

**EVALUACIÓN DE UN CONCRETO MODIFICADO PARA EL USO COMO
AISLANTE TÉRMICO EN EDIFICACIONES**

**DIEGO JULIAN ORDOÑEZ TORRES
JOHN ANDERSON MARTINEZ OLARTE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

**EVALUACIÓN DE UN CONCRETO MODIFICADO PARA EL USO COMO
AISLANTE TÉRMICO EN EDIFICACIONES**

**DIEGO JULIAN ORDOÑEZ TORRES
JOHN ANDERSON MARTINEZ OLARTE**

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil

**Director
RICARDO ALFREDO CRUZ HERNANDEZ
PhD en Ingeniería Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2018**

DEDICATORIA

A mi madre por todo su empeño, generosidad y su amor. A mis tíos Jairo, José, Fanny, Chela, Elda, y Carmenza que nunca me dejaron solo y siempre me apoyaron en todos los momentos de mi vida. A mi primo hermano del alma el cual ha sido mi compañía de aventuras en toda mi vida. A mi prima Sandrita que desde que nací ha estado pendiente de mí. A mi padre por toda su colaboración en mi vida universitaria.

A todos mis amigos que han compartido conmigo los mejores y peores momentos de mi vida, los cuales me han aportado valores sustanciales a mi vida.

DIEGO JULIAN ORDOÑEZ TORRES

Para mis papás Gloria y Aquileo por todo su apoyo y motivación. Para mis hermanas Liseth y Katherine por ser incondicionales y brindarme sus buenos consejos. Para Laura por su amor e inspiración. Para toda mi familia y amigos que han hecho parte de mi crecimiento como persona.

JOHN ANDERSON MARTÍNEZ OLARTE

AGRADECIMIENTOS

Al grupo de docentes de la Escuela de Ingeniería Civil por su gran dedicación a la enseñanza, porque siempre estuvieron ahí para nosotros.

Al profesor Ricardo Cruz y el Ingeniero Carlos por su gran colaboración en nuestra investigación, porque sin ellos esto no hubiera sido posible.

A Daniela Quiroz Fonseca por su colaboración, interés, apoyo y enseñanzas fue una parte fundamental en nuestro trabajo de grado.

DIEGO JULIAN ORDOÑEZ TORRES

El autor expresa agradecimiento: al ingeniero Carlos Ramírez por su colaboración y consejos durante la investigación, a los docentes y personal de la UIS por sus enseñanzas e instrucciones y a mi prima Mari por su valiosa contribución.

JOHN ANDERSON MARTÍNEZ OLARTE

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. METODOLOGÍA	17
1.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	17
2.1.1 Agua	17
2.1.2 Cemento	17
2.1.3 Agregado fino.....	17
2.1.4 Agregado grueso	19
2.1.5 Polvo de neumáticos reciclados.....	21
2.2 DISEÑO DE LA MEZCLA DE CONCRETO	22
3. PRUEBAS EXPERIMENTALES	27
3.1 MANEJABILIDAD	27
3.2 DENSIDAD Y POROSIDAD.....	28
3.3 COMPRESIÓN SIMPLE	29
3.4 FLEXIÓN.....	30
3.5 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	30
3.6 ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL	32
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	33
4.1 MANEJABILIDAD	33
4.2 DENSIDAD Y POROSIDAD.....	34
4.3 COMPRESIÓN SIMPLE	36
4.4 FLEXIÓN.....	39
4.5 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	39
4.6 ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL	41
4.7 APLICACIÓN EN EDIFICACIONES	44
4.7.1 Valores de referencia de confort térmico	45

4.7.2. Resistencia térmica.....	47
4.7.3. Transmitancia térmica.....	48
5. CONCLUSIONES	51
6. RECOMENDACIONES.....	52
BIBLIOGRAFÍA.....	53

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Análisis granulométrico agregado fino.	19
Figura 2. Análisis granulométrico agregado grueso.	20
Figura 3. Polvo de NR.	21
Figura 4. Imágenes SEM del polvo de NR.	22
Figura 5. Medición del asentamiento para el CMNR30.	27
Figura 6. Espécimen sometido a la carga axial de compresión.	29
Figura 7. Thermal conductivity analyzer (C-therm TCi).	31
Figura 8. Microscopio Quanta Feg 650.	32
Figura 9. Asentamiento de las mezclas.	33
Figura 10. Densidad aparente promedio vs. Dosificación de NR.	34
Figura 11. Porcentaje de poros promedio vs. Dosificación de NR.	35
Figura 12. Resistencia a la compresión vs. Dosificación de NR.	37
Figura 13. Relación entre la compresión y la porosidad para cada dosificación de NR.	38
Figura 14. Resistencia promedio a la flexión vs. Dosificación de NR.	39
Figura 15. Conductividad térmica promedio vs. Dosificación de NR.	40
Figura 16. Relación entre la densidad y la porosidad vs. Conductividad térmica.	41
Figura 17. Imágenes SEM de las muestras.	42

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Granulometría agregado fino.	18
Tabla 2. Parámetros agregado fino.....	19
Tabla 3. Granulometría agregado grueso.	20
Tabla 4. Parámetros agregado grueso.	21
Tabla 5. Composición química del polvo de NR.	22
Tabla 6. Propiedades de los materiales.....	23
Tabla 7. Diseño de la mezcla del CC para 1 metro cúbico de volumen.....	23
Tabla 8. Diseño de las mezclas del CC y los CMNR, para 1 metro cúbico de volumen.	26
Tabla 9. Asentamiento de las mezclas y sus porcentajes de reducción respecto al CC.	33
Tabla 10. Densidad promedio de los concretos y sus porcentajes de reducción respecto al CC.	35
Tabla 11. Resistencia promedio a la compresión y sus porcentajes de reducción respecto al CC.	36
Tabla 12. Conductividad térmica promedio y sus porcentajes de reducción respecto al CC.	40
Tabla 13. Temperaturas medias anuales.....	45
Tabla 14. Valores de referencia de confort térmico.	47
Tabla 15. Resistencias térmicas superficiales.	47
Tabla 16. Análisis de transmitancia termica.....	48
Tabla 17. Transmitancia térmica de referencia para minimizar el riesgo de condensaciones.	50

RESUMEN

Título. EVALUACIÓN DE UN CONCRETO MODIFICADO PARA EL USO COMO AISLANTE TÉRMICO EN EDIFICACIONES*

Autor: DIEGO JULIAN ORDOÑEZ TORRES
JOHN ANDERSON MARTINEZ OLARTE**

Palabras Clave: Conductividad térmica, aislamiento térmico, porosidad, densidad, propiedades mecánicas, asentamiento, zona de transición interfacial (ITZ), polvo de neumáticos reciclados.

En este estudio se investigaron las propiedades mecánicas y térmicas de un concreto modificado, al que le fue reemplazado parte del agregado fino por polvo de neumáticos reciclados en porcentajes de 0, 10, 20, 30 y 40% en peso. Las mezclas de los concretos modificados presentaron una reducción gradual en sus asentamientos conforme se aumentaba la dosificación de partículas de caucho. Los especímenes elaborados se sometieron a diferentes pruebas y en ellas, los concretos modificados arrojaron como resultado una disminución en sus valores de compresión, flexión, densidad, conductividad térmica y un incremento en su porosidad, tomando como referencia el concreto sin modificar. Los resultados de densidad, porosidad y conductividad térmica, son expuestos mediante graficas en las que se correlacionan estas variables para comprender la relación que existe entre ellas. La zona de transición interfacial (ITZ) entre la pasta de cemento y el polvo de neumático, fue visualizada y se advirtió de una baja adherencia entre estos componentes. La composición química del polvo de neumático y de un espécimen por cada porcentaje de caucho utilizado, son analizadas con el fin de identificar los elementos químicos presentes en cada material. La aplicación que se propuso en esta investigación dará lugar a la implementación de materiales que utilicen desechos y que cuenten con propiedades de aislamiento térmico para el uso en edificaciones.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Civil Director Omar Giovanni Sanchez Rivera PhD. en Ingeniería - Gestión de Desarrollo Tecnológico

ABSTRACT

Title. EVALUATION OF A MODIFIED CONCRETE FOR USE AS A THERMAL INSULATION IN BUILDINGS *

Authors: DIEGO JULIAN ORDOÑEZ TORRES
JOHN ANDERSON MARTINEZ OLARTE **

KEYWORDS: Thermal conductivity, thermal insulation, porosity, density, mechanical properties, settlement, interfacial transition zone (ITZ), recycled tire dust.

In this study we investigated the mechanical and thermal properties of a modified concrete, which was replaced part of the fine aggregate by recycled tire powder in percentages of 0, 10, 20, 30 and 40% by weight. The mixtures of the modified concrete showed a gradual reduction in their settlements as the dosage of rubber particles was increased. The elaborated specimens were subjected to different tests and in them, the modified concretes resulted in a decrease in their values of compression, bending, density, thermal conductivity and an increase in their porosity, taking as reference the unmodified concrete. The results of density, porosity and thermal conductivity are exposed by graphs in which these variables are correlated to understand the relationship that exists between them. The interfacial transition zone (ITZ) between the cement paste and the tire powder was visualized and a low adhesion between these components was noticed. The chemical composition of the tire powder and of a specimen for each percentage of rubber used, are analyzed in order to identify the chemical elements present in each material. The application proposed in this research will lead to the implementation of materials that use waste and that have thermal insulation properties for use in buildings.

* Degree work

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering School of Civil Engineering Director Omar Giovanni Sanchez Rivera PhD. in Engineering - Technological Development Management

INTRODUCCIÓN

En el sector de la construcción se emplean diversos materiales como agregados pétreos, maderas, metales, plásticos, pinturas y aislantes. Algunos de estos, provocan un impacto negativo al medio ambiente por ser extraídos directamente de la naturaleza, de fuentes no renovables o con tasas de renovación lenta con respecto a la tasa de uso. Además, otros son fabricados a partir de procesos industriales en los que se generan altas emisiones de dióxido de carbono (CO₂). En la construcción de edificaciones se hace evidente el excesivo consumo de dichos materiales, por lo cual, este sector ha sido uno de los grandes responsables ante el uso desmesurado de recursos naturales, a tal punto que afecta negativamente el planeta^{1 2 3}. Como consecuencia, es necesario adoptar medidas que mitiguen la sobreexplotación y que incentiven el uso de materiales de construcción eco-eficientes⁴ Es así como, el autor Pacheco presenta una serie de objetivos bajo un enfoque sostenible para el desarrollo de materiales eco-eficientes que buscan lograr un impacto positivo en la industria de la construcción, mediante el programa de investigación e innovación Horizon 2020 de la Unión Europea⁵. Adicionalmente, en los últimos años, las fuentes de energía se han agotado rápidamente⁶, lo que ha fomentado el uso de materiales reciclables que representen una reducción del

¹ HÄFLIGER I. F. et al., "Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials," J. Clean. Prod., vol. 156, pp. 805–816, 2017

² JACOBS B. T. L., MEMBER A., and P. VESILIND A., "Probabilistic environmental risk of hazardous materials," vol. 118, pp. 878–889, 1993

³ LO C.-L., "Environmental benefits of renewable building materials: A case study in Taiwan," Energy Build., vol. 140, pp. 236–244, 2017

⁴ *Ibíd.*

⁵ WANG G. and LEE N., "The Methodology of Utilization of Waste and Recycled Materials in Construction," Int. Conf. Sustain. Des. Eng. Constr. Texas, Novemb., pp. 749–756, 2012

⁶ PACHECO-TORGAL F, LABRINCHA J.A. The future of construction materials research and the seventh UN Millennium Development Goal: A few insights. En: Construction and Building Materials. Marzo 2013. Vol 40. P. 729-737

consumo de energía ⁷. Cabe resaltar que, en Colombia la demanda de energía tuvo un crecimiento en los últimos años, según el Informe de Operación presentado por la compañía XM ⁸. Estos datos evidencian la necesidad de encontrar alternativas que logren reducir el consumo energético. La producción de neumáticos en el mundo es alrededor de 1,5 millones de unidades al año, esta cifra es alarmante ya que por cada neumático que se vende, hay otro que culmina su vida útil convirtiéndose en un residuo ⁹. Por lo tanto, es sostenible pensar en la reutilización de dicho material ¹⁰. Los neumáticos usados por la industria automotriz no tienen un adecuado proceso de reciclaje, debido a que no se realiza una correcta disposición final y se generan impactos negativos al medio ambiente y a la salud de las personas ¹¹. Los argumentos citados anteriormente, son suficientes para que se establezcan normativas que regulen la recirculación de estos residuos y que promuevan el interés de desarrollar nuevas aplicaciones para los neumáticos gastados y que, a su vez rechacen la eliminación deliberada de los mismos ¹² ¹³. Por tal razón, desde hace varios años ha estado en la mira la recuperación y reutilización de NR como un sustituto o agregado en los materiales de construcción ¹⁴, que han dado paso a una serie de investigaciones que estudian las consecuencias de usar NR en la preparación de concretos o morteros. Dichos estudios, han arrojado como resultado una reducción en sus propiedades mecánicas (compresión y flexión), una

⁷ PACHECO-TORGAL F. Eco-efficient construction and building materials research under the EU framework Programme Horizon 2020. En: Construction and Building Materials. Enero 2014. Vol 51. P. 151-162

⁸ INFORME DE OPERACIÓN. Compañía XM. Disponible en: <https://www.xm.com.co> (Última consulta: 20.07.2018).

⁹ ETRA, European Tyre Recycling Association. Disponible en: <https://www.etra-eu.org> (Última consulta: 03.07.2018)

¹⁰ Ibid.

¹¹ GUPTA T., CHAUDHARY S., and SHARMA R. K., "Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate," Constr. Build. Mater., vol. 73, pp. 562–574, 2014

¹² COUNCIL REGULATION (EC) 31/1999 of 26 April 1999 on the landfill of waste [1999] OJ L182/1

¹³ DIRECTIVE (EC) 98/2008 of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and replacing certain Directives [2008] OJ L312/3

¹⁴ ETRA, European Op. Cit.

disminución en su densidad y un aumento en su porosidad ^{15 16 17 18 19}, que influyen de manera directa sobre sus propiedades térmicas ^{20 21}. Razones por las cuales, la aplicación de CMNR se ha condicionado para elementos sometidos a bajos requerimientos de carga. Esta investigación evaluó un CMNR que fue sometido a pruebas mecánicas y a un ensayo de conductividad térmica. De modo que, al hacer el análisis de resultados, fue posible obtener un aporte a la disminución del consumo de energía mediante la reducción de equipos refrigerantes y de calefacción. Los recintos cerrados deben ser diseñados de una manera sostenible que minimice la pérdida de calor en invierno y evite la transferencia de calor en verano ²². En síntesis, el propósito de este proyecto es proporcionar una aplicación del CMNR como aislante térmico en edificaciones bajo el propósito de disminuir el consumo energético.

¹⁵ GUPTA T., CHAUDHARY S., and SHARMA R. K., "Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 562–574, 2014

¹⁶ SUKONTASUKKUL P., "Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 2, pp. 1084–1092, 2009

¹⁷ RAFFOUL S., GARCIA R., PILAKOUTAS K., GUADAGNINI M., and FLORES N., "Optimisation of rubberised concrete with high rubber content : An experimental investigation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 124, pp. 391–404, 2016

¹⁸ MILLER N. M. and TEHRANI F. M., "Mechanical properties of rubberized lightweight aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 147, pp. 264–271, 2017.

¹⁹ SU H., YANG J., LING T., GHATAORA G. S., and DIRAR S., "Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes," *J. Clean. Prod.*, vol. 91, pp. 288–296, 2015

²⁰ MILLER N. M. and TEHRANI F. M., *Op. Cit.*

²¹ SU H., YANG J., LING T., GHATAORA G. S., and DIRAR S.,

²² CENGEL Yunus, GHAJAR Afshin. *Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones*. McGraw Hill, 2011. 945 p

1. METODOLOGÍA

1.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

2.1.1 Agua Conforme lo establece la NTC 3459 (BS 3148:1980) ²³, el agua es un componente esencial en las mezclas de concretos y morteros. Esta debe ser inodora, incolora, insípida y apta para el consumo humano. Por lo tanto, si cumple con dichas características, es considerada aceptable para ser usada en concretos. Sin embargo, de no cumplir tales condiciones, será necesario realizar ensayos químicos de acidez, alcalinidad, dureza, cloro, pH, sedimentos sólidos disueltos, turbidez y partículas en suspensión. De tal manera, se utilizó agua proveniente del Acueducto Metropolitano de la ciudad de Bucaramanga, la cual cumple con la normativa estipulada. En esta investigación se tomó la densidad del agua como 1000 kg/m³.

2.1.2 Cemento Para la elaboración de las muestras, se utilizó cemento gris de uso general tipo I, producido por Cementos Argos. Este cuenta con especificaciones químicas, físicas y mecánicas, que cumplen los valores de la NTC 121 (ASTM C150) ²⁴ y la NTC 321 (ASTM C150) ²⁵. Fue necesario calcular el peso específico del cemento para hacer posible la elaboración del diseño de la mezcla de concreto. De manera que, se obtuvo un valor de 3030 kg/m³ según los pasos establecidos por la NTC 221 (ASTM C188) ²⁶.

2.1.3 Agregado fino El agregado fino que se utilizó, fue proporcionado por la cantera de INGESAN (Bucaramanga, Colombia) y se realizó la caracterización del

²³ Agua para la elaboración de concreto, NTC 3459, 2001.

²⁴ Especificación de desempeño para cemento hidráulico, NTC 121, 2014

²⁵ Cemento Portland. Especificaciones químicas, NTC 321, 1982.

²⁶ Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico, NTC 221, 2011

material, según lo dispuesto por la NTC 174 (ASTM C33) ²⁷. En efecto, se elaboró la gradación registrada en la Tabla 1 y de la cual se obtuvo, el análisis granulométrico mostrado en la Figura 1. Asimismo, fue necesario consultar las normas: NTC 77 (ASTM C136) ²⁸, NTC 127 (ASTM C40) ²⁹ y NTC 237 (ASTM C128) ³⁰, que hicieron posible la ejecución de las pruebas para conocer los parámetros del agregado. Sus resultados son expuestos en la Tabla 2.

Tabla 1. Granulometría agregado fino.

Tamiz [mm]	Agregado Fino (% Pasa)	Porcentaje de Aprobación	
		Límite Superior	Límite Inferior
9,5	100	100	100
4,75	95,16	100	95
2,36	90,4	100	80
1,18	83,23	85	50
0,6	57,81	60	25
0,3	34,62	30	10
0,15	13,6	10	2
0,075	5,47	0	0
Fondo	0	0	0

²⁷ Especificaciones de los agregados para concreto, NTC 174, 2000

²⁸ Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos, NTC 77, 2007

²⁹ Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto, NTC 127, 2000

³⁰ Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino, NTC 237, 1995

Figura 1. Análisis granulométrico agregado fino.

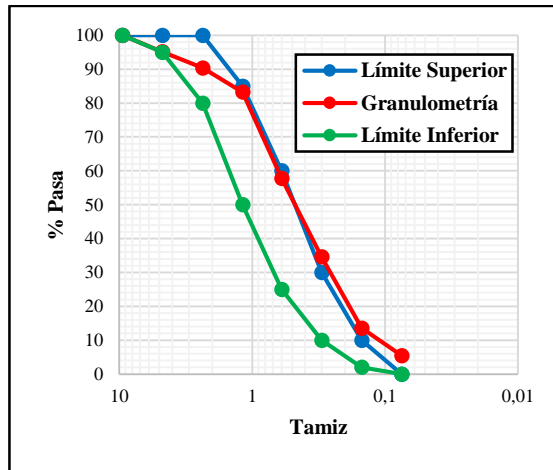


Tabla 2. Parámetros agregado fino.

Parámetro	Norma	Resultado
Módulo de Finura (MF)	NTC 77	2,2
Gravedad Específica	NTC 237	2,48
Capacidad de Absorción	NTC 237	7,39 [%]
Contenido de Humedad	NTC 237	0,4 [%]
Escala Colorimétrica de Gardner	NTC 127	1

2.1.4 Agregado grueso El agregado grueso que se utilizó, fue proporcionado por la cantera de INGESAN (Bucaramanga, Colombia) y se realizó la caracterización del material, según lo dispuesto por la NTC 174 (ASTM C33) ³¹22]. En efecto, se elaboró la gradación registrada en la Tabla 3 y de la cual se obtuvo, el análisis granulométrico mostrado en la Figura 2. Asimismo, fue necesario consultar las normas: NTC 77 (ASTM C136) ³², NTC 176 (ASTM C127) ³³ y NTC 92 (ASTM C29)

³¹ Especificaciones de los agregados para concreto, NTC 174, 2000

³² Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos, NTC 77, 2007.

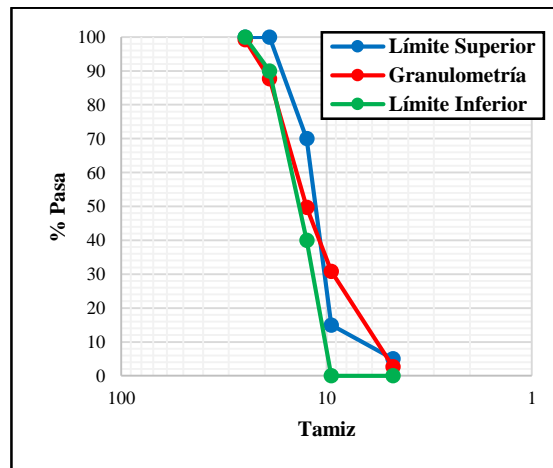
³³ Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso, NTC 176, 1995.

³⁴, que hicieron posible la ejecución de las pruebas para conocer los parámetros del agregado. Sus resultados son expuestos en la Tabla 4.

Tabla 3. Granulometría agregado grueso.

Tamiz [mm]	Agregado Grueso (% Pasa)	Porcentaje de Aprobación	
		Límite Superior	Límite Inferior
25	99,26	100	100
19	87,74	100	90
12,5	49,74	70	40
9,5	30,85	15	0
4,75	2,66	5	0
Fondo	0	0	0

Figura 2. Análisis granulométrico agregado grueso.



³⁴ Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados, NTC 92, 1995.

Tabla 4. Parámetros agregado grueso.

Parámetro	Norma	Resultado
Tamaño Máximo Nominal (TMN)	NTC 77	12,5 [mm]
Gravedad Específica	NTC 176	2,95
Capacidad de Absorción	NTC 176	1,94 [%]
Contenido de Humedad	NTC 176	0,3 [%]
Peso Unitario Compactado (PUC)	NTC 92	1628 [kg/m ³]

2.1.5 Polvo de neumáticos reciclados El polvo de NR fue proporcionado por la empresa Cauchos Reciclados de Colombia (Cúcuta, Colombia) y es mostrado en la Figura 3. Así pues, se observaron sus partículas bajo la microscopía electrónica de barrido (SEM) y son apreciadas en la Figura 4. Además, se realizó un estudio de su composición química, mediante el análisis microelemental (EDS) registrado en la Tabla 5. Para esta investigación se escogió el tamaño más pequeño de partícula (Malla No. 40) ofrecido por la empresa, con el objetivo de causar menor impacto sobre las propiedades mecánicas del CMNR ^{35 36}.

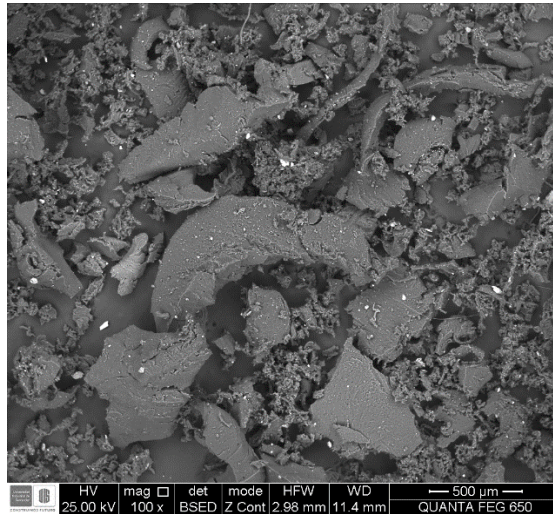
Figura 3. Polvo de NR.



³⁵ MILLER N. M. and TEHRANI F. M., “Mechanical properties of rubberized lightweight aggregate concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 147, pp. 264–271, 2017

³⁶ SUKONTASUKKUL P., “Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 2, pp. 1084–1092, 2009

Figura 4. Imágenes SEM del polvo de NR.



Fuente. Laboratorio de Microscopia. Universidad Industrial de Santander, Piedecuesta, Colombia.

Tabla 5. Composición química del polvo de NR.

Elemento	Porcentaje en Peso (Wt%)	Porcentaje Atómico (At%)
C	92,17	95,74
O	3,87	3,02
Si	0,6	0,27
S	1,7	0,66
Zn	1,65	0,32

Fuente. Laboratorio de Microscopia. Universidad Industrial de Santander, Piedecuesta, Colombia.

2.2 DISEÑO DE LA MEZCLA DE CONCRETO

Se diseñó la mezcla del CC para una Resistencia especificada a la compresión de 21 MPa a los 28 días de curado, conforme lo establece la ACI 211-1 ³⁷. El método que propone la norma consultada, se basa en medir los componentes del concreto

³⁷ Práctica estándar para la selección de proporciones para concreto normal, pesado y concreto en masa, ACI 211-1, 2002

(cemento, agregado fino, agregado grueso y agua) en peso y volumen. Por lo cual, es necesario conocer las propiedades de los materiales que son mostradas en la Tabla 6.

Tabla 6. Propiedades de los materiales.

Propiedad	Resultado
TMN del Agregado Grueso	12,5 [mm]
Densidad del Agua	1000 [kg/m ³]
Densidad del Cemento	3030 [kg/m ³]
MF del Agregado Fino	2,2
PUC del Agregado Grueso	1628 [kg/m ³]
Densidad Aparente del Agregado Grueso	2950 [kg/m ³]
Densidad Aparente del Agregado Fino	2480 [kg/m ³]

Así mismo, se escogió un asentamiento de 8 [cm] y una relación a/c de 0,55 de diseño en peso, que permitieron calcular la dosificación de cada componente del CC, para una mezcla de 1 metro cúbico de volumen. Sus resultados son registrados en la Tabla 7.

Tabla 7. Diseño de la mezcla del CC para 1 metro cúbico de volumen.

Material	Peso [kg]	Volumen [m³]
Cemento	495,85	0,16
Agua	272,72	0,27
Agregado Grueso	993,08	0,34
Agregado Fino	500,95	0,20

En esta investigación se planteó modificar el concreto corriente, al reemplazar una parte de alguno de sus componentes, por polvo de NR. Estas partículas, reducen la

resistencia mecánica del concreto cuando se reemplazan por agregado grueso ³⁸. Por ejemplo, autores han indicado reducciones de resistencia hasta en un 90% al reemplazar la arena por completo, o hasta en un 80% cuando el agregado grueso se reemplaza por un 60% de caucho ^{39 40}. Por otro lado, el tamaño del polvo de NR que se utilizó, es similar al del agregado fino empleado. Por lo tanto, se propuso sustituir parte del agregado fino por el polvo de NR. En consecuencia, se consideraron algunas investigaciones que plantearan la misma sustitución, con el fin de, seleccionar las proporciones de reemplazo para este estudio ^{41 42}. En efecto, se optó por hacer la sustitución en porcentajes de 0, 10, 20, 30 y 40% en peso. Finalmente, se modificó el diseño de la mezcla del CC para cada porcentaje propuesto, donde se mantuvieron constantes las cantidades de los demás componentes y la relación a/c. Sus dosificaciones son mostradas en la Tabla 8.

2.3 Fabricación y curado de las muestras

Las mezclas se realizaron en una mezcladora de concreto eléctrica bajo las especificaciones de la NTC 1377 (ASTM C192) ⁴³. Para la elaboración de las mezclas del concreto modificado, se realizó una previa combinación entre el agregado fino y el polvo de NR, hasta que se obtuvo una mezcla homogénea. El vaciado del concreto fresco desde la mezcladora al recipiente metálico, se efectuó con las indicaciones de la NTC 1377 (ASTM C192) ⁴⁴. Enseguida, se ejecutaron las pruebas de asentamiento para cada mezcla. Esto con el fin de iniciar el moldeo de

³⁸ GUPTA T., CHAUDHARY S., and SHARMA R. K., "Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 562–574, 2014

³⁹ SUKONTASUKKUL P., "Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 2, pp. 1084–1092, 2009

⁴⁰ MILLER N. M. and TEHRANI F. M., "Mechanical properties of rubberized lightweight aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 147, pp. 264–271, 2017

⁴¹ SU H., YANG J., LING T., GHATAORA G. S., and DIRAR S., "Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes," *J. Clean. Prod.*, vol. 91, pp. 288–296, 2015

⁴² RAFFOUL S., GARCIA R., PILAKOUTAS K., GUADAGNINI M., and FLORES N., "Optimisation of rubberised concrete with high rubber content : An experimental investigation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 124, pp. 391–404, 2016

⁴³ Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio, NTC 1377, 2010

⁴⁴ Ibid.

45 muestras para sus respectivos ensayos. Conforme lo establece la NTC 1377 (ASTM C192) ⁴⁵, se moldearon tres muestras de cada dosificación de NR para cada prueba y se analizaron a la edad de 28 días de curado. Los ensayos de compresión, densidad y porosidad, se realizaron a 15 probetas con forma cilíndrica. Así mismo, para los ensayos de conductividad térmica se necesitaron 15 probetas con igual forma y se rebanaron para cumplir las dimensiones requeridas por el dispositivo de ensayo. Por otro lado, la prueba de flexión se efectuó a 15 muestras con forma de prisma rectangular, semejantes a una viga. Los especímenes de prueba se elaboraron y se curaron con las especificaciones y dimensiones de las guías NTC 1377 (ASTM C192) ⁴⁶ y NTC 550 (ASTM C31) ⁴⁷. Las dimensiones de los moldes y su respectiva prueba, son presentadas en la Tabla 9.

Tabla 9. Dimensiones de los moldes y su respectiva prueba.

Ensayo	Dimensiones	
Forma Cilíndrica	Diámetro [mm]	Altura [mm]
Compresión	100	300
Densidad	100	300
Porosidad	100	300
Conductividad Térmica	100	30
Forma de Prisma Rectangular	Sección Transversal Cuadrada [mm]	Longitud [mm]
Flexión	100	300

⁴⁵ Ibid.

⁴⁶ Ibid.

⁴⁷ Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra, NTC 550, 2000.

Tabla 8. Diseño de las mezclas del CC y los CMNR, para 1 metro cúbico de volumen.

Designación	Relación a/c	Peso por m ³				
		Polvo de NR [kg]	Cemento [kg]	Agregad o Grueso [kg]	Agrega do Fino [kg]	Agua [kg]
CC	0,55	0,00	495,85	993,08	500,95	272,72
CMNR10	0,55	50,09	495,85	993,08	450,85	272,72
CMNR20	0,55	100,19	495,85	993,08	400,76	272,72
CMNR30	0,55	150,28	495,85	993,08	350,66	272,72
CMNR40	0,55	200,38	495,85	993,08	300,57	272,72

3. PRUEBAS EXPERIMENTALES

3.1 MANEJABILIDAD

La manejabilidad del concreto fresco se mide conforme lo establece la NTC 396 (ASTM C143) ⁴⁸. La prueba de asentamiento para cada mezcla realizada, se efectuó después de haber depositado el concreto fresco en el recipiente metálico. Esta práctica consiste en colocar el concreto fresco en un molde con forma de cono truncado y compactarlo con la ayuda de una varilla. El molde es retirado y el concreto cae hasta detenerse. La distancia vertical entre la posición original y el centro de la superficie superior desplazada, se mide y se informa como el asentamiento del concreto. La medición del asentamiento para una de las mezclas se puede apreciar en la Figura 5.

Figura 5. Medición del asentamiento para el CMNR30.



⁴⁸ Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto, NTC 396, 1992

3.2 DENSIDAD Y POROSIDAD

La densidad y porosidad del concreto endurecido, se determinan acorde a las especificaciones y cálculos de la NTC 5653 (ASTM C642) ⁴⁹. Para la ejecución de las pruebas se utilizaron las muestras descritas en el numeral 2.3 a la edad de 28 días de curado. Este método de ensayo es útil para determinar la información de pesos y volúmenes de las muestras de concreto en estado endurecido. El cálculo de la densidad seca (D_s), se obtiene mediante la ecuación (1), la densidad aparente (D_a), con la ecuación (2) y la porosidad (%P) con la ecuación (3). Con los resultados arrojados se desarrolló correlaciones de densidad y porosidad versus el coeficiente de conductividad térmica.

$$D_s = [A/(C - D)] \cdot \rho \quad (1)$$

$$D_a = [A/(A - D)] \cdot \rho \quad (2)$$

$$\%P = [(C - A)/(C - D)] \times 100 \quad (3)$$

Donde:

A = Masa seca al horno, g

C = Masa saturada después de ebullición, g

D = Masa sumergida aparente, g

ρ = Densidad del agua = 1 g/cm³

⁴⁹ Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en el concreto endurecido, NTC 5653, 2008

3.3 COMPRESIÓN SIMPLE

El ensayo de resistencia del concreto a la compresión se rige mediante la NTC 673 (ASTM C39) ⁵⁰. Para efectuar las pruebas se utilizaron las muestras descritas en el numeral 2.3 a la edad de 28 días de curado. Este método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión como se muestra en la Figura 6, a una velocidad de 0,15 a 0,35 [MPa/s] durante la última mitad de la fase de carga hasta que ocurra la falla. La resistencia a la compresión de un espécimen se calcula al dividir la carga máxima alcanzada durante el ensayo, por el área de la sección transversal de la muestra.

Figura 6. Especimen sometido a la carga axial de compresión.



⁵⁰ Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto, NTC 673, 2010

3.4 FLEXIÓN

El ensayo de resistencia del concreto a la flexión es estudiado por la NTC 2871 (ASTM C78) ⁵¹. Para la ejecución de las pruebas se utilizaron las muestras descritas en el numeral 2.3 a la edad de 28 días de curado. Este método se utiliza para determinar la resistencia del concreto a la flexión, mediante el uso de una viga simple con carga en los tercios medios. Este procedimiento consiste en acomodar la muestra sobre los bloques de soporte. Se colocan los bloques de aplicación de carga en contacto con la superficie del espécimen en los tercios medios. Se aplica una carga de forma continua y sin impactos, a una tasa que incrementa en forma constante el esfuerzo extremo de la fibra en un intervalo de 0,86 y 1,21 [MPa/min] hasta que ocurra rotura. El módulo de rotura se calcula con la ecuación (4).

$$M_r = (P \cdot L)/(b \cdot d^2) \quad (4)$$

Donde:

M_r = Módulo de rotura, MPa

P = Carga máxima aplicada, N

L = Distancia entre apoyos, mm

b = Ancho promedio de la viga en la fractura, mm

d = Altura promedio de la viga en la fractura, mm

3.5 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

El ensayo de conductividad térmica utilizado para esta investigación es realizado bajo las especificaciones de la guía ASTM D7984 ⁵². Para efectuar las pruebas se

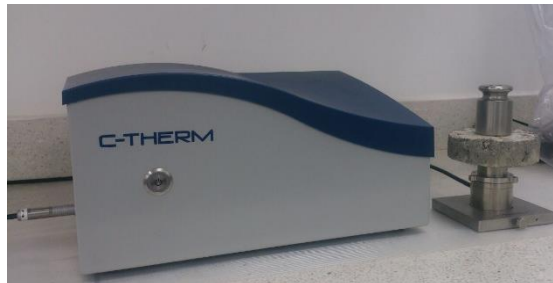
⁵¹ Determinar la resistencia del concreto a la flexión utilizando una viga simple con carga en los tercios medios, NTC 2871, 2004

⁵² Método de prueba estándar para la medición de la efusividad térmica de tejidos utilizando un instrumento de fuente de plano transitorio modificado, ASTM D7984, 2016

utilizaron las muestras descritas en el numeral 2.3 a la edad de 28 días de curado. Así también, para medir la capacidad de conducción de calor del concreto, se utilizó el Thermal Conductivity Analyzer (C-therm TCi) que se muestra en la Figura 7, el cual es un equipo de última tecnología que emplea el método de fuente de plano transitorio modificado, para determinar la conductividad térmica de los materiales. El procedimiento que realiza el equipo es el siguiente:

1. Se aplica una corriente conocida en el espiral del sensor, que calienta el elemento y proporciona una pequeña cantidad de calor a la muestra.
2. Un anillo de protección rodea la primera bobina del sensor, el cual trabaja como un aislante lateral con el fin de proporcionar una transferencia unidimensional dentro del espécimen. La corriente aplicada resulta en un aumento de la temperatura entre el sensor y la muestra, que induce un cambio en la caída de voltaje del elemento del sensor.
3. La tasa de cambio del incremento en el voltaje del sensor, es usada para determinar las propiedades térmicas en la muestra. La Conductividad térmica es inversamente proporcional a la tasa de cambio en el aumento de la temperatura en el punto de contacto entre el sensor y la muestra. El voltaje es utilizado como una aproximación para la temperatura y crece abruptamente cuando se miden conductividades térmicas bajas.

Figura 7. Thermal conductivity analyzer (C-therm TCi).



Fuente. Grupo de investigación en instrumentación y física de materia condensada. Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.

3.6 ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL

Con el fin de investigar la unión entre el polvo de neumático y el concreto en la zona de transición interfacial (ITZ), fue utilizada la microscopía electrónica de barrido (SEM). Para utilizar el equipo se acondicionaron muestras representativas de cada patrón de adición de polvo de NR a una edad de 28 días de curado. Debido a que el concreto es un material no conductor, se realizó “sputtering” o pulverización catódica con el fin de otorgarle propiedades conductoras. Las muestras se recubrieron con grafito en un equipo de recubrimiento Quorum 150ES. Las fotografías se tomaron con el microscopio Quanta Feg 650 que se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Microscopio Quanta Feg 650.



4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

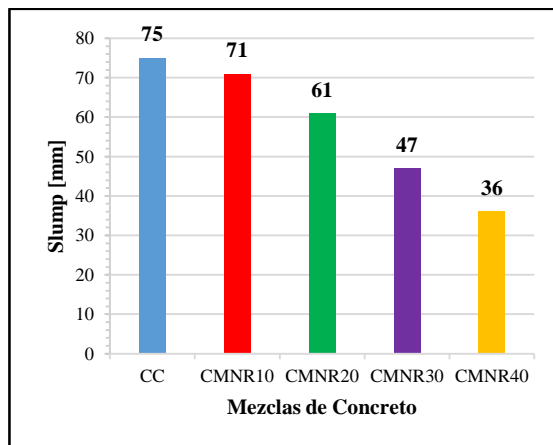
4.1 MANEJABILIDAD

Se observó mediante inspección visual que las mezclas de concreto eran cohesivas y que no presentaban segregación o sangrado durante el mezclado. Los asentamientos de las mezclas y sus porcentajes de reducción respecto al CC, son registrados en la Tabla 10. Además, se graficaron los asentamientos en la Figura 9.

Tabla 9. Asentamiento de las mezclas y sus porcentajes de reducción respecto al CC.

Mezcla de Concreto	Slump [mm]	Reducción respecto al CC [%]
CC	75	0
CMNR10	71	5,3
CMNR20	61	18,7
CMNR30	47	37,3
CMNR40	36	52

Figura 9. Asentamiento de las mezclas.

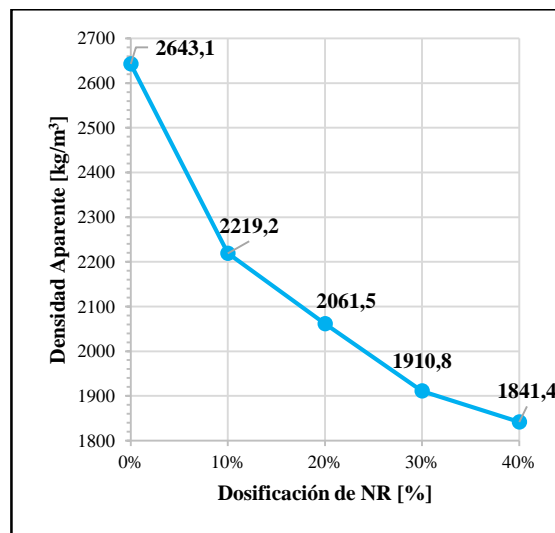


A partir de los resultados, se observó una disminución en los valores de asentamiento para las mezclas que reemplazaron agregado fino por polvo de NR.

4.2 DENSIDAD Y POROSIDAD

Los valores de las densidades se determinaron con el procedimiento descrito en el numeral 3.2. Por lo tanto, se obtuvieron los resultados de 3 muestras para cada dosificación y se calcularon los promedios. Las densidades para cada porcentaje son graficadas en la Figura 10.

Figura 10. Densidad aparente promedio vs. Dosificación de NR.



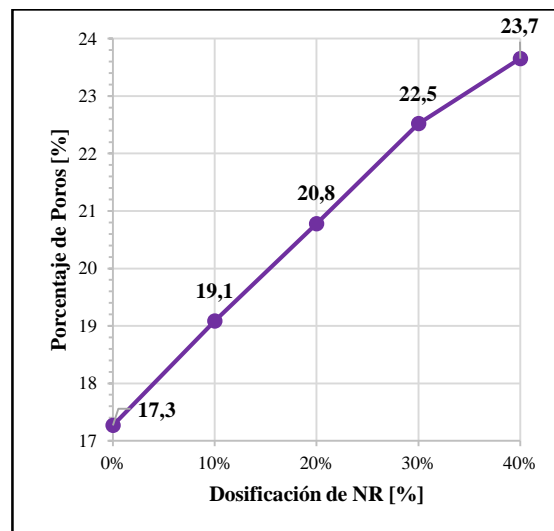
Los resultados obtenidos indican que la densidad aparente disminuye conforme aumenta la dosificación de polvo de NR. Las densidades de los CMNR presentaron porcentajes de reducción al tomar como referencia el CC. Los valores son mostrados en la Tabla 11.

Tabla 10. Densidad promedio de los concretos y sus porcentajes de reducción respecto al CC.

Concreto	Densidad Aparente [kg/m ³]	Reducción respecto al CC [%]
CC	2643,1	0
CMNR10	2219,2	16,0
CMNR20	2061,5	22,0
CMNR30	1910,8	27,7
CMNR40	1841,4	30,3

Por otro lado, la porosidad en los concretos se determinó con el procedimiento descrito en el numeral 3.2. En efecto, se obtuvieron los resultados de 3 muestras para cada dosificación y se calcularon los promedios. Como resultado, se observó un aumento en el porcentaje de poros al incrementar la dosificación de polvo de NR. Por ejemplo, el CMNR40 presentó la mayor porosidad con un aumento del 37% respecto al CC. Los porcentajes de poros para cada dosificación de NR son graficados en la Figura 11.

Figura 11. Porcentaje de poros promedio vs. Dosificación de NR.



Las moléculas de un neumático cuentan con enlaces que forman moléculas no polares. Además, este material repele el agua y atrapa el aire en su superficie. Por lo cual, al ser incorporado en el concreto se generan vacíos que reducen la densidad de este ⁵³.

4.3 COMPRESIÓN SIMPLE

La resistencia a la compresión se determinó con el procedimiento descrito en el numeral 3.3. Así pues, se obtuvieron los resultados de 3 muestras para cada dosificación y se calcularon los promedios. La resistencia a la compresión de los concretos y sus porcentajes de reducción respecto al CC, son registrados en la Tabla 12. Las resistencias de todas las probetas son graficadas en la Figura 12.

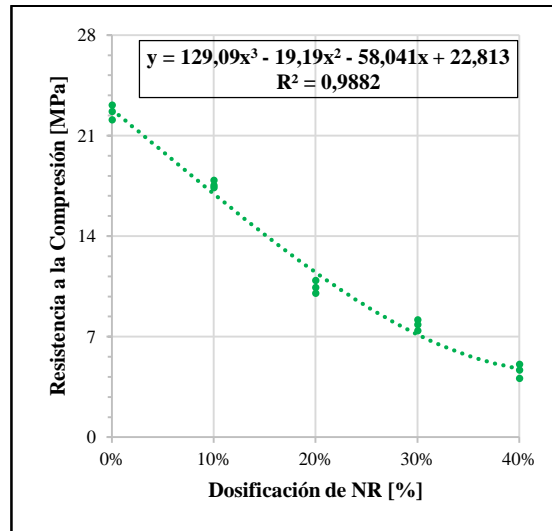
Tabla 11. Resistencia promedio a la compresión y sus porcentajes de reducción respecto al CC.

Dosificación de NR [%]	Resistencia a la Compresión [MPa]	Reducción respecto al CC [%]
0	22,6	0
10	17,6	22,2
20	10,5	53,8
30	7,8	65,4
40	4,6	79,6

⁵³ Properties of concrete containing scrap-tire rubber-an overview de Rafat Siddique, Tarun R. Naik

Los resultados obtenidos indican que la resistencia a la compresión del concreto a la edad de 28 días de curado, disminuye conforme aumenta la dosificación de polvo de NR.

Figura 12. Resistencia a la compresión vs. Dosificación de NR.



Los especímenes ensayados fueron analizados mediante inspección visual para determinar sus tipos de falla. En efecto, las muestras de CC presentaron falla frágil con grietas inclinadas sobre su superficie. Por otro lado, las probetas de CMNR mostraron grietas horizontales sin presencia de falla frágil.

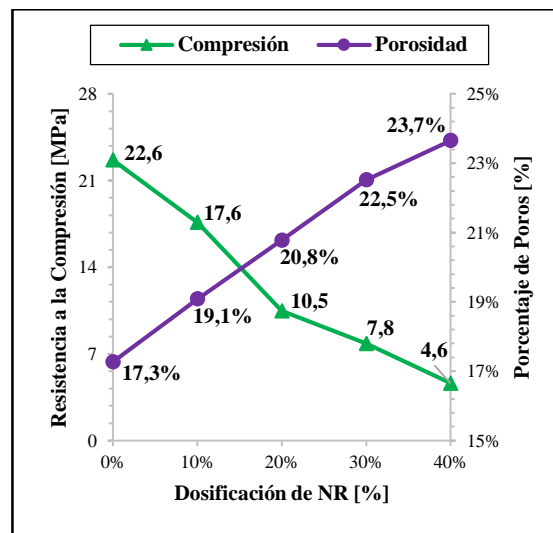
Los resultados alcanzados ayudan a fortalecer las conclusiones planteadas por otros estudios. Así mismo, algunos investigadores propusieron las posibles causas de que se genere una reducción de la resistencia a la compresión en los CMNR. Los argumentos son los siguientes:

- El NR cuenta con una baja densidad y produce que las partículas tiendan a subir en la preparación de las muestras. En consecuencia, se genera la concentración de caucho en la parte superior y ocasiona que no se presente una distribución uniforme entre sus componentes. Además, no se evidencia la adhesión

apropiada entre la pasta de cemento y el NR, por lo tanto, su unión es débil. Como resultado, las muestras sometidas a compresión generan grietas alrededor de las partículas de caucho, debido a, la mala distribución de tensiones aplicadas que conlleva a una falla rápida de las probetas ⁵⁴.

Con los valores promedio de resistencia a la compresión y de porosidad, se realizó una relación en función de la dosificación de NR mediante la Figura 13. En consecuencia, se observó que con la adición de NR se generó un aumento de la porosidad que repercutió en la reducción de la resistencia a la compresión.

Figura 13. Relación entre la compresión y la porosidad para cada dosificación de NR.



A partir de la gráfica, se deduce que la resistencia a la compresión en materiales sólidos con base cementicia, se ve favorecida al disminuir el porcentaje de poros ⁵⁵.

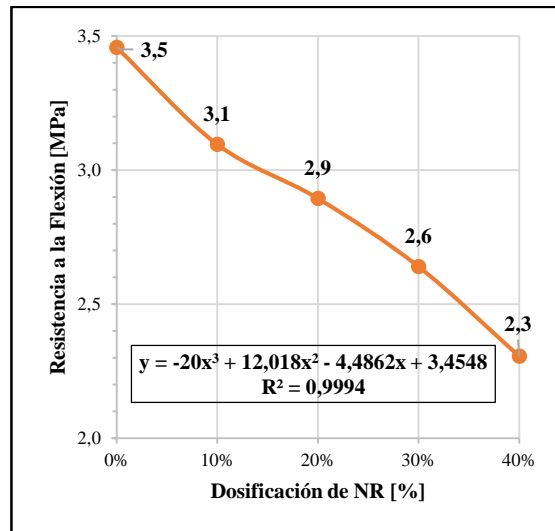
⁵⁴ GANJIAN E, MORTEZA K, Ali AM. Scrap-tire-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. Constr Build Mater 2009;23:1828–36

⁵⁵ CHEN X., WU S., ZHOU J., Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar, Construction and Building Materials, vol 40, pp 869– 874, Mar 2013

4.4 FLEXIÓN

La resistencia a la flexión se midió mediante el cálculo del módulo de rotura. Por lo tanto, se obtuvieron los resultados de 3 muestras para cada dosificación y se calcularon los promedios. Los CMNR presentaron una reducción gradual de la Flexión con el aumento de las partículas de caucho. Así, por ejemplo, el CMNR40 disminuyó su resistencia en un 33,3% respecto al CC que alcanzó un valor de 3,46 [MPa]. Los resultados son expuestos en la Figura 14.

Figura 14. Resistencia promedio a la flexión vs. Dosificación de NR.



4.5 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

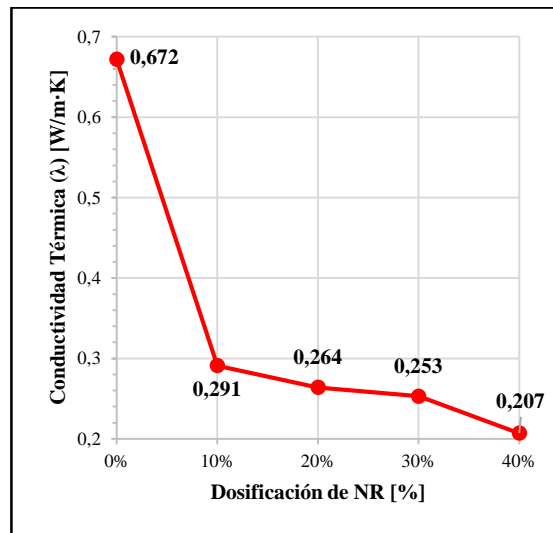
La conductividad térmica (λ) se determinó con el artefacto descrito en el numeral 3.5. Así pues, se obtuvieron los resultados de 3 muestras para cada dosificación y se calcularon los promedios. Los CMNR presentaron una reducción gradual de la conductividad térmica con el aumento de las partículas de caucho. Así, por ejemplo, el CMNR40 disminuyó su λ en un 69,2% respecto al CC que obtuvo un valor de 0,672 [W/m · K]. Los valores de conductividad térmica de las muestras y sus

porcentajes de reducción respecto al CC, son registrados en la Tabla 13. Además, se graficaron los λ en la Figura 15.

Tabla 12. Conductividad térmica promedio y sus porcentajes de reducción respecto al CC.

Dosificación de NR [%]	Conductividad Térmica (λ) [W/m·K]	Reducción respecto al CC [%]
0	0,672	0
10	0,291	56,7
20	0,264	60,7
30	0,253	62,4
40	0,207	69,2

Figura 15. Conductividad térmica promedio vs. Dosificación de NR.

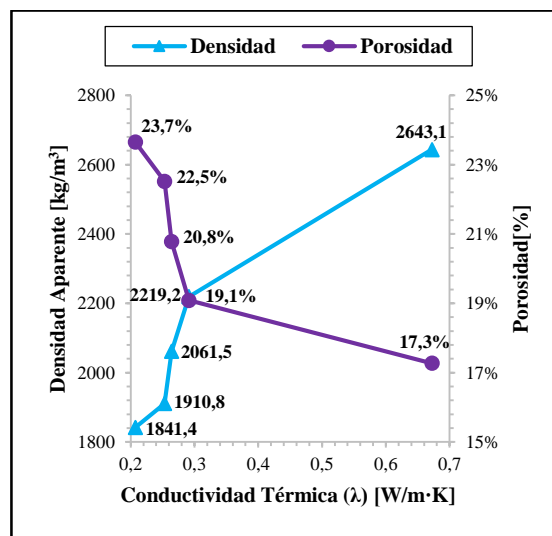


La teoría planteada en otra investigación propone la relación directa y proporcional que existe entre la densidad y la conductividad térmica ⁵⁶. Del mismo modo, en este estudio los CMNR presentaron baja densidad, lo que ocasionó una reducción en sus valores de conductividad térmica.

⁵⁶ Ibíd.

Por otra parte, la porosidad es una variable determinante para la densidad, por lo cual, es posible deducir la relación inversa y proporcional que se evidencia entre el volumen de poros y la conductividad térmica. Con los valores promedio de densidad y de porosidad, se realizó una relación en función de la conductividad térmica promedio mediante la Figura 16. En consecuencia, se observó que la conductividad térmica tiende a disminuir conforme aumenta la porosidad y baja la densidad.

Figura 16. Relación entre la densidad y la porosidad vs. Conductividad térmica.



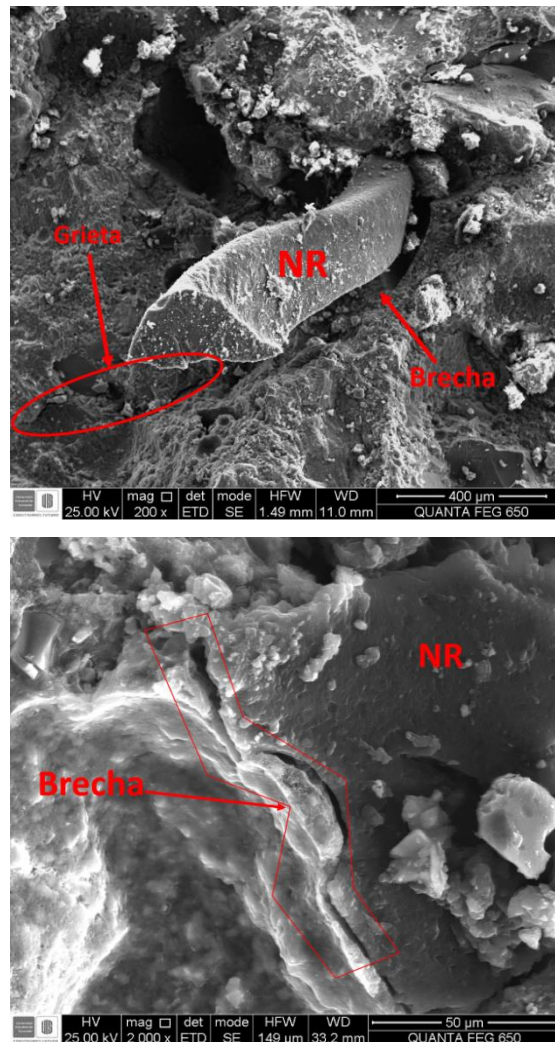
4.6 ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL

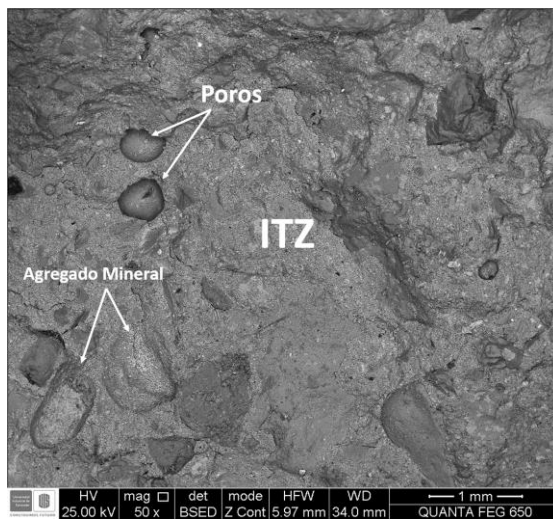
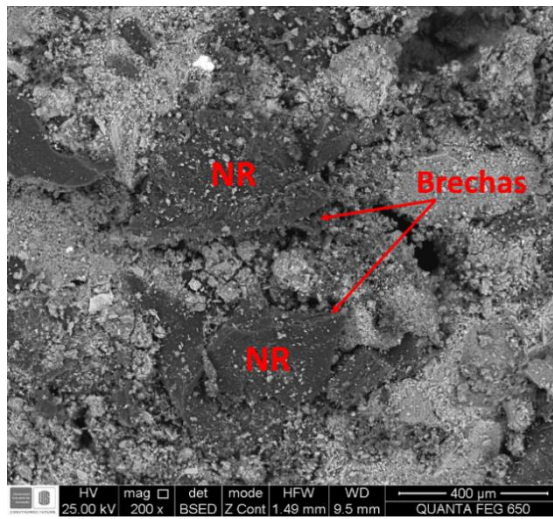
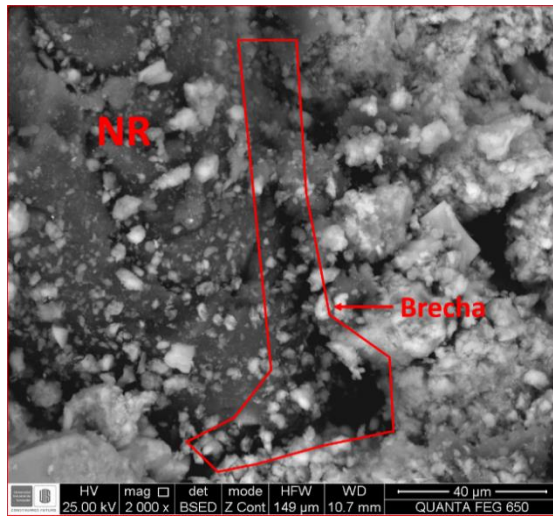
Las imágenes SEM revelaron que las partículas de NR tenían forma irregular y eran de color oscuro. Por otra parte, los agregados minerales mostraron un aspecto grisáceo intermedio y la pasta de cemento presentaba un tono gris claro. La zona de transición interfacial (ITZ) entre la pasta de cemento y el polvo de neumático, fue visualizada y se observaron grietas que representaban una leve separación entre los componentes mencionados. Por esa razón, es posible que se genere una

reducción en sus propiedades mecánicas. Algunas de las fotografías que se tomaron son apreciadas en la Figura 17.

Por medio del análisis microelemental (EDS), se realizó un estudio de la composición química de un espécimen por cada porcentaje de caucho utilizado. En todas las muestras se encontró la presencia de oxígeno (O), calcio (Ca), carbono (C), silicio (Si) y aluminio (Al). No obstante, con la adición de polvo de NR se presentó una reducción paulatina de oxígeno, calcio, aluminio, silicio y un aumento de carbono.

Figura 17. Imágenes SEM de las muestras.





Fuente. Laboratorio de Microscopia. Universidad Industrial de Santander, Piedecuesta, Colombia.

4.7 APLICACIÓN EN EDIFICACIONES

La vivienda es una necesidad primordial de la humanidad y su función es garantizar protección contra los elementos del clima. Así mismo, los recintos cerrados deben ser diseñados de una manera sostenible que minimice la pérdida de calor en invierno y evite la transferencia de calor en verano ⁵⁷. Además, es importante que cumpla con un confort térmico, esto es, la condición de la mente en la que se expresa el bienestar con el ambiente térmico ⁵⁸. Por otro lado, las fachadas y las cubiertas en una edificación son los puntos más susceptibles a la ganancia o pérdida de calor, por lo tanto, es fundamental obtener un aislamiento térmico mediante estos elementos. En particular, las fachadas deben proteger las edificaciones de las temperaturas que se presenten al exterior de ellas. Sin embargo, en muchos recintos cerrados no se logra un bienestar térmico y es necesario el uso de equipos refrigerantes y/o de calefacción. Por lo tanto, ocurre un consumo energético en la búsqueda del confort térmico.

La finalidad de esta investigación es diseñar una fachada de CMNR como aislante térmico en edificaciones, bajo el objetivo de disminuir el consumo de energía por parte de dispositivos refrigerantes y/o de calefacción. Por consiguiente, se planteó el siguiente estudio:

Se investigaron los requerimientos necesarios para experimentar el confort térmico, logrando valores de referencia por medio de la metodología planteada por Marice Croiset ⁵⁹, la cual, analiza los valores de conducción de los materiales, su influencia en la temperatura interior y el riesgo de aparición de humedad por condensación. Para lo cual se parte de las condiciones climáticas de la ciudad de Bucaramanga

⁵⁷ Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local, ISO 7730, 2005

⁵⁸ Ibid.

⁵⁹ CROISET, M., & LUQUE MALDONADO, R. t. Humedad y temperatura en los edificios: condensaciones y confort térmico de verano y de invierno: Barcelona Técnicos Asociados 1970

(Colombia), estableciendo de acuerdo a sus características, cuáles son sus necesidades de confort térmico de acuerdo con los criterios de la NTC 5316.

Bucaramanga es una ciudad localizada al nororiente de Colombia sobre la cordillera oriental con una altura media de 959 MSNM. En la Tabla 14 se observa las temperaturas promedio presentes en la ciudad ⁶⁰.

Tabla 13. Temperaturas medias anuales

Temperatura Máxima registrada	30,3°C
Temperatura media anual	23,1°C
Temperatura Mínima registrada	19,0°C

4.7.1 Valores de referencia de confort térmico

- La temperatura de referencia de confort térmico se determinó por medio de lo especificado en la norma NTC 5316. Se tomó en cuenta una humedad relativa del 60 % como máximo valor aceptable, vestimenta en un punto medio entre verano e invierno y de esta manera se determina que la temperatura de confort al interior de las edificaciones en Bucaramanga deberá estar alrededor de los 23°C.
- La temperatura radiante media es un factor que condiciona el confort térmico, su influencia está directamente relacionada con la temperatura interior de la superficie de la fachada y su capacidad de cambiar la temperatura interior del lugar. Se puede calcular mediante la ecuación (4).

⁶⁰ IDEAM, I. d. h., meteorología y estudios ambientales. (2017). Solicitud de información estaciones meteorológicas. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/solicitud-deinformacion>

$$T_{rm} = T_g + 1.9\sqrt{V_a} * [T_g - T_s] \quad (4)$$

Donde:

T_{rm} = Temperatura radiante media (°C).

T_g = Temperatura de globo (°C), se toma como 25,6 (°C) ⁶¹.

V_a = Velocidad del aire (m/s), considerada en 0,1 (m/s) para espacios de baja carga metabólica ⁶².

T_s = Temperatura media (°C).

- “La temperatura de rocío mide la humedad del ambiente, es la temperatura a la cual una muestra de aire húmedo llega a saturarse y comienza la condensación. El punto o temperatura de rocío depende de la masa de vapor de agua contenida en el aire” ⁶³. La temperatura de rocío se puede determinar por medio de la ecuación (5).

$$T_R = \sqrt[8]{\frac{H}{100} * (112 + 0,9 * T) + (0,1 * T) - 112} \quad (5)$$

Donde:

T_r = Temperatura de rocío (°C).

H = Humedad relativa (%) ⁶⁴.

T = Temperatura de confort (°C).

Los valores de referencias son mostrados en la Tabla 15.

⁶¹ TEMPERATURA PROTOCOLO-Curso de Higiene y Seguridad Industrial-escuela colombiana de ingeniería

⁶² El confort térmico adaptativo Aplicación en la edificación en España

⁶³ DÍAZ REGODÓN & TENORIO RÍOS, 2005

⁶⁴ IDEAM, I. d. h., meteorología y estudios ambientales. (2017). Solicitud de información estaciones meteorológicas. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/solicitud-deinformacion>

Tabla 14. Valores de referencia de confort térmico.

Temperatura de confort	23,0 °C
Humedad optima	60%
Temperatura radiante	27,10 °C
Temperatura rocío	20,52 °C

4.7.2. Resistencia térmica La resistencia térmica se puede definir como el cociente entre el espesor y la conductividad térmica de un elemento de edificación constituido por una capa térmicamente homogénea, está se calcula con la ecuación (6).

$$R = \frac{e}{K} \quad (6)$$

Donde:

R = Resistencia térmica, m²*K/W.

e = Espesor de la capa, m.

K = Conductividad térmica del material, W/m*K.

Las resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con en el aire exterior en m²*K/W (ver Tabla 16) ⁶⁵.

Tabla 15. Resistencias térmicas superficiales.

Posición del cerramiento y sentido del flujo de calor	R_{se}	R_{si}
Cerramientos verticales o con pendiente sobre la horizontal >60° y flujo Horizontal	0,04	0,13

⁶⁵ DA DB-HE / 1 Cálculo de parámetros característicos de la envolvente

4.7.3. Transmitancia térmica Es el flujo de calor, en estado estacionario, para un área y diferencia de temperaturas de los medios situados a cada lado del elemento a consideración ⁶⁶. La transmitancia viene dada por la ecuación (7).

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (7)$$

Donde:

U = Transmitancia térmica, W/m²*K.

R_T = Resistencia térmica total del componente constructivo, m²*K/W.

4.7.4. Control térmico

Se plantió un muro prefabricado de CMNR como tipología de fachada a analizar, con una resistencia mínima a la compresión de 14 [MPa] que se estable como valor mínimo del concreto simple en el artículo 630-13 del INVIAS ⁶⁷. El espesor del muro no debe ser menor a 100 [mm] según lo planteado en la sección 11.3.1 de la ACI 318S-14. El valor de conductividad térmica que corresponde a la especificación de resistencia mínima a la compresión es de 0,280 [W/m*K] y fue determinado mediante una regresión lineal con los resultados obtenidos en los numerales 4.3 y 4.5. De acuerdo con lo anterior, se determinó el valor de transmitancia térmica para la fachada tipo que se muestra en la Tabla 17.

Tabla 16. Análisis de transmitancia termica.

Material	Espesor (m)	K (W/m*K)	R (m ² *K/W)
Mortero	0	0,9	0,000
Concreto	0,1	0,28	0,357
Mortero	0	0,9	0,000
Rsi			0,13
Rse			0,4

⁶⁶ Investigación pre-normativa de control térmico en fachadas de edificios multifamiliares tipo VIS en la ciudad de Bogotá D.C

⁶⁷ Normas y especificaciones del INVIAS, artículo 630, 2013

Rt Resistencia total (m²*K/W)	0,89
U Transmitancia térmica (W/m²*K)	1,13

Se obtuvo un valor de 23,71 [°C] en la temperatura superficial interior del cerramiento, la cual fue inferior a la temperatura radiante y de esta manera se garantizó una temperatura de confort de 23°C en el interior de la edificación. Mediante la ecuación (8) se determinó la temperatura superficial interior.

$$t_i = T_i - \frac{U}{F_i} * (T_i - T_e)$$

Donde:

t_i = Temperatura superficial interior del cerramiento, °C.

T_i = Temperatura del ambiente interior, definida en 23°C.

U = Transmitancia térmica, W/m²*K.

F_i = Película de aire interior, definida en 9,09 W/m²*°C.

T_e = Temperatura exterior, definida en 30.3°C.

El riesgo de condensaciones en edificaciones tiene incidencia en la durabilidad de los materiales y en la salud de sus habitantes. Para determinar el valor límite de transmitancia térmica de la fachada que minimice el riesgo de condensaciones, en la Tabla 18, se realizó el estudio de temperatura superficial interior, buscando un valor de transmitancia térmica bajo las características de Bucaramanga que asegure una temperatura interior de fachada, como mínimo de 20,52°C. Para lo cual, se toma la ecuación (8) con los siguientes valores:

- Temperatura interior: 23°C (Temperatura de confort).
- Temperatura exterior: 18°C (temperatura mínima anual).
- F_i , película aire interior: 9,3, W/m²*K.

Tabla 17. Transmitancia térmica de referencia para minimizar el riesgo de condensaciones.

Fachada	I
U Transmitancia térmica (W/m²*K)	4.61
Temp Int °C	23
Temp Ext °C	18.00
Película aire interior Fi (W/m²*°C)	9.09
Ti °C	20.52

De acuerdo con la Tabla 18, para obtener una temperatura superficial interior en la fachada de 20,52°C se necesita una transmitancia térmica de 4,61 [W/m²*K], con el fin de minimizar el riesgo de aparición de humedades, hongos y bacterias por condensación

5. CONCLUSIONES

Mediante la sustitución de agregado fino por polvo de NR en un 10-40%, la trabajabilidad, densidad, resistencias a la compresión y flexión disminuyeron gradualmente.

El concreto modificado con polvo de neumático evidencio un aumento de 10% hasta 37% en la porosidad, debido a la incidencia de la polaridad del polvo de NR.

La conductividad térmica disminuyo gradualmente con el aumento de polvo de neumático, por lo cual el CMNR exhibe mejoras en las propiedades térmicas en comparación con el concreto normal.

Para obtener una resistencia mínima a la compresión de 14 [MPa] establecida por la NSR-10 para uso como concreto simple, se debe sustituir como máximo un 14% en peso de agregado fino por polvo de NR.

El análisis microestructural reveló una unión débil entre las partículas de polvo de NR y la pasta de cemento en la Zona de Transición Interfacial (ITZ).

El muro prefabricado planteado en esta investigación cumple el objetivo de aislar térmicamente edificaciones en la ciudad de Bucaramanga.

El uso de polvo de NR en el concreto puede ser un método para minimizar la acumulación de neumáticos, reducir el consumo energético y de recursos naturales. Además, el uso de este tipo de residuos produce un proceso de construcción sostenible.

6. RECOMENDACIONES

Realizar nuevas investigaciones variando el tamaño de partícula del NR, con el fin de analizar la incidencia en las diferentes propiedades del concreto.

Se recomienda más estudios de las propiedades mecánicas, dinámicas y la durabilidad para generar nuevas aplicaciones al CMNR.

Investigar pretratamientos del NR con el fin de mejorar la unión entre la partícula de neumático y el cemento.

BIBLIOGRAFÍA

CENGEL Yunus, GHAJAR Afshin. Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones. McGraw Hill, 2011. 945 p.

CHEN X., WU S., ZHOU J., Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar, Construction and Building Materials, vol 40, pp 869– 874, Mar 2013.

COUNCIL REGULATION (EC) 31/1999 of 26 April 1999 on the landfill of waste [1999] OJ L182/1.

CROISSET, M., & LUQUE MALDONADO, R. t. Humedad y temperatura en los edificios: condensaciones y confort térmico de verano y de invierno: Barcelona Técnicos Asociados 1970.

DA DB-HE / 1 Cálculo de parámetros característicos de la envolvente.

DIRECTIVE (EC) 98/2008 of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and replacing certain Directives [2008] OJ L312/3.

ETRA, European Tyre Recycling Association. Disponible en: <https://www.etra-eu.org> (Última consulta: 03.07.2018).

GANJIAN E, MORTEZA K, Ali AM. Scrap-tire-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. Constr Build Mater 2009;23:1828–36.

GUPTA T., CHAUDHARY S., and SHARMA R. K., “Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 562–574, 2014.

HÄFLIGER I. F. et al., “Buildings environmental impacts’ sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials,” *J. Clean. Prod.*, vol. 156, pp. 805–816, 2017.

IDEAM, I. d. h., meteorología y estudios ambientales. (2017). Solicitud de información estaciones meteorológicas. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/solicitud-deinformacion>.

INFORME DE OPERACIÓN. Compañía XM. Disponible en: <https://www.xm.com.co> (Ultima consulta: 20.07.2018).

Investigación pre-normativa de control térmico en fachadas de edificios multifamiliares tipo VIS en la ciudad de Bogotá D.C.

JACOBS B. T. L., MEMBER A., and P. VESILIND A., “Probabilistic environmental risk of hazardous materials,” vol. 118, pp. 878–889, 1993.

LO C.-L., “Environmental benefits of renewable building materials: A case study in Taiwan,” *Energy Build.*, vol. 140, pp. 236–244, 2017.

MILLER N. M. and TEHRANI F. M., “Mechanical properties of rubberized lightweight aggregate concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 147, pp. 264–271, 2017.

PACHECO-TORGAL F, LABRINCHA J.A. The future of construction materials research and the seventh UN Millennium Development Goal: A few insights. En: *Construction and Building Materials*. Marzo 2013. Vol 40. P. 729-737.

PACHECO-TORGAL F. Eco-efficient construction and building materials research under the EU framework Programme Horizon 2020. En: Construction and Building Materials. Enero 2014. Vol 51. P. 151-162.

RAFFOUL S., GARCIA R., PILAKOUTAS K., GUADAGNINI M., and FLORES N., "Optimisation of rubberised concrete with high rubber content: An experimental investigation," Constr. Build. Mater., vol. 124, pp. 391–404, 2016.

SU H., YANG J., LING T., GHATAORA G. S., and DIRAR S., "Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes," J. Clean. Prod., vol. 91, pp. 288–296, 2015.

SUKONTASUKKUL P., "Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel," Constr. Build. Mater., vol. 23, no. 2, pp. 1084–1092, 2009.

SUKONTASUKKUL P., "Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel," Constr. Build. Mater., vol. 23, no. 2, pp. 1084–1092, 2009.

TEMPERATURA PROTOCOLO-Curso de Higiene y Seguridad Industrial-escuela colombiana de ingeniería.

WANG G. and LEE N., "The Methodology of Utilization of Waste and Recycled Materials in Construction," Int. Conf. Sustain. Des. Eng. Constr. Texas, Novemb., pp. 749–756, 2012.