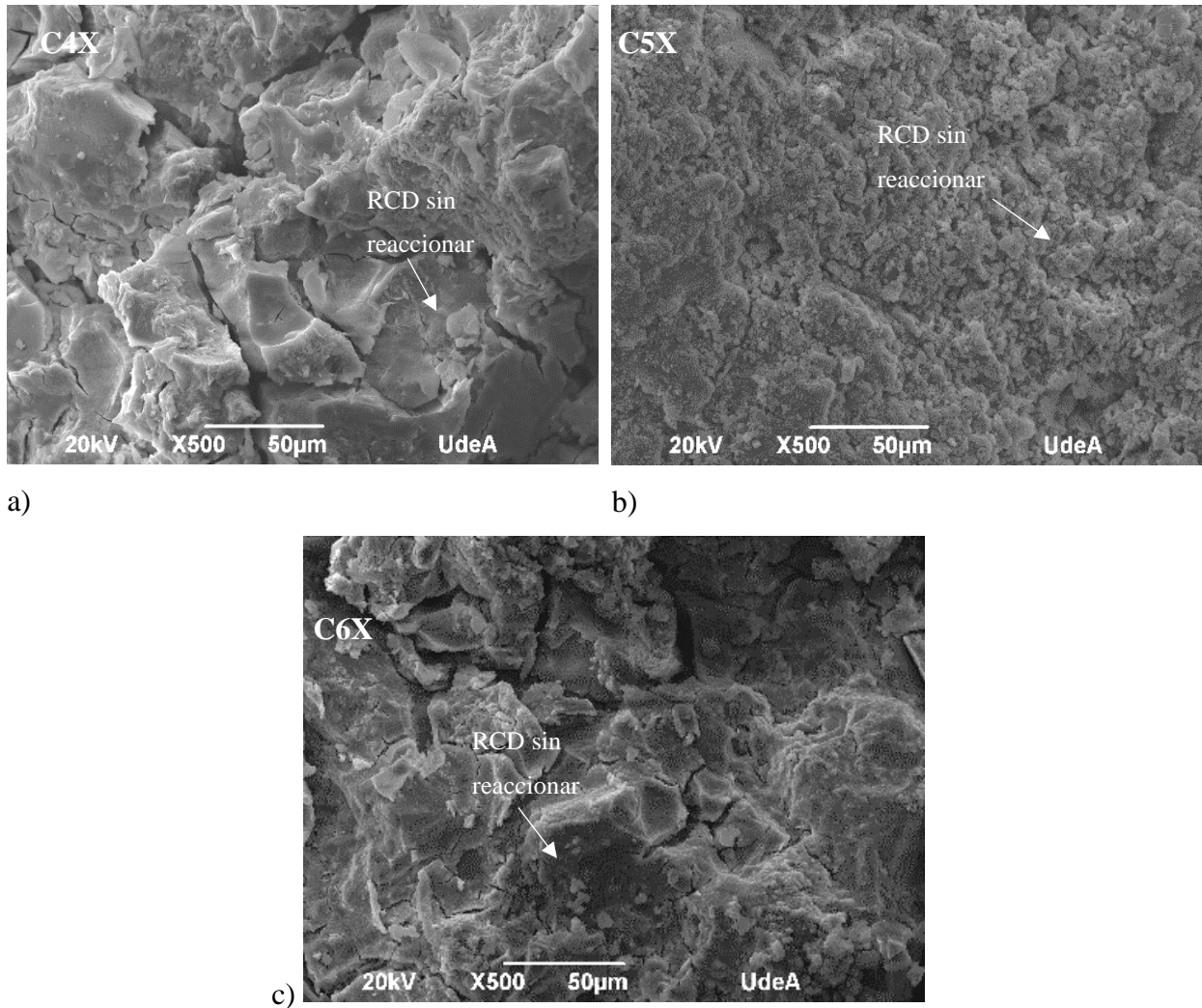


Fig. 26. Morfología de los cementos activados de residuo de concretos con una relación activador X 70/30. a) 40% en peso del residuo b) 50 % en peso del residuo c) 60% en peso del residuo.

En la Figura 27, se puede apreciar la morfología para las diferentes cantidades de polvo de residuo de concreto, para la relación activador Y (60/40), podemos observar que mientras se aumenta la cantidad de sólido en la muestra, la formación de geles disminuye y la matriz se vuelve heterogénea mostrando partículas sin activar, fenómeno que se evidencia en las propiedades de resistencia a compresión. También se evidencian vacíos en las matrices en formas de poros y grietas.

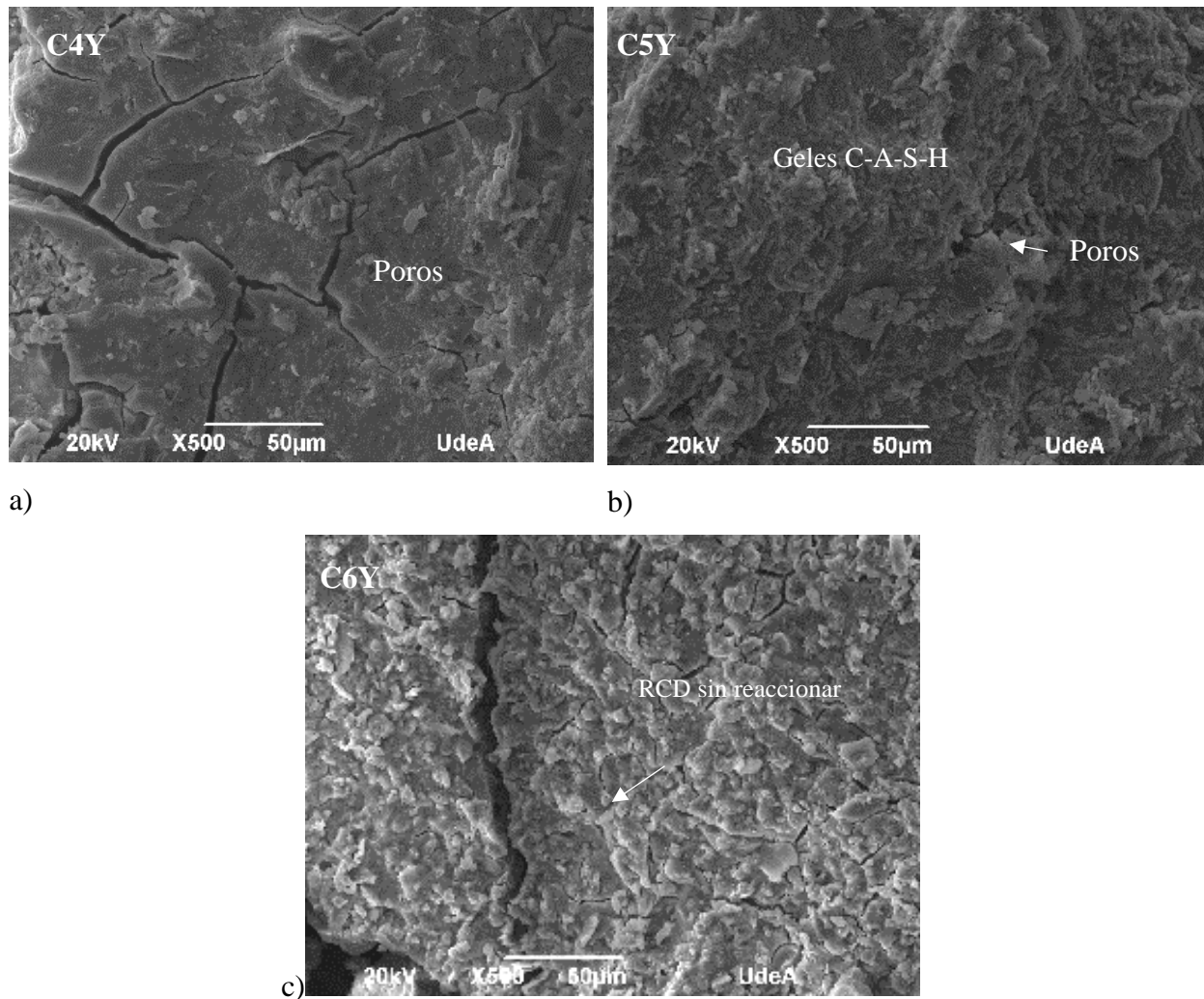


Fig. 27. Morfología de los cementos activados de residuo de concretos con una relación activador Y 60/40. a) 40% en peso del residuo b) 50 % en peso del residuo c) 60% en peso del residuo.

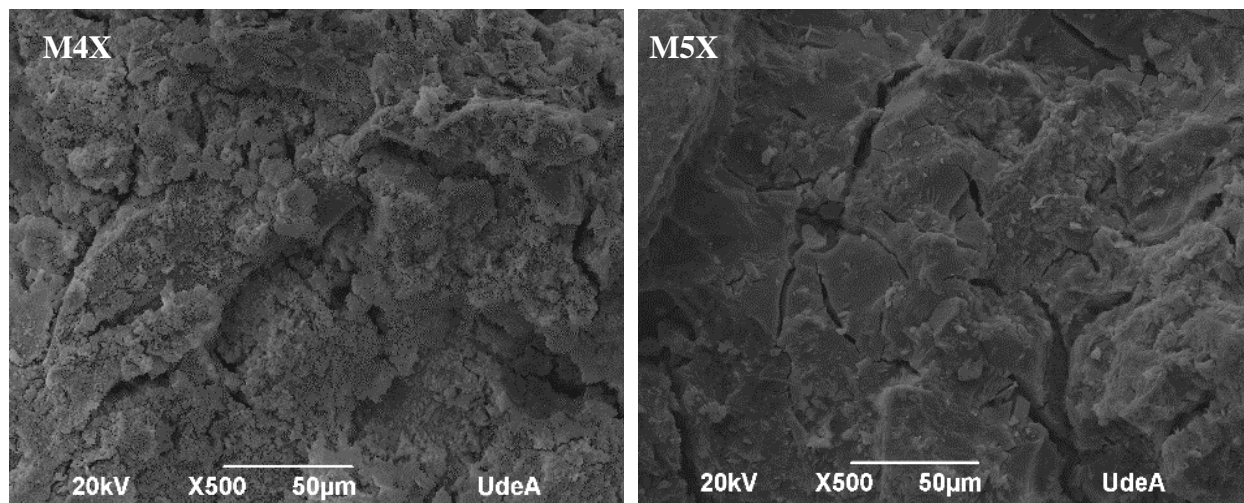
El efecto del Silicato de sodio sobre la relación $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ sobre las propiedades mecánicas no es infinito, ni aplicable a todos los precursores [63], el aumento del silicato de sodio en las muestras de residuo de concreto aumento la viscosidad de las pastas, provocando una difícil trabajabilidad, estas muestras obtuvieron mejor desempeño mecánico para la cantidad 30% de silicato de sodio.

4) Análisis morfológico de las probetas AAC de residuo mixto

Se analizó la morfología superficial endurecida de las 4 muestras de AAC después de someterlas al ensayo de resistencia a compresión para las probetas con residuo mixto, las cuales se presentan en la Figura 28 y 29 respectivamente.

En la Figura 28 se puede apreciar la morfología para las probetas con residuo mixto (residuo de ladrillo 50% y residuo de concreto 50%) y con relación de activador X 70/30. En estas probetas se observa el mismo fenómeno que en las anteriores, lo cual era lo esperado dado a que es una combinación de ambos residuos (residuo de ladrillo y residuo de concreto).

Como se indicó en la sección de metodología experimental, las probetas con 60% de polvo en ambas relaciones activador no lograron formar una pasta en su preparación, por lo cual no se incluyen en ningún análisis.



a)

b)

Fig. 28. Morfología de los cementos activados de residuos mixtos con una relación activador X 70/30. a) 40% en peso del residuo b) 50 % en peso del residuo.

La probeta M5X presenta una superficie más compacta con menos partículas sin activar, es decir que el proceso de activación en estas probetas fue mejor, lo que se valida con el comportamiento mecánico.

El comportamiento de las muestras de residuo mixto tendió a parecerse más al comportamiento del residuo de concreto, para proporciones 70/30 las superficies endurecidas se observan más homogéneas con menos partículas sin reacción, dando lugar a mejores resistencias mecánicas, al contener mayor contenido de Si las probetas formaron defectos visuales, dando resultados bajo de resistencias.

En la Figura 29 se observan los resultados morfológicos de las probetas con residuo mixto para una relación Y (60/40), se observan morfologías muy similares con partículas aún sin reaccionar, igualmente se pueden observar la propagación de las grietas de la fractura de los ensayos de resistencia a compresión.

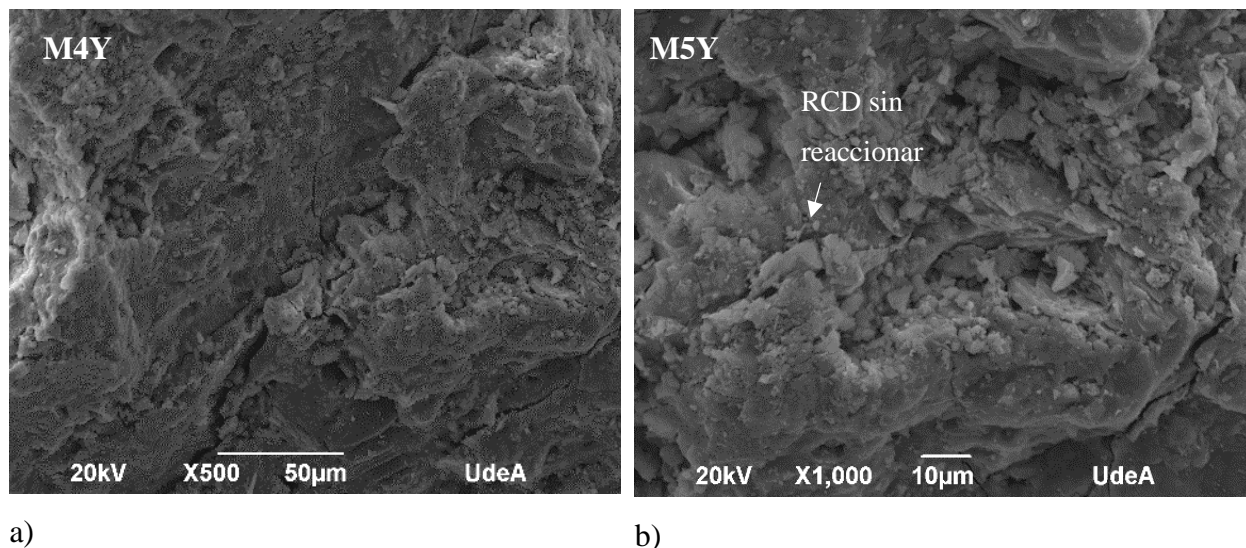


Fig. 29. Morfología de los cementos activados de residuo mixtos con una relación activador Y 60/40. a) 40% en peso del residuo b) 50 % en peso del residuo.

Resultados similares a los cementos activados alcalinamente de los tres residuos obtuvo el autor Komnitsas y asociados en su investigación [74]. En general las imágenes SEM con estructuras más homogéneas dieron como resultados mejores propiedades mecánicas.

D. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS PARA EL RESIDUO DE LADRILLO

Para probar la validez de los datos y predecir las propiedades mecánicas se realizó un análisis estadístico mediante el procedimiento de superficie de respuesta (RSM) en el software R-studio, este análisis se realizó con los datos del cemento activado alcalinamente a base de residuos de ladrillo con una cantidad de polvo 40% y una relación activadora Y, el cual fue el que mejores resultados mecánicos obtuvo, debido a ser un material más puzolánico [71]. Se revisaron los efectos de dos variables principales: el porcentaje de sólido en la muestra, y la relación activadora.

Inicialmente, se realizó la prueba de normalidad, nos da un valor $p=0.95$, por lo cual todos nuestros datos son normales, y podemos seguir con nuestro análisis estadístico. En la Tabla 12 se pueden apreciar los resultados.

TABLA XII.
PRUEBA DE NORMALIDAD DE LOS RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Shapiro-Wilk test de normalidad
Datos: resistencia a compresión
W = 0.979, Valor P= 0.9058

1) Modelo de primer orden con interacción. Anova

Posterior a la prueba de normalidad, se procedió al modelo que mejor se ajustara a nuestros datos, el cual es un modelo de primer orden con interacción, X1 corresponde a la cantidad de sólido en la muestra, y X2 corresponde a la relación activadora.

El valor P del modelo es menor a 0.05, lo que indica que el modelo es altamente significativo. Con efectos significativos para cada variable. La significancia de cada coeficiente de parámetro se determinó mediante valores P, cuanto más pequeños son los valores P, más significancia tiene el coeficiente. En este caso, todos los factores tienen un gran efecto sobre la resistencia a compresión de las probetas. El efecto de interacción de la cantidad de sólido y la relación de activador también tienen efectos significativos sobre la resistencia a compresión de las probetas. Otros estudios han utilizado el modelo de superficie de respuesta para la optimización del diseño de mezclas, validando con métodos experimentales de manera satisfactoria, por lo cual concluyeron que se predice exactitud la resistencia a la compresión [101].

Basándonos en las variables significativas seleccionadas, la ecuación Anova del modelo de primer orden para la resistencia a compresión en términos de factores reales es:

$$\text{Resistencia a compresión} = 16.590941 + 6.64977x_1 - 9.24341x_2 + 25.12464x_1x_2$$

Donde X1 corresponde a la cantidad de sólido en la muestra, y X2 corresponde a la relación activadora del AAC.

La Figura 30 se puede observar cómo se relacionan las 2 variables estudiadas, con la resistencia a compresión del AAC, teniendo un resultado positivo para la interacción entre ellas (relación activador y cantidad de residuo) y un efecto negativo sobre la resistencia a compresión para la cantidad de relación activador, el efecto de la cantidad de sólido en la muestra es positivo. Esto quiere decir que entre más cantidad de sólido se tenga en la muestra la resistencia a compresión aumentaría, y entre más relación activadora tengamos en la muestra la resistencia disminuye, pero la interacción de ambas favorece la resistencia, tal cual lo podemos observar en la Figura 30.

X1 corresponde a la cantidad de sólido en la muestra, y X2 corresponde a la relación activadora.

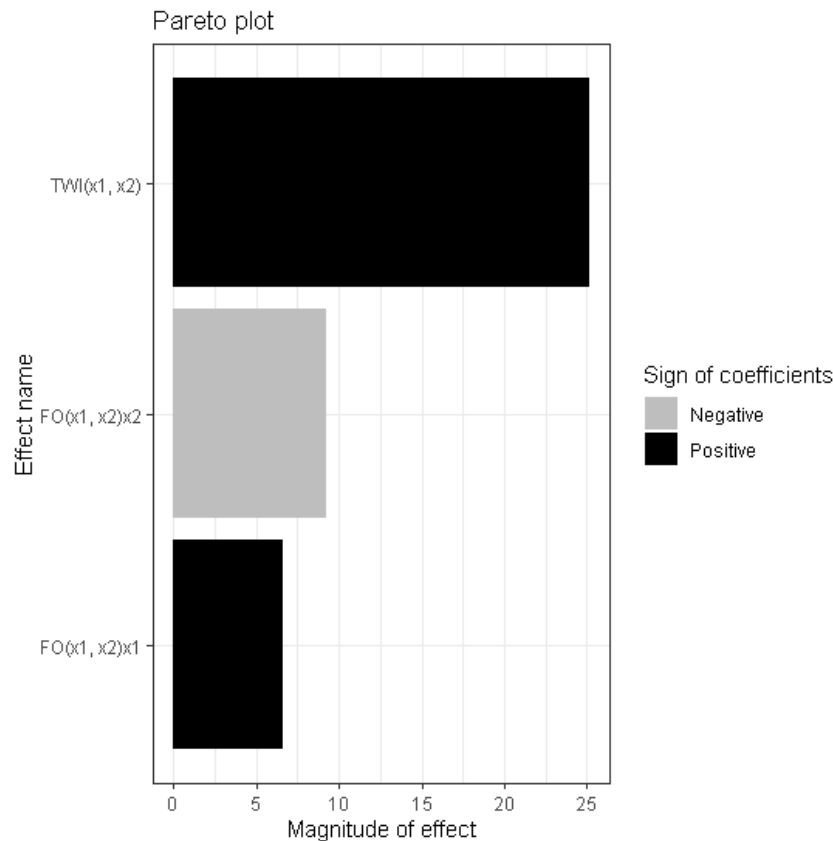


Fig. 30. Efectos de las variables evaluadas sobre la resistencia a compresión

En la Figura 31a se observa el gráfico de superficie del efecto combinado de la relación líquido sólido y la cantidad de sólido sobre la resistencia a compresión del cemento activado. Se encuentra que la resistencia de las muestras de alta relación de activador es fuertemente influenciada a la variación de cantidad de sólido. En tales mezclas (activador 4) se observa un fuerte aumento en la resistencia a la compresión cuando la cantidad de sólido aumenta de 0.45 a 0.60. Para el caso de las mezclas hechas con una relación de activador de 2, la resistencia a la compresión con un cambio en la cantidad de sólido comienza a disminuir lentamente, esto podría ocurrir debido a la presencia de más partículas sin reaccionar.

La resistencia a compresión está en función tanto de la cantidad de sólido de las muestras como de la relación de activador alcalino. La gráfica de superficie de respuesta, indica claramente que existe un óptimo dentro del espacio de diseño observado. Con base en el modelo, se utilizó la optimización numérica para determinar la combinación óptima de parámetros del proceso para lograr la resistencia máxima. Se calcularon mediante las derivadas las condiciones óptimas para el modelo [102], en las que se encontraron una cantidad de sólido: 0.5 y un máximo de relación activador =2.

El gráfico de Contornos observado en la Figura 31b nos ejemplifica una representación bidimensional de la superficie de respuesta donde nos muestra la correlación de la cantidad de sólido con la cantidad de activador. Se observa que para una cantidad baja de sólido con una relación alta de activador los valores son desfavorables, mientras que para una cantidad alta de sólido con una cantidad alta de activador los valores comienzan a mejorar en términos de resistencia a compresión. También se observa que para proporciones bajas de activador con proporciones bajas de cantidad de sólido el comportamiento mecánico es mejor, resultados similares evidenciados con los análisis físicos (SEM).

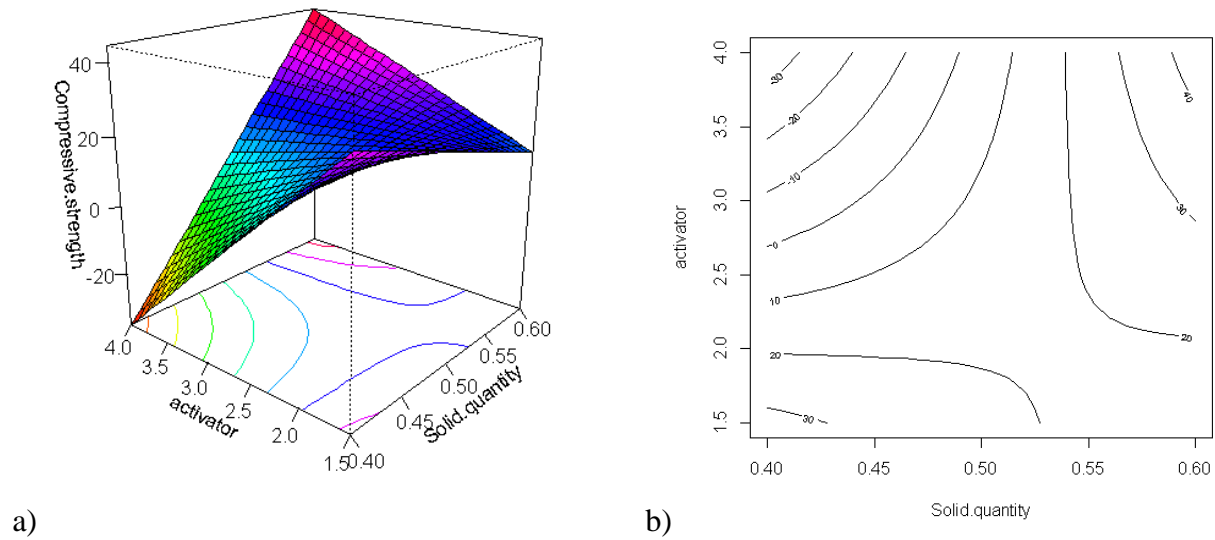


Fig. 31. Resultado del modelo a) grafico de superficie de respuesta b) grafico de contornos.

Para confirmar el análisis estadístico se hicieron los análisis de validación de supuestos, con los cuales los datos cumplieron. Mediante la prueba de Shapiro se obtuvo un valor $p=0.8$ por lo cual los datos son aleatorios. En la Figura 32 se puede apreciar la aleatoriedad de los datos.

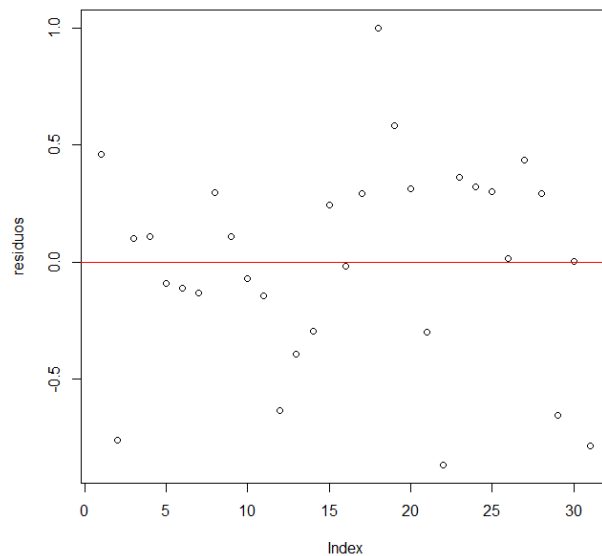


Fig. 32. Resultados de los residuos aleatorios

Mediante el ensayo de Runs Test se obtiene un valor $p=0.1$ por lo cual nuestros residuos son normales. Mediante la prueba de White's tenemos un valor de $p=0.5$ podemos decir que nuestra varianza es constante. La determinación de parámetros de síntesis óptimos permite la producción de AAC en menos tiempo y con menor consumo de materia prima.

E. RESULTADOS DE RESISTENCIA A DEL CEMENTO HIBRIDO DE RCD LADRILLO CON ADICIÓN DE CEMENTO PORTLAND

Una vez obtenida la muestra de AAC a base de residuo con las mejores propiedades mecánicas, se procede a adicionar de manera porcentual OPC a la muestra con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas. Se utilizó OPC tipo I de la marca CEMEX.

1) Resistencia a compresión de los cementos activados con adicción de OPC.

Para realizar el AACH, a las cantidades anteriormente estudiadas y optimizadas se les agrega parcialmente 10%, 20% y 30% de OPC. La adición de cemento portland ordinario a nuestro material de partida (B4Y) nos brinda mayor presencia de calcio, el cual podría ayudar en la reacción formando geles C-A-S-H, la cantidad de sólido de la muestra se mantuvo en 50% tal como se optimizó con el análisis estadístico. En la Tabla 13 y la Figura 33 se pueden observar la resistencia a compresión obtenida para cada formulación.

La resistencia a compresión obtenida es cerca de un 68% mayor a los resultados obtenidos del cemento activado a base solamente de residuo de ladrillo, resultados similares se han obtenido en otras investigaciones [6], [11], [60], [68], [76].

TABLA XIII.
RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL AACH

Tipo de Residuo	Cantidad de OPC	Nombre	Resistencia promedio a compresión (MPa)	Desviación estándar
Residuo de ladrillo	30%	Bopc30	106.71	6.53
	20%	Bopc20	77.56	2.83
	10%	Bopc10	61.69	9.12

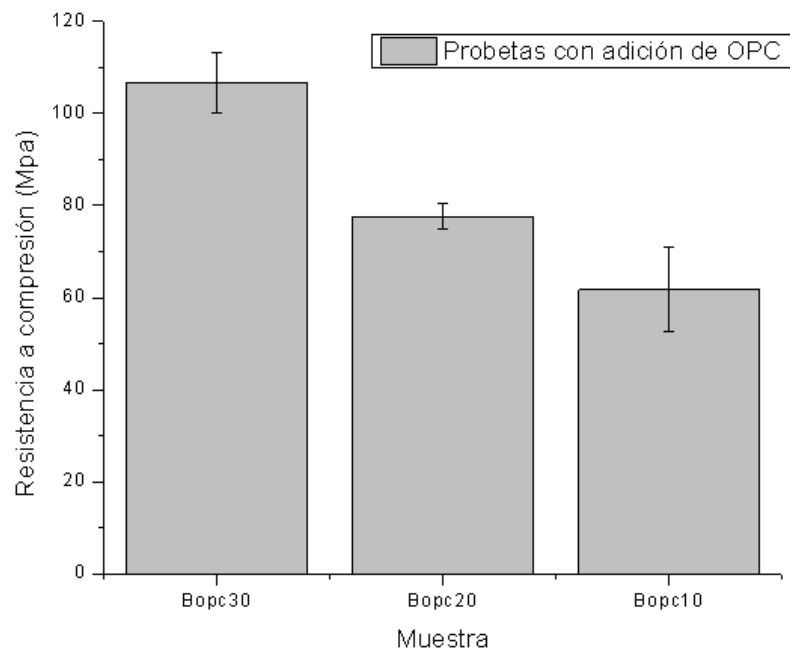


Fig. 33. Resultados de resistencia a compresión de los cementos con adición de OPC

Se observa que la adición porcentual de OPC promueve el desarrollo óptimo de resistencia de los AAC basadas 100% en residuos de ladrillos, estos resultados se logran gracias al aporte de calcio del OPC al sistema, generando gel (C-A-S-H). Las partículas de residuos de ladrillo podrían reaccionar con productos de hidratación de cemento como el hidróxido de calcio (portlandita) y

producir más geles, lo que explica el aumento de la resistencia a la compresión [76], dado a que se produce una activación acelerada de los aluminosilicatos gracias al calor generado en el proceso de hidratación del cemento [3]. Los nuevos productos de hidratación que se forman como resultado de la reacción puzolánica mejoraron la flexibilidad y la plasticidad de las pastas [69].

El valor de resistencia a compresión obtenido fue de 106,7 MPa, el cual se ajusta dentro del rango de los valores comunes de resistencia a compresión de las pastas de cemento Portland [58], resultados similares obtuvieron Robayo et al, utilizando un tipo diferente de activador [103]. Este tipo de cemento activado se puede utilizar para realizar mortero de mampostería no estructural cumpliendo con la NTC 3356 (ASTM C780). Para brindar confiabilidad a nuestros datos se efectuó una prueba de Anova la cual nos da una confiabilidad del 95%, resultados similares se obtuvieron en otros estudios [6], [76].

Los cementos activados alcalinamente tienen un resultado de resistencia a la compresión de hasta 100 MPa, que es comparable y superior a la mayoría de los cementos de Portland [83], estos resultados apuntan a que los AAC pueden ser un material de construcción cementoso potencial.

2) Resultados de resistencia a flexión de las muestras

Los resultados encontrados mediante análisis estadístico para las muestras sugieren una resistencia a flexión máxima de 16,68 MPa para la probeta con máxima adicción de OPC, los resultados se pueden apreciar en la Tabla 14. [60], [104].

TABLA XIV.
RESULTADOS DE RESISTENCIA A FLEXIÓN PARA LAS PROBETAS CON RESIDUO DE LADRILLO.

Tipo de residuo	Nombre	Resistencia a flexión (MPa)	Desviación estándar
Residuo de ladrillo	Bopc30	16.68	0.752
	Bopc20	13.04	0.380
	Bopc10	11.73	1.380

F. ANÁLISIS FÍSICO DEL CEMENTO HÍBRIDO

A continuación, se muestra la morfología y las fases presentes en las probetas de cemento activado a base de residuos de ladrillos con adicción porcentual de cemento Portland.

1) Difracción de rayos X de AACH

Una vez obtenido el mejor AAC el cual fue con residuos de ladrillo, variando la mejor cantidad de relación de activador y después de optimizados los resultados mediante el análisis de superficie de respuesta, se procedió a revisar los componentes mineralógicos mediante la técnica de difracción de rayos x (DRX). En la Figura 34 se muestran los patrones para todos los porcentajes de adicción de OPC, también se estudió el DRX de la pasta cemento Portland para tener materiales de partida.

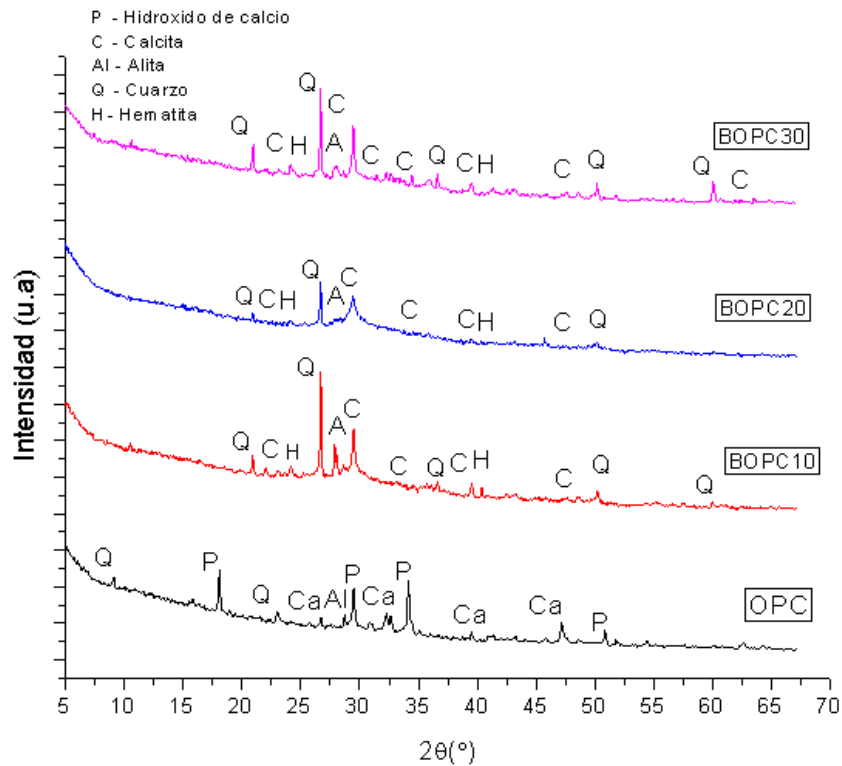


Fig. 34. Análisis XRD de los cementos activados y el material de muestra (pasta de cemento).

La pasta de cemento OPC consiste en fases que incluyen cuarzo, Calcita, Hidróxido de calcio y albita, en comparación con los cementos activados los picos de hidróxido de calcio desaparecen, otros investigadores informaron resultados similares. Se puede deducir que los materiales silíceos aluminosos en la pasta de cemento se disuelven en el activador alcalino con la formación de una nueva fase [105], [106]. Los picos $2\theta = 29,12$ corresponden a formación de geles C-A-S-H resultantes de la reacción de activación.

Un pico nuevo que aparece en el ángulo de 22 ($^{\circ}2\theta$) indica la presencia de fases de Cuarzo amorfo [69]. Observamos picos más bajos de la calcita en comparación con la muestra de control debido a la disolución que ocurre con la activación, esta disminución otorga resistencia relativamente mayor al ataque ácido debido a la liberación de OH^- . Los nuevos AAC a diferencia de la pasta de solo OPC tienen a formar aluminato de calcio hidratado, el cual se puede observar con la aparición de un nuevo pico en el ángulo 23 ($^{\circ}2\theta$) [69]. Los picos de cuarzo únicamente aparecen en los

cementos activados con residuo de ladrillo y adición de OPC, estos picos son provenientes de los residuos de ladrillos, resultados similares obtuvieron otros autores [76].

En la Figura 35, se puede observar la disolución parcial de las fases cristalinas, la cual es indicada a mediante la disminución de la intensidad de los picos en comparación con los picos de las materias primas (DRX del residuo de ladrillo), además el uso de silicato de sodio da como resultado $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ que también puede contribuir a una disminución de la cristalinidad en los productos finales [74].

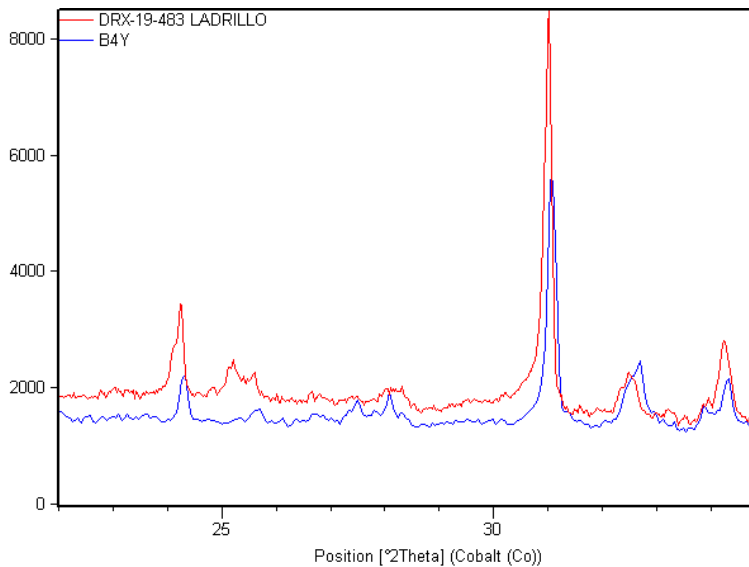


Fig. 35. DRX de residuo de ladrillo comparado con DRX de cemento activado B4Y.

En las Tablas 15,16,17 y 18 se pueden observar el porcentaje de cada fase presente en el análisis DRX. También se cuantificó las fases presentes en la probeta inicial de cemento activado B4Y. Se puede observar que la cantidad de cuarzo presente en la muestra comienza a crecer a medida que se adiciona OPC en comparación con el cemento activado B4Y, la fase compuesta por albita decrece a medida que se adiciona OPC al cemento activado, fases como la moscovita tiende a

desaparecer de los cementos activados con adición de OPC. La cantidad de calcita se mantiene para las tres muestras, siendo un poco menor que en los materiales de partida.

Para las tres muestras se observan estructuras ricas en Si, Al, O y Ca y en baja proporción de Na y Fe, los cuales están relacionados con la composición elemental de la matriz, estructuras ricas en Si, Al, y Ca indican la formación de geles proporcionados a los procesos de geopolimerización, las fases elementales para la formación del geopolímero [3].

TABLA XV.
FASES PRESENTES EN LA PASTA DE CEMENTO.

Fases cristalinas	wt%	Cristal	Fórmula
Hidróxido de calcio	28	Hexagonal	Ca (OH) ₂
Calcita	44.2	Triagonal	CaCO ₃
Cuarzo	4.5	Monoclínico	SiO ₂
Albita	3.3	Triclínico	NaAlSi ₃ O ₈

En la Tabla 15 se muestra el porcentaje en peso obtenido para cada fase de la pasta de cemento mediante un análisis Rietveld con un valor R 6,8. La presencia de Ca es por lo tanto superior e porque el componente principal de la OPC es el óxido de calcio [100].

TABLA XVI.
FASES PRESENTES EN LA PASTA DE CEMENTO ACTIVADO B4Y.

Fases cristalinas	wt%	Cristal	Fórmula
Cuarzo	17.9	Triagonal	SiO ₂
Calcita	30.0	Triagonal	CaCO ₃
Moscovita	16.8	Monoclínico	M-KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂
Hematita	15.9	Triagonal	Fe ₂ O ₃
Albita	19,4	Triclínico	NaAlSi ₃ O ₈

En la Tabla 16 se muestra el porcentaje en peso obtenido para cada fase del cemento activado a base de residuo de ladrillo B4Y mediante un análisis Rietveld con un valor R 6,36

TABLA XVII.
FASES PRESENTES EN LA MUESTRA BOPC10.

Fases cristalinas	wt%	Cristal	Fórmula
Cuarzo	22.5	Triagonal	SiO ₂
Calcita	21.1	Triagonal	CaCO ₃
Hematita	31.7	Triagonal	Fe ₂ O ₃
Albita	24.7	Triclínico	NaAlSi ₃ O ₈

En la Tabla 17 se muestra el porcentaje en peso obtenido para cada fase del cemento activado a base de residuo de ladrillo con adicción de 10% de OPC mediante un análisis Rietveld con un valor R 7,4.

En la Tabla 18 se muestra el porcentaje en peso obtenido para cada fase del cemento activado a base de residuo de ladrillo con adicción de 20% de OPC mediante un análisis Rietveld con un valor R 5.1.

TABLA XVIII.
FASES PRESENTES EN LA MUESTRA BOPC20

Fases cristalinas	wt%	Cristal	Fórmula
Cuarzo	23.5	Triagonal	SiO ₂
Calcita	25.0	Triagonal	CaCO ₃
Hematita	30.0	Triagonal	Fe ₂ O ₃
Albita	20.0	Triclínico	NaAlSi ₃ O ₈

En la Tabla 19 se muestra el porcentaje en peso obtenido para cada fase del cemento activado a base de residuo de ladrillo con adicción de 30% de OPC mediante un análisis Rietveld con un valor R 6,3, como se puede observar la cantidad de Calcita en la muestra aumenta dada la adicción de OPC.

TABLA XIX.
FASES PRESENTES EN LA MUESTRA BOPC30.

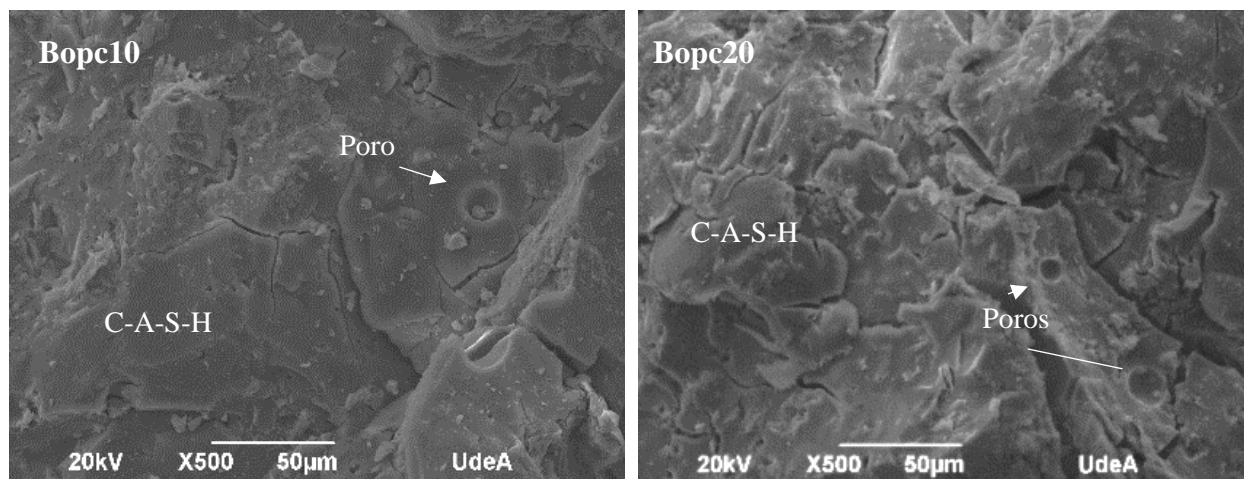
Fases cristalinas	wt%	Cristal	Fórmula
Cuarzo	21.9	Triagonal	SiO ₂
Calcita	26.7	Triagonal	CaCO ₃
Hematita	15.4	Triagonal	Fe ₂ O ₃

Albita	36.8	Triclínico	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
--------	------	------------	-----------------------------

2) Análisis morfológico SEM del cemento híbrido

En los diferentes análisis SEM se observan estructuras bien compactas, al igual que las grietas generadas por los ensayos de resistencia a compresión. Se obtienen, al igual que los cementos activados sin adición de Portland, una estructura en forma de gel C-SA-S-H para todas las adicciones las cuales se pueden observar en la Figura 36.

En la adición de 30% comienzan a aparecer partículas sin reaccionar, lo que pudiera deberse a la saturación de la muestra, una adicción mayor al 30% de OPC podría comenzar a decrecer sus propiedades mecánicas, y se debiera replantear la cantidad de activador utilizada en la activación. En las imágenes SEM no se observan los productos de portlandita (bordes bien definidos y la forma hexagonal) característicos del mortero de OPC al igual que en la difracción de rayos X, dado que la activación alcalina hace que desaparezca.



a)

b)

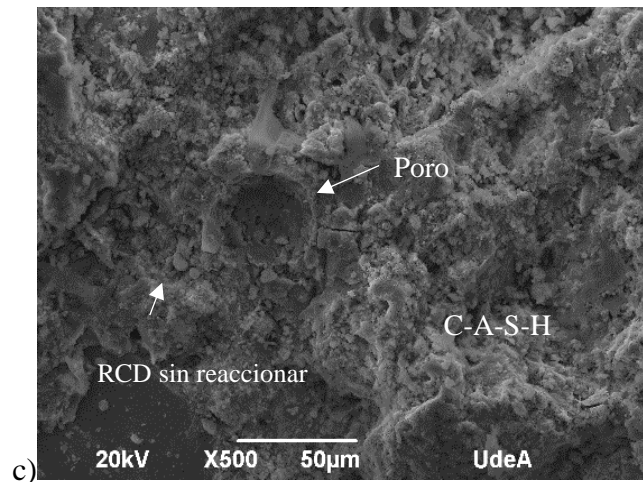


Fig. 36. Imágenes DRX de los cementos activados a base de residuos. a) Bop10 b) Bop20 c) Bop30.

El OPC contiene partículas de tamaño más fino que el residuo de ladrillo, por lo cual se evidencia una reducción de la porosidad (SEM), así como una microestructura más densa, los materiales con partículas finas contribuyen a la compactación de la matriz del AAC. [91].

G. ANÁLISIS ANOVA DEL CEMENTO HÍBRIDO

Mediante la prueba estadística podemos afirmar que, si hay modelo estadístico para los resultados de resistencia a compresión del cemento activados con adición parcial de OPC, lo que significa que la cantidad de OPC añadido si tiene influencia sobre el material de partida. Se obtuvo un valor de $P < 0.05$ en la validación de supuestos y los residuos aleatorios para comprobación de supuestos.

VII. CONCLUSIONES

En este estudio se probaron los residuos de ladrillos y los residuos de concreto como dos de los principales componentes de los residuos de demolición y construcción para la fabricación de cementos activados, estos residuos mostraron potencial para ser materiales viables para la activación alcalina o geopolimerización al ser materiales con contenido de aluminosilicatos, necesarios para que dicha reacción ocurra, y brindar prestaciones mecánicas aceptables.

En comparación, entre estos dos residuos, se encuentra mayor actividad puzolánica en los residuos de ladrillo, esto debido a los componentes y al tamaño de partícula propios de este tipo de material, lo que posibilita mejores reacciones de activación; los cementos activados a partir de residuos de demolición y construcción son una forma potencial de remplazo del cemento Portland.

Se pueden obtener cementos activados alcalinamente con material de residuo de ladrillos y residuos de concretos, obteniendo resistencias a la compresión de 33,11 y 19,6 MPa respectivamente y de manera convencional, con una baja variabilidad en los resultados. Las probetas formadas con residuos de ladrillos obtienen una mejor resistencia a la compresión debido al alto contenido de SiO_2 y Al_2O_3 , además, el tamaño de partícula de las materias primas es un factor muy importante durante la activación alcalina. Las mejores condiciones de activación fueron 40% en peso de sólido, una relación de 60/40 del activador alcalino, una relación molar de 8, temperatura ambiente entre 24 - 28 grados, y residuo de ladrillo. Para los resultados de la experimentación estadísticamente se obtiene un óptimo para una proporción 50% en peso de sólido y una relación de activador de 2. Los resultados de la activación alcalina de residuo mixto también presentan una buena resistencia mecánica pero su desviación estándar es más alta en comparación con las muestras de residuo de ladrillo activado, por lo cual no se seleccionó para continuar dada la variabilidad de los resultados.

Se demostró que el residuo de ladrillo como precursor potencial para la síntesis de AAC, el cual bajo ciertas condiciones como tamaño de partícula y las relaciones L/S, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$, logra obtener un buen comportamiento mecánico siendo apto para la producción de elementos constructivos.

La adición de OPC como fuente de calcio a los cementos activados de residuos de ladrillos proporciona un aumento en la resistencia mecánica a y mejoran el método de curado en comparación a los cementos activados 100% de residuos de ladrillo sintetizados a temperatura ambiente. Los ACCH con tal solo un porcentaje de OPC del 10% evidenciaron una resistencia a compresión de 61 MPa a 28 días, el doble de los AAC de residuos de ladrillos.

Se comprobó que, en los AACH, es decir residuos de RCD activados alcalinamente con adición de OPC de 30% se puede aumentar la resistencia del cemento activado en más del 50%, dando como resultados materiales de construcción verde. Los resultados indican que es posible adaptar a la normativa técnica colombiana estos cementos activados por ejemplo en la fabricación de ladrillos de desgaste severo, clasificación de la ASTM C 62 [107].

Según la normativa colombiana NTC los cementos activados se adhieren perfectamente para las fabricaciones de ladrillos, bloques estructurales o adoquines verdes, además de la viabilidad de la construcción de estos mismos de manera manual, lo que potencializa a la fabricación en comunidades de baja tecnología.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

-
- [1] J. Davidovits, “False Values on CO₂ Emission for Geopolymer Cement / Concrete published in Scientific Papers,” *Geopolymer Inst. Libr.*, no. November, 2015.
- [2] A. Latorre, “La industria del cemento en colombia,” pp. 1–53, 2008.
- [3] N. Ruiz lopez, “Concreto a partir de residuos de demolición activados alcalinamente reforzados con caucho para aplicaciones en pavimentos rígidos,” Universidad del valle, 2018. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001><http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.055><https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.006><https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.024><https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127252><http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001>
- [4] J. D. Aristizábal Hernández and C. Luengas Pinzón, “Reducción de Emisiones en la industria cementera usando madera procedente de plantaciones dendroenergéticas,” *Gestión Integr. en Ing. Neogranadina -Universidad Mil. Nueva Granada*, vol. 1, pp. 5–7, 2009, [Online]. Available: http://www.umng.edu.co/documents/10162/745273/V1N1_5.pdf
- [5] J. T. M. Francisco, A. E. de Souza, and S. R. Teixeira, “Construction and demolition waste in concrete: Property of pre-molded parts for paving,” *Ceramica*, vol. 65, pp. 22–26, 2019, doi: 10.1590/0366-6913201965S12595.
- [6] R. A. Robayo-Salazar, J. M. Mejía-Arcila, and R. Mejía de Gutiérrez, “Eco-efficient alkali-activated cement based on red clay brick wastes suitable for the manufacturing of building materials,” *J. Clean. Prod.*, vol. 166, pp. 242–252, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.243.
- [7] D. FLORES, “Las emisiones de CO₂ aumentan y será un nuevo récord | RTVE,” 2019. <https://www.rtve.es/noticias/20191204/emisiones-dioxido-carbono-siguen-aumentando-marcaran-nuevo-record-2019/1993128.shtml> (accessed Jul. 20, 2020).
- [8] H. K. Shehab, A. S. Eisa, and A. M. Wahba, “Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete with full and partial cement replacement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 126, pp. 560–565, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.059.
- [9] D. A. V. Molina, J. M. M. Arcila, and R. M. de Gutiérrez, “Mechanical and thermal performance of a geopolymeric and hybrid material based on fly ash,” *Dyna*, vol. 83, no. 195, pp. 216–223, 2016, doi: 10.15446/dyna.v83n195.50824.

- [10] “Cemento Verde Argos, Usos y Beneficios - Cemento Argos Colombia.” <https://colombia.argos.co/cemento-verde/> (accessed Nov. 07, 2022).
- [11] A. Cardoza and H. A. Colorado, “Geopolymers Made of Construction and Demolition Waste: Current Trends and Perspectives,” in *Minerals, Metals and Materials Series*, vol. I, 2022, pp. 703–719. doi: 10.1007/978-3-030-92563-5_73.
- [12] J. Tan, J. Cai, X. Li, J. Pan, and J. Li, “Development of eco-friendly geopolymers with ground mixed recycled aggregates and slag,” *J. Clean. Prod.*, vol. 256, p. 120369, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120369.
- [13] M. Del Río, P. Izquierdo, I. Salto, and J. Santa Cruz, “La regulación jurídica de los residuos de construcción demolición (RCD) en España. El caso de la Comunidad de Madrid,” *Inf. la Construcción*, vol. 62, no. 517, pp. 81–86, 2010, doi: 10.3989/ic.08.059.
- [14] L. A. López Ruiz, X. Roca Ramón, and S. Gassó Domingo, “The circular economy in the construction and demolition waste sector – A review and an integrative model approach,” *J. Clean. Prod.*, vol. 248, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119238.
- [15] F. Özalp, H. D. Yilmaz, M. Kara, Ö. Kaya, and A. Şahin, “Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 110, pp. 17–23, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.030.
- [16] N. Sierra Perdomo, “Residuos de construcción y demolición (RCD), construcción en la ciudad de Bogotá y la metodología PMBOK,” Universidad Militar nueva granada, 2020. [Online]. Available: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/38030/SierraPerdomoNicolás2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=En Colombia se generan un,de residuos de construcción y>
- [17] K. L. Trujillo Vargas and A. P. Quintero Vargas, “Análisis del manejo de Residuos de Construcción y Demolición RCD y sostenibilidad en la construcción en Bogotá D.C.,” *Univ. la Salle*, p. 74, 2021, [Online]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/912
- [18] Departamento nacional de planeación, “Diseño de una estrategia para la promoción y fortalecimiento de los procesos de logística inversa de residuos de materiales de construcción y demolición – RCD,” 2022. <https://www.dnp.gov.co/> (accessed Nov. 14, 2022).

- [19] L. M. Chica-Osorio and J. M. Beltrán-Montoya, “Demolition and construction waste characterization for potential reuse identification,” *DYNA*, vol. 85, no. 206, pp. 338–347, 2018.
- [20] C. Rivera Mera and C. Gutiérrez Palacios, “Análisis de impacto ambiental por la inadecuada disposición de residuos de la construcción y demolición en el valle de México y propuestas de solución,” *Rev. AIDIS Ing. y Ciencias Ambient. Investig. Desarro. y práctica*, vol. 1, no. 4, 2009.
- [21] A. Palomo, P. Krivenko, I. Garcia-Lodeiro, E. Kavalerova, O. Maltseva, and A. Fernández-Jiménez, “A review on alkaline activation: new analytical perspectives,” *Mater. Construcción*, vol. 64, no. 315, p. e022, Sep. 2014, doi: 10.3989/mc.2014.00314.
- [22] F. Pacheco-Torgal, J. Castro-Gomes, and S. Jalali, “Alkali-activated binders: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 7, pp. 1305–1314, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015.
- [23] M. Nodehi and V. M. Taghvaei, “Alkali-Activated Materials and Geopolymer: a Review of Common Precursors and Activators Addressing Circular Economy,” *Circ. Econ. Sustain.*, vol. 2, no. 1, pp. 165–196, 2022, doi: 10.1007/s43615-021-00029-w.
- [24] S. Goyal, R. Siddique, S. Jha, and D. Sharma, “Utilization of textile sludge in cement mortar and paste,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 214, pp. 169–177, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.04.023.
- [25] F. Ameri, P. Shoaie, S. A. Zareei, and B. Behforouz, “Geopolymers vs. alkali-activated materials (AAMs): A comparative study on durability, microstructure, and resistance to elevated temperatures of lightweight mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 222, pp. 49–63, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.079.
- [26] F. Škvára, T. Jílek, and L. Kopecký, “Geopolymer materials based on fly ash,” *Ceram. - Silikaty*, vol. 49, no. 3, pp. 195–204, 2005.
- [27] A. Nazari, A. Bagheri, and S. Riahi, “Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 528, no. 24, pp. 7395–7401, 2011, doi: 10.1016/j.msea.2011.06.027.
- [28] I. Garcia-Lodeiro, S. Donatello, A. Fernández-Jiménez, and Á. Palomo, “Hydration of hybrid alkaline cement containing a very large proportion of fly ash: A descriptive model,” *Materials (Basel)*, vol. 9, no. 8, 2016, doi: 10.3390/MA9070605.

- [29] J. B. M. Dassekpo, X. Zha, J. Zhan, and J. Ning, “The effects of the sequential addition of synthesis parameters on the performance of alkali activated fly ash mortar,” *Results Phys.*, vol. 7, no. May, pp. 1506–1512, 2017, doi: 10.1016/j.rinp.2017.04.019.
- [30] L. N. Assi, E. Eddie, and P. Ziehl, “Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 167, pp. 372–380, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.193.
- [31] J. Tan, Ö. Cizer, J. De Vlieger, H. Dan, and J. Li, “Impacts of milling duration on construction and demolition waste (CDW) based precursor and resulting geopolymer: Reactivity, geopolymerization and sustainability,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 184, p. 106433, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106433.
- [32] Y. Segura Sierpes, M. V. Borrachero Rosado, J. M. Monzó Balbuena, and J. Payá Bernabeu, “Preliminary studies on hydrated cement for its reuse in geopolymers,” *Dyna*, vol. 83, no. 196, pp. 229–238, 2016, doi: 10.15446/dyna.v83n196.54189.
- [33] N. G. Pericot and P. Del Solar, “Optimizing the recycling rate on construction waste : the approach of sustainability tools,” no. October 2014, p. 13, 2013.
- [34] S. A. Bernal, R. Mejía de Gutierrez, and E. D. Rodríguez, *Materiales activados por álcali: cimentando un futuro sostenible*, vol. 15, no. 2. Universidad del Valle, 2013. Accessed: Jun. 01, 2019. [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-30332013000200020
- [35] M. Torres-Carrasco and F. Puertas, “Alkaline activation of different aluminosilicates as an alternative to Portland cement: Alkali activated cements or geopolymers,” *Rev. Ing. Constr.*, vol. 32, no. 2, pp. 5–12, 2017, doi: 10.4067/S0718-50732017000200001.
- [36] Á. Villamor, : Constantino, F. Pereira, and Y. L. Galiano, “Geopolímeros sintetizados a partir de distintos materiales residuales. Activación alcalina de cenizas de cascarilla de arroz,” p. 114, 2016, [Online]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90737/fichero/TRABAJO+FIN+DE+GRADO+ÁLVARO+VILLAMOR+LORA.pdf>
- [37] M. Carrasco, “Manuel Torres Carrasco,” p. 433, 2015.
- [38] J. A. Mena Jiménez, “Desarrollo de geopolímeros porosos a partir de ceniza volante y paval,” p. 53, 2018.
- [39] C. Lampris, R. Lupo, and C. R. Cheeseman, “Geopolymerisation of silt generated from

- construction and demolition waste washing plants,” *Waste Manag.*, vol. 29, no. 1, pp. 368–373, 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.04.007.
- [40] B. Singh, G. Ishwarya, M. Gupta, and S. K. Bhattacharyya, “Geopolymer concrete: A review of some recent developments,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 85, pp. 78–90, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036.
- [41] Y. Park, A. Abolmaali, Y. H. Kim, and M. Ghahremannejad, “Compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber partially replacing sand,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 118, no. 2016, pp. 43–51, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.001.
- [42] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, and J. S. J. Van Deventer, “Geopolymer technology: The current state of the art,” *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 9, pp. 2917–2933, 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0637-z.
- [43] J. Davidovits, “Properties of Geopolymer Cements,” *First Int. Conf. Alkaline Cem. Concr.*, pp. 131–149, 1994.
- [44] C. Shi, “Corrosion resistance of alkali-activated slag cement,” *Adv. Cem. Res.*, vol. 15, no. 2, pp. 77–81, 2003, doi: 10.1680/adcr.2003.15.2.77.
- [45] F. Puertas, A. Gil-Maroto, M. Palacios, and T. Amat, “Morteros de escoria activada alcalinamente reforzados con fibra de vidrio AR. Comportamiento y propiedades,” *Mater. Constr.*, vol. 56, no. 283, pp. 79–90, 2006, doi: 10.3989/mc.2006.v56.i283.10.
- [46] T. Suwan and M. Fan, “Influence of OPC replacement and manufacturing procedures on the properties of self-cured geopolymer,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 551–561, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.065.
- [47] R. Andres Robayo-Salazar, R. Mejía de Gutiérrez, and A. Jimena Mulford-Carvajal, “Producción de elementos constructivos a partir de residuos de ladrillo activados alcalinamente Production of building elements based on alkali-activated red clay brick waste Produção de elementos construtivos a partir de resíduos de tijolo ativados alcali,” *Rev. Fac. Ing. (Rev. Fac. Ing.*, vol. 25, no. 43, pp. 21–30, 2016, doi: 10.19053/01211129.v25.n43.2016.5294.
- [48] T. Błaszczczyński and M. Król, “Durability of cement and geopolimer composites,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 251, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/251/1/012005.
- [49] A. Mehta and R. Siddique, “Properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete incorporating OPC as partial replacement of fly ash,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 150, pp.

- 792–807, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.067.
- [50] M. Ossa M. and H. Jorquera S., “Cementos con cenizas volantes,” *Mater. Construcción*, vol. 34, no. 193, pp. 3–17, 2012, doi: 10.3989/mc.1984.v34.i193.956.
- [51] A. M. Kaja, A. Lazaro, and Q. L. Yu, “Effects of Portland cement on activation mechanism of class F fly ash geopolymer cured under ambient conditions,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 189, pp. 1113–1123, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.065.
- [52] C. A. Pacheco Bustos, L. G. Fuentes Pumarejo, É. H. Sánchez Cotte, and H. A. Rondón Quintana, “Residuos de construcción y demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de barranquilla desde su modelo de gestión,” *Ing. y Desarro.*, vol. 35, no. 2, pp. 533–555, 2017, [Online]. Available: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=124714208&lang=es&site=ehost-live>
- [53] Y. F. Cao, Z. Tao, Z. Pan, and R. Wuhrer, “Effect of calcium aluminate cement on geopolymer concrete cured at ambient temperature,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 191, pp. 242–252, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.204.
- [54] L. Reig, L. Soriano, M. V. Borrachero, J. Monzó, and J. Payá, “Influence of calcium aluminate cement (CAC) on alkaline activation of red clay brick waste (RCBW),” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 65, pp. 177–185, 2016, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.10.021.
- [55] J. M. Moreno-Maroto *et al.*, “Alkaline activation of high-crystalline low-Al₂O₃ Construction and Demolition Wastes to obtain geopolymers,” *J. Clean. Prod.*, vol. 330, p. 129770, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129770.
- [56] L. M. Chica-Osorio and J. M. Beltrán-Montoya, “Demolition and construction waste characterization for potential reuse identification,” *DYNA*, vol. 85, no. 206, pp. 338–347, 2018, doi: 10.15446/dyna.v85n206.68824.
- [57] “Técnicas de Recolección de Información.” <http://metodelainv.blogspot.es/> (accessed Jul. 05, 2017).
- [58] J. Su, J. yao Ye, Z. Fang, and M. hua Zhao, “Size effect on cubic and prismatic compressive strength of cement paste,” *J. Cent. South Univ.*, vol. 22, no. 10, pp. 4090–4096, 2015, doi: 10.1007/s11771-015-2954-3.
- [59] M. Vafaei and A. Allahverdi, “Durability of Geopolymer Mortar Based on Waste-Glass Powder and Calcium Aluminate Cement in Acid Solutions,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 29,

- no. 10, Oct. 2017, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002053.
- [60] J. Fořt *et al.*, “Application of waste brick powder in alkali activated aluminosilicates: Functional and environmental aspects,” *J. Clean. Prod.*, vol. 194, pp. 714–725, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.181.
- [61] K. Komnitsas, “Co-valorization of marine sediments and construction and demolition wastes through alkali activation,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 4, no. 4, pp. 4661–4669, 2016, doi: 10.1016/j.jece.2016.11.003.
- [62] M. Bassani, L. Tefa, B. Coppola, and P. Palmero, “Alkali-activation of aggregate fines from construction and demolition waste: Valorisation in view of road pavement subbase applications,” *J. Clean. Prod.*, vol. 234, no. 2019, pp. 71–84, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.06.207.
- [63] D. Panias, I. P. Giannopoulou, and T. Perraki, “Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 301, no. 1–3, pp. 246–254, 2007, doi: 10.1016/j.colsurfa.2006.12.064.
- [64] M. Criado, A. Fernández-Jiménez, and A. Palomo, “Alkali activation of fly ash. Part III: Effect of curing conditions on reaction and its graphical description,” *Fuel*, vol. 89, no. 11, pp. 3185–3192, 2010, doi: 10.1016/j.fuel.2010.03.051.
- [65] G. Kovalchuk, A. Fernández-Jiménez, and A. Palomo, “Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development - Part II,” *Fuel*, vol. 86, no. 3, pp. 315–322, 2007, doi: 10.1016/j.fuel.2006.07.010.
- [66] E. Gomaa, S. Sargon, C. Kashosi, and M. ElGawady, “Fresh properties and compressive strength of high calcium alkali activated fly ash mortar,” *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 29, no. 4, pp. 356–364, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.JKSUES.2017.06.001.
- [67] F. Kazemian, H. Rooholamini, and A. Hassani, “Mechanical and fracture properties of concrete containing treated and untreated recycled concrete aggregates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 209, pp. 690–700, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.03.179.
- [68] M. F. Zawrah, R. A. Gado, N. Feltin, S. Ducourtieux, and L. Devoille, “Recycling and utilization assessment of waste fired clay bricks (Grog) with granulated blast-furnace slag for geopolymer production,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 103, pp. 237–251, 2016, doi: 10.1016/j.psep.2016.08.001.
- [69] E. Asensio, C. Medina, M. Frías, and M. I. Sánchez de Rojas, “Fired clay-based construction

- and demolition waste as pozzolanic addition in cements. Design of new eco-efficient cements,” *J. Clean. Prod.*, vol. 265, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121610.
- [70] P. Mikhailenko, F. Cassagnabère, A. Emam, and M. Lachemi, “Influence of physico-chemical characteristics on the carbonation of cement paste at high replacement rates of metakaolin,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 158, pp. 164–172, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.021.
- [71] E. Asensio, C. Medina, M. Frías, and M. I. S. de Rojas, “Characterization of Ceramic-Based Construction and Demolition Waste: Use as Pozzolan in Cements,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 99, no. 12, pp. 4121–4127, 2016, doi: 10.1111/jace.14437.
- [72] E. Sassoni, P. Pahlavan, E. Franzoni, and M. C. Bignozzi, “Valorization of brick waste by alkali-activation: A study on the possible use for masonry repointing,” *Ceram. Int.*, vol. 42, no. 13, pp. 14685–14694, 2016, doi: 10.1016/j.ceramint.2016.06.093.
- [73] Z. Sun *et al.*, “Synthesis and thermal behavior of geopolymer-type material from waste ceramic,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 49, pp. 281–287, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.063.
- [74] K. Komnitsas, D. Zaharaki, A. Vlachou, G. Bartzas, and M. Galetakis, “Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers,” *Adv. Powder Technol.*, vol. 26, no. 2, pp. 368–376, 2015, doi: 10.1016/j.apt.2014.11.012.
- [75] M. Giraldo and J. Tobon, “Evolución Mineralógica Del Cemento Portland Durante El Proceso De Hidratación Mineralogical Evolution of Portland Cement During Hydration Process,” *Año*, vol. 73, no. January 2006, pp. 69–81, 2006.
- [76] Y. Zhao, J. Gao, C. Liu, X. Chen, and Z. Xu, “The particle-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement,” *J. Clean. Prod.*, vol. 242, p. 118521, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118521.
- [77] A. Fernández-Jiménez and F. Puertas, “alkali-activated slag cements: Kinetic studies,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 27, no. 3, pp. 359–368, 1997, doi: 10.1016/S0008-8846(97)00040-9.
- [78] I. Martínez, M. Etxeberria, E. Pavón, and N. Díaz, “A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 49, pp. 384–392, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.049.
- [79] J. Wang, T. Zhang, X. Zhao, Q. Ma, and S. Xu, “Study on the lightweight hydraulic mortars designed by the use of diatomite as partial replacement of natural hydraulic lime and

- masonry waste as aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 33–40, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.062.
- [80] S. Puligilla and P. Mondal, “Role of slag in microstructural development and hardening of fly ash-slag geopolymer,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 43, no. 1, pp. 70–80, 2013, doi: 10.1016/j.cemconres.2012.10.004.
- [81] C. A. Rosas, S. P. Arredondo-Rea, R. Corral Higuera, and J. Almaral, “Estudio Físico , Químico y Microestructural De Geopolímeros Base Ceniza Volante Estudio Físico , Químico y Microestructural De Geopolímeros Base Ceniza Volante,” *Conf. Pap.*, vol. 1, no. 1, 2015.
- [82] L. Reig, M. M. Tashima, M. V. Borrachero, J. Monzó, C. R. Cheeseman, and J. Payá, “Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 43, pp. 98–106, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.031.
- [83] J. He, Y. Jie, J. Zhang, Y. Yu, and G. Zhang, “Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 37, no. 1, pp. 108–118, 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.11.010.
- [84] V. Sata, A. Sathonsaowaphak, and P. Chindaprasirt, “Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 5, pp. 700–708, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.01.010.
- [85] K. Komnitsas, D. Zaharaki, A. Vlachou, G. Bartzas, and M. Galetakis, “Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers,” *Adv. Powder Technol.*, vol. 26, no. 2, pp. 368–376, 2015, doi: 10.1016/j.apt.2014.11.012.
- [86] L. Guzmán aponte, “Comportamiento mecanico de un geopolímero basado en metacaolín y adicionado con particulas de TiO₂,” *Rev. Colomb. Mater.*, no. 13, pp. 1–8, 2019.
- [87] J. C. Patiño, “Ensayos de calidad del cemento,” 2022. <https://360enconcreto.com/blog/detalle/ensayos-calidad-cemento/>
- [88] K. Oviedo-Sánchez and R. Mejía de Gutiérrez, “Mortero geopolimérico para uso potencial como recubrimiento en concreto,” *Rev. EIA*, vol. 16, no. 31, pp. 159–170, Jan. 2019, doi: 10.24050/reia.v16i31.1243.
- [89] J. Zheng, Y. Zhu, and Z. Zhao, “Utilization of limestone powder and water-reducing admixture in cemented paste backfill of coarse copper mine tailings,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 124, pp. 31–36, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.055.

- [90] T. Yilmaz, B. Ercikdi, and H. Deveci, "Utilisation of construction and demolition waste as cemented paste backfill material for underground mine openings," *J. Environ. Manage.*, vol. 222, no. March, pp. 250–259, 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.05.075.
- [91] P. Duan, C. Yan, W. Luo, and W. Zhou, "Effects of adding nano-TiO₂ on compressive strength, drying shrinkage, carbonation and microstructure of fluidized bed fly ash based geopolymer paste," *Constr. Build. Mater.*, vol. 106, pp. 115–125, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.12.095.
- [92] P. Duxson, J. L. Provis, G. C. Lukey, S. W. Mallicoat, W. M. Kriven, and J. S. J. Van Deventer, "Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 269, no. 1–3, pp. 47–58, 2005, doi: 10.1016/j.colsurfa.2005.06.060.
- [93] A. Allahverdi and E. Najafi Kani, "Construction wastes as raw materials for geopolymer binders," *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 7, no. 3, pp. 154–160, 2009.
- [94] ICONTEC, "Norma tecnica colombiana NTC 4017." 2005.
- [95] L. A. Pereira-De-Oliveira, J. P. Castro-Gomes, and P. M. S. Santos, "The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components," *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 197–203, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.110.
- [96] K. Corredor, A. Guzmán, and N. Torres, "Factibilidad en la fabricación de ladrillos no estructurales, a partir del reciclaje de las colillas de cigarrillo," *Rev. Ing. construcción*, vol. 35, no. 3, pp. 232–245, 2020, doi: 10.4067/s0718-50732020000300232.
- [97] K. Rodríguez espejel, "Panel composito con metacaolin para la sustitucion de maderas naturales en el diseño de acabados interiores y mobiliario," CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN ELECTROQUÍMICA, S.C, 2013.
- [98] M. T. Marvila, A. R. G. de Azevedo, L. B. de Oliveira, G. de Castro Xavier, and C. M. F. Vieira, "Mechanical, physical and durability properties of activated alkali cement based on blast furnace slag as a function of %Na₂O," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, no. October, p. e00723, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00723.
- [99] F. Puertas, M. Palacios, H. Manzano, J. S. Dolado, A. Rico, and J. Rodríguez, "A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 31, no. 12, pp. 2043–2056, 2011, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2011.04.036.

-
- [100] A. Vásquez, V. Cárdenas, R. A. Robayo, and R. M. De Gutiérrez, “Geopolymer based on concrete demolition waste,” *Artic. Press*, p. 7, 2016, doi: 10.1016/j.apr.2016.03.029.
- [101] Y. Gao, J. Xu, X. Luo, J. Zhu, and L. Nie, “Experiment research on mix design and early mechanical performance of alkali-activated slag using response surface methodology (RSM),” *Ceram. Int.*, vol. 42, no. 10, pp. 11666–11673, 2016, doi: 10.1016/j.ceramint.2016.04.076.
- [102] D. Montgomery, “Diseño y análisis de experimentos,” *Limusa Wiley*. pp. 21–692, 2004.
- [103] R. A. Robayo, A. Mulford, J. Munera, and R. Mejía de Gutiérrez, “Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 128, pp. 163–169, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.023.
- [104] H. Li, L. Dong, Z. Jiang, X. Yang, and Z. Yang, “Study on utilization of red brick waste powder in the production of cement-based red decorative plaster for walls,” *J. Clean. Prod.*, vol. 133, pp. 1017–1026, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.05.149.
- [105] Z. Sun and A. Vollpracht, “Isothermal calorimetry and in-situ XRD study of the NaOH activated fly ash, metakaolin and slag,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 103, no. March, pp. 110–122, 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.10.004.
- [106] A. Tironi, F. Cravero, A. N. Scian, and E. F. Irassar, “Pozzolanic activity of calcined halloysite-rich kaolinitic clays,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 147, no. March, pp. 11–18, 2017, doi: 10.1016/j.clay.2017.07.018.
- [107] G. S. Soto and L. P. Sánchez, “Estudio Comparativo de la Resistencia a la Compresión, Absorción y Dimensionamiento del Ladrillo Rafón Producido en Quimistán, Chamelecón y Florida, Honduras,” *Innovare Rev. Cienc. y Tecnol.*, vol. 6, no. 1, pp. 97–116, 2017, doi: 10.5377/innovare.v6i1.4948.

XII. RECOMENDACIONES

Como recomendaciones futuras para esta investigación se tienen las siguientes:

Se recomienda continuar con los ensayos de pruebas químicas y físicas de los cementos híbridos evaluados en esta investigación para definir su comportamiento en el tiempo y delimitar su aplicación.

Se recomienda elaborar muestras vibro compactadas buscando eliminar al máximo las burbujas de aire atrapadas ajustando las probetas de ensayo a las normas colombianas de prefabricados.

Se recomienda realizar varios ensayos sobre las probetas como por ejemplo de durabilidad, resistencia al ataque de ácidos y sulfatos, ensayos de congelamiento y descongelamiento entre otros, de esta manera ubicar en un mayor rango de aplicaciones al cemento híbrido.

Por último, se sugiere investigar el efecto de la temperatura de curado en las probetas, debido a que este parámetro pudiese influenciar en el comportamiento mecánico de las muestras.