

DESARROLLO DE CONCRETOS DE BAJO IMPACTO AMBIENTAL A PARTIR DE RESIDUOS SÍLICO-ALUMINOSOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE DEL SECTOR MINERO

Nicolás Pardo^{1,2*}, *Francy Hurtado*², *Duván Agudelo*², *Guillermo Penagos*³, *Mauricio Correa*⁴, *Esperanza López*^{1,2}

1: GIPIMME, Ingeniería de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

2: GIMACYR, Ingeniería de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

3: PNUD, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Bogotá, Colombia

4: GIGA, Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

* E-Mail: nicolas.pardo.alvarez@gmail.com

RESUMEN

Los residuos mineros (RM) generan grandes problemas ambientales debido a la alta y progresiva explotación de minerales y su consecuente disposición. La activación alcalina es un método utilizado para la fabricación de materiales de construcción, usando los residuos como materiales cementantes. En esta investigación se desarrollaron concretos a partir de RM activados alcalinamente. Los residuos de minería de carbón (arenosos-RC y arcillosos-RCd) y de minería aurífera de veta (colas de flotación-CF), fueron activados mediante una mezcla de solución NaOH y Na₂SiO₃. Inicialmente se fabricaron morteros activados alcalinamente, utilizando los RM molidos y/o con granulometría original y sustituciones parciales por cemento Pórtland tipo I del 10 y el 20% como co-aglutinante para los residuos molidos como precursores. Debido a que las CF molidas con 20% de sustitución parcial por cemento, no alcanzaron la resistencia del mortero y del concreto de referencia (mejor resistencia a la compresión a los 28 días de fraguado), se prepararon dos condiciones más. El diseño de mezcla de las CF molidas con 30% de cemento superó la resistencia a la compresión del mortero de referencia. Por lo tanto, se utilizó para fabricar concretos activados alcalinamente, los cuales también superaron la resistencia del concreto de referencia a los 28 días de fraguado con 25,3 MPa y con un porcentaje de reducción de emisiones del 29,04%.

Palabras clave: Mortero, concreto, activación alcalina, residuos de minería, gel (N,C-A-S-H).

DEVELOPMENT OF LOW ENVIRONMENTAL IMPACT CONCRETES FROM SILICO-ALUMINOUS MINE TAILINGS ALKALI ACTIVATED

ABSTRACT

Mine tailings cause several environmental impacts, due to high and progressive mineral exploitation, as well as waste management considerations. Alkaline activation to manufacture

building materials using waste as cementitious materials has been a used method. In this article, concretes with alkali-activated mine tailings have been studied. Coal mine tailings (sandy-RC and clay-RCd) and vein gold mine tailings (flotation tails-CF) were activated by a mixture of NaOH and Na₂SiO₃ solution. Alkaline activated mortars, using original granulometry tailing and / or milled residue and partial substitutions for type I Portland cement of 10 and 20% as co-binder for milled mine tailings as precursors were manufactured initially. The milled CF with 20% partial substitution by cement did not reach the resistance of the reference mortar and concrete, therefore, two more conditions were prepared (best compressive strength after 28 days of setting). The mix design of the milled CF with 30% cement surpassed the compressive strength of the reference mortar. Hence, mix design was used to manufacture alkaline activated concrete, which also surpassed the strength of the reference concrete after 28 days of setting with 25.3 MPa and with a percentage of reduction emissions of 29.04%.

Keywords: Mortar, concrete, alkaline activation, mine tailings, gel (N,C-A-S-H).

1. INTRODUCCIÓN

La Economía Circular (EC) se presenta como un sistema de aprovechamiento de recursos donde prima la reducción, la reutilización y el reciclaje de los elementos. Los beneficios ambientales de la EC se traducen en reducción de la extracción de materias primas, uso de fuentes de energía renovables, la reducción de residuos y emisiones, y la conservación y uso eficiente del agua. La vinculación entre gremios del sector productivo, como el constructor y el minero, resulta estratégico para lograr estos objetivos, ya que los residuos mineros (RM) pueden utilizarse como materia prima para fabricar materiales de construcción. Los RM son un problema ambiental importante que se está volviendo cada vez más serio con el incremento paulatino en la explotación de minerales y su consecuente disposición. Pueden definirse como residuos sólidos, acuosos o en pastas, que quedan tras las actividades de exploración, explotación e investigación, y se rigen por la legislación de minas. El principal efecto ecológico es generalmente la contaminación del agua, que surge de los procesos de degradación e hidrólisis de los residuos y la posterior descarga de agua contaminada con sólidos, metales pesados, reactivos de molino y compuestos de azufre que pueden alcanzar niveles freáticos [1–4].

Kinnunen et al [5] estiman que a nivel mundial se producen aproximadamente 20-25 billones de toneladas de desechos sólidos mineros anualmente. Además, la acumulación de residuos de la extracción de minerales representa aproximadamente de 5 a 7 mil millones de toneladas de residuos, almacenadas en más de 3.500 presas [5]. Debido a la creciente preocupación por el cambio climático y los problemas mencionados que se encuentran asociados a la disposición de los residuos, en el sector de la construcción se pueden encontrar diferentes investigaciones relacionadas a la fabricación de concretos con RM activados alcalinamente [5–13], concreto poroso [14–16], cemento [17–19], cerámicos sinterizados [20–22] y concretos y morteros simples [23–25]. El término de activación alcalina se refiere a la reacción de un aluminosilicato sólido bajo condiciones alcalinas, para producir un aglomerante que puede fraguar y endurecerse como un cemento Pórtland; en este caso, puede emplearse para la formación de concretos activados alcalinamente (CAA) [26–28].

Las investigaciones han señalado que los CAA ofrecen propiedades mecánicas superiores, desarrollo de resistencia rápida en comparación con el cemento Portland (OPC), resistencia al ataque de agentes corrosivos e inmovilización eficiente de contaminantes de residuos mineros

(RM). Los RM se presentan como una fuente precursora potencial para los CAA: los minerales más abundantes en la corteza terrestre son aluminosilicatos, que también se refleja en las composiciones de los residuos. Sin embargo, la reactividad alcalina de los RM es generalmente baja, y presenta el aspecto más crítico en la activación de residuos basados en activación alcalina [5–13]. En este trabajo se desarrollaron concretos a partir de residuos sílico-aluminosos del sector minero, utilizando los residuos como material cementante y una mezcla de silicato de sodio e hidróxido de sodio como solución activadora.

2. METODOLOGÍA

2.1. Materiales

Por su producción y disponibilidad de muestreo, se seleccionaron los municipios de Titiribí y El Bagre. Para el caso de Titiribí, se tomaron dos tipos de residuos de la explotación de carbón y se denominaron “RC” y “RCd”. Para el caso de El Bagre, se tomaron residuos de la explotación de minería aurífera de veta, correspondiente a las muestras colas de flotación, nombradas “CF”. De cada tipo de residuo se tomaron aproximadamente 130 kg de muestra. Para cada tipo de residuo se llevó a cabo la preparación de la muestra según lo indicado en la norma ASTM D421-81 [29]. Los materiales adicionales corresponden a agregados finos y gruesos disponibles comercialmente (Easy Cencosud) y cemento Pórtland Tipo I (Argos). Como solución activante se utilizó una mezcla de solución 10 molar de hidróxido de sodio (Químicos JM S.A) y silicato de sodio alcalino comercial Flocsil (Spin S.A).

2.2. Fabricación de los morteros activados alcalinamente

Para verificar la influencia del tamaño de partícula, se llevó a cabo una comparación de la resistencia a la compresión entre los morteros fabricados con los residuos con un proceso de molienda y los residuos con granulometría original (en estado de entrega). De los tres tipos de residuos, CF y RC podían ser utilizados con granulometría original, mientras que RCd, por sus características arcillosas, sólo pudo ser utilizada molida. Para la fabricación de los morteros, se utilizó el procedimiento descrito por Rivera [30] a fin de establecer las condiciones del mortero dosificado con cemento. Para evaluar la resistencia a la compresión se elaboraron cubos de 50 mm de lado en moldes normalizados. La resistencia a la compresión se evaluó en un equipo Shimadzu Autograph con una velocidad empleada para el ensayo de aplicación de la carga de 900 N/s, según la norma ASTM C109/C109 – 16a [209]. El mortero de referencia se elaboró con cemento Pórtland, arena y agua, y se corresponde con un mortero dosificado tipo S ($R'm=12,5$ MPa [31]). El mortero con cemento se denominó MC.

Para la activación alcalina se utilizó una mezcla de solución de hidróxido de sodio 10 M y silicato de sodio alcalino. El módulo de solución (M_s) del silicato corresponde a 1,65 [32]. Se utilizó la combinación $M_s=1,5$ y $\%Na_2O=6$ y se fabricaron 3 muestras para cada diseño de mezcla. Para la dosificación de los morteros con los residuos mineros con granulometría original, se utilizó la fracción pasante malla No. 200 como parte del material cementante y el retenido como parte del agregado fino. MRC y MCF corresponden a los morteros con los residuos con granulometría original. MRCm0, MCFm0 y MRCdm0 corresponden a los morteros con los residuos molidos. Finalmente, MRCm10, MCFm10 y MRCdm10 corresponden a los morteros con materiales molidos con 10% de sustitución por cemento y MRCm20, MCFm20 y MRCdm20 los residuos molidos con 20% de sustitución por cemento. La resistencia a la compresión se evaluó a los 7, 14

y 28 días, ya que a los 3 días los morteros elaborados con los residuos mineros no habían completado el proceso de fraguado.

2.3. Fabricación y caracterización química y morfológica de los concretos activados alcalinamente

Para el diseño de mezcla del concreto de referencia se utilizó el método ACI 211.1 descrito en [33]. Se seleccionó una consistencia fluida, con un asentamiento entre 50 y 100 mm y sin vibración. El tamaño máximo de agregado se encuentra en el rango recomendado para muros reforzados, vigas y columnas. Para la estimación del agua en la mezcla, se escogió un concreto con aire incluido, con forma angular de agregado y una exposición de aire media. El diseño de mezcla corresponde a una resistencia a la compresión de 21 MPa. Se determinaron las condiciones iniciales y se llevó a cabo el ajuste por humedad de los agregados. Una vez llevado a cabo el ajuste por humedad de los agregados, se prepararon tres cilindros y se midió el asentamiento. Cuando se preparó esta primera mezcla de prueba, fue necesario adicionar agua. Ya que la relación agua/cemento se alteró, se ajustó el contenido de cemento y se procedió al ajuste por resistencia. Con la segunda mezcla de prueba con las proporciones ajustadas, se verificó el asentamiento y se ensayaron tres cilindros de prueba a los cuales se les determinó una resistencia promedio a los 28 días de $23,0 \pm 0,4$ MPa. Esta resistencia fue superior a la de diseño, por lo tanto, se utilizaron las proporciones finales en peso para el concreto de referencia, denominado CC.

La mejor condición de los morteros activados alcalinamente fue tomada en cuenta para la fabricación de los concretos activados alcalinamente. Para los concretos activados alcalinamente, la cantidad de solución activamente se dosificó en función de las proporciones de la mejor condición de los morteros activados alcalinamente y manteniendo una buena manejabilidad para la pasta y un asentamiento similar al encontrado para el concreto de referencia. La cantidad de agregado grueso y fino se estableció en función de las mismas proporciones que el concreto de referencia. Para evaluar la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de fraguado, se elaboraron especímenes cilíndricos de 15 cm de diámetro por 30 cm de alto en moldes normalizados. La resistencia a la compresión se evaluó con una velocidad de 0,25 MPa/s, siguiendo la norma ASTM C39/C39M-18 [34]. Los análisis morfológico y elemental puntual de las superficies de fractura de los concretos fabricados con los residuos mineros y el cemento se llevó a cabo mediante MEB y EED con un equipo JEOL JSM, 6490 LV.

2.4. Emisiones y energía incorporada por metro cúbico de concreto

Si bien se reconoce que el sector cementero ha realizado esfuerzos por disminuir el factor de emisión del cemento, con valores que oscilan entre 0,72 y 0,97 t CO₂/t cemento producido entre los años 2015 y 2017 [35–37], estos valores corresponden a valores promedio de las plantas analizadas de cada cementera (Argos, Cemex y LafargeHolcim) y las variaciones pueden ser muy significativas en función de los tipos de materias primas y combustibles utilizados. Por lo tanto, en el presente estudio se utilizó el valor promedio entre los procesos de fabricación por vía seca y húmeda reportados en el año 2012 para Colombia presentados en el informe del PNUD, UPME y Ecoingeniería [38], haciendo un énfasis particular en la necesidad de actualizar estos valores para las cementeras colombianas. Para el residuo molido fueron asignadas las emisiones proporcionales a la molienda final, homogenización y embalaje (4,5% [39] del factor de emisión del cemento), ya que los residuos sólo necesitaron un proceso de molienda y homogenización para su uso en el caso de los residuos molidos o un factor de emisión cero para las mezclas que utilizaron el residuo con

granulometría original. El cálculo corresponde al *Factor de emisión del cemento* * 0,045 para 1 kg de residuo molido [39]. Para la soda cáustica en escamas, ya que es un material importado, se utilizó el valor presentado por Thanmalay [40] en el año 2013. El autor llevó a cabo el análisis de ciclo de vida para la fabricación de hidróxido de sodio sólido, encontrando que a partir de la materia prima, los químicos y/o aditivos y el proceso de manufactura, la reacción presenta una eficiencia del 31% para el hidróxido de sodio (formando otros subproductos). El cálculo corresponde al *Factor de emisión*/0,31 para 1 kg de hidróxido de sodio sólido. Para el silicato de sodio, ante la falta de un factor de emisión por parte de la empresa Spin S.A., se utilizó el valor reportado por Fawer en el año 1999 [41]. El autor llevó a cabo el análisis de ciclo de vida para la fabricación de silicato de sodio sólido y diferentes soluciones con porcentajes de sólidos variables, encontrando que en función del porcentaje de sólidos, el factor de emisión de las soluciones se comporta casi de manera proporcional. Ya que la empresa Spin S.A. utiliza silicato de sodio sólido de la empresa Manufacturas Silíceas S.A.S. para fabricar el Flocsil, se utilizó el factor de emisión reportado por Fewer para el silicato sólido y el contenido de sólidos por el factor de emisión para el Flocsil. El cálculo corresponde al *Factor de emisión* + *Factor de emisión* * 0,452 para 1 kg de silicato de sodio en solución Flocsil. Finalmente, para el agua y los agregados, se utilizaron los valores del PNUD, UPME, Ecoingeniería [38], haciendo de nuevo énfasis en la necesidad de actualizar todos los valores. Los análisis de huella de carbono (kg CO₂ eq.) y energía incorporada (MJ) por metro cúbico de mezcla estimados no incluyen emisiones por transporte o utilización in situ. Sólo corresponden a los factores de emisión encontrados para las fases de extracción de la materia prima y fabricación de los materiales.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Resistencia a la compresión morteros

En la Tabla 1 se presentan los resultados de la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de fraguado para los morteros activados alcalinamente y el mortero de referencia. Se observa que, pese a que MCFm20 presenta el resultado más alto a los 28 días de fraguado, no se logró alcanzar el valor establecido en las especificaciones.

Tabla 1. Resultados de la resistencia a la compresión de los morteros con residuos activados y el mortero con cemento como referencia.

Diseño	Resistencia a la compresión (MPa)			Diseño	Resistencia a la compresión (MPa)		
	7 días	14 días	28 días		7 días	14 días	28 días
MC	11,0±0,1	12,4±0,1	12,8±0,2	MCFm0	2,1±0,1	3,8±0,1	4,5±0,1
MRC	0,6±0,0	1,2±0,0	1,4±0,1	MCFm10	0,8±0,2	0,9±0,0	1,4±0,1
MRCm0	1,0±0,0	2,0±0,2	3,2±0,2	MCFm20	5,4±0,2	7,6±0,0	8,0±0,0
MRCm10	0,5±0,1	0,9±0,1	1,1±0,1	MRCdm0	0,7±0,1	1,9±0,1	2,7±0,2
MRCm20	2,1±0,2	3,4±0,1	4,0±0,1	MRCdm10	0,4±0,1	0,8±0,1	1,5±0,2
MCF	2,5±0,2	3,5±0,2	3,7±0,2	MRCdm20	3,4±0,1	4,5±0,2	4,8±0,1

3.2. Resistencia a la compresión concretos y caracterización química y morfológica

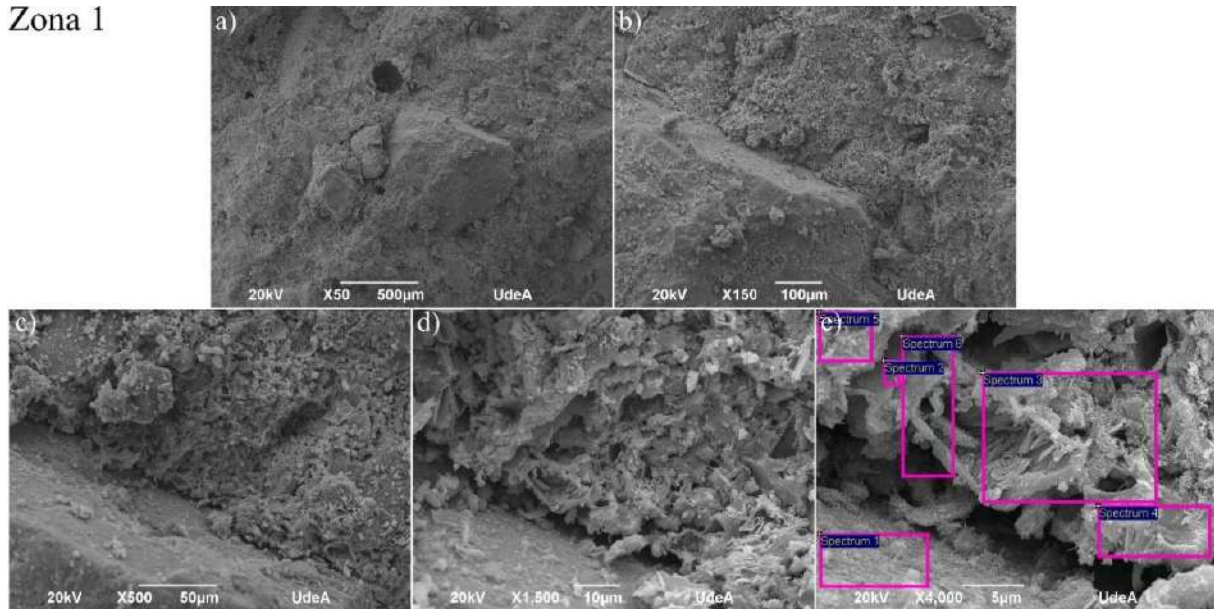
Dado que el mortero MCFm20 fue el que obtuvo mayor resistencia a la compresión evaluada a los 28 días de fraguado, se utilizó su diseño de mezcla en la preparación de los concretos. En la Tabla 2 se presentan los resultados de la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de fraguado para el concreto desarrollado y el concreto de referencia. Se observó que CCFm20 a los 28 días de fraguado no cumplió con el valor especificado. Este resultado es acorde con el encontrado para los 28 días de resistencia del mortero MCFm20, el cual tampoco alcanzó la resistencia especificada.

Tabla 2. Resultados de la resistencia a la compresión, emisiones y energía incorporada para CCFm20 y el concreto con cemento de referencia.

Diseño	Resistencia a la compresión (MPa)		
	7 días	14 días	28 días
CC	13,8±0,4	19,6±0,5	23,0±0,4
CCFm20	6,4±0,6	9,2±0,5	11,1±0,6

En la Figura 1 se presenta la morfología de la superficie de fractura después del ensayo de compresión y se indican los lugares donde se realizaron los análisis EED del concreto CCFm20 para dos zonas con sus acercamientos. A bajos aumentos la mezcla entre material cementante (CFm con cemento) y agregados finos se encuentra recubriendo los agregados gruesos de manera uniforme, tal como se observa para la Zona 1 en la Figura 1a, b y c y para la Zona 2 en la Figura 1c, d y e. A mayores aumentos, en la Zona 1 (Figura 1d y e) y en la Zona 2 (Figura 1i y j) se pueden observar algunas estructuras similares al gel (N,C)-A-S-H, sin embargo son poco densas y poco compactas, con una falta de continuidad evidente. Esto se relaciona con la propiedad mecánica evaluada, causando probablemente la disminución de la resistencia a la compresión. A pesar que a estos aumentos no es posible asegurar la existencia de unidades zeolíticas bien definidas, la zona delimitada por el espectro 1 en la Zona 2 muestra ligeras similitudes con las zeolitas sintetizadas a partir de la activación de cenizas volantes [42–48]. Esto también puede influir en la resistencia a la compresión, ya que esta cristalización no es la deseada, por el contrario, se espera un gel en su mayoría amorfo, denso, compacto y continuo.

Zona 1



Zona 2

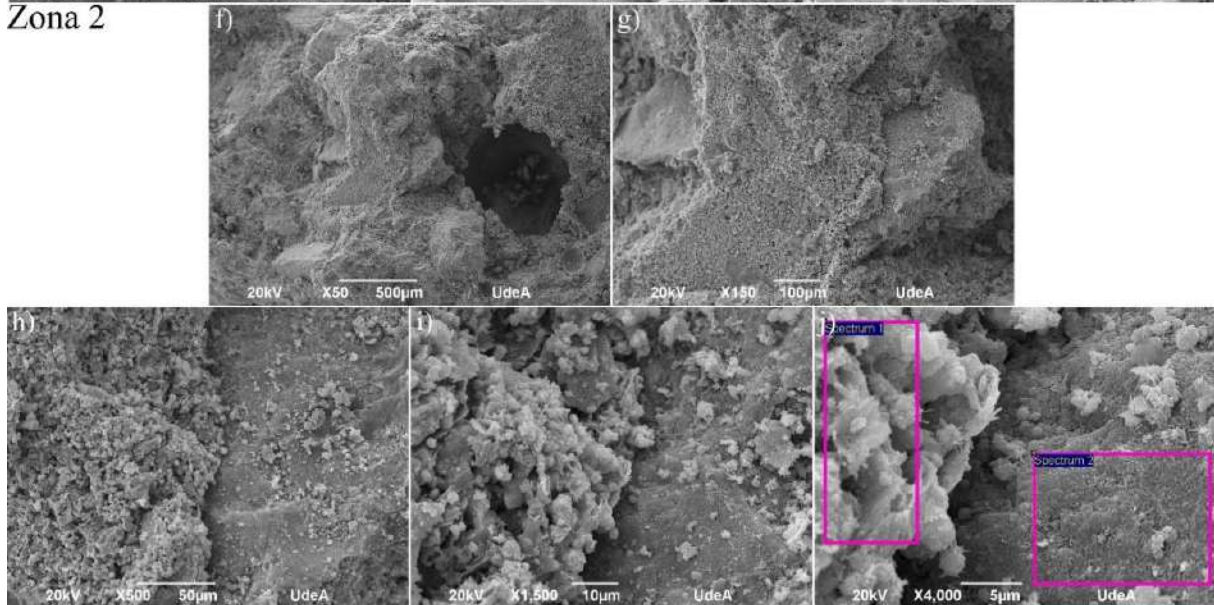


Figura 1. Morfología de la superficie de fractura después del ensayo de compresión y lugares de espectros EED del concreto CFm20 para dos zonas con sus acercamientos. a), b), c), d) y e) Zona 1. f), g), h), i) y j) Zona 2.

Gracias a que las micrografías fueron tomadas en dos zonas que muestran simultáneamente el gel poco denso y el agregado grueso, los porcentajes elementales de los espectros 2 al 6 para la Zona 1 (Figura 1e) y el espectro 1 para la Zona 2 (Figura 1j) presentados en la Tabla 3, sugieren la presencia de este tipo de gel C-A-S-H poco denso, debido a los altos contenidos de Ca. Los porcentajes elementales del espectro 1 para la Zona 1 (Figura 1e) y el espectro 2 para la Zona 2 (Figura 1j) presentados en la Tabla 3, muestran que el agregado (alto contenido de Si y Al) se encuentra recubierto por un poco de gel (poco contenido de Ca).

Tabla 3. Composición elemental (% en peso) para los análisis EED para el concreto CCFm20 en las zonas identificadas.

Zona	Espectro	O	Si	Al	Na	Ca	Mg	K	Fe
1	1	32,99	28,73	6,73	-	31,55	-	-	-
	2	15,95	10,39	2,04	-	62,94	0,98	-	7,7
	3	36,7	15,57	4,1	-	36,42	1,54	1,16	4,51
	4	46,53	9,85	2,98	-	38,91	-	-	1,73
	5	27,77	13,15	2,35	-	52,37	-	-	4,36
	6	16,73	10,77	2,09	-	60,52	-	-	9,89
2	1	27,81	12,98	4,63	-	49,54	-	-	5,04
	2	31,41	39,62	12,93	4,36	11,68	-	-	-

3.3. Resistencia a la compresión de condiciones adicionales en morteros y concretos

A partir de los resultados presentados, se prepararon dos condiciones más para morteros, MCFm30 y MCFm40 (30 y 40% de sustitución de cemento respectivamente), y se evaluó de nuevo la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días. Como se observa en la Tabla 4, la condición MCFm30 superó la resistencia a la compresión del mortero convencional de referencia. Sin embargo, la condición MCFm40 presentó una disminución considerable en la resistencia. Ambos resultados se pueden asociar a la cantidad de silicato de sodio e hidróxido de sodio adicionados a las muestras, ya que a medida que aumenta la cantidad de cemento sustituido, aumenta la cantidad de silicato de sodio e hidróxido de sodio, necesarios para mantener la condición $M_s=1,5$ y $\%Na=6$. Debido a que el silicato de sodio puede funcionar como retardante de la hidratación del cemento Pórtland [49], el aumento en la cantidad de cemento y silicato probablemente haya ocasionado un efecto negativo en la formación del gel C-A-S-H, generando una disminución en la resistencia a la compresión. No obstante, hay una cantidad de hidróxido de sodio, silicato de sodio y cemento, en la cual la resistencia a la compresión es máxima para el diseño de mezcla evaluado. Esta condición se encontró con un 30% de sustitución de residuo CFm por cemento Pórtland tipo I.

Tabla 4. Resultados de la resistencia a la compresión, emisiones y energía incorporada para los morteros con las CFm activadas y el mortero con cemento de referencia.

Diseño	Resistencia a la compresión (MPa)			Emisiones		Energía incorporada	
	7 días	14 días	28 días	kg CO ₂ /m ³	Reducción (%)	MJ/m ³	Reducción (%)
MC	11,0±0,1	12,4±0,1	12,8±0,2	589,6	-	4.945,6	-
MCFm0	2,1±0,1	3,8±0,1	4,5±0,1	22,8	62,37	2.375,9	51,94
MCFm10	0,8±0,2	0,9±0,0	1,4±0,1	275,3	53,28	2.789,6	43,55
MCFm20	5,4±0,2	7,6±0,0	8,0±0,0	330,4	43,99	3.242,9	34,45
MCFm30	12,4±0,1	16,4±0,1	17,7±0,1	396,1	32,85	3.823,1	22,73
MCFm40	2,2±0,1	2,7±0,1	3,1±0,1	464,1	21,34	4.421,5	10,67

A partir de los resultados encontrados en los morteros, se fabricó el concreto activado alcalinamente con la condición CCFm30. Como se observa en la Tabla 5, la condición CCFm30 superó la resistencia a la compresión del concreto convencional de referencia a los 28 días de fraguado. Este resultado es acorde con el encontrado para los 28 días de resistencia del mortero MCFm30, el cual también superó la resistencia especificada. Este es un resultado sumamente interesante, ya que podría permitir su uso en elementos estructurales, con el gran beneficio de la disminución en los impactos ambientales (29,04% en la huella de carbono y 19,31% en la energía incorporada) respecto al concreto de referencia CC. Nuevamente este resultado se atribuye la óptima cantidad entre el hidróxido de sodio, el silicato de sodio y el cemento adicionados a la mezcla.

Tabla 5. Resultados de la resistencia a la compresión, emisiones y energía incorporada para CCFm30 y el concreto con cemento de referencia.

Diseño	Resistencia a la compresión (MPa)			Emisiones		Energía incorporada	
	7 días	14 días	28 días	kg CO ₂ /m ³	Reducción (%)	MJ/m ³	Reducción (%)
CC	13,8±0,4	19,6±0,5	23,0±0,4	550,1	-	4.576,0	-
CCFm30	14,9±0,4	20,1±0,4	25,3±0,5	390,4	29,04	3.692,4	19,31

4. CONCLUSIONES

La resistencia a la compresión de los morteros activados alcalinamente fue inferior para las mezclas preparadas con residuos en estado de entrega, en comparación con las mezclas preparadas con residuos molidos. El tamaño de partícula juega un papel importante en la activación, ya que a menor tamaño de partícula incrementa el área superficial expuesta y por ende la reactividad entre la sílice, la alúmina y el óxido de calcio, para formar las redes características de este tipo de materiales.

Los análisis morfológicos y químicos sugirieron la presencia del gel C-A-S-H; sin embargo, eran geles poco densos y poco compactos, con una falta de continuidad evidente. Esto se relaciona con la propiedad mecánica evaluada, causando probablemente la disminución de la resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión mejoró con la adición de cemento, de manera específica para las colas de flotación, donde la sustitución de residuo con 30% de cemento superó la resistencia a la compresión del mortero y el concreto de referencia. Es decir, los residuos mineros presentan cierta capacidad cementante mediante medios alcalinos. Sin embargo, se debe adicionar la cantidad apropiada para evitar disminuciones en esta propiedad, ya que sustituciones en las bandas límites entre el 10 y 40% de cemento para las colas de flotación molidas, generó un detrimento de la resistencia a la compresión.

Los análisis ambientales de la huella de carbono y energía incorporada por metro cúbico de concreto mostraron ser inferiores para los concretos a partir residuos mineros respecto al convencional de referencia. En particular, la condición CCFm30 se presenta como una alternativa de cara al cumplimiento de la meta de reducción del 20% de las emisiones para el año 2030 establecida en Colombia en la Cumbre de Cambio Climático del año 2015.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los grupos de investigación GIPIMME, GIMACYR y GIGA de la Universidad de Antioquia, y también al CESET de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, por el apoyo durante la ejecución del proyecto.

6. REFERENCIAS

- [1] Wills, B. A., Finch, J. A., “Tailings disposal,” In: *Wills’ Mineral Processing Technology*, , 2016.
- [2] Ministerio de Industria y Energía, “Manual de reutilización de residuos de la industria minera, siderometalúrgica y termoeléctrica.,” In: *RESIDUOS PROCEDENTES DE LA INDUSTRIA MINERA DEL CARBÓN*, 1st ed., ch. 1, Instituto Tecnológico GeoMinero de España, España, 1995.
- [3] Betzab, A., *Residuos Mineros , Qué Son Y Posibilidades De Valorización Residuos Mineros*, 2016.
- [4] Junta de Andalucía, *Los Residuos Mineros*, Andalucía, España, 2006.
- [5] Kinnunen, P., Ismailov, A., Solismaa, S., *et al.*, “Recycling mine tailings in chemically bonded ceramics – a review”, *Journal Of Cleaner Production*, vol. 174, pp. 634–649, 2018.
- [6] Caballero, E., Sánchez, W., Ríos, Y C. A., “Synthesis of geopolymers from alkaline activation of gold minning wastes”, *Ingeniería Y Competitividad*, vol. 16, no. 1, pp. 317–330, 2014.
- [7] Consoli, N. C., Da Silva, A. P., Nierwinski, H. P., *et al.*, “Durability, strength, and stiffness of compacted gold tailings – cement mixes”, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 55, no. 4, pp. 486–494, 2018.
- [8] Gitari, M. W., Akinyemi, S. A., Thobakgale, R., *et al.*, “Physicochemical and mineralogical characterization of musina mine copper and new union gold mine tailings: implications for fabrication of beneficial geopolymeric construction materials”, *Journal Of African Earth Sciences*, vol. 137, pp. 218–228, 2018.
- [9] Kiventerä, J., Lancellotti, I., Catauro, M., *et al.*, “Alkali activation as new option for gold mine tailings inertization”, *Journal Of Cleaner Production*, vol. 187, pp. 76–84, 2018.
- [10] Sedira, N., Castro-gomes, J., “Study of an alkali-activated binder based on tungsten mining mud and brick powder waste”, *8th Scientific-Technical Conference On Material Problems In Civil Engineering*, vol. 06002, pp. 1–8, 2018.
- [11] Solismaa, S., Ismailov, A., Karhu, M., *et al.*, “Valorization of finnish mining tailings for use in the ceramics industry”, *Bulletin Of The Geological Society Of Finland*, vol. 90, no. 1, pp. 33–54, 2018.
- [12] Wei, B., Zhang, Y., Bao, S., “Preparation of geopolymers from vanadium tailings by mechanical activation”, *Construction And Building Materials*, vol. 145, pp. 236–242, 2017.
- [13] Ye, J., Zhang, W., Shi, D., “Properties of an aged geopolymer synthesized from calcined ore-dressing tailing of bauxite and slag”, *Cement And Concrete Research*, vol. 100, no. May, pp. 23–31, 2017.
- [14] Cai, L., Ma, B., Li, X., *et al.*, “Mechanical and hydration characteristics of autoclaved aerated concrete (aac) containing iron-tailings: effect of content and fineness”, *Construction And Building Materials*, vol. 128, pp. 361–372, 2016.
- [15] Cong, X. Y., Lu, S., Yao, Y., *et al.*, “Fabrication and characterization of self-ignition coal gangue autoclaved aerated concrete”, *Materials And Design*, vol. 97, pp. 155–162, 2016.
- [16] Ma, B. guo, Cai, L. xiong, Li, X. guo, *et al.*, “Utilization of iron tailings as substitute in autoclaved aerated concrete: physico-mechanical and microstructure of hydration products”, *Journal Of Cleaner Production*, vol. 127, pp. 162–171, 2016.
- [17] Belkheiri, D., Diouri, A., Taibi, M., *et al.*, “Recycling of moroccan coal gangue in the elaboration of a portland clinker”, *Journal Of Materials And Environmental Science*, vol. 6, no. 6,

pp. 1570–1577, 2015.

[18] Li, X., Wang, H., “Gangue utilization methods inquiry,” no. Cmes, pp. 343–345, 2015.

[19] Xu, G., Sun, C., Sun, Y., *et al.*, “A new comprehensive utilization method for coal gangue : preparing alite-sulphoaluminate cement,” vol. 654, no. 1, pp. 1527–1532, 2013.

[20] Liu, T., Li, X., Guan, L., *et al.*, “Low-cost and environment-friendly ceramic foams made from lead-zinc mine tailings and red mud: foaming mechanism, physical, mechanical and chemical properties”, *Ceramics International*, vol. 42, no. 1, pp. 1733–1739, 2016.

[21] Liu, T., Tang, Y., Li, Z., *et al.*, “Red mud and fly ash incorporation for lightweight foamed ceramics using lead-zinc mine tailings as foaming agent”, *Materials Letters*, vol. 183, pp. 362–364, 2016.

[22] Liu, T., Tang, Y., Han, L., *et al.*, “Recycling of harmful waste lead-zinc mine tailings and fly ash for preparation of inorganic porous ceramics”, *Ceramics International*, vol. 43, no. 6, pp. 4910–4918, 2017.

[23] Campillo Montoya, Luis Felipe Marín Osorio, Nolbayro Andrés Arias Gómez, J. A., López, M. E., *ANEXO 39. Informe Elaboración De Morteros A Partir De Residuos De Minerales Auríferos Del Occidente Antioqueño*, Colombia, 2016.

[24] Han, F., Li, L., Song, S., *et al.*, “Early-age hydration characteristics of composite binder containing iron tailing powder”, *Powder Technology*, vol. 315, pp. 322–331, 2017.

[25] Shettima, A. U., Hussin, M. W., Ahmad, Y., *et al.*, “Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete”, *Construction And Building Materials*, vol. 120, pp. 72–79, 2016.

[26] Provis, J. L., “Alkali-activated materials”, *Cement And Concrete Research*, 2017.

[27] Pacheco-Torgal, F., Jalali, S., Labrincha, J. A., *et al.*, *Eco-Efficient Concrete*, Woodhead Publishing Limited, Philadelphia, USA, 2013.

[28] Vincenzini, P., Leonelli, C., “Geopolymers and geocements: low environmental impact ceramic materials,” In: *Proceedings Of The 12 Th International Ceramics Congress, Part Of CIMTEC 2010- 12 Th International Ceramics Congress And 5th Forum On New Materials Montecatini Terme*, p. 210 2010.

[29] ASTM D421–85, “Standard practice for dry preparation of soil samples for particle-size analysis and determination of soil constants,” 2007.

[30] Rivera, G., “Dosificación de mezclas de concreto,” In: *Concreto Simple*, Universidad del Cauca, 1st ed., ch. 8, Cauca, Colombia, 2013.

[31] Comisión Asesora Permanente Para El Regimen De Construcciones Sismo Resistentes, *NSR-10*, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Colombia, 2010.

[32] Spin S.A., *Especificaciones Y Certificado De Calidad Flocsil*, Colombia, 2018.

[33] ACI Committee, “Standard practice for selecting proportions for normal heavyweight, and mass concrete, aci 211.1-91”, *Manual Of Concrete Practice*, no. Reapproved, pp. 1–38, 1997.

[34] ASTM C39/C39M – 18, “Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens,” 2018.

[35] CEMEX, *Integrated Report CEMEX*, 2017.

[36] ARGOS, *Integrated Report ARGOS*, 2017.

[37] LAFARGEHOLCIM, *Sustainability Report LAFARGEHOLCIM*, 2017.

[38] Salazar Jaramillo, A., *Determinación De Propiedades Físicas Y Estimación Del Consumo Energético En La Producción, De Acero, Concreto, Vidrio, Ladrillo Y Otros Materiales, Entre Ellos Los Alternativos Y Otros De Uso No Tradicional, Utilizados En La Construcción De Edificaciones*, Santiago de Cali, Colombia, 2012.

[39] International Finance Corporation, *Environmental, Health, And Safety Guidelines CEMENT AND LIME MANUFACTURING*In: DRAFT REVISED EHS GUIDELINES FOR CEMENT AND

LIME MANUFACTURING-ENVIRONMENTAL, HEALTH, and SAFETY GUIDELINES
TECHNICAL REVISION, SECOND PUBLIC CONSULTATION, World Bank Group, 2018.

- [40] Thannimalay, L., Yusoff, S., Zawawi, N. Z., “Life cycle assessment of sodium hydroxide”, *Australian Journal Of Basic And Applied Sciences*, vol. 7, no. 2, pp. 421–431, 2013.
- [41] Fawer, M., Concannon, M., Rieber, W., “Life cycle inventories for the production of sodium silicates”, *International Journal Of Life Cycle Assessment*, vol. 4, no. 4, pp. 207–212, 1999.
- [42] De Rossi, A., Simão, L., Ribeiro, M. J., *et al.*, “In-situ synthesis of zeolites by geopolymerization of biomass fly ash and metakaolin”, *Materials Letters*, vol. 236, pp. 644–648, 2019.
- [43] LaRosa, J. L., Kwan, S., Grutzeck, M. W., “Zeolite formation in class f fly ash blended cement pastes”, *Journal Of The American Ceramic Society*, vol. 75, no. 6, pp. 1574–1580, 1992.
- [44] Ojha, K., Pradhan, N. C., Samanta, A. N., “Zeolite from fly ash: synthesis and characterization”, *Bulletin Of Materials Science*, vol. 27, no. 6, pp. 555–564, 2004.
- [45] Alehyen, S., Achouri, M. E. L., Taibi, M., “Characterization, microstructure and properties of fly ash-based geopolymer”, *Journal Of Materials And Environmental Sciences*, vol. 8, no. 5, pp. 1783–1796, 2017.
- [46] Tang, Q., He, Y., Wang, Y. pin, *et al.*, “Study on synthesis and characterization of zsm-20 zeolites from metakaolin-based geopolymers”, *Applied Clay Science*, vol. 129, pp. 102–107, 2016.
- [47] Grutzeck, M., Kwan, S., DiCola, M., “Zeolite formation in alkali-activated cementitious systems”, *Cement And Concrete Research*, vol. 34, no. 6, pp. 949–955, 2004.
- [48] Król, M., Mozgawa, W., “Zeolite layer on metakaolin-based support”, *Microporous And Mesoporous Materials*, vol. 282, no. February, pp. 109–113, 2019.
- [49] Guo, S., Zhang, Y., Wang, K., *et al.*, “Delaying the hydration of portland cement by sodium silicate: setting time and retarding mechanism”, *Construction And Building Materials*, vol. 205, pp. 543–548, 2019.