

**CONCRETO A PARTIR DE RESIDUOS DE DEMOLICIÓN ACTIVADOS
ALCALINAMENTE REFORZADOS CON CAUCHO PARA APLICACIONES EN
PAVIMENTOS RÍGIDOS**

NASLY VIVIANA RUIZ LOPEZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
ÁREA DE ÉNFASIS EN INGENIERÍA DE MATERIALES
2018

**CONCRETO A PARTIR DE RESIDUOS DE DEMOLICIÓN ACTIVADOS
ALCALINAMENTE REFORZADOS CON CAUCHO PARA APLICACIONES EN
PAVIMENTOS RÍGIDOS**

Ing. NASLY VIVIANA RUIZ LOPEZ

TESIS DE MAESTRÍA

DIRECTORA

RUBY MEJÍA DE GUTIÉRREZ, MSc., Ph.D.



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
ÁREA DE ÉNFASIS EN INGENIERÍA DE MATERIALES
2018

RUBY MEJÍA DE GUTIERREZ, MSc., Ph.D.
Directora del trabajo de investigación

Jurado 1

Jurado 2

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, le doy gracias a Dios por llenarme de la fuerza y perseverancia necesarias para enfrentar cada uno de los retos que se presentaron a lo largo de del desarrollo del presente trabajo de grado.

A la profesora Ruby Mejía de Gutiérrez, por sus sin número de consejos, sugerencias y acompañamiento durante la mi formación académica y por brindarme su apoyo cuando lo he necesitado, sin importar la situación. También por permitirme continuar siendo parte del Grupo de Materiales compuestos, brindándome su confianza.

A los laboratoristas Constanza Gutiérrez, Carmen Guerrero, Irvin Castro, July Manquillo, Carolina Perea, quienes colaboraron en la obtención de resultados, facilitando el uso de los diversos equipos e implementos, así como su motivación personal en momentos difíciles. A los integrantes del grupo de materiales compuestos, como Rafael Robayo, William Valencia, Yimmy Silva, John Torres, Johanna Mejía, Jhonathan Rivera y Juan David Pardo por sus diversos consejos y ayudas a lo largo del proyecto.

A mi familia por ser mi principal apoyo, por su amor incondicional, recursos, consejos y fuerza para seguir adelante, especialmente a mis padres Gilberto Gustavo Ruíz y Luz Marina López, que me han moldeado y guiado hasta ahora y que son la luz de mi vida, a mi tía Elizabeth Arturo Leyva por apoyarme en cada uno de mis momentos.

A la familia García por acogerme como si fuera una integrante más, a Juan Pablo García por ser mi motor en esta etapa y por asumir este trabajo de grado como si fuera de él, por su amor, su tiempo, su apoyo y cada uno de los momentos en los que me comparte de su luz.

Finalmente, a nuestros amigos y compañeros de carrera y de corazón: Luis Guzman, Kathe Oviedo, Jhon Ocampo, Robin Lopez, Venus Cardenas, Maria Clara.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES.	13
2.1 Conceptualización: Cementos activados alcalinamente y geopolímeros.	13
2.2 Residuos de construcción y demolición (CDW) en concretos de OPC.....	15
2.3 Concretos activados alcalinamente (CAA) y geopolímeros a partir de CDW....	17
2.4 Sustitución parcial de agregados finos por caucho molido en concretos de OPC.....	21
2.5 Sustitución parcial de agregados finos por caucho molido en concretos activados alcalinamente y geopoliméricos.....	24
3. OBJETIVOS	27
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	27
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	27
4. OBTENCION DE PASTAS, MORTEROS Y CONCRETOS HIBRIDOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE A PARTIR DE RESIDUOS DE DEMOLICION. 28	
4.1 INTRODUCCIÓN.....	28
4.2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	30
4.2.1 Materiales.....	30
4.2.2 Adecuación materia prima.....	30
4.2.4 Técnicas de caracterización.....	34
4.2.5 Caracterización físico-mecánica.....	35
4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
4.3.1 Caracterización de materia prima.....	36
4.3.2 Caracterización físico-mecánica.....	38
4.3.2.1 Caracterización de CDW y agregados.....	38
4.3.2.2 Proporción de precursores y adición de OPC al sistema de activación alcalina.....	40
4.3.2.3 Producción de pastas activadas alcalinamente.....	42
4.3.2.4 Producción de morteros activados alcalinamente.....	44
4.3.2.5 Producción de concretos activados alcalinamente.....	45
4.3.2.6 Tiempo de fraguado	47
4.3.2.7 Asentamiento	48

4.3.2.8 Densidad, absorción y porosidad.....	49
4.3.3 Caracterización macro y microestructural de los CAA.....	50
4.4 CONCLUSIONES.....	53
5. SUSTITUCIÓN DE 0, 5, 10 Y 15% DE AGREGADO FINO POR CAUCHO RECICLADO Y PRODUCCIÓN DE CONCRETOS PARA PAVIMENTOS.....	54
5.1 INTRODUCCIÓN.....	54
5.2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	55
5.2.1 Materiales.....	55
5.2.2 Obtención de muestras.....	55
5.2.3 Técnicas de caracterización.....	57
5.2.4 Caracterización mecánica.....	57
5.2.5 Caracterización física.....	58
5.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59
5.3.1 Caracterización mecánica.....	59
5.3.1.1 Resistencia a compresión.....	59
5.3.1.2 Resistencia a la flexión.....	60
5.3.2.3 Ensayo resistencia a la abrasión.....	62
5.3.1 Caracterización macro y microestructural del CAA con inclusión de caucho.....	64
5.3.3 Caracterización física.....	66
5.3.3.1 Asentamiento.....	66
5.3.3.2 Densidad, absorción y porosidad.....	67
5.3.3.3 Permeabilidad.....	68
5.4 CAMPO POTENCIAL DE APLICACIÓN.....	69
5.5 CONCLUSIONES.....	71
6. CONCLUSIONES GENERALES.....	73
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	74

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diseño de mezclas para la proporción de precursores.	31
Tabla 2. Variación de las relaciones Si/Al y Na/Si de cada sistema.	32
Tabla 3. Composición química residuos de construcción y demolición CDW.	37
Tabla 4. Caracterización de agregados naturales y reciclados.	38
Tabla 5. Gradación granulométrica de agregados naturales y reciclados.	39
Tabla 6. <i>Composición de elementos medidos por EDS de la Figura 18 (Izq).</i>	52
Tabla 7. Composición de elementos medidos por EDS de la Figura 18 (Der).	52
Tabla 8. Longitud de huella resultante del desgaste por abrasión exhibida por concretos activados alcalinamente y una muestra comercial de adoquín vehicular.	62
Tabla 9. Composición de elementos medidos por EDS de la Figura 27 (b).	65
Tabla 10. Composición de elementos medidos por EDS de la Figura 27 (c).	65
Tabla 11. Asentamiento arrojado en concretos con inclusión de caucho particulado (Gcp) y tipo fibra (Gcf).	66
Tabla 12. Criterios de diseño para la mezcla de concreto en pavimentos de concreto hidráulico, INVIAS 2012.	70
Tabla 13. Especificaciones técnicas de concretos para pavimentos comerciales.	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama ternario $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$, composición de los residuos urbanos (Modificada, Bernal, S. et al. 2016)	19
Figura 2. Relación de reducción de la resistencia a compresión respecto al contenido de CR (Modificada, Yahya et al. 2018).	26
Figura 3. (a) Trituradora de mandíbulas, (b) Molino de discos y (c) Molino de bolas cerámicas.	30
Figura 4. Equipos usado para la mezcla de pastas y morteros (a) HOBART Vulcan 1249, y de CAA (b) Mezcladora Planetaria CreteAngle.	33
Figura 5. <i>Proceso de obtención de concretos activados alcalinamente.</i>	34
Figura 6. Granulómetro laser Mastersizer 2000.	34
Figura 7. Microscopio electrónico de barrido, JEOL JSM-6490 LV.	35
Figura 8. Estereoscopio Nikon SMZ1000.	35
Figura 9. Máquina universal de ensayos Instron 3369.	36
Figura 10. Distribución de tamaño de partícula (a) Concreto, (b) Ladrillo y (c) Cerámica.	37
Figura 11. Tipos de arena utilizadas, arena natural (Izq.) y arena reciclada (Der.)	38
Figura 12. Combinación granulométrica agregados utilizados para la producción de concretos activados alcalinamente.	40
Figura 13. Resistencia a la compresión a 7 y 28 días, pastas activadas alcalinamente con 0, 5 y 10% de OPC.	40
Figura 14. Gráficos de contorno para la variable de respuesta resistencia a la compresión a 28 días, (a) Proporción 40/40/20, (b) Proporción 60/20/20, con la adición del 10% de OPC en cada sistema.	42
Figura 15. Resistencia a la compresión a 7 y 28 días, (a) Proporción 40/40/20, (b) Proporción 60/20/20.	43
Figura 16. Resistencia a la compresión de morteros a 7 y 28 días.	44
Figura 17. <i>Resistencia a compresión mezclas óptimas para la producción de concreto con arena reciclada.</i>	46
Figura 18. Tiempo de fraguado de las proporciones 40/40/20 y 60/20/20.	48
Figura 19. Slump obtenido para la mezcla 60/20/20 (500 Kg).	49
Figura 20. a) Densidad, b) absorción de agua y porosidad de los sistemas 40/40/20 y 60/20/20.	50
Figura 21. <i>Micrografías MEB de concreto a partir de CDW en proporciones 60/20/20 a edades de 7 (Izq.) y 28 (Der) días a 50x, 2500x y 5000x aumentos.</i>	52
Figura 22. Imágenes de interfase a) matriz-agregado grueso y b) matriz-agregado fino, obtenidas mediante estereoscopio.	53
Figura 23. Morfología de caucho para el reemplazo parcial de agregado fino en la producción de concretos, tipo particulado (a) y tipo fibra (b).	56
Figura 24. Montaje ensayo de desgaste abrasión NTC 5147.	57
Figura 25. Montaje en ensayo de permeabilidad de agua en cilindros de concretos con y sin adición de caucho molido	58

Figura 26. Resistencia a la compresión de concretos activados alcalinamente con adición de 0, 5, 10 y 15 % del caucho particulado y del tipo fibra.	60
Figura 27. Resistencia a flexión de concretos activados alcalinamente con adición de 0, 5, 10 y 15 % de caucho particulado y tipo fibra.	61
Figura 28. Huella resultante del ensayo de resistencia a la abrasión de concreto a) Referencia, b) 5% de caucho particulado, c) 5% de caucho tipo fibra y d) adoquín comercial prefabricado para pavimento.	63
Figura 29. Micrografías MEB concretos activados alcalinamente con inclusión de 5% de caucho (a y b) particulado y (c y d) tipo fibra.	64
Figura 28. Imágenes de interfase matriz-agregado obtenida mediante estereoscopio a) Referencia, b) 5% de caucho particulado y c) 5% de caucho tipo fibra.	66
Figura 31. Slump obtenido en concretos con inclusión del 5% de caucho a) Particulado y b) Tipo Fibra.	67
Figura 32. a) Densidad, b) Absorción y porosidad. Obtenidos en muestras con y sin sustitución del 5% de agregados finos por caucho particulado y tipo fibra.	68
Figura 33. Permeabilidad de gramos de H ₂ O por minuto para concretos activados alcalinamente, adicionados con caucho y un concreto de OPC.	69

RESUMEN

El desarrollo de este trabajo investigativo se orientó a la obtención de un concreto activado alcalinamente a partir de residuos de construcción y demolición (CDW) con inclusión de caucho, con propiedades mecánicas y físicas aptas para aplicaciones en carreteras y pavimentos. La síntesis del material se realizó desde el diseño de mezclas con la dosificación de los residuos en la pasta para definir la cantidad de cementante por m^3 de concreto que generara la mayor resistencia mecánica posible. En el proceso se produjeron morteros con arena natural (AN) y con arena reciclada (AR) con el fin de evaluar la influencia del tipo de agregado fino utilizado, encontrando que el uso de AR resultante de procesos de molienda de CDW genera mayor adherencia del agregado en la matriz otorgando diferentes patrones de anclaje que mejoran las propiedades del concreto final. Como resultado se lograron resistencias a compresión a 90 días de 47,18 MPa y un asentamiento de 87,5 mm para el concreto producido con un cementante de proporción de 60, 20 y 20% en peso para residuos de concreto, ladrillo y cerámica respectivamente, adición de 10% en peso de OPC, relación Si/Al de 6,8, relación L/S de 0,40, 500 Kg de cementante/ m^3 , AR como agregado fino, grava natural con TMN de 1".

La inclusión de caucho se realizó como reemplazo del 0, 5, 10 y 15% en peso de agregado fino, se evaluó el efecto de la morfología del caucho, particulado y tipo fibra, en las propiedades de la mezcla de concreto de proporciones óptimas obtenido previamente. Los resultados muestran una disminución de la resistencia a compresión y a flexión proporcional al incremento del contenido de caucho, se evidencia el decrecimiento de hasta un 42,30 y 48,91% a una edad de 90 días para los dos tipos de caucho; de acuerdo a los resultados se selecciona el 5% de la sustitución como el valor ideal para la mínima pérdida de propiedades mecánicas y conservación de propiedades de asentamiento, densidad, absorción, porosidad y permeabilidad para su adaptación en la producción de pavimentos. Mediante MEB se pudo atribuir los resultados a la generación de cavidades en la interfase matriz-caucho que producen una baja adhesión de las partículas en el cementante, limitando la transferencia de carga y conformando cavidades interconectadas que permean fácilmente el agua.

Los resultados hallados en este trabajo de maestría demuestran el campo potencial de aplicación de concretos producidos a partir de desechos del sector de la construcción en la obtención de concretos para pavimentos rígidos, ya que las propiedades mecánicas inherentes de concretos activados alcalinamente y la mejora de propiedades físicas con la inclusión de caucho en cualquiera de sus morfologías, en especial la tipo fibra, permite equiparar este concreto con los producidos comercialmente, cumpliendo todas las especificaciones técnicas establecidas en el capítulo 5 de INVIAS 2012.

1. INTRODUCCIÓN.

El uso desmedido de recursos naturales en procesos industriales y los problemas de disposición de residuos y subproductos que ello acarrea, así como la liberación de gases de combustión que deterioran progresivamente la capa de ozono son el resultado de índices de desarrollo insostenibles por el medio ambiente. La obtención de materiales ambientalmente amigables que permitan construir y mejorar la infraestructura civil ha despertado el interés de investigadores y profesionales del sector de la construcción en lograr estructuras eco sostenibles, eficientes energéticamente, con baja huella de carbono y de propiedades mecánicas, físicas y de durabilidad superiores a las alcanzadas convencionalmente.

La producción de concretos basados en cemento portland ordinario (OPC) se ha convertido durante las últimas décadas en la industria de mayor crecimiento a nivel mundial, con un incremento del 7% anual, lo que se traduce en el consumo de 2,8 toneladas de materia prima extraída por cada tonelada de cemento producido, ocasionando una mayor escasez en las reservas de caliza y fuentes de arcillas silicoaluminosas (Aliabdo, A. et al. 2016). Por otro lado, autores como Singh & Singh (2016) estiman que la cantidad de residuos sólidos generados por actividades de construcción y demolición (CDW) se incrementaran de 12,7 billones de ton³ a 27 billones de ton³ para el año 2050. En países de la Unión Europea, donde el 30% de los residuos sólidos existentes se atribuyen a este tipo de actividades, se han establecido normativas que regulan el manejo y depósito de estos residuos, teniendo en cuenta su alto potencial para reducir el uso de recursos primarios y espacios de relleno, una de las alternativas de mayor uso es la incorporación de CDW en la producción de concretos como agregados reciclados finos y gruesos, sin embargo en los últimos años se han realizado varias investigaciones que soportan la posibilidad de producir aglutinantes alternativos activando alcalinamente este tipo de residuos, con el fin de aprovechar su estructura rica en sílice y alúmina que finalmente permite producir materiales denominados concretos activados alcalinamente (CAA).

El cementante utilizado en la producción de CAA, corresponde a un cemento activado alcalinamente, el cual se sintetiza a partir de una reacción entre una solución altamente alcalina y fuentes ricas en aluminosilicatos con estructuras total o parcialmente amorfas, como producto final se tiene un material aglutinante alternativo viable, de bajo costo y densidad, elevada resistencia a compresión, baja fluencia, resistencia química superior y mínima contracción respecto a concretos de OPC (Park, Y. et al. 2016), si bien el rango de materiales de partida que se pueden utilizar en la activación alcalina abarca desde cenizas volantes y escorias de alto horno hasta residuos de construcción como concreto, ladrillo, vidrio y cerámicos en

general (CDW) (Kostas, K. et al. 2015), estudios recientes afirman que la producción de concretos activados alcalinamente permiten incorporar otros subproductos en su estructura para mejorar propiedades en el material, tales como partículas de caucho molido.

En este proyecto de grado se diseñó un concreto activado alcalinamente a partir de residuos de demolición y construcción, evaluando la inclusión de caucho molido de llanta reciclada con diferentes morfologías, caucho particulado y tipo fibras, para obtener un material con propiedades mecánicas y físicas aptas para su aplicación en pavimentos y carreteras, con el fin de desarrollar un concreto que integre diferentes tipos de residuos que actualmente no tienen uso industrial a gran escala.

El presente documento contiene los resultados del trabajo de investigación dividido en 5 capítulos. En el primero se define el planteamiento del problema y la pertinencia del estudio, en el segundo se definen los conceptos teóricos fundamentales para llevar a cabo el trabajo de investigación y se presentan estudios relacionados con el tema abordado denominado como estado del arte; en el tercero se definen el objetivo general del estudio y los específicos que permiten desarrollarlo; el cuarto y quinto capítulo corresponden al desarrollo experimental y el análisis de los resultados obtenidos, el cuarto capítulo es referente a la síntesis del material desde la pasta activada alcalinamente hasta la producción del concreto óptimo, así como sus respectivas caracterizaciones físicas y mecánicas, el quinto referente a la inclusión de caucho molido en distintas proporciones y su influencia en la modificación de propiedades para ser utilizado como un concreto para pavimentos rígidos contrastando los resultados obtenidos con los exhibidos por concretos comerciales para dichas aplicaciones. Finalmente, en el sexto y séptimo capítulo se muestran las conclusiones generales del estudio y las referencias bibliográficas consultadas y empleadas para llevar a cabo esta investigación, respectivamente.

Vale la pena resaltar que este trabajo de investigación de maestría se enmarcó dentro del proyecto de investigación “Construcción de prototipo a escala de vivienda rural utilizando materiales innovadores de baja huella de carbono” financiado por COLCIENCIAS y dirigido por la profesora Ruby Mejía de Gutiérrez.

2. ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES.

2.1 Conceptualización: Cementos activados alcalinamente y geopolímeros.

El concreto portland es el segundo material más empleado en el mundo después del agua, con un consumo promedio de 1,4 m³ por persona anualmente, es decir aproximadamente 26 mil millones de toneladas de utilización por año; su material de partida, el cemento ordinario portland (OPC) requiere un consumo excesivo de recursos naturales y un elevado uso de energía generando gases de combustión que son liberados a la atmosfera, contribuyendo con el 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero (Miller et al., 2015). Se estima que para el año 2020 las emisiones de CO₂ debido a la producción de OPC aumentarán hasta en un 50% de los niveles actuales.

El reemplazo parcial o total del OPC en los concretos mediante el uso de cementantes suplementarios nace como la alternativa a la escasez de piedra caliza y otros precursores necesarios para su producción, surgen así los cementos adicionados, generalmente con porcentajes relativamente bajos de reemplazo, así como los denominados cementos activados alcalinamente y geopolímeros que permiten un mayor reemplazo del cementante, alcanzando sustituciones hasta del 100%.

En general, estos nuevos cementos consisten en la reacción de un precursor rico en especies de aluminosilicatos que se activan químicamente con una solución altamente alcalina, formando redes de moléculas de tipo inorgánico unidas por enlaces covalentes; su formación implica la ruptura de los enlaces Si-O-Si, Al-O-Al y Al-O-Si presentes en el precursor, como resultado del estímulo que ejercen los iones alcalinos (-OH) provenientes de la solución activante; cuando el grado de hidroxilación del silicio o el aluminio aumenta, se forman compuestos intermedios inestables que se descomponen y dan lugar a aniones tipo [SiO₄]⁻ o [AlO₄]⁻ mediante reacciones de policondensación donde los cationes de metales alcalinos equilibran la carga eléctrica negativa, el mecanismo finaliza con la cristalización resultante de la precipitación de los productos de reacción, dando lugar a la formación de geles que definen las características microestructurales de los cementantes.

El esquema de formación del producto final se clasifica con base en la composición de los productos de hidratación, para un geopolímero corresponde a un gel de aluminosilicatos de sodio o potasio hidratados (R-A-S-H, R=Na⁺,K⁺), mientras que en los cementos activados alcalinamente las reacciones se diferencian por la presencia de calcio en su estructura, es así como los productos principales son

aluminosilicatos de calcio hidratados (C-A-S-H) que presentan analogía a las fases aglutinantes típicas del OPC (Singh et al. 2015); es así que aunque muchas propiedades físicas y mecánicas exhibidas por estos dos tipos de nuevos cementos son similares, su microestructura y propiedades químicas varían en gran medida.

El uso de fuertes activadores alcalinos como hidróxido de potasio (KOH) e hidróxido de sodio (NaOH) tiene gran influencia directa sobre todas las etapas de activación de minerales tipo aluminosilicatos, especialmente en la etapa de endurecimiento, mientras que los silicatos solubles como el silicato de sodio (Na_2SiO_3) o potasio (K_2SiO_3) generan una mayor cinética de reacción, produciendo una estructura más compacta y de mayor estabilidad (Alonso & Palomo, 2001), un mayor contenido de estos silicatos puede reducir el ordenamiento de largo alcance aumentando el grado de amorficidad de la estructura, afectando las características del cementante final.

El diseño de concretos con el uso de cementantes activados alcalinamente implica la relación de múltiples criterios, entre los que se pueden considerar el tipo y la dosificación de los precursores y el activador, la relación líquido/sólido (L/S) y el asentamiento de la mezcla, así como el tiempo y la temperatura de curado; diversos autores reportan un sin número de estudios con los resultados obtenidos de la modificación de estos parámetros. Hardijo et al. 2005, produjeron CAA a partir de ceniza volante con una relación L/S de 0,18, logró asentamientos desde 100 hasta 250 mm con el incremento de la molaridad del activador NaOH (de 8 a 14M), la temperatura de curado se varió de 30 a 90°C y se alcanzaron resistencias en un rango de 40 a 90 MPa. Por su parte Olivia y Nikraz en el 2012 obtuvieron CAA a partir del mismo precursor con resistencias de 55 MPa a 28 días con un curado a temperaturas de 75°C, en este estudio se evidenció la reducción de aproximadamente el 15-29% en el módulo de elasticidad frente a concretos de OPC, mientras que la contracción por secado del CAA fue de 0,025%, valor que es inferior a los obtenidos en concretos convencionales que reportaron contracciones de 0,9% después de 12 semanas. Ding et al., 2016 afirmaron que concretos de escoria activados alcalinamente pueden alcanzar resistencias a la compresión a edades de 1 día de hasta 60 MPa, mientras que a edades de 1 año pueden superar valores de 100 MPa, las altas resistencias exhibidas se atribuyen principalmente a la rápida velocidad de las reacciones de hidratación. Al mezclar dos precursores tales como ceniza volante y escoria para dar lugar a los concretos conocidos como concretos binarios se observa el incremento de la resistencia a compresión de 15,5 a 23 MPa cuando el reemplazo de ceniza volante por escoria aumenta de 10 al 15%, lo cual se atribuye a la formación de fases tipo N-A-S-H y C-A-S-H en la matriz, y con ello la condensación de la microestructura, de manera general se observó que la temperatura de curado permite el desarrollo de mayores resistencias mecánicas.

Estos concretos alternativos proporcionan un rendimiento comparable a los basados en OPC en muchas aplicaciones, presentan un amplio rango de materias primas disponibles en cualquier localidad, un endurecimiento rápido, elevada resistencia mecánica, baja permeabilidad, resistencia al fuego, excelente durabilidad y resistencia química, permiten la inmovilización de contaminantes y presentan un menor porcentaje de energía consumida y de gases emitidos a la atmosfera frente a concretos convencionales.

2.2 Residuos de construcción y demolición (CDW) en concretos de OPC.

Las actividades de construcción, demolición y recuperación de infraestructura se han convertido en el sector de mayor impacto en la economía de los países, en especial de aquellos en desarrollo. Según Dalhbo, H. 2015, este tipo de actividades generan un gran volumen de residuos resultante de diferentes procesos, tales como los constructivos (16%), de demolición (57%) y de renovación (27%). China es considerado el mayor productor de residuos de construcción y demolición, generando en promedio 1,8 billones de toneladas en el transcurso del año 2017, países como España generan alrededor de 2 Kg de este tipo de residuo por habitante/día (Wu, Z. et al. 2014). En Estados Unidos y la Unión Europea se estima que estos residuos son aproximadamente 143 y 700 millones de toneladas por año respectivamente, mientras que, en Colombia, una ciudad como Bogotá alcanza fácilmente 12 millones de toneladas anuales (Robayo, R. et al. 2016); sin embargo en la mayoría de países solo existen procesos y tecnología para reutilizar como máximo el 30% de estos residuos. Por otro lado, autores como Bravo, M. et al. 2015 identificaron que el 85% de los CDW utilizados en su investigación se componen de residuos de ladrillo, concreto, cerámica y vidrio, el porcentaje restante está compuesto por metales, madera y tierras orgánicas.

Una de las aplicaciones que ha sido ampliamente estudiada durante los últimos 50 años es la producción de agregados a partir de CDW (RCA) como respuesta a la escasez y deterioro de recursos naturales, así como la gran cantidad de emisiones de CO₂ que implica la extracción de agregados, no obstante factores como una escasa normativa de la calidad de estos agregados y una limitada experiencia y tecnología disponible para el tratamiento de adecuación de los desechos, así como la falta de regulación ambiental y técnica de sitios de disposición final de CDW han impedido su uso a escala industrial. Sin embargo, entre todas las fuentes alternativas para los agregados, el reciclaje de CDW ha tenido amplia aceptación en algunos países gracias a su amplia disponibilidad y su contribución a la producción de concretos con menor huella ecológica. En general, la calidad de los agregados reciclados depende principalmente del concreto fuente, de la proporción en la que se sustituye el agregado natural, de la cantidad de pasta de cemento adherido a él y de otros factores similares (Kumar, R., 2017).

Autores como Pacheco, F. 2010, evaluaron la influencia de la inclusión de residuos de ladrillo, gres porcelánico y artículos sanitarios en la producción de concretos como precursor y como agregado, la primera etapa consistió en el reemplazo del 20% de pasta de cemento por polvo obtenido de cada uno de los residuos, encontrando la mínima disminución de resistencia mecánica cuando el reemplazo se realizó por polvo de ladrillo, mientras que para el gres porcelánico y los residuos sanitarios las pérdidas fueron similares y de mayor magnitud, sin embargo se mejoró notablemente la resistencia a la penetración de iones cloruro para todos los reemplazos. La segunda etapa consistió en el reemplazo de agregados naturales finos y gruesos por agregados reciclados provenientes de la mezcla de residuos cerámicos, los resultados evidenciaron una mejora significativa para ambos reemplazos de agregados, así como la reducción en la permeabilidad de oxígeno y agua, y en la difusión de iones cloruro, debido a la morfología obtenida en el cribado de residuos y la alta dureza que característica a los materiales cerámicos.

Lotfy, A. 2015, reemplazó el 10%, 20% y 30% en peso de agregados naturales finos y gruesos por RCA, con una gradación granular completa, se concluyó que la incorporación de RCA de gran área superficial contiene una mayor proporción de mortero adherido, lo que influye drásticamente en la resistencia a flexión, la contracción por secado, la absorción de agua y la penetración de cloruros, además se encontró que el incremento en la sustitución de agregados naturales por RCA es proporcional a la pérdida de propiedades mecánicas. Kumar en el 2017, determinó que la sustitución de agregado grueso natural con RCA disminuye la resistencia a compresión hasta en un 20%, lo que se atribuyó principalmente a la presencia de una elevada microporosidad y grietas en el mortero adherido a los RCA, así como la posible presencia de agregados blandos, tales como piezas de ladrillo.

En los procesos de cribado y trituración, para la obtención de agregados, se obtiene diferentes tamaños de partículas, estimando que un 20% de la adecuación de CDW presenta un tamaño inferior a 150 mm, siendo un tamaño superior al del cemento portland y las adiciones que se utilizan usualmente; por otro lado, algunas plantas de reciclaje dependiendo del tamaño pueden recuperar entre 5 y 80 toneladas por hora de limo de CDW (Lampris, et al., 2009), limitando su aplicación en concretos como resultado de las características que exhibe la fracción más fina de este limo, en especial cuando es proveniente de residuos de concreto, esto se atribuye a la presencia de cemento hidratado y parcialmente carbonatado con elevada porosidad, lo que aumenta el requerimiento de agua en la mezcla, afectando la trabajabilidad y propiedades mecánicas del material. Sánchez de Rojas et al. 2001, realizó estudios que permitieron plantear que aquellas pastas de cemento que contienen un 20% de residuos a base de arcilla exhiben mayor resistencia a la flexión respecto a las muestras con 100% de OPC, lo cual se atribuyó a la elasticidad

y ductilidad proporcionada por la adición cerámica.

Xiao, J. 2018, planteó la posibilidad de utilizar CDW provenientes de concreto y ladrillo, triturados previamente hasta alcanzar un tamaño de partícula de 45 μm , como reemplazo de OPC en proporciones de 0, 15, 30 y 45%, los resultados mostraron que la adición de CDW acelera la aparición de grietas y aumenta la cantidad de grietas formadas por unidad de área, esto atribuido a la alta relación líquido/sólido que se debe mantener, también se estableció un comportamiento binomial en este tipo de mezclas, debido a que el uso de reemplazos de hasta 30% evidencian la pérdida de propiedades mecánicas, mientras que porcentajes superiores disminuyen su efecto negativo en la resistencia a compresión y aportan resistencia a flexión en el material, lo que se atribuye a la distribución granulométrica ajustada que presenta la inclusión de CDW y su posible efecto relleno en la estructura del concreto.

Dado que la mayoría de los residuos CDW son inertes, la industria de la construcción ha adoptado procesos de inclusión de este tipo de residuos en aplicaciones como estabilización de suelos, pavimentos de carreteras, mejora del subsuelo, material de relleno para el paisajismo, como aglomerado artificial en la producción de concreto o materia prima para la producción de Clinker de cemento Portland. Estudios recientes han demostrado que la reutilización y valorización de los residuos CDW pueden reducir la huella de la industria en la mayoría de las categorías de impacto ambiental, principalmente a los relacionados con el calentamiento global (Bravo, M. et al. 2015).

Algunos CDW presentan fases amorfas de aluminosilicatos en su estructura generando un carácter puzolánico en el residuo, incrementando su carácter reactivo al contacto con otros compuestos formados durante la hidratación del cemento, como la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). A pesar de la formación de posibles productos de reacción, el grado de puzolanidad es significativamente bajo en comparación con otro tipo de adiciones como las arcillas calcinadas tales como el metacaolín, motivo por el cual su valor como precursor en la producción de concretos de OPC no es significativo, dando lugar a su utilización en cementantes alternativos donde se aprovecha su composición química y su amorficidad para la generación de nuevos aglutinantes.

2.3 Concretos activados alcalinamente (CAA) y geopolímeros a partir de CDW.

El uso de residuos CDW para la producción de concretos activados alcalinamente se ha convertido en un desafío, considerando la naturaleza variable de estos y la consecuente falta de consistencia en las propiedades químicas y físicas reportadas

en diferentes investigaciones, que varían de acuerdo a la fuente del residuo. En la adecuación de CDW para producir materiales cementantes, se evidencia un alto costo energético y financiero asociado con la reducción de estos desechos a un tamaño de partícula suficientemente fino para su uso como precursor en activación alcalina.

El alto contenido de aluminosilicatos característico en la mayoría de CDW, promueve su aplicación como una fuente precursora para la obtención de CAA, algunos autores como Sun et al. 2013, han encontrado que el residuo de ladrillo de arcilla presenta en su composición un contenido promedio de 49,9% de SiO_2 y 16,6% de Al_2O_3 , mientras que los residuos de cerámica presentan un 65,5% de SiO_2 y 21% de Al_2O_3 ; en la figura 1 se muestra el diagrama ternario de SiO_2 - Al_2O_3 - CaO con la distribución y composición de diferentes tipos de residuos, entre ellos los CDW (Bernal, S. et al., 2016). Autores como Reig et al. 2013 investigaron propiedades y microestructuras de materiales activados alcalinamente obtenidos a partir de residuo de ladrillo y gres porcelánico, los resultados reportaron resistencias hasta de 50 MPa a 65°C a una edad de 7 días, en el mismo año Reig et al., evaluaron la adición del 40% de cemento de aluminato de calcio en la misma matriz, alcanzando 94 MPa bajo condiciones de curado similares. Recientemente, Komnitsas et al. 2015 demostró el uso potencial de los residuos CDW como materia prima para la síntesis de cementantes activados logrando el desarrollo de altas resistencias mecánicas, siendo superiores a 40 MPa después de 7 días de curado, estos CDW provenían de residuos de cerámicas y ladrillos; Sun et al. 2013 produjo cementantes a partir de residuos de cerámica usando como activador alcalino una solución de KOH y K_2SiO_3 , con ello obtuvo un material de alta estabilidad térmica y resistencias aproximadamente de 75 MPa bajo temperaturas de 60°C a una edad de 28 días.

Por su parte Robayo, R. et al. 2016 obtuvieron cementantes a partir de residuos de ladrillos de arcilla roja (RCBW) y sistemas híbridos con la inclusión 5, 10, 15 y 20% en peso de OPC activados con una solución alcalina de NaOH y Na_2SiO_3 , en la muestra de control se evaluó el efecto de la concentración del activador y las relaciones molares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$; para asegurar la trabajabilidad de todas las mezclas se mantuvo una relación líquido/sólido (L/S) de 0,25; los tratamientos térmicos efectuados fueron a temperatura ambiente y a 70°C durante 24 horas. Los resultados evidencian el incremento de la resistencia a compresión a medida que aumenta el porcentaje de Na_2O en la solución activadora (8 y 10% Na_2O) para todos los tratamientos, la relación $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ igual a 0,12 y valores entre 6,60 y 7,10 para la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ permiten alcanzar resistencias máximas de 54,38 y 66,56 MPa a temperaturas de 25 y 70°C respectivamente, mientras que la adición de 20% OPC produjo resistencias de hasta 102,59 MPa a 28 días a temperatura ambiente,

resultados que se atribuyen a una mayor contribución de CaO proveniente del OPC en la coexistencia de geles C-S-H y N-A-S-H en la estructura del sistema híbrido, que produce una activación acelerada de los aluminosilicatos gracias al calor generado en el proceso de hidratación del cemento (Ahmari et al. 2012).

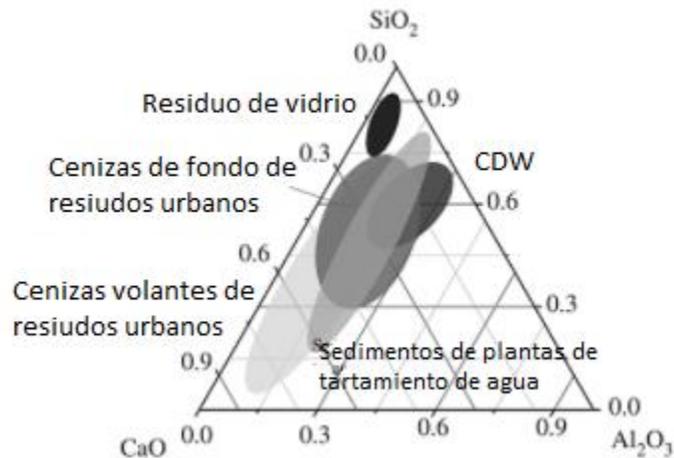


Figura 1. Diagrama ternario $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$, composición de los residuos urbanos. (Modificada, Bernal, S. et al. 2016)

De manera general, los residuos de concreto presentan un bajo contenido de SiO_2 y de Al_2O_3 disponibles en su estructura, los valores reportados mediante técnicas de caracterización corresponden a 5,81 y 1,49% respectivamente, no obstante, este tipo de residuo evidencia un elevado contenido de CaO que alcanza hasta el 65,2% de su composición (Komnitsas, K. et al., 2015), como resultado se obtiene una mínima formación de geles N-A-S-H y C-A-S-H, generando resistencias mecánicas bajas del orden de hasta 9,5 MPa a 28 días, algunas investigaciones concuerdan en que los tratamientos térmicos y la adición de fuentes alternativas de Al y Si fomentan la formación de redes tridimensionales de tipo tetraédrico.

Autores como Allahverdi y Kani en el 2009 produjeron cementos activados alcalinamente utilizando como precursor una mezcla de desechos de ladrillos y concreto, en proporciones de 40:60, 50:50, 60:40, 80:20 y 100:0 para sus dos componentes respectivamente, se concluyó que el residuo de ladrillo exhibe un mayor potencial para ser activado, con base en los resultados de resistencia a compresión obtenidos cuando la composición fue de 100% ladrillo, siendo de 40 MPa a 28 días de curado, mientras que para mezclas con igual porcentaje de ladrillo y concreto se logró el desarrollo de 18,5 MPa a la misma edad con un curado a temperatura ambiente.

Autores como Payá et al. 2012 activaron alcalinamente residuos de OPC provenientes de pastas de cemento hidratado usadas en pruebas aceleradas de

durabilidad, por lo cual fueron previamente carbonatadas como resultado de exposiciones intensas en ambientes de elevado contenido de CO_2 , para ello se activó el residuo con una solución de NaOH y Na_2SiO_3 , y se curaron a 65°C , los resultados arrojaron resistencias a compresión de 10 MPa a 3 días, lo que corroboró el uso potencial de la fracción remanente rica en cemento de los residuos de concreto, característica poco deseable cuando se usan los residuos como agregado, ya que genera alta demanda de agua en las mezclas de concreto.

Ahmari et al. 2012 produjeron un cemento activado con una mezcla de residuos de concreto y adición de ceniza volante en proporciones de 0, 25, 50, 75 y 100% en peso, encontrando que el uso de una solución alcalina de NaOH con molaridad 10M y Na_2SiO_3 , la resistencia a compresión de los productos fue al menos de 30 MPa, se estima que el incremento de la molaridad del activador genera aumento de resistencia, debido a que en concentraciones bajas la porosidad del mortero adherido consume el NaOH de la solución, haciéndolo insuficiente para la disolución de especies Si y Al en los precursores.

Zaharaki et al. (2016) encontraron que una mezcla de 25% de escoria, 30% de cerámica tipo azulejo, 30% de ladrillo rojo y 15% de residuo de concreto producidos mediante activación alcalina y curados a 80°C durante 24 horas, permite obtener un material con propiedades comparables a las obtenidas al activar 100% escoria, la investigación reportó resistencias de hasta 74 MPa a una edad de 28 días y una resistencia residual de 30 MPa a una temperatura de 800°C , lo que demostró la elevada estabilidad térmica de este tipo de compuestos, mientras que mezclas con un contenido de 50% de escoria, 10% cerámica, 10% ladrillo rojo y 30% de residuo de concreto permitió alcanzar una resistencia máxima de 59 MPa a 28 días cuando la concentración del activador NaOH es 10M.

Vásquez et al. 2016 evaluaron mezclas a 28 días con diferentes composiciones, 100% de residuos de concreto, sistemas híbridos con 10, 20 y 30% de OPC, y sistemas binarios con 10, 20 y 30% de Metacaolín (MK), a los cuales se le efectuaron dos tipos de tratamientos térmicos, uno correspondía al curado a temperatura ambiente y el otro a una temperatura de 70°C durante 24 horas. Se encontró que las mezclas producidas totalmente con residuos de concreto alcanzaron resistencias de 26 y 28 MPa con una relación Si/Al de 10,0 y 10,5, para 25 y 70°C respectivamente. Mientras que los sistemas híbridos arrojaron el mejor comportamiento cuando su sustitución por OPC fue de 30% logrando resistencias de 31 y 33 MPa para una relación Si/Al de 10,5 para cada uno de los tratamientos. Finalmente, en los sistemas binarios el óptimo se encontró cuando la sustitución de MK fue del 10%, las resistencias fueron del orden de 46 MPa para una relación Si/Al de 8,0 a temperatura ambiente y de 27 MPa con una relación de 7,5 a 70°C de curado.

En general, en concretos activados alcalinamente se evidencia el incremento de las resistencias mecánicas y la modificación de propiedades físicas respecto a los concretos de OPC, aunque la mayoría de estudios que usan CDW para la producción de concretos usan uno o máximo dos tipos de residuos para la síntesis, se puede atribuir los resultados obtenidos principalmente a la zona de transición interfacial (ZTI) establecida entre el agregado y la matriz cementicia, el estudio de esta zona es crucial para determinar el comportamiento del material en diferentes situaciones de servicio, en especial en aquellas donde los concretos de OPC se caracterizan por fallar súbitamente debido a las microgrietas que se desarrollan bajo carga, mientras que según las investigaciones en los CAA la matriz es densa, compacta y de alta homogeneidad, otorgando al material una mayor capacidad de absorción de energía y soporte de carga (Ding, Y. et al., 2016).

2.4 Sustitución parcial de agregados finos por caucho molido en concretos de OPC.

La producción de concreto incluye en su composición agregados como arenas y gravas, constituyendo aproximadamente el 70% del volumen del concreto, siendo los agregados finos una cuarta parte del total. El consumo de agregados crece anualmente un 4,5% (Huey, S. et al., 2017), ocasionando escasez de recursos y fuentes naturales. La extracción de agregados naturales (AN) de ríos, lagos y otras reservas de agua durante un periodo prolongado ha dado lugar a enormes problemas ambientales alrededor del mundo, por tal razón, el reemplazo parcial o total de AN por una fuente alternativa, resulta en un considerable ahorro de recursos y una menor huella ambiental.

De forma paralela, la industria automovilística desecha cerca de 1000 millones de neumáticos en todo el mundo cada año y casi la mitad de éstos se disponen en vertimientos sin ningún tratamiento (Thomas, B., 2014); para el año 2024 se estima que la Unión Europea produzca alrededor de 355 millones de llantas por año, siendo a diferencia de otros residuos casi imposible de reincorporar en la producción de nuevas llantas (Pacheco, R. 2018), el manejo inapropiado de este creciente subproducto se ha convertido en una preocupación ambiental, actualmente se considera que en los vertederos de llantas se crea un ambiente toxico y peligroso denominado “polución negra” que finalmente impacta los ámbitos económicos y sociales, la inclusión de partículas de caucho en el concreto es una alternativa como respuesta a la alta demanda de recursos naturales no renovables y que puede mitigar los problemas de gestión de neumáticos de desecho.

El uso del caucho de llantas recicladas (CR) en mezclas de concreto se ha implementado en múltiples tamaños y morfologías, todas provenientes de la implementación de procesos de trituración mecánica del residuo primario, al final del cribado se producen principalmente tres tipos de caucho, la primera corresponde al caucho en polvo, esta morfología funciona como material aglutinante y puede actuar como reemplazo parcial del cemento en la producción de concreto. Las otras dos formas se consideran cauchos granulados de mayor tamaño y diferente morfología, las partículas finas inferiores a 6 mm se utilizan en general como reemplazo de arena y las partículas en forma de virutas con tamaño mayor a 6 mm como reemplazo de agregado grueso en el concreto (Mendis, A. et al. 2017).

Durante las últimas dos décadas, varios autores han investigado las propiedades que exhibe el concreto con la inclusión de CR en su estructura, entre las que se encuentran el efecto sobre las propiedades mecánicas, físicas y de durabilidad. En estudios preliminares (1993) produjeron mezclas de concreto con un porcentaje variable de virutas de neumático y caucho molido con tamaño de partícula menor a 6 mm como reemplazo de agregados grueso y fino respectivamente. Se observó que la sustitución de agregados gruesos condujo a la reducción de hasta 85% en la resistencia a la compresión y de un 50% de la resistencia a la tracción. No obstante, en el reemplazo de agregados finos el decremento fue relativamente menor, alrededor del 65% para la resistencia a la compresión y del 50% en la resistencia a flexión, la mayor pérdida de propiedades se encontró para reemplazos de 75 y 100% del volumen de los agregados, el material presentó naturaleza dúctil en su comportamiento a esfuerzos mecánicos.

Más adelante, Turatsinze, A. & Garros en el 2008, estudiaron concretos de OPC con reemplazos de arena por CR particulado en proporciones de 20 y 30%, con el fin de mejorar la resistencia a flexión y la propagación de grieta, los resultados evidenciaron que la adición polimérica promueve propiedades como aislamiento térmico, absorción acústica y la baja densidad del material, contribuyendo a la mejora de la durabilidad del concreto, comportamiento que se atribuye a la naturaleza hidrofóbica de la partícula de caucho. Pelisser et al. (2011), mejoraron la adhesión de las partículas de caucho en el concreto, mediante un tratamiento previo con NaOH y adición de humo de sílice a la mezcla, la pérdida de resistencia fue del 14% frente al 67% reportado en concretos con sustitución de agregado fino por caucho, pero sin tratamiento previo a su incorporación.

A pesar de la pérdida de resistencia mecánica exhibida en este tipo de concretos al incorporar partículas de CR, los resultados evidencian potencial de estas mezclas en estructuras civiles, en particular en aplicaciones donde se requiera además un comportamiento dúctil del material. Liu et al. (2013), reportaron el decrecimiento de

la resistencia a flexión desde 5,46 a 4,6 MPa para contenidos de 0 y 15% de caucho en concretos de OPC, sin embargo, se evidenció la mejora sustancial en la resistencia a la fatiga siendo proporcional a la inclusión de este polímero. Por su parte, Thomas y Gupta (2013) estudiaron las características mecánicas y de durabilidad del concreto con la incorporación de escorias de cobre y CR de neumáticos desechados, para ello se utilizó una relación a/c de 0,4, los resultados evidenciaron que la mezcla de concreto con 40% de escoria de cobre y 10% de caucho molido era adecuada para aplicaciones tales como pavimentos, obras estructurales y no estructurales; las características exhibidas por el material aseguran alta durabilidad del concreto, considerándose factible para su uso en todas las actividades de construcción.

Thomas et al. (2014), informaron acerca de la obtención de concretos con la incorporación de CR con variaciones de 2,5%, el rango de resistencias a compresión varió entre 17 y 42,5 MPa para valores de 0 y 20% de caucho respectivamente; la resistencia a flexión alcanzó valores entre 5,32 y 3,76 MPa a 28 días para los mismos porcentajes de inclusión de caucho, las relaciones a/c utilizadas fueron de 0,4, 0,45 y 0,5, se encontró que hasta el 7,5% de inclusión no genera grandes modificaciones en las resistencias mecánicas. Adicionalmente, se evidencio el incremento de la resistencia a la abrasión, disminuyendo la longitud de huella en la superficie del material de 1,58 a 1,04 mm con el 20% de inclusión respecto a la muestra de referencia para la relación a/c de 0,5.

Park et al. (2016) sustituyeron parcialmente el agregado fino por CR en una matriz de OPC, obtuvo mejora en la ductilidad del concreto y en la resistencia al impacto, además del incremento en la capacidad de deformación respecto a concretos de OPC convencionales, propiedades aptas para el diseño de estructuras sometidas a cargas dinámicas y de impacto. En Australia las investigaciones han evidenciado el incremento en el desempeño de columnas de concreto con este tipo de mezclas bajo cargas sísmicas, indicando la mejora sustancial en la capacidad de absorción de energía, resistencia a la abrasión y resistencia a ciclos de hielo-deshielo, concluyendo que el uso de CR aumenta la relación de amortiguación y la disipación de energía (Yousf, O. et al. 2016).

Rezaifar et al. (2016) propusieron una mezcla de concreto con OPC y metacaolín (MK) como adición para la mejora de la interfase matriz-agregado, con la sustitución parcial de agregados por CR con un tamaño alrededor de 1,32 mm, se logró evaluar la resistencia a compresión y la absorción de agua como indicador de porosidad en el material, las proporciones de inclusión de caucho variaron entre 0 y 30% respecto al agregado fino, la resistencia a compresión optima fue de 30,69 y 40,38 MPa a 7 y 28 días respectivamente, con una absorción de 3,92% y un peso unitario de

2272,8 Kg/m³ para una inclusión de 4,35% de caucho y una adición de 17,07% de MK.

Al respecto, Naji, N.2017 demostró que el tamaño de la partícula de CR tiene gran influencia sobre la resistencia del concreto, en su investigación se produjeron mezclas autocompactantes con un reemplazo del 30% de OPC por ceniza volante clase F, con una relación constante de a/c de 0,35 y un contenido de 520 Kg/m³ de cementante, la inclusión de caucho como agregado fino en el concreto fue del 5, 10, 15, 20 y 25% y se evaluó tres diferentes tamaños, inferior a 1 mm, entre 1 y 4 mm, y finalmente una mezcla de estos. Los resultados demostraron que las partículas de mayor tamaño generan una menor resistencia, lo que se atribuye a la tenacidad inferior característica de las partículas de llanta en comparación con la arena natural, además de presentar una superficie lisa que limita la unión entre las partículas de caucho y la pasta de cemento, afectando así la resistencia y la elasticidad de la capa de zona de transición interfacial. No obstante, la inclusión del 5% de caucho resultante de la mezcla de los dos tamaños produjo la misma resistencia a compresión que la muestra de referencia y redujo la resistencia a flexión en un 13,75%, la producción de concretos autocompactantes con resistencias superiores a 39 MPa se puede lograr fácilmente con la inclusión hasta del 25% de caucho, indiferente del tamaño de la partícula que presente.

La mayoría de los autores concluyeron que el reemplazo de agregados por CR de manera general disminuye la densidad del material, siendo de alta viabilidad en aplicaciones de concreto arquitectónico y de baja resistencia, tales como fachadas, alfajías y aceras, entre otros. A pesar de la pérdida de propiedades mecánicas, se adicionan nuevas propiedades relacionadas con la capacidad de absorber energía y una mayor durabilidad, que proyectan su uso en aplicación como pavimentos y asfaltos (Gibreil, H. et al., 2017).

2.5 Sustitución parcial de agregados finos por caucho molido en concretos activados alcalinamente y geopoliméricos.

El uso del caucho molido (CR) en concretos para aplicaciones en carreteras, plazas públicas, estaciones de ferrocarril y materiales para pisos es ampliamente usado debido a la mejora que produce este residuo en la capacidad de amortiguación de vibraciones externas. Las investigaciones corroboran que el uso de partículas poliméricas como agregados otorgan múltiples ventajas al material compuesto entre las que se destacan la disminución de densidad y de la porosidad en la estructura, así como mayor resistencia eléctrica, aislamiento térmico y acústico, se produce además el aumento en la tenacidad y la ductilidad de la matriz cementicia, y el incremento en la resistencia a la fatiga y al agrietamiento (Long, et al., 2018), a

pesar de sus amplias ventajas conocidas no ha sido implementado extensamente en concretos activados alcalinamente (CAA) y geopolímeros.

Autores como Parque et al. (2016) produjeron concretos geopoliméricos a partir de dos clases de ceniza volante, una clase F con un bajo contenido de CaO (1,29%) y otra clase C para las que presentan un mayor contenido de CaO, utilizando la segunda ceniza se produjeron concretos tipo I para una composición de 14,14% y tipo II para un contenido de 9,42% de CaO respectivamente, estos precursores se activaron alcalinamente con NaOH de diferentes molaridades (8 y 12M) y Na₂SiO₃, como sustitución parcial de agregado fino se incorporó partículas de CR con una granulometría entre 0,075 y 4,75 mm en proporciones de 5 a 20%; los resultados evidenciaron la reducción del peso unitario y la resistencia a compresión del concreto proporcional al incremento en la sustitución de CR, las menores pérdidas de resistencias se lograron con un 5% de inclusión en la ceniza clase C tipo I, una concentración del NaOH de 14M y la relación Na₂SiO₃/NaOH de 2, alcanzando hasta 40,6 MPa a una edad de 28 días.

Luhar et al. (2018) produjeron a partir de cenizas volantes un concreto activado alcalinamente con una solución de NaOH y Na₂SiO₃ con una relación SiO₂/Na₂O igual a 2, se evaluó la inclusión de fibras de caucho del 10% en peso de los agregados, con una longitud aproximada de 22 mm y un diámetro entre 2 y 4 mm, los especímenes de concreto activado fueron tratados en un horno a 200, 400, 600 y 800°C con una velocidad de calentamiento de 4,4°C/min, la resistencia a compresión se afectó negativamente a temperaturas inferiores a 600°C, mientras que valores superiores evidenciaron incremento de la resistencia proporcional a la temperatura de tratamiento, resistencias de 21,85 y 22,52 MPa se alcanzaron a 600 y 800°C, comportamiento que se atribuye a la formación de geles N-A-S-H en la microestructura del material que son resistentes a altas temperaturas y a las fibras que permiten mantener la integridad de la muestra a pesar de la presencia de múltiples grietas.

Por su parte, Long et al. (2018) produjeron morteros ecoamigables a partir de escorias con un contenido de 39,08% de CaO y una superficie específica de 430 m²/Kg, activadas alcalinamente con una solución de NaOH y Na₂SiO₃ y una relación líquido/cementante de 0,44, con una inclusión de CR en proporciones de 0, 20, 40 y 60% en volumen; se encontró que la trabajabilidad de la mezcla se afecta fuertemente en proporción al porcentaje de CR en la estructura, lo cual se atribuye a que las partículas de caucho presentan un bajo peso unitario y una mayor rugosidad respecto a la arena, influyendo en la cantidad de aire atrapado en el mortero, resultando en un incremento significativo de los requerimientos de agua. La resistencia a compresión presentó reducciones de aproximadamente 31,3, 32,6 y 35% para los

porcentajes de reemplazo de agregado fino de 20, 40 y 60% respectivamente, mientras que la resistencia a flexión se redujo en un 23,6, 13,4 y 7,3% para valores de CR iguales a 7 días, resultados que se atribuyen a la diferencia de rigidez de la matriz cementicia y los agregados de CR, ocasionando heterogeneidad en la microestructura, creando zonas de propagación de fisuras.

Otros autores como Yahya et al. 2018 se plantearon el uso de concretos de ceniza volante clase F activados alcalinamente con el reemplazo parcial de agregado grueso en un rango entre el 5 y el 20% por CR de tamaños entre 0,5 y 1 cm, se utilizó una relación $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ entre 2 y 2,5, las muestras fueron sumergidas en agua de mar para evaluar el efecto de un ambiente agresivo en el desarrollo de propiedades del material, los resultados evidencian que la mayor resistencia a compresión se obtuvo para la mezcla con 5% de CR, siendo de 39,6 MPa a 28 días (Figura 2), se evidencia también la disminución de la densidad del material para todos los porcentajes de reemplazo, así como la ganancia de peso cuando se sumergen los especímenes, esto se atribuye a que la mezcla presenta gran heterogeneidad y poca adherencia del CR en la pasta, generando porosidad en la microestructura proporcional al reemplazo, aumentando la capacidad de absorción del material, contribuyendo a la pérdida de resistencia mecánica.

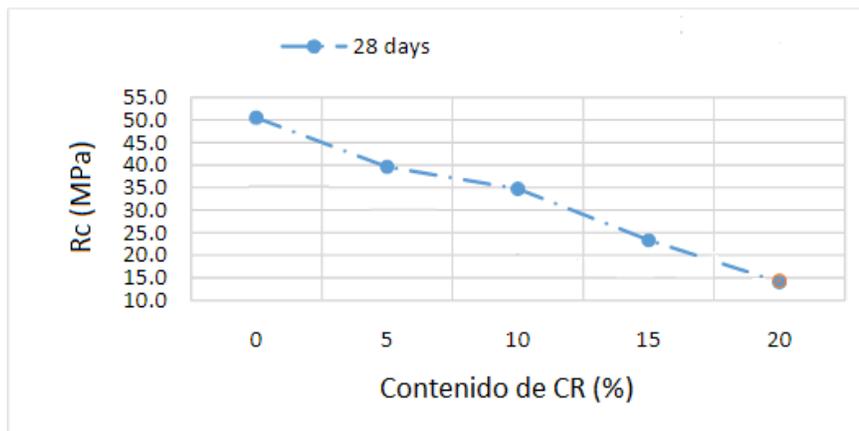


Figura 2. Relación de reducción de la resistencia a compresión respecto al contenido de CR (Modificada, Yahya et al. 2018).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL.

Desarrollar un material compuesto de tipo geopolímero a partir de residuos de construcción y demolición (CDW) con propiedades mecánicas y físicas para aplicaciones en carreteras y pavimentos.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Dosificar la pasta cementicia que permita usar CDW como precursores para activación alcalina.

Encontrar la pasta óptima que permita la obtención de un concreto activado alcalinamente de buena trabajabilidad y que refleje las propiedades iniciales de la pasta.

Analizar el efecto del uso de arena natural y reciclada en el concreto activado.

Evaluar la inclusión de caucho molido proveniente de llantas recicladas en proporciones de 0, 5, 10 y 15% como adición de agregado fino en el concreto activado alcalinamente.

Estudiar y caracterizar el concreto final obtenido y las propiedades que avalan su potencial uso en pavimentos.

4. OBTENCION DE PASTAS, MORTEROS Y CONCRETOS HIBRIDOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE A PARTIR DE RESIDUOS DE DEMOLICION.

4.1 INTRODUCCIÓN.

La industria de cemento Portland ordinario (OPC) después de 175 años de producción, ha generado residuos de construcción y demolición (CDW) como resultado del desarrollo de edificaciones, de la renovación y demolición de infraestructura como pavimentos, puentes, edificios y carreteras, actividades que han generado un importante volumen de subproductos que actualmente se consideran como un problema de manejo ambiental (Wu, Z. 2014). Países como Hong Kong y Reino Unido reportaron que alrededor del 65 y 50% de sus vertederos eran ocupados por este tipo de desechos, respectivamente. Mientras que en Australia y Estados Unidos la actividad de construcción genera el 30% de los residuos depositados en rellenos y vertederos. Con el fin de mitigar y reducir la problemática, se han establecido diferentes normativas internacionales relacionadas al reciclaje de CDW, entre ellos se encuentra la directiva de la Unión Europea (2008/98/CE) que ha establecido como objetivo la inclusión de al menos el 70% de estos residuos para el 2020, generando estrategias para estimular el sector de materiales reciclados derivados de los CDW (Arenas, C. et al. 2017).

En general se estima que el 54% de los CDW corresponden a materiales tipo cerámicos incluyendo ladrillos, tejas, baldosas, cerámica blanca, entre otros, y que el 12% pertenecen a residuos de concreto (Robayo, R. et al. 2017). La viabilidad del uso de este tipo de residuos radica en su naturaleza silicoaluminosa que permite incorporarlos en la producción de materiales de construcción como los concretos, sin la necesidad de cambios drásticos en la producción y el proceso de aplicación, además de su disponibilidad inmediata alrededor del mundo. Inicialmente los CDW fueron usados para producir Clinker, logrando reemplazos parciales en el OPC entre 10 y 35% (Reig, L. et al. 2013) reduciendo ligeramente las 3,5 Gt que se producen anualmente; por otro lado, la alternativa de activar alcalinamente los CDW como precursores para formar estructuras tridimensionales de cadenas de tetraedros de SiO_4 y AlO_4 permite obtener materiales cementantes con un amplio espectro de aplicaciones, en especial en el sector de la construcción, generando una menor huella ambiental respecto a cementos tradicionales, permitiendo reemplazos de OPC hasta de un 100%.

Existe un amplio rango de residuos reciclables que pueden ser incorporados en concretos geopoliméricos, entre los que se encuentran cenizas volantes, cenizas volcánicas, escoria de alto horno, metacaolín, entre otros; pese a que son residuos

y subproductos, el éxito en su utilización, han fomentado el incremento en el valor comercial en el mercado de las adiciones de concreto, ya que permiten sustituir altos porcentajes de Clinker por subproductos industriales, mejorando propiedades físicas, químicas y mecánicas.

Por otro lado existen los residuos no reciclables como los CDW, materiales de uso alternativo que pueden reducir el uso intensivo de rellenos sanitarios alrededor del mundo y que durante los últimos años han sido ampliamente utilizados en la producción de CAA, pese al consumo de energía que se requiere para la adecuación granulométrica del material para su uso como agregado y como precursor, autores reportan que el consumo energético y la emisión de gases de efecto invernadero se pueden reducir de 511 kg·CO₂·eq a 265 kg·CO₂·eq respecto a concretos convencionales (Robayo, et, al. 2017).

Los procesos de activación alcalina y geopolimerización, involucran mecanismos complejos de formación de productos de reacción, que dependen de la variación de parámetros establecidos, principalmente se consideran el tipo de precursor de la pasta y su relación Si/Al, la cantidad de cementante (Kg/m³), la estructura y el tipo de activador alcalino, la temperatura y tiempo de curado, así como la relación liquido/solido, el pH de la mezcla y la temperatura inicial de síntesis (Pourabas, et. Al, 2018), los cuales definen las propiedades específicas del material como una baja densidad, micro/nanoporosidad, contracción despreciable, alta resistencia mecánica un notable endurecimiento superficial, estabilidad térmica y resistencia química.

Como respuesta a la necesidad de integrar los diferentes componentes presentes en los CDW, en este capítulo se tiene como objetivo optimizar las proporciones de mezcla para lograr las relaciones SiO₂/Al₂O₃ necesarias para alcanzar propiedades físicas y mecánicas para producir un CAA; como materiales de partida se utilizan residuos de ladrillo, cerámica blanca y concreto que se activan con una solución altamente alcalina de NaOH y Na₂SiO₃, evaluando la adición de agregados finos naturales y reciclados en morteros de relación 1:1, para obtener como producto final CAA; las muestras obtenidas se someten a ensayos en estado fresco como tiempo de fraguado y consistencia (*slump*) y en estado endurecido entre los que se encuentran resistencia a compresión, densidad, absorción y porosidad. Se complementa el estudio con un análisis microestructural del geopolímero, utilizando técnicas tales como microscopía electrónica de barrido (MEB o SEM, por sigla en inglés).

4.2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

4.2.1 Materiales.

Los materiales empleados en el desarrollo de concretos activados alcalinamente fueron:

- Concreto reciclado (material precursor).
- Ladrillo reciclado (material precursor).
- Cerámica reciclada (material precursor, arena reciclada).
- Hidróxido de sodio (NaOH - Activador alcalino).
- Silicato de sodio (Na_2SiO_3 - Activador alcalino).
- Arena natural, AN (M.F: 1.8)
- Mortero de baldosa y cerámica, AR (arena reciclada, M.F: 4.0).
- Grava Natural, GN (TMN: 1”).

4.2.2 Adecuación materia prima.

Los residuos utilizados como material precursor fueron obtenidos de procesos de construcción y demolición (CDW) de diferentes áreas de la Universidad del Valle, para su adecuación fue necesario un proceso de trituración primaria en una trituradora de mandíbula, posteriormente se sometieron los materiales a un proceso de molienda primaria y secundaria en un molino de discos y en un molino de bolas respectivamente, en la Figura 3 se muestran los equipos utilizados para la adecuación de los precursores.



Figura 3. (a) Trituradora de mandíbulas, (b) Molino de discos y (c) Molino de bolas cerámicas.

El agregado fino reciclado fue obtenido de residuos provenientes de una estación de transferencia de residuos sólidos en la ciudad de Cali, el tamaño final requerido para ser usado como arena se alcanzó mediante procesos de trituración primaria y secundaria de residuos de cerámica y mortero de baldosa, homogeneizados manualmente.

4.2.3 Obtención de muestras.

Para este estudio se realizó un diseño de mezclas para lo cual se utilizó un software comercial llamado MiniTab 10. Se encontró la proporción de materiales precursores variando la composición del concreto (C), ladrillo (B) y cerámica (T) entre 40-60%, 20-40% y 0-20% respectivamente, obteniendo 13 mezclas de las cuales 4 son puntos centrales, teniendo como variable de respuesta la resistencia a compresión a 28 días. Se procedió a mezclar los precursores con un activador alcalino de hidróxido de sodio industrial (NaOH) y silicato de sodio comercial (Na₂SiO₃), distribuido por Productos Químicos Panamericanos (SiO₂=30,29%, Na₂O=14,57%, H₂O=54,74%), manteniendo relaciones preliminares Si/Al de 6,5 y Na/Si de 0,13, la relación L/S de 0,25 fue constante en todas las mezclas, en la Tabla 1 se muestran las 13 mezclas realizadas.

Tabla 1. Diseño de mezclas para la proporción de precursores.

Mezcla	Tipo_PT	Concreto (C)	Ladrillo (B)	Cerámica (T)
M1	0	0,53	0,33	0,13
M2	0	0,53	0,33	0,13
M3	-1	0,57	0,37	0,07
M4	2	0,60	0,30	0,10
M5	2	0,50	0,40	0,10
M6	-1	0,47	0,37	0,17
M7	1	0,40	0,40	0,20
M8	-1	0,57	0,27	0,17
M9	0	0,53	0,33	0,13
M10	0	0,53	0,33	0,13
M11	2	0,50	0,30	0,20
M12	1	0,60	0,40	0,00
M13	1	0,60	0,20	0,20

Las pastas se mezclaron utilizando una mezcladora HOBART Vulcan 1249, que se muestra en la Figura 4; el procedimiento consistió en la homogenización de los componentes sólidos del precursor durante 1 minuto, luego se adicionó la solución activante (NaOH+Na₂SiO₃) disuelta en el agua de mezclado y preparada 30 minutos antes de iniciar el mezclado para alcanzar la temperatura ambiente del activador, se mezcló por 2 minutos a velocidad baja, seguido de 1 minuto a velocidad media y finalmente 1 minuto a velocidad baja hasta obtener una pasta homogénea, seguidamente fue vaciada en moldes cúbicos de silicona que permiten obtener muestras de 20x20x20 mm, las cuales fueron vibradas durante 30 segundos para eliminar la presencia de aire atrapado y la formación de poros. Las muestras

obtenidas fueron sometidas a curado a temperatura ambiente (25 °C) en una cámara húmeda (H.R > 90%).

A partir de los resultados preliminares, se seleccionaron 2 mezclas de acuerdo con parámetros de resistencia y trabajabilidad, las proporciones seleccionadas se denominan 40/40/20 (C, B, T) y 60/20/20 (C, B, T) que corresponden a las mezclas M7 y M13 de la Tabla 1. Se obtuvieron resultados de resistencia a compresión inferiores a 10 MPa a 28 días. Con el fin de otorgar mayor potencial a este tipo de residuos, se evaluó el efecto que genera la inclusión del 5 y 10% de OPC como adición de material cementante, otorgando una fuente alternativa de calcio en la matriz activada alcalinamente.

La dosificación de las pastas de las proporciones seleccionadas 40/40/20 y 60/20/20 se determinaron con el uso del software MiniTab mediante el método de mínimos cuadrados, variando los parámetros Si/Al y Na/Si, para un total de 13 combinaciones basadas en los niveles de las variables que se muestran en la Tabla 2, cabe resaltar que a partir de M9 las mezclas corresponden a puntos centrales, para un total 9 mezclas diferentes por sistema.

Tabla 2. Variación de las relaciones Si/Al y Na/Si de cada sistema.

Mezcla	40/40/20		60/20/20	
	Si/Al	Na/Si	Si/Al	Na/Si
M1	5,75	0,11	6,45	0,11
M2	6,45	0,11	7,15	0,11
M3	5,75	0,19	6,45	0,19
M4	6,45	0,19	7,15	0,19
M5	5,60	0,15	6,30	0,15
M6	6,60	0,15	7,30	0,15
M7	6,10	0,10	6,80	0,10
M8	6,10	0,20	6,80	0,20
M9	6,10	0,15	6,80	0,15
M10	6,10	0,15	6,80	0,15
M11	6,10	0,15	6,80	0,15
M12	6,10	0,15	6,80	0,15
M13	6,10	0,15	6,80	0,15

La producción de morteros con relación 1:1 de cementante: arena, 10% de adición de OPC y relación L/S de 0,3 se realizó en la mezcladora Hobart Vulcan 1249, siguiendo el mismo procedimiento de mezclado de las pastas activadas, el agregado fino se añadió al final y se mezcló durante 1 minuto adicional para lograr la integración adecuada de la arena en la mezcla, seguidamente se vació en moldes cúbicos metálicos que permiten obtener muestras de 5x5x5 cm, las cuales fueron

vibradas durante 60 segundos para eliminar el aire atrapado, cabe resaltar que se evaluaron dos tipos de arena, arena natural (AN) y arena reciclada (AR) con un módulo de finura 1,8 y 4,0 respectivamente. Cabe resaltar que el agregado fino reciclado AR proviene de residuos de cerámica y mortero de baldosa sometidos a procesos de trituración primaria en una trituradora de mandíbulas. En la

Figura 5 se muestra el esquema de obtención de muestras.



Figura 4. Equipos usado para la mezcla de pastas y morteros (a) HOBART Vulcan 1249, y de CAA (b) Mezcladora Planetaria CreteAngle.

Finalmente se produjeron los concretos activados alcalinamente con base en los sistemas óptimos de los morteros obtenidos, se realizó el diseño de mezcla para contenidos de cementante de 400 y 500 Kg/m³ y se utilizó una mezcladora planetaria Creteangle (Figura 4), el proceso consiste en la homogenización de los sólidos precursores y el 10% de OPC durante 1 minuto, luego se adicionó la solución activante y se mezcló durante 2 minutos, posteriormente se adicionó la arena y se dejó mezclar 1 minuto, finalmente se agrega grava natural de tamaño máximo nominal de 25,4 mm (1 plg), dejando mezclar durante 30 segundos, seguidamente se vació la mezcla en cilindros con relación 1:2 y moldes rectangulares de 300x100x100 mm para la conformación de vigas de concreto, se mantuvo una relación líquido/sólido constante de 0,40 para garantizar la trabajabilidad de la mezcla y una relación activador/cementante de 0,39 para garantizar la disponibilidad de solución activante.

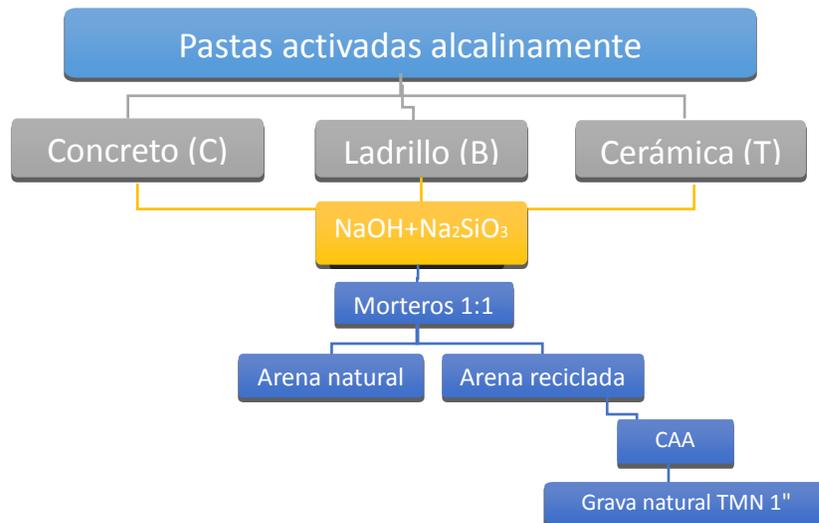


Figura 5. Proceso de obtención de concretos activados alcalinamente.

4.2.4 Técnicas de caracterización.

Se determinó la composición química de cada uno de los materiales precursores mediante la técnica de espectroscopia FRX, empleando un equipo MagixPro PW-2440 equipado con un tubo de rodio, de potencia máxima de 4 KW. Este equipo cuenta con una sensibilidad de 200 ppm (0,02%) en la detección de elementos pesados metálicos.

El tamaño promedio de partícula ($D [4,3]$) de cada uno de los residuos usados como precursor se determinó mediante granulometría laser con el uso del equipo Mastersizer 2000, que se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Granulómetro laser Mastersizer 2000.

La microestructura del material se analizó mediante un microscopio electrónico de barrido (MEB), JEOL JSM-6490LV, mostrado en la Figura 7. Este equipo cuenta con un detector INCAPentaFETx3 marca Oxford Instruments Modelo 7573. Previo

al análisis las muestras se recubrieron con oro por medio de deposición en una unidad de vacío dentro del tanque VacuumDesk IV. También se utilizó la unidad de análisis EDS para determinar de manera semicuantitativa la composición química de los materiales analizados.



Figura 7. Microscopio electrónico de barrido, JEOL JSM-6490 LV.

La morfología, características y defectos de la interfase formada entre la matriz y los agregados de las mezclas de concreto se analizaron macroscópicamente mediante el uso de un estereoscopio Nikon SMZ1000 que se muestra en la

Figura 8.



Figura 8. Estereoscopio Nikon SMZ1000.

4.2.5 Caracterización físico-mecánica.

La caracterización física se realizó a los componentes precursores y agregados del concreto producido, se midió la densidad de los CDW según el procedimiento establecido en la norma ASTM 329 mediante el uso de un picnómetro y una balanza de alta precisión (± 0.0005 g); los agregados naturales y reciclados se caracterizaron mediante ensayos normativos de la NTC correspondiente, se determinaron propiedades específicas como densidad, absorción y humedad, contenido de materia orgánica para los agregados finos y coeficiente de los ángeles para los

agregados gruesos, así como la gradación granulométricas de cada uno de los agregados utilizados.

En estado fresco las pastas se caracterizaron mediante el tiempo de fraguado empleando la norma ASTM C191, se obtuvieron tiempos de fraguado inicial y final con el uso de la aguja de Vicat, mientras que para los concretos activados alcalinamente la caracterización se realizó mediante asentamiento o *slump* con el cono de Abrams, empleando la norma ASTM C143.

Para el estado endurecido, la caracterización se realizó mediante la medición de la densidad, volumen de poros y absorción de agua del concreto producido, siguiendo los procedimientos detallados en la norma ASTM C642-13.

En la Figura 9 se muestra la máquina universal de ensayos Instron 3369, utilizada para la determinación de propiedades mecánicas de las muestras activadas desde pastas hasta concretos, como variable de respuesta se empleó la resistencia a la compresión a 7 y 28 días de curado, siguiendo la norma ASTM C109.



Figura 9. Máquina universal de ensayos Instron 3369.

4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.3.1 Caracterización de materia prima.

Las granulometrías mostradas en la Figura 10, evidencian la distribución granulométrica de los sólidos precursores, se presentan varios comportamientos de los materiales, desde curvas moderadamente asimétricas sesgadas a la izquierda (C y T) hasta curvas bimodales (B).

Teniendo en cuenta que todos los residuos se sometieron al mismo proceso de molienda, los tamaños promedios fueron próximos o inferiores a 30 μm , presentando un área superficial suficiente para ser utilizado en procesos de

activación alcalina. Para C, B y T los tamaños promedio fueron de 34,92; 14,05 y 26,23 μm respectivamente, el ladrillo al ser un material de menor dureza alcanzó un tamaño significativamente menor.

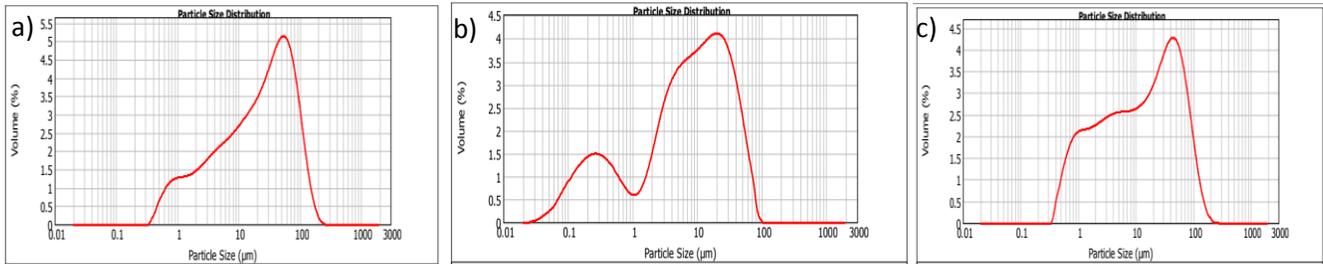


Figura 10. Distribución de tamaño de partícula (a) Concreto, (b) Ladrillo y (c) Cerámica.

La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos mediante FRX de la composición química de los residuos utilizados en este estudio. Se aprecia el alto contenido de grupos SiO_2 y Al_2O_3 en los precursores, valores que indican su uso como fuente de materia prima para el desarrollo de materiales cementantes por procesos de activación alcalina, cabe resaltar que se evidencia fuentes considerables de CaO que se complementan con la adición de OPC.

Tabla 3. Composición química residuos de construcción y demolición CDW.

Elemento / Compuesto	% en peso		
	Concreto (C)	Ladrillo (B)	Cerámica (T)
Na_2O	1,40	1,14	0,55
MgO	3,17	2,50	3,17
K_2O	0,47	1,63	0,95
CaO	17,79	3,10	10,09
MnO	-	0,11	0,03
Fe_2O_3	-	9,02	1,98
Al_2O_3	10,10	22,01	19,21
SiO_2	47,66	57,82	54,94
P_2O_5	0,13	0,13	0,09
SO_3	0,54	0,09	0,01
TiO_2	0,79	1,06	0,87
Cl	0,03	0,01	0,01
V_2O_5	0,05	-	0,07
Cr_2O_3	0,03	0,03	0,03
ZnO	-	0,04	0,25
SrO	-	0,02	1,79
ZrO_2	-	0,08	0,49

BaO	-	0,12	0,26
PbO	-	0,01	0,11
CO ₂	8,09	1,04	4,94

4.3.2 Caracterización físico-mecánica.

4.3.2.1 Caracterización de CDW y agregados.

La densidad de los sólidos CDW fue determinada mediante picnómetro y arrojó como resultado para el residuo de concreto, ladrillo y cerámica valores de 2.690, 2.860 y 2.660 Kg/m³ respectivamente.

Se determinaron las propiedades físicas de los agregados utilizados para la producción de morteros y concretos, encontrando que el agregado reciclado presenta una menor densidad respecto al natural, sin embargo, tiene una absorción más alta. El agregado reciclado (AR) presenta muy bajo contenido de materia orgánica y debido a su morfología angular presenta un mayor anclaje en la matriz, generando una estructura más compacta, que representa una mayor resistencia mecánica en comparación con los morteros producidos con agregado natural (AN) de canto rodado. En la Tabla 4 se presenta el resultado de la caracterización y en la Tabla 5 la gradación granulométrica de los agregados utilizados en esta etapa. En la Figura 11 se muestran los tipos de arena utilizada.



Figura 11. Tipos de arena utilizadas, arena natural (Izq.) y arena reciclada (Der.)

Tabla 4. Caracterización de agregados naturales y reciclados.

Tipo de agregado	Arena Natural	Arena Reciclada	Grava Natural
Densidad (g/cm ³)	2,39	2,03	2,72
Absorción (%)	3,42	12,12	1,52
Humedad (%)	4,11	2,58	0,54

Materia orgánica	3	1	NA
Coefficiente de los ángulos (%)	NA	NA	13,20

Tabla 5. Gradación granulométrica de agregados naturales y reciclados.

Abertura de tamiz (mm)	Tamiz No	Arena natural % Pasa	Arena reciclada % Pasa	Grava natural % Pasa
25,4	1	100,0	100,0	100,0
19,10	3/4	100,0	100,0	89,2
12,70	1/2	100,0	100,0	56,2
9,52	3/8	99,8	99,6	18,5
4,76	N° 4	98,9	92,1	0,7
2,38	N° 8	97,4	70,6	0,7
1,19	N° 16	94,0	27,4	0,6
0,60	N° 30	79,8	3,0	0,6
0,30	N° 50	42,1	1,9	0,0
0,15	N° 100	5,8	1,5	0,0
0,07	N° 200	1,0	0,8	0,0
	FONDO	0,0	0,0	0,0
TOTAL	M.F.	1,8	4,0	

La dosificación del concreto activado alcalinamente se realizó mediante el método de volumen absoluto, se determinó el volumen total ocupado por los agregados en 1 m³ de concreto y se procedió a estimar la proporción a utilizar entre agregados grueso y agregados finos siguiendo la curva ideal planteada por Fuller-Thompson, se encontró que la proporción volumétrica que mejor se adaptó fue la curva denominada AC 50-50 que corresponde a la dosificación de 50% de cada tipo de agregado, en la Figura 12 se muestra la gradación granulométrica resultante de la combinación de agregados en diferentes proporciones.

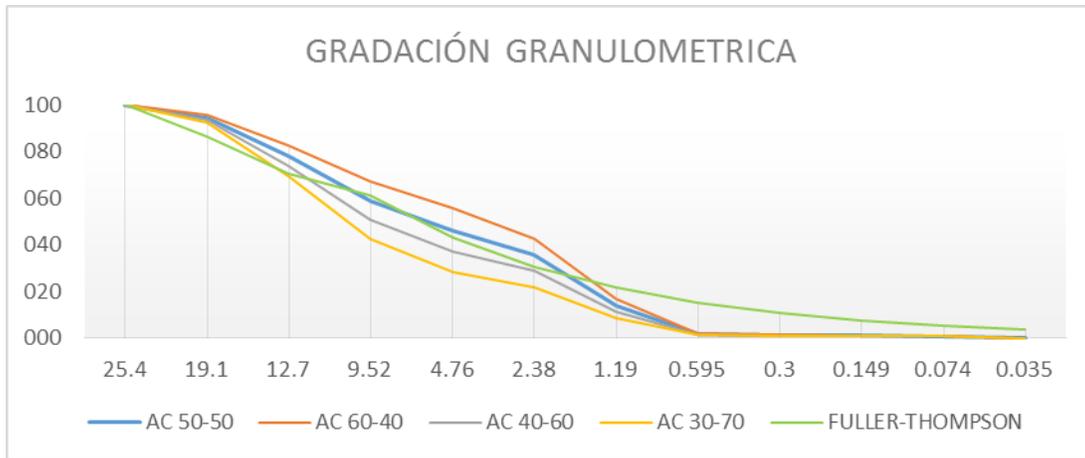


Figura 12. Combinación granulométrica agregados utilizados para la producción de concretos activados alcalinamente.

4.3.2.2 Proporción de precursores y adición de OPC al sistema de activación alcalina.

La adición de OPC en la matriz activada alcalinamente supone la mejora de resistencia mecánica, algunos autores afirman que la adición de una fuente de CaO reactivo interviene en la formación de productos de reacción adicional de naturaleza adherente, tales como geles C-S-H en medio del gel geopolimérico formado a partir de los aluminosilicatos activados alcalinamente N-A-S-H, además de la modificación de las estructuras tridimensionales, en las que se introduce en las cadenas iones de Ca, que intervienen en el desarrollo de propiedades y generan geles denominados C-A-S-H (Singh, B. 2015); en la Figura 13 se observa el aumento notable de resistencia cuando se adiciona el 5 y 10% de OPC al sistema, alcanzando hasta 28,86 MPa a 28 días para las muestras de dosificación inicial.

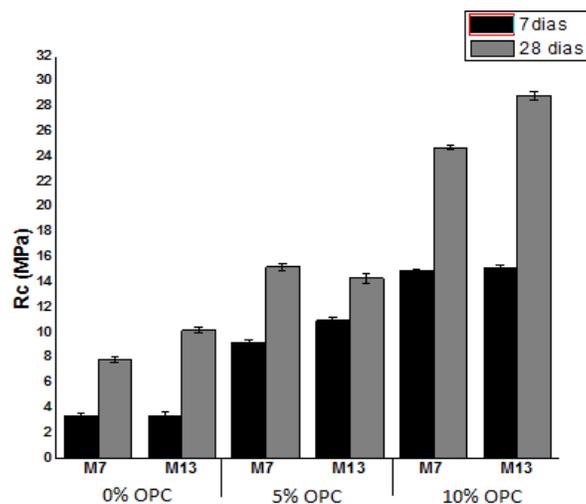


Figura 13. Resistencia a la compresión a 7 y 28 días, pastas activadas alcalinamente con 0, 5 y 10% de OPC.

La adición de OPC genera el aumento de la resistencia a la compresión en los sistemas evaluados, especialmente a edades tempranas de 7 días, exhibiendo aumentos de 208 y 262% para la adición del 5 y 10% de OPC en el sistema M7 respectivamente, mientras que el aumento fue de 352 y 360% para la adición del 5 y 10% de OPC en el sistema M13 respectivamente, estos resultados corroboran el aumento en la cinética de la reacción, bien sea por la introducción de iones Ca en la estructura que fomenta la formación de estructuras más rígidas o debido a la energía térmica que otorga el proceso exotérmico de hidratación del OPC, energía suficiente para iniciar aceleradamente las reacciones de condensación de los geles tipo N-A-S-H y C-A-S-H.

Por otro lado, a 28 días se produce el incremento de resistencias para los sistemas híbridos, en especial para la adición del 10% de OPC, de tal manera se logran aumentos hasta del 118% para el sistema M13, las fuentes de calcio promueven la formación de microestructuras con menor porosidad debido al desarrollo de geles tipo C-S-H y C-A-S-H que se caracterizan por rellenar cavidades, contribuyendo al incremento de resistencias mecánicas; la reacción inicial de los compuestos de calcio con el activador alcalino resulta en la rápida formación de los geles amorfos y semicristalinos que coexisten en el sistema cementicio, en la siguiente etapa se incrementa la producción de geles C-S-H debido al decrecimiento de alcalinidad de la mezcla generando entrecruzamiento entre los geles producidos (Askarian, et al., 2018).

Figura 14, muestran los valores de resistencia a compresión obtenidos en pastas activadas alcalinamente con adición del 10 de OPC cuando se varían las relaciones Si/Al y Na/Si, de manera general se observa que el parámetro de mayor influencia sobre la variable de respuesta es la relación Si/Al, encontrando que mayores valores de este parámetro resultan en una mayor resistencia a la compresión, siendo los valores óptimos las relaciones por encima de 6,3, para valores inferiores se considera que el proceso de policondensación de las especies de Si y Al disueltas conducen a la formación de estructuras de polisialatos (PS) que se caracterizan por bajos valores de resistencia mecánica, mientras que valores superiores a 6,3 sugieren que existe la disponibilidad suficiente de Si para la condensación de esta especie entre sí, que genera una posterior condensación con especies de Al, haciendo posible la formación de redes tridimensionales rígidas denominadas siloxo-polisialatos (PSS) y disiloxo-polisialatos (PSDS) que exhiben altas propiedades mecánicas (Ahmari, et al., 2012).

Cabe resaltar que las mezclas seleccionadas de manera general presentan relaciones Na/Si inferiores o iguales a 0,15, este valor es suficiente para generar el

pH indicado para promover la solubilidad de las especies silicoaluminosas de los CDW, proporcionando cationes para el balance de las cargas negativas de los grupos aluminato en el sistema. No obstante, la cantidad de cationes requeridos para este balance es dependiente del contenido de alúmina presente en el sistema, ya que relaciones Na/Si mayores a 0,15 generan un exceso de Na⁺ libre que pueden llegar a ser lixiviados hacia el exterior del material, obteniendo como resultado un efecto negativo en parámetros, tales como el comportamiento físico y mecánico del material (Sun, Z. et al., 2018).

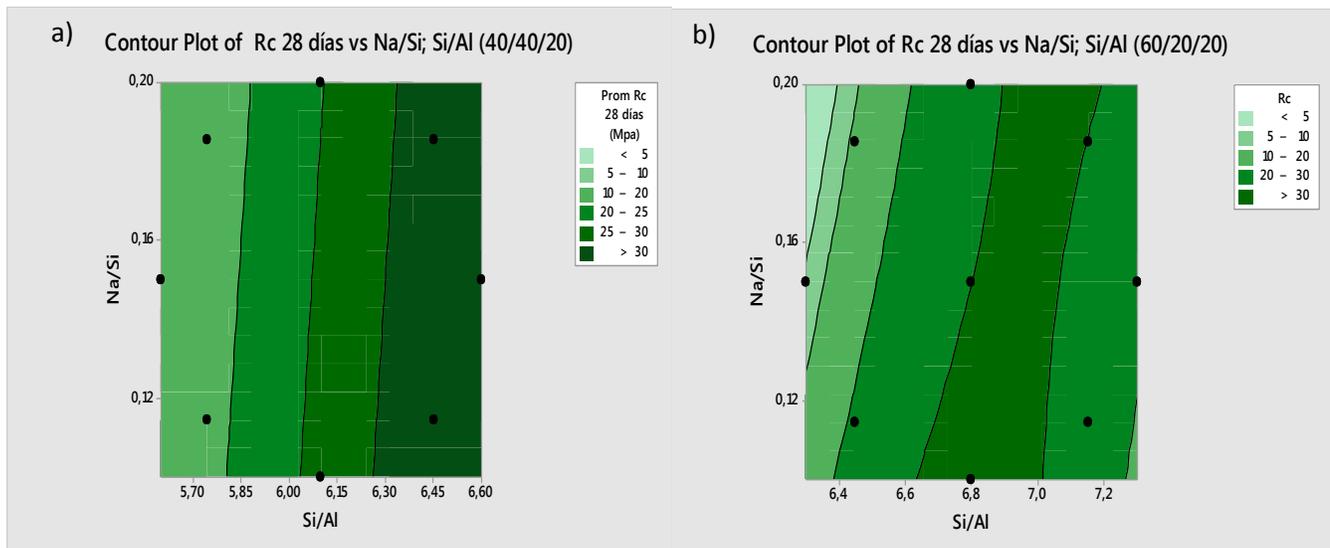


Figura 14. Gráficos de contorno para la variable de respuesta resistencia a la compresión a 28 días, (a) Proporción 40/40/20, (b) Proporción 60/20/20, con la adición del 10% de OPC en cada sistema.

4.3.2.3 Producción de pastas activadas alcalinamente.

Se realizó el mezclado correspondiente a las dosificaciones desde M1 hasta M9 referenciados en la Tabla 2, para las proporciones 40/40/20 y 60/20/20 seleccionadas del diseño de mezclas inicial, se logró obtener un amplio rango de resistencias a la compresión a 7 y 28 días, en ambos sistemas de proporciones se alcanzaron valores cercanos a los 38 MPa a 28 días con el ajuste adecuado de relaciones Si/Al, tal como se evidencia en la Figura 15.

La relación Si/Al determina la cantidad relativa de contenido de tetraedros de AlO₄

y SiO_4 que conforman las cadenas de la estructura tridimensional del gel resultante de la activación, la mezcla de sólidos precursores aportan una relación Si/Al inicial que se modifica con la adición de sílice soluble proveniente de la solución alcalina, así, de tal manera, se proveen las condiciones necesarias para formar una estructura tipo geopolímero a partir de los CDW, al disponer Si libre y reactiva en los procesos de gelificación que involucran la formación inicial de cadenas de C-S-H resultantes de la hidratación del OPC, se produce una rápida formación de geles C-A-S-H y N-A-S-H (Lee & Lee, 2013), la coexistencia de estos geles modifica la cinética de las reacciones y la velocidad de cristalización, mejorando el proceso de condensación de las especies disueltas del precursor, contribuyendo a la formación de una mejor interfase entre las partículas sin reaccionar y el gel presente en la matriz, como resultado se obtienen mayores resistencias exhibidas por el gel silicoaluminoso.

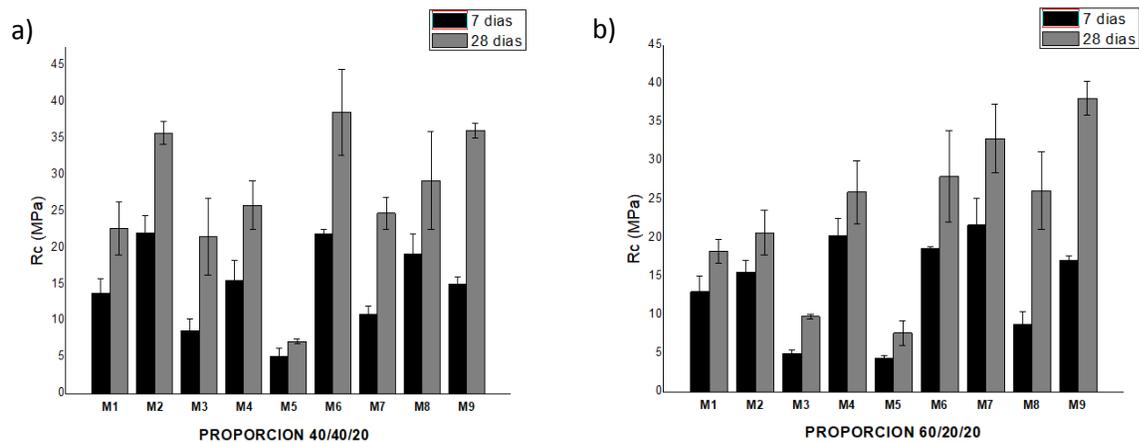


Figura 15. Resistencia a la compresión a 7 y 28 días, (a) Proporción 40/40/20, (b) Proporción 60/20/20.

El desarrollo de resistencias mecánicas, en especial a edades tempranas, se ve afectado por la concentración y contenido de NaOH de la solución alcalina, este activador sólido se disocia de tal manera que provee aniones de hidróxido (OH^-) que permiten la disolución de los aluminosilicatos en la primera etapa, y los cationes (Na^+) que generan el balance de cargas en la red de aluminosilicatos formada en la última etapa (Singh, et al. 2015). La solubilidad del precursor en especies Si y Al incrementa con la concentración de iones (OH^-), por otro lado, el exceso de hidróxido puede causar que las reacciones de policondensación inicien rápidamente, reduciendo el tiempo requerido para la disolución de los aluminosilicatos, obteniendo usualmente bajos valores de resistencia a compresión debido la formación acelerada de geles, inhibiendo la reacción de un alto porcentaje de partículas de CDW en la mezcla, aportando mayor cantidad de álcali al sistema que no logra integrarse

al gel, presentando tendencia a la lixiviación o formación de eflorescencias debido a la acumulación de carbonato de sodio en la superficie del material (Ahmari, et al. 2012).

De acuerdo con los resultados obtenidos en pastas, las mezclas de mayor resistencia en la proporción 40/40/20 presentan relaciones Si/Al de 6,45 y 6,60 que corresponden de M2 y M6 respectivamente, mientras que para la proporción 60/20/20 fue la relación Si/Al de 6,80 para las mezclas M7 y M9; estas 4 mezclas seleccionadas, se consideran óptimas para la posterior producción de morteros.

4.3.2.4 Producción de morteros activados alcalinamente.

En esta etapa se evaluó la influencia del tipo y naturaleza del agregado fino utilizado en la producción de morteros activados alcalinamente, se utilizó como cementante las pastas resultantes del diseño experimental con mejor desempeño mecánico, cabe resaltar que debido a las características granulométricas de la AR, en especial un bajo contenido de finos, se afectó negativamente la trabajabilidad de la mezcla. Para mejorar el desempeño del sistema, se procedió a trabajar con morteros de relación cementante: arena de 1:1, además se logra asegurar la existencia suficiente de activador alcalino, que permite completar los procesos de activación alcalina de los CDW teniendo en cuenta la absorción inherente de los agregados finos, que en contacto con la fase líquida de la mezcla impiden la adecuada homogenización con los precursores del sistema. En la Figura 16 se observan las resistencias a compresión alcanzadas por los morteros dosificadas con arena natural y arena reciclada respectivamente.

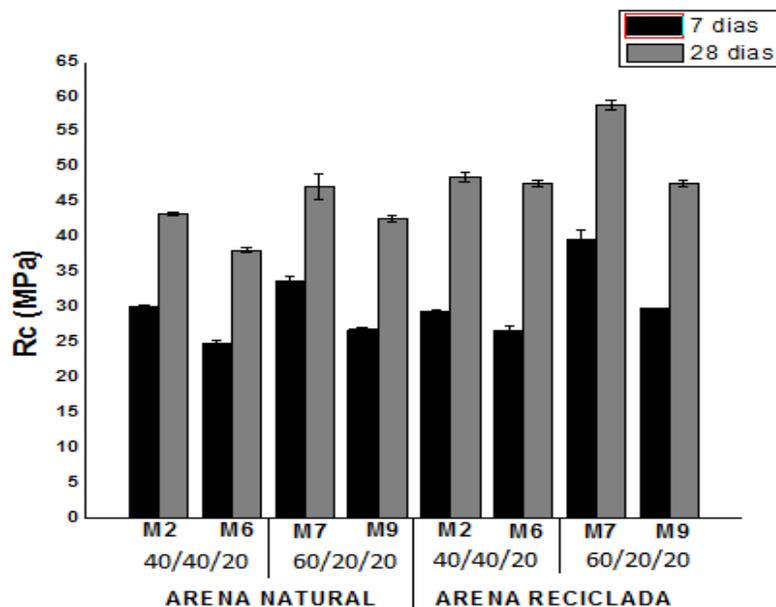


Figura 16. Resistencia a la compresión de morteros a 7 y 28 días.

De manera general, las resistencias mecánicas alcanzadas en morteros activados usualmente son inferiores a las logradas en pastas del mismo tipo, esto se atribuye a la presencia de partículas de agregado fino que actúan como concentradores de esfuerzos, induciendo la generación de grietas que se propagan alrededor de estos agregados (Lee, B. et al., 2017), sin embargo los resultados arrojados por este tipo de materiales muestran un comportamiento contrario, el desempeño mecánico de los morteros mejoró respecto a las resistencias exhibidas por las pastas, alcanzando valores máximos de hasta 43,3 y 47,2 MPa a 28 días para los sistemas producidos con arena natural en las proporciones 40/40/20 y 60/20/20 respectivamente.

Las mezclas obtenidas con arena reciclada M2 y M7 en las proporciones 40/40/20 y 60/20/20 respectivamente, tuvieron un comportamiento especial alcanzando hasta 48,6 y 58,8 MPa de resistencia a la compresión para los sistemas producidos con arena reciclada, esto se atribuye a que los agregados reciclados obtenidos a partir de trituración primaria de residuos de cerámica y baldosas presentan una superficie rugosa y con mayor porosidad respecto a los agregados naturales silíceos, siendo mayor el área de contacto del agregado con la matriz, incrementando la adherencia de las partículas de AR con la pasta activada alcalinamente. Por otro lado, la composición química de los agregados reciclados es similar a la de los precursores, lo que permite que exista una mayor interacción y reactividad con la solución activante, otorgando sinergia al sistema, dando como resultado la mejora de propiedades mecánicas (Bernal et al., 2011).

4.3.2.5 Producción de concretos activados alcalinamente.

El desarrollo de resistencia en los concretos se basa principalmente en su microestructura compacta, máxima formación de productos de reacción, un tamaño de poro pequeño y buena adherencia pasta-agregado; con base en estos parámetros se seleccionaron los morteros obtenidos con mayor resistencia a 28 días para la producción de concretos, siendo M2 y M7 las mezclas con mejor desempeño y trabajabilidad para las proporciones 40/40/20 y 60/20/20 respectivamente, no obstante, con el fin de producir concretos ecoambientales con un menor consumo de recursos no renovables y de acuerdo a los resultados obtenidos entre arena natural y arena reciclada, se decide trabajar con arena reciclada en la producción de los concretos activados alcalinamente.

De manera general en la Figura 17 se observa que el incremento de 400 a 500 Kg/m³ de masa de cementante produce el aumento de resistencia a compresión, este incremento corresponde a 21,62, 44,55 y 34,57% para edades de curado de 7, 28 y 90 días respectivamente para la mezcla de proporciones 40/40/20, mientras que el incremento para la mezcla 60/20/20 fue de 50,60, 41,92 y 33,26% para

edades de 7 días, 28 y 90 días respectivamente, estos resultados se atribuyen a la disponibilidad de mayor cantidad de pasta que rodea los agregados generando una mejor adherencia entre todos los componentes, además del aumento en el contenido de sílice y alúmina disponible para la formación de geles tipo C-A-S-H (Ibrahim et al., 2017), así como el aumento de OPC en la mezcla que induce a la formación de geles iniciales de C-S-H y un mayor calor de hidratación que otorga la energía de activación al sistema (Ma, C. et al., 2018) que finalmente resultan en el aumento de resistencias mecánicas. Cabe resaltar que el acople granulométrico obtenido con el uso de arena reciclada con la grava en proporciones de 50-50% respectivamente permite una buena compactación en los CAA atribuido a la adecuada gradación de agregados.

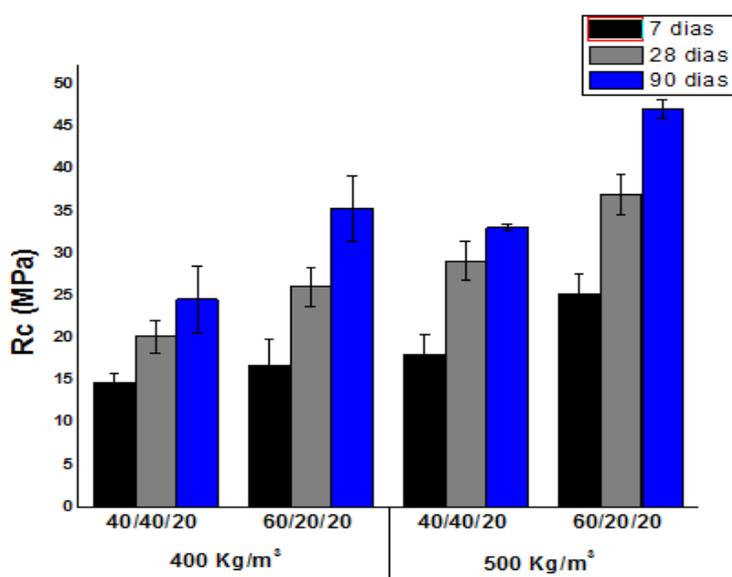


Figura 17. Resistencia a compresión mezclas óptimas para la producción de concreto con arena reciclada.

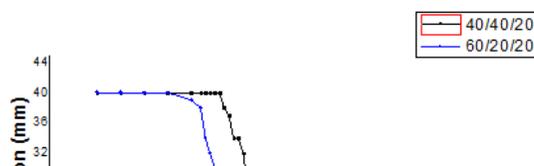
No obstante, la proporción de residuos de 60/20/20 muestra un comportamiento mecánico superior con respecto a la mezcla 40/40/20 alcanzando aumentos de hasta 42,51% para una edad de 90 días, este desempeño se puede atribuir al desarrollo de una zona de transición interfacial (ZTI) entre el agregado y la pasta de mayor densidad respecto a la formada por la mezcla de proporción 40/40/20, debido a la presencia de mayor contenido de compuestos de calcio que estimulan la formación de geles tipo C-A-S-H (Ding, Y. et al., 2016). Además las reacciones parciales adicionales entre la superficie de los agregados silíceos con el activador alcalino pueden promover la formación de enlaces adherentes entre las fases constituidas, con una mínima diferencia de resistencias entre la ZTI y el cementante, lo que resulta en el aumento del esfuerzo necesario para ocasionar la falla del material (Bernal et al., 2011).

En concretos convencionales la ZTI es el enlace más débil donde usualmente se desarrollan las microgrietas cuando el material se somete a cargas, mientras que en los CAA la alta concentración de álcali y la sílice soluble provenientes de la solución activante son esenciales para la formación de una fuerte interfase entre agregados y la pasta. Asimismo, el uso de Na_2SiO_3 como activador alcalino como fuente de SiO_2 libre promueve la formación de largas cadenas de geles C-A-S-H, de tal manera se minimiza la presencia de poros que afecten el desempeño de la interfase. La formación y adherencia en esta zona es de alta relevancia para determinar el comportamiento que tendrá el material en servicio; se ha identificado que cuando esta zona presenta una estructura de alta densidad contribuye a una mayor resistencia a la compresión, tracción indirecta, fuerza de enlace y durabilidad del CAA (Ibrahim, et al., 2017).

4.3.2.6 Tiempo de fraguado

En la Figura 18 se muestran los resultados obtenidos de tiempo de fraguado, en los materiales activados alcalinamente, esta propiedad se asocia a la trabajabilidad, la cual se rige por la formación inicial de geles de aluminosilicatos sódicos hidratados tipo C-A-S-H y N-A-S-H, que en etapas posteriores, son responsables del desarrollo de resistencia mecánica; el fraguado inicial corresponde al tiempo disponible para el transporte, colocación y compactación del concreto, mientras que en el fraguado final el concreto activado ha perdido por completo su plasticidad, algunos estudios establecen que el tiempo de fraguado depende de factores como la composición de la solución alcalina, la relación activador alcalino/cementante, relación Si/Al, contenido de CaO, entre otros (Siyala, A. et, al. 2016).

El fraguado inicial indica el momento en el que la masa ha adquirido tanta rigidez que no puede ser vibrado sin dañar su estructura interna, por lo tanto, el conocimiento del comportamiento y tiempo de fraguado es esencial, para planear los tiempos de acabado de una estructura o pavimento, en este sentido se observa que el tiempo de fraguado inicial para las proporciones 40/40/20 y 60/20/20 son 34,50 y 27,25 minutos respectivamente, el aumento en la proporción de residuo de concreto en el material precursor (la proporción del 60% de la mezcla respecto al 40%), supone la disminución de tiempo de fraguado, lo cual afecta negativamente la plasticidad y manejabilidad de la mezcla, debido a una mayor presencia de iones de Ca provenientes principalmente de este residuo y del OPC, estos iones aceleran la disolución de especies Si y Al, de tal manera se estimula la formación de cadenas de silicatos de las especies cercanas y se forman partículas sólidas con energía superficial relativamente baja debido al gran tamaño que presentan, las cuales se comportan como sitios de nucleación, se mejora la polimerización entre la sílice



soluble y las partículas sólidas formadas y se obtiene como resultado el aumento en la velocidad de endurecimiento (Lee. W, et al., 2002).

Figura 18. Tiempo de fraguado de las proporciones 40/40/20 y 60/20/20.

4.3.2.7 Asentamiento

La trabajabilidad de la mezcla de concreto se afecta por múltiples factores, entre los que se encuentran la morfología y tamaño de las partículas del precursor y agregado, la relación activador/cementante, la relación líquido/sólido, así como la combinación obtenida entre agregados finos y agregados gruesos; para este tipo de residuo CDW las partículas son angulares y con un tamaño de partícula alrededor de 30 μm , condiciones que decrecen significativamente la trabajabilidad del concreto respecto a partículas redondeadas, debido a que precursores con morfología angular contribuyen en la pérdida de trabajabilidad y disminuyen el tiempo de endurecimiento de la mezcla.

Fang, et al., 2018 clasificaron los materiales activados alcalinamente de acuerdo al asentamiento obtenido, de tal manera que cuando este valor es igual o superior a 90 mm se considera un concreto de alta trabajabilidad, para un valor entre 50 y 89 mm se considera como un concreto de trabajabilidad media, mientras que para asentamientos inferiores la trabajabilidad es baja, la mezcla de proporciones 40/40/20 arrojó un valor de asentamiento igual a 102,4 mm clasificándose como concreto de alta trabajabilidad, por otro lado la mezcla de proporciones 60/20/20 alcanzó 87,5 mm de tal manera que se considera de trabajabilidad media. En la Figura 19 se muestra el resultado del ensayo del cono de Abrams realizado a la mezcla 60/20/20.



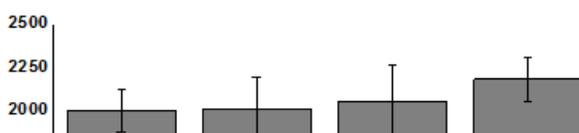
Figura 19. Slump obtenido para la mezcla 60/20/20 (500 Kg).

Al realizar el ensayo del cono de Abrams se observa que la mezcla se comporta de manera rígida y cohesiva, las relaciones usadas de líquido/cementante y activador/cementante de 0,40 y 0,39 respectivamente, aseguran una rápida reacción del residuo del concreto y el OPC con el activador alcalino, esto se puede atribuir a la adición de una fuente de calcio que modifica la cinética de reacción, gracias a la naturaleza divalente de este compuesto que genera fuerzas de interacción atractivas entre partículas disminuyendo la capacidad de deslizamiento entre cadenas de geles C-S-H y C-A-S-H formados a edades tempranas, reduciendo el flujo y la trabajabilidad de la mezcla (Laskar & Talukdar, 2017). Cabe resaltar que la arena reciclada presenta mayor porcentaje de absorción, lo que implica que parte del líquido será consumido por el agregado fino reduciendo la trabajabilidad respecto a concretos producidos con arenas naturales que son agregados redondeados y lisos.

4.3.2.8 Densidad, absorción y porosidad

En la

Figura 20 se muestran los resultados obtenidos de densidad, absorción y porosidad para las mezclas de proporciones 40/40/20 y 60/20/20 con 400 y 500 Kg de cementante por m^3 de concreto producido, se observa que la densidad fluctúa entre 1998 y 2180 Kg/m^3 alcanzando su mayor valor para la mezcla de proporción 60/20/20 con 500 Kg, los resultados obtenidos son acordes con las resistencias mecánicas obtenidas, que evidencia mejor comportamiento a esfuerzos de compresión a 7, 28 y 90 días; de manera general los concretos convencionales alcanzan densidades entre 2200 y 2550 Kg/m^3 , mientras que los concretos activados alcalinamente producidos presentan una menor densidad, esto se atribuye a la naturaleza del agregado fino utilizado, que presenta una densidad



menor a la arena natural, y su alto porcentaje de participación en la gradación granulométrica que alcanza el 50% del volumen de agregados usados en la mezcla.

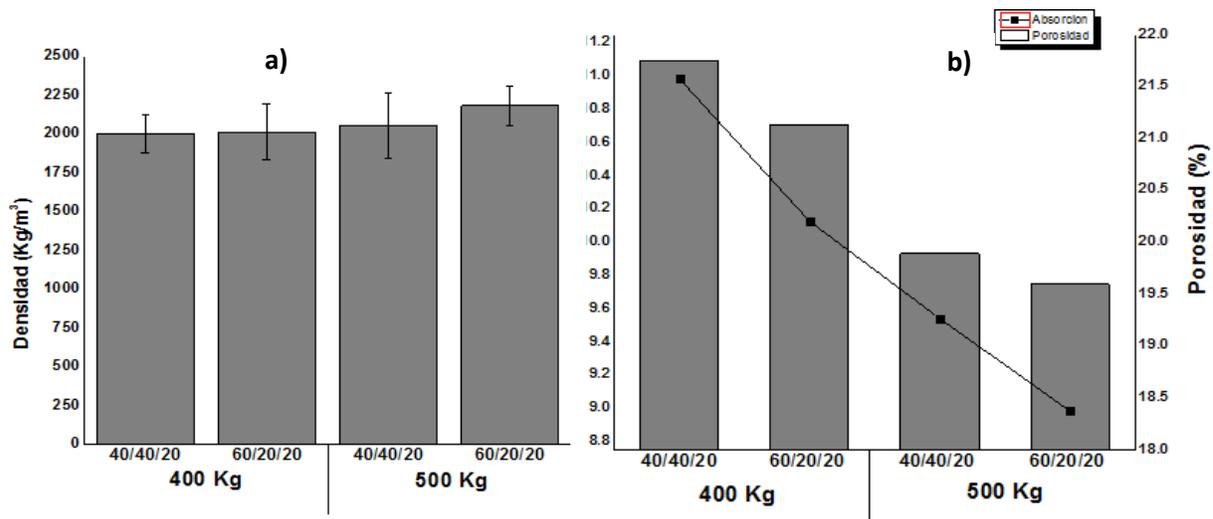


Figura 20. a) Densidad, b) absorción de agua y porosidad de los sistemas 40/40/20 y 60/20/20.

Bernal et al. (2018) afirman que el aumento de cementante por m³ de concreto promueve el incremento de densidad del material tal como se observa en la mezcla de 500 Kg, esto se atribuye a una mayor producción de geles que ocupan y reducen la porosidad del material; para las mezclas de 400 Kg de cementante se considera que no contiene suficiente aglutinante para generar la compactación completa, lo que produce una mayor cantidad de espacios vacíos e interconectados que permiten el flujo del agua.

Se observa en las mezclas de 500 Kg de cementante que la muestra de proporciones 60/20/20 muestra el mayor valor de densidad de 2180 Kg/m³ y la menor porosidad (19,59%), siendo coherente con el bajo porcentaje de absorción generado por la muestra con un valor 8,98% respecto a la mezcla 40/40/20, diferentes autores interpretan que el incremento de residuo de concreto se considera como fuente de calcio suficiente para la formación de un volumen considerable del gel C-A-S-H y productos tipo C-S-H, que resultan en el entrecruzamiento y su coexistencia en la matriz (Robayo et al., 2017), como resultado se obtienen estructuras de mayor compactación con una distribución de poros más finos.

4.3.3 Caracterización macro y microestructural de los CAA.

Figura 21 se aprecia la morfología superficial del material en estudio, las micrografías mediante MEB corresponden a la mezcla considerada como óptima para la producción de concretos de proporción 60/20/20 a x50, x2500 y x5000 aumentos a

edades de 7 y 28 días de curado, en las Tabla 6 y Tabla 7 se muestra la composición de elementos presentes en los puntos evaluados por EDS de las muestras.

De manera general mediante EDS se verifica la formación de estructuras ricas en Si, Al, O y Ca y en menor proporción de Na y Fe lo que sugiere la formación adecuada de geles correspondientes a procesos de activación alcalina; para las micrografías que corresponden a una edad de 7 días se evidencia partículas de CDW sin reaccionar y la formación inicial de un gel poco compacto y voluminoso correspondiente a los productos de reacción tipo C-A-S-H y C-S-H en la matriz, mientras que para la edad de 28 días se observa que el material cuenta con una estructura compacta y homogénea, así como la menor presencia de partículas sin reaccionar, lo cual sugiere una mayor formación de geles. Lo anterior, es corroborado por los resultados obtenidos en el desempeño mecánico del material en los cuales al aumentar el tiempo de curado existe un aumento en la resistencia a la compresión debido a una mayor formación de geles y productos de reacción, cabe resaltar la presencia de grietas a lo largo de la matriz que limitan la continuidad de la matriz y aumentan la fragilidad, disminuyendo la adherencia con agregados del material tipo concreto.

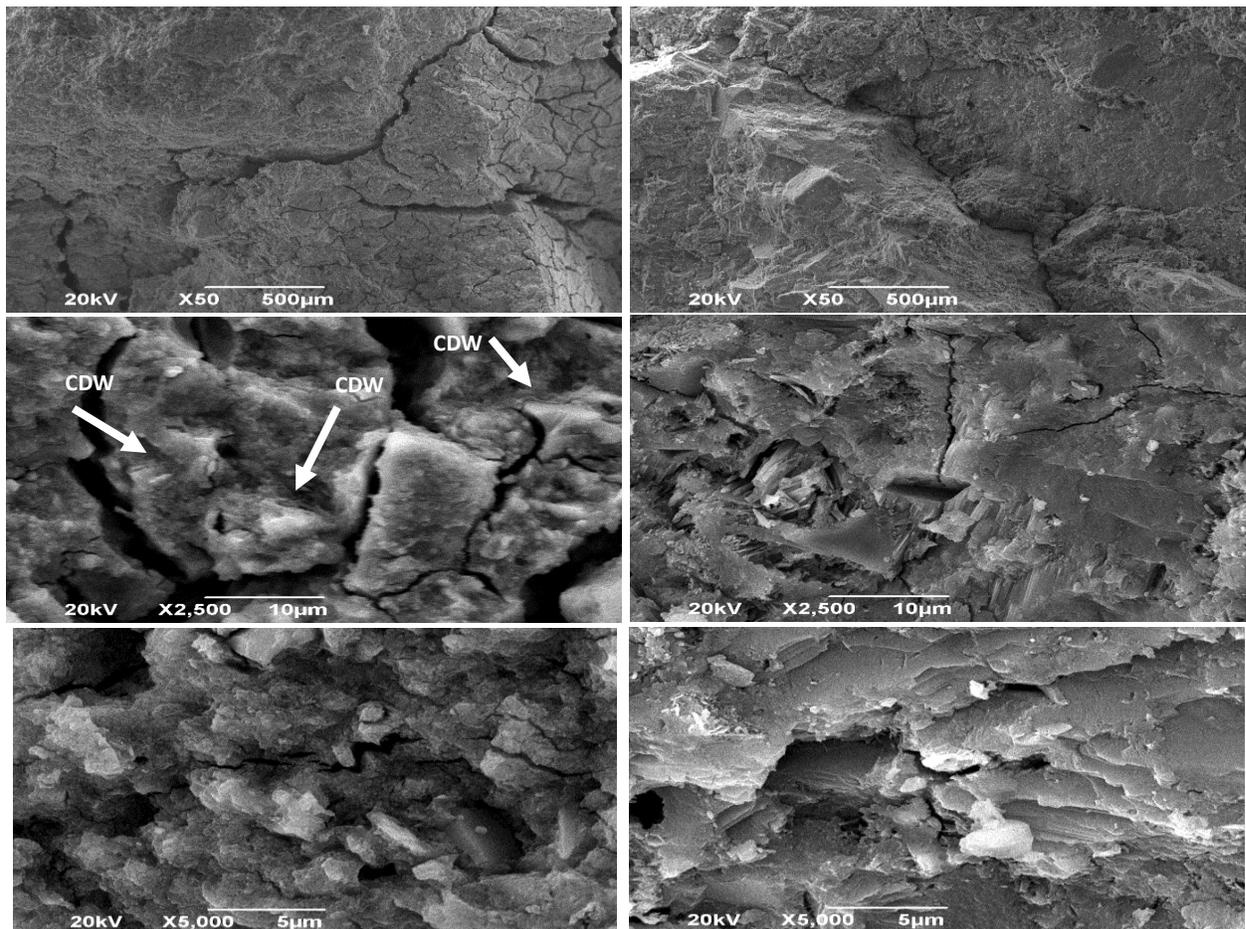
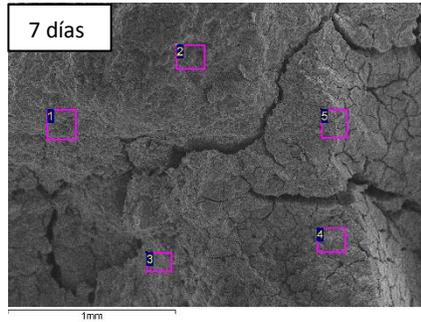


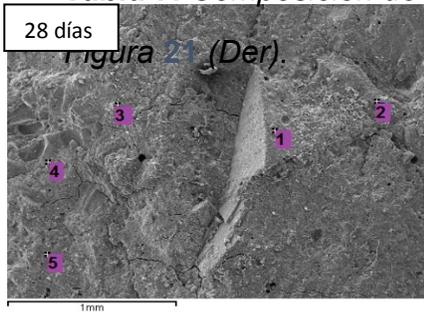
Figura 21. Micrografías MEB de concreto a partir de CDW en proporciones 60/20/20 a edades de 7 (Izq.) y 28 (Der) días a 50x, 2500x y 5000x aumentos.

Tabla 6. Composición de elementos medidos por EDS de la Figura 21 (Izq).



Espectro	O	Al	Si	Ca	Na	Fe
1	50.92	5.5	19.2	8.59	10.38	3.8
2	54.05	3.88	17.85	11.27	12.95	0
3	52.37	6.49	18.04	7.12	12.12	3.86
4	53.74	9.43	21.63	7.13	5.91	0
5	55.99	4.76	19.28	7.78	12.19	0

Tabla 7. Composición de elementos medidos por EDS de la



Espectro	O	Al	Si	Ca	Na	Fe
1	40.04	4.06	17.2	6.27	18.1	14.33
2	34.45	3.44	22.66	10.25	24.54	4.65
3	40.76	8.43	25.28	8.56	12.15	4.82
4	38.26	7.87	35.65	6.99	7.43	2.75
5	41.25	5.67	21.28	12.8	16.00	3.00

Debido a la similitud en la composición de los elementos que integran el concreto producido, se dificulta analizar la interfase formada mediante micrografías MEB, se procede a la captura de imágenes mediante el estereoscopio, en las que se visualiza una interfase homogénea y continua, libre de grietas o porosidad que dificulten la adherencia de los agregados con la matriz, se atribuye por lo tanto que las altas resistencias a compresión obtenidas se deben al incremento del esfuerzo requerido para hacer que el material falle por la interfase; en las Figura 22a y 22b se observan partículas de agregados finos y gruesos embebidos fuertemente en la matriz de CDW activada alcalinamente.

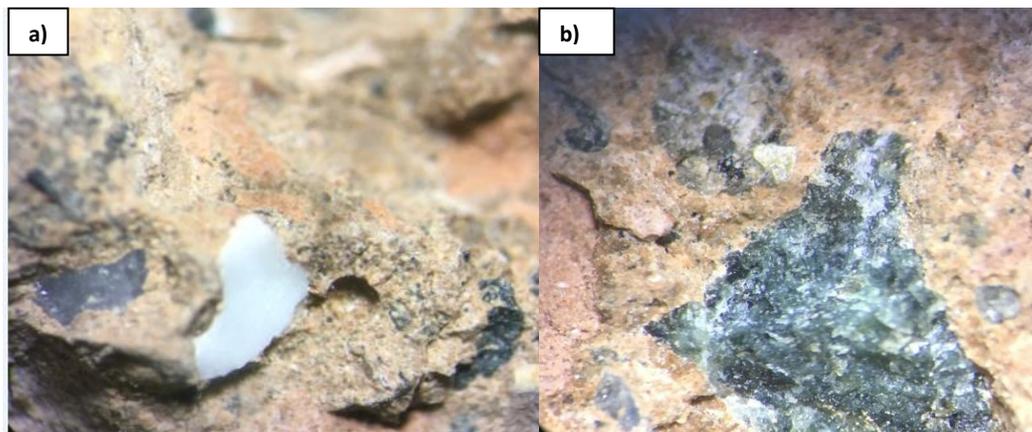


Figura 22. *Imágenes de interfase a) matriz-agregado grueso y b) matriz-agregado fino, obtenidas mediante estereoscopio.*

4.4 CONCLUSIONES

Se evaluó la factibilidad de producir un concreto activado alcalinamente a partir de residuos de concreto, ladrillo y cerámica provenientes de actividades de demolición y construcción integrados en mezclas de proporciones de 40/40/20 y 60/20/20 para los residuos mencionados respectivamente.

Los resultados muestran que la relación Si/Al es el parámetro de mayor influencia en la resistencia a compresión del material, valores entre 6,3 y 7,2 reportan resistencias de hasta 38 MPa en pastas activadas alcalinamente con la adición de 10% de OPC. El comportamiento mecánico en la producción de morteros se potencializó al usar arena reciclada a partir de procesos de trituración de residuos de mortero de baldosa y cerámica, debido a la forma angular y rugosa de sus partículas, que generan un mayor anclaje en la matriz y mejoran la interfase formada, así como la sinergia que se genera entre estas dos fases que muestran composiciones similares y por lo tanto pueden generar un acople químico. Las características de los concretos activados alcalinamente se rigen por la cantidad de cementante por m³ de concreto utilizado, siendo el valor de 400 Kg/m³ una masa insuficiente para la producción de geles tipo C-A-S-H y C-S-H, necesarios para la aglomeración de agregados, mientras que valores de 500 Kg/m³ permiten alcanzar resistencias a la compresión de hasta 33,10 y 47,17 MPa a 90 días para las mezclas 40/40/20 y 60/20/20. El tiempo de fraguado y las pruebas de asentamiento se vieron afectadas por el porcentaje de residuo de concreto presente en la mezcla, así al aumentar el contenido a un 60% se disminuye el tiempo de fraguado inicial a 27,25 minutos y el asentamiento a 87,5 mm, que así se clasifican como concretos de trabajabilidad media.

5. SUSTITUCIÓN DE 0, 5, 10 Y 15% DE AGREGADO FINO POR CAUCHO RECICLADO Y PRODUCCIÓN DE CONCRETOS PARA PAVIMENTOS.

5.1 INTRODUCCIÓN.

El manejo y disposición de residuos sólidos se considera el nuevo tópico al que se deben enfrentar las entidades gubernamentales de cada país, el crecimiento en infraestructura vial, el volumen de producción de vehículos y con ello los desechos de la industria automovilística, constituyen indicadores de nivel de desarrollo en las sociedades, un claro ejemplo de ello es la cantidad de llantas consumidas por año, tan solo en el 2010 el consumo de caucho al nivel mundial alcanzo 24,9 millones de toneladas, países de alto desarrollo como Estados Unidos producen aproximadamente 3,9 millones de toneladas de caucho cada año, de las cuales solo el 35% son recicladas y el 65% son quemadas o dispuestas en vertederos (Thomas, B. et al., 2016), estimaciones del sector automovilístico prevén que para el año 2024 se alcanzará un crecimiento superior al 25% a nivel mundial y se producirán alrededor de 335 millones de llantas en la Unión Europea por año (Youssf, O. et al., 2016).

La disposición del elevado porcentaje de materiales poliméricos como las llantas se considera una operación costosa, teniendo en cuenta el gran volumen que ocupan en los rellenos sanitarios como resultado de la baja densidad que los caracteriza. La contaminación producida por este tipo de desechos en los sitios de disposición al final de su ciclo de vida, ha sido denominada “polución negra” en especial debido a los problemas de salud pública, ambientales y estéticos que producen, así como el alto riesgo de combustión que presentan (Youssf, et al. 2017).

En el intento de reducir este tipo de residuo, se han realizado diferentes investigaciones que incorporan el caucho proveniente de llantas neumáticas de desecho en algunos materiales de construcción, este caucho se obtiene después de un proceso de extracción del acero y los posibles contaminantes, y de la reducción de tamaño con un granulador o molino de craqueo, como resultado se generan diferentes granulometrías y morfologías del caucho molido que afectan las propiedades de los materiales compuestos en los que se incluyen.

La industria cementera ha promovido el uso de caucho molido como reemplazo parcial y/o total de agregados naturales (Bashar, M. et al., 2018), en especial en aquellos lugares donde la extracción en canteras o ríos es limitada, o bien, cuando el costo del transporte de agregados no hace viable su uso en la producción de concretos. Actualmente ha incrementado el interés en el uso de concreto rígido en la

pavimentación de carreteras, debido a que se mejora la durabilidad y se reduce el costo creciente de mantenimiento y el impacto ambiental que generan los productos derivados del petróleo, cuando se compara con un pavimento flexible o asfáltico.

La inclusión de caucho a partir de llantas en el concreto para la construcción de pavimentos se considera una interesante alternativa que promueve un novedoso uso de este material, reduciendo la cantidad de este residuo en los sitios de disposición y al mismo tiempo la disminución del volumen de materiales precursores necesarios para la producción de concretos rígidos, de tal manera se mitiga el impacto ambiental asociado a la obtención de recursos.

En el presente capítulo de este trabajo investigativo se evaluó el efecto de la inclusión de 0, 5, 10 y 15% de caucho molido con dos morfologías diferentes, particulado y tipo fibra, en las propiedades mecánicas y físicas de un concreto activado alcalinamente a partir de CDW, los resultados permiten validar el cumplimiento de las especificaciones mínimas para ser considerado apto para la producción de pavimentos rígidos, tras la medición de parámetros como resistencia a compresión, módulo de rotura en esfuerzos a flexión, densidad, asentamiento, permeabilidad y resistencia a la abrasión, el análisis microestructural mediante MEB y las imágenes obtenidas por estereoscopio de la interfase formada matriz-caucho permiten explicar algunos de los valores obtenidos .

5.2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

5.2.1 Materiales.

Los materiales empleados para llevar a cabo esta etapa del proceso fueron:

- Concreto reciclado (material precursor).
- Ladrillo reciclado (material precursor).
- Cerámica reciclada (material precursor, arena reciclada).
- Hidróxido de sodio (NaOH - Activador alcalino).
- Silicato de sodio (Na_2SiO_3 - Activador alcalino).
- Grava Natural (TMN: 25,4 mm).
- Caucho reciclado (nodular y fibras).

5.2.2 Obtención de muestras.

Los concretos activados alcalinamente se prepararon a partir de la proporción óptima resultante del diseño de mezclas planteado para activar alcalinamente residuos de demolición y construcción (CDW), se usó como parámetro de selección la resistencia mecánica del material a 28 días de curado, la proporción corresponde

a la mezcla denominada 60/20/20 con 500 Kg de cementante por m^3 de concreto y una relación Si/Al de 6,8. Como solución activante se utilizó una mezcla de hidróxido de sodio industrial (NaOH) y silicato de sodio comercial (Na_2SiO_3) distribuido por Productos Químicos Panamericanos ($SiO_2=30,29\%$, $Na_2O=14,57\%$, $H_2O=54,74\%$) se mantuvo una relación L/S constante de 0,40 para todas las mezclas con el fin de garantizar la trabajabilidad del concreto. El porcentaje de sustitución (wt.) de caucho en función del agregado fino a reemplazar se varió en 4 niveles: 0, 5, 10 y 15%, se evaluaron 2 tipos de morfología de caucho, que se muestran en la Figura 23, particulado (a) y tipo fibra (b). Se realizaron 8 mezclas con dos repeticiones de cada una para un total de 16 mezclas.

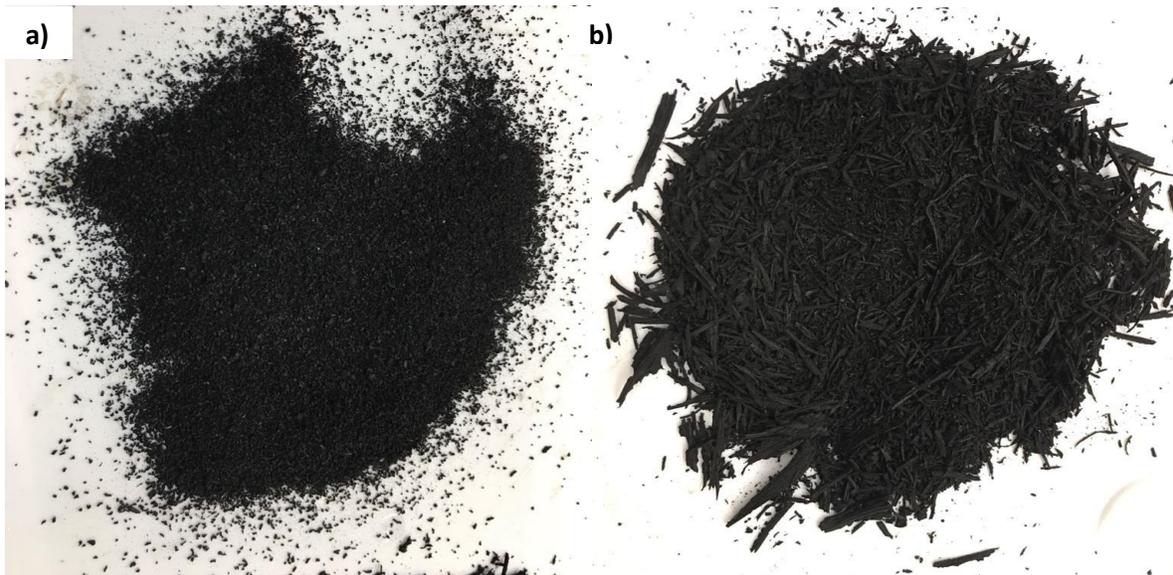


Figura 23. Morfología de caucho para el reemplazo parcial de agregado fino en la producción de concretos, tipo particulado (a) y tipo fibra (b).

Los concretos activados alcalinamente se produjeron utilizando una mezcladora planetaria Creteangle, el procedimiento consistió en la homogenización de los componentes sólidos del precursor y el OPC durante 1 minuto, luego se adicionó la solución activante ($NaOH+Na_2SiO_3$) disuelta en el agua y preparada 30 minutos antes de iniciar el mezclado para alcanzar la temperatura ambiente del activador, se mezcló por 2 minutos hasta obtener una pasta homogénea, posteriormente se agregó el caucho y se mezcló durante 15 segundos para garantizar su adecuada inclusión en la mezcla, luego se adicionó la arena reciclada (AR) y se mezcló durante 1 minuto, finalmente se agrega grava natural de tamaño máximo nominal 25,4 mm dejando mezclar durante 30 segundos, seguido se vació la mezcla en cilindros de relación 1:2 y moldes rectangulares de 300x100x100 mm para la conformación de vigas de concreto, en ambos procesos se vibró la mezcla en el molde durante 30 segundos para eliminar la presencia de aire atrapado y la

formación de poros. Las muestras obtenidas fueron sometidas a curado a temperatura ambiente (25 °C) en una cámara húmeda (H.R > 90%).

5.2.3 Técnicas de caracterización.

La microestructura del material se analizó mediante un microscopio electrónico de barrido (MEB), JEOL JSM-6490LV. Este equipo cuenta con un detector INCAPentaFETx3 marca Oxford Instruments Modelo 7573. Previo al análisis las muestras se recubrieron con oro por medio de deposición en una unidad de vacío dentro del tanque VacuumDesk IV. También se utilizó la unidad de análisis EDS para determinar de manera semicuantitativa la composición química de los materiales analizados.

La morfología, características y defectos de las interfases formadas entre matriz-agregados y matriz-caucho incluido en las mezclas de concreto se analizaron macroscópicamente mediante el uso de un estereoscopio Nikon SMZ1000.

5.2.4 Caracterización mecánica.

La caracterización mecánica se realizó en la máquina universal de ensayos Instron 3369 con una velocidad de carga de 1 N/min y un desplazamiento de 1 mm/min, se evaluó la resistencia a la compresión y a la flexotracción a 7, 28 y 90 días de curado, de acuerdo a la norma ASTM C109 y la C78 para cada ensayo respectivamente. En la Figura 24, se muestra el montaje realizado para reproducir condiciones abrasivas a las cuales está sometido un pavimento en servicio, regido por la NTC 5147.



Figura 24. Montaje ensayo de desgaste abrasión NTC 5147.

El ensayo consistió en someter una muestra del material a desgaste por medio de la abrasión ejercida, bajo condiciones controladas, por un flujo de arena que pasa tangencialmente entre la superficie del material y la cara lateral de un disco metálico que ejerce presión contra ella, el disco metálico es un acero A36 con una dureza aproximada de $200 \text{ HB} \pm 20 \text{ HB}$, las dimensiones de diámetro y ancho según la norma corresponden a $200 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ y $70 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ respectivamente, el disco debe girar a una tasa de 75 revoluciones en $60 \text{ s} \pm 3 \text{ s}$, la presión ejercida junto a la acción de la arena genera una huella en el concreto, cuya longitud resultante es inversamente proporcional a la resistencia al desgaste por abrasión del material.

5.2.5 Caracterización física.

La caracterización física en estado fresco para los concretos activados alcalinamente con la inclusión de caucho se realizó mediante la medición del asentamiento o *slump* con el cono de Abrams, empleando la norma ASTM C143. Para el estado endurecido, la caracterización se realizó mediante la medición de la densidad, volumen de poros y absorción de agua del concreto producido con y sin inclusión de caucho, según los procedimientos detallados en la norma ASTM C642-13. En la Figura 25 se muestra el montaje realizado para cuantificar la cantidad de agua que puede permear una muestra cilíndrica de concreto por minuto.

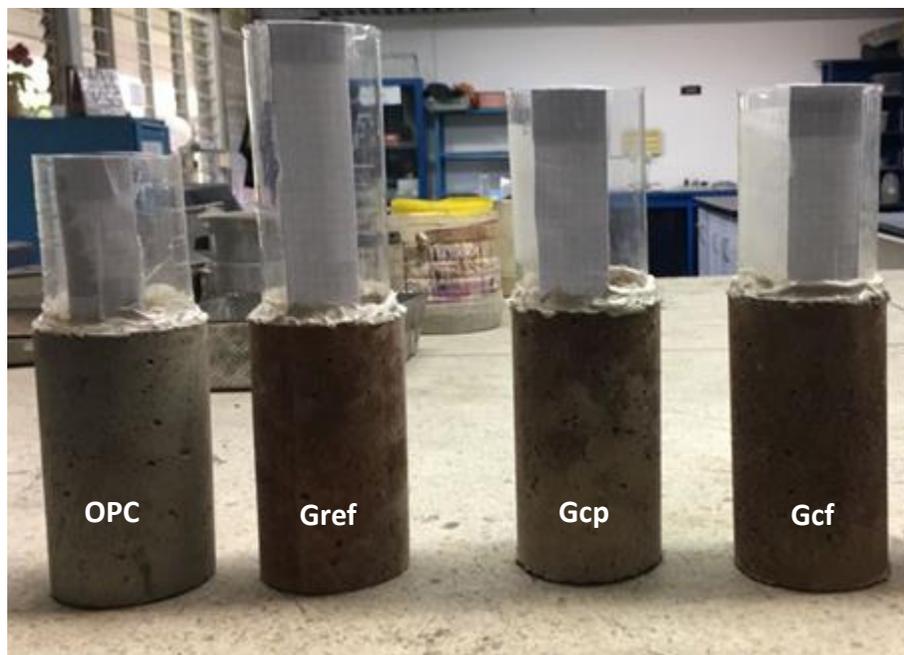


Figura 25. Montaje en ensayo de permeabilidad de agua en cilindros de concretos con y sin adición de caucho molido

Para ello se usaron tubos de polipropileno adheridos a la superficie lisa del concreto, se adicionaron 300 g de agua a cada uno y se pesó el agua permeada cada 5 minutos, cabe resaltar que durante los primeros 5 minutos la medida se realizó cada minuto. Las muestras evaluadas corresponden a una muestra de concreto convencional y tres de concreto activado alcalinamente que se consideraron mezclas óptimas, estas tres muestras corresponden a concreto activado alcalinamente sin adición (Gref), una con adición del 5% de caucho particulado (Gcp) y una con adición del 5% de caucho tipo fibra (Gcf).

5.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.3.1 Caracterización mecánica.

5.3.1.1 Resistencia a compresión.

La sustitución parcial de agregados finos por partículas de caucho afecta negativamente el comportamiento mecánico de los concretos activados alcalinamente a partir de CDW, debido a que se reemplazan agregados cerámicos por partículas de baja densidad y menor rigidez. Sin embargo, a pesar de la disminución de la resistencia a la compresión con la adición de caucho, se considera que los resultados obtenidos permiten utilizar el concreto en cualquier aplicación estructural o no estructural que requiera resistencias entre 17,1 y 32,38 MPa a 28 días exhibiendo un comportamiento dúctil ante fallas o fracturas, esto se puede atribuir a la morfología angular y superficie relativamente rugosa con indentaciones esféricas como resultado de procesos de trituración y molienda (Thomas, B. et al., 2016), lo cual contribuye al anclaje de estas partículas en la matriz contrarrestando la baja adherencia que existe entre el caucho y el material cementante. En la Figura 26 se muestra la disminución de la resistencia a la compresión cuando se adiciona caucho particulado o el tipo fibra.

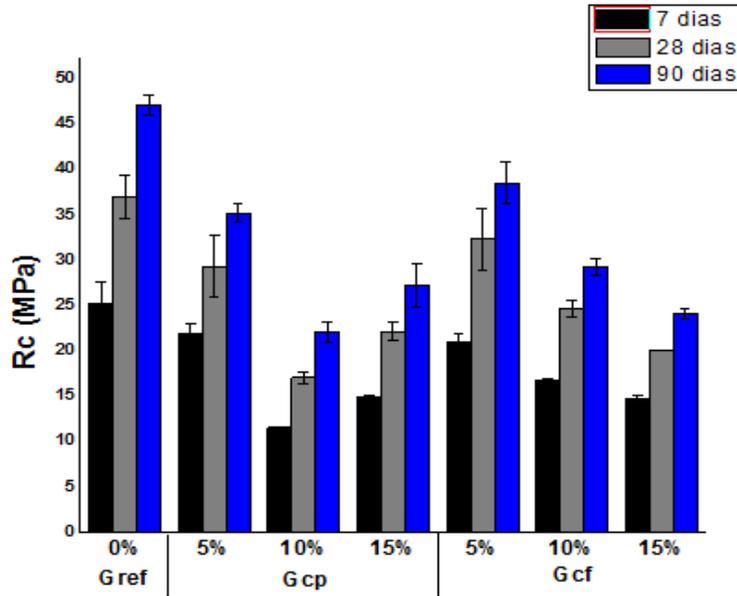


Figura 26. Resistencia a la compresión de concretos activados alcalinamente con adición de 0, 5, 10 y 15 % del caucho particulado y del tipo fibra.

Se observa que la resistencia a compresión disminuye con el incremento del porcentaje de contenido de caucho, para reemplazos del 5, 10 y 15% de agregado fino por caucho particulado se obtuvo disminuciones de hasta 25,26, 53,11 y 42,30% a una edad de 90 días, mientras que para el caucho en forma de fibra para porcentajes idénticos se obtuvo disminuciones del 18,26, 37,91 y 48,91% a 90 días, alcanzando su mayor valor con el reemplazo del 5% para ambas morfologías de caucho, siendo en promedio de 35,26 y 38,56 MPa para cada una de las morfologías respectivamente. Estudios previos coinciden que este porcentaje se considera como el reemplazo óptimo de agregados finos (Bisht & Ramana, 2017) y que contribuye a la mejora de propiedades físicas sin afectar de manera considerable las propiedades mecánicas. Cabe resaltar que el vibrado de las muestras con inclusión de caucho dificulta la distribución de las partículas poliméricas en el concreto debido a la menor densidad que las ubica en la superficie de la muestra, de tal manera se afecta la uniformidad de la muestra a ensayar (Ganjian, E. et al., 2009).

5.3.1.2 Resistencia a la flexión.

La inclusión de partículas de caucho en la mezcla de concreto activado generó un incremento de la resistencia a flexión cuando el reemplazo fue 5% para las morfologías particulada y tipo fibra, porcentajes mayores conllevan a la disminución del módulo de rotura del material. De manera general la forma del agregado es uno de los factores de mayor influencia en la ruptura a flexión respecto a otros ensayos, debido a la presencia de un gradiente de esfuerzos que induce la generación de

grietas, las formas irregulares características del caucho hacen al concreto susceptible a la falla acelerada. No obstante, la inclusión del 5% permite que el material más fino entre en zonas intersticiales, por lo tanto funciona como relleno, se disminuye la porosidad del material y se aumenta la resistencia mecánica. En la

Figura 27 se muestra el comportamiento de los concretos con 0, 5, 10 y 15% de reemplazo de agregado fino por caucho particulado y tipo fibra.

La muestra de referencia (0% de reemplazo) exhibió una falla frágil, luego de la fisuración inicial, la falla se propago rápidamente, dividiendo la muestra en 2 piezas, mientras que las muestras que contenían caucho tipo fibra exhibieron deformación de la muestra sin desintegración total, estos resultados concuerdan con lo planteado por autores como Youssf O. et al. (2017), quienes afirman que el caucho puede absorber la energía de deformación de la expansión de grietas mejorando la tenacidad del material y reduciendo la fragilidad del concreto, con esto se logra un efecto puente entre grietas.

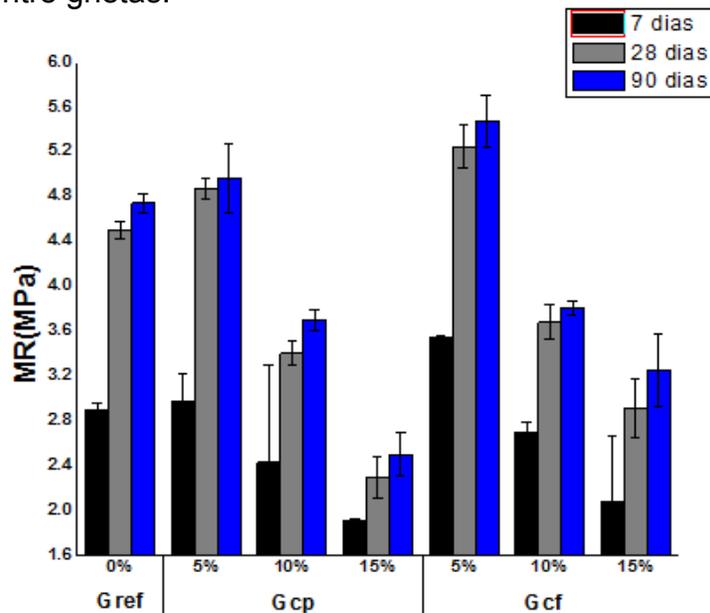


Figura 27. Resistencia a flexión de concretos activados alcalinamente con adición de 0, 5, 10 y 15 % de caucho particulado y tipo fibra.

La inclusión del 5% de caucho incrementa la resistencia a flexión a 28 días en comparación con el concreto de referencia en un 8,28 y 23,14% para la morfología particulada y tipo fibra, mientras que la inclusión de un 15% decrece la resistencia en un 48,97 y 35,43% para las respectivas formas, este resultado se debe a la baja adherencia característica del caucho con el material cementante que genera porosidad entre ellos, lo cual resulta en una ZTI débil. El aumento en el porcentaje de reemplazo de agregado fino incrementa el tamaño de las cavidades formadas disminuyendo los puntos de enlace en el concreto, este comportamiento se intensifica con la morfología particulada debido a su mayor área superficial con

respecto al caucho tipo fibra (Naji, et al. 2017). El mayor valor de módulo de rotura alcanzado fue de 5,48 MPa para el concreto con inclusión de 5% de caucho tipo fibra a 90 días, mientras que el menor valor alcanzado fue de 2,5 MPa para el concreto con inclusión de 15% de caucho particulado a la misma edad.

5.3.2.3 Ensayo resistencia a la abrasión.

El desgaste en concretos se produce por el efecto abrasivo que genera el contacto entre la superficie de dos materiales, esta propiedad es altamente influenciada por factores como la resistencia y dosificación del concreto, la calidad y propiedades del agregado y las adiciones de fibra, existen también factores adicionales como las condiciones de curado y el terminado superficial del material, mientras que en los concretos activados alcalinamente es importante el tipo de precursor y las relaciones de activador alcalino/precursor utilizado en la mezcla (Thomas, et al. 2014). De acuerdo con estos factores, se observa que las muestras reportadas con los mayores resultados de resistencia a compresión a 28 días exhiben el mejor comportamiento al desgaste por abrasión, por lo cual se corrobora la correlación entre estos parámetros de resistencia, los cuales se atribuyen a la alta compactación de la estructura que se evidencia en la densidad del material y el contenido mínimo de poros en la matriz.

En la Tabla 8 se muestran los resultados de longitud de huella exhibidos por las muestras de concretos activados alcalinamente como referencia (Gref), así como los adicionados con 5% de caucho particulado (Gcp) y 5% de caucho tipo fibra (Gcf), se muestra también los resultados exhibidos por una muestra de adoquín vehicular comercial utilizado en la construcción de pavimentos prefabricados.

Tabla 8. Longitud de huella resultante del desgaste por abrasión exhibida por concretos activados alcalinamente y una muestra comercial de adoquín vehicular.

MUESTRA	DIMENSIONES LONGITUDINALES			HUELLA LONGITUDINAL (mm)
	CD	AB	EF	
Gref	26	24,7	17,3	25,0
Gcp	23,3	24,5	22,7	23,5
Gcf	18,3	19,7	21,5	20,5
Adoquín vehicular	18,7	16,8	18,5	17,7
LONGITUD DE LA HUELLA MÁXIMA PERMITIDA NTC 5147				23,0

La adición de caucho usualmente aumenta la tendencia del material a desgastarse, autores reportan que la incorporación de 5,5% de caucho aumenta la huella de desgaste en 0,14 mm respecto a la muestra de control, esto se debe a que cuando el concreto es sometido a vibración el caucho tiende a ubicarse en la superficie del

material como consecuencia de la menor densidad que presenta, generando debilitamiento en la zona debido a la poca adherencia entre las partículas de caucho y la matriz, y ocasionando el fácil desprendimiento en condiciones abrasivas (Bisht, et al. 2017).

La NTC 5147 especifica que el valor promedio de la longitud de huella no podrá ser mayor a 23 mm, los resultados obtenidos de las muestras de concreto activado evidencian en su mayoría valores superiores al permitido por la norma haciendo que su comportamiento no sea el adecuado para la construcción de pavimentos rígidos, sin embargo se observa que la adición del 5% de caucho aumenta la resistencia del material a la abrasión con referencia a Gref, siendo el caucho en forma de fibras el óptimo para su aplicación en este tipo de concretos, ya que alcanza una huella longitudinal de 20,5 mm, este comportamiento se le atribuye a que durante la prueba de abrasión las fibras de caucho en el concreto restringieron la acción abrasiva actuando como una especie de cepillo que minimiza la fricción, de tal forma se inhibe la acción del polvo abrasivo sobre la superficie (Thomas, B. et al., 2016). En la Figura 28 se evidencia la huella de desgaste resultante del ensayo.

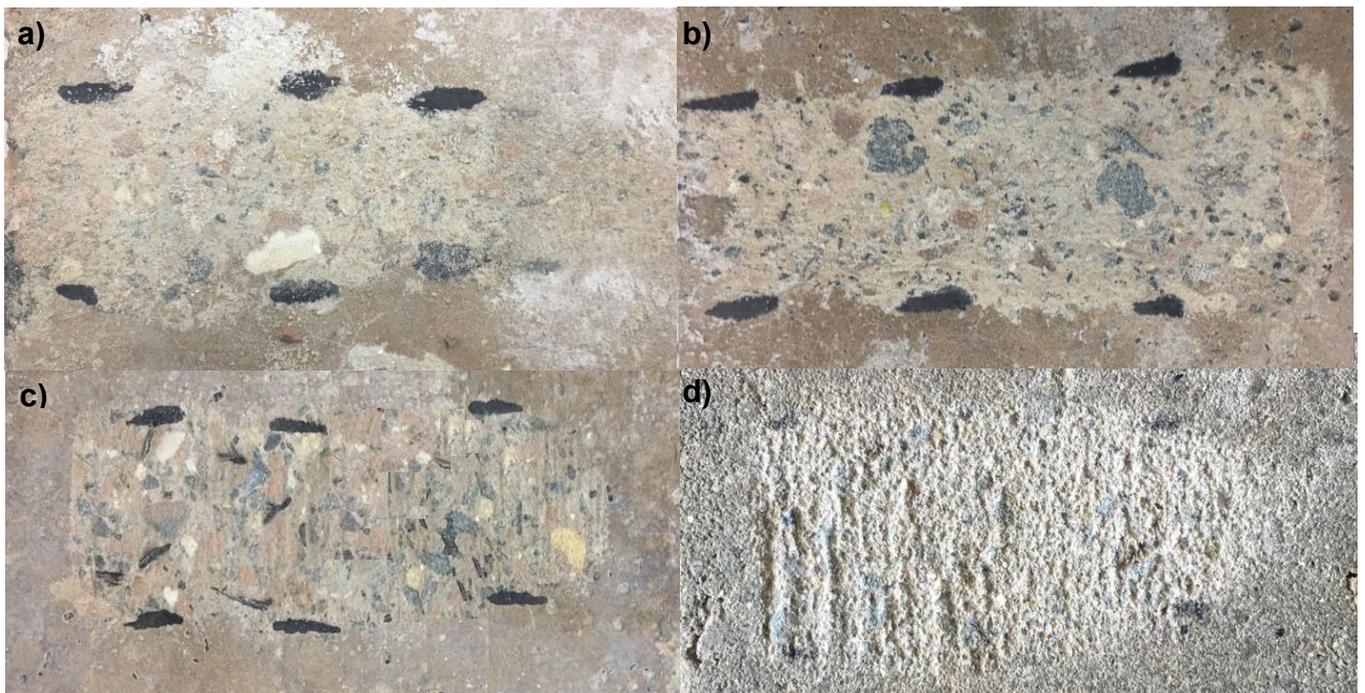


Figura 28. Huella resultante del ensayo de resistencia a la abrasión de concreto
a) Referencia, b) 5% de caucho particulado, c) 5% de caucho tipo fibra y d)
adoquín comercial prefabricado para pavimento.

Cabe resaltar que el adoquín vehicular comercial presenta una alta resistencia al desgaste respecto a las muestras de concreto activado, esto se puede atribuir al

tipo de agregados que contiene la mezcla, que presentan un menor tamaño, generando mayor área de contacto entre la matriz y el agregado, lo cual contribuye a una mejor adherencia con la interface e incrementa la resistencia al desgaste, sin embargo también se puede observar que la profundidad de la huella es mayor, lo cual se atribuye al poco contenido de agregado grueso en comparación del alto contenido de agregado fino, de tal manera se incrementa la tendencia al desprendimiento de la partículas, ya que funcionan como puntos concentradores de esfuerzos que inducen a la formación de grietas (Thomas, et al. 2016).

5.3.1 Caracterización macro y microestructural del CAA con inclusión de caucho.

En la Figura 29 se puede observar la morfología superficial del concreto con inclusión de caucho, las micrografías mediante MEB x50 aumentos, corresponden a las mezclas con reemplazo de 5% de agregado fino por caucho (a y b) particulado y (c y d) tipo fibra, en la Tabla 9 y en la Tabla 10 se muestra la composición de elementos presentes en los puntos evaluados por EDS de las muestras.

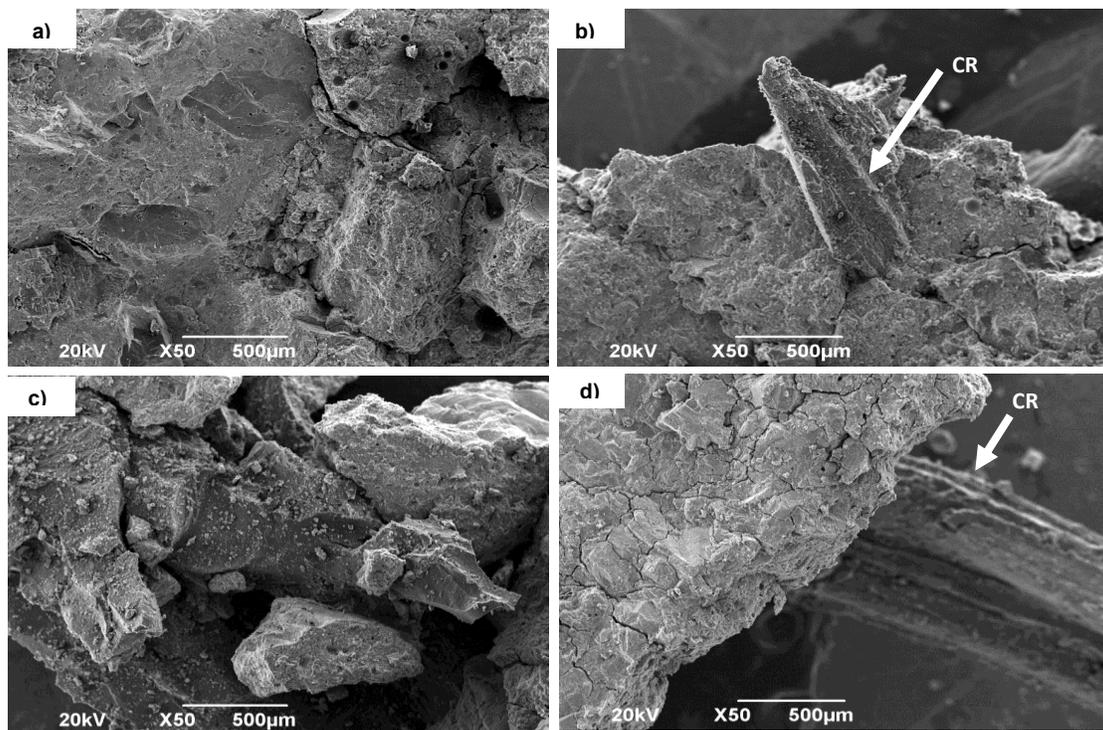


Figura 29. Micrografías MEB concretos activados alcalinamente con inclusión de 5% de caucho (a y b) particulado y (c y d) tipo fibra.

Mediante EDS se verifica la presencia de partículas poliméricas constituidas por enlaces C-C rodeadas de matriz del cementante activado alcalinamente con estructuras ricas en Si, Al, O y Ca y en menor proporción de Na y Fe. Las micrografías *b* y *d* permiten visualizar partículas de caucho incrustadas en el concreto activado alcalinamente, de manera general se evidencia la presencia de grietas y espacios vacíos alrededor de dichas partículas, que limitan la continuidad de la matriz y debilitan la ZTI al inhibir las fuerzas adhesivas, como resultado se disminuye la resistencia mecánica al interrumpir la transferencia de cargas en el material, con lo cual se disminuye la capacidad total de carga del concreto. También es posible visualizar la forma irregular de las partículas de caucho y su superficie levemente rugosa, que contribuye a mejorar el anclaje en la matriz.

Tabla 9. Composición de elementos medidos por EDS de la

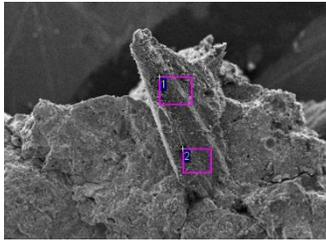


Figura 29 (b).

Espectro	C	O	Al	Si	Ca	Na
1	56.86	32.33	0	0	6.66	4.15
2	50.77	36.77	0	8.07	4.39	0

Tabla 10. Composición de elementos medidos por EDS de la

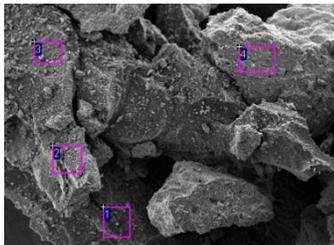


Figura 29 (c).

Espectro	C	O	Al	Si	Ca	Na
1	41.91	42.85	0	5.15	10.09	0
2	65.82	26.60	1.01	2.74	1.74	2.09
3	0	61.03	0	12.64	11.19	15.14
4	0	48.33	5.21	21.77	11.56	7.31

En la figura 28.c se visualiza la presencia de cavidades alrededor del caucho que facilitan la permeabilidad e incrementan la absorción del material.



Figura 30. Imágenes de interfase matriz-agregado obtenida mediante estereoscopio a) Referencia, b) 5% de caucho particulado y c) 5% de caucho tipo fibra.

De manera general se observa que las partículas de caucho de ambas morfologías no se encuentran totalmente embebidas en el material cementante, dando lugar a una interfase débil que induce a la propagación de grietas y corrobora la baja adherencia que presenta este polímero en una matriz cementicia reportada por la mayoría de los autores (Bisht, et al. 2017 & Thomas, et al. 2016).

5.3.3 Caracterización física.

5.3.3.1 Asentamiento.

En la Tabla 11 se muestran los resultados de *slump* o asentamiento obtenidos del ensayo por cono de Abrams para los porcentajes de caucho sustituidos. De manera general, la inclusión de caucho afecta negativamente la trabajabilidad del concreto activado, los resultados evidencian que el asentamiento disminuye proporcionalmente al porcentaje de inclusión de caucho, aumentando la rigidez del material en fresco; supone, además, mayor dificultad en el deslizamiento entre partículas en la mezcla (Youssf, O. et al., 2016). Long, et al. 2018 atribuye este comportamiento a la superficie rugosa de las partículas de CR que promueve la cantidad de aire atrapado, aumentando el requerimiento de agua para alcanzar una buena trabajabilidad y con ello la obtención de bajas resistencias mecánicas.

Tabla 11. Asentamiento arrojado en concretos con inclusión de caucho particulado (*Gcp*) y tipo fibra (*Gcf*).

Mezcla	Reemplazo (%)	Asentamiento (mm)
Gref	0	87,5
Gcp	5	62,5
	10	31
	15	18
Gcf	5	66
	10	29
	15	24

Según la clasificación realizada por Fang, et al. (2018) la obtención de un concreto de trabajabilidad media solo se puede lograr con la inclusión del 5%, mayores porcentajes limitan la trabajabilidad, así como el transporte y la adecuada colocación de la mezcla. En la Figura 31 se muestran los valores obtenidos para concretos activados alcalinamente con la inclusión del 5% de caucho (a) particulado y (b) tipo fibra.

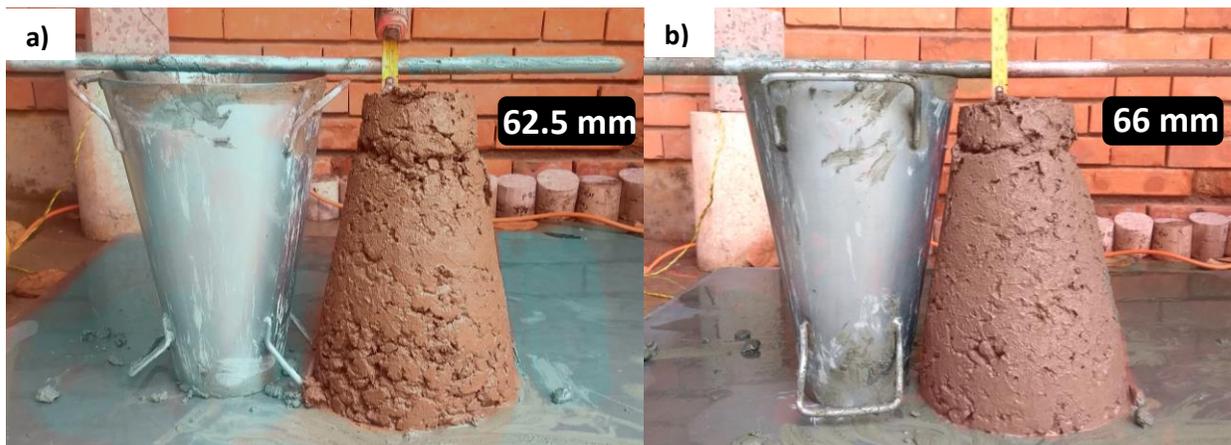


Figura 31. Slump obtenido en concretos con inclusión del 5% de caucho a) Particulado y b) Tipo Fibra.

Los resultados muestran que la morfología particulada del caucho disminuye el asentamiento de la mezcla en un 28,57, 64,57 y 79,43% respecto al concreto de referencia para los porcentajes de reemplazo del 5, 10 y 15%. Mientras que el caucho tipo fibra disminuye la trabajabilidad en un 24,57, 66,86 y 72,57% para porcentajes de reemplazo iguales, respectivamente.

5.3.3.2 Densidad, absorción y porosidad.

Generalmente se relaciona el decrecimiento en la densidad del concreto con el incremento en el porcentaje de sustitución de caucho, siendo 5% considerado como el valor óptimo para conservar las propiedades mecánicas y modificar propiedades físicas como la absorción y porosidad.

Los resultados obtenidos muestran que la inclusión del 5% de caucho decrece la densidad, se obtienen valores de 2125 y 2056 Kg/m³ para la morfología de caucho particulado y tipo fibra respectivamente, mientras que la absorción y porosidad aumentan; en especial para la morfología alargada tipo fibra que alcanza

incrementos del 18 y 13%, respectivamente, cuando se compara con los resultados obtenidos para la muestra de referencia. En la Figura 32, se observa la sustitución de 5% de agregados finos por caucho de morfología particulado y tipo fibra.

El valor de densidad arrojada por las mezclas que contienen caucho son inferiores a la muestra control, esto se debe a que la densidad del agregado polimérico (particulado 813 Kg/m³ y tipo fibra 1276 Kg/m³) es notablemente inferior a la de los sólidos reemplazados, autores afirman que la adición de caucho genera porosidad adicional a la que presenta usualmente un concreto, atribuido a la capacidad de las partículas de caucho de atrapar aire en su superficie debido a su naturaleza no polar que repele el agua, con lo cual se incrementa la porosidad (Khaloo, A. et al., 2008), como resultado existe un mayor volumen del concreto ocupado por aire en forma de porosidad, lo que contribuye al aligeramiento del material.

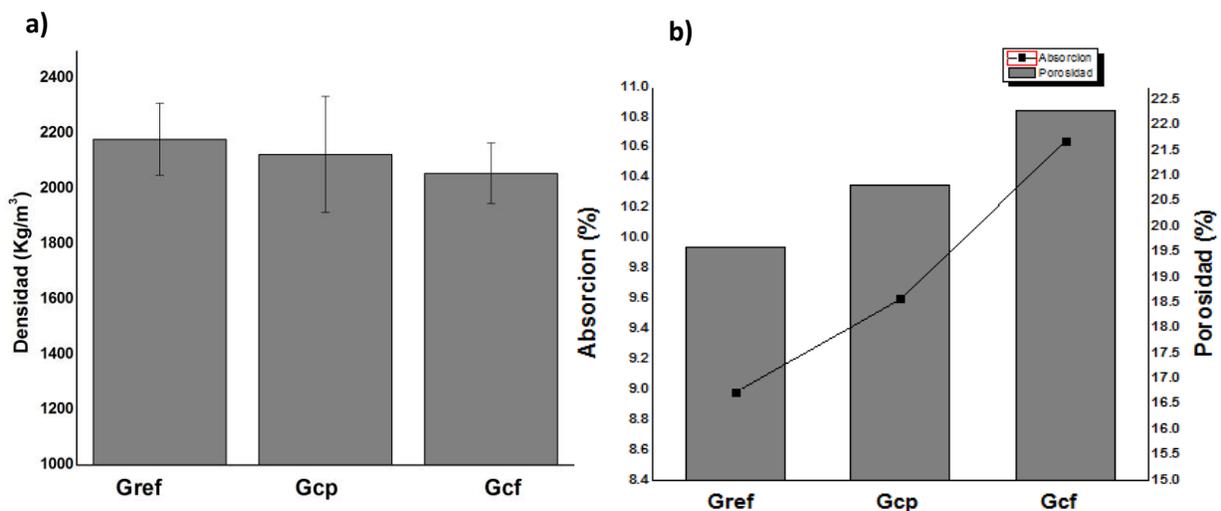


Figura 32. a) Densidad, b) Absorción y porosidad. Obtenidos en muestras con y sin sustitución del 5% de agregados finos por caucho particulado y tipo fibra.

5.3.3.3 Permeabilidad.

La permeabilidad es un factor que depende de la porosidad de un material y la conectividad entre los poros. En la Figura 33 se muestran los resultados obtenidos para el ensayo de permeabilidad de agua para las muestras evaluadas de concretos activados alcalinamente y una muestra de concreto de OPC como referencia. Las muestras de concreto adicionadas con caucho muestran un comportamiento de mayor permeabilidad en comparación a los concretos no adicionados, esto se debe a la generación de espacios entre el caucho y la matriz como resultado de la pobre adherencia entre estos materiales, lo cual permite el flujo de agua por medio de cavidades abiertas (Bisht, et al. 2017).

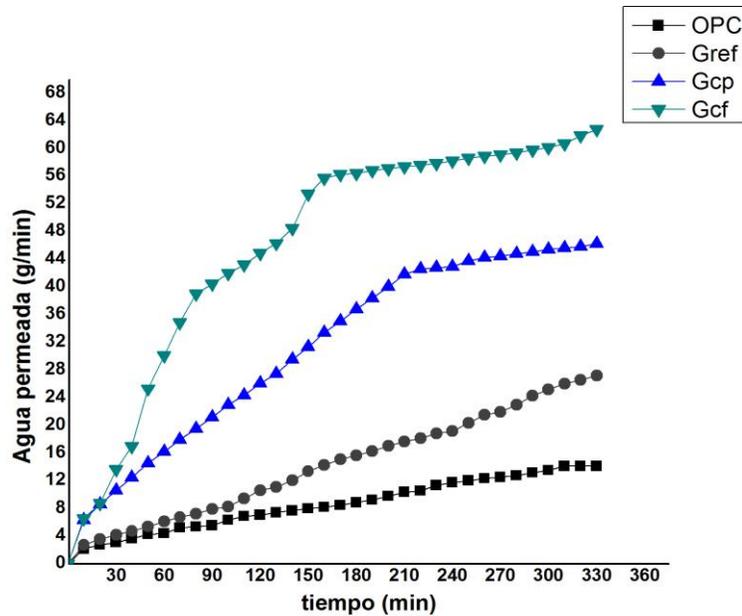


Figura 33. Permeabilidad de gramos de H₂O por minuto para concretos activados alcalinamente, adicionados con caucho y un concreto de OPC.

La presencia de grietas y microfisuras también desempeña un papel importante al generar continuidad entre espacios y poros para el flujo de agua, bajo esta premisa se observa que la muestra adicionada con caucho tipo fibra presenta mayor permeabilidad en comparación con la muestra adicionada con caucho particulado. Autores, entre ellos (Khaloo, A. et al., 2008), afirman que las fibras de caucho actúan como puente entre poros produciendo interconectividad, esto ocasiona que el agua permee entre cavidades. Thomas & Gupta (2016) plantean que la inclusión de partículas de caucho de menor tamaño puede rellenar cavidades en la estructura del concreto logrando una disminución en la permeabilidad respecto a las partículas tipo fibra.

5.4 CAMPO POTENCIAL DE APLICACIÓN.

De manera general, los criterios de aceptación de concretos para pavimentos se fundamentan en propiedades específicas, tales como la resistencia a la flexotracción a 28 días, la relación agua/cementante, el contenido mínimo de cementante en masa por m³ de concreto producido y el asentamiento exhibido por la mezcla. Los resultados arrojados en esta investigación evidencian que los concretos activados alcalinamente a partir de CDW con la inclusión de 5% de CR con morfología tipo fibra (Gcf) presentan propiedades apropiadas para su aplicación como concreto en pavimentos rígidos de acuerdo con las especificaciones técnicas de la norma colombiana INVIAS 2012, capítulo 5, en el que se abarca a los pavimentos de concreto, artículo 500 que hace referencia a los pavimentos de concreto hidráulico.

En la Tabla 12 se relacionan los valores y parámetros exigidos en la normativa para este tipo de concretos. Los valores señalados en la tabla con asterisco hacen referencia a la clasificación en la que se puede inscribir el concreto Gcf producido, cabe resaltar que la resistencia mecánica exhibida es superior a la requerida por la norma INVIAS, resultado atribuido al contenido de cementante que alcanza los 500 Kg/m³. Por otra parte, las características de flexotracción, asentamiento, fraguado inicial y final de los concretos premezclados que se encuentran disponibles en el mercado en Colombia para este tipo de aplicaciones se muestran en la

Tabla 13. ,

Tabla 12. Criterios de diseño para la mezcla de concreto en pavimentos de concreto hidráulico, INVIAS 2012.

Resistencia a flexotracción mínima a 28 días (MPa)	Transito NT1	3,8
	Transito NT2	4,0
	Transito NT3	4,2
Contenido mínimo de cemento en masa por m ³ de concreto (Kg)	Fraguado normal	300
	Fraguado rápido	350*
Relación agua/material cementante máximo	Fraguado normal	0,48
	Fraguado rápido	0,45*
Asentamiento (mm)	Formaleta fija	25-50
	Formaleta deslizante	13-80*

Tabla 13. Especificaciones técnicas de concretos para pavimentos comerciales.

Especificación	Argos*	Cemex**	Gcf
Resistencia a flexotracción a 28 días (MPa)	5,0	5,0	5,25
Asentamiento (mm)	102±25	100±25	66*
Fraguado inicial (h)	6	6	0,45*
Fraguado final (h)	9	7	1,13*

*Ficha técnica Concreto para pavimentos, Argos.

**Ficha técnica Concreto para pavimentos, Cemex Colombia.

Con base en las especificaciones de concretos comerciales, se puede observar que la resistencia a flexotracción alcanzada por Gcf es comparable con las obtenidas por los concretos comercializados en el país, sin embargo los parámetros de asentamiento y fraguado son muy inferiores a los requeridos en su aplicación en pavimentos, esto se atribuye a que la mezcla Gcf, a diferencia de las comerciales, no contiene ningún aditivo que modifique las propiedades físicas del material; otro parámetro que no se tiene en cuenta en la normativa colombiana y que se considera fundamental en aplicaciones en pavimentos es la resistencia al desgaste abrasivo

que exhibe el concreto, la mezcla Gcf alcanza longitudes de huella de 20,5 mm en promedio, respecto a los 23 mm permitidos por la norma NTC 2017.

5.5 CONCLUSIONES

Se evaluó la inclusión de 0, 5, 10 y 15% en peso de agregados finos de caucho reciclado en la producción de concretos activados alcalinamente, posteriormente se logró determinar la influencia de la morfología particulada y tipo fibra del CR en las propiedades mecánicas y físicas del concreto.

La incorporación del 5% de CR en el concreto activado, ocasiona la disminución de la resistencia a compresión en 20 y 12,6% para la morfología particulada y tipo fibra alcanzando valores de 29,3 y 32,38 MPa a 28 días, sin embargo, se evidencia el incremento de la resistencia a flexión en 8,28 y 16,49% respectivamente para el mismo contenido de CR, alcanzando valores de 4,88 y 5,25 MPa a 28 días. Cabe resaltar que la adición del 5% de CR mejoró la resistencia al desgaste abrasivo, reduciendo la longitud de huella a 23,5 y 20,5 mm para la morfología particulada y tipo fibra, respecto a la muestra de referencia que presentó una longitud 25 mm. Según la NTC 2017, que hace referencia al requerimiento físico y mecánico de los adoquines de concreto para pavimentos, el concreto activado con la inclusión de 5% de CR tipo fibra cumple con las especificaciones mecánicas para su utilización en pavimentos.

Las propiedades físicas en estado fresco y endurecido se vieron fuertemente afectadas por la inclusión de CR en el concreto activado, se reduce la trabajabilidad de la mezcla, atribuido a la tendencia que tiene el CR a atrapar aire en su superficie rugosa, lo cual aumenta los requerimientos de agua en el material y crea la necesidad del uso de aditivos para aumentar el asentamiento de la mezcla, no obstante se logra la obtención de una trabajabilidad media con la inclusión de 5% de CR, de tal manera se alcanzan asentamientos de 62,5 y 66 mm para la inclusión de morfología particulada y tipo fibra respectivamente, porcentajes mayores limitan la trabajabilidad de la mezcla, así como el transporte y su adecuada colocación en servicio.

En estado endurecido se evidencia la reducción de la densidad de concreto con la inclusión de 5% de CR al alcanzar valores de hasta 2056 Kg/m³ para la morfología tipo fibra, resultados que se atribuyen a una menor densidad de las partículas de CR respecto a otros sólidos y al incremento en la porosidad del material debido al aire atrapado en la mezcla como resultado de la inclusión. Por otro lado, respecto al concreto que no contiene CR, la morfología tipo fibra genera un mayor incremento en la absorción y porosidad en comparación del caucho particulado, se obtienen

valores de 9,6 y 10,64% para la absorción y valores de 20,82 y 22,29 para la porosidad para las muestras Gcp y Gcf respectivamente.

6. CONCLUSIONES GENERALES

Con los resultados obtenidos durante la ejecución de esta investigación se demostró la factibilidad de producir un concreto activado alcalinamente a partir de CDW y una adición de 10% de OPC con el uso de arena reciclada y la inclusión de CR de morfologías particulada y tipo fibra. Respecto al comportamiento físico se obtuvo que la adición de CR disminuye la trabajabilidad y la densidad del material, además se incrementa los porcentajes de absorción y porosidad en el concreto, no obstante, se sugiere la implementación de aditivos que permitan modificar propiedades tales como aumentar el tiempo de fraguado. En cuanto al desempeño mecánico se pudo determinar que la inclusión de CR disminuye la resistencia a la compresión, sin embargo, la inclusión de 5% generó el aumento de la resistencia a flexión, en especial para la morfología tipo fibra.

De manera general la inclusión de 5% de CR tipo fibra en concretos activados alcalinamente a partir de CDW permite la producción de concretos que según la normativa de INVIAS 2012 se consideran aptos para su aplicación en pavimentos rígidos, se logra cumplir con los requerimientos de resistencia a flexotracción mínima de 4,2 MPa a 28 días, un contenido de 350 Kg de cementante por m³ de concreto producido, una relación agua/material cementante de 0,45 y un asentamiento entre 13 y 80 mm. La alta permeabilidad de Gcf respecto a concretos de OPC convencionales crea nuevas posibilidades para otros campos de aplicación en el sector de la construcción adicional a elementos prefabricados, tales como pavimentos permeables.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ahmari, S., Ren, X., Toufigh, V., Zhang, L. 2012. Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash. *Construction and building materials*, 35, pp 718-729.
- Aliabdo, A., Elmoaty, A., Salem, H. (2016). Effect of cement addition, solution resting time and curing characteristics on fly ash based geopolymer concrete performance. *Construction and building Materials*, 2016, 123, pp 581-584.
- Allahverdi, A. Najafi, E. 2009. Construction wastes as raw materials for geopolymer binders. *International Journal of civil engineering*, 7, pp 154-559.
- Arenas, C., Luna-Galiano, Y., Leiva, C., Vilches, L., Arroyo, F., Villegas, R., Fernandez-Pereira, C. 2017. Development of a fly ash-based geopolymeric concrete with construction and demolition wastes as aggregates in acoustic barriers. *Construction and Building Materials*, 134, pp 433-442.
- Askarian, M., Tao, Z., Adam, B., Samali, B. 2018. Mechanical properties of ambient cured one-part hybrid OPC-geopolymer concrete. *Construction and building materials*, 186, pp 330-337.
- Bashar, M., Mohd, S., Wesam, S., Amin, A., Wadhah, I., Musa, A. 2018. Development of rubberized geopolymer interlocking bricks. *Case studies in construction materials*, 8, pp 401-408.
- Bernal, S., Mejia, R., Pedraza, A., Provis, J. 2011. Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes. *Cement and concrete research*, 41, pp 1-8.
- Bernal, S., Rodriguez, E., Kirchheim, A., Provis, J. 2016. Management and valorization of waste through use in producing alkali-activated cement materials. *Chemical technology and Biotechnology*, 91, pp 2365-2388.
- Bisht, K., Ramana, P. 2017. Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber. *Construction and building materials*, 155, pp 811-817.
- Bravo, M., De Brito, J., Pontes, J., Evangelista, L. 2015. Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *Journal Cleaner Production*, 99, pp 59-74.
- Dahlbo, H., Bacher, J., Lahtinen, K., Jouttijarvi, T., Suoheimo, P., Mattila, T., Sironen, S., Myllymaa, T., Saramaki, K. 2015. Construction and demolition waste management- a holistic evaluation of environmental performance. *Journal of Cleaner Production*, 107, pp 333-341.

- Ding, Y., Dai, J., Shi, C. 2016. Mechanical properties of alkali-activated concrete: A state-of-art review. *Construction and building materials*, 127, pp 68-79.
- Ding, Z., Wang, Y., Zou, P. (2016). An agent based environmental impact assessment of building demolition waste management: Conventional versus green management. *Journal of cleaner production*, 133, pp 1136-1153.
- Fang, G., Kei, W., Tu, W., Zhang, M. 2018. Workability and mechanical properties of alkali-activated fly ash-slag concrete cured at ambient temperature. *Construction and building materials*, 172, pp 476-487.
- Ganjian, E., Khorami, M., Maghsoudi, A. 2009. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and building materials*, 23, pp 1828-1836.
- Gibreil, H., Pei, C. 2017. Effects of high-density polyethylene and crumb rubber powder as modifiers on properties of hot mix asphalt. *Construction and building materials*, 142, pp 101-108.
- Hardjito, D., Rangan, B. 2005. Development and properties of low-calcium fly ash- based geopolymer concrete. Curtin, University of technology, pp 37-61.
- He, L., Ma, Y., Liu, Q., Mu. (2016). Surface modification of crumb rubber and its influence on the mechanical properties of rubber-cement concrete, *Construction and building Materials*, 120, pp 403-407.
- Huey, S., Wiedmann, T., Castel, A., De Burgh, J. 2017. Hybrid life cycle assessment of greenhouse gas emissions from cement, concrete and geopolymer concrete in Australia. *Journal of cleaner production*, 152, pp 312-320.
- Ibrahim, M., Megat, M., Rahman, M., Maslehuddin, M. 2017. Effect of alkaline activators and binder content on the properties of natural pozzolan-based alkali activated concrete. *Construction and building materials*, 147, pp 648-660.
- Khaloo, A., Dhestani, M., Rahmatabadi, P. 2008. Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire–rubber particles. *Waste Management*, 28, pp 2472–2482.
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., Vlachou, A., Bartzas, G., Galetakis, M. (2015) Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers, *Advanced Powder Technology*, 26, pp 368-376.
- Kumar, R. 2017. Influencia de agregado grueso reciclado derivado de residuos de construcción y demolición (CDW) en resistencia a la abrasión del hormigón del pavimento. *Materiales de construcción*, 142, 248-255.
- Lampris, C., Lupo, R., Cheeseman, C. 2009. Geopolymerisation of silt generated from construction and demolition waste washing plants. *Waste Management*, 29, pp 368–373.

- Laskar, S., Talukdar, S. 2017. Preparation and test for workability, compressive and bond strength of ultra-fine slag based geopolymer as concrete repairing agent. *Construction and building materials*, 154, pp 176-190.
- Lee, B., Kim, G., Kim, R., Cho, B., Lee, S., Chon, C. 2017. Strength development properties of geopolymer paste and mortar with respect to amorphous Si/Al ratio of fly ash, *Construction and Building Materials*, 151, pp 512-519.
- Lee, N., Lee, H. 2013. Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature. *Construction and building materials*, 47, pp 1201-1209.
- Liu, F., Zheng, W., Li, L. Feng, W., Ning, G. 2013. Mechanical and fatigue performance of rubber concrete. *Construction and building materials*, 47, pp 711-719.
- Long, W., Li, H., Wei, J., Xing, F., Han, N. 2018. Sustainable use of recycled crumb rubbers in eco-friendly alkali activated slag mortar: Dynamic mechanical properties. *Journal of cleaner production*, 204, pp 1004-1015.
- Lotfy, A., Al-Fayez, A. 2015. Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate. *Cement and concrete composites*, 61, pp 36-43.
- Ma, C., Awang, A., Omar, W. 2018. Structural and material performance of geopolymer concrete: A review. *Construction and building materials*, 186, pp 90-102.
- Mehta, A., Siddique, R. 2017. Properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete incorporating OPC as partial replacement of fly ash. *Construction and building materials*, 150, pp 792-807.
- Mendis, A. Al-Deen, S., Ashraf, M. 2017. Behaviour of similar strength crumbed rubber concrete (CRC) mixes with different mix proportions. *Construction and building materials*, 137, pp 354-366.
- Meysan, P., Mohamed, M., Vahid, T. 2018. Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils. *Construction and building Materials*, 170, pp 302-313.
- Naji, N. 2017. Hardened properties of self-compacting concrete with different crumb rubber size and content. *International Journal of Sustainable Built Environment*.
- Olivia, M., Nikraz, H. 2012. Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials and Design*, 26, pp 191-198.
- Pacheco, F., Jalali, S. 2010. Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials*, 24, pp 832-838.

- Park, Y., Abolmaali, A., Kim, Y., Ghahremannejad, M., (2016), Compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber partially replacing sand. *Construction and Building Materials*, 118, pp 43-51.
- Paya, J., Borrachero, M., Monzo, J., Soriano, L., Tashima, M. 2012. A new geopolymeric binder from hydrated-carbonated cement. *Materials Letters*, 74, pp 223-225.
- Pelisser, A., Zavarise, N., Arent, T., Bernadin, A. (2011). Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition. *Journal of Cleaner Production*, 19, pp 757-763.
- Reig, L., Tashima, M., Borrachero, M., Monzó, J., Cheeseman, C., Payá, J. 2013. Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials*, 43, pp 98-106.
- Rezaifar, O., Hasanzadeh, M., Gholhaki, M. 2016. Concrete made with hybrid blends of crumb rubber and metakaolin: Optimization using response Surface method. *Construction and building materials*, 123, pp 59-68.
- Robayo, R., Mulford, A., Munera, J., Mejía, R. 2016. Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials*, 128, pp 163-169.
- Robayo, R., Rivera, J., Mejía de Gutierrez, R. 2017. Alkali-activated building materials made with recycled construction and demolition wastes. *Construction and building materials*, 149, pp 130-138.
- Sanchez de Rojas, M., Frias, M., Rivera, J., Escorihuela, M., Marin, F. 2001. Research about the pozzolanic activity of waste materials from calcined clay. *Materiales de construcción*, 51, pp 45-52.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta M., Bhattacharyya, S. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments, *Construction and building materials*, 85, pp 78-90.
- Siyala, A., Azizlia, K., Mana, Z., Ullaha, Z. 2016. Effects of Parameters on the Setting Time of Fly Ash Based Geopolymers Using Taguchi Method, *Procedia Engineering*, 148, pp 302 – 307.
- Sukontasukkul, P. (2009). Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel. *Construction and Building*, 23, pp 1084-1092.
- Sun, Z., Cui, H., An, H., Tao, D., Xu, Y., Zhai, J., Li, Q. 2013. Synthesis and thermal behavior of geopolymer-type material from waste ceramic. *Construction and Building Materials*, 49, pp 281-287.
- Sun, Z., Lin, X., Liu, P., Wang, D., Vollpracht, A., Oeser, M. 2018. Study of alkali activated slag as alternative pavement binder. *Construction and building materials*, 186, pp 626-634.

- Thomas, B., Gupta, R. 2013. Mechanical properties and durability characteristics of concrete containing solid waste materials. *Journal of cleaner production*, 26, pp 1-6.
- Thomas, B., Gupta, R. 2016. Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber. *Journal of cleaner production*, 113, pp 86-92.
- Thomas, B., Gupta, R., Kalla, P., Cseteneyi, L. 2014. Strength, abrasion and permeation characteristics of cement concrete containing discarded rubber fine aggregates. *Construction and building materials*, 59, pp 204-212.
- Thomas, B., Kumar, S., Mehra, P., Gupta, R., Joseph, M., Cseteneyi, L. 2016. Abrasion resistance of sustainable green concrete containing waste tire rubber particles. *Construction and building materials*, 124, pp 906-909.
- Turatsinze, A. Garros, M. 2008. On the modulus of elasticity and strain capacity of self-compacting concrete incorporating rubber aggregates. *Resource, conservation and recycling*, 52, 1209-1215.
- Turatsinze, A., Bonnet, S., Granju, J., 2005. Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: improvement in cracking shrinkage resistance. *Building and Environment*, 40, pp 221-226.
- Turatsinze, A., Garros, M., 2008. On the modulus of elasticity and strain capacity of self-compacting concrete incorporating rubber aggregates. *Resources, Conservation and Recycling* 52 (10), pp 1209-1215.
- Vasquez, A., Cardenas, V., Robayo, R., Mejia, R. (2016). Geopolymer based on concrete demolition waste. *Advanced Powder Technology*, 27, pp1173-1179.
- W.K.W. Lee, J.S.J. Van Deventer, The effect of ionic contaminants on the early-age properties of alkali-activated fly ash-based cements, *Cem. Concr. Res.* 32 (2002) 577–584.
- Wongsu, A., Sata, V., Nematollahi, B., Sanjayan, J. 2018. Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer mortar incorporating crumb rubber. *Journal of cleaner production*, 195, pp 1069-1080.
- Wu, Z., Ann, T., Shen L., Guiwen, L. 2014. Quantifying construction and demolition waste: An analytical review. *Waste Management*, 34, pp 16-83.
- Xiao, J., Ma, Z., Sui, T., Akbarnezhad, Ali., Duan, Z. 2018. Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste. *Journal of cleaner production*, 188, pp 720-731.
- Yahia, Z., Abdullah, M., Ramli, S., Minciuna, M., Razak, R. 2018. Durability of fly ash based geopolymer concrete infilled with rubber crumb in seawater exposure. *Materials science and engineering*, 374, pp 1-6.

- Youssf, O., Hassanli, R., Millis, J. 2017. Mechanical performance of FRP-confined and unconfined crumb rubber concrete containing high rubber content. *Journal of Building Engineering*, 11, pp 115-126.
- Youssf, O., Millis, J., Hassanli, R. 2016. Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete. *Construction and building Materials*, 125, pp 175-183.
- Zaharaki, D., Galetakis, M., Komnitsas, K. 2016. Valorization of construction and demolition (C&D) and industrial waste through alkali activation. *Construction and building Materials*, 121, pp 686-692.
- Zedan, S., Mohamed, M., Ahmed, D., Mohammed, A. 2015. Effect of demolition/construction wastes on the properties of alkali activated slag cement. *HBRC Journal*.