

ANÁLISIS DE RESIDUOS DE LADRILLO COMO AGREGADO GRUESO PARA LA FABRICACIÓN DE CONCRETO

Susana Gallón Martínez^{1}, Esperanza López Gómez², Carmenza García Restrepo³*

1: Estudiante de Ingeniería de Materiales. Grupo de Investigación en Materiales Cerámicos y Recubrimientos (GIMACYR) – Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

2: Ph.D. Ingeniería y Ciencia de Materiales. Grupo de Investigación en Materiales Cerámicos y Recubrimientos (GIMACYR) – Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

3: Especialista en Ingeniería Ambiental. Ingeniería de Petróleos. Secretaría de Medio Ambiente. Itagüí, Colombia.

*E-mail: susana.gallon@udea.edu.co

RESUMEN

Teniendo en cuenta que la industria ladrillera está clasificada por aspectos técnicos y económicos, fueron seleccionadas dos muestras de residuos cerámicos de ladrillo de la industria tecnificada y dos de la industria artesanal, a fin de evaluar sus fases cristalinas mediante DRX (Difracción de rayos X) y propiedades físicas por medio de análisis granulométricos, determinación de densidad, absorción de agua, masas unitarias, forma y pérdidas por calcinación, basados en las normas técnicas colombianas, para brindar una ruta de aprovechamiento a estos residuos, mediante su aplicabilidad como agregados gruesos en la fabricación de concreto. Posteriormente, fue seleccionada una sola muestra de agregado reciclado, que correspondió a una industria tecnificada, la cual exhibió mejores propiedades para el diseño de una mezcla de concreto, variando su proporción al 5%,10% y 20% en peso de agregado grueso natural por agregado reciclado, y así establecer sus propiedades mecánicas, tales como la resistencia a compresión y la resistencia a flexión con respecto a una mezcla patrón cuya totalidad de agregados son naturales. Considerando esto, también fueron evaluadas, la morfología de las superficies de fractura mediante caracterización SEM (Microscopía electrónica de barrido), colorimetría y propiedades físicas del concreto en estado endurecido. Los resultados de los ensayos, indican que es viable utilizar triturado de ladrillo reciclado como agregado grueso en la elaboración de concreto, siempre y cuando este no supere el 20% en peso del agregado grueso natural.

Palabras claves: Agregados reciclados, chamote, concreto, resistencia nominal, agregados gruesos.

ANALYSIS OF BRICK WASTE AS THICK AGGREGATE FOR CONCRETE MANUFACTURE

ABSTRACT

Taking into account that the brick industry is classified by technical and economic aspects, two samples of brick ceramic waste from the technical industry and two from the artisanal industry were selected in order to evaluate their crystalline phases by means of XRD (X-ray Diffraction)

and physical properties by means of granulometric analysis, determination of density, water absorption, unit masses, shape and losses by calcination, based on colombian technical standards, to provide a route of use to these residues, through their applicability as coarse aggregates in the manufacture of concrete. Subsequently, a single sample of recycled aggregate was selected, which corresponded to a technified industry, which exhibited better properties for the design of a concrete mix, varying its proportion to 5%, 10% and 20% in weight of natural coarse aggregate by recycled aggregate, and thus establish its mechanical properties, such as compressive strength and flexural strength with respect to a standard mixture whose totality of aggregates are natural. Considering this, the morphology of the fracture surfaces was also evaluated by SEM characterization (Scanning Electron Microscopy), colorimetry and physical properties of the hardened concrete. The results of the tests indicate that it is feasible to use shredded recycled brick as a coarse aggregate in the manufacture of concrete, as long as it does not exceed 20% by weight of the natural coarse aggregate.

Keywords: Recycled aggregates, chamotte, concrete, nominal strength, coarse aggregates.

1. INTRODUCCIÓN

Como consecuencia del incremento de la población mundial, la demanda de materiales de construcción también ha aumentado, situación que pone en peligro la calidad del medio ambiente, debido a que se generan diariamente altos volúmenes de residuos sólidos que podrían ser reciclados de forma adecuada. Particularmente las industrias del sector ladrillero, que producen materiales tradicionales de construcción están siendo cada vez menos competitivas en el ámbito internacional y la razón está en que sus productos son fabricados con recursos naturales no renovables, mediante procesos de alto consumo energético y elevados niveles de contaminación atmosférica por emisión de material particulado y gases tóxicos [1]. Por otro lado, esta actividad productiva, genera residuos sólidos inertes constituidos por los escombros cerámicos provenientes de los productos rechazados por rotura o deficiente cocción. Lo anterior, motiva a investigar acerca del aprovechamiento y revalorización de estos residuos, considerando el potencial que tiene de reciclaje en comparación con otros residuos inertes, debido a que los residuos de ladrillo permiten la obtención de un material fragmentado que es utilizado como agregado reciclado ampliamente manejado en la industria de la construcción [2].

Actualmente en Colombia, a pesar de que en las últimas décadas se han incrementado no solo los residuos de ladrillos provenientes de una fabricación defectuosa, sino también los residuos del sector de la construcción y demolición, este tipo de residuos no recibe ninguna clase de tratamiento, lo que conlleva a que en su mayoría, sean utilizados para rellenar huecos presentes en los caminos cercanos a la fuente de generación, ser transportados por empresas que generan un cobro por la disposición o simplemente son arrojados a predios baldíos y quebradas, creando un gran impacto visual y paisajístico [3]. A nivel internacional, en varios países desarrollados han instaurado tanto en su legislación como en sus prácticas ingenieriles, el uso de residuos de la construcción como agregado en diferentes tipos de obras. Cabe destacar las estrategias que desde hace algunos años vienen implementando países desarrollados tales como Estados Unidos, Dinamarca, Holanda, Gran Bretaña, Alemania y Japón, los cuales poseen programas para reciclar materiales de construcción con la creación de plantas de tratamiento y, además poseen una legislación específica que regula y grava el vertido de residuos de construcción [4].

El aprovechamiento de estos residuos constituye un aspecto importante a nivel mundial, ya que representa un beneficio económico por la incorporación de materiales de desecho al proceso productivo de materiales de la construcción y a su vez ayuda a la preservación de los recursos naturales [5]. Es por ello, que el hecho de utilizar los residuos de la industria ladrillera como agregado en la fabricación del concreto, minimiza el empleo de recursos no renovables, donde los agregados constituyen entre el 60 y 75 % en peso de un material estructural, y que debido a su escasez cada vez más progresiva, motiva a buscar alternativas en medio de la demanda constante del concreto en los últimos años, de acuerdo al crecimiento del sector de la construcción [6].

Desde el punto de vista operativo, ambiental y normativo actual, se requiere que sean implementados procesos de tipo ingenieril, que brinden un manejo apropiado de los residuos sólidos. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo está orientado en caracterizar los residuos sólidos cerámicos del sector ladrillero del Municipio de Itagüí, por medio de pruebas de análisis físicas, químicas, mineralógicas y térmicas para posteriormente, determinar un posible plan de aprovechamiento que los incluya dentro de la cadena productiva en aplicaciones industriales, como lo es su implementación como agregado grueso en concreto, permitiendo de igual manera un impacto positivo sobre el medio ambiente. Para este propósito, fueron seleccionadas dos muestras de residuo cerámico de una industria tecnificada y dos de la industria artesanal, para finalmente escoger una sola muestra de residuo de ladrillo, con las mejores propiedades en función de agregado grueso y fabricar probetas de concreto con diferentes proporciones de agregado grueso reciclado como sustitución al agregado grueso natural. Posteriormente, se sometieron a ensayos mecánicos de compresión y flexión, evaluando su morfología mediante técnicas de caracterización, así como a diferentes pruebas físicas como densidad, absorción y color.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Inicialmente, se requiere caracterizar dos muestras de residuos de ladrillo provenientes de una industria tecnificada (RC1 y RC2) y dos de industria artesanal (RC3 y RC4) del Municipio de Itagüí, en función de agregado grueso (Figura 1). Este material fue muestreado mediante la norma NTC 129 “Práctica para la toma de muestras de agregados” y seguidamente fue evaluada su granulometría inicial empleando la norma ASTM C117-95 “Método de ensayo estándar para tamizado de material más fino que la malla N° 200 (75 μ m) en agregados minerales por lavado”. Posteriormente, los residuos cerámicos fueron sometidos a un proceso de trituración (Figura 2) utilizando una trituradora de mandíbulas, con la cual se obtuvieron diferentes tamaños de partícula. Para la elaboración de las mezclas de concreto se emplearon agregados naturales (grava y arena) provenientes de un depósito, cemento Portland Tipo I de la Fábrica ARGOS y como sustitución del agregado natural a diferentes proporciones, se seleccionó una sola muestra de residuo de ladrillo (Figura 3).



Figura 1. Recolección de muestras



Figura 2. Proceso de trituración



Figura 3. Muestras de residuo trituradas

El análisis mineralógico se realizó a las cuatro muestras de ladrillo reciclado de las ladrilleras, mediante la técnica, difracción de rayos X, por medio de la cual se efectuó un análisis cualitativo identificando las fases cristalinas presentes en las muestras de estudio. En la preparación de las muestras, fue necesario obtener una cantidad de 10 g de cada uno de los residuos, mediante varias etapas de conminución, garantizando el pasante de la malla N°200 de la serie Tyler.

Con el fin de determinar las características físicas de las partículas recicladas y de los agregados naturales, se desarrolló el análisis granulométrico, siguiendo el procedimiento descrito en la norma NTC 77 “Método de ensayo para análisis por tamizado de agregado”, con el objetivo de que los agregados reciclados cumplan los requerimientos establecidos en la norma NTC174 “Especificaciones de agregado para concreto”. El tamaño de los agregados fue evaluado mediante el diámetro de Feret y clasificada de acuerdo a los principios de Zingg [7]. Además, se realizó un análisis colorimétrico de las muestras de ladrillo reciclado, empleando el método CieLab y usando un espectrodensitómetro X-Rite 939, con el fin de verificar la incidencia del color de los agregados en la estructura del concreto. En cuanto a las propiedades físicas, tales como densidad aparente, densidad nominal, porcentaje de absorción, masa unitaria y humedad, de igual manera, fueron seguidos los procedimientos establecidos por las Normas Técnicas Colombianas, los cuales son resumidos en la Tabla 1.

Tabla 1. Normas técnicas empleadas para la caracterización física de las partículas recicladas y los agregados naturales.

Norma	Ensayo
NTC 176	Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso
NTC 237	Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado fino
NTC 92	Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados
NTC 1776	Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados

Con respecto a la caracterización térmica, se desarrolló una prueba de calcinación, para determinar el contenido de materia orgánica y el contenido en carbonatos de las muestras de

residuo de ladrillo, considerando así, los elementos no deseados que podrían afectar la calidad del concreto. Para ello se desarrolló el tratamiento térmico el cual se describe en la Figura 4.

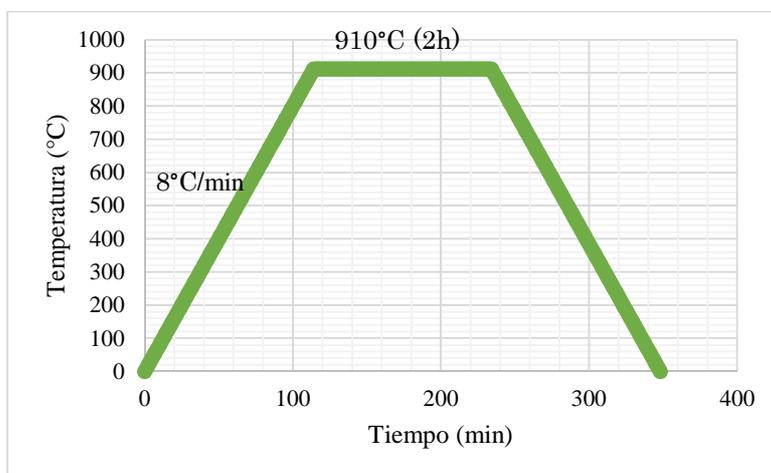


Figura 4. Ciclo térmico de la prueba de calcinación.

Para el diseño de las mezclas de concreto, se realizaron 5 réplicas de cada una de ellas, por lo que se elaboraron 20 probetas cilíndricas para el ensayo de compresión y el análisis de propiedades en estado endurecido, siguiendo el procedimiento descrito en la norma NTC 1377 «Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio». Para todas las mezclas se mantuvo como estándar el contenido en peso del cemento, y la relación agua/cemento; en cuanto a la grava, ésta se sustituyó parcialmente por triturado de ladrillo reciclado en proporciones del 0, 5, 10 y 20% en peso. La Tabla 2, muestra la nomenclatura asignada para cada una de estas mezclas.

Tabla 2. Nomenclatura de las probetas de concreto.

Nombre de la mezcla	Proporciones de los agregados a mezclar
M0-RC	Mezcla normal sin agregados adicionales (Mezcla patrón)
M1-RC	Mezcla con 5% en peso de agregado triturado de ladrillo respecto a la fracción de agregado grueso
M2-RC	Mezcla con 10% en peso de agregado triturado de ladrillo respecto a la fracción de agregado grueso
M3-RC	Mezcla con 20% en peso de agregado triturado de ladrillo respecto a la fracción de agregado grueso

Para lograr que el concreto fabricado con agregado reciclados, mantenga la resistencia a la compresión de diseño establecida, se recomienda que los agregados reciclados deben incorporarse a la mezcla con niveles de humedad altos y por tanto era necesario saturarlos durante 24 horas antes de la fabricación de las probetas para evitar la pérdida rápida de fluidez en el concreto [8]. En la Tabla 3, se indica las proporciones en peso de cada uno de los agregados utilizados en la elaboración de las diferentes mezclas de concreto para el ensayo de compresión. En cuanto a la prueba de flexión, fue desarrollada evaluando la probeta que mejor comportamiento exhibió frente al ensayo de compresión, en comparación a una mezcla con 100%

de agregados naturales. La consistencia y manejabilidad del concreto fresco se determinó mediante el método del cono de Abrams, según la norma NTC 396. «Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto».

Tabla 3. Proporciones en peso de las mezclas de concreto para ensayo de compresión.

Nombre	W/C	(kg)			
		Cemento	AGN	AFN	AGR
M0-RC	0,56	2,30	6,623	3,392	-
M1-RC	0,56	2,30	6,291	3,392	0,331
M2-RC	0,56	2,30	5,960	3,392	0,662
M3-RC	0,56	2,30	5,298	3,392	1,324

* W/C: Relación agua-cemento; AGN: Agregado grueso natural; AFN: Agregado fino natural; AGR: Agregado grueso reciclado.

La resistencia a la compresión y a la flexión, se midieron después de los 28 días de curado, tiempo en el cual se pretende que el concreto haya alcanzado la resistencia nominal establecida, siguiendo la norma NTC 673 “Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto” y la norma NTC 2871 «Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión». Para el desarrollo de este ensayo, se empleó la máquina de ensayos de concreto del Laboratorio de Suelos, Pavimentos y Concretos de la Universidad de Antioquia, la cual se encuentra calibrada. Posteriormente, con el fin de analizar la morfología de las probetas de concreto, se empleó Microscopia Electrónica de Barrido con un equipo con un equipo JEOL JSM-6490LV mediante la cual se identificó el tipo de falla y la interacción del agregado reciclado de ladrillo, con la matriz cementante. Para ello, se tomaron pedazos de las probetas sometidas a los ensayos mecánicos que tuvieran en su superficie de falla, la presencia de agregados reciclados de ladrillo. Adicionalmente, se realizó análisis químico de las partículas de ladrillo reciclado mediante Dispersión de Energía de Rayos X (en inglés, Energy Dispersive Scanning-EDS), utilizando el sistema acoplado al microscopio electrónico de barrido mencionado anteriormente.

Con el objetivo de evaluar las propiedades físicas del concreto en estado endurecido, se siguió el procedimiento descrito en la norma NTC 5653 “Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en el concreto endurecido”. Para el desarrollo de este ensayo, fueron tomadas 2 muestras cilíndricas de cada mezcla, garantizando que estuvieran libres de fisuras, grietas o bordos rotos.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Análisis mineralógico de las muestras de ladrillo reciclado

En la Figura 5, se puede evidenciar el difractograma obtenido para las muestras de ladrillo reciclado. Mediante el análisis cualitativo empleando el software Highscore Xpert y las bases de datos de RRUFF [9], se pudieron identificar las principales fases cristalinas tales como: Cuarzo, Plagioclasas (albita y anortita), calcita, hematita, cordierita, yeso, kaolinita y coesita. Es importante resaltar la presencia de yeso y un pico destacado de kaolinita en la muestra RC4, debido a que su materia prima constituye desechos de la industria de la construcción y demolición, donde estos componentes hacen parte de la pasta para guarnecidos, enlucidos, estucados, revoques, vajillas, sanitarios, azulejos, entre otros.

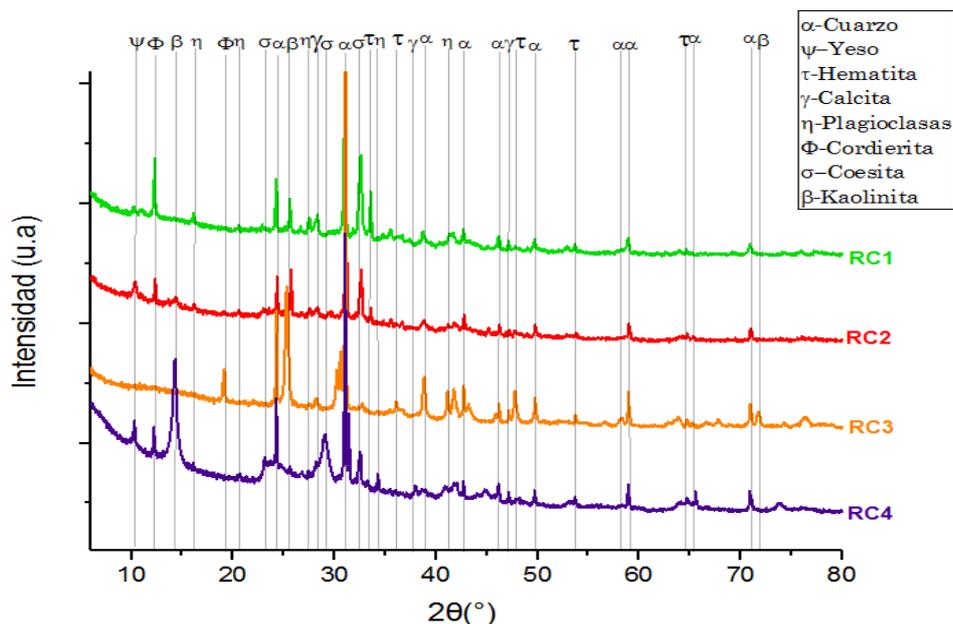


Figura 5. Difractograma de las muestras de ladrillo reciclado.

Adicionalmente, el análisis cuantitativo de los componentes de las muestras de ladrillo reciclado realizado mediante SEM-EDS, el cual indicó que los elementos que componen cada una de las muestras cumplen con la clasificación establecida en la norma NTC 3493 “Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento Portland”, con respecto a los requisitos químicos para constituir un aditivo clase N, dentro de una mezcla de concreto, como se muestra en la Tabla 4,.

Tabla 4. Porcentajes en peso de los óxidos que componen las muestras de ladrillo reciclado.

Nombre del compuesto	Fórmula química	Porcentajes en peso (%) para cada muestra				Norma NTC 3493
		RC1	RC2	RC3	RC4	
Óxido de aluminio	Al ₂ O ₃	25,43	28,98	30,57	31,48	70 (Mínimo)
Dióxido de sílice	SiO ₂	58,80	53,31	52,57	51,12	
Óxido Férrico	Fe ₂ O ₃	11,98	16,41	14,06	10,97	4 (Máximo)
Trióxido de azufre	SO ₃	0	0	0	0	
Óxido de magnesio	MgO	2,64	1,49	0,45	0,00	-
Óxido de potasio	K ₂ O	0,78	1,01	1,38	0,27	
Óxido de sodio	Na ₂ O	0,56	0,00	0,00	0,00	
Óxido de calcio	CaO	2,46	1,43	0,95	1,71	
Óxido de titanio	TiO ₂	0	0	0,16	0,38	
Total		100				

3.2. Granulometría de los materiales

Inicialmente, se desarrolló un análisis de finos, de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C117-95, con el fin de determinar la granulometría de las muestras de ladrillo reciclado en su estado inicial, considerando que estas partículas podrían provocar problemas en la fabricación del

concreto, disminuyendo la resistencia y su velocidad de endurecimiento. En la Figura 6, se observa la curva de distribución granulométrica para los agregados de ladrillo reciclado, evaluados mediante análisis de finos y tamizaje. Se puede evidenciar que la muestra RC2, se encuentra dentro de un rango de agregados gruesos como los alcanzados en un proceso de trituración, con menor implicación energética que las demás, sin embargo, presenta la mayor cantidad de partículas finas. En cuanto a las muestras RC1 y RC4 presenta similitud en las distribuciones de tamaño de sus partículas. Para la muestra RC3, no fue realizado este análisis, debido a que sus partículas estaban constituidas únicamente de residuos de ladrillo de un tamaño superior a las demás.

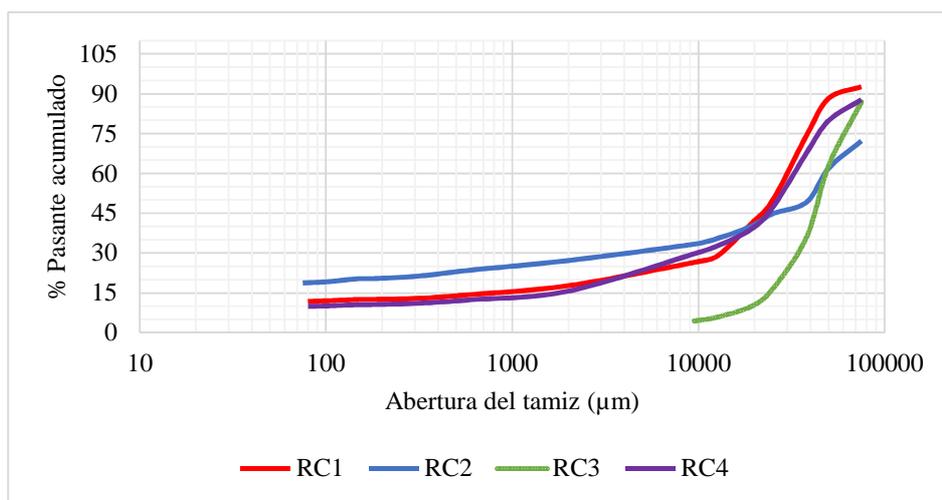


Figura 6. Distribución granulométrica inicial.

Después de realizado el proceso de trituración, se evaluó la granulometría de los agregados naturales y de los agregados reciclados de ladrillo, las respectivas curvas granulométricas se muestran en la

Figura 7. A nivel general, se observa el cumplimiento dentro de los límites de la muestra de agregado grueso natural, con respecto a las muestras de agregados reciclados, la muestra que cumplió en un mayor rango los límites establecidos por la norma es la RC2.

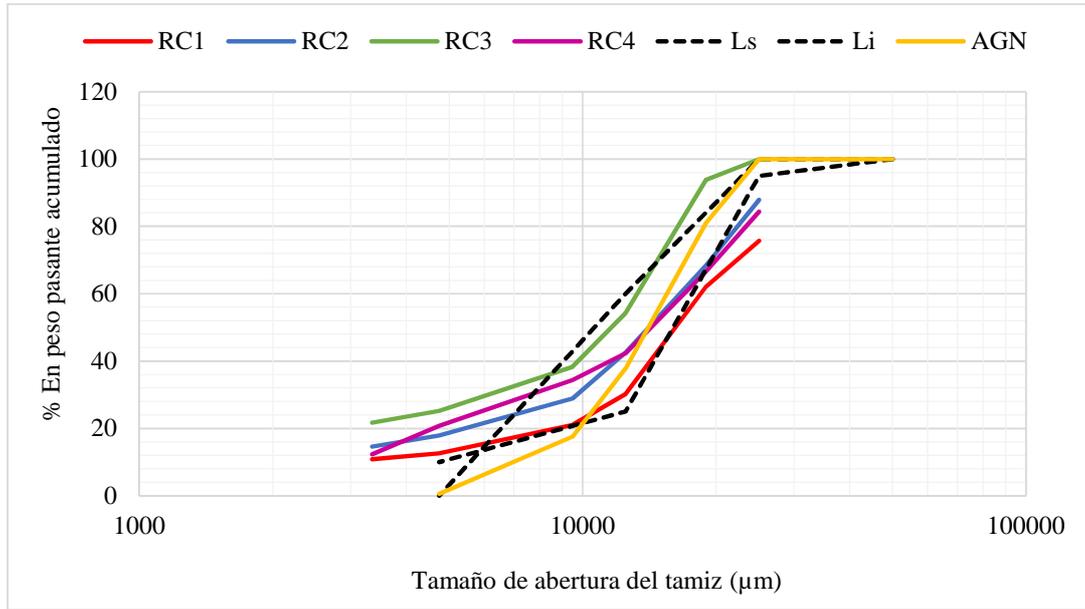


Figura 7. Análisis granulométrico para los agregados gruesos naturales y reciclados.

3.3. Análisis térmico

Los resultados del proceso de calcinación se muestran en la Figura 8. Las muestras que presentaron mayores pérdidas por calcinación, con un porcentaje de reducción entre el 2,3 y 19,2%, corresponden a industrias de tipo artesanal, lo que permite concluir que éstas muestras poseen mayor cantidad de elementos no deseados, los cuales afectarían en mayor medida la calidad del concreto. Sin embargo, todas las muestras de agregado reciclado, cumplen con los límites máximos del 10% en peso de pérdidas por ignición, establecidos por la norma NTC 3493.

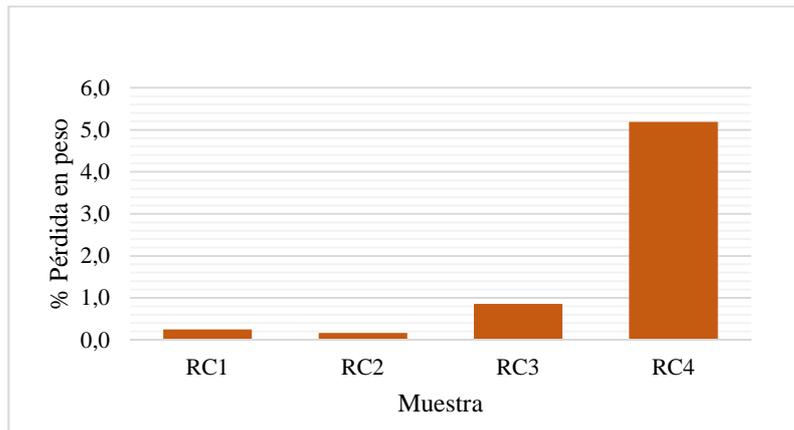


Figura 8. Resultados de ensayo térmico para las pérdidas por calcinación (%).

3.4. Propiedades físicas de los agregados

En la Tabla 5, se muestran los resultados de las propiedades físicas de los agregados naturales y de los reciclados de ladrillo a emplear en la mezcla de concreto. Se puede observar, que los agregados reciclados de ladrillo presentan una densidad aparente y nominal menor y un porcentaje de absorción de agua mayor respecto a los agregados naturales. Esto se atribuye a una

mayor porosidad y la forma angular, resultado del proceso de trituración. De igual forma, se observa que los residuos de ladrillo de las industrias tecnificadas presentan una mayor compactación y calidad con respecto a los residuos de industrias artesanales, basados en las diferentes técnicas y equipos de procesamiento empleados para la producción de los ladrillos.

Tabla 5. Propiedades físicas de los agregados naturales y reciclados de ladrillo.

Muestra	Densidad aparente (Kg/dm ³)	Densidad nominal (Kg/dm ³)	Absorción (%)	Humedad (%)	M.U.C. (Kg/m ³)	M.U.S. (Kg/m ³)
AGN	2,27	2,30	0,53	0,34	1652,0	1608,8
AFN	2,66	2,76	1,24	0,23	-	-
RC1	1,81	2,25	10,82	0,27	1069,7	902,8
RC2	1,73	2,06	9,17	0,78	1055,8	897,8
RC3	1,58	2,21	17,88	1,20	1050,3	893,0
RC4	1,67	2,00	9,96	1,26	1059,4	900,5

*AGN: Agregado grueso natural, AFN: Agregado fino natural, M.U.C: Masa unitaria compacta, M.U.S: Masa unitaria suelta.

También se observa en la Tabla 5, que los agregados reciclados presentan un porcentaje de humedad mayor, debido principalmente a su característica porosa y a la disposición a la intemperie de los residuos. En cuanto a las masas unitarias, los agregados reciclados de ladrillo presentan valores menores con respecto a los agregados naturales, considerando que esta es una propiedad relacionada con el valor de la densidad y además, debido a las características de forma, que impiden el acomodamiento de las partículas y a la porosidad propia del material cerámico, que hacen menos compacta su estructura.

3.5. Forma

Los agregados reciclados, debido a su procedencia y tratamiento previo, presentan diferentes características de forma y textura, que afectan directamente la cantidad de agua a adicionar a la mezcla y por ende, la manejabilidad de la misma. En la Tabla 6, se muestran los resultados de las medidas realizadas, empleando los principios del diámetro de Feret, de acuerdo a la clasificación de Zingg [10].

Tabla 6. Coeficiente de forma para los agregados reciclados.

Muestra	b/a	c/b	Forma
RC1	0,71	0,36	Discoidal
RC2	0,69	0,55	Discoidal
RC3	0,69	0,56	Discoidal
RC4	0,65	0,52	Discoidal

A nivel general, todas las partículas tienden al mismo coeficiente de forma, discoidal, es decir, en forma de disco irregular. Esta característica de forma, presenta cercanía respecto a la condición esférica, lo que permite afirmar que los agregados reciclados en cuanto a su forma, establecen requerimientos de pasta de cemento menores con respecto a partículas elongadas y aplanadas, ya que estos últimos, presentan una mayor superficie específica.

3.6. Color de los agregados reciclados

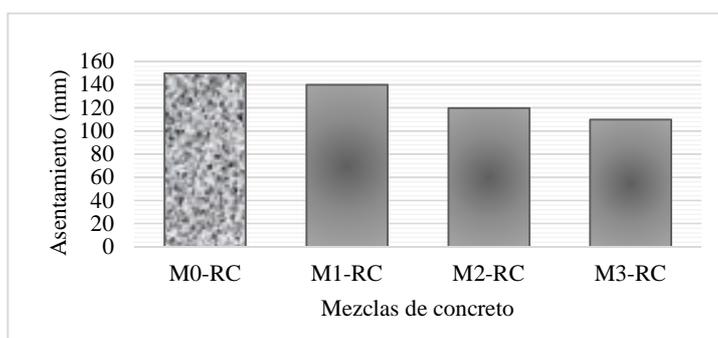
Se evaluó el carácter colorimétrico de las muestras, previo al desarrollo de las mezclas. Los resultados se muestran en la Tabla 7. De acuerdo a ellos, se pudo establecer que el color de los agregados reciclados, presenta una designación predominante del color, según la enciclopedia del color, “ColorHexa”, es “Naranja moderadamente oscuro”. Además, a nivel general, se considera que las muestras tienen la tonalidad típica de un ladrillo, donde aquella muestra que presenta menor intensidad del color, con una tendencia baja al rojo, es la RC3 (62%), y por el contrario la muestra que presenta más tendencia y mayor intensidad respecto al rojo, corresponde a la muestra RC1(74%), estableciendo una diferenciación clara entre la industria artesanal y la tecnificada, respectivamente, como consecuencia de las técnicas de procesamiento y materias primas variantes.

Tabla 7. Resultados de la caracterización colorimétrica de las muestras de agregado reciclado

Muestra/ Parámetro	L	a	b	C	H	Desvest	Color Hexadecimal	Color
RC1	59,09	19,09	28,17	34,01	56,2	0,51	#BC805D	
RC2	56,31	18,5	26,44	32,28	55,02	0,28	#B27959	
RC3	47,86	20,16	24,24	31,42	50,93	0,71	#9E633C	
RC4	54,97	16,91	20,26	26,39	50,07	0,36	#AA7761	

3.7. Manejabilidad del concreto fresco

La consistencia media del concreto fresco con una relación a/c = 0,56 fue de 130 mm, como se muestra en la Figura 9. De acuerdo a ello, se puede indicar que a medida que incrementa la cantidad de agregados reciclados, disminuye el valor del asentamiento, considerando que los agregados reciclados tienden a absorber el agua dosificada para la mezcla, aun cuando estos han sido saturados previamente.



* Mezclas de concreto: M0-RC Mezcla patrón; M1-5% en AGR; M2-RC 10% en AGR; M3-RC 20% en AGR

Figura 9. Resultados de medida de asentamiento para diferentes mezclas de concreto con el agregado reciclado RC2.

3.8. Concreto endurecido

3.8.1. Resistencia a compresión

Los resultados respecto a la resistencia a compresión para las diferentes mezclas de concreto se muestran en la Figura 10. Se observa que las resistencias que exhiben las mezclas M1-RC, M2-

RC, M3-RC con la muestra de agregado reciclado RC2, que corresponden a concretos con alguna proporción de agregado reciclado de ladrillo, presentan una disminución respecto a la mezcla patrón, elaborada con agregados totalmente naturales. Sin embargo, el porcentaje de variación respecto a la mezcla de referencia esta entre un 11,2 y 23,2%, valores cercanos al los de un concreto convencional.

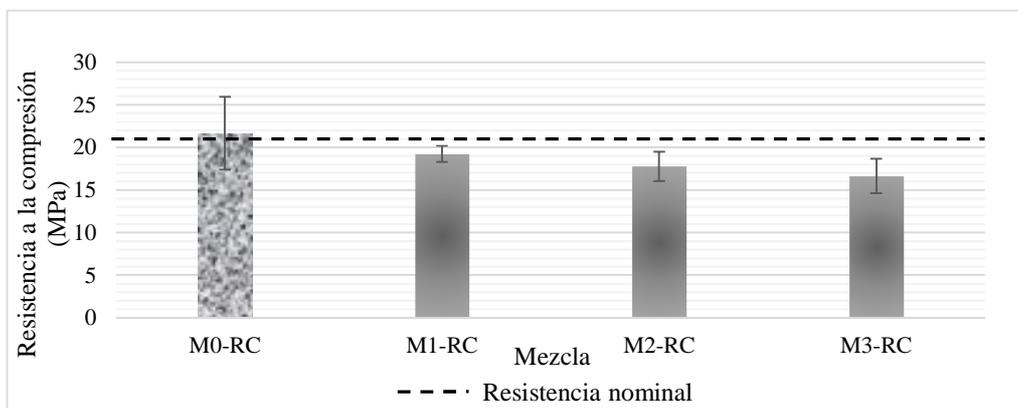


Figura 10. Resultados de resistencia a compresión para las mezclas de concreto.

3.8.2. Resistencia a flexión

Considerando que la mezcla M1-RC, con una proporción del 5% en peso en agregados reciclados RC2 exhibió el mejor comportamiento a compresión, se desarrolló una mezcla con esta proporción para comparar su comportamiento a flexión, respecto a una mezcla patrón. Los resultados se muestran en la

Figura 11, de los cuales se puede concluir que, aunque se generó una disminución del 7,6% respecto al espécimen patrón, por características propias del agregado reciclado, se obtiene un beneficio a favor de la unión entre este agregado y la pasta del cemento, mejorando los rendimientos de este ensayo en comparación a los ensayos de resistencia a compresión.

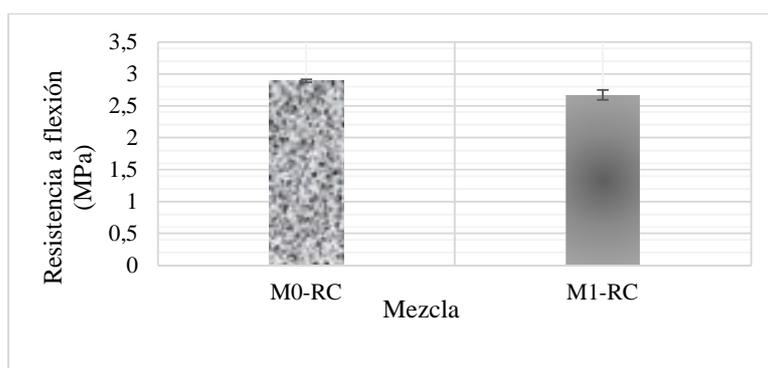


Figura 11. Resultados de la resistencia a flexión para las mezclas de concreto.

3.8.3. Análisis de superficies de fractura

En la Figura 12, se presentan las imágenes tomadas en el SEM de las probetas de concreto patrón. En la pasta de concreto; se observa la presencia de gel de C-S-H (Silicato cálcico hidratado) en

abundancia, producto de reacción responsable de las propiedades de la pasta de cemento. Dicha fase, forma una capa continua que une las partículas de cemento originales en un todo cohesivo; también se evidencia la formación de cristales de etringita, los cuales tienen una forma característica de agujas pequeñas o varillas alargadas, que le brindan al cemento mayor cohesión. Además, se ve la presencia de Portlandita en forma de plaquetas hexagonales delgadas, pero que posteriormente se convierten en depósitos masivos y también se observan, los agregados gruesos naturales (grava) en forma angular, particularmente en zonas de fractura, inmersos de pasta de cemento [11]. Es posible identificar una zona de transición interfacial (ITZ) entre la pasta de cemento y los agregados, por medio de la cual, ante la aplicación de algún tipo de carga, inicia el microagrietamiento entre el agregado grueso y el mortero que lo rodea.

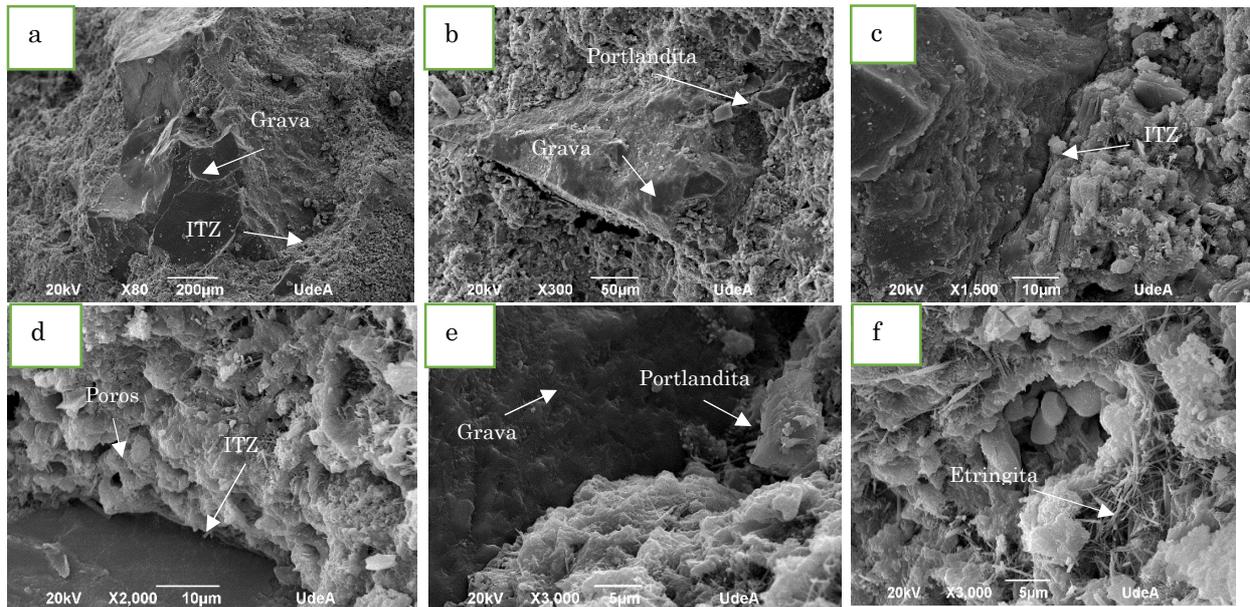


Figura 12. Muestra de mezcla de concreto patrón. Superficies de fractura de pruebas de resistencia a compresión (a) X80, (b) X300, (c) X1500, (d) X2000, (e) X3000, (f) X3000.

En la Figura 13, se evidencian las imágenes SEM para las mezclas de concreto con agregados reciclados a diferentes proporciones. Se observa una mejor adherencia de la pasta de cemento con respecto a los agregados naturales por su característica rugosa y angular. Además, al igual que la muestra patrón, se identifican las fases portlandita, etringita, gel C-H-S e incluso se resalta para este caso, la presencia de fisuras en la Figura 13. a y e, las cuales se reconocen porque que se encuentran rodeando los granos en lugar de atravesarlos, como ocurre en el caso de las fisuras por una falla a compresión. Este tipo de fisuras se generan debido al calor de hidratación, es decir, producidas por las reacciones exotérmicas de hidratación.

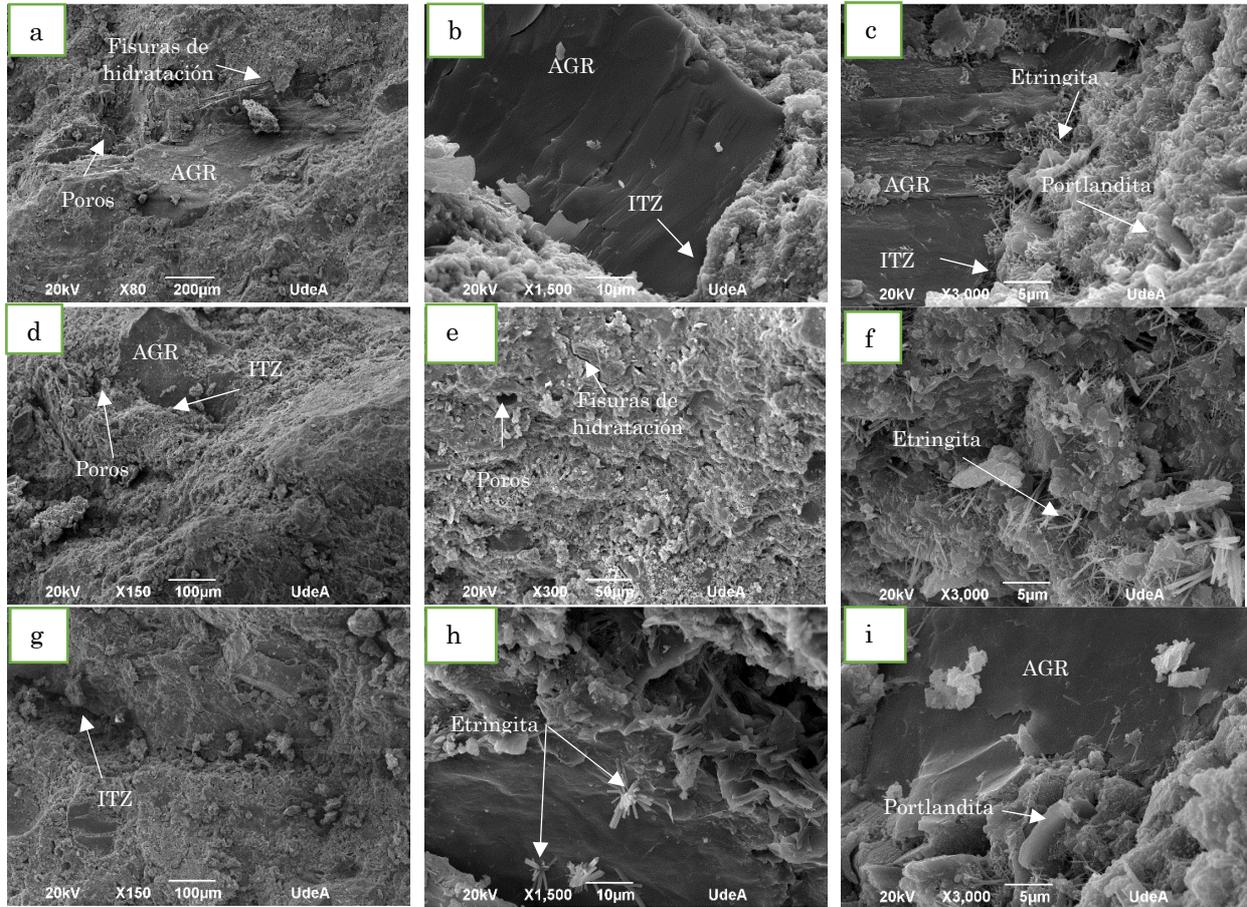


Figura 13. Muestra de mezcla con 5% en agregado reciclado RC2(a) X80, (b) X1500, (c) X3000. Muestra de mezcla con 10% en agregado reciclado RC2 (d) X150, (e) X300, (f) 3000. Muestra de mezcla con 20% en agregado reciclado RC2 (g) X150 (h) X1500 (i) X3000. Superficies de fractura de pruebas de resistencia a compresión.

3.8.4. Análisis de color

En la Tabla 8, se especifican los resultados del análisis colorimétrico para las probetas de concreto endurecido. La descripción del color especificada por la enciclopedia de “Colorhexa”, designa un color denominado “Naranja grisáceo oscuro”, el cual tiene una tendencia con mayor saturación hacia los grises, incluso para la muestra patrón. Lo anterior, demuestra que los agregados no generan una variación en el aspecto colorimétrico de las mezclas ya que, sin importar la proporción de agregado reciclado de ladrillo, la prueba indica la misma denominación de color.

Tabla 8. Resultados de la caracterización colorimétrica de las muestras de concreto endurecido.

Muestra/Parámetro	L	a	b	C	H	Desvest	Color Hexadecimal	Color
MO-RC	70,90	0,43	3,28	3,32	84,37	2,31	#b0aca7	
M1-RC	67,89	1,57	5,23	5,47	74,07	1,99	#aca39b	
M2-RC	60,54	1,13	4,69	4,83	76,31	1,46	#979089	

M3-RC	68,36	1,99	4,95	5,37	70,15	3,02	#aea49d	
--------------	-------	------	------	------	-------	------	---------	--

3.8.5. Propiedades físicas del concreto endurecido

En la Figura 14, se puede evidenciar que el valor de la densidad disminuye a medida que incrementa la proporción de agregado reciclado de ladrillo. El valor de la densidad del concreto endurecido depende fundamentalmente del tipo de árido, método de compactación y del aire incluido, presentando un porcentaje de disminución del 18 y 23,9% para los concretos con agregados reciclados respecto a la mezcla patrón. Con respecto al porcentaje de absorción del concreto endurecido, los resultados se muestran en la Figura 15. Es posible observar un incremento considerable de esta propiedad para las mezclas que poseen sustitución de agregado natural por agregado reciclado de ladrillo, lo que se traduce en una mayor permeabilidad del agua. El aumento del porcentaje de absorción, de la mezcla de concreto con mayor proporción de agregado reciclado respecto a la mezcla patrón, es de un 34%, indicando que las características de forma angulares y porosas de los agregados reciclados de ladrillo influyen en esta propiedad, debido a que son parámetros diferenciables claves respecto a los agregados naturales.

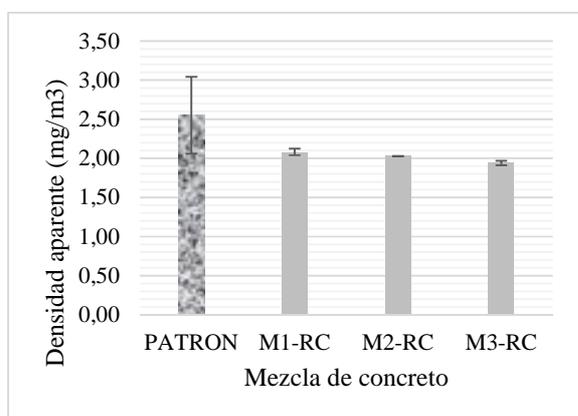


Figura 14. Densidad del concreto endurecido para las mezclas de concreto elaboradas.

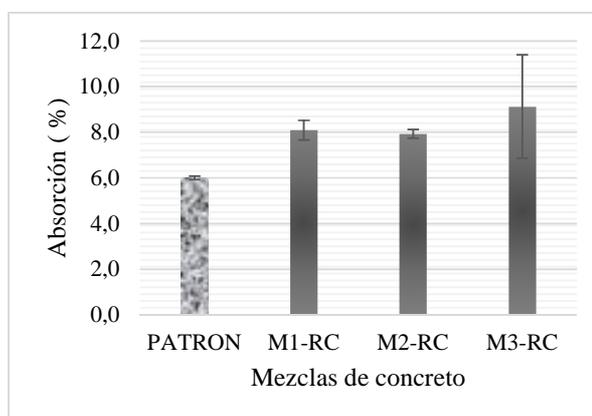


Figura 15. Absorción del concreto endurecido para las mezclas de concreto elaboradas.

4. CONCLUSIONES

Se identificó que los agregados reciclados de ladrillo, presentan un porcentaje de absorción, considerando que todos sobrepasan los rangos que van de 0.2 a 7%, mostrando así una noción de la cantidad de agua que es capaz de alojar el agregado en su interior y que por ende podría variar considerablemente la relación agua cemento establecida en el diseño de la mezcla.

La densidad aparente, como propiedad base, para el diseño de la mezcla en la proporción de agregados, presenta una disminución del 20 al 26% para los agregados reciclados con respecto a los agregados naturales, debido principalmente a su característica porosa.

La manejabilidad de la mezcla de concreto, cuando se emplean agregados reciclados cumplió con el intervalo de 100 a 150 mm establecido en el diseño de la mezcla. Sin embargo, se identificó una disminución en el valor del asentamiento de 40 mm para la mezcla con 20% de agregados reciclados de ladrillo con respecto a la mezcla patrón con 100% agregados naturales.

Emplear ladrillo triturado como agregado grueso en la elaboración de concreto, es una solución viable a favor del medio ambiente en un tema crítico como los residuos sólidos, bien sea por

defectuosa fabricación, construcción o demoliciones. De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, el concreto reciclado puede ser empleado cuando la sustitución de agregado grueso no exceda el 20% en peso a partir de la cual las resistencias presentan una disminución superior al 23% de la resistencia nominal.

Los análisis colorimétricos desarrollados, indican previo al desarrollo de la mezcla de concreto, que los agregados reciclados presentan una designación típica denominada “naranja moderadamente oscuro”, con una tendencia alta hacia el rojo de 18,86, sin embargo, una vez desarrolladas las probetas de concreto, no se establece una variación en el color gris característico del concreto con la totalidad de agregados naturales, ya que la distribución de los agregados gruesos, no tiene incidencia superficial significativa y por tanto, el color para dichas probetas es denominado “naranja grisáceo oscuro”, con tendencia baja hacia el parámetro del color rojo de 1,08.

El concreto fabricado con la mayor proporción de agregado reciclado de ladrillo, presenta una disminución en su valor de densidad del 23,9 % respecto a una mezcla con agregados naturales en su totalidad, y un aumento en el porcentaje de absorción del 34,2% con respecto a la mezcla patrón. Esto se atribuye a las características propias del agregado reciclado, como material cerámico y a las diferentes interacciones entre la pasta de cemento y los agregados, los cuales exhiben una mayor porosidad.

Aunque no fueron alcanzadas las resistencias nominales, establecidas en el diseño de la mezcla cuando son empleados agregados gruesos reciclados, este concreto reciclado es una opción viable para emplearse en parqueos, bordillos, banquetas y estabilización de suelos. También pueden emplearse en la fabricación de productos manufacturados como topes de automóviles, tapaderas de obras hidráulicas y blocks.

5. REFERENCIAS

- [1] Tiempo-Colciencias, "*Ladrillos hechos de escombros*" - Archivo digital de noticias de Colombia y el mundo desde 1.990 - ELTIEMPO.COM, [En línea], Disponible en: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-912278>, [Consultado: 15-ene-2018].
- [2] Viviana, Á., Rojas, P., "Use of crushed recycled brick coarse as aggregate in the use elaboration of concrete", *Ingenium*, vol. 13, núm. 26, pp. 116–125, 2012.
- [3] Rocha Osorio, C. L., "*Aprovechamiento y revalorización de residuos de la construcción y demolición generados por un evento adverso para la construcción de obras civiles sostenibles*", Monogr. Investig. Catol. Manizales, pp. 7–9, 2015.
- [4] Escandon Mejía, J. C., "*Diagnóstico técnico y económico del aprovechamiento de residuos de construcción y demolición en edificaciones en la ciudad de Bogotá.*", pp. 1–91, 2011.
- [5] Guarín, J. M., "Posibilidad de diseño con el concreto arquitectónico utilizando agregado grueso de ladrillo triturado reciclado", núm. 2, pp. 81–87, 2012.
- [6] Lopez, L. G. De, *El Concreto Y Otros Materiales Para La Construcción*, Manizales, 2003.
- [7] Crespo Villalaz, C., *Mecánica De Suelos Y Cimentaciones*, Limusa, 2007.
- [8] Fong, W. F. K., Yeung, J. S. K., Poon, C. S., "*Hong kong experience of using recycled aggregates from construction and demolition materials in ready mix concrete*", *Proc. Int. Work. Sustain. Dev. Concr. Technol.*, pp. 267–275, 2004.
- [9] Geosciences, D., Arizona, U. of, RRUFF.INFO, [En línea], Disponible en: http://rruff.info/about/about_general.php#.
- [10] Villalaz, C. C., *Mecánica De Suelos Y Cimentaciones*, E. Limusa, , Mexico, 2004.

[11] Gómez-Zamorano, L. Y., Escalante, J. I., “Hidratación y microestructura de cemento portland sustituido parcialmente”, *Mater. Construcción*, vol. 59, núm. 296, pp. 5–16, 2009.