PLACA HUELLAS DE CONCRETO FABRICADAS CON ESCORIAS DE ACERÍAS O GRANO DE CAUCHO RECICLADO: UNA REVISIÓN.

DANIEL FERNANDO MESA GARCIA
CIRO A. ROMERO GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS-SECCIONAL TUNJA INGENIERIA CIVIL

BOYACÁ-TUNJA
2021

PLACA HUELLAS DE CONCRETO FABRICADAS CON ESCORIAS DE ACERÍAS O GRANO DE CAUCHO RECICLADO: UNA REVISIÓN.

CIRO A. ROMERO GONZÁLEZ
DANIEL FERNANDO MESA GARCIA

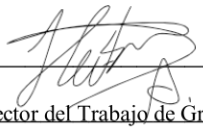
DIRECTOR PROYECTO DE GRADO:
ING. HÉCTOR MAURICIO SÁNCHEZ ABRIL, M.Sc.

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS-SECCIONAL TUNJA

MONOGRAFÍA DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

BOYACÁ-TUNJA
2020-1

Nota de aceptación



Director del Trabajo de Grado

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Texto de agradecimiento

Doy gracias a Dios por permitirme culminar esta etapa con éxito, a mi abuelita Mariela (q.e.p.d), a mi madre Rocio, a mi padre Mauricio, a mi tío Jhon Jairo, a mi hermano Andrés y a Carlos por apoyarme, creer y confiar en mí junto a todas las personas que hicieron parte del camino para hacer realidad este sueño.

"If you can to dream, you can do it".

(Daniel F. Mesa Garcia)

La infinita bondad que Dios que me ha dado es la oportunidad para disfrutar esta etapa, también la sabiduría y la fuerza necesaria para avanzar en todo este tiempo que estado en la universidad. A mi padre Ciro Alfonso Romero (q.e.p.d), por apoyarme incondicionalmente en su sabiduría y conocimiento hasta el último momento, a mi madre Raiza Yaneth Gonzalez Gonzalez, por su apoyo incondicional ante cualquier situación, concejos y charlas, a mi hermana Raiza Nathaly Romero Gonzalez, por apoyándome desde la distancia y aconsejándome en su tiempo libre.

(Ciro A. Romero González)

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN 14

2. ABSTRACT 15

3. INTRODUCCIÓN 16

4. OBJETIVOS 17

4.1. OBJETIVO GENERAL 17

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 17

5. MARCO TEÓRICO 18

5.1. PAVIMENTOS 18

5.2. PLACA HUELLA 18

5.3. ESCORIA NEGRA 20

5.4. GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR) 24

5.5. COMPOSICIÓN DE LOS NEUMÁTICOS: 24

5.6. PROCESOS DE OBTENCIÓN 25

5.6.1. PROCESO AMBIENTAL 25

5.6.2. PROCESO CRIOGÉNICO 26

5.6.3. MICRO MOLIENDA 27

5.6.4. RENDIMIENTO EN PRODUCCIÓN: 28

5.7. GRANULOMETRÍA: 29

5.8. PRUEBAS TÉCNICAS REALIZADAS AL CONCRETO 31

5.8.1. PRUEBAS DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO: 31

5.8.2. RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO 33

5.8.3. RESISTENCIA 33

5.9. DURABILIDAD DE 28 DÍAS 35

5.10. PENETRACIÓN DE CLORUROS 36

5.11. PERMEABILIDAD AL AGUA 37

5.12. LAS EMPRESAS TRITURADORAS RECICLADORAS ACTIVAS SEGÚN LA RUES SON:[8] 38

6. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE 39

6.1. REFERIDO A PLACA HUELLAS 39

6.2. REFERIDO A CONCRETO HIDRÁULICO 45

6.3. REFERIDO A CONCRETO HIDRÁULICO CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR) 47

6.4. REFERIDO A CONCRETO HIDRÁULICO CON ESCORIAS DE NEGRA 55

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS 63

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 65

9. REFERENCIAS 66

10. ANEXOS 79

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - CONSTRUCCIÓN DE 52 METROS DE PLACA HUELLA EN MESA-CUNDINAMARCA (INVIAS, 2020) 19

FIGURA 2 - CONSTRUCCIÓN DE PLACA HUELLA EN BUCARAMANGA COLOMBIA 20

FIGURA 3 - ASPECTO DE LA ESCORIA NEGRA (BOZA, MAILE P.33) 21

FIGURA 4 - CLASIFICACIÓN DE ESCORIA NEGRA PROCESADA [63] 21

FIGURA 5 - HORNO DE ARCO ELÉCTRICO (NINABANDA & SANTAMARÍA, P.15)[58] 23

FIGURA 6 - DISEÑO DE ALCANTARILLA PARA PLACA HUELLA 41

FIGURA 7 - DISEÑO POZO DE INSPECCIÓN 41

FIGURA 8 - DISEÑO DE CUNETA 42

FIGURA 9 - BOX COULVERT INCORPORADO A SISTEMA PLACA HUELLA [24] 43

FIGURA 10 - MUERO DE CONTENCIÓN [24] 44

FIGURA 11 - ALABEO POR TEMPERATURA DE LOSA DE CONCRETO HIDRULICO 45

FIGURA 12 - MODELO ESTRUCTURAL DE REFERENCIA 46

INDICE DE TABLA

TABLA 1 - PRODUCCIÓN DE ACERO A NIVEL MUNDIAL (WORLD STEEL, P.17) [82] 22
TABLA 2 - PROPIEDADES MECANICAS DEL MATERIAL DE SELLO CONVENCIONAL 47
TABLA 3 - COMPARACION DE LAS PROPIEDADES DEL CAUCHO DESVULCANIZADO VS MATERIAL DE SELLO CONVENCIONAL 48
TABLA 4 - RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO ESCORIA GRUESA 56

INDICE DE DIAGRAMA

Diagrama 2 - Proceso de molienda en ambiente (Recycling Research Institute,2021)[79] 26

Diagrama 3 - proceso de molienda criogénica (Recycling Research Institute,2021)[79] 27

Diagrama 4- Molino micronizador (MAYPER,2020)[56] 28

Diagrama 5- Diagrama de flujo granulometría NTC 77 (Venegas, Laura p. 26)[86] 29

Diagrama 6 - Diagrama de flujo determinación de la densidad (Venegas, Laura p. 30)[86] 30

Diagrama 7 - Diagrama de proceso del concreto (Venegas, Laura p. 33)) [86] 31

Diagrama 8 - Diagrama de flujo medida de la temperatura NTC 2557 (Venegas, Laura p. 36)[86] 32

Diagrama 9 - Diagrama de flujo determinación del contenido de aire (Venegas, Laura p. 37) [86] 32

Diagrama 10 - Diagrama de flujo determinación de la densidad NTC 1926 (Venegas, Laura p. 38)[86] 33

Diagrama 11 - Diagrama de flujo prueba de ensayo a la compresión NTC 673 (Venegas, Laura p. 40)[86] 34

Diagrama 12 - Diagrama de ensayo del módulo elástico estático (Venegas, Laura p. 41)[86] 35

Diagrama 13 - Módulo de Rotura (MR) aplicando granulo de caucho [62] 36

Diagrama 14 - Diagrama de ensayo de penetración de cloruros (Venegas, Laura p. 41)[86] 37

Diagrama 15 - Diagrama de flujo ensayo de permeabilidad al agua NTC 448 (Venegas, Laura p. 44)[86] 38

Diagrama 16 - Deflexiones en la placa huella. 40

Diagrama 17 - Momentos en la placa-huella. 40

Diagrama 18 - Cuneta tipo 1[24] 43

LISTA DE SIMBOLOS

A/C = relación agua cemento. (p.24)[85] [86]

EAF = Escoria de horno de arco eléctrico. [76]

ENHAE = Escorias Negras De Horno De Arco Eléctrico. [76]

F'c = Resistencia del concreto

GCR: Granulo de caucho Reciclable.

INEN = Instituto ecuatoriano de normalización

Mr=módulo de rotura en Mpa [62]

GLOSARIO

- Box Coulvert: Obra de drenaje utilizado para paso de agua.

- Carga Monotónica: Ensayo de laboratorio utilizado para determinar algunos parámetros y resistencia del material.

- CBR: California Bearing Ratio (Capacidad de Soporte) caracteriza la capacidad de soporte de los materiales de pavimento en diseño de espesores de capas. (Padilla P.25)

- CLINKER: Material granular principal que componente del cemento y su vez mayor generador deCO^2, resultado que viene de la cocción a una temperatura alta (1400°) previamente pulverizadas, entra en proceso de molienda, donde se mezcla con yeso, caliza y otros materiales hasta obtener el cemento conocido como portland (SANABRIA RAMIREZ, M. A,2018) [75]

- ECONOMÍA CIRCULAR =Renueva la producción de materiales reciclables para un posible nuevo uso.

- ESCLEROMÉTRICOS: instrumento de medición empleado, generalmente, para la determinación de la resistencia a compresión en hormigones ya sea en pilares, muros, pavimentos.(P.162) [68]

- FITORREMEDIACIÓN = Descontaminación de cantidades de metales en zonas agrícolas, recomendado por medio de platas de girasol (Helianthus Annuus) (P.175) [36]

- GP = G, grava y P, Pobremente graduado, es unas de las clasificaciones SUCS.

- JPCP = jointed plain concrete pavement (Pavimento de hormigón liso articulado): tipo de pavimento, que usa juntas de contracción para controlar el agrietamiento y no usa acero de refuerzo.[44]

- JRCP = jointed reinforced concrete pavement (pavimento articulado de hormigón armado) tipo de pavimento, utiliza juntas de contracción y acero de refuerzo para controlar el agrietamiento. [44]

- LONA: Son cables de fibra textil o de acero que proporcionan una gran resistencia en el neumático. [5]
- MICROSÍLICE: Subproducto originado de la reducción de cuarzo. [62]

- MODELO WINKLER = Se utilizó para determinar los esfuerzos mecánico (deformaciones, momentos y cortantes) (p.75) [61]
- MTC = Ministerio de Transportes y Comunicaciones (P.177) [36]

- NEVI-12 = Norma Ecuatoriana Vial, revisión y actualización.

- NTC = Norma técnica colombiana (P.15) [86]

- RUES= Registro Único Empresarial y Social, artículo 11 de la Ley 590 de 2000, administrado por la cámara de comercio atendiendo a empresarios y contratista a la economía soldaría a las entidades sin ánimo de lucro una herramienta de información confiable unificada en el orden nacional como en el internacional

- SBR: Copolímero Estireno-Butadieno (composición química), Caucho sintético más utilizado y económico, tiene mayor resistencia al desgaste y presenta mayor generación de calor. [19] [30]

- SBS: caucho natural es un polímero elástico que surge de la emulsión de una sustancia lechosa más comúnmente conocida como látex en la savia de algunas plantas, principalmente las del género. [30]

- SIDERÚRGICOS: Se trata del proceso que consiste en la extracción y la utilización de hierro, A través de la siderurgia se pueden conferir diversos tratamientos al hierro para conseguir distintas aleaciones y tipos de minerales.

- SOLERAS = Revestimiento del suelo natural con hormigón.[28]

- TECNALIA = Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

- UCSC = Unified Soil Classification System, en su traducción de inglés, Sistema de clasificación unificado de suelos SUCS. [76]

1. **RESUMEN**

La adición de escorias negras de acería o granulo de caucho reciclado (GCR) como agregados en mezclas utilizadas para la elaboración de placa huellas representa con su implementación presuntas soluciones óptimas para el mejoramiento de este tipo de pavimentos ante problemas que limitan el buen funcionamiento y estado de vías con bajos volúmenes de tránsito, contribuyendo con esta monografía a la proyección de vías sostenibles.

El seguimiento llevado a cabo corresponde a la revisión del estado del arte a partir de estudios e investigaciones relacionadas con el tema de la presente monografía, lo cual conlleva a un análisis sobre las ventajas y desventajas que determinen la viabilidad de su implementación.

Palabras claves: Escoria negra, proceso siderúrgico, gránulo de caucho reciclado, impacto ambiental, reciclaje, concreto hidráulico, placa huella, vías terciarias, horno arco eléctrico, neumático desechado, reutilización, trituradora de llantas, agregado, concreto, sostenible

2. ABSTRACT

The addition of black steel slag or recycled rubber granules (GCR) as aggregates in mixtures used for the manufacture of footprints represents with its implementation presumed optimal solutions for the improvement of this type of pavement in the face of problems that limit the good functioning and condition of roads with low volumes of traffic, contributing with this monograph to the projection of sustainable roads.

The follow-up carried out corresponds to the review of the state of the art based on studies and research related to the subject of this monograph, which entails an analysis of the advantages and disadvantages that determine the feasibility of its implementation.

Keywords: Black slag, iron and steel process, recycled rubber granule, environmental impact, recycling, hydraulic concrete, footprint plate, tertiary roads, electric arc furnace, discarded tire, reuse, tire shredder, aggregate, concrete, sustainable

3. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se genera un enorme impacto ambiental asociado a la inadecuada disposición final de neumáticos y escoria de acería, problemática que representa la necesidad de investigar su potencial como agregado en mezclas usadas para el mejoramiento de la infraestructura vial; el estado del arte recopilado en la presente investigación permite analizar la posibilidad de usar dichos agregados por separado en mezclas utilizadas para la elaboración de placa huellas como alternativa para el mejoramiento de este tipo de pavimento.

El acero y los neumáticos son dos de los materiales más utilizados en el mundo, su producción genera contaminación en: el aire, el suelo y en los recursos hídricos, por tal motivo se requiere maximizar los esfuerzos en áreas de sostenibilidad para la reducción del impacto ambiental propio de su fabricación e incorrecta disposición final.

La obtención tanto del GCR como de la escoria negra resultan ser económicas y factibles, son materiales que cumplen con estándares de calidad óptimos en cuanto a su implementación como agregados en mezclas utilizadas para la elaboración de diferentes pavimentos, ofreciendo así múltiples beneficios a la infraestructura vial.

La presente monografía surge a partir de la necesidad de contribuir como profesionales en una investigación relacionada con el mejoramiento de vías terciarias en Colombia con enfoque sostenible, como producto se presenta la revisión del estado del arte “placa huellas de concreto fabricadas con escorias de acerías o grano de caucho reciclado” correspondiente a la línea de investigación Geotecnia, vías y transporte.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Revisar el estado del arte relacionado con el uso de agregados de grano de caucho reciclado (GCR) o escorias negras de acería en la elaboración de mezclas de concreto hidráulico usado en la fabricación de placa huellas.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- A partir de la revisión del estado del arte analizar el comportamiento físico y mecánico de mezclas de concreto con agregados de grano de caucho reciclado (GCR) o escorias negras de acería.

- Indagar sobre la viabilidad y sostenibilidad que pueda representar la adición de agregados de escorias negras o de grano de caucho reciclado (GCR) en mezclas de concreto hidráulico usadas en la fabricación de placa huellas.

- Especular sobre las posibles ventajas y desventajas que puedan tener las placa huellas con agregados de escorias negras de acería o grano de caucho reciclado (GCR).

- Realizar recomendaciones para futuras investigaciones relacionadas con el uso de escorias negras o grano de caucho reciclado (GCR) como agregados en la elaboración de concretos hidráulicos usados en la fabricación de placa huellas dispuestas en vías con bajos volúmenes de tránsito.

5. MARCO TEÓRICO

En Colombia las vías se clasifican en: vías primarias, vías secundarias y vías terciarias, Esta investigación se enfoca en las vías terciarias, la placa huella es una solución óptima para el mejoramiento de vías con bajos volúmenes de tránsito, a continuación se presentan algunos conceptos importantes referentes a la "placa huellas de concreto fabricado con escorias de acerías o grano de caucho reciclado GCR)" siendo estos dos aditivos los materiales estudiados en la presente revisión del estado del arte [1-87], la red terciaria del departamento correspondiente a un 63% de la totalidad de su red vial, es la de mayor magnitud debido posiblemente a la gran extensión de la región, al gran número de municipios, veredas, corregimientos[49]

5.1. PAVIMENTOS

Los pavimentos en vías son la superficie artificial dispuesta sobre un terreno completamente nivelado y apto para tal fin, conformada por capas de uno o varios materiales cuyo comportamiento en términos de resistencia debe cumplir con la normativa legal vigente de cada país, entre dichos materiales se encuentra el concreto hidráulico y sus diferentes aplicaciones en pavimentos junto a otros materiales convencionales cuya importancia en materia investigativa resalta la implementación de nuevas opciones de pavimentos con enfoque sostenible que logren minimizar el impacto ambiental generado por la construcción de nuevas vías.

5.2. PLACA HUELLA

Es una losa de hormigón armado moldeada en la subbase, en la que el acero de refuerzo se entrecruza con la barra de refuerzo de la riostra y la barra de refuerzo de la placa-huella; se diseña con base granular de 15 centímetros de espesor por norma colombiana, es apta para para ser implementada en suelos con CBR mayores o iguales a 3 % y con valores de CBR menores de 3% para suelos con comportamiento complejo (INVIAS,2017)[47]; en la siguiente imagen se puede visualizar una placa huella convencional:



Figura 1 - Construcción de 52 metros de placa huella en Mesa-Cundinamarca (INVIAS, 2020)

El diseño de placa huellas debe garantizar el tránsito de vehículos tipo C-2 y C-3 conforme a la norma INVIAS de la siguiente manera.

Las placas-huella son de 90 centímetros de ancho separadas por una franja central también de 90 centímetros en piedra pegada, este tipo de pavimento debe garantizar el soporte de los esfuerzos aplicados por los ejes del vehículo, para ello es usado en las riostras el concreto ciclópeo o un material más económico. La riostra es una viga transversal, de 20 centímetros (0.20 m) de ancho con 18 centímetros de profundidad (0.18 m) y en su longitud varia ajustado a la sección transversal, articulan estructuralmente los elementos de drenaje, Berma-cuneta y bordillo, construidos en concreto

La piedra pegada (ciclópeo), contiene un espesor de 15 centímetros (0.15 m), teniendo como función la disminución de construcción del pavimento, para generar el carril generando una alta rugosidad que presenta las rocas pegadas, sin contar la contribución a la estética

La siguiente figura, permite visualizar una mezcla de concreto hidráulico dispuesta en placa separadas en la construcción de una paca huella



Figura 2 - Construcción de placa huella en Bucaramanga Colombia

5.3. ESCORIA NEGRA

La escoria negra proviene de la fundición del acero en procesos siderúrgicos, no es tóxico ni peligroso, se clasifica según el horno (horno de arco eléctrico para fines del presente estudio), generalmente se compone de magnesio, calcio, silicio y aluminio por lo que se presenta un mayor volumen de producción con respecto a la escoria blanca; La escoria negra es de color negro o grisáceo, textura rugosa y áspera, forma cúbica, angular e insoluble (*Parra Araque & Sánchez García 2010*)[63] como se muestra en la siguiente imagen:



Figura 3 - Aspecto de la escoria negra (Boza, Maile p.33)

De acuerdo al tamaño la clasificación de la escoria negra es la siguiente:



Figura 4 - Clasificación de escoria negra procesada [63]

Para el uso de escoria negra como agregado grueso en mezclas de hormigón para la elaboración de pavimentos, esta debe estar limpia sin ningún recubrimiento superficial y debe tener una resistencia a la abrasión recomendada del 35%.(*Ninabanda,2017*)[58].

Según estudios realizados por la empresa *Diaco S.A* de Parra Araque & Sánchez García[63]; compañía colombiana, con respecto a la implementación del material, recomiendan la adición de

la escoria negra en la fabricación de concreto; dicho agregado es a los millones de toneladas de acero fabricadas en el mundo como se registra en la siguiente tabla en un periodo de tiempo:

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Austria	3.6	3.6	3.9	3.8	4.1	4.2	4.0
Belgium-Luxembourg	4.2	4.3	4.3	4.4	4.6	4.6	4.6
Czech Republic	5.9	6.2	6.6	6.9	7.2	7.6	7.2
France	12.6	12.5	13.2	13.0	14.1	14.1	13.8
Germany	38.0	39.6	39.1	40.5	41.0	39.6	34.9
Italy	21.9	21.9	24.5	23.7	25.1	25.8	25.5
Netherlands	3.7	3.5	3.5	4.0	4.0	4.8	4.7
Poland	10.4	12.3	12.6	13.1	13.6	14.9	13.1
Romania	3.3	3.8	4.0	4.1	4.2	4.6	4.6
Spain	10.9	11.6	12.7	12.6	13.3	13.8	13.2
Sweden	3.6	3.4	3.4	3.9	4.1	4.1	3.8
United Kingdom	9.6	10.7	10.5	10.9	11.0	10.8	10.2
Other EU (28)	14.7	15.5	16.0	17.2	17.7	19.1	19.1
European Union (28)	142.4	149.0	154.3	158.1	164.0	168.0	158.7
Turkey	31.3	30.8	34.4	34.1	35.9	30.6	26.1
Others	5.6	6.2	5.7	6.5	6.5	6.8	7.8
Other Europe	36.9	37.0	40.1	40.6	42.4	37.4	33.9
Russia	43.3	43.1	39.8	38.7	40.9	41.4	43.5
Ukraine	5.6	4.2	3.3	4.2	4.6	4.7	4.8
Other CIS	11.3	10.3	9.3	8.1	9.0	9.5	10.5
CIS	60.2	57.7	52.4	51.1	54.4	55.7	58.8
Canada	14.8	15.8	12.9	13.4	14.0	15.2	13.1
Mexico	20.6	23.5	24.9	25.5	26.5	25.6	24.2
United States	95.7	107.0	96.1	91.9	97.7	99.8	97.7
NAFTA	131.1	146.2	133.9	130.7	138.3	140.6	135.0
Argentina	5.1	5.0	5.3	4.2	4.9	4.8	3.9
Brazil	28.0	25.6	21.3	18.5	19.5	21.2	20.6
Venezuela	2.9	2.0	1.8	0.7	0.5	0.2	0.1
Others	15.7	16.6	17.7	16.8	17.3	17.8	17.6
Central and South America	51.7	49.3	46.1	40.2	42.3	44.0	42.3
Egypt	9.2	10.2	10.9	11.7	10.2	11.1	10.4
South Africa	5.7	5.1	5.3	5.0	4.7	4.7	4.5
Other Africa	21.5	22.1	22.5	21.0	19.6	20.5	21.6
Africa	36.4	37.4	38.7	37.6	34.6	36.3	36.4
Iran	19.8	19.9	19.7	19.1	20.0	19.6	18.5
Other Middle East	32.9	34.6	34.1	34.0	33.2	30.2	30.2
Middle East	52.7	54.5	53.8	53.1	53.2	49.8	48.7
China	741.4	710.8	672.3	681.0	773.8	836.1	907.5
India	73.7	76.1	80.2	83.6	88.7	96.7	101.5
Japan	65.2	67.7	63.0	62.2	64.4	65.4	63.2
South Korea	51.8	55.5	55.8	57.1	56.3	53.7	53.2
Taiwan, China	18.6	19.6	17.5	18.3	17.7	17.9	18.1
Other Asia	75.8	83.3	90.2	99.5	97.0	100.4	103.7
Asia	1 026.4	1 012.9	979.0	1 001.6	1 097.8	1 170.1	1 247.1
Oceania	6.8	7.6	7.4	6.9	6.6	6.6	6.6
World	1 544.6	1 551.5	1 505.8	1 520.0	1 633.4	1 708.4	1 767.5

Tabla 1 - Producción de acero a nivel mundial (World Steel, p.17) [82]

En la empresa ACINOX ubicada en la ciudad de Tunas en Cuba se dispuso de una parte de la escoria negra para ser usada como agregado en la construcción de bloques de hormigón para la construcción de andenes peatonales con resultados favorables (*Boza Regueira,2011*)[13]

El horno de arco eléctrico genera calor por medio de electricidad para fundir hierro y acero a una temperatura de 1600°C, su capacidad máxima es de 300 Toneladas, obteniendo así líquido fundido, luego este producto se purifica con la adición de cal y oxigeno optimizando el proceso de separación de las escorias negras con el acero, de esta manera es posible utilizar posteriormente esta escoria como agregados en mezclas elaboradas para la fabricación de pavimentos, reduciendo el impacto ambiental producto de su incorrecta disposición al ser considerado un desecho por parte de las empresas siderúrgicas. (*Ninabanda & Santamaría,2017*)[58]

En la siguiente imagen se representa la composición de un horno de arco eléctrico convencional:

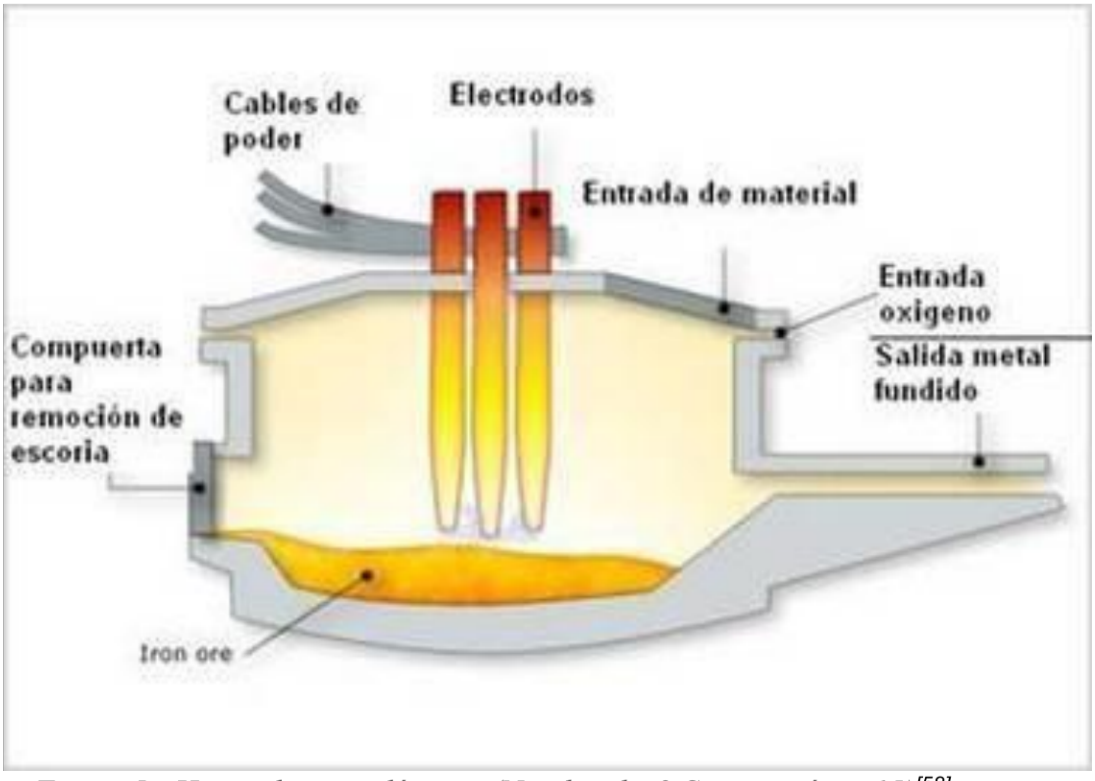


Figura 5 - Horno de arco eléctrico (Ninabanda & Santamaría, p.15)[58]

5.4. GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR)

El (GCR) es un material cuya materia prima para su obtención son los neumáticos usados debidamente procesados, su uso disminuye las malas prácticas existentes en cuanto a su incorrecta disposición final generadora de altos índices de contaminación ambiental.

Es un producto dispuesto en tamaño de granos inferiores a 0.60 mm (pasante del tamiz No. 30), cuyo proceso requiere de la trituración de neumáticos usados para finalmente ser usado como aditivo en mezclas utilizadas para la fabricación de pavimentos. El comportamiento del grano de caucho reciclado (GCR) como aditivo en mezclas utilizadas para la construcción de pavimentos sostenibles, de acuerdo al material bibliográfico obtenido se demuestra la versatilidad del aditivo para proporcionar beneficios relacionados con la resistencia y durabilidad de las vías.

El reciclaje de llantas para la obtención del GCR se lleva a cabo en las siguientes fases: Una primera fase destalonadora para el desmonte y una segunda fase de trituración primaria en la que las llantas se reducen a cortes de 50X50 mm aproximadamente de acuerdo a las condiciones de la máquina y finalmente dos fases posteriores, una de pre granulación en la que se obtienen granos de tamaño de 10mm a 8mm y por último una fase de pulverización que ofrece un tamaño de polvo de malla 30-80; Es claro que a menor tamaño de grano de caucho reciclado (GCR) que se utilice para mejorar las mezclas asfálticas se obtendrán mejores resultados porque la mezcla asfáltica tendrá una mayor compatibilidad en la unificación de las partículas pétreas, es menester realizar futuras investigaciones prácticas que determinen el cumplimiento de dichas características en mezclas de concreto hidráulico usadas para la fabricación de placa huellas (Venegas,2016)[86]

5.5. COMPOSICIÓN DE LOS NEUMÁTICOS:

Los neumáticos se componen de: caucho sintético, caucho natural, fibra textil y fibra metálica, siendo el caucho el componente requerido en los procesos de reciclaje y trituración para la obtención del (GCR). Los tipos de caucho más comunes son el SBR y el SBS, los cuales se componen por varios polímeros entre ellos el estireno-butadieno, cuya reacción con los otros

componentes de las mezclas utilizadas para la elaboración de pavimentos aportan diferentes beneficios.

La inadecuada disposición final de neumáticos fuera de uso genera un impacto ambiental devastador que requiere atención gubernamental y social para mitigar dicha problemática mundial. La adición de (GCR) en mezclas utilizadas para la elaboración de pavimentos además de ser una alternativa sostenible también garantiza una mejor calidad en el comportamiento de las vías cuyas mezclas sean modificadas con este aditivo, ofreciendo un aumento en las propiedades de refuerzo, lento desgaste del caucho por oxidación y evita su endurecimiento, prolongando así la vida útil de las vías.

5.6. PROCESOS DE OBTENCIÓN

A partir de procesos de trituración y separación se obtienen partículas de un tamaño máximo de ¼" libre de materiales propios del neumático que interfieran en la calidad del aditivo, los procesos de obtención más comunes son:

5.6.1. PROCESO AMBIENTAL

En este proceso se usan granuladores a temperatura ambiente que por medio de cuchillas cortan en partículas pequeñas el caucho cuyo tamaño es controlado por medio de tamices, cuenta con un sistema de imanes que separa los componentes metálicos para su reciclaje y elimina a compresión las fibras textiles por medio de bandas vibratorias. la temperatura de los materiales aumenta en el proceso requiriendo un enfriamiento del GCR en la etapa final para evitar así su combustión, dicho proceso se Ilustra a continuación:

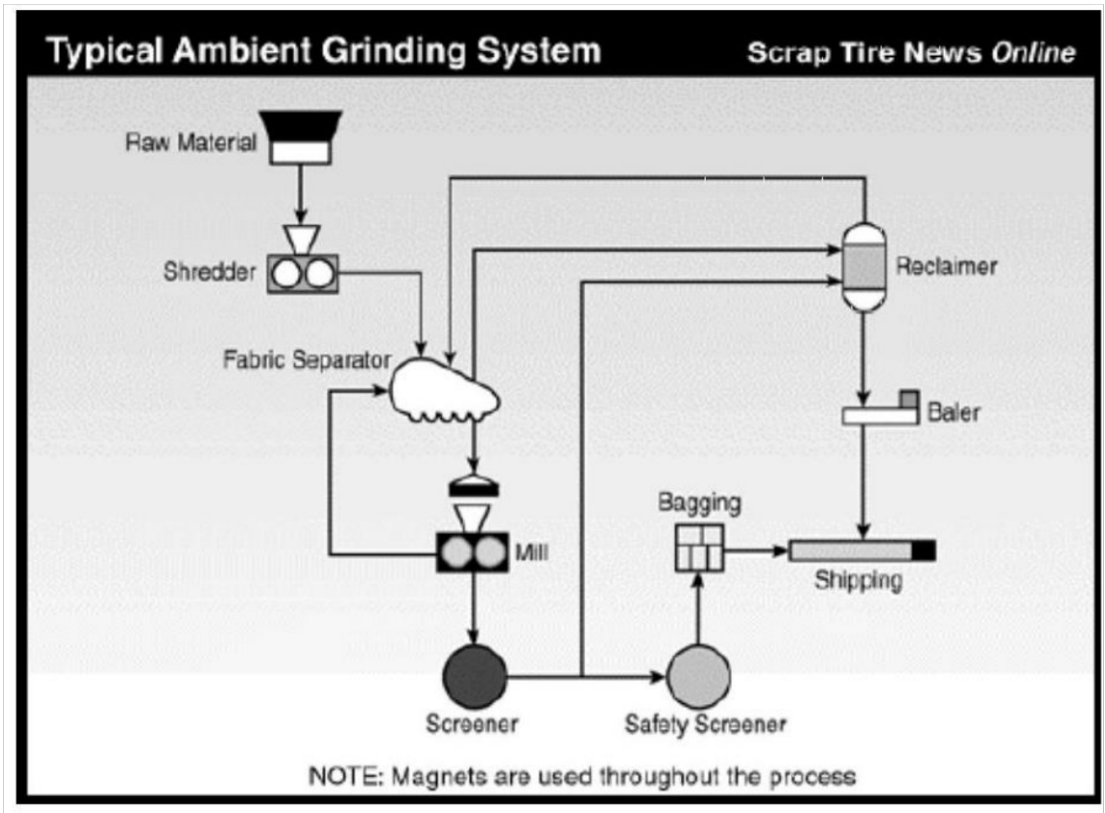


Diagrama 1 - Proceso de molienda en ambiente (Recycling Research Institute,2021)[79]

5.6.2. PROCESO CRIOGÉNICO

Este proceso es muy efectivo en la obtención de partículas de grano de caucho reciclado (GCR) de tamaño de ¼" con tamiz #30, material que presenta una superficie relativamente suave, un amplio rango de tamaño de partícula así como una mínima oxidación superficial, consiste en la reducción térmica de los neumáticos por medio de nitrógeno líquido o dióxido de carbono a temperaturas promedio de -80 °F, es un proceso económicamente más costoso con respecto a otros procesos de obtención de grano de caucho reciclado (GCR) debido a los altos precios que representa la obtención de la materia prima ya mencionada, luego de tal enfriamiento se dispone a separar los componentes de los neumáticos y triturar en pequeñas partículas el caucho por medio de un molino de martillo para disminuir al máximo su tamaño (*Diaz Claros & Castro Celis, 2017; p.17*)[31], dicho proceso se puede apreciar en la siguiente ilustración:

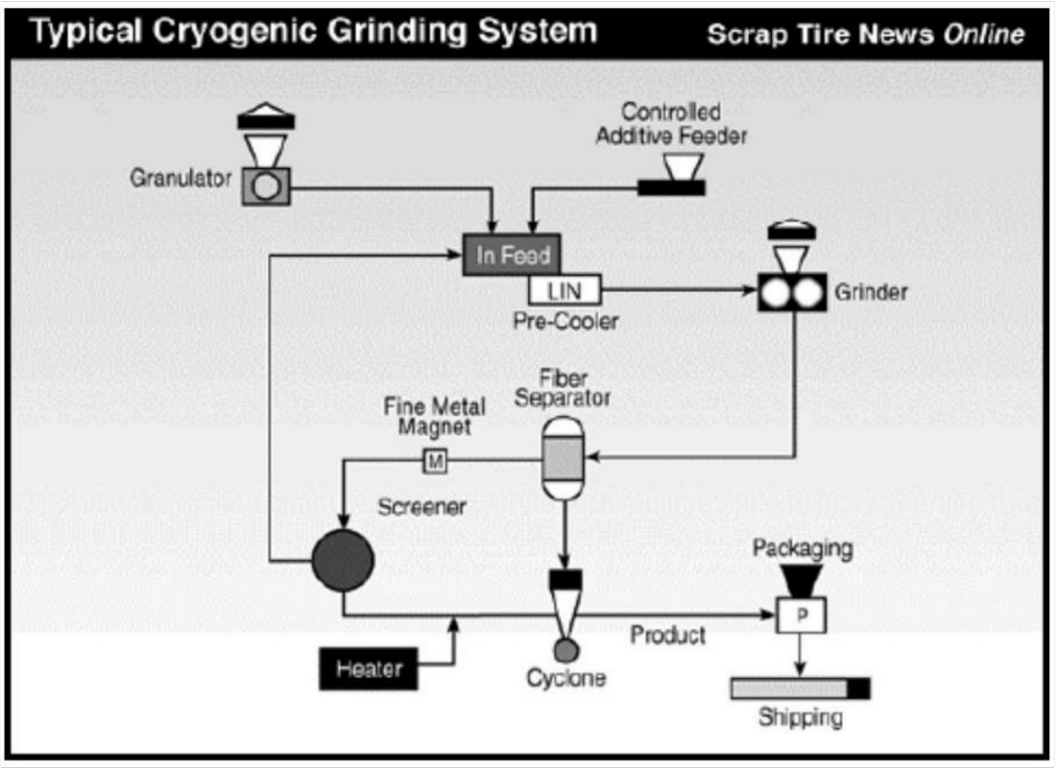


Diagrama 2 - proceso de molienda criogénica (Recycling Research Institute,2021)[79]

5.6.3. MICRO MOLIENDA

Este proceso de trituración se desarrolla por medio de dos ruedas dispuestas en un molino micronizador en vía húmeda con tamices #40 y #60 por dos veces consecutivas obteniendo por medio de este proceso un tamaño de grano fino con propiedades óptimas *(Mayper,2020)* [56], en la siguiente ilustración se puede apreciar un molino micronizador:



Diagrama 3- Molino micronizador (Mayper,2020)[56]

5.6.4. RENDIMIENTO EN PRODUCCIÓN:

Por lo general la disposición final de neumáticos usados son: las calles, rellenos sanitarios, zonas verdes, fuentes hídricas y quema a cielo abierto, entre otras prácticas culpables del impacto ambiental y el problema de salud pública ocasionado por su mal manejo y por la falta de alternativas para su reutilización. Según data el IDU con la reutilización de 250 llantas se puede producir una tonelada de GCR.[11]

5.7. GRANULOMETRÍA:

El tamaño de grano de caucho reciclado (GCR) se tiene en cuenta en el diseño de la mezcla de concreto, clasificándose en agregado grueso y agregado fino por medio de tamizaje a partir de su caracterización establecida en conformidad a la NTC 77 y la NTC 174 por medio del siguiente proceso:

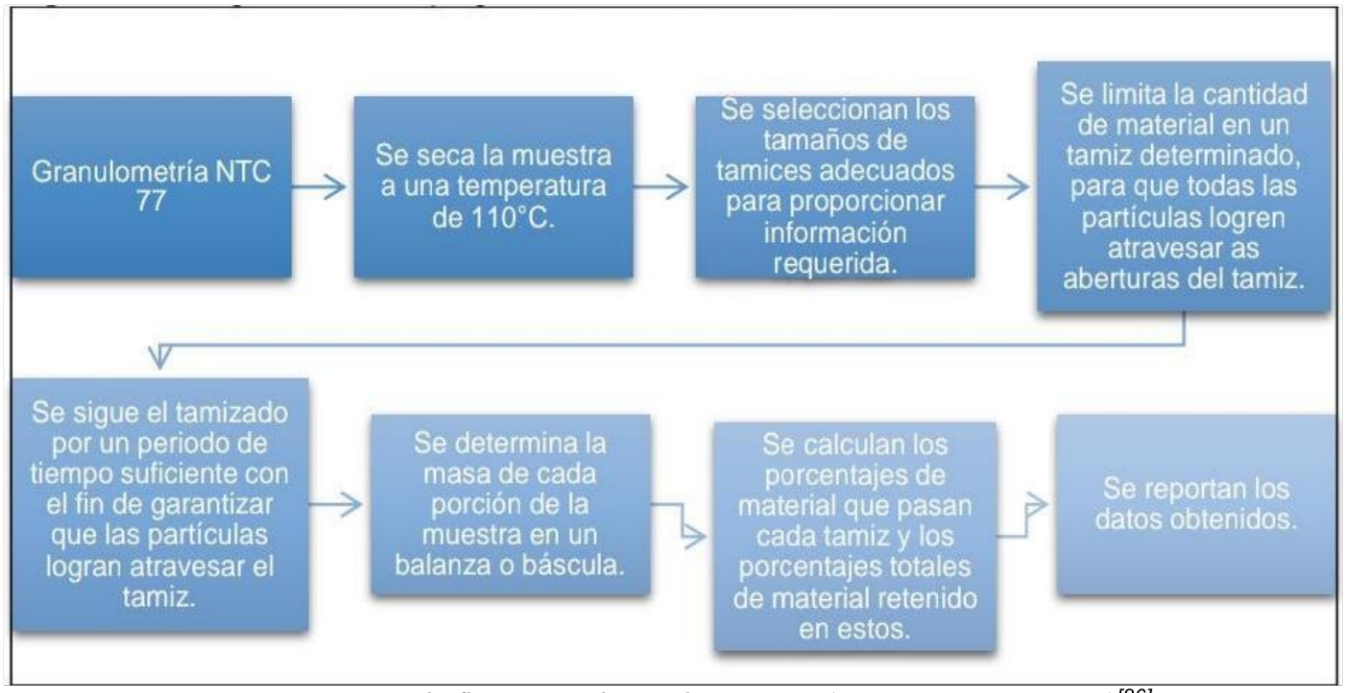


Diagrama 4- Diagrama de flujo granulometría NTC 77 (Venegas, Laura p. 26)[86]

5.7.1.1. DENSIDAD

La densidad es fundamental en la caracterización para establecer las relaciones de agregados, cemento y agua evitando así porosidades que afecten el diseño de la mezcla, se aplica bajo los criterios establecidos en la NTC 456 por medio del siguiente proceso:

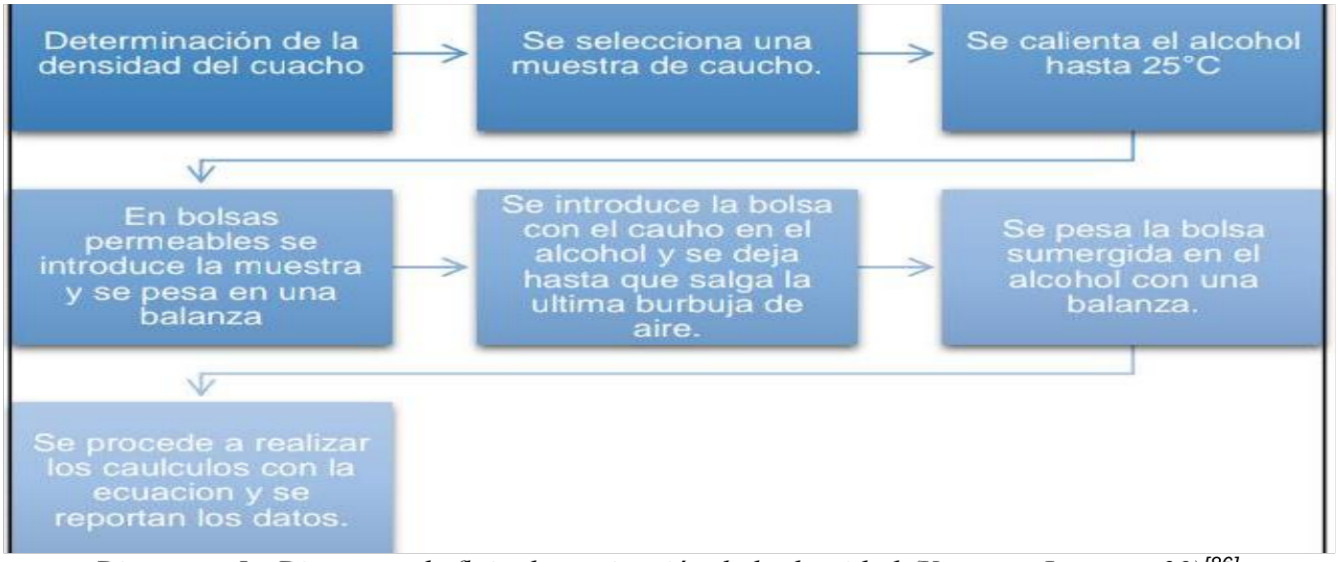


Diagrama 5 - Diagrama de flujo determinación de la densidad (Venegas, Laura p. 30)[86]

5.7.1.2. ADICIÓN DE GRANULO DE CAUCHO RECICLADO (GCR) EN MEZCLAS DE CONCRETO:

Como una alternativa de uso para el grano de caucho de llanta reciclado (GCR) se propone diseñar una línea de concreto con un valor agregado en la cual se reemplace parte del agregado fino por este GCR lo cual puede ofrecer propiedades mecánicas similares al concreto convencional [41].

A continuación, se describe en un diagrama el proceso del concreto en el cual se incluye el uso de aditivos dentro de los que se puede considerar el GCR o la escoria negra:

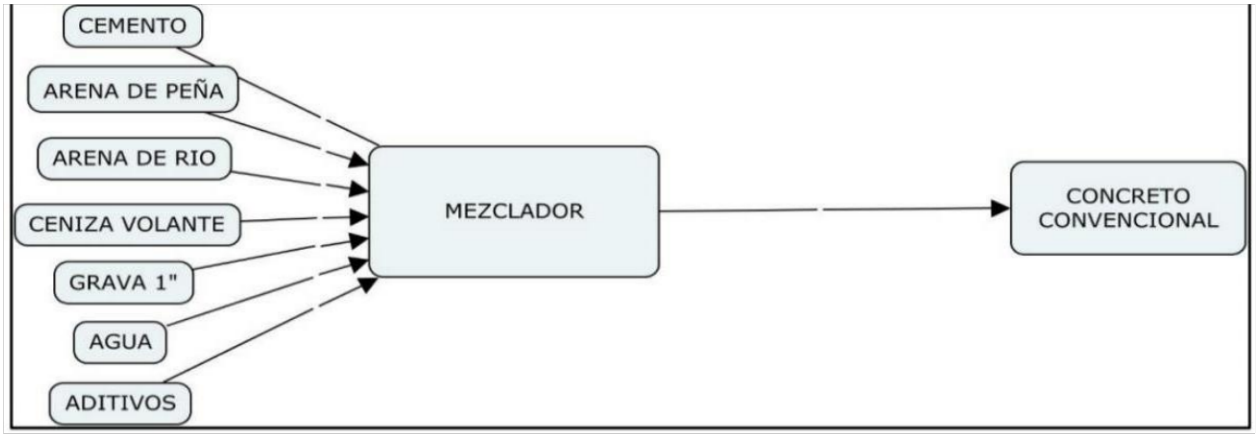


Diagrama 6 - Diagrama de proceso del concreto (Venegas, Laura p. 33)) [86]

5.8. PRUEBAS TÉCNICAS REALIZADAS AL CONCRETO

Las pruebas técnicas realizadas a las mezclas de concreto son requeridas para conocer las características y propiedades del concreto, dicho estudio se realiza a la mezcla de concreto en estado fresco y en estado sólido. Las pruebas son las siguientes:

5.8.1. PRUEBAS DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO:

- **Asentamiento:** Se refiere a la medida de la consistencia de concreto, se relaciona con el grado de fluidez de la mezcla e indica qué tan seco o fluido está el concreto [75].

-Temperatura: Este parámetro fisicoquímico permite medir el nivel de calor de la mezcla de concreto y se mide a partir del siguiente proceso:



Diagrama 7 - Diagrama de flujo medida de la temperatura NTC 2557 (Venegas, Laura p. 36)[86]

-Contenido de aire: Es la cantidad de aire que se acumula cuando la mezcla del concreto está fresca, se ocasiona ya sea por agitación de forma intencional o por reacción natural y se determina por medio del siguiente proceso:

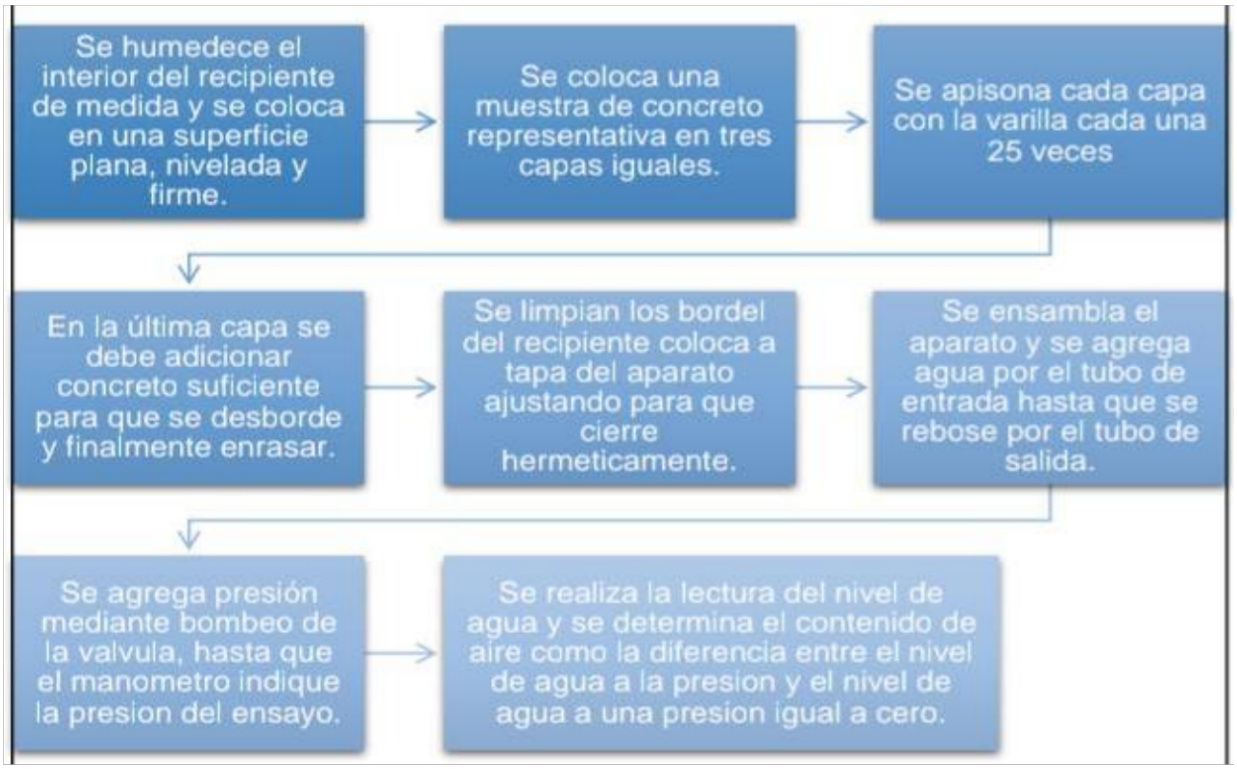


Diagrama 8 - Diagrama de flujo determinación del contenido de aire (Venegas, Laura p. 37) [86]

-Densidad: proporciona la relación entre el volumen y el peso encontrado en la mezcla bajo especificaciones de la NTC 1926, se determina a partir del siguiente proceso:



Diagrama 9 - Diagrama de flujo determinación de la densidad NTC 1926 (Venegas, Laura p. 38)[86]

5.8.2. RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO

Es el volumen de concreto elaborado necesario para el cálculo de la cantidad de cemento utilizado a partir de los parámetros establecidos en la NTC 1926.

5.8.3. RESISTENCIA

Existen dos caminos para poder determinar la resistencia, el primero es un ensayo de compresión que al ser una característica mecánica del concreto permite conocer la máxima resistencia del material frente a una determinada carga axial bajo parámetros establecidos en la NTC 673, ensayo cuyo proceso se describe en el siguiente diagrama**:**

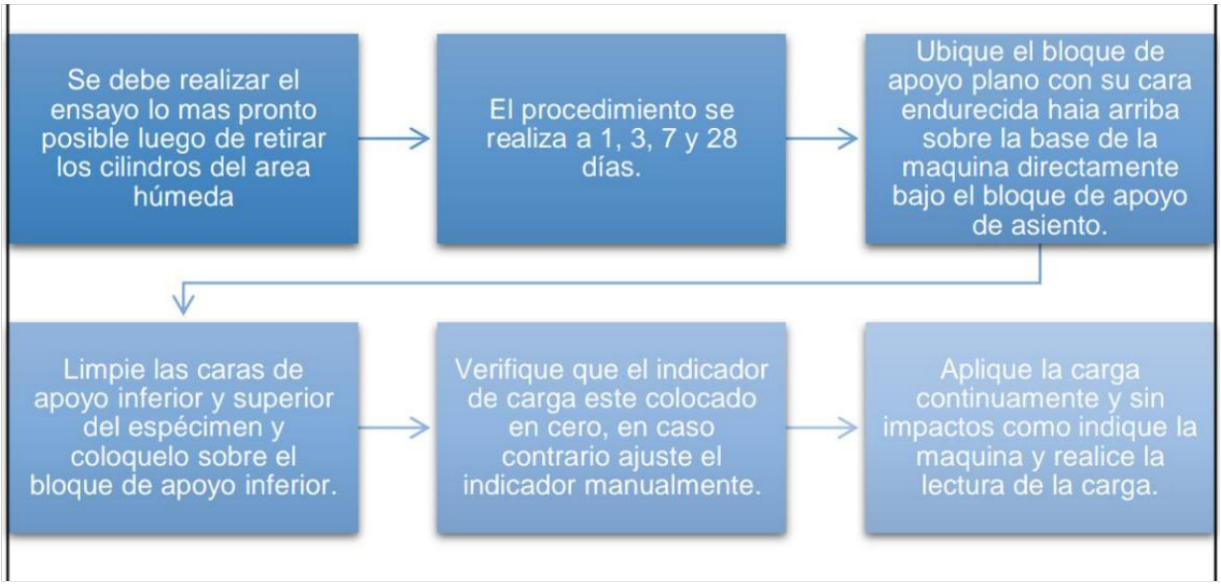


Diagrama 10 - Diagrama de flujo prueba de ensayo a la compresión NTC 673 (Venegas, Laura p. 40)[86]

Y el segundo es el Módulo elástico estático de 28 días o resistencia a la flexión, dicha propiedad se mide con el ensayo de vigas simples con carga en los tercios medios, los resultados se calculan y reportan como el módulo de rotura y variaran si existen diferencias en el tamaño del espécimen, su preparación, condiciones de humedad, curado, o si la viga ha sido fundida o cortada al tamaño requerido; el proceso para el ensayo del módulo elástico estático se describe a continuación. [86]

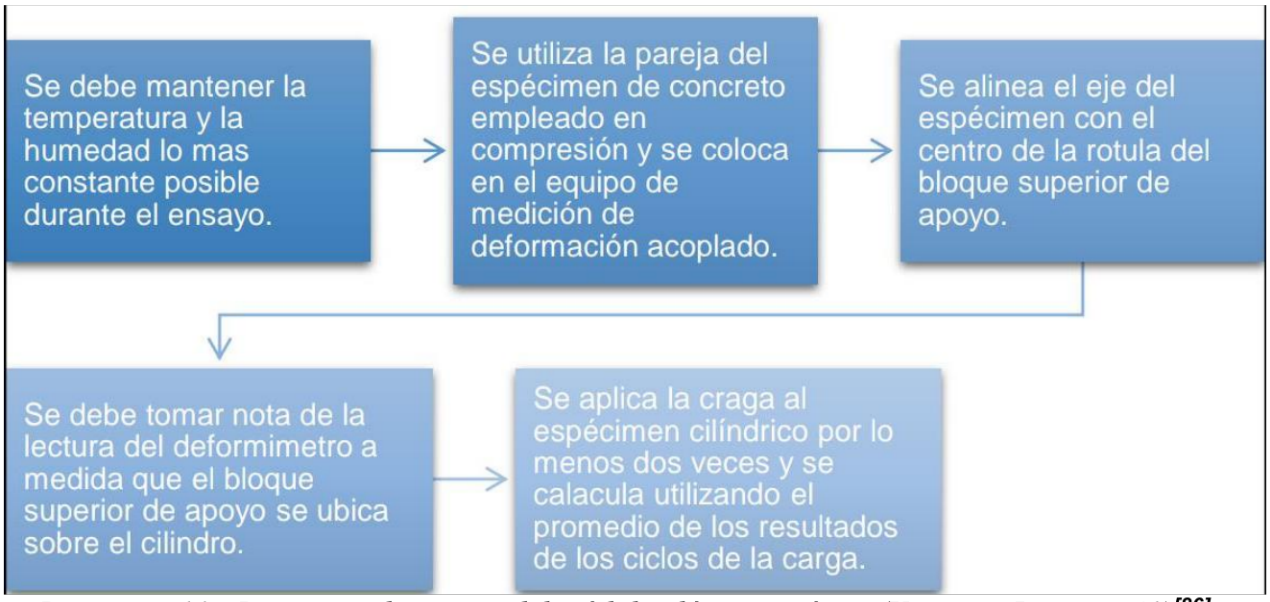


Diagrama 11 - Diagrama de ensayo del módulo elástico estático (Venegas, Laura p. 41)[86]

5.9. DURABILIDAD DE 28 DÍAS

Esta es otra de las características más importantes del concreto ya que determina su vida útil relacionada con las condiciones de exposición al medio ambiente, el deterioro se puede ocasionar por causas físicas, químicas o mecánicas, dicha durabilidad registra una resistencia optima del 100% en muestras de concreto en donde se implementó un 30% de cambio con GCR respecto al agregado fino. [86]

Los parámetros requeridos para el cálculo de la durabilidad son:

En el siguiente diagrama se presenta los porcentajes de GCR en 0%, 5%, 10% 15%

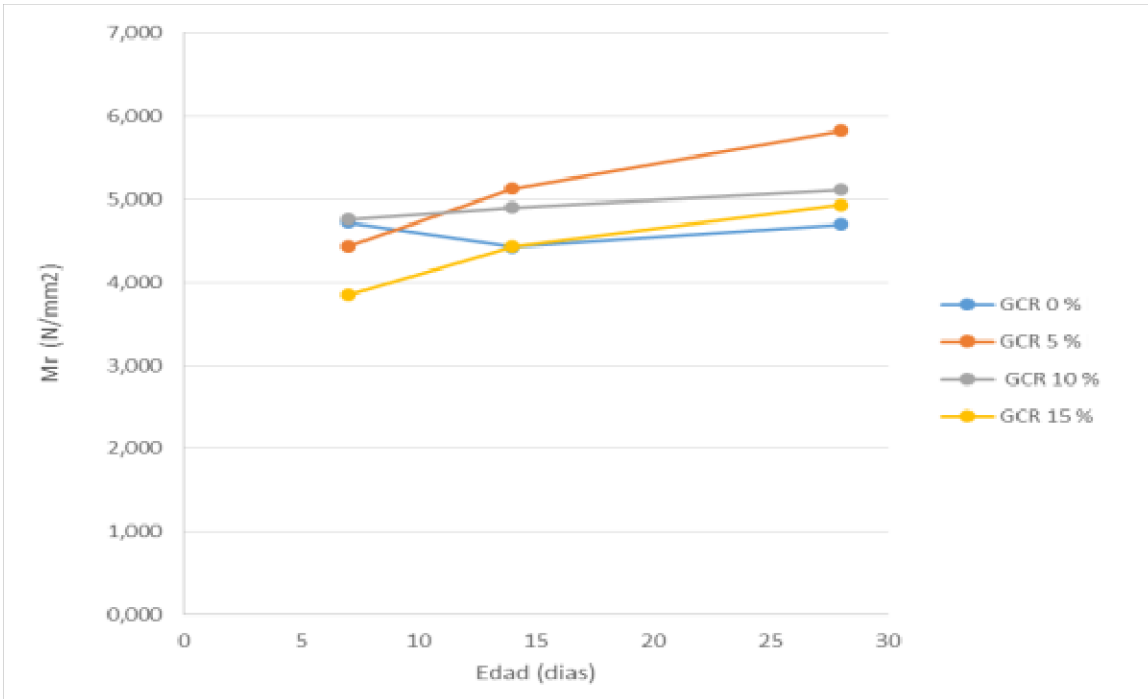


Diagrama 12 - Módulo de Rotura (MR) aplicando granulo de caucho [62]

A los 28 días Representa la mezcla de 5% de GCR de mayor MR y de menor de MR es de menor se presenta el de 0%GCR

5.10. PENETRACIÓN DE CLORUROS

Este parámetro está regulado bajo parámetros de la ASTM C1201, va enfocado a la protección de los aceros que refuerzan las estructuras de concreto, ya que los cloruros son el principal problema de corrosión y por esto el concreto debe brindar una protección física y química al acero. Este problema se encuentra directamente relacionado con el tipo de cemento, la relación a/c, la compactación y el curado de la mezcla entre otros; el proceso para realizar el ensayo de penetración de cloruros se describe a continuación.[86]

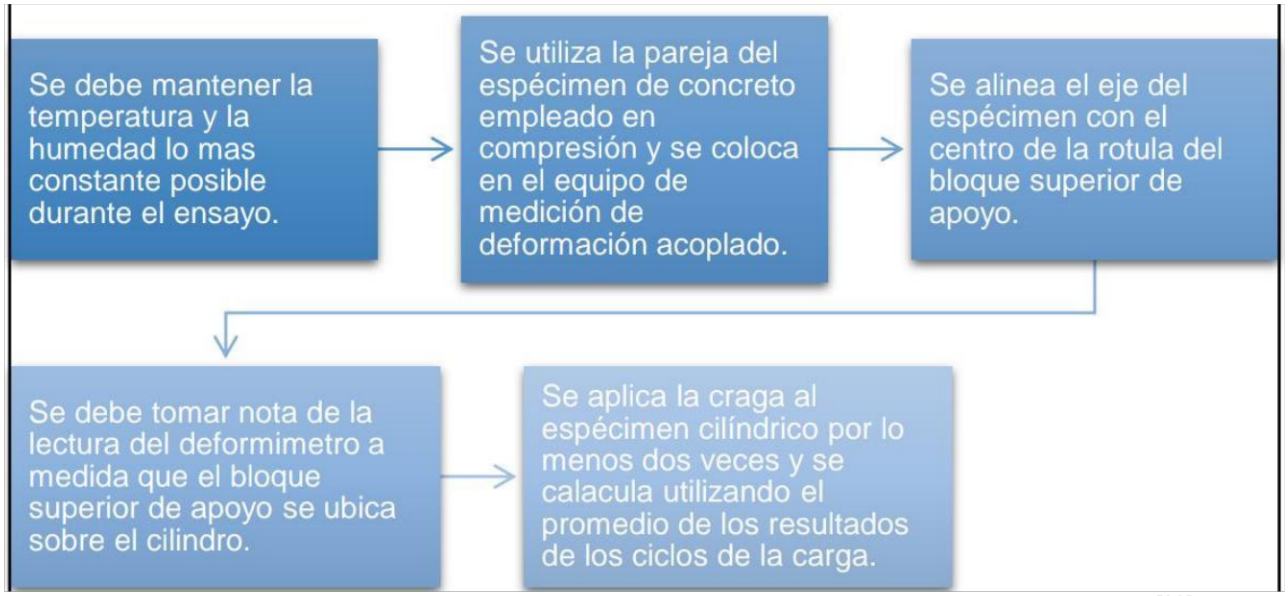


Diagrama 13 - Diagrama de ensayo de penetración de cloruros (Venegas, Laura p. 41)[86]

5.11. PERMEABILIDAD AL AGUA

Es la capacidad del concreto de permitir el paso de agua a través de su estructura interna sin causarle daños, este parámetro depende de la porosidad de la pasta de cemento y de la porosidad de los agregados. Adicionalmente la penetración de agua puede disminuir en concretos con relación de a/c bajas y con grados altos de hidratación del cemento, ya que los poros se reducen y por tanto la permeabilidad disminuye; Se debe realizar un ensayo para determinar la permeabilidad del agua cuyo proceso se presenta a continuación. (Peñaloza Garzón, & Moreno Barreto,2015,p3)[66]

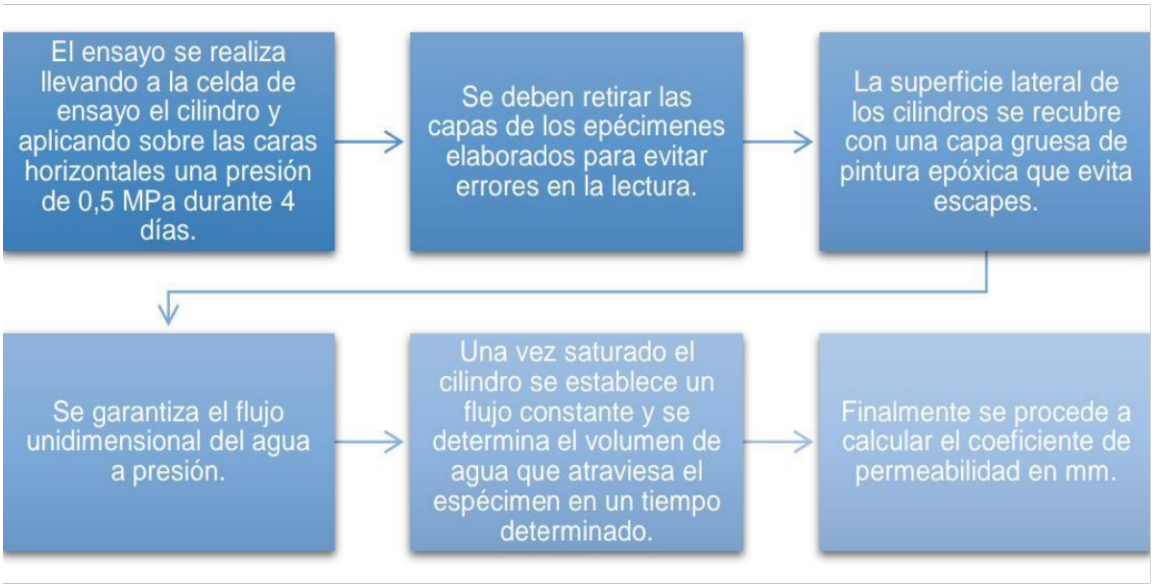


Diagrama 14 - Diagrama de flujo ensayo de permeabilidad al agua NTC 448 (Venegas, Laura p. 44)[86]

5.12. LAS EMPRESAS TRITURADORAS RECICLADORAS ACTIVAS SEGÚN LA RUES SON:[8]

- Granulo de caucho reciclado S.A.S., en Madrid-Cundinamarca;
- Gestores de caucho reciclado S.A.S, en Cora-Cundinamarca;
- Biocompañía de gránulos de caucho reciclado de Colombia sociedad por acciones simplificada - biocom zona franca S.A.S., en Tebaida – Quindío.

6. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

6.1. REFERIDO A PLACA HUELLAS

Armando Orobio, Juan Carlos Orobio y Juan Manuel Mosquera presentaron un artículo en donde se analizan los pavimentos en placa-huella con respecto a las cargas de diseño, características del suelo y calidad en los materiales dispuestos; Los autores afirman que para el diseño estructural de pavimentos con placa huellas el modelo winkler es óptimo en el cálculo de momentos, deflexiones y cortantes en vigas apoyadas sobre fundaciones elásticas para evaluar la respuesta de las placas-huella a las cargas críticas del tránsito y enfatizan en la precisión que se requiere en el evaluó de la carga máxima para el periodo de diseño que en materia contractual es de 20 años, con el fin de cumplir con los estándares de calidad necesarios para su buen funcionamiento. En el diagrama 15 y 16 se presentan los diagramas de deformación y momento de la placa-huella, resultantes de las cargas aplicadas por el paso de un camión C3 y el peso propio del pavimento en placa-huella bajo los siguientes parámetros: Ancho de banda: 0,90 m (ancho de la Placa-huella), [61]

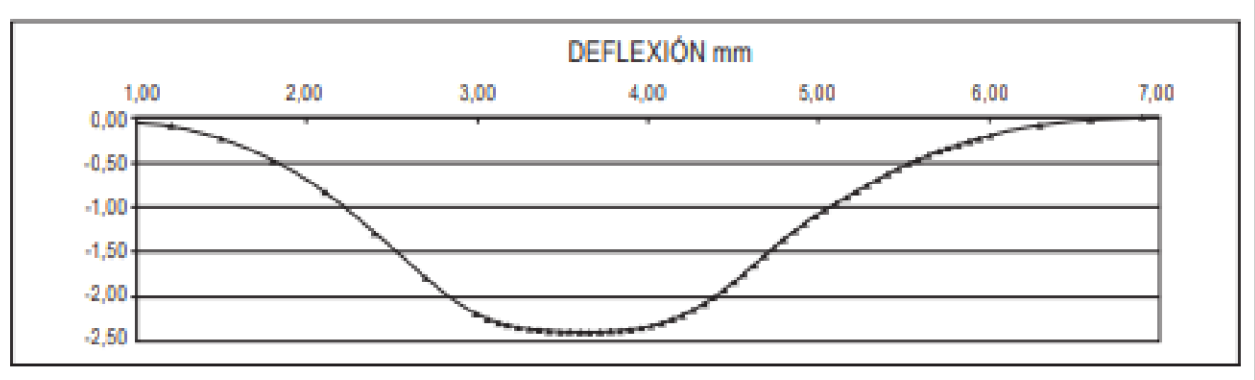


Diagrama 15 - Deflexiones en la placa huella.

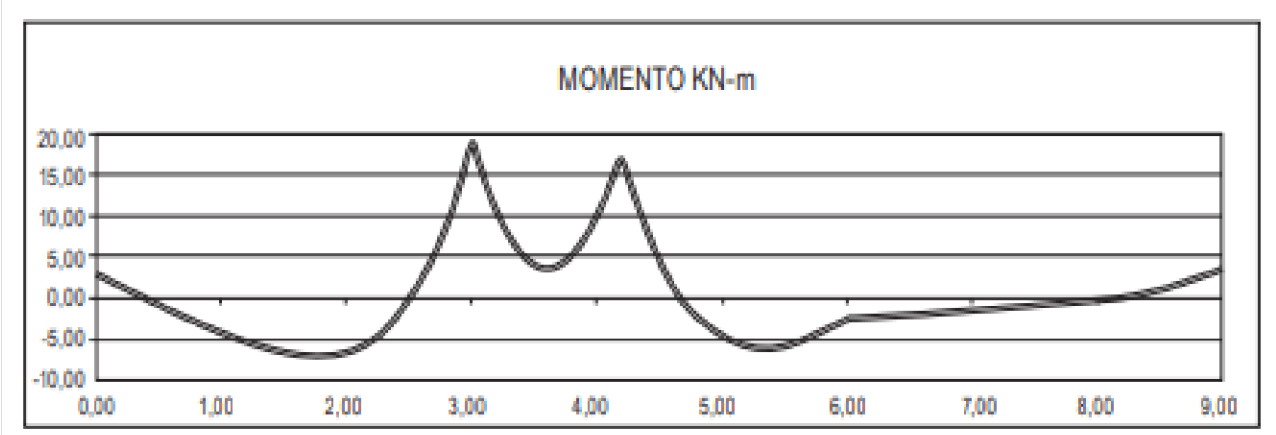


Diagrama 16 - Momentos en la placa-huella.

En la elaboración de placa huellas tanto la sub rasante como la sub base deben ser debidamente compactadas. Se debe garantizar el confinamiento de la subbase por parte de la riostra y el bordillo, por lo que estos elementos deberán proyectarse por debajo de la placa, como mínimo hasta alcanzar una profundidad igual al espesor de la subbase (0,15 m).[61] [2]

---

[2] Revista Ingenierías Universidad de Medellín | Vol. 17 Núm. 32 | enero-junio 2018 | pp. 69-83 | Medellín, Colombia Recomendaciones de diseño y construcción de pavimentos en placa-huella de concreto reforzado.

Opuesto a la referencia anterior se destacan los autores Aldemar Liz Díaz y Nadia Fernanda Rúgeles Rosario quienes presentaron una cartilla Guía del proceso de construcción de placas huellas de concreto hidráulico para bajos volúmenes de tránsito bajo parámetros establecidos en el INVAS 2017. Los autores resaltan las obras complementarias que puedan ser requeridas en la elaboración de placa huellas como lo son las obras de drenaje, obras de mitigación de riesgos tales como la estabilización de taludes o muros de contención, obras de mejoramiento de sub rasante, concreto modificado, disipadores de energía u obras de amarre diferentes a lo estipulado en la norma.[53], algunas de las obras complementarias que se evaluadas fueron las siguientes:



Figura 6 - Diseño de alcantarilla para placa huella



Figura 7 - Diseño pozo de inspección



Figura 8 - Diseño de cuneta

Se presenta por la autora Paola james guarín un análisis general de las vías terciarias del departamento de Boyacá y los programas asociados por parte del gobierno nacional a través del Plan Nacional de Desarrollo 2010 – 2014 "Prosperidad para todos" tales como: Caminos de prosperidad y Plan Vial Regional, proporcionando de esta manera a los diferentes municipios un apoyo técnico y económico en la consolidación de metodologías optimas de rehabilitación, mejoramiento y conservación de vías. [49]

Félix Andrés Contreras González y Juan Camilo Muñoz Hernández identifican una problemática nacional en la construcción de placa huellas en vías terciarias con respecto a la inexistencia de un manual de diseño y construcción que exija por norma a los ingenieros civiles colombianos cumplir con especificaciones y estándares de calidad. Los autores identifican la importancia en la topografía para obtener con precisión los datos referentes a la localización y al replanteo para optimizar la vida útil de la placa huella, evitando así fallas estructurales relacionadas. En esta investigación visitaron once frentes en los cuales se observaron muros de contención y sistemas de drenaje tales como cunetas, alcantarillas y box coulvert,[24], Como se puede a observar continuación.

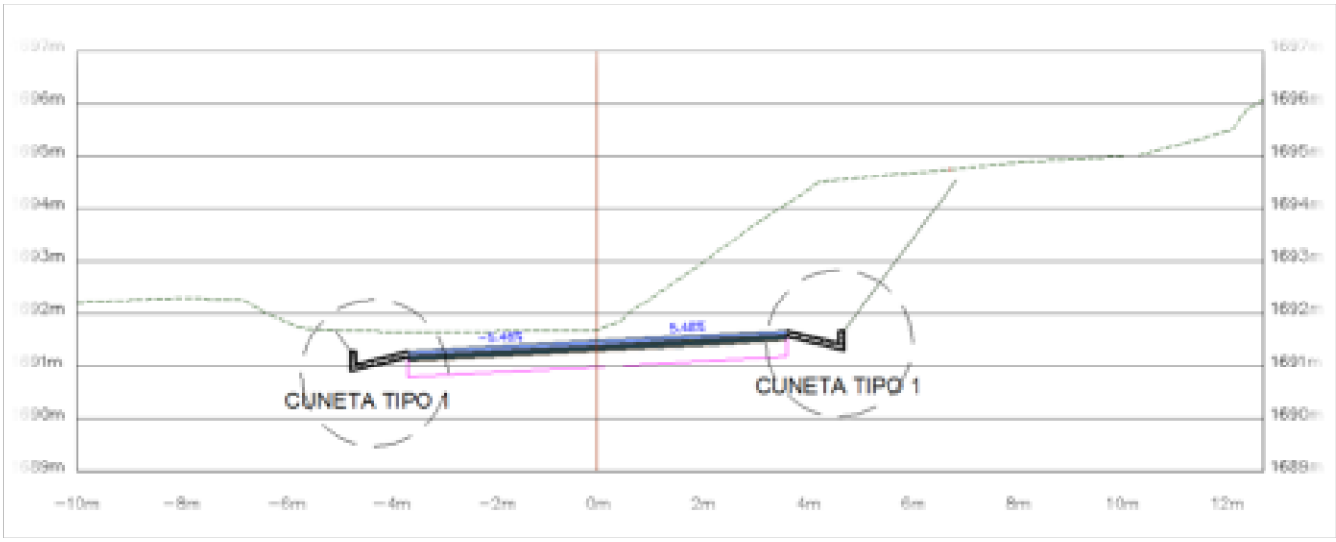


Diagrama 17 - Cuneta tipo 1[24]



Figura 9 - Box coulvert incorporado a sistema placa huella [24]



Figura 10 - Muero de contención [24]

Armando Orobio y Juan Carlos Orobio publicaron un artículo en la revista DYNA de la Universidad Nacional de Colombia en donde realizaron un estudio a partir de la modelación con elementos finitos, en los que analizaron el comportamiento de pavimentos elaborados con placa huella con ensayos de soporte y carga máxima. para un periodo de diseño de 20 años, determinaron en los resultados obtenidos el cumplimiento del criterio de fatiga y resaltan la incertidumbre existente sobre el comportamiento a erosión en placa huella por falta de una respectiva modelación. [60]

"Ales Yovani Moyano Villamil en su trabajo de grado titulado "Supervisión a la construcción de placa huella y obras de drenaje vial, municipio de Togüí 2018" indica la importancia de las especificaciones técnicas de construcción del INVIAS para la fabricación de placa huellas y la solicitud oportuna de permisos ambientales y judiciales; El autor sugiere para este tipo de proyectos se realicen ensayos de calidad de los materiales usados en los elementos de la obra para garantizar el buen estado de la placa huella , siendo esta una alternativa óptima para el mejoramiento de la movilidad en vías terciarias del país."[1]

6.2. REFERIDO A CONCRETO HIDRÁULICO

"Por medio del "Análisis de los procedimientos constructivos de losas de pavimentos de JPCP y JRCP mediante concreto hidráulico extruido" realizado por Diana Carolina Herrera Olivera y Kevin Nicolas Barreto Herrera, los autores afirman que este tipo de procesos constructivos son una oportunidad de mejoramiento vial para Colombia al garantizar mayor calidad, durabilidad, costos y tiempos de duración de las obras viales.[44]

EL autor Carlos Hernando Higuera Sandoval en su investigación denominada "Análisis de sensibilidad de las variables que influyen en los esfuerzos de alabeo por temperatura en losas de concreto hidráulico 2009" estudia los esfuerzos a flexión producidos por la diferencia de temperatura de las caras de la losa de concreto hidráulico, el autor sugiere usar concreto de buena calidad además de controlar la etapa de curado y esbeltez en la losa bajo parámetros de la AASHTO; Es menester señalar que en el diseño de placa huellas se incluye la elaboración, transporte, colocación y vibrado de una mezcla de concreto hidráulico reforzado dispuesto en dos placas separadas por piedra pegada (concreto ciclópeo) entre otras características de diseño específico para cada vía, por lo que se deben considerar las observaciones del autor Higuera para su fabricación.[45][24], Representa dos gráficamente a continuación

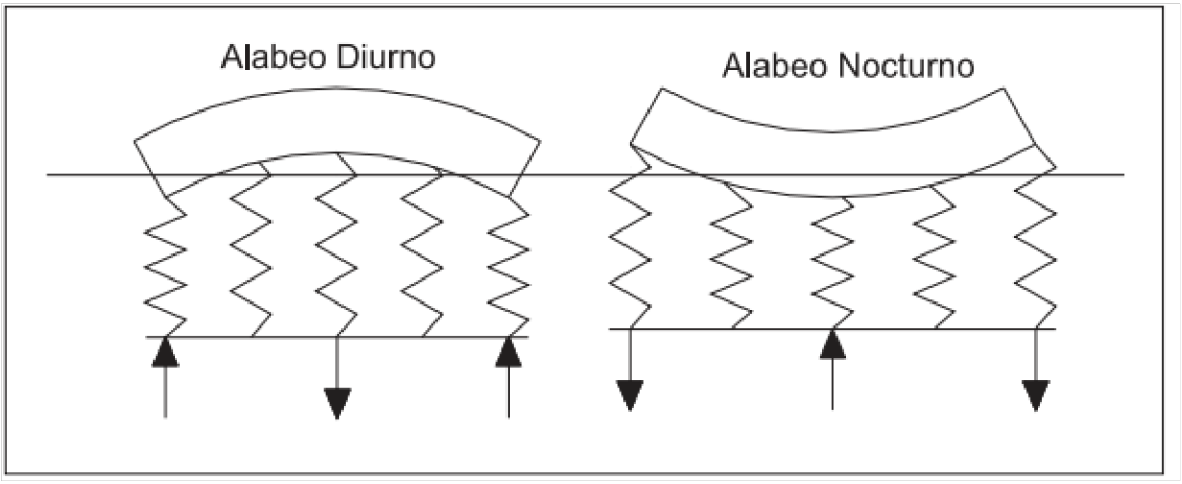


Figura 11 - Alabeo por temperatura de losa de concreto hidrulico

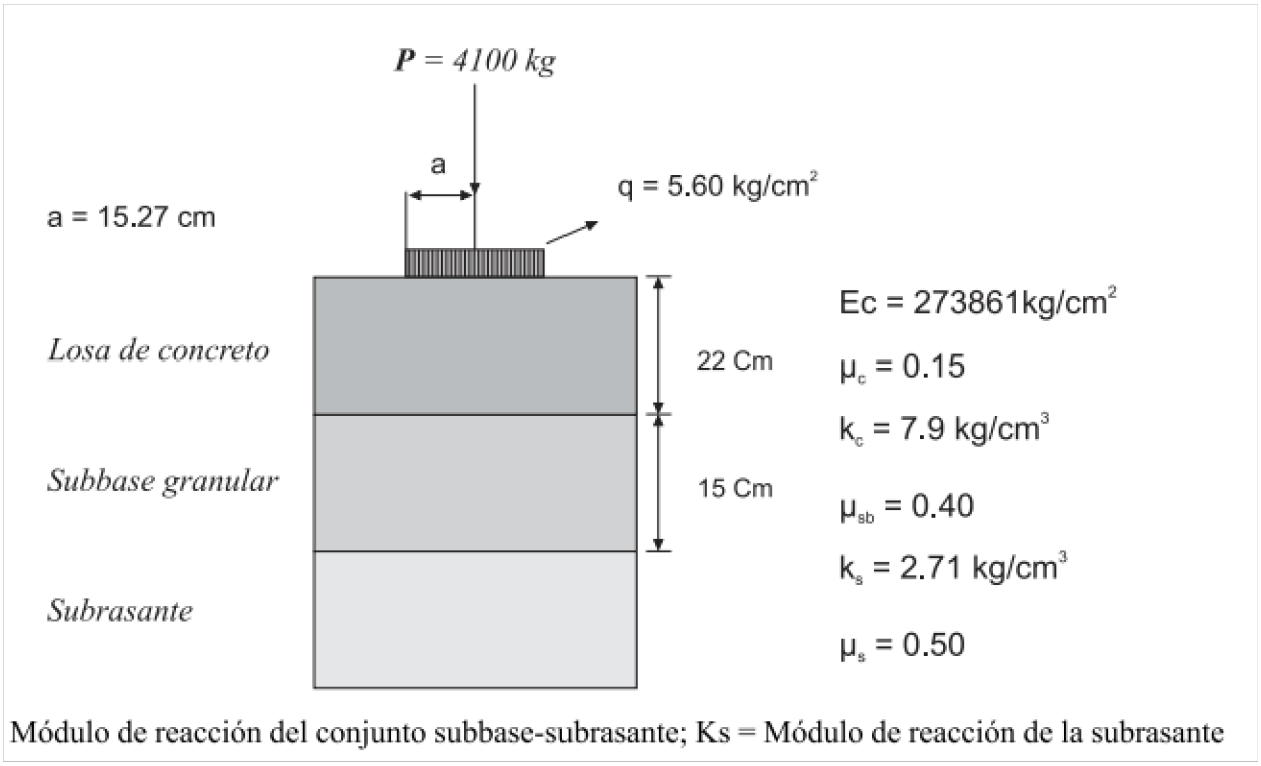


Figura 12 - Modelo estructural de referencia

C-Chou en su estudio denominado "Elaboración de un modelo estocástico para determinar el plazo óptimo de fraguado en la reparación de placas de hormigón (2010)". Afirma que su modelo permite preparar procesos eficientes y duraderos de reparación de placas de hormigón y determinar para diferentes niveles de fiabilidad el tiempo óptimo de fraguado.[33]

En el estudio comparativo entre una pavimentación con concreto hidráulico y una pavimentación con piedra laja emboquillada con concreto en la zona urbana de Lircay (2014) por el autor Eulises Pillpa Escobar, se resalta la implementación de los ensayos esclerométricos para determinar la resistencia a compresión del concreto, homogeneidad y calidad de una manera económica y en poco tiempo de forma no destructiva.[68]

El Ingeniero civil Luis Rolando Román Ávila en su Método constructivo de losas cortas en pavimentos de concreto hidráulico (2008) da a conocer uno los métodos constructivos de pavimentos poco convencionales y su deficiencia en el uso de equipos de auscultación que permitan controlar y garantizar calidad en los pavimentos construidos [9]

6.3. REFERIDO A CONCRETO HIDRÁULICO CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR)

El estudio sobre el caucho vulcanizado realizado por Elva Fonseca y Lady González de Colombia en su tesis "análisis de las propiedades mecánicas del caucho vulcanizado para utilizarlo como material de sello en juntas de pavimentos rígidos y compararlo con las propiedades de los sellos convencionales", presenta una investigación motivada por el impacto ambiental generado por la inadecuada disposición final de las llantas en desuso en el territorio colombiano, proyecto enfocado a la reutilización de neumáticos, El caucho vulcanizado presentó una respuesta óptima como material de sello al cumplir con los parámetros que exige la norma ASTM-D6690 siendo más óptimo en aspectos mecánicos que otros sellos de juntas convencionales cumpliendo con parámetros de dureza, impermeabilidad, adhesión y grado de elasticidad medido a través de la resiliencia.[37]

PROPIEDAD	TIPO I	TIPO II	TIPO III	TIPO IV
Penetración	Máx. 90	Máx. 90	Máx. 90	90-150
Flujo a 60°C, mm	5,0 Máx	3,0 Máx	3,0 Máx	3,0 Máx
Adherencia sin inmersión y con inmersión	Dos de tres muestras de 25.4 mm pasan (D)	Tres muestras de 12.7mm pasan (D)	Pasa Tres muestras de 12.7mm pasan (D)	Tres muestras de 12.7mm pasan (D)
Resiliencia %	60 min	60 min	60 min	60 min

NOTA: D La aparición, durante cualquier momento del procedimiento de prueba, de una grieta, separación u otra abertura que en cualquier punto tenga más de 6 mm de profundidad, en el sellador o entre el sellador y el bloque de concreto, constituye una falla de la muestra de prueba. La profundidad de la grieta, separación u otra abertura debe ser medida perpendicularmente al lado del sellador que muestre el defecto.

Tabla 2 - Propiedades Mecanicas Del Material De Sello Convencional

VARIABLES	CAUCHO DESVULCANIZADO	VULKEM 45	POLYSELLO 3405	DYNAFLEX 88
Penetración mm	65	70	90	90
Inmersión sumergido	No presenta grietas, separación o apertura del sellador, ni separación o apertura entre el sellador y el concreto	Pasa	6,5 mm	6,5 mm
Resiliencia	94%	60%	60%	60%

Tabla 3 - Comparación De Las Propiedades Del Caucho Desvulcanizado Vs Material De Sello Convencional

El estudio realizado por Gema Ceballos quien abarca su hipótesis desde un punto de vista económico y multifuncional, titulando su tesis "análisis del proceso de creación de carreteras a partir de caucho reciclado, con la finalidad de reducir el impacto ambiental en el ecuador para el año 2015" en la cual menciona los principales procesos para la reutilización de este producto: termólisis, trituración mecánica, trituración criogénica y valoración energética, siendo la trituración mecánica la que menor impacto ambiental genera y un proceso con enfoque de negocio que podría disminuir notablemente la contaminación producida por la incorrecta disposición final de más de 50.000 Toneladas de neumáticos anuales en Ecuador. [20].

En base a la norma técnica colombiana 2017 se realizaron ensayos de absorción de agua y densidad a adoquines de concreto hidráulico, laboratorios establecidos para el cumplimiento de las especificaciones mínimas que debe tener dicho diseño, comparando el comportamiento mecánico de los adoquines con adición de material de GCR (5% 10% 15%) y Microsílice (3%, 6% y 9%), estudio llamado "análisis del comportamiento mecánico en adoquines de concreto hidráulico con sustitución de agregado fino por grano de caucho reciclado en los tamices n°8 al n°20 (2.36mm - 0,85mm) y adición de polvo fino de Microsílice" (2018), realizado por los investigadores, Brayan Moreno & amp; Fernando Pacheco quienes evidenciaron que el porcentaje óptimo de Microsílice

es del 6% con mezclas de 5 10 y 15 % de GCR y los laboratorios establecidos para el cumplimiento de las especificaciones mínimas que debe tener los adoquines diseñados. [62].

El estudio de la implementación de GCR en diferentes porcentajes (3 %, 5% ,7% y 10%) en las mezclas de concreto hidráulico mejoran las propiedades mecánicas de estas, lo afirman los autores Pablo Rincón y Mateo Londoño, en su tesis "Análisis del concreto con caucho como agregado para aligerar elementos estructurales" (2019). Del cual deducen que la adición de GCR al 5% en mezclas de concreto hidráulico disminuye su peso propio con respecto a concretos hidráulicos sin aditivos de GCR.[81]

Gabriel Peláez, Sandra Velásquez y Diego Giraldo evalúan algunos métodos para el reciclaje de caucho con base a bibliografías relacionadas con su investigación titulada "aplicaciones de caucho reciclado: una revisión de la literatura" (2017), los autores consideraron diferentes alternativas para la reutilización de neumáticos usados desde un aspecto económico y ambiental, entre ellas se propone utilizarlos como modificadores de pavimentos y concretos mejorando de esta manera la liviandad y ductilidad del mismo, considerando en el diseño algunas características funcionales como la resistencia a la compresión y a la flexión puesto que disminuyen cuando se agrega ese tipo de desechos.[65]

Se presenta una propuesta para el mejoramiento de vías terciarias, problemática que impide el desarrollo de Colombia en materia vial, limitando la explotación de todo su potencial productivo en aras a un crecimiento económico y social necesario para él territorio nacional, elaborado por Oscar Carreño y Felipe Ospina, en su "propuesta de diseño geométrico tipo placa huella para vía terciaria en la vereda el hospicio del municipio de la Mesa Cundinamarca", en donde dan a conocer parámetros tales como la velocidad de diseño geométrico para placa huellas igual a 20km por hora dispuesto en el INVIAS y afirman que el mejoramiento de vías terciarias soluciona problemas de movilidad y calidad de vida de quienes dan uso de las mismas.[18]

Yudy Sánchez González, Kelly Rincón Velásquez y Yenny Esperanza Barbosa Clavijo recopilan información acerca del uso de llantas desechadas y sus beneficios tanto económicos como sociales en la creación de empresa, dispuesto en su proyecto llamado "Beneficios tributarios para

las empresas que reciclan neumáticos en la ciudad de Bogotá y que realizan inversiones en control y mejoramiento del medio ambiente (2016)", del cual infieren la importancia que tiene la aplicación de procesos de reciclaje asociados financieramente a beneficios tributarios que motiven a las empresas en su implementación, como lo es la exclusión del IVA, contemplado en el Art. 428 Estatuto Tributario en el caso de adquirir Activos Fijos de esta índole, entre otros..[77]

Los autores M. Farfán y E. Leonardo en su investigación titulada "Caucho reciclado en la resistencia a la compresión y flexión de concreto modificado con aditivo plastificante 2018", señalan que en la elaboración de dicho concreto el porcentaje de caucho reciclado ideal para cumplir con condiciones de calidad optimas en las mezclas es del 5% a los 28 días, garantizando de esta forma resistencia a la compresión y a la flexión, sin embargo la adición del 10% de caucho reciclado permite lograr una máxima resistencia a la flexión del concreto, Los autores dan a conocer la viabilidad mecánica y la reducción del impacto ambiental que representa el aditivo dispuesto en la investigación.[55]

Cristhian Román Peñaloza Garzón y Richard Moreno Barreto realizaron un estudió del "comportamiento mecánico de una mezcla para concreto con sustituciones del 10% y el 30% de arena con caucho granulado" para fines constructivos por medio de ensayos de laboratorio, determinando que la sustitución del 30% de agregado fino por caucho granulado no cumple con especificaciones de compresión, en cambio la sustitución del 10% alcanzo una resistencia de diseño igual a 21MPa en 28 días proporcionando factibilidad en su implementación, los autores recomiendan futuras investigaciones relacionadas con criterios de tracción y flexión en el tema de estudio.[66]

El periódico colombiano EL TIEMPO publica el artículo titulado: "comienza era de vías que se harán con llantas usadas 2016", en el cual se informa sobre desarrollo vial tanto de Autopistas 4G como de carreteras regionales proyectadas con un 10 % de pavimento continuo y grano de caucho, reduciendo de esta manera el impacto ambiental propio de la incorrecta disposición final de neumáticos fuera de uso además de proporcionar mayor calidad de asfaltos, la licitación de proyectos viales con adición del GCR como aditivo en contratos estatales aumenta la puntuación como incentivo a los postulantes[39]

Los autores Felipe Ledesma Chumbes y Wilder Yauri Huiza en su investigación "Diseño de mezcla del concreto para elaboración de adoquines con material reciclado de neumáticos en la provincia de Huancavelica" analizan el uso del GCR en el diseño de un adoquín con características mecánicas iguales a los actualmente comerciales y recomiendan utilizar el 25% de GCR debido a que este aditivo no deteriora las características del concreto y lo vuelve más liviano además de contribuir con la reducción del impacto ambiental propia de los neumáticos desechados [52]

Alejandro López y María Pineda presentan el "diseño de un proceso de producción basado en la trituración mecánica para el aprovechamiento de las llantas fuera de uso en Santiago de Cali", determinando que, en la ciudad de Cali ubicada en Colombia, por cada vehículo en circulación se desechan 1,95 llantas anuales y reiteran la factibilidad del proceso de llantas recicladas para la obtención de GCR y los beneficios ambientales relacionados con la reducción de emisiones de CO2 además de las ventajas propias de su implementación en diversos proyectos de Ingeniería.[54]

En el desarrollo de estudios relacionados con la implementación de plantas productoras de GCR en Colombia, se destaca Patricia del Pilar Cardona Urrutia en su "Estudio de factibilidad para la creación de una planta de producción de granos de caucho (GCR) mediante el reciclaje de llantas fuera de uso 2016" en donde justifica la factibilidad económica para la creación de una planta de reciclaje de llantas fuera de uso en Risaralda con sede en la ciudad de Pereira resaltando el aporte ambiental propio de la puesta en marcha de este proyecto.[16].Por su parte Ramón Virgilio Martínez presenta su "Estudio De Factibilidad Para La Instalación De Una planta recicladora de llantas usadas en la ciudad de Ibagué 2014" sobresaliendo la proyección en aportes de tipo social, económico y ambiental para el departamento garantizando la viabilidad del proyecto.[87]

"Nando Alfaro y Redin Cahuana de Perú en su "Estudio de las propiedades mecánicas del concreto 210kg/cm2, con granulado de caucho reciclado en reemplazo parcial del agregado fino de Cunyac", remplazaron parcialmente en volumen el agregado fino por GCR en mezclas de concreto demostrando que influye en las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión y conductividad térmica de forma positiva[2]

“En el “Estudio de factibilidad para la compra y operación de una maquinaria para la pulverización de llantas usadas en la ciudad de Girardot” realizado por Olga Shirley Jiménez y Luis Alfonso Perdomo se demuestra el beneficio económico y ambiental de la compra de una maquina pulverizadora de llantas. Como soporte se analizan variantes de precios, demanda y ofertas en el mercado para para determinar el alcance del proyecto.[50]

Los investigadores Diana Carolina Álzate, Emerson Gelacio & Jaime Alexander García presentan un “Estudio de Viabilidad para la Creación de una Empresa Transformadora de Llantas en Pereira” plantearon la posibilidad de emprender una empresa que logre transformar las llantas trituradas en GCR para diferentes usos en proyectos para la ciudad, los autores efectuaron estudios técnicos a partir de los cuales presentan una recolección de datos en estudios de mercadeo y administrativos, corroborando de esta manera la viabilidad del proceso de transformación de neumáticos fuera de uso en GCR.[17]

Juan Carlos Pérez y Yeison Leonardo Arrieta realizaron un “Estudio para caracterizar una mezcla de concreto con caucho reciclado en un 5% en peso comparado con una mezcla de concreto tradicional de 3500 psi” en donde estudiaron la adición de GCR en remplazo de agregado fino y grueso en mezclas de concreto para evaluar su comportamiento físico y mecánico bajo parámetros establecidos en la (NTC) y la (NSR 10), los autores afirman que a partir del ensayo de la resistencia a compresión con la sustitución de GCR por agregado grueso se demuestra una disminución en las muestras evaluadas con respecto al concreto tradicional debido a la porosidad que se origina, además se presenta poca adherencia entre el GCR y la pasta de concreto por la baja absorción de agua recomendando la sustitución de GCR por agregado fino, en este aspecto varia el tamaño de grano de caucho reciclado, no obstante se ratifica que la sustitución de caucho reciclado elimina la falla catastrófica del concreto hidráulico producida por agrietamiento, permitiendo que el material flexible absorba parte de la carga a mayores deformaciones localizadas manteniendo de esta forma unidos los dos extremos de cualquier grieta, característica que beneficia el estado de vías con adición de GCR en sus mezclas.[67]

Laura Carolina Venegas Ramírez realizo una “Evaluación del comportamiento del grano de caucho de llanta reciclada en la producción de concreto para la empresa argos “ en la cual da a conocer la viabilidad comercial y las desventajas físicas y mecánicas de adicionar grandes

cantidades de GCR como sustituto de finos puesto que los porcentajes óptimos de adición deben ser bajos, además es cuestionable el costo de la arena con respecto al del GCR lo cual representa una desventaja entre el concreto convencional y el concreto con aditivo de GCR en términos económicos.[86]

El ministerio de ambiente y desarrollo sostenible de Colombia publica un artículo titulado: "El gránulo de caucho reciclado (GCR) proveniente de las llantas usadas, será utilizado en la construcción de vías en el territorio nacional". El beneficio ambiental propio de la adición de GCR en mezclas utilizadas para la elaboración de vías es un tema de interés gubernamental en donde se planteó en el año 2015 el aprovechamiento de llantas usadas como materia prima del asfalto para la construcción de la malla vial del país.[32]

En el "Estudio de concreto elaborado con caucho reciclado de diferentes tamaños de partículas" realizado por los autores C. Albano, N. Camacho, M. Hernández, A. Bravo y H. Guevara, se infiere la factibilidad del uso de GCR en mezclas de concreto en un porcentaje no mayor al 5% en un tamaño de grano aleatorio al no afectar las propiedades del concreto haciéndolo más liviano y amigable con el medio ambiente.[14]

La alcaldía mayor de Bogotá D.C en colaboración del instituto de desarrollo urbano y la universidad de los Andes presentan un "Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas" en el cual se demuestra el uso del GCR como un agregado en proceso seco o como un modificador de ligante en proceso húmedo para asfaltos, lo cual mejora considerablemente la resistencia a la fatiga y aumenta la vida útil de las vías, los autores infieren que entre menor sea el tamaño del GCR mejores serán los resultados obtenidos.[3]

El autor español Juan Carlos Estrada Rivera realizo un "Estudio de propiedades físico mecánicas y de durabilidad del hormigón con caucho" en el cual indica que la adición de GCR en mezclas de hormigón es viable en porcentajes determinados, pero debe limitarse a funciones no estructurales como lo son andenes y otras obras menores).[10]

En el artículo denominado "Llantas usadas materia prima para pavimentos y múltiples eco aplicaciones", las autoras Leidy Viviana Patiño y María Aleyda Rodríguez Ramos evaluaron la

viabilidad de comercializar GCR como materia prima para diferentes tipos de proyectos, las autoras confirman las ventajas de sostenibilidad y rentabilidad empresarial presentes en la idea de negocio a partir de datos vigentes a la fecha de la publicación.[64]

Se plantea un "Plan de negocios eco-llantas del llano S.A.S" para la ciudad de Villavicencio por los autores Marlly Nova y Angela Rivera, plan enfocado a la realización de una procesadora de llantas usadas para producir GCR, además de la recolección oportuna de neumáticos fuera de uso en diferentes puntos de la ciudad avalada por EL MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE bajo principios de responsabilidad social y ambiental.[79]

"En la "Propuesta de concreto eco-sostenible con la adición de caucho reciclado para la construcción de pavimentos urbanos en la ciudad de lima" realizada por Luis Antonio Chávarri Cueva y Jorge Arturo Falen Solís, quienes evidencian en su investigación el potencial del GCR como aditivo en la producción de concreto hidráulico para pavimentos cuya implementación reduce la huella de carbono hasta 0.4% kgCO2/m3 y un ahorro económico de 2.9 % además del mejoramiento en las características viales, los autores determinan en su estudio que el tamaño de GCR apropiado para cumplir con las prestaciones de trabajabilidad debe ser de 25 um y el remplazo por agregado de un 20%.[21]

La investigadora Paulina Alejandra Delarze Díaz, en su tesis denominada: "reciclaje de neumáticos y su aplicación en la construcción", Promueve el reciclaje de estos desechos y su implementación en múltiples prestaciones, cuya aplicación a resultado favorable para el país de Chile, el GCR se ha implementado como aditivo en mezclas usadas para recubrimiento de barreras de contención de carreteras y de asfaltos para carreteras, materia prima en la fabricación de losetas, adoquines y otros tipos de pavimentos además de ser un insumo en la fabricación de membranas de aislación vibratoria y acústica [29]

"En búsqueda de alternativas para el procesamiento de las llantas desechadas surge el proyecto denominado: "Utilización de granulado de caucho reciclado como adición para concreto permeable para uso en estacionamientos vehiculares 2017" elaborado por José González Quiñonez quien afirma que la adición de GCR en proporciones adecuadas además de ser una práctica eco

amigable mejora las características de resistencia a flexión y permeabilidad de la mezcla de concreto.[40]

6.4. REFERIDO A CONCRETO HIDRÁULICO CON ESCORIAS DE NEGRA

El Gobierno de España en colaboración del CEDEX y los ministerios de fomento y del medio ambiente publicaron un catálogo formal de residuos utilizables en construcción, la ficha técnica sobre las escorias de acerías de horno de arco eléctrico, incluyen el proceso de fabricación del acero y las diferentes fases para la extracción de las escorias negras. Los autores resaltan la valorización existente del agregado en distintos usos: capas de rodadura de firmes con pavimento de mezcla bituminosa, como material para explanadas, como árido para hormigón, sub bases y bases de carreteras, sin embargo, debido al riesgo de expansión y de hinchamiento es importante evaluar su potencial expansivo y limitar su uso cuando sobrepase los valores establecidos. Debido a características propias de porosidad, angulosidad y falta de finos, las escorias pueden ser difícil de extender y compactar por lo que se requieren otros áridos para controlar este aspecto [35]

Lina Parra Araque y Diana Sánchez García presentan un proyecto que aborda el análisis técnico, comercial y financiero del aprovechamiento de las escorias negras generadas por la Siderúrgica DIACO S.A. localizada en el Municipio de Tuta, (Boyacá), para uso como material agregado en concreto. Para establecer dicha viabilidad se determinaron las propiedades físicas a partir de ensayos de laboratorio para evaluar su uso potencial como agregado fino o grueso. Posteriormente se diseñaron mezclas de concreto en las que se reemplazó en porcentajes diferentes el agregado convencional por escoria para la fabricación de cilindros con el fin de evaluar las propiedades mecánicas a los 7 y 28 días a través del ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales establecido en la norma NTC 673. Los autores afirman que la aplicación de las escorias negras como agregado grueso dentro de la mezcla de concreto, sustituyendo los agregados convencionales como lo es la grava, le otorga al material endurecido propiedades mecánicas favorables, mayor resistencia a la compresión y una alternativa sostenible para la disposición final de las escorias negras provenientes de la Siderúrgica Diaco, cuya generación alcanza las 5000 toneladas mensuales[63]

TAMIZ	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO	%PASA	Cumplimiento NTC 174
2"	0,00	0,000	100,000	Si
1"	3017,42	27,431	72,569	No
3/4"	1459,16	13,265	59,304	N/A
1/2"	3561,32	32,376	26,928	Si
3/8"	1629,53	14,814	12,114	N/A
No 4	1263,80	11,489	0,625	Si

Tabla 4 - Resultados del análisis granulométrico escoria gruesa

El Ingeniero Pompeyo Maldonado en su informe de pasantías presenta el comportamiento científico técnico del cemento portland I-R elaborado con Escoria Negra de Acero tipo Vesicular proveniente de la Siderúrgica del Orinoco "SIDOR" en el país de Venezuela. Para estos estudios llevó a cabo una caracterización química, mineralógica y morfológica del cemento y la escoria, por medio de DRX, difracción laser para determinar tamaños de partículas, análisis térmico y SEM. Además, se determinó la resistencia a la compresión que posee el cemento portland con adiciones de escoria negra de acero, con ello pudo conocer la gran factibilidad del uso como material hidráulico cementante rigiéndose por la norma venezolana: (COVENIN 3134 1994). El autor afirma que con la adición al 20% de escoria se obtuvo un porcentaje máximo del 0.30%, dicho valor indica que disminuyendo el porcentaje de escoria disminuye también el porcentaje de expansibilidad, según norma (ASTM C-845 1980) [69]

Byron Muñoz, Bryan Ninabanda y Karina Santamaría de Ecuador, presentan un proyecto de investigación que consiste en el reemplazo del agregado fino natural por escoria negra de horno de arco eléctrico, con la finalidad de poder ser utilizado en pavimentos rígidos. para la obtención de un hormigón de alta resistencia con escoria de acería para ser implementado en la elaboración de pavimentos rígidos, los autores siguen todas las especificaciones técnicas y normas vigentes cumpliendo con la resistencia especificada de 42 Mpa, concluyendo que el empleo de escoria de acería como agregado fino en el hormigón es óptimo en la elaboración un pavimento rígido [58]

Walter Chavarro Acuña y Carolina Molina Pinzón en su trabajo de grado presentan una evaluación de alternativas de pavimentación para vías con bajos volúmenes de tránsito, las cuales responden a problemas viales de tipo funcional o estructural dentro de lo especificado en el

INVIAS. Los autores mencionan que la clasificación de las vías terciarias a intervenir en Colombia se realiza con base en las políticas económicas y sociales de los programas de gobierno local y de cada entidad territorial. sugieren la aplicación de la metodología DAO que involucra no solo el tránsito, sino todos los elementos ambientales, económicos técnicos y sociales. Evidencian que la solución de mejoramiento de vías terciarias más utilizada en la actualidad es la construcción de placa. Las intervenciones de vías terciarias aportan ventajas como: el aumento de la capacidad portante y la resistencia a la compresión en los suelos. Incremento de la densidad e impermeabilidad del material tratado. La reducción de los esfuerzos e incremento de la respuesta a la compactación. Mejora en la tracción vehicular, mínima producción de contaminación ambiental, reducción del deterioro ecológico y protección del medio ambiente, reducción del polvo, aumento la vida útil de las vías y de las obras civiles [22]

Lorenzo Ainhoa Landaverde de España presenta un estudio del estado de conocimiento relacionado con la reutilización de las escorias de acería eléctrica en hormigones compactados a rodillo, desde el punto de vista del comportamiento mecánico y la durabilidad afirmando la viabilidad del uso de la escoria negra como aditivo ya que puede proporcionar mezclas hidráulicas con excelente calidad para aplicaciones siendo químicamente compatibles con los demás compuestos.[51]

Patricia Astorgano de España para su trabajo de fin de Master analiza las posibilidades de valorización de la escoria negra de horno de arco eléctrico en su país evitando así su disposición en vertederos, Sugiere apoyo gubernamental para solucionar esta problemática. De acuerdo a laboratorios y centros de investigación, como el CEDEX o CICEnergyGune, se ha determinado que la escoria es una materia prima con excelentes propiedades tanto físicas y térmicas, como de durabilidad. En el sector de la construcción del país vasco se decretó el ampliamiento de las unidades de obra en las que se permite utilizar el árido siderúrgico y define las condiciones que este debe cumplir, en materia de expansividad, granulometría, lixiviación, etc. Esta normativa abre un gran abanico de posibilidades de utilización de la escoria en el sector de la construcción facilitando su uso debido a que, a través de un marco normativo claro, disipa la gran incertidumbre que se percibía en el sector en torno a las condiciones que el árido debe cumplir, así como, al comportamiento del árido con el paso del tiempo.[5]

Anthony Enrique Corcuera Sigüenza de Perú propone en su tesis el uso de la eco gravilla de escoria de acero como agregado grueso en la elaboración de estructuras de concretos. La manera en que se utilizó la eco gravilla en este trabajo fue a través de la sustitución de la piedra en diferentes porcentajes. Luego se analizó el impacto en su resistencia a la compresión y penetración de agua bajo presión para medir su permeabilidad. Los resultados obtenidos para los concretos estudiados muestran que hasta un porcentaje de sustitución del 50% de eco gravilla por piedra, la resistencia a la compresión se incrementa, así como su impermeabilidad. Cuando el porcentaje de sustitución es del 65%, la resistencia e impermeabilidad se reduce. [25]

Ana Méndez Piña de España presenta un proyecto en el cual definió y demostró el uso de escorias como sustituto de áridos, estos generan ahorros ambientales al remplazar áridos naturales provenientes de la explotación minera como lo son la gravilla y el granito. Se le exige las mismas condiciones que al árido natural (incluso más restrictivas porque se les exige condiciones sobre su posible expansividad y composición) no contienen arcillas ni componentes orgánicos. El tratamiento para el uso de la escoria (machaqueo y trituración), debido a la gran dureza del material siderúrgico (mayor que para el material convencional). Aunque su posible uso está demostrado por distintos estudios de investigación desde hace años, por algunos motivos no interesa su valoración (para seguir explotando canteras). La autora afirma que hay conocimiento sobre la recuperación o valorización de materias y se ofrecen tecnologías de probada viabilidad técnica, pero el precio actual de su gestión o la ausencia de empresas que lleven a la práctica otras soluciones, impide que los residuos sean valorizados en vez de acabar en vertederos.[57]

Ilich Figueroa y Carlos Mamani de Perú presentan una investigación sobre las escorias negras (EAFS) obtenidas a partir de la industria siderúrgica, como residuos, para su uso como material de agregado en capas de afirmado, así como el diseño de esta. El autor avala su hipótesis y afirma frente a una problemática encontrada que si bien las escorias presentan valores ligeramente superiores a los rangos admisibles para suelos agrícolas, con respecto a las cantidades de cromo y cobre, estas pueden ser mitigadas mediante la fitorremediación, lo que hace viable su uso.[36]

El Ingeniero Héctor Mauricio Sánchez Abril de Colombia presenta un estado del arte del estudio de escorias negras de horno de arco eléctrico con fines de uso en la construcción y especialmente en los pavimentos viales. En su análisis de resultados a partir de ensayos de laboratorio y pruebas realizadas para diferentes dosificaciones de ENHAE para capas granulares y asfálticas de pavimentos y más de treinta referencias relacionadas con la optimización del uso de escorias negras colombianas en pavimentos. El autor afirma que muchas de estas escorias negras pueden tener algo de potencial expansivo lo que debe llevar a quienes las usen a generar procesos para el control de la misma, ya que de no hacerlo esto sería desfavorable para el caso de la estabilidad de suelos y estructuras de pavimentos. Las escorias negras poseen buenas propiedades de resistencia al desgaste por abrasión (inferior al 35%) y CBR superiores al 100%. El autor ratifica la viabilidad sobre la adición de escorias negras de horno de arco eléctrico en mezclas de concreto hidráulico para pavimentos puesto que según el sistema de clasificación unificado de suelos UCSC la escoria negra se considera una Grava mal gradada (GP) [76]

Tecnalia presenta un estudio diagnostico en donde se identifican los elementos críticos frente a los cuales se establecen las principales limitaciones y oportunidades para mejorar la eficiencia en el uso de materiales y productos en el sector de la manufactura y el sector de la construcción en el contexto de la economía Circular. Desde aspectos (normativos, institucionales, técnicos, de mercado, financieros, ambientales y socio-culturales (P.106), indicando que en la producción del acero la escoria negra o de fusión se produce en una proporción que oscila entre 85 y 150 kg/tonelada de acero, en función de la calidad de la chatarra (P.106).[84]

Israel Sosa Yépez presenta una investigación enfocada en la fabricación de hormigones autocompactantes de elevada resistencia y baja permeabilidad mediante la incorporación de escorias de horno eléctrico como árido grueso y fino. El autor español afirma que las escorias siderúrgicas son materiales perfectamente útiles en la construcción y que el elevado potencial que aportan las escorias ha superado el comportamiento mecánico de algunos componentes de origen natural. España cuenta con legislaciones autonómicas que admiten el uso de este residuo en capas granulares de carreteras y mezclas bituminosas, así como, también, en la fabricación de hormigones convencionales. El resultado del estudio permite comprobar que se pueden elaborar hormigones fluidos, estables y de altas prestaciones, con escorias siderúrgicas. su incorporación eleva

notablemente la resistencia a compresión, así como, también, la densidad del material pétreo, aunque los indicadores de durabilidad se ven ligeramente reducidos tras la incorporación de las escorias. [80]

H. Rondón, W. Fernández, D. Patiño, J. Ruge, H. Vacca y F. Reyes presentan un estudio en donde evalúan el potencial de uso de una escoria de alto horno (BFS) como material de conformación de capas granulares no tratadas en pavimentos (base, subbase y afirmado), y como agregado pétreo en la fabricación de mezclas asfálticas. Para tal fin, fueron ejecutados sobre la BFS, ensayos de caracterización, difractometría de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX) e imagenología en un microscopio electrónico de barrido (MEB). Como conclusión general se reporta que la BFS puede ser utilizada en la conformación de capas granulares no tratadas de subbase y como material para base granular, el autor recomienda su uso en vías con bajos volúmenes de tráfico y como material de afirmado, en vías terciarias que soporten tráfico liviano.[43]

Oscar Rodrigo Godoy Fernández de Guatemala presenta un trabajo en donde realizó una revisión bibliográfica de investigaciones enfocadas en la descripción y evaluación de materiales puzolánicos al constituir las principales adiciones empleadas para la elaboración de cementos mezclados hidráulicos caracterizados por una mayor resistencia al ataque de agentes agresivos. El autor afirma que Los cementos mezclados hidráulicos optimizan la trabajabilidad de las mezclas que posteriormente desarrollan un menor calor de hidratación determinante para la minimización de agrietamientos. [38]

José Antonio de la Fuente Alonso presenta una investigación de tesis doctoral en donde desarrolla un estudio experimental para la obtención de hormigones destinados a pavimentos y/o soleras utilizando como áridos los residuos generados en la fabricación de acero en hornos eléctricos de arco, escoria negra EAF como sustitución de los áridos naturales en un 75%, con aporte de fibras metálicas o sintéticas que sirvan de refuerzo y mejoren sus propiedades mecánicas. El autor caracterizo el hormigón en estado fresco y endurecido, determinando sus propiedades físicas, mecánicas y micro estructurales, así como sus características de resistencia al impacto, abrasión, tenacidad y módulo elástico, posteriormente estudio los efectos del envejecimiento acelerado en el mismo, la durabilidad y comportamiento frente a ciclos de hielo-deshielo,

humedad-sequedad, estabilidad frente a los sulfatos, resistencia al CO2 en cámara estanca y atmósferas industriales. demostrando así la factibilidad que tienen dichos hormigones al presentar mayores resistencias tanto a corto como a medio y a largo plazo que los hormigones convencionales.[28]

Carmen Jacqueline Cuásquer y Santiago Altamirano de Ecuador presentan el estudio de un árido fino natural destinado a la producción de hormigón hidráulico con excelentes resultados; los autores señalan que el hormigón producido con escoria de acero sería bastante útil para la fundición de todo tipo de cimentaciones y losas sobre piso debido a que es 1.37 veces más pesado que un agregado fino de origen natural. El hormigón hidráulico con escoria de acero realizado en este proyecto presenta un incremento del 33.17% en la resistencia a la compresión, 26.77% en la resistencia a la flexión, 26.87% en el módulo de elasticidad, 39.72% en la resistencia a la tracción; todo esto en comparación con el hormigón hidráulico elaborado con materiales convencionales. La escoria de acero es porosa y debido a esto el hormigón con escoria de acero requiere de una cantidad un poco menor de agua de mezcla que el hormigón convencional, los autores afirman que La escoria de acero sí puede sustituir al agregado fino en la producción de hormigón hidráulico puesto que cumple con los parámetros para árido fino establecidas en las normas INEN y NEVI-12. [27]

En el documento denominado escoria para agregados de concreto, una solución sólida (2014) publicado por la Universidad industrial de Santander (UIS), se sustenta la viabilidad en la adición de escoria negra para agregados de concreto en proyectos de ingeniería con enfoque de desarrollo sostenible. Afirman que una propiedad muy interesante es que la escoria por sí misma tiene propiedades cementantes; es decir, la sola escoria, si se pule muy fina, se le pone un poco de arena y agua, endurece porque tiene esa propiedad de cohesión; eso indica que la escoria pulida podría reemplazar parte del cemento que se utilice en la mezcla.[34]

María Alejandra Sanabria Ramírez autora de la “Propuesta de mejora para el proceso productivo de la empresa cementos Tequendama (2018)” evaluó la adaptación del plan de gestión sostenible de la empresa por medio del diagnóstico para mejorar la producción del cemento manteniendo su calidad y reduciendo el impacto ambiental propio de su fabricación, la autora afirma la viabilidad de implementar la escoria negra de alto horno como aditivo en la fabricación

de cemento, pulverizándola y remplazando en un porcentaje determinado el Clinker sin perder las propiedades del cemento, además es necesario la adición de una o más formas de sulfato de calcio según la NTC 31[75]

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con la adición de GCR o escoria negra en mezclas de concreto hidráulico se garantiza un beneficio de tipo ambiental al reducir las emisiones contaminantes propias de la incorrecta disposición final de estos materiales, adicional a esto en la construcción de placas huellas la implementación de estos agregados estudiados en las mezclas de concreto supone ventajas de tipo físico y mecánico como; estabilidad marshall y cociente Marshall; peso del material antes y después de introducir al horno, asentamiento del concreto, densidad, contenido de aire, rendimiento volumétrico, compresión, ensayo de permeabilidad, absorción de agua y densidad ; que prolongan la vida útil del diseño; no obstante existen desventajas al usar GCR con tamaños de grano muy grueso mayores a 0.60 mm. (Orobio, & Mosquera,2016, p.60) [61][63][73][76][62]

El porcentaje óptimo de caucho reciclado para lograr la resistencia máxima a la compresión del concreto (218.452 Kg/cm2) es del 5%, a los 28 días [55]

La naturaleza expansiva de la escoria negra requiere un análisis previo de comportamiento en la mezcla para evitar reacciones desfavorables.[63]

La arena es usada como agregado fino en la fabricación de mezclas de concreto y tiene un precio comercial inferior al grano de caucho reciclado (GCR), este factor representaría una limitante en la viabilidad de implementar el agregado en proyectos viales con placa huellas pese a los beneficios propios a su efecto impermeabilizante, elástico, aislante de temperatura, resistente a los ácidos y liviano al ser adicionado en mezclas de concreto hidráulico, sin embargo, esto último se compensa con el presunto ahorro a largo plazo producido por la disminución en los mantenimientos necesarios de la placa huella a lo largo del periodo de diseño estimado en 20 años según regido normas INVIAS 2017 [47]

En los estudios recopilados se analizaron diferentes tamaños granulométricos y porcentajes de sustitución por agregados finos, tanto para las escorias negras como para el grano de caucho reciclado (GCR), determinando que la sustitución es óptima en un porcentaje de 5% y 11% [76] [86] [62] respectivamente como se observó el diagrama 12 para GCR

De acuerdo a la investigación realizada en términos de sostenibilidad y calidad el uso de las escorias negras o el grano de caucho reciclado (GCR) como agregados en mezclas de concreto hidráulico para la elaboración de placa huellas dispuestas en vías con bajos volúmenes es una propuesta viable, no obstante, se recomienda realizar estudios para poder evaluar el comportamiento de este diseño de pavimento en un periodo de tiempo prolongado, que los autores citados o referenciado, han estado todos de acuerdo que la ENHAE no es tóxico y con respecto a GCR utiliza como materia prima un producto que a pesar de tener numerosas opciones en el reciclaje, hasta el momento sigue siendo un problema ambiental significativo [67]

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este proyecto se realizó como iniciativa de investigación sobre el uso de neumáticos fuera de uso y la escoria negra proveniente de la fabricación del acero como agregados en mezclas de concreto hidráulico utilizadas para la fabricación del acero, motivados por los beneficios de tipo ambiental físico y mecánico que supone su implementación en placa huellas para vías terciarias de Colombia.

Las placas huellas mejoran la comunicación en vías terciarias correspondiente al 63% de la totalidad de la red vial nacional cuyo diseño y proceso constructivo se ven regidos en Colombia bajo la norma INVIAS, lo cual garantiza un periodo de duración de 20 años como mínimo.

Con esta investigación se infiere la viabilidad del uso de los aditivos analizados en pavimentos elaborados con placa huellas, adicional a esto se recomienda la implementación de obras complementarias de drenaje y obras de mitigación de riesgos como la estabilización de taludes o muros de contención.

Se obtienen mejores resultados en la sustitución de agregados finos por GCR o escoria negra, que dicha sustitución en agregados gruesos.

- Se recomienda se realicen estudios de factibilidad económica en cuanto a la adición de GCR o escoria negra en mezclas de concreto hidráulico utilizadas para la elaboración de placa huellas.

Este proyecto se realizó como iniciativa de investigación en el uso y el beneficio que genera el reciclaje de diferentes polímeros, en este caso, el grano de caucho reciclado (GCR) o la escoria negra, se busca motivar a los futuros ingenieros a seguir investigando sobre el uso de estos aditivos en la elaboración de mezclas utilizadas para la construcción de placa huella.

9. REFERENCIAS

[1]. ALES YOVANI, M. (2018). SUPERVISIÓN A LA CONSTRUCCIÓN DE PLACA HUELLA Y OBRAS DE DRENAJE VIAL, MUNICIPIO DE TOGÜÍ. Obtenido de: https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/3100/1/TGT_1661.pdf

[2]. ALFARO CURITUMAY, G. N., & CAHUANA VALENZUELA, R. (2018). "ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO 210kg/cm2, CON GRANULADO DE CAUCHO RECICLADO EN REMPLAZO PARCIAL DEL AGREGADO FINO DE CUNYAC''. Perú.

[3]. Andes, U. d. (23 de septiembre de 2002). ESTUDIO DE LAS MEJORAS MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON DESECHOS DE LLANTAS. Obtenido de ESTUDIO DE LAS MEJORAS MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON DESECHOS DE LLANTAS: https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras_mecanicas_mezclas_asfalticas_desechos_llantas.pdf

[4]. ARIAS ALVARADO, J. F., FLOREZ PEREZ, G., & ROJAS CARREÑO, W. A. (2014). *VIABILIDAD TÉCNICA DE UN DISEÑO DE MEZCLA PARA LA ELABORACIÓN DE ASFALTOS MODIFICADOS CON LLANTAS RECICLABLES.* Obtenido de https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/4788/1/2014_viabilidad_tecnica_dise%C3%B1o.pdf

[5]. Artículo Planta trituradores de llantas. (12 de marzo de 2016). Obtenido de Gercons Colombia-Productos plantas trituradoras de llantas: http://www.gerconscolombia.com/index.php/productos/plantas-trirutadoras-de-llantas

[6]. Astorgano, Rodera, Patricia. (31 de agosto de 2020). *ANÁLISIS DE LAS POSIBILIDADES DE VALORIZACIÓN DE LA ESCORIA NEGRA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EN LA COMUNIDAD AUTÓNOMA DEL PAÍS VASCO.* Obtenido de PDF: https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/46920/TFM_PatriciaAstorgano.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[7]. Asmar Soto, S. (17 de 08 de 2020). *Producción de acero en Colombia se estabilizó en 65.000 toneladas al mes, según Camacero*. Obtenido de la republica: https://www.larepublica.co/infraestructura/produccion-de-acero-en-colombia-se-estabilizo-en-65000-toneladas-al-mes-3042245

[8]. AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES, 0 0 7 2 - 1 6 (EL DIRECTOR DE LA AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES - ANLA 28 de abril de 2016).

[9]. AVILA, L. R. (octubre de 2008). MÉTODO CONSTRUCTIVO DE LOSAS CORTAS EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO. Obtenido de: https://core.ac.uk/download/pdf/45359339.pdf

[10]. BARRA BIZINOTTO, M., & ROYANO GARCIA, V. (2016). ESTUDIO DE PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DEL HORMIGÓN CON CAUCHO. Barcelona, Cataluña, España.

[11]. Bogotá. (2012). *Llantas y asfaltos reciclados para pavimentar a Bogotá:Apuesta ambiental del IDU a partir de 2012.* Obtenido de https://calidad.idu.gov.co/web/content/3711/info_pavimentos_amigables_05jun12.pdf

[12]. Bogotá, A. (s.f.). *MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE CON ASFALTOS MODIFICADOS CON CAUCHO.* Obtenido de SECCIÓN:560-11: https://www.idu.gov.co/web/content/7632/560-11.pdf

[13]. Boza Regueira, M. (2011). Utilización de las escorias de acería. Obtenido de http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revista_estudiantil/article/download/536/294

[14]. C. Albano, N. C. (2008). ESTUDIO DE CONCRETO ELABORADO CON CAUCHO DE RECICLADO DE DIFERENTES TAMAÑOS DE PARTÍCULAS. Obtenido de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652008000100005

[15]. Bucaramanga, P. A. (2018). ALCALDÍA DE BUCARAMANGA CONSTRUYE PLACAS HUELLAS. Obtenido de https://www.youtube.com/watch?v=i2W29YW_zbE

[16]. CARDONA URRUTIA, P. (2016). ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA CREACIÓN DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE GRANOS DE CAUCHO (GCR) MEDIANTE EL RECICLAJE DE LLANTAS FUERA DE USO. PEREIRA, RISARALDA, Colombia.

[17]. Carolina Alzate, D., Alexander García, J., & Gelacio, E. (2019). Estudio de Viabilidad para la Creación de una Empresa Transformadora de Llantas en Pereira. Pereira, Colombia.

[18]. CARREÑO, O. E., & CHAUZA OSPINA, E. F. (2020). PROPUESTA DE DISEÑO GEOMETRICO TIPO PLACA HUELLA PARA VIA TERCIARIA EN LA VEREDA EL HOSPICIO DEL MUNICIPIO DE LA MESA CUNDINAMARCA. BOGOTÁ, Cundinamarca, Colombia.

[19]. CASTRO, G. (diciembre de 2008). MATERIALES Y COMPUESTOS PARA LA INDUSTRIA DEL NEUMATICO (DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA y MECÁNICA F.I.U.B.A). Obtenido de: https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Materiales_y_Compuestos_para_la_Industria_del_Neumatico.pdf MATERIALES Y COMPUESTOS PARA LA INDUSTRIA DEL NEUMATICO

[20]. CEBALLOS GALARZA, G. R. (2016). ANÁLISIS DEL PROCESO DE CREACIÓN DE CARRETERAS A PARTIR DE CAUCHO RECICLADO, CON LA FINALIDAD DE REDUCIR EL IMPACTO AMBIENTAL EN EL ECUADOR PARA EL AÑO 2015. Obtenido de https://docplayer.es/97213162-Analisis-del-proceso-de-creacion-de-carreteras.html

[21]. Chávarri Cueva, L. A., & Falen Solis, J. A. (05 de marzo de 2020). Propuesta de concreto eco-sostenible con la. Lima, Perú, Perú. Obtenido de https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Materiales_y_Compuestos_para_la_Industria_del_Neumatico.pdf

[22]. CHAVARRO ACUÑA, W. (2015). EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE PAVIMENTACIÓN PARA VÍAS DE BAJOS. Obtenido de https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2617/1/Evaluaci%C3%B3n-alternativas-pavimentaci%C3%B3n-v%C3%ADas-bajos-vol%C3%BAmenes-de-tr%C3%A1nsito.pdf

[23]. CHOU, C. J. (s.f.). ELABORACION DE UN MODELO ESTOCASTICO PARA DETERMINAR EL PLAZO OPTIMO DE FRAGUADO EN LA REPARACION DE PLACAS DE HORMIGON. Obtenido de trid.trb.org: https://trid.trb.org/view.aspx?id=1004821

[24]. CONTRERAS GONZALEZ, F. A., & MUÑOZ HERNANDEZ, J. C. (s.f.). PLACA HUELLAS PARA RED TERCIARIA UN ACERCAMIENTO PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN. Obtenido de https://1library.co/document/z1d0ge3z-placa-huellas-red-terciaria-acercamiento-diseno-construccion.html o https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/4974/ContrerasGonzalezFelixAndr%c3%a9s2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[25]. Corcuera Sigüenza, A. E., & Vela Fernandez, J. R. (2018). IMPACTO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y PERMEABILIDAD DEL CONCRETO A PARTIR DE LA SUSTITUCIÓN DE LA PIEDRA POR ECOGRAVILLA DE ESCORIA DE ACERO, TRUJILLO. Obtenido de https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/13755

[26]. CORREA VALDERRAMA, E. (2017). EL ROL DE LAS VÍAS TERCIARIAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN NUEVO PAÍS. Obtenido de: https://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista/article/view/943

[27]. CUÁSQUER GONZÁLEZ, C. J., & ALTAMIRANO PROAÑO, S. I. (2015). *EVALUACIÓN DEL USO DE ESCORIAS DE ACERO EN LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN*. Obtenido de http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/11352/1/T-ESPE-048972.pdf o http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/11352

[28]. de la Fuente Alonso, J. (2015). Comportamiento del hormigón con áridos siderúrgicos (EAF) reforzado con fibras. Obtenido de https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=122872

[29]. DELARZE DÍAZ, P. A. (2008). RECICLAJE DE NEUMÁTICOS Y SU APLICACIÓN. VALDIVIA, Valdivia, CHILE.

[30]. Desconocido. (12 de septiembre de 2017). PARA LAS LLANTAS USADAS SÍ HAY UNA VIDA DESPUÉS DE LA MUERTE. Ambiente Bogotá, https://oab.ambientebogota.gov.co/para-las-llantas-usadas-si-hay-una-vida-despues-de-la-muerte/. Obtenido de Ambiente Bogotá: https://oab.ambientebogota.gov.co/para-las-llantas-usadas-si-hay-una-vida-despues-de-la-muerte/

[31]. DIAZ CLAROS, C. M., & CASTRO CELIS, L. C. (2017). *IMPLEMENTACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR) PROVENIENTE DE LLANTAS USADAS PARA MEJORAR LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS Y GARANTIZAR PAVIMENTOS SOSTENIBLES EN BOGOTÁ (UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS).* Obtenido de: https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2633/Diazcesar2017.pdf

[32]. EL GRÁNULO DE CAUCHO RECICLADO (GCR) PROVENIENTE DE LAS LLANTAS USADAS, SERÁ UTILIZADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE VÍAS EN EL TERRITORIO NACIONAL. (10 de 06 de 2015). Obtenido de minambiente: https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias-asuntos-ambientales/1847-el-granulo-de-caucho-reciclado-gcr-proveniente-de-las-llantas-usadas-sera-utilizado-en-la-construccion-de-vias-en-el-territorio-nacional

[33]. ELABORACIÓN DE UN MODELO ESTOCÁSTICO PARA DETERMINAR EL PLAZO ÓPTIMO DE FRAGUADO EN LA REPARACIÓN DE PLACAS DE HORMIGON. (s.f.). Obtenido de https://trid.trb.org/view/1004821

[34]. ESCORIA PARA AGREGADOS DE CONCRETO, UNA SOLUCIÓN SÓLIDA. (2014). Obtenido de https://www.uis.edu.co/webUIS/es/investigacionExtension/nuestrosResultados/documentos/3escoriaAgregadosConcreto.pdf

[35]. FICHA TÉCNICA: ESCORIAS DE ACERÍAS DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO. (2013). Obtenido de http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/22980D5E-377B-4697-AEFE-CE897A68963D/119858/ESCORIASDEACERIADEHORNODEARCOELECTRICO.pdf

[36]. Figueroa Chavez, I. D., & Mamani Quinto, C. C. (01 de 2019). DISEÑO DE CARRETERAS AFIRMADAS EN BASE A ESCORIAS NEGRAS, PROVENIENTES DE LA PLANTA DE ACEROS AREQUIPA DE PISCO, PARA ZONAS RURALES. Obtenido de https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/625099

[37]. FONSECA PERALTA, E. N., & GONZÁLEZ PERDOMO, Y. L. (2016). ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CAUCHO VULCANIZADO PARA UTILIZARLO COMO MATERIAL DE SELLO EN JUNTAS DE PAVIMENTOS RÍGIDOS Y COMPARARLO CON LAS PROPIEDADES DE LOS SELLOS CONVENCIONALES. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.

[38]. Godoy Fernández, O. R. (09 de 2006). DESARROLLO Y APLICACIONES DE LOS CEMENTOS MEZCLADOS HIDRÁULICOS. Obtenido de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2698_C.pdf

[39]. GÓMEZ E, L. (17 de enero de 2016). Comienza era de vías que se harán con llantas usadas. Tiempo, págs. https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16483926?fbclid=IwAR1Hwwdj6BWdS8Z5Ln2JAEI1FY7sYiS8S-ZMf4cDHNhK5p5bOHgMTFxGUd4.

[40]. González Quiñonez, J. G. (2017). UTILIZACIÓN DE GRANULADO DE CAUCHO RECICLADO COMO ADICIÓN PARA CONCRETO PERMEABLE PARA USO EN ESTACIONAMIENTOS VEHICULARES. Guatemala, México, México.

[41]. GUEVARA, C. (28 de febrero de 2015). Cada día más de 2.050 llantas terminan invadiendo el espacio público. Obtenido de Tiempo: https://www.eltiempo.com/archivo/documento/:~:text=Cada%20d%C3%ADa%20m%C3%A1s%20de%202.050%20llantas%20terminan%20invadiendo%20el%20espacio%20p%C3%BAblico,-Terminan%20en%20andenes&text=La%20situaci%C3%B3n%20es%20cada%20vez,incluso%20frente%20a%20las%20cas

[42]. GUZMÁN ROJAS, Y. Y., & GUZMÁN ROJAS, L. E. (2015). SUSTITUCIÓN DE LOS ÁRIDOS POR FIBRAS DE CAUCHO DE NEUMÁTICOS RECICLADOS EN LA ELABORACIÓN DE CONCRETO ESTRUCTURAL EN CHIMBOTE. NUEVO CHIMBOTE, PERÚ

[43]. H. Rondón Quintana, J.C. Ruge Cárdenas, D. Patiño Sánchez, H. Vacca Gamez, F. Reyes Lizcano, & W. Fernández Gómez. (04 de 2018). CARACTERIZACIÓN DE UNA ESCORIA DE ALTO HORNO PARA PROYECTOS VIALES. Obtenido de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732018000100083

[44]. HERRERA OLIVERA, D. C., & BARRETO HERRERA, K. N. (2019). ANÁLISIS DE LOS PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS DE LOSAS DE PAVIMENTOS DE JPCP Y JRCP MEDIANTE CONCRETO HIDRÁULICO EXTRUIDO. Obtenido de: http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/5691/MONOGRAFIA%20DIANA%20HERRERA%20Y%20KEVIN%20BARRETO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[45]. Higuera Sandoval, C. H. (2009). Análisis de sensibilidad de las variables que influyen en los esfuerzos de alabeo por temperatura en losas de concreto hidráulico. Obtenido de primo: https://primo-tc-na01.hosted.exlibrisgroup.com/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_doaj_soai_doaj_org_article_f49055b5703845d79595e8762bbf31b6&context=PC&vid=UDISTRITAL&lang=es_CL&search_scope=udis_completo&adaptor=primo_central_multiple_fe&tab=udis_tab&qu

[46]. Hilal Farhan, A. (2016). Characterization of Rubberized Cement-Stabilized Roadbase Mixtures. Obtenido de: https://core.ac.uk/download/pdf/76970703.pdf

[47]. INVIAS. (octubre de 2017). Guía de Diseño de Pavimentos con Placa-huella. Obtenido de INVIAS: https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/6644-guia-de-disenoo-de-pavimentos-con-placa-huella

[48]. INVÍAS concluye obras en sitios críticos de corredores viales en los departamentos de Cauca y Cundinamarca. (10 de Abril de 2020). Obtenido de https://www.invias.gov.co/index.php/sala/noticias/3776-invias-concluye-obras-en-sitios-criticos-de-corredores-viales-en-los-departamentos-de-cauca-y-cundinamarca

[49]. JAIMES GUARÍN, J. P. (2014). ANÁLISIS DE LA CONSERVACIÓN DE LA RED VIAL TERCIARIA DEL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ EN LA ACTUALIDAD. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.

[50]. JIMENEZ HERRAN, O. S., & PERDOMO ROJAS, L. A. (2018). ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA COMPRA Y OPERACIÓN DE UNA MAQUINARIA PARA LA PULVERIZACION DE LLANTAS USADAS EN LA CIUDAD DE GIRARDOT. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.

[51]. LANDABEREA LORENZO, A. (02 de 2018). ESTADO DEL CONOCIMIENTO SOBRE LA VIABILIDAD DEL USO DE ESCORIAS DE ACERÍA ELÉCTRICA EN HORMIGONES COMPACTADOS A RODILLO. Obtenido de https://www.ehu.eus/documents/5414097/5665133/2018_TFM_AinhoaLandaberea/6ebae8cf-5910-877f-9977-48a68f64ea15

[52]. LEDEZMA CHUMBES, F., & YAURI HUIZA, W. (2018). DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO PARA ELABORACIÓN DE ADOQUINES CON MATERIAL RECICLADO DE NEUMÁTICOS EN LA PROVINCIA DE HUANCAVELICA. LIRCAY, LIRCAY – HUANCAVELICA, Perú.

[53]. LIZ DIAZ, E., & RUGELES ROSARIO, N. (2018). CARTILLA DE PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS EN INFRAESTRUCTURA VÍAL PARA PLACAS HUELLA DE CONCRETO HIDRAÚLICO EN EL CERRO EL ARBOLITO. Obtenido de: http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/5721/Placa%20Huella%20-%20Arbolito%20Final%20final.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[54]. LÓPEZ GONZÁLEZ, A., & PINEDA SANTANDER, S. (2017). DISEÑO DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN BASADO EN LA TRITURACIÓN MECÁNICA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS LLANTAS FUERA DE USO EN SANTIAGO DE CALI. Obtenido de: file:///D:/ciro%20romero/DOCUMENTOS/U/US/11%20S/4.0.0.0/45%20Dise%C3%B1o_proceso_produccion-unprotected.pdf

[55]. M., F., & E., L. (mayo de 2018). Caucho reciclado en la resistencia a la compresión y flexión de concreto modificado con aditivo plastificante. Obtenido de scielo Conicyt PDF: https://scielo.conicyt.cl/pdf/ric/v33n3/0718-5073-ric-33-03-241.pdf

[56]. mayper. (2020). mayper.es. Obtenido de mayper: https://www.mayper.es/molino-micronizador/

[57]. MÉNDEZ PIÑA, A. (2010-2011). PROYECTO SOBRE RESIDUOS: UTILIZACIÓN DE ESCORIAS COMO SUSTITUTOS DE ÁRIDOS. Obtenido de https://www.eoi.es/es/file/16052/download?token=IUlvu2yy

[58]. Ninabanda Cango, Bryan Ernesto, Morales Muñoz, Byron Omar, & Santamaría Jerez, Karina Lorena. (29 de 08 de 2017). DISEÑO DE HORMIGÓN RÍGIDO DE ALTA RESISTENCIA UTILIZANDO ESCORIA DE ACERO PARA LA APLICACIÓN EN PAVIMENTO DE CONCRETO. Obtenido de DISEÑO DE HORMIGÓN RÍGIDO DE ALTA RESISTENCIA UTILIZANDO ESCORIA DE ACERO PARA LA APLICACIÓN EN PAVIMENTO DE CONCRETO

[59]. NOVA MUÑOZ, M. A., & RIVERA TORRES, A. M. (2016). PLAN DE NEGOCIOS ECOLLANTAS DEL LLANO S.A.S. Villavicencio, Meta, Colombia.

[60]. Orobio, A., & Orobio, J. C. (13 de junio de 2016). PAVIMENTOS CON PLACA-HUELLA DE CONCRETO SIMPLE: ANÁLISIS CON ELEMENTOS FINITOS 3D. Obtenido de: https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/55350

[61]. Orobio, A., Orobio, J. C., & Mosquera, J. M. (29 de 01 de 2016). Recomendaciones de diseño y construcción de pavimentos en placa-huella de concreto reforzado. Obtenido de: https://pdfs.semanticscholar.org/cd41/963291a7329e4f31a521582acef4777cb5df.pdf?_ga=2.248029127.1171509223.1604711732-614483490.1604711732

[62]. Pacheco González, L. F., & Moreno Cárdenas, B. G. (1 de 1 de 2018). ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN ADOQUINES DE CONCRETO HIDRÁULICO CON SUSTITUCIÓN DE AGREGADO FINO POR GRANO DE CAUCHO RECICLADO EN LOS TAMICES N°8 AL N°20 (2.36MM-0,85MM) Y ADICIÓN DE POLVO FINO DE MICROSÍLICE. Obtenido de ciencia. Lasalle: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1361&context=ing_civil

[63]. Parra Araque, L., & Sánchez García, D. (2010). ANÁLISIS DE LA VALORIZACIÓN DE ESCORIAS NEGRAS COMO MATERIAL AGREGADO PARA CONCRETO EN EL MARCO DE LA GESTIÓN AMBIENTAL DE LA SIDERÚRGICA DIACO. MUNICIPIO TUTA BOYACÁ. Obtenido de https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1024&context=ing_ambiental_sanitaria

[64]. Patiño, L. V., & Rodríguez Ramos, M. A. (2017). LLANTAS USADAS MATERIA PRIMA PARA PAVIMENTOS Y MÚLTIPLES RECOAPLICACIONES. Facultad de Ingeniería-Universidad EAN, 114.

[65]. Peláez Arroyave, G. J., Velásquez Restrepo, S. M., & Giraldo Vásquez, D. H. (14 de febrero de 2017). APLICACIONES DE CAUCHO RECICLADO: UNA REVISIÓN DE LA LITERATURA. Obtenido de: http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v27n2/0124-8170-cein-27-02-00027.pdf & https://www.redalyc.org/jatsRepo/911/91150559002/html/index.html

[66]. Peñaloza Garzón, C. R., & Moreno Barreto, R. (2015). COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNA MEZCLA PARA CONCRETO CON SUSTITUCIONES DEL 10% Y EL 30% DE ARENA CON CAUCHO GRANULADO. Obtenido de: https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2501/3/Art.Comportamiento%20mec%C3%A1nico%20de%20una%20mezcla%20para%20concreto%20con%20sustituciones%20del%2010%25%20y%20el%2030%25%20de%20are.pdf

[67]. PÉREZ OYOLA, J. C., & ARRIETA BALLÉN, Y. L. (2017). ESTUDIO PARA CARACTERIZAR UNA MEZCLA DE CONCRETO CON CAUCHO RECICLADO EN UN 5% EN PESO COMPARADO CON UNA MEZCLA DE CONCRETO TRADICIONAL DE 3500 PSI (2017). Obtenido de: https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15486/1/Tesis.pdf

[68]. PILLPA ESCOBAR, U. (2014). ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UNA PAVIMENTACIÓN CON CONCRETO HIDRÁULICO Y UNA PAVIMENTACIÓN CON PIEDRA LAJA EMBOQUILLADO CON CONCRETO EN LA ZONA URBANA DE LIRCAY. Obtenido de: http://repositorio.unh.edu.pe/bitstream/handle/UNH/250/TP%20-%20UNH%20CIVIL%200033.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[69]. Pompeyo, M. (2013). COMPORTAMIENTO CIENTÍFICO TÉCNICO DEL CEMENTO PORTLAND I-R ELABORADO CON ESCORIA NEGRA DE ACERO TIPO VESICULAR PROVENIENTE DE LA SIDERÚRGICA DEL ORINOCO ALFREDO MANEIRO "SIDOR". Obtenido de https://materialesalternativos.weebly.com/uploads/2/0/6/2/20628570/6._escoria_negra_sidor-150pp.pdf

[70]. RAMÍREZ VILLAMIZAR, A., LADINO RUBIO, I., & ROSAS RAMÍREZ, J. (12 de 2019). MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE CON ASFALTOS MODIFICADOS CON CAUCHO POR VÍA HÚMEDA. Obtenido de https://www.idu.gov.co/Archivos_Portal/Transparencia/Informacion%20de%20interes/SIIPVIALES/Innovaci%C3%B3n/Portafolio/2020/ET-IC-01-Especificaciones-tecnicas-generales/625-18%20MEZCLA%20ASF%C3%81LTICA%20EN%20CALIENTE%20CON%20ASFALTO%20MODIFICADO%20CON%20C

[71]. RAMOS ROJAS, N., & VALENCIA ERAZO HERWIN. (2015). Estudio del comportamiento mecánico del concreto, sustituyendo parcialmente el agregado fino por caucho molido recubierto con polvo calcáreo. Obtenido de Trabajo de grado. Ingeniería Civil e Industrial Santiago de Cali. Pontificia Universidad Javeriana. Departamento de Ingeniarías: http://vitela.javerianacali.edu.co/bitstream/handle/11522/3431/Estudio_comportamiento_mecanico.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[72]. Ricardo, D. (2015). Evaluación del uso de escorias de acero en la producción de hormigón. Obtenido de http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/11352

[73]. Rojas Manzano, M. A., Pérez Caicedo, J., Otálvaro-Calle, I., Benavides, H., & Ambriz Fregoso, C. (2021). *Uso de las escorias de horno de arco eléctrico (EHAE) en la construcción –estado del arte.* Obtenido de universidad industrial de Santander: https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/10900/11263

[74]. RUIZ IBARRA, J. (2018). EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA BAJO CARGA MONOTÓNICA Y LA RIGIDEZ BAJO CARGA CÍCLICA DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA FABRICADA CON SUSTITUCIONES PARCIALES DE AGREGADO PÉTREO POR ESCORIA DE ALTO HORNO. Obtenido de: https://repository.usta.edu.co/handle/11634/12640

[75]. SANABRIA RAMIREZ, M. A. (2018). PROPUESTA DE MEJORA PARA EL PROCESO PRODUCTIVO DE LA EMPRESA CEMENTOS TEQUENDAMA. Obtenido de https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22447/1/PROPUESTA%20DE%20MEJORA%20PARA%20EL%20PROCESO%20PRODUCTIVO%20DE%20LA%20EMPRESA%20CEMENTOS%20TEQUENDAMA..pdf

[76]. Sánchez Abril, H. (2014). ESTADO DEL ARTE SOBRE LAS ESCORIAS NEGRAS DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO Y SUS APLICACIONES EN PAVIMENTOS. Obtenido de http://www.ustatunja.edu.co/cong/images/Articulos/-ESTADO%20DEL%20ARTE%20SOBRE%20LAS%20ESCORIAS%20NEGRAS%20DE%20HORNO%20DE%20ARCO%20ELECTRICO%20Y%20SUS%20APLICACIONES%20EN%20PAVIMENTOS.pdf

[77]. SÁNCHEZ GONZÁLEZ, Y. E., BARBOSA CLAVIJO, Y. E., & RINCÓN VELÁSQUEZ, K. J. (2016). BENEFICIOS TRIBUTARIOS PARA LAS EMPRESAS QUE RECICLAN NEUMÁTICOS EN LA CIUDAD DE BOGOTA Y QUE REALIZAN INVERSIONES EN CONTROL Y MEJORAMIENTO DEL MEDIO AMBIENTE. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.

[78]. SinNombre. (2019). World Steel in Figures 2019 Acero. Obtenido de World Steel Association: https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:96d7a585-e6b2-4d63-b943-4cd9ab621a91/World%2520Steel%2520in%2520Figures%25202019.pdf

[79]. Sinnombre. (s.f.). Crumb Rubber. Obtenido de scraptirenews: https://scraptirenews.com/information-center/crumb-rubber/

[80]. Sosa Yépez, I. (2017). INCORPORACIÓN DE ESCORIAS SIDERÚRGICAS EN HORMIGONES AUTO-COMPACTANTES DE ALTAS PRESTACIONES. Obtenido de https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=134910

[81]. SOTO LONDOÑO, M., & MARÍN RINCÓN., J. P. (2019). ANÁLISIS DEL CONCRETO CON CAUCHO COMO ADITIVO PARA ALIGERAR ELEMENTOS ESTRUCTURALES. Obtenido de: https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/17858

[82]. Steel, W. (2020). World Steel. Obtenido de: https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f7982217-cfde-4fdc-8ba0-795ed807f513/World%2520Steel%2520in%2520Figures%25202020i.pdfAstorgano, Rodera, Patricia. (31 de agosto de 2020). ANÁLISIS DE LAS POSIBILIDADES DE VALORIZACIÓN DE LA ESCORIA NEGRA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EN LA COMUNIDAD AUTÓNOMA DEL PAÍS VASCO. Obtenido de: https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/46920/TFM_PatriciaAstorgano.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[83]. STUDIO DE CONCRETO ELABORADO CON CAUCHO DE RECICLADO DE DIFERENTES TAMANOS DE PARTICULAS. (2008). Obtenido de scielo: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652008000100005&fbclid=IwAR2P79Y9o8COxlI2G5N-eFel5KTGvzViU9S6P8afNNLBWfzmKKh_91ksVoQ

[84]. TECNALIA. (2017). ESTUDIO EN LA INTENSIDAD DE UTILIZACIÓN DE MATERIALES Y ECONOMÍA CIRCULAR EN COLOMBIA PARA LA MISIÓN DE CRECIMIENTO VERDE. Obtenido de https://bibliotecadigital.ccb.org.co/handle/11520/21034

[85]. TORRES OSPINA, A. H. (2014). Valoración de las propiedades mecánicas del Asfalto Modificado con grano de llanta reciclado. Trabajo de grado. Ingeniería Civil Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Facultad de Ingeniería (PG: 77; 79; 82). Obtenido de: https://www.academia.edu/15946905/VALORACI%C3%93N_DE_PROPIEDADES_MEC%C3%81NICAS_Y_DE_DURABILIDAD_DE_CONCRETO_ADICIONADO_CON_RESIDUOS_DE_LLANTAS_DE_CAUCHO.

[86]. VENEGAS RAMIREZ, L. C. (2016). EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL GRANO DE CAUCHO DE LLANTA RECICLADA EN LA PRODUCCIÓN DE CONCRETO PARA LA EMPRESA ARGOS. Bogotá, Cundinamarca, Colombia. Obtenido de: https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/432/1/6112739-2016-2-IQ.pdf

[87]. VILLA RODRIGUEZ, L. A., & BARRETO RAMIREZ, J. D. (2014). ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA INSTALACIÓN DE UNA PLANTA RECICLADORA DE LLANTAS USADAS EN LA CIUDAD DE IBAGUÉ. Ibagué, Tolima, Tolima.

10. ANEXOS

Mezcla con 0% GCR (Pacheco González & Moreno Cárdenas,2018, p.145) [62]

Mezcla patron 0 (12 adoquines)

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

I. EQUIPO

Id Equipo	Descripción	Tipo	Tarifa/hora	Rendimient	Valor-Unit
054-0145	Maquina Trompo mecladora		$ 1.416,67	Hr	$ 708,33
067-0005	Herramienta Menor		$ 944,97		$ 472,49
				Sub- Total	$ 1.180,82

II. MATERIALES EN OBRA

Id Insumo	Descripción	Unidad	Precio-Unit	Cantidad	Valor-Unit
090-0001	Adoquín en concreto e=8cm (20*10*8 cm)	und	$ 462,26	12	$ 5.547,12
005-0001	Cemento	gr	$ 0,40	8460	$ 3.384,00
148-0002	Grava	gr	$ 0,06	19207	$ 1.075,59
	Fino	gr	$ 0,05	20056,8	$ 1.063,01
	Agua	gr	$ 0,00	5160	$ 16,41
	GCR	gr	$ 0,60	0	$ 0,00
	Microsilice	gr	$ 4,80	0	$ 0,00
				Sub- Total	$ 5.539,0

III. MANO DE OBRA

Id Cuadrilla	Descripción	Jornal	Prestaciones	Jornal Total	Rendimient	Valor-Unit
113-0003	Oficial	$ 43.471,89	85%	$ 80.423,00	8	$ 5.026,44
113-0002	Ayudante	$ 25.571,89	85%	$ 47.308,00	8	$ 2.956,75
					Sub- Total	$ 7.983,19
				Total Costo Directo		$ 14.703,02

Mezcla del hormigón con escoria de acero (Ninabanda Bryan & Santamaría Karina) [58]



Ensayo de resistencia a la compresión (Ninabanda Bryan & Santamaría Karina) [58]

