



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Estudio del agregado reciclado de residuos de construcción y demolición en celdas de confinamiento con llantas desechadas para la construcción de obras viales en Colombia.

Jairo Andrés Guaje Guerra

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Artes, Maestría en Construcción
Bogotá, Colombia
2020

Estudio del agregado reciclado de residuos de construcción y demolición en celdas de confinamiento con llantas desechadas para la construcción de obras viales en Colombia.

Jairo Andrés Guaje Guerra

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Construcción

Director (a):

PhD. Gloria Inés Beltrán Calvo

Línea de Investigación:

Procesos constructivos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Artes, Maestría en Construcción
Bogotá, Colombia

2020

Dedicatoria

*A Dios, por su infinita misericordia y bondad,
que me ha guiado en la realización de esta
investigación para su bien y su gloria.*

*A mis padres, por su apoyo incondicional y
ser impulsores de mi desarrollo personal y
profesional.*

*A mis hermanos, por su compañía y animo en
seguir siempre adelante y buscar siempre la
verdad.*

Agradecimientos

A Dios, por permitirme culminar mis estudios de posgrado, y darme la fuerza, la entereza y el compromiso de culminar a cabalidad con este proyecto para su gloria y para aportar en el desarrollo investigativo del país.

A la Dra. Gloria Inés Beltrán Calvo por su paciencia, acompañamiento y dedicación para la buena práctica de la investigación y por liderar el Semillero de Investigación de Materiales para Carreteras (SIMCA), Semillero a quienes agradezco infinitamente por toda la colaboración y sacrificio realizado para concluir este proyecto.

A la Universidad Nacional de Colombia por ser cuna y fomento de investigación, y recibirme como estudiante desde mi formación de pregrado. De igual manera, a la Dirección de Investigación de la sede Bogotá, por la financiación del proyecto “Evaluación del comportamiento de materiales reciclados y de desecho para su uso en obras de infraestructura vial rural” en el que se enmarca esta Tesis de Maestría.

A la empresa Granulados Reciclados de Colombia GRECO S.A.S por su amabilidad en permitirnos recorrer y conocer los procesos en su planta y el suministro de materiales.

A toda mi familia por su apoyo y acompañamiento en este camino.

Resumen

En Colombia, la creciente demanda de insumos para la construcción de obras civiles y la generación de grandes volúmenes de residuos y desechos constructivos ejerce una gran presión en la academia para realizar investigaciones que conduzcan a alternativas no convencionales que resulten técnicamente viables y sustentables. En esa dirección, la reutilización de materiales como los Residuos de la Construcción y Demolición (RCD) en obras de ingeniería, puede tomar un papel importante por su aporte en aspectos como mitigación de impacto ambiental en zonas de disposición final y disminución en la explotación de recursos no renovables.

En esta tesis de Maestría, se estudia el desempeño de una propuesta que incluye la reutilización de agregados reciclados producto de RCD para la construcción de infraestructura vial; complementariamente y, buscando una alternativa que permita mejorar el desempeño de dichos agregados, que a su vez presente facilidades constructivas, se considera el aporte de confinamiento lateral al agregado por medio de llantas de desecho para mejorar su capacidad portante, restringir la pérdida de materiales por lavado y disminuir las deformaciones del pavimento donde se utilice la alternativa.

Para esos fines, se realiza una investigación experimental y analítica a través de cinco fases, donde se combina la observación, la experimentación en campo y en laboratorio, así como la modelación física, para evaluar el desempeño de la alternativa de capa de pavimento propuesta. Con base en los resultados obtenidos, se establece la viabilidad técnica del uso del agregado reciclado de RCD en celdas de confinamiento con llantas desechadas para la construcción de vías de bajos volúmenes vehiculares, para el medio colombiano. Como referente, se compara el desempeño observado con el de una capa de agregado natural bajo un sistema constructivo tradicional según la normativa vigente.

Palabras clave: RCD, Agregados reciclados, llantas de desecho, confinamiento lateral, Infraestructura vial.

Abstract

In Colombia, the growing demand for supplies for the construction of civil works and the generation of large volumes of construction waste and scrap puts great pressure on the academy to carry out research that leads to unconventional alternatives that are technically viable and sustainable. In this direction, the reuse of materials such as Construction and Demolition Waste (CDW) in engineering works, can take an important role for its contribution in aspects such as mitigation of environmental impact in areas of final disposal and decrease in the exploitation of nonrenewable resources.

In this Master's thesis, the performance of a proposal that includes the reuse of recycled aggregates resulting from CDW for the construction of road infrastructure is studied; In addition, and looking for an alternative that allows improving the performance of said aggregates, which in turn presents constructive facilities, the contribution of lateral confinement to the aggregate by means of waste tires is considered to improve its carrying capacity, restricting the loss of materials by washing and decrease the deformations of the pavement where the alternative is used.

For these purposes, an experimental and analytical investigation is carried out through five phases, where observation, field and laboratory experimentation, and physical modeling are combined to evaluate the performance of the proposed pavement layer alternative. Based on the results obtained, the technical feasibility of using the CDW recycled aggregate in confinement cells with discarded tires is established for the construction of low-volume vehicle roads for the Colombian environment. As a reference, the performance observed is compared with that of a natural aggregate layer under a traditional construction system according to current regulations.

Keywords: CDW, recycled aggregate, scrap tires, lateral confinement, road infrastructure.

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de figuras.....	XII
Lista de tablas	XV
Introducción.....	1
1. Marco investigativo.....	4
1.1 Justificación.....	4
1.2 Preguntas de investigación.....	6
1.3 Objetivos.....	7
1.3.1 Objetivo general.....	7
1.3.2 Objetivos específicos.....	7
1.4 Aporte investigativo.....	8
1.5 Antecedentes.....	8
2. Marco teórico y normativo.....	15
2.1 Residuos de construcción y demolición.....	15
2.1.1 Agregados reciclados de RCD.....	16
2.1.2 Caracterización de materiales.....	16
2.2 Fundamentos de carreteras y obras viales.....	18
2.2.1 Estructura de pavimento.....	18
2.2.2 Desempeño de materiales en estructura de pavimento.....	19
2.2.3 Sistema constructivo.....	24
2.2.4 Ensayos in situ para pavimentos.....	25
2.3 Confinamiento lateral de agregados granulares.....	31
2.3.1 Efecto de confinamiento.....	31
2.3.2 Efecto de membrana tensionada.....	31
2.3.3 Distribución de esfuerzos.....	32
2.3.4 Incremento en la rigidez y capacidad portante del suelo reforzado.....	32
2.3.5 Llantas como elementos confinantes.....	32
2.4 Innovación y sostenibilidad en la construcción de obras viales con materiales reciclados.....	34
2.4.1 Innovación.....	34
2.4.2 Sostenibilidad.....	35
2.5 Generación de RCD en Colombia.....	35
2.6 Generación de llantas como residuos en Colombia.....	38
3. Metodología.....	43

3.1	Fase inicial de campo: Identificación del Procedo de Producción de Agregados Reciclados a Nivel Industrial	43
3.2	Fase Experimental en laboratorio: Caracterización de materiales	44
3.3	Fase de modelación física: Diseño y construcción de modelo a escala reducida en campo	45
3.4	Fase de experimentación en campo: Pruebas de caracterización mecánica .	45
3.5	Fase analítica: Evaluación del desempeño del RCD y llantas de confinamiento para la construcción de obras viales	46
4.	Proceso de producción industrial de agregados reciclados	48
4.1	Plantas de aprovechamiento de RCD en Colombia	48
4.2	Planta de aprovechamiento de RCD GRECO SAS	52
5.	Caracterización de materiales.....	61
5.1	Caracterización de RCD.....	61
5.1.1	Determinación del contenido de humedad	61
5.1.2	Relación humedad-peso unitario seco (ensayo modificado de compactación)	62
5.1.3	Índices de aplanamiento y alargamiento	65
5.1.4	Valor de azul de metileno	66
5.1.5	Equivalente de arena	69
5.1.6	Resistencia al desgaste en máquina de Los Ángeles	70
5.1.7	Distribución Granulométrica.....	72
5.1.8	CBR de suelos compactados en laboratorio y sobre muestra inalterada.....	74
5.1.9	Resumen caracterización RCD.....	78
5.2	Caracterización agregado natural de referencia	79
5.2.1	Determinación del límite líquido	80
5.2.2	Límite plástico e índice de plasticidad.....	81
5.2.3	Índices de aplanamiento y alargamiento	82
5.2.4	Relación humedad-peso unitario seco (ensayo modificado de compactación)	83
5.2.5	Valor de azul de metileno	85
5.2.6	Equivalente de arena.....	85
5.2.7	Resistencia al desgaste en máquina de Los Ángeles	86
5.2.8	Distribución Granulométrica.....	86
5.2.9	CBR de suelos compactados en laboratorio y sobre muestra inalterada para agregado natural.....	88
5.2.10	Resumen caracterización Agregado natural	92
5.3	Caracterización de llantas	93
6.	Diseño y construcción de modelo de pruebas	94
6.1	Selección de ubicación del modelo de pruebas	94
6.2	Diseño del modelo de pruebas	96
6.3	Construcción del modelo de pruebas	98
6.3.1	Preparación de las celdas de confinamiento.....	98
6.3.2	Preparación de las celdas de confinamiento.....	100
6.3.3	Adecuación del confinamiento lateral.....	100
6.3.4	Transporte y almacenamiento del material	101

6.3.5	Colocación de las celdas sobre la superficie	101
6.3.6	Extensión y conformación del material granular	102
6.3.7	Compactación de la capa granular	102
7.	Pruebas de caracterización mecánica en campo.....	105
7.1	Pruebas de caracterización mecánica en campo	105
7.1.1	Ensayo de penetración dinámica de cono	105
7.1.2	Medición de deflexiones con FWD	113
8.	Análisis de resultados	116
8.1.1	Evaluación de calidad del agregado reciclado.....	116
8.2	Evaluación del desempeño del agregado reciclado confinado	122
9.	Proceso constructivo propuesto.....	129
9.1	Procedimiento.....	131
9.1.1	Preparación de la superficie existente.....	131
9.1.2	Adecuación del confinamiento lateral	131
9.1.3	Transporte y almacenamiento del material.....	132
9.1.4	Selección de las celdas (llantas) de confinamiento	132
9.1.5	Adecuación y disposición de las llantas	132
9.1.6	Colocación de las celdas sobre la superficie	132
9.1.7	Extensión y conformación del material granular	133
9.1.8	Compactación de la capa granular	134
9.2	Cantidades de materiales por tramo unitario.....	135
10.	Conclusiones y recomendaciones.....	139
10.1	Conclusiones	139
10.2	Recomendaciones	142
	Bibliografía	145
A.	Anexo: Formato toma de datos CBR.	155
B.	Anexo: Ensayos de PDC INV E-172-13	157

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Geocelda para construcción de pavimentos.	9
Figura 1-2: Búsqueda “recycled”, “aggregate” y “pavement” por país.	13
Figura 1-3: Búsqueda “confinement” y “pavement” por país.	13
Figura 1-4: Búsqueda “recycled”, “aggregate” y “confinement” por país.	14
Figura 1-5: Búsqueda “recycled”, “aggregate”, “confinement” y “pavement” por país. 14	14
Figura 2-1: Mapa de literatura.	15
Figura 2-2: Estructura de pavimento.....	18
Figura 2-3: Curvas esfuerzo-deformación a diferente confinación.	23
Figura 2-4: Curvas esfuerzo-deformación por ciclos de carga.	23
Figura 2-5: Penetrómetro Dinámico con Cono - PDC.	26
Figura 2-6: Ejemplo muestreo PDC.	27
Figura 2-7: Falling Weigth Deflectometer - FWD.	28
Figura 2-8: Efecto de confinamiento.	31
Figura 2-9: Secciones de llanta estándar.....	33
Figura 2-10: Metas de aprovechamiento de RCD.....	36
Figura 2-11: Especificaciones de agregados pétreos.	37
Figura 2-12: Metas de aprovechamiento de RCD Bogotá D.C.....	37
Figura 2-13: Especificaciones de agregados pétreos IDU.	38
Figura 2-14: Empleo de agregados pétreos a partir de concreto hidráulico reciclado IDU. 38	38
Figura 2-15: Aprovechamiento de llantas usadas Colombia.	39
Figura 2-16: Metas de recolección de llantas usadas.	40
Figura 2-17: Metas de recolección de llantas usadas Bogotá D.C.....	41
Figura 2-18: Aprovechamiento de llantas usadas Bogotá D.C.....	41
Figura 2-19: Generación de llantas usadas Bogotá D.C.....	42
Figura 3-1: Diseño metodológico.....	46
Figura 4-1: Productos GRECO SAS.	48
Figura 4-2: Productos CICLOMAT SA.	49
Figura 4-3: Productos Reciclados industriales de Colombia SAS.	50
Figura 4-4: Productos CONASFALTOS SA.	50
Figura 4-5: Productos SINESCO SAS.	51
Figura 4-6: Productos CONESCO SAS.	51
Figura 4-7: GRECO SAS.....	52

Figura 4-8:	Localización planta GRECO SAS.	52
Figura 4-9:	Transporte y descarga RCD planta GRECO SAS.	54
Figura 4-10:	RCD planta GRECO SAS.	54
Figura 4-11:	Planta de trituración Hazemag GRECO SAS.	54
Figura 4-12:	Tolva inicial de la planta de trituración Hazemag.	55
Figura 4-13:	Trituradora de Impacto de la planta Hazemag.	55
Figura 4-14:	Separadores magnéticos de la planta de trituración.	56
Figura 4-15:	Cabina selección y limpieza manual.	56
Figura 4-16:	Criba para selección de material con tamaño entre 25 y 40 mm.	57
Figura 4-17:	Criba Wind Shifter con stacker móvil.	57
Figura 4-18:	Criba Wind Shifter para tamaños de 0 a 5 mm.	58
Figura 4-19:	Maquina clasificadora Powerscreen GRECO SAS.	58
Figura 4-20:	Agregados procesados RCD planta GRECO SAS.	59
Figura 4-21:	Sub-base A.	59
Figura 5-1:	Patrón de impactos para compactación.	62
Figura 5-2:	Compactación material ensayo modificado de compactación.	63
Figura 5-3:	Peso probeta ensayo modificado de compactación.	63
Figura 5-4:	Curva compactación ensayo modificado de compactación.	65
Figura 5-5:	Especificaciones para ensayo de índice de aplanamiento y alargamiento. 66	
Figura 5-6:	Preparación solución ensayo azul de metileno.	67
Figura 5-7:	Preparación suspensión ensayo azul de metileno.	68
Figura 5-8:	Apariencia de un resultado negativo y positivo ensayo azul de metileno. 68	
Figura 5-9:	Resultado azul de metileno.	68
Figura 5-10:	Degradación del agregado durante el ensayo de desgaste en máquina de los Ángeles. 70	
Figura 5-11:	Especificaciones técnicas de tamaño y masas de muestras para este ensayo de la Máquina de los Ángeles.	71
Figura 5-12:	Curva granulométrica del agregado reciclado.	73
Figura 5-13:	Curva CBR sin inmersión.	76
Figura 5-14:	Curva CBR con inmersión.	77
Figura 5-15:	Determinación límite líquido agregado natural.	81
Figura 5-16:	Curva compactación ensayo modificado de compactación.	84
Figura 5-17:	Curva granulométrica del agregado natural de referencia.	87
Figura 5-18:	Curva CBR sin inmersión Agregado natural.	90
Figura 5-19:	Curva CBR con inmersión Agregado natural.	91
Figura 6-1:	Posibles sitios la para fase de modelación física.	95
Figura 6-2:	Estado de la vía aledaña al estadio universitario.	95
Figura 6-3:	Estado vía aledaña al CADE de Ingeniería.	96
Figura 6-4:	Localización modelo de pruebas.	97
Figura 6-5:	Distribución modelo de pruebas.	98
Figura 6-6:	Llantas seleccionadas como celdas de confinamiento.	99
Figura 6-7:	Llantas cortadas.	99

Figura 6-8:	Retiro de laterales de llantas de modelo de pruebas.	99
Figura 6-9:	Excavación de modelo de pruebas.....	100
Figura 6-10:	Adecuación del confinamiento lateral de modelo de pruebas.	100
Figura 6-11:	Preparación material de modelo de pruebas.	101
Figura 6-12:	Colocación de llantas en modelo de pruebas.	101
Figura 6-13:	Extensión de material en modelo de pruebas.....	102
Figura 6-14:	Compactación de material en modelo de pruebas.	102
Figura 6-15:	Modelo de pruebas.....	103
Figura 7-1:	PDC Universidad Nacional de Colombia.	105
Figura 7-2:	Ensayo PDC alrededor del modelo de pruebas.	106
Figura 7-3:	Curva de penetración en la subrasante - ensayo 1.....	107
Figura 7-4:	Curva de penetración en la subrasante - ensayo 2.....	107
Figura 7-5:	Curva de penetración en la subrasante - ensayo 3.....	108
Figura 7-6:	Curva de penetración RCD sin ciclos de carga.	109
Figura 7-7:	Curva de penetración RCD con 50 ciclos de carga.	110
Figura 7-8:	Curva de penetración RCD con 100 ciclos de carga.	110
Figura 7-9:	Curva de penetración Agregado natural sin ciclos de carga.	111
Figura 7-10:	Curva de penetración Agregado natural con 50 ciclos de carga.	112
Figura 7-11:	Curva de penetración Agregado natural con 100 ciclos de carga.	112
Figura 8-1:	Curvas granulométricas RCD Respecto a Norma INVIAS	121
Figura 8-2:	Curvas granulométricas RCD respecto a norma IDU.	121
Figura 8-3:	Ciclo de carga vs IPDC	123
Figura 8-4:	Deflexión Máxima vs IPDC	125
Figura 8-5:	Deflexión Máxima vs Módulo Elástico	126
Figura 8-6:	IPDC vs Módulo Elástico	127
Figura 9-1:	Pavimento Placa-Huella	130
Figura 9-2:	Pavimento Celda-Huella.....	130
Figura 9-3:	Arreglo de llantas Celda-Huella.	133
Figura 9-4:	Extensión y conformación del material granular.	134
Figura 9-5:	Compactación del material granular.	135

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Valores típicos de módulo para diferentes capas.	24
Tabla 3-1: Metodología de investigación.	47
Tabla 5-1: Ensayos realizados para caracterización de agregados reciclados.	61
Tabla 5-2: Resultados moldes ensayo modificado de compactación RCD.	64
Tabla 5-3: Resultados contenidos humedad ensayo modificado de compactación RCD. 64	64
Tabla 5-4: Índices de alargamiento y aplanamiento del agregado con RCD.....	66
Tabla 5-5: Resultados del ensayo de equivalente de arena RCD.....	70
Tabla 5-6: Resultados del ensayo de desgaste en máquina de Los Ángeles RCD.....	71
Tabla 5-7: Granulometría de los agregados reciclados.	72
Tabla 5-8: Datos de la muestra para condiciones de ensayo.	75
Tabla 5-9: Resultados sub-muestras sin inmersión.	75
Tabla 5-10: Resultado sub-muestra con inmersión.....	76
Tabla 5-11: CBR sin inmersión.	77
Tabla 5-12: CBR con inmersión.....	77
Tabla 5-13: Expansión volumétrica sub-muestra con inmersión de agregado reciclado.	78
Tabla 5-14: Resultados caracterización RCD.	78
Tabla 5-15: Ensayos caracterización agregado natural.	79
Tabla 5-16: Resultados ensayo límite líquido agregado natural.....	80
Tabla 5-17: Resultados ensayo límite plástico agregado natural.	81
Tabla 5-18: Resultados ensayo alargamiento agregado natural.	82
Tabla 5-19: Resultados ensayo aplanamiento agregado natural.	82
Tabla 5-20: Resultados moldes ensayo modificado de compactación RCD.....	84
Tabla 5-21: Resultados contenidos humedad ensayo modificado de compactación RCD.	84
Tabla 5-22: Resultados ensayo de equivalente de arena agregado natural.....	85
Tabla 5-23: Resultados del ensayo de desgaste en máquina de Los Ángeles agregado natural.	86
Tabla 5-24: Granulometría de los agregados naturales.	87
Tabla 5-25: Resultados sub-muestras CBR de Agregado Natural.	89
Tabla 5-26: Resultados sub-muestras sin inmersión Agregado natural.	89
Tabla 5-27: Resultado sub-muestra con inmersión Agregado natural.....	90

Tabla 5-28:	CBR sin inmersión Agregado natural.....	90
Tabla 5-29:	CBR con inmersión Agregado natural.	91
Tabla 5-30:	Expansión volumétrica sub-muestra con inmersión de agregado natural. 92	
Tabla 5-31:	Resumen resultado caracterización agregado natural.....	92
Tabla 5-32:	Características de las llantas.....	93
Tabla 6-1:	Compactación del agregado reciclado en el modelo de pruebas	103
Tabla 7-1:	Ensayos in situ modelo de pruebas.....	105
Tabla 7-2:	Resultados del ÍPDC para la subrasante.	108
Tabla 7-3:	Índice PDC ensayos celda RCD.	111
Tabla 7-4:	Índice PDC ensayos Agregado natural sin confinamiento.	113
Tabla 7-5:	Resultados FWD celda RCD modelo de pruebas.....	114
Tabla 7-6:	Deflexión registrada en la frontera de la celda con RCD.....	114
Tabla 7-7:	Deflexiones registradas sobre el agregado natural	114
Tabla 7-8:	Módulos elásticos estimados con base en deflexiones	115
Tabla 8-1:	Comparación resultados caracterización RCD.....	117
Tabla 8-2:	Comparación resultados caracterización RCD.....	118
Tabla 8-3:	IPDC en las secciones con RCD y con agregado natural (mm/golpe).....	123
Tabla 8-4:	Deflexiones máximas y módulos elásticos de secciones	124
Tabla 9-1:	Resumen cálculo cantidades sección vial.	138

Introducción

En Colombia, la industria de la construcción es uno de los sectores más dinámicos y de mayor incidencia en el desarrollo económico del país (Mattey, Robayo, Silva, Alvarez y Arjona, 2014). En su ejecución, se desprenden diversas consecuencias, entre las que resaltan: la creciente demanda de insumos para la construcción de obras civiles (Porrás, Guarín y Cortes, 2013), y la generación de grandes volúmenes de residuos y desechos, los cuales requieren grandes zonas de disposición final.

El reciclaje de materiales, como: los Residuos de la Construcción y Demolición (RCD), las llantas usadas, entre otros, para su uso en la construcción, pueden tomar un papel importante por su aporte en aspectos como: ahorro energético y transporte de materiales más livianos (Verian, Ashraf y Cao, 2018), mitigación de impacto ambiental en zonas de disposición final, reducción de la huella de carbono (Vieira y Pereira, 2015) y disminución en la explotación de recursos no renovables (Agrela, Barbudo, Ramírez, Ayuso, Carvajal y Jiménez, 2012). De igual manera, el uso de desechos plantea una solución económicamente viable, comparada con el uso de agregados naturales de altas especificaciones, y reducción de los costos de tratamiento y disposición del material (Rahman, Imteaz, Arulrajah, Piratheepan y Disfani, 2015). También, los agregados reciclados de RCD tienen el potencial para ser usados como material para la construcción de obras viales debido a sus propiedades físicas y mecánicas, que han permitido tener un buen desempeño para vías de bajo tráfico (O'Mahony, 1990).

Dentro de la investigación de reutilización de agregados reciclados para su uso en obras viales, se indaga una alternativa complementaria que permita mejorar su desempeño mecánico y a su vez presente facilidades constructivas para su ejecución; es así, que se considera dar confinamiento lateral del agregado, para mejorar la capacidad de soportar carga, restringir la pérdida de material por lavado, mejorar la distribución de las cargas vehiculares y disminuir las deformaciones de las capas de material reciclado (Urresta, 2015). Para llevar a cabo esta alternativa, se plantea el uso de llantas recicladas como

elemento confinante, esperando beneficios técnicos, económicos, ambientales, y con amplia disponibilidad (Neel, Navarkar, y Hiremath, 2015).

Siguiendo la metodología como un conjunto de procesos, se plantea un ejercicio probatorio cuantitativo, buscando medir propiedades y desempeño de los materiales, que permitan comparar numéricamente los resultados con las exigencias de las normas en nuestro país; esto, a partir de un componente experimental fuerte, en el que se pueda evaluar la propuesta presentada, con su respectiva componente analítica, de la cual se desprendan los resultados que permitan determinar la efectividad y la viabilidad para su uso eventual en nuestro medio.

Esta tesis se enmarca dentro del proyecto de investigación “Evaluación del comportamiento de materiales reciclados y de desecho para su uso en obras de infraestructura vial rural”, financiado mediante la “Convocatoria nacional para el apoyo a proyectos de investigación y creación artística de la Universidad Nacional de Colombia 2017-2018”, por la Dirección de Investigación de la sede Bogotá de la universidad.

El documento de tesis inicia con el marco de la investigación en el Capítulo 1, donde se incluyen el planteamiento del problema de investigación y la justificación, las preguntas de investigación y los objetivos de la misma, los aportes investigativos y los antecedentes pertinentes para la adecuada contextualización. Posteriormente, en el Capítulo 2 se presenta la fundamentación teórica, complementada por un mapa de literatura siguiendo la metodología de Creswell, (2007). En el Capítulo 3 se presenta la estrategia metodológica con la que se aborda el proceso investigativo y el cumplimiento de los objetivos propuestos. En el Capítulo 4 se presenta la identificación del proceso de producción de agregados reciclados a nivel industrial y en el Capítulo 5, se presenta la caracterización de los materiales utilizados, tanto de los agregados reciclados, los agregados naturales de referencia, y las llantas. Posteriormente, en el Capítulo 6 se aborda el diseño y construcción de un modelo físico de pruebas, desde la selección de la ubicación, hasta la construcción final. En el Capítulo 7 se presentan las pruebas de caracterización mecánica en campo, en el capítulo 8 se consolidan los resultados y análisis integrales de todas las pruebas realizadas. Como producto de la experiencia investigativa obtenida en esta tesis de Maestría, en el Capítulo 9 se plantea una propuesta de proceso constructivo para llevar

a cabo un tramo vial real de una vía de bajo volumen de tránsito, cuyo comportamiento pueda ser monitoreado bajo condiciones reales de operación, bien sea dentro o fuera del campus de la Universidad. Finalmente, en el Capítulo 10 se presentan las conclusiones y recomendaciones más relevantes de la investigación.

1. Marco investigativo

El planteamiento de esta investigación se realiza siguiendo un enfoque cuantitativo, el cual será un estudio con alcance exploratorio. Desde esa referencia, en el presente capítulo se presentan algunos antecedentes de investigación, se justifica la importancia de realizarla, se enuncian las preguntas que sustentan el desarrollo de la misma, los objetivos que linearán el desarrollo y metodología del proceso y el alcance que tiene la investigación.

1.1 Justificación

Considerando el potencial que representan los agregados reciclados de RCD y el desarrollo de antecedentes de investigación en diferentes lugares del mundo, se presentan argumentos que muestran la importancia y relevancia de llevar a cabo una investigación en nuestro medio, que permita indagar su alcance, y acercar a la comunidad científica a una mejor comprensión de la problemática que se desprende del tema.

En primer lugar, se encuentra la extracción de materiales pétreos para construcción, los cuales son recursos no renovables y deben cumplir con requerimientos en sus propiedades mecánicas y físicas, para aprobarse su uso en obras civiles de acuerdo a las exigencias de las normas NTC, normas INVIAS, entre otras; esto implica, no solo la necesidad de industrias extractivas, sino también la búsqueda de fuentes de materiales que cumplan estas especificaciones.

En segundo lugar, se encuentra la producción y disposición de altos volúmenes de residuos de la construcción, los cuales, según normativa, se transportan y se dejan en sitios exclusivos para esta función, conocidos popularmente como escombreras, donde se acumulan grandes cantidades de material, requiriendo cada vez mayor espacio para su disposición.

Algo muy similar ocurre con la disposición de las llantas vehiculares usadas y desechadas, convirtiéndose en otro grave problema ambiental.

En tercer lugar, en nuestro país se han priorizado las vías terciarias como política de estado, para dinamizar la economía y conectividad en las regiones. Desde el gobierno nacional se tiene un programa a 20 años consignado en documento CONPES (Consejo Nacional de Política Económica y Social) 3857 “Lineamientos de política para la gestión de la red terciaria” (DNP, 2016), donde se contempla el planteamiento de nuevas alternativas de construcción y mantenimiento para estas vías. El programa invita a instituciones de educación superior para fomentar la investigación sobre nuevas alternativas, que sean ambiental, técnica y económicamente factibles para ser reglamentadas e implementadas. Considerando el potencial de uso de RCD como material de construcción de vías de bajo tránsito vehicular, se ve una gran oportunidad en aplicaciones direccionadas a las vías terciarias de nuestro país.

Es así, como esta investigación busca contribuir, desde la academia, con una posible solución para el aprovechamiento de RCD como material de construcción vial en Colombia. De esta forma, se espera que un depósito de escombros, se convierta en fuente de agregados para suplir parte de la demanda anual de materiales para la construcción, reduciendo la explotación minera. Esto, permitiría disminuir, a su vez, los volúmenes de residuos de construcción que se encuentran en las zonas de disposición final, generando un equilibrio entre la materia desechada y la materia reciclada y reutilizada.

Adicional al potencial uso de RCD como material de construcción de vías de bajo tránsito vehicular, se busca la aplicación de un sistema de mejoramiento del material, a través de un proceso constructivo que sea amigable con el medio ambiente y que involucre la reutilización y el reciclaje de otros materiales desechados. Es así que, se presenta la alternativa de la aplicación de confinamiento al RCD mediante llantas desechadas, como elementos de reforzamiento, optimizando las propiedades de los reciclados para su uso en estructuras de pavimento. Esto proporciona soluciones verdaderamente sostenibles, que se transfieran en beneficio de las comunidades.

1.2 Preguntas de investigación

Las propiedades de los agregados reciclados son muy variables y dependen en gran medida del origen del residuo de construcción (Barbudo, Agrela, Ayuso, Jiménez, y Poon, 2012). Pasando por el uso inicial que se le dio, el tratamiento que tuvo el material natural, las condiciones ambientales donde se usaron, el tiempo de uso que tuvieron, los diversos materiales que se utilizaron, el proceso por el que pasaron a convertirse en residuos, el tratamiento que se le dio en los espacios de disposición final y la clasificación y separación de los materiales de reciclaje.

Es necesario indagar acerca de las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los agregados reciclados extraídos de los residuos y generar referencias que nos permitan compararlos con otros agregados de uso común en la construcción y que ya han sido avalados por las normativas que rigen la construcción en el país. Así, se presentan las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cómo se caracterizan los RCD en una zona de disposición final típica en nuestro medio?
- ¿Son aptos los agregados reciclados de RCD para su uso en la construcción de estructura vial de acuerdo con las normas técnicas que rigen en Colombia?

Al considerar la opción de mejorar las propiedades de los agregados reciclados a partir de confinamiento lateral, y específicamente con el uso de llantas recicladas, surge la siguiente pregunta:

- ¿cómo es el desempeño técnico de las celdas de confinamiento con llantas recicladas, dentro de una estructura vial?

De acuerdo con la alternativa que se plantea: celdas de confinamiento con llantas desechadas, conformando un sistema modular, se genera la pregunta que enmarca todo el proceso investigativo:

- ¿Es viable, desde una perspectiva técnica y ambiental, el uso de agregado reciclado de RCD, en celdas de confinamiento, con llantas desechadas, para la construcción de obras viales en Colombia?

Para responder metodológicamente cada uno de los interrogantes planteados, se definen los siguientes objetivos de la investigación

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Determinar la viabilidad técnica del uso del agregado reciclado de RCD en celdas de confinamiento con llantas desechadas, para la construcción de infraestructura vial en nuestro país.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar la composición y caracterización de los residuos de la construcción y demolición típicos en un área de disposición final en nuestro medio, establecida como estudio de caso.
- Para el caso de estudio, determinar si las propiedades físicas y mecánicas de los agregados reciclados de RCD son adecuadas para su uso como material de construcción de carreteras, según la normativa colombiana.

Se plantea hacer una evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados reciclados a partir de ensayos en los que se puedan determinar los aspectos más representativos e importantes para su posible uso como material de construcción al compararse con los resultados obtenidos del ensayo de agregados naturales y su validación con las normas técnicas que rige en Colombia.

- Medir el desempeño técnico de las celdas de llantas desechadas rellenas con RCD, bajo condiciones simuladas de tráfico y reales de medio ambiente, para determinar su comportamiento efectivo, mediante la construcción de un modelo físico de prueba.
- Cuantificar el aporte físico-mecánico de la implementación de confinamiento lateral, a los agregados reciclados de RCD, comparado con el de un agregado convencional.

1.4 Aporte investigativo

Por medio de esta investigación, se hace un aporte al conocimiento, al evaluar el comportamiento de una propuesta no convencional sustentable para la construcción de una capa modular de pavimento compuesta por agregado reciclado de RCD, como material llenante de llantas desechadas, como elemento para proveer confinamiento lateral, simulando un efecto parecido al de una geocelda de gran tamaño. Al presentar un desempeño técnico adecuado para los requerimientos de las vías de bajo y medio tráfico, la propuesta puede ser considerado como alternativa para la construcción de obras viales en el país, previa validación en tramos de prueba y consideraciones normativas por parte de las entidades competentes en nuestro medio.

1.5 Antecedentes

A partir de diversas investigaciones realizadas, se ha encontrado que el uso de RCD como material para construcción presenta gran potencial, algunos estudios se han efectuado con la finalidad de caracterizar sus propiedades y comportamiento para poder definirlo como agregado para construcción (Chini, Kuo, Armaghani, y Duxbury, 2001; O'Mahony, 1990; Verian et al., 2018).

También se ha profundizado en la investigación del material como agregado para carreteras, obteniéndose un desempeño aceptable para vías de bajo tráfico (Agrela et al., 2012; Arulrajah, Disfani, Horpibulsuk, Suksiripattanapong, y Prongmanee, 2014; Barbudo, et al., 2012; Cardoso, Silva, Brito, y Dhir, 2016; Jiménez, Ayuso, Galvín, López y Agrela, 2012; Leite, Motta, Vasconcelos y Bernucci, 2011; O'Mahony y Milligan, 1991; Park, 2003; Poon y Chan, 2006; Rahman et al., 2015; Vegas, Ibañez, Lisbona, Sáez De Cortazar y Frías, 2011; Vieira y Pereira, 2015)

Sin embargo, se reporta una amplia variabilidad entre las propiedades y características debido a los diferentes orígenes de los materiales, al igual que los procesos realizados en las plantas de tratamiento donde se produjeron; por lo que se deben realizar ensayos previos para corroborar las propiedades de cada planta o fuente de producción (Barbudo et al., 2012; Cardoso et al., 2016; Chini et al., 2001).

Adicionalmente, se ha determinado que el uso de estos, aportaría a reducir el impacto ambiental de la construcción en dos dimensiones: i) al dar un segundo uso a materiales que, en la actualidad, se acumulan en grandes extensiones de terreno y no se les hace un trato adecuado para su disposición final (Chini et al., 2001) y ii) a reducir la extracción de recursos no renovables para suplir las demandas de agregados para construcción de estructuras y obras civiles (Agrela et al., 2012; Arulrajah et al., 2014).

En Colombia, se han realizado algunas investigaciones con el objetivo de caracterizar las propiedades físico-químicas de los residuos de la construcción de la ciudad de Bogotá, concluyendo, por ejemplo, que estos materiales podrían usarse como agregados para fabricación de elementos en concreto no estructural (Porras et al., 2013). Igualmente, se han estudiado las propiedades mecánicas, eléctricas y de durabilidad de concretos fabricados con agregados reciclados (Bojacá Castañeda, 2013; Arriaga Tafhurt, 2013; Laverde Laverde, 2014), concluyendo también sobre la viabilidad para su uso en construcción. En la ciudad de Cali, se han investigado algunas propiedades físicas y mecánicas de los agregados reciclados de construcción, concluyendo que, si bien presentan algunas deficiencias, pueden servir como agregados para concretos (Mattey et al., 2014). Finalmente, se ha determinado que podrían ser utilizados como agregados para usarse en pavimentos (Olmedo y Barrera, 2015; Cardona y López, 2016; Martínez y Castro, 2017), aunque se requiere mayor investigación.

Respecto a los sistemas de confinamiento lateral, en la ingeniería de carreteras se conocen los geosintéticos, específicamente las geoceldas, usadas para confinar el material granular, aumentando la capacidad portante de la estructura y generando una disminución de los espesores de las capas (Tuan-Chun Fu y Chen, 2005).

Figura 1-1: Geocelda para construcción de pavimentos.



Fuente: Suspes Páez, Carpio Patiño, y Maldonado Tinjaca (2018)

La investigación de las geoceldas inició en el año 1979 por el ejército de los Estados Unidos, con el fin de probar la viabilidad de la construcción de vías de acceso a los puentes sobre suelos blandos. Posteriormente, fue utilizado en 1980 para el control de erosión en taludes y revestimiento de canales en países como Estados Unidos y Canadá (Cuartas, 2015). Específicamente, se ha verificado su uso efectivo con materiales de relleno como el pavimento asfáltico reciclado “reclaimed asphalt pavement” (RAP), encontrando que el uso de las geoceldas reducía la deformación permanente, e incrementaba el porcentaje de deformación resiliente (Thakur, 2013).

En Colombia, si bien ya se han utilizado en la construcción de carreteras, se han realizado pocas investigaciones con el objetivo de estudiar su comportamiento y desempeño a corto, mediano y largo plazo. Duarte Duarte y Sierra Parra (2011) realizaron ensayos de laboratorio en modelos a escala, donde se concluye que estos elementos contribuyen a reducir los asentamientos y los esfuerzos en la subrasante, respecto a un sistema de estabilización convencional. Por su parte, Suspés et al., (2018) por medio de un tramo de prueba ubicado en la ciudad de Bogotá, localidad de Suba, hicieron el seguimiento y estudio de la efectividad del uso de geoceldas en la rehabilitación de secciones viales, respecto a otros sistemas de rehabilitación, donde finalmente se encontró que la estructura con mayor aporte de mejoramiento era el de geoceldas con RAP, si bien presentaba un mayor costo respecto a los sistemas convencionales.

En paralelo al uso de geoceldas, se dio inicio a la investigación del uso de llantas de desecho como elemento para reforzamiento de suelos, específicamente en Francia en 1976, por el *Laboratoire central des ponts et chaussées*, presentan una solución llamada *Pneusol*, correspondiente a la combinación entre las llantas y el suelo, con el cual demostraban una reducción de la presión activa del terreno en muros de contención, reducir la vibración en la estructura, reducción relativo de costos y de accesibilidad al material (Long, 1990).

Posteriormente, se han realizado investigaciones para demostrar la efectividad y los beneficios que presentan estos elementos como confinantes laterales: Huat, Aziz, y Chuan (2008), investigaron su funcionamiento por medio de una estructura de contención construida en campo, siguiendo este modelo, además de realizar ensayos de tensión sobre

las llantas, las cuales exhibieron alta resistencia a tensión, brindando mayor resistencia a la estructura, además de reducir costos de materiales y construcción. Por su parte, Baroni, Pivoto Specht, y Barbosa Pinheiro (2012), investigaron la incidencia del tamaño de la llanta en la estabilidad de la estructura de contención, encontrando que llantas de menor tamaño presentan menores pesos específicos para el conjunto estructura-suelo, además de que se absorben las deformaciones en conjunto. Recientemente se han realizado investigaciones para corroborar estos resultados (L. Li, Xiao, Ferreira, y Cui, 2016; L. Li, Cui, Ferreira, Xiao, y Jie, 2019), a través de modelos a escala de terraplenes, donde concluyen que el refuerzo con llantas mejora significativamente la fuerza del terraplén y se reducen las deformaciones horizontales respecto a las estructuras sin refuerzo.

Respecto al uso de estas para la construcción de pavimentos, Bonasso (2008) estudió el comportamiento de llantas desechadas como confinamiento de agregado pétreo grueso, denominado al conjunto de materiales “Mechanical concrete”, donde se alcanzaron comportamientos satisfactorios y reducción en los costos de mantenimiento.

En el contexto de la Universidad Nacional, en la Maestría en construcción, se han realizado investigaciones en el uso de agregado reciclado para fabricación de concreto (Garzón Pire, 2013; Rosas Chaves, 2014; Fonseca Medina, 2018) donde se ha analizado la durabilidad del concreto, la factibilidad del uso del mismo para elementos no estructurales, y se realizó un análisis de ciclo de vida, donde se encontró que si bien, presentan un comportamiento más pobre respecto a concretos con agregados naturales, presentan buen desempeño para ser utilizados cumpliendo parámetros de resistencia y durabilidad, además de presentar ventajas ambientales, produciendo un menor impacto ambiental negativo respecto al generado por el uso de agregados naturales. De igual manera, se ha estudiado el uso de concreto con agregado de llantas trituradas (Liévano Ruiz, 2017; Páez García, 2020), donde han determinado que, aunque la resistencia y la trabajabilidad del concreto se ve disminuida, la mezcla puede ser utilizada para elementos arquitectónicos.

Desde la maestría en Ingeniería -Estructuras, de igual manera se ha estudiado el uso de concretos con agregados reciclados (Mora Villota, 2016; Rosero Alvarez, 2019), las propiedades mecánicas y de permeabilidad del concreto con agregados reciclados, el desempeño de concreto permeable con agregados reciclados, y presentando una propuesta de guía para el uso de agregados reciclados de RCD en Colombia, basado en

normativa internacional e investigaciones en universidades colombianas. En estas investigaciones se concluye que, el concreto con agregados reciclados presenta reducciones en la mayoría de sus propiedades, pero cumple con los requerimientos mecánicos y de desempeño para ser usados en Colombia.

Por su parte, en la maestría en Ingeniería- Geotecnia, se ha estudiado principalmente el uso de llantas para la construcción de estructuras de contención (Rodríguez González, 2016; Sánchez G, 2018), donde inicialmente se determina un incremento en la cohesión del suelo de relleno, debido al confinamiento del mismo por las llantas, de igual manera, se determina un incremento en las propiedades mecánicas del conjunto de material de lleno con las llantas, por lo que se considera económicamente viable respecto a soluciones con geotextil o concreto reforzado.

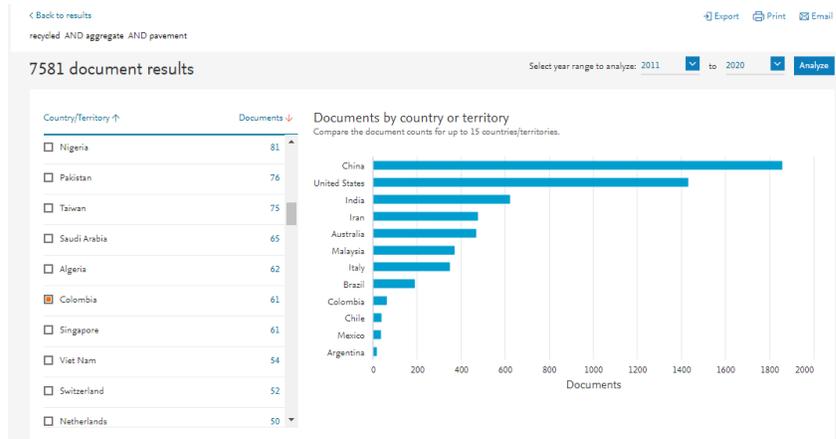
En el mismo proyecto de investigación en el que se enmarca esta tesis de Maestría, a partir de ensayos sobre el modelo físico, Mendoza Rojas (2020) realiza un análisis para determinar módulos resilientes, tanto por retro cálculos, como por modelación numérica mediante el método de elementos finitos, donde se concluye que se obtienen módulos superiores a los que presenta una base granular sin tratar, dando unas primeras luces el buen desempeño de la alternativa que aquí se estudia, desde el punto de vista del comportamiento mecánico.

Con base en el análisis de todas las investigaciones previas mencionadas, se puede apreciar que si bien, el tema del uso de agregados reciclados presenta un auge investigativo en la comunidad mundial, las aplicaciones han estado muy direccionadas hacia la fabricación de concretos para uso estructural, más que en la conformación de capas de pavimento. Algo similar ocurre con la reutilización de llantas de desecho, donde las aplicaciones han estado enfocadas hacia su uso en condición triturada, como remplazo de una fracción granular para la preparación de concretos. Las experiencias exitosas del uso de neumáticos desechados completos se han enfocado hacia estructuras de contención. Las pocas experiencias internacionales en obras viales se centran en la construcción de capas de neumáticos que requieren ser rellenos con material pétreo triturado de muy buenas especificaciones, proveniente de la explotación de canteras.

El uso de agregados reciclados de RCD bajo condición de confinamiento, y delimitando su uso para pavimentos, es un tema poco estudiado, y especialmente en nuestro país y nuestra región, es un tema de escasa o nula investigación.

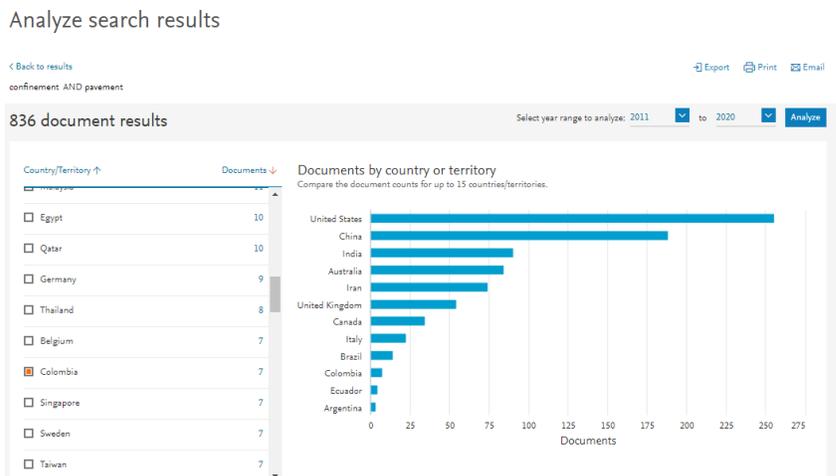
Como soporte a lo anterior, mediante un análisis bibliométrico con palabras claves que definen esta investigación, se puede identificar que tan estudiado ha sido el tema, tanto a nivel mundial, como a nivel regional y nacional. Para dicho análisis, se utiliza la página www.scopus.com y se determina un periodo de diez años, comprendido entre 2011 y 2020. Los resultados pueden verse en las figuras: Figura 1-2, Figura 1-3, Figura 1-4, y Figura 1-5.

Figura 1-2: Búsqueda “recycled”, “aggregate” y “pavement” por país.



Fuente: www.scopus.com

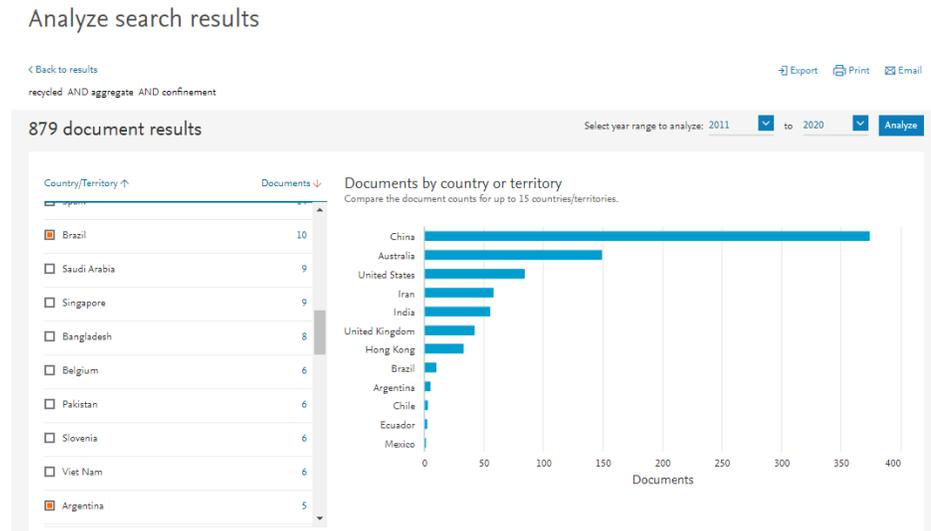
Figura 1-3: Búsqueda “confinement” y “pavement” por país.



Fuente: www.scopus.com

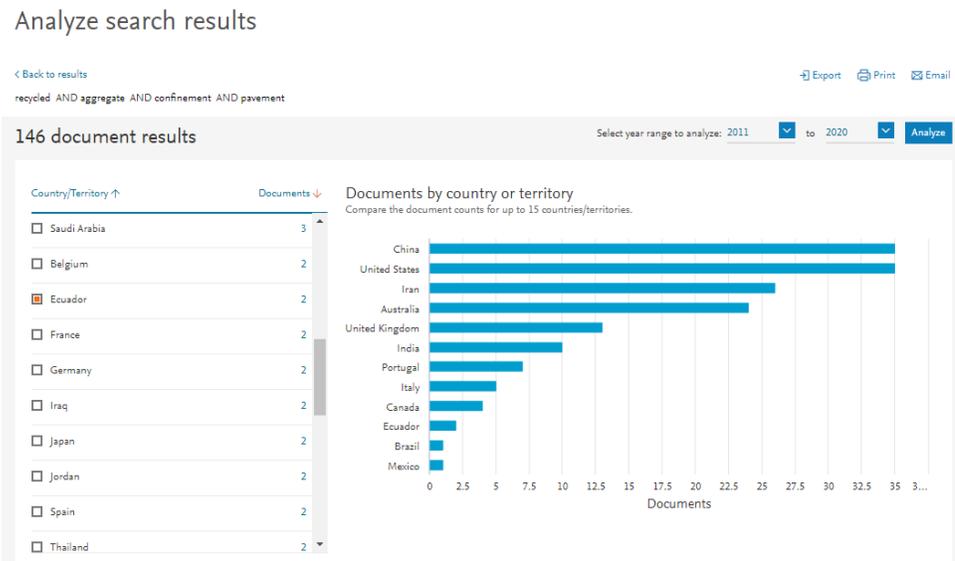
14 Estudio del agregado reciclado de residuos de construcción y demolición, en celdas de confinamiento con llantas desechadas, para la construcción de obras viales en Colombia

Figura 1-4: Búsqueda “recycled”, “aggregate” y “confinement” por país.



Fuente: www.scopus.com

Figura 1-5: Búsqueda “recycled”, “aggregate”, “confinement” y “pavement” por país.

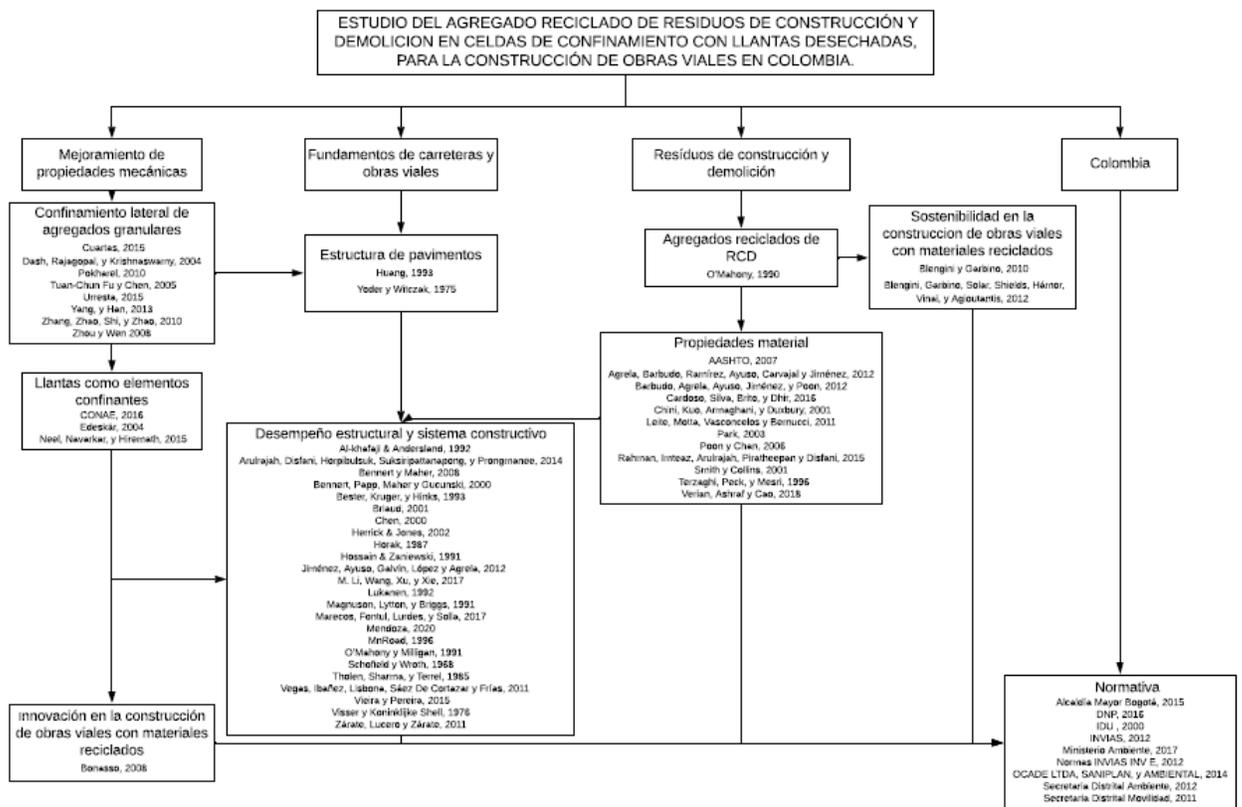


Fuente: www.scopus.com

2. Marco teórico y normativo

El marco teórico se encuentra sustentado por un mapa de literatura siguiendo la metodología de investigación de Creswell, (2007), según se muestra en la Figura 2-1.

Figura 2-1: Mapa de literatura.



Fuente: Propia.

2.1 Residuos de construcción y demolición

Los residuos de la construcción son todos los sólidos resultantes de actividades de construcción, remodelación y reparación de unidades residenciales, edificaciones comerciales y otras estructuras civiles (O'Mahony, 1990).

2.1.1 Agregados reciclados de RCD

Los agregados son materiales sólidos granulares, los cuales son usados como parte esencial para la fabricación de un producto de mejores características mecánicas, físicas y químicas, a través de su mezcla con otros materiales o sustancias con propiedades aglomerantes o a través de procesos mecánicos que los consoliden con ayuda del agua (Terzaghi, Peck, y Mesri, 1996; Smith y Collins, 2001).

Se tiene que los agregados reciclados de los residuos de la demolición y construcción son los materiales sólidos granulares, extraídos y recuperados de los desechos de construcción y demolición para su uso como material bruto para construcción.

O'Mahony (1990) propuso que estos agregados reciclados eran una opción viable para ser usados en la construcción de obras civiles debido al alto potencial que presentan, desde sus características como material virgen hasta las características remanentes después de su uso.

2.1.2 Caracterización de materiales

Se entiende como caracterización de materiales a la determinación de las características que rigen el comportamiento de una partícula o grano del elemento a través del estudio de sus propiedades; estas pueden ser físicas, químicas, térmicas, ópticas, mecánicas, etc. (Terzaghi et al., 1996).

Dentro de las propiedades de los agregados reciclados que más énfasis se ha dado para su caracterización como material para construcción se tienen:

- **Gravedad específica**

La gravedad específica es la relación entre la masa o peso de una unidad de volumen de material respecto a la masa o peso de un mismo volumen de agua (AASHTO, 2007).

O'Mahony (1990) concluyó que los agregados reciclados del concreto presentaban una gravedad específica menor que los agregados naturales del mismo tamaño. Esto ha sido corroborado posteriormente por otros investigadores. (Chini et al., 2001; Park, 2003; Poon

y Chan, 2006; Leite et al., 2011; Agrela et al., 2012; Barbudo et al. 2012; Rahman et al., 2015). Esto, puede deberse al mortero adherido a los agregados reciclados, el cual tiene una menor densidad que el agregado natural, haciendo que presenten una menor densidad y una mayor porosidad (Cardoso et al., 2016).

- **Absorción de agua**

La absorción de agua corresponde al incremento de la masa del agregado debido al agua en los poros y fisuras que presenta el material al llenar el volumen de vacíos (AASHTO, 2007).

O'Mahony (1990) encontró que los agregados reciclados presentan una mayor absorción de agua que los agregados naturales. Atribuido a diversos factores entre los que destacan: su mayor porosidad comparado con los agregados naturales, la presencia de materiales cerámicos como ladrillos y tejas, y el porcentaje relativo de mortero y material cementante (Poon y Chan, 2006; Leite et al., 2011; Barbudo et al., 2012; Jiménez et al., 2012; Cardoso et al., 2016; Verian et al., 2018).

- **Textura y forma de partículas**

O'Mahony (1990) determinó que presentan una textura más rugosa que los agregados naturales. Esto, sin embargo, depende de la fuente de origen del material reciclado; los agregados reciclados de origen de materiales cerámicos presentan granos planos, los de concreto reciclado y roca triturada presentan granos cúbicos. También depende del procesamiento del material en planta, y de la cantidad de veces que se trituró el material (Cardoso et al., 2016; Leite et al., 2011; Park, 2003; Verian et al. 2018).

- **Durabilidad**

La durabilidad del agregado corresponde a la resistencia del material al desgaste por acción de agentes externos, ya sean físicos o químicos (Terzaghi et al., 1996). Se evalúa por medio del ensayo de desgaste en máquina de Los Ángeles (LA).

O'Mahony (1990) determinó que los RCD presentan una durabilidad aceptable para diversos usos en la construcción, si bien no presenta el mismo desempeño que los agregados naturales al presentar desgastes mayores. Este bajo comportamiento mecánico

respecto a los otros materiales fue verificado por posteriores investigaciones (Barbudo et al., 2012; Arulrajah et al., 2014; Vieira y Pereira, 2015). Uno de los aspectos que más influyen en este comportamiento, es el porcentaje de mampostería en el agregado reciclado y el mortero adherido a los agregados que tiende a quebrarse por desgaste (Barbudo et al., 2012; Verian et al., 2018).

2.2 Fundamentos de carreteras y obras viales

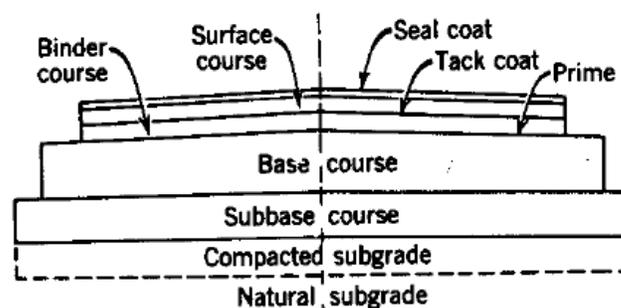
Al proponerse el uso de agregados reciclados en la construcción de obras viales, se hace necesario establecer una base teórica del comportamiento del agregado reciclado como material para carreteras.

2.2.1 Estructura de pavimento

Consiste en un conjunto de capas homogéneas de materiales granulares seleccionados, cuyas principales funciones consisten en proporcionar una superficie uniforme donde se pueda transitar, resistente a la acción del tráfico, al medio ambiente y otras solicitudes, además de transmitir los esfuerzos adecuadamente a la sub-rasante o suelo de cimentación, evitando que esta se deforme por las cargas (Yoder y Witczak, 1975).

Estas estructuras se clasifican entre pavimentos flexibles, rígidos y en afirmado, dependiendo de las propiedades de la capa de rodadura. Entre las capas que conforman la estructura de pavimento, se distinguen; la capa de rodadura, las capas granulares de base y sub-base, cada una con una composición y funcionalidad diferente que las distingue, se puede apreciar un esquema en la Figura 2-2.

Figura 2-2: Estructura de pavimento.



Fuente: Yoder y Witczak, (1975).

La capa de rodadura puede estar compuesta por concreto hidráulico, asfáltico, adoquines, empedrados o afirmados (vías destapadas); estas últimas son las que tradicionalmente conforman la red vial terciaria en nuestro país.

La base es la capa de material agregado inmediatamente inferior a la capa de rodadura de la estructura de pavimento para pavimentos flexibles; debe poseer alta resistencia a la deformación para sostener las grandes presiones impuestas sobre la superficie (Yoder y Witczak, 1975). Debe incrementar la capacidad de soporte de carga del pavimento, al proveer resistencia a la estructura, además de permitir la distribución de los esfuerzos en las capas inferiores, y proveer drenaje adecuado (Huang, 1993).

La sub-base es la capa de material agregado entre la capa de base y la sub-rasante para el caso de pavimentos flexibles, o entre la capa de rodadura y la sub-rasante para el caso de pavimentos rígidos (Yoder y Witczak, 1975). Entre las funciones se encuentra la prevención de bombeos, prevenir el cambio volumétrico de la sub-rasante, incrementar la capacidad estructural, drenaje, entre otros (Huang, 1993).

Esta sucesión de capas de pavimento se encuentra cimentada en la subrasante, la cual puede ser el terreno natural, o una capa de suelo con algún mejoramiento para incrementar la capacidad de soportar carga o para controlar las deformaciones.

2.2.2 Desempeño de materiales en estructura de pavimento

Considerando todos estos aspectos del comportamiento mecánico, que se revisaron en los resultados obtenidos de investigaciones previas, se establece un fundamento teórico útil para sustentar, posteriormente, la idea de utilizar agregados reciclados de RCD como material de construcción para obras viales en Colombia

Dentro del comportamiento mecánico de la estructura de pavimento, se destacan los siguientes aspectos:

- **Capacidad de soporte**

Es la capacidad de la capa de suelo o estructura para soportar cargas aplicadas directamente por el tránsito vehicular y se considera como una de las propiedades

mecánicas que gobierna el comportamiento de una estructura de pavimento (Terzaghi et al., 1996). Para el caso de vías en afirmado, este no es un criterio fundamental, debido a los bajos volúmenes vehiculares que transitan.

O'Mahony y Milligan, (1991) llegaron a la conclusión de que, en general, los materiales reciclados podían usarse como agregado de capa granular de pavimento según sus resultados de capacidad portante determinado en la prueba CBR (California Bearing Ratio), los cuales eran inferiores de los agregados naturales, aunque cumplían con un buen grado de soporte. Estos resultados se han ido comprobando por diversos autores (Chini et al., 2001; Poon y Chan, 2006).

Esta aceptable capacidad de soporte se debe a la disposición de partículas y fuerzas inter-particulares, además de una reacción puzolánica entre los agregados más finos y las partículas de cemento existentes que no habían sido hidratadas (Agrela et al., 2012; Arulrajah et al., 2014; Barbudo et al., 2012; Cardoso et al., 2016; Jiménez et al., 2012; Vegas et al., 2011; Verian et al., 2018; Vieira y Pereira, 2015).

- **Energía y humedad óptima de compactación**

Se entiende la compactación como el proceso ejercido a las partículas de la capa de material para ponerlas en contacto entre ellas y eliminar el volumen de aire, aumentando la densidad de la capa, la capacidad de soporte y estabilidad de la estructura, generalmente con la adición de agua como aglutinante. La energía de compactación consiste en la energía requerida para poder forzar el desplazamiento de las partículas, reduciendo el aire en la mezcla, hasta una condición óptima donde se consiga la mejor capacidad de soporte y resistencia de la capa granular (Terzaghi et al., 1996).

La humedad óptima de compactación es el contenido de humedad que debe tener la mezcla para obtener la densidad óptima cuando se aplique el proceso de compactación (Terzaghi et al., 1996).

O'Mahony y Milligan, (1991) encontraron que los materiales reciclados requerían humedades óptimas mayores a los agregados naturales, implicando una mayor cantidad de agua en la mezcla para obtener un óptimo grado de compactación. Este supuesto ha

sido comprobado por diversos autores (Leite et al., 2011; Agrela et al., 2012; Cardoso et al., 2016).

Este contenido puede llegar a ser mayor a medida que aumenta la cantidad de materiales de origen arcilloso como ladrillos triturados, debido a la alta absorción de agua y la poca densidad de partículas. (Poon y Chan, 2006; Vegas et al., 2011; Vieira y Pereira, 2015).

De igual manera, estos agregados requieren mayor energía de compactación respecto a los agregados naturales para poder alcanzar el grado de densidad óptima; atribuible a que entre mayor grado de compactación se aplique, se irán rompiendo las partículas de mortero adheridas a los agregados (Park, 2003; Vegas et al., 2011).

- **Módulo de resiliencia**

Se entienden como deformaciones resilientes o elásticas a las deformaciones de recuperación instantánea en la estructura, bajo carga móvil con ciertos números de ciclos de carga y descarga (Yoder y Witczak, 1975). Se define el módulo de resiliencia a la relación entre el esfuerzo dinámico y la deformación resiliente (Bester, Kruger, y Hinks, 1993).

Se ha concluido que los materiales reciclados presentan altos módulos de resiliencia, comparados con los materiales naturales usados en la construcción de pavimentos (Park, 2003; Poon y Chan, 2006). Esto sucede por el alto ángulo de fricción interna de los materiales reciclados, que a su vez mejoran la resistencia al corte, además de las propiedades auto cementantes de las partículas de cemento que no se hidrataron en su uso anterior (Cardoso et al., 2016; Leite et al., 2011; Vieira y Pereira, 2015).

- **Permeabilidad**

Se refiere a la presencia de vacíos continuos que permiten el libre flujo de fluidos a través de la estructura (Terzaghi et al., 1996). Para el buen funcionamiento de una capa de estructura de pavimento, se requiere que el material asegure un adecuado drenaje para evitar bombeos y fallas de la estructura.

Bennert y Maher, (2008) identificaron que las capas con agregados reciclados presentaban una permeabilidad similar a la que presentaban las capas conformadas con agregados

naturales, si bien seguían siendo de menor desempeño. Esto posiblemente atribuible a una mayor presencia de finos por la trituración del mortero adherido cuando se compactan los agregados para obtener la densidad óptima. Rahman et al. (2015) indican que los residuos reciclados presentan mayor conductividad hidráulica que los agregados naturales, atribuible a una mayor cantidad de poros en el material. De manera que esta propiedad todavía no está bien definida y requiere más investigación.

- **Deflexión**

La deflexión indica el grado en que la estructura de pavimento se deforma bajo la aplicación de una carga sobre las capas, ya sea estática o dinámica, y esta se determina a partir del desplazamiento vertical de la superficie (Yoder y Witczak, 1975).

Bennert, Papp, Maher y Gucunski, (2000) determinaron que las deflexiones obtenidas en su investigación eran bajas. Park, (2003) encontró que presentaban similares o incluso menores deflexiones que las capas con agregados naturales. Esto puede deberse a la rugosidad de los agregados, que permiten una mejor fricción inter-particular y a una consecuente redistribución de cargas, además de que este tipo de agregados es más susceptible a romperse por lo que se densifican las capas de la estructura (Jiménez et al., 2012). Al presentar menores deflexiones en el tiempo, se puede esperar que la estructura tenga un mayor tiempo de vida útil que una construida con agregados naturales (Cardoso et al., 2016).

- **Esfuerzo-Deformación y módulo elástico**

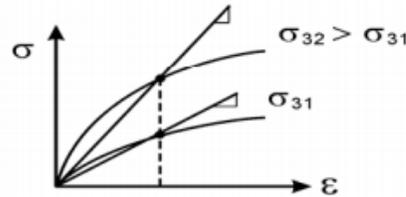
El módulo de un suelo es uno de los parámetros de suelo más difíciles de estimar porque depende de muchos factores. La elasticidad supone que las deformaciones experimentadas por el suelo están relacionadas linealmente con los esfuerzos aplicados.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que el módulo no es directamente la pendiente de la curva de esfuerzo-deformación; sin embargo, la pendiente de la curva está relacionada con el módulo y es conveniente asociar la pendiente de la curva de deformación a un módulo.

Si la pendiente se dibuja como la línea que une puntos después de una carga adicional a la inicial, entonces se obtiene la pendiente de descarga S_u y se calcula a partir del módulo de descarga E_u . Este módulo se utiliza para calcular el rebote de un pavimento después de la carga por un neumático de camión (módulo resiliente).

El proceso de carga induce esfuerzos en el suelo. En un punto y en cualquier momento dado en una masa de suelo hay un conjunto de tres esfuerzos normales principales. La media de estos tres esfuerzos tiene una influencia significativa en el módulo del suelo. Esto también se llama efecto de confinamiento. Cuanto mayor sea el confinamiento, mayor será el módulo del suelo, ver Figura 2-3 (Briaud, 2001).

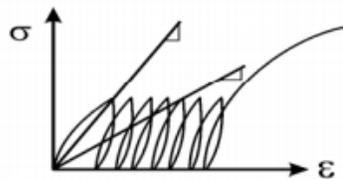
Figura 2-3: Curvas esfuerzo-deformación a diferente confinación.



Fuente: Briaud (2001).

Si el proceso de carga se repite varias veces, la cantidad de ciclos aplicados influirá en el módulo del suelo. Nuevamente refiriéndose al módulo secante, cuanto mayor sea el número de ciclos, menor será el módulo. Esto es consistente con la acumulación de movimiento con un número creciente de ciclos, ver Figura 2-4 (Briaud, 2001).

Figura 2-4: Curvas esfuerzo-deformación por ciclos de carga.



Fuente: Briaud, (2001).

Para los pavimentos, el nivel medio de esfuerzo en la subrasante es relativamente bajo. La presión aplicada al pavimento es del orden de 200 kPa para neumáticos de automóviles, 500 kPa para neumáticos de camiones y 1700 kPa para neumáticos de aviones. De igual

manera, el esfuerzo vertical en la parte superior del subsuelo debajo de un pavimento diseñado adecuadamente puede ser solo una décima parte de la presión de los neumáticos aplicada en la superficie del pavimento. El nivel de deformación es muy bajo porque el propósito del pavimento es limitar las deformaciones a largo plazo a movimientos medidos en milímetros, si no en décimas de milímetros. La cantidad de ciclos está vinculada a la cantidad de vehículos que viajan en el pavimento durante la vida útil del pavimento. Los valores de módulo típicos varían de 20MPa a 150 MPa (Briaud, 2001). En la Tabla 2-1, se presentan valores de módulos elásticos reportados en la literatura técnica.

Tabla 2-1: Valores típicos de módulo para diferentes capas.

MATERIAL	MÓDULO DE ELASTICIDAD (MPa)
<i>Concreto asfáltico</i>	3500
<i>Concreto de cemento portland</i>	35000
<i>Base tratada con cemento</i>	4100
<i>Base sin tratar</i>	200
<i>Subbase sin tratar</i>	100
<i>Suelo-cemento</i>	350
<i>Arcillas blandas</i>	35
<i>Arcillas muy blandas</i>	20
<i>RCD</i>	270

Fuente: Adaptado de Huang (2004) y Dandekar y Kulkarni (2018)

2.2.3 Sistema constructivo

Los métodos constructivos convencionales se basan en la colocación secuencial de capas de material sobre la calzada, que se compactan para lograr su mayor nivel de densificación. Uno de los retos más importantes de esta investigación tiene que ver con planteamiento de un nuevo método constructivo de un sistema modular conformado por hileras de celdas de llantas rellenas de RCD, geométricamente distribuidas sobre la calzada, que permita potenciar la capacidad de soporte, durabilidad y confort. Es de esperarse que con este método se demande mayor mano de obra no especializada, brindando así oportunidades laborales a las comunidades durante los procesos constructivos, redundando en beneficios sociales.

2.2.4 Ensayos in situ para pavimentos

En este apartado se incluye la descripción de las pruebas que se utilizarán en esta investigación, para evaluación de una estructura de pavimento in situ construida a modo de modelo físico. Se incluyen las pruebas de penetración dinámica con cono (PDC) y deflectómetro de impacto, principalmente. Es obvio que para un determinado proyecto no todas las pruebas son necesarias (Al-khafaji & Andersland, 1992).

- **Penetrómetro Dinámico de Cono**

El penetrómetro dinámico de cono (PDC), o en inglés Dynamic Cone Penetrometer (DCP), es una herramienta económica y fácilmente transportable. Este método de prueba se utiliza para evaluar la resistencia in situ de suelos inalterados y/o materiales compactados. El PDC se debe mantener verticalmente, por lo tanto, se usa típicamente en aplicaciones de construcción horizontal como pavimentos. Este instrumento se usa típicamente para evaluar las propiedades del material hasta una profundidad de 1000 mm. El PDC se puede usar para estimar las características de resistencia de suelos de grano fino y grueso, materiales de construcción granulares y materiales débiles estabilizados o modificados (ASTM D6951M-09,2009).

La penetración del PDC se puede utilizar para estimar el CBR in-situ; para inferir espesores de las capas; así como para estimar la resistencia al corte de las capas y otras características de los materiales que la constituyen (INV E 172, 2012).

El PDC consta de los siguientes componentes, ilustrados en la Figura 2-5:

- Una varilla de transmisión de acero de 16 mm de diámetro con un punto reemplazable o desechable.
- Una punta cónica.
- Un martillo de 8 kg que se deja caer una altura fija de 575 mm.
- Un conjunto de acoplador.
- Un mango.

El operador introduce la punta del PDC al suelo levantando el martillo deslizante hacia el mango y luego soltándolo. La penetración total para un número dado de golpes se mide y registra en mm / golpe, que luego se usa para describir la rigidez (ASTM D6951M-09,2009).

Figura 2-5: Penetrómetro Dinámico con Cono - PDC.

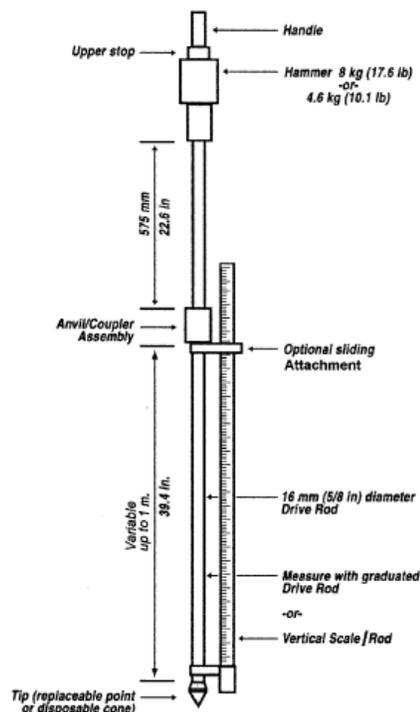


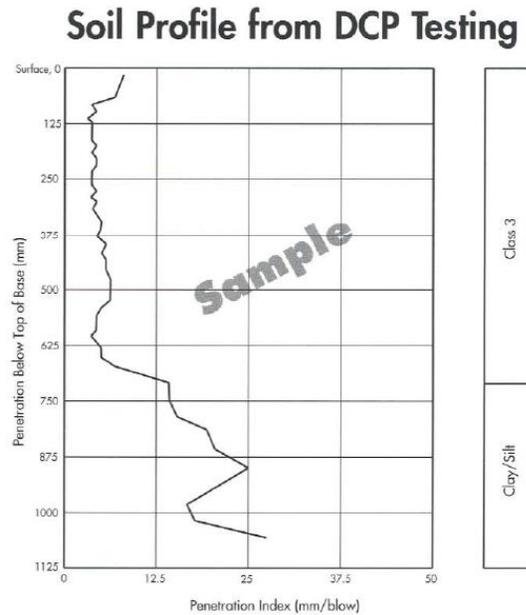
FIG. 1 Schematic of DCP Device

Fuente: ASTM D6951M-09,2009.

La resistencia del suelo se determina midiendo la penetración del eje inferior en el suelo después de cada caída de martillo. Este valor se conoce como el índice de penetración. El índice de penetración se puede trazar frente a la profundidad para identificar el grosor y la resistencia de las diferentes capas del pavimento o se puede correlacionar con otros parámetros de resistencia del suelo, como el CBR. Para definir los límites de la capa en una estructura de pavimento, se debe desarrollar una gráfica del índice de penetración versus la profundidad, como se aprecia en la Figura 2-6. El gráfico mostrará claramente un perfil de la profundidad y la capacidad de soporte relativa de las diferentes capas (MnRoad, 1996).

Los penetrómetros dinámicos suministran una cantidad conocida de energía cinética al penetrómetro, lo que hace que el penetrómetro se desplace a través del suelo. La distancia de penetración depende de la energía cinética aplicada al penetrómetro, la geometría de la punta del penetrómetro y la resistencia a la penetración del suelo (Herrick & Jones, 2002).

Figura 2-6: Ejemplo muestreo PDC.



Fuente: MnRoad (1996).

- **Deflectómetro de Impacto**

El deflectómetro de impacto, falling-weight deflectometer (FWD), es una herramienta usada para determinar las propiedades estructurales de los pavimentos de carreteras. Sus características de carga y tiempo de carga, representan la carga del tráfico pesado. La carga se aplica mediante una masa que cae sobre un conjunto de resortes que se montan en una placa, que descansa sobre la superficie del pavimento (Visser y Koninklijke Shell, 1976).

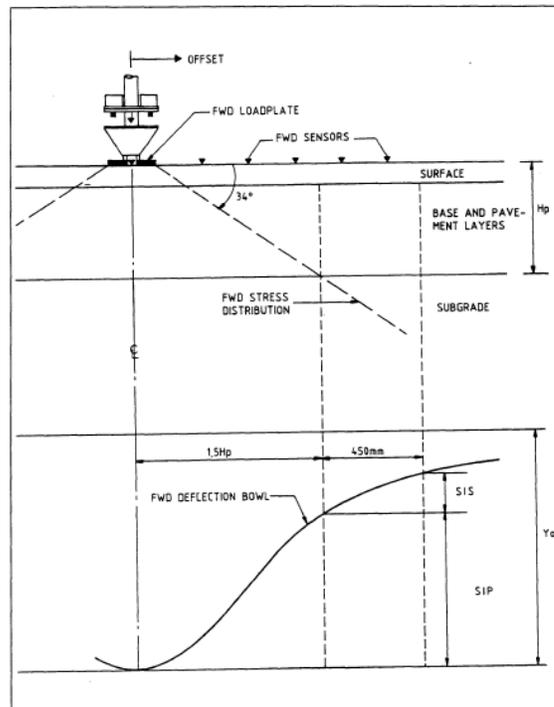
El impacto genera la fuerza que se transmite al pavimento a través de una placa de contacto. Un resorte situado entre la masa que cae y el soporte de impacto amortigua el impacto al desacelerar la masa. Cuanto mayor es la desaceleración, mayor es la fuerza generada. La cantidad de fuerza generada es una función de la rigidez del conjunto de resortes, la cantidad de masa y su velocidad cuando golpea el conjunto de resortes, más cualquier amortiguación que pueda ser parte del sistema (Lukanen, 1992).

La respuesta del pavimento a la carga se caracteriza por la deflexión máxima y la forma de la cuenca de deflexión. Esta última, se caracteriza por la relación de la deflexión registrada, a diferentes distancias del punto de aplicación la carga, a manera ilustrativa se presenta la Figura 2-7. La deflexión del pavimento y la cuenca de deflexión, están

determinados por geófonos (transductores de velocidad) en el centro del área cargada y a ciertas distancias del centro (Visser y Koninklijke Shell, 1976).

Los parámetros de la cuenca de deflexión se usan ampliamente para tres aplicaciones principales: (a) para verificar la integridad estructural de los pavimentos en servicio, (b) para relacionarse con la respuesta crítica del pavimento, y (c) para calcular los módulos de capa in situ de los pavimentos (Hossain & Zaniewski, 1991).

Figura 2-7: Falling Weigh Deflectometer - FWD.



Fuente: Rohde (1994).

Los pulsos de tiempo de carga del FWD, se transforman frecuencias utilizando el principio de superposición. Los pulsos transitorios se expresan como una suma de funciones armónicas en el tiempo que interfieren entre sí de tal manera que se replican estrechamente la forma del pulso original (Magnuson, Lytton, y Briggs, 1991).

Las señales del transductor utilizadas para registrar las desviaciones, se muestran en una pantalla para permitir que el operador verifique rápidamente el funcionamiento correcto de los equipos e instrumentos. La ubicación de los puntos en los que se miden las deflexiones

se registra tanto longitudinalmente como transversalmente con respecto a la geometría de la carretera.

Los principios son los siguientes: la estructura del pavimento está representada por un sistema elástico lineal multicapa en el que los materiales son homogéneos e isotrópicos y se caracterizan por el módulo de elasticidad de Young y la relación de Poisson. En la mayoría de los casos, la estructura puede considerarse como un sistema de tres capas que consiste en una capa superior unida, una capa base no unida o cementada y una subrasante. Para simplificar el sistema, se adoptan valores fijos para ν para todas las capas. Se supone que la carga de prueba se distribuye uniformemente en una o más áreas circulares (Visser y Koninklijke Shell, 1976).

Ensayos en Europa y en los Estados Unidos demostraron que la respuesta de carga con el FWD era muy cercana de las condiciones del mundo real, y, por lo tanto, el FWD se promovió como un buen sistema de prueba. Los FWD proporcionan una forma de impulso de fuerza que tiende a simular las cargas de las ruedas móviles mejor que otros dispositivos (Tholen, Sharma, y Terrel, 1985).

Las deflexiones de la superficie medidas bajo las pruebas FWD se utilizan para evaluar la capacidad de la estructura del sistema de pavimento y volver a calcular los módulos de las capas del pavimento. Sin embargo, se necesitan modelos mecanicistas precisos para analizar los resultados de las pruebas FWD, considerando la interacción entre la carga, el medio ambiente y la estructura del pavimento (M. Li, Wang, Xu, y Xie, 2017).

Utilizando los valores de deflexión medidos por el FWD y los espesores de capa, se puede estimar el módulo de cada capa. La confiabilidad de los módulos estimados del pavimento depende de la precisión de los datos de espesor de las capas (Marecos, Fontul, Lurdes, y Solla, 2017).

A partir de la cuenca de deflexión obtenida, se han propuesto diferentes parámetros, a partir de estos, es posible establecer una medida de la capacidad estructural de un pavimento.

Una alta deformación bajo el centro de aplicación de carga (deflexión máxima d_0), puede indicar una baja capacidad de soporte de alguna de las capas de la estructura de pavimento y/o de la subrasante. Zárate, Lucero y Zárate (2011), analizaron más de 20 tramos viales en México, encontrando para pavimentos flexibles, deflexiones máximas entre 0.076 y 1.78 mm, siendo valores superiores a 0.75 mm un indicativo de estructuras y/o subrasantes débiles. Sin embargo, se debe tener en cuenta que estructuras con cuencas de deflexión totalmente diferentes y con respuestas estructurales distintas, pueden tener el mismo valor de deflexión máxima, por lo que es necesario analizar otros indicadores para hacer un juicio integral de la condición estructural de un pavimento (Horak, 1987).

El área normalizada de la cuenca, es un parámetro propuesto por Hoffman y Thompson (1981), quienes formularon inicialmente la ecuación para el caso de 4 sensores separados 0.3 m entre sí. Este índice representa una sección equivalente a la mitad de la cuenca, comprendida desde el eje de aplicación del impacto hasta una distancia de 0.9 m de este punto.

$$\text{Área (m}^2\text{)} = 150 * \frac{(d_0 + 2d_1 + 2d_2 + d_3)}{d_0}$$

Zárate et al. (2011) indican que el valor máximo ocurre cuando las cuatro deflexiones son iguales, lo que refleja un pavimento rígido. Según su investigación, el valor mínimo correspondería a 280 m^2 , para un pavimento débil, cuyo módulo de elasticidad es semejante al de la subrasante.

En la norma ASTM D5858-96 (ASTM D5858-96, 2015), se establece la ecuación general para el caso de múltiples sensores con separaciones variables.

$$\text{Área} = \frac{\text{Dist}_2}{2} + \left[\frac{\sum_{i=2}^{n-1} d_i (\text{Dist}_i + \text{Dist}_{i+1})}{2d_0} \right] + \left[\frac{\text{Dist}_n d_n}{2d_0} \right]$$

Dónde: n , número de sensores usados para definir la cuenca.

Dist, distancias entre el sensor en la posición del subíndice y el anterior.

d , deflexión medida en cada punto.

2.3 Confinamiento lateral de agregados granulares

En esta investigación se busca mejorar las propiedades de los materiales reciclados para la construcción de capas de estructura de pavimento, a partir de proveer confinamiento lateral a los agregados. A partir de investigaciones realizadas en capas de material reforzadas con elementos como geotextiles, principalmente geoceldas, sometidas a cargas estáticas y dinámicas, se ha logrado identificar como funciona este reforzamiento, que permite conocer y plantear metodologías de diseño y construcción.

2.3.1 Efecto de confinamiento

El principal resultado de este efecto, es que el movimiento de las partículas contenidas, se ven lateralmente restringido, de igual manera, el movimiento vertical se reducido, esto debido a la fricción entre el material de relleno y la pared de la celda o elemento confinante, además de que, la base actúa como una matriz que impide el movimiento hacia arriba del suelo inferior, en áreas ajenas a donde se está aplicando la carga (Pokharel, 2010) a manera ilustrativa se presenta la Figura 2-8.

Figura 2-8: Efecto de confinamiento.



Fuente: Yang y Han. (2013).

2.3.2 Efecto de membrana tensionada

Este efecto se refiere a la tensión desarrollada en la geocelda curvada para resistir cargas verticales (Dash, Rajagopal, y Krishnaswamy, 2004), redistribuyendo la carga de ahuellamiento en un área mayor, y reduciendo la formación de huella a valores prácticamente nulos. Según Zhou y Wen (2008), se presenta un incremento en la capacidad de resistencia de la estructura, reduciendo los esfuerzos en la subrasante, esto debido a la rigidez del material, de manera que el material curvado, ejerce una fuerza hacia

arriba, aumentando la resistencia de la matriz a la vez que se reduce el esfuerzo en el subsuelo.

2.3.3 Distribución de esfuerzos

Debido a la interacción entre el material de relleno y la geocelda, las partículas en contacto con la subrasante se encuentran restringidas, y la matriz reforzada actúa como una nueva superficie que redistribuye la carga en un área más amplia sobre el subsuelo, haciendo que la presión en la subrasante sea menor en comparación con estructuras sin este reforzamiento (Zhang, Zhao, Shi, y Zhao, 2010).

2.3.4 Incremento en la rigidez y capacidad portante del suelo reforzado

La combinación de los efectos previamente mencionados, genera un mejor comportamiento mecánico de la estructura (Pokharel, 2010). Igualmente, se determina una relación directa entre el módulo elástico del material de confinamiento y la mejora obtenida por el reforzamiento de la estructura, debido a que el incremento en la rigidez de las bases granulares reforzadas, aumenta la capacidad de soporte de la estructura.

Así mismo, el confinamiento protege de las afectaciones por agentes ambientales como el agua y el viento, evita el incremento de vacíos en la capa por el desplazamiento lateral de las partículas por transporte y lavado, que debilitan mecánicamente las capas y causan el consecuente fallo de la estructura (Tuan-Chun Fu y Chen, 2005).

Por lo que, al tener mayor confinamiento lateral, no se requieren agregados con las calidades exigidas por las normativas actuales, que resultan de difícil consecución y generan fuerte impactos ambientales para su extracción. En su lugar, se pueden reutilizar los RCD que aportan buen desempeño estructural y funcional.

2.3.5 Llantas como elementos confinantes

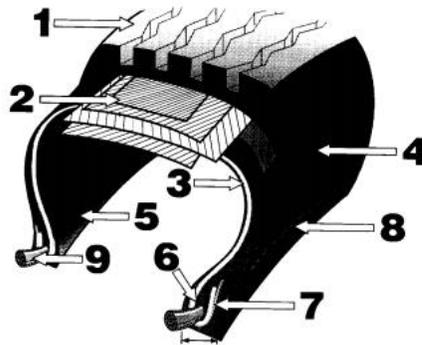
El confinamiento a los materiales granulares puede darse a través un sistema de celdas articuladas conformadas por llantas desechadas.

Las llantas presentan un gran desempeño por su flexibilidad, resistencia y capacidad volumétrica (Neel et al., 2015). De igual manera, los materiales que componen la estructura de las llantas permiten altas deformaciones de los mismos por su naturaleza elástica, llegando a ser altamente flexible, resistente al desgaste, y a los esfuerzos de compresión y tensión (Edeskär, 2004).

Bonasso, (2008) elaboro una prueba de ensayo utilizando llantas recicladas para confinar material definido como agregado confinado, consistente en agregado pétreo adherido mediante confinamiento lateral, el cual concluye presenta buenas capacidades de resistencia y desempeño mecánico, con bajas deflexiones a altos esfuerzos y una buena distribución de los mismos.

Una llanta radial estándar está conformada por las siguientes partes, según la Figura 2-9:

Figura 2-9: Secciones de llanta estándar.



Fuente: CONAE, 2016

- **1. Banda de rodamiento:**

Corresponde a la superficie, generalmente de caucho, de la llanta, que interactúa con el camino, proporcionando tracción y frenado, por medio de una superficie irregular.

- **2. Cinturón (estabilizador):**

Corresponde a capas generalmente de acero, y su función es dar resistencia a la llanta, estabilizar la banda de rodadura, y brindarle protección contra perforaciones.

- **3. Capa radial:**

En conjunto con el cinturón, contienen la presión del aire, adicionalmente, se encarga de transmitir las fuerzas generadas por la carga, el frenado y el cambio de dirección, con la banda de rodadura.

- **4. Costado (pared):**

El caucho del costado está compuesto para resistir a los efectos de la flexión y el clima, protegiendo a su vez a la capa radial.

- **5. Sellante:**

Capa de caucho especial, preparado para resistir la difusión del aire.

- **6. Relleno:**

Pieza de caucho, que se usa para llenar el área entre el talón y la parte inferior del costado, proporcionando una transición suave del área rígida del talón, al área flexible del costado.

- **7. Refuerzo de talón:**

Capa colocada sobre el exterior del amarre de la capa radial, en el área del talón, que refuerza y estabiliza la zona de transición entre el talón y el costado.

- **8. Ribete:**

Elemento que se usa para referencial el asentamiento del área del talón sobre el rin.

- **9. Talón:**

Cuerpo de alambres de acero de alta resistencia, utilizado para formar una sección de gran robustez. El talón es el ancla de cimentación de la carcasa, lo que mantiene el diámetro de la llanta en relación con el rin.

2.4 Innovación y sostenibilidad en la construcción de obras viales con materiales reciclados

Transversalmente, se consideran dos aspectos de suma importancia para el desarrollo de la investigación, la innovación y la sostenibilidad, aspectos que se encuentran inmersos y ligados con la propuesta como aporte al conocimiento. Así pues, se deben presentar los fundamentos que permiten comprender mejor este aporte.

2.4.1 Innovación

En Estados Unidos, el ingeniero Samuel Bonasso, (Bonasso, 2008), recibió cuatro patentes relacionadas con su idea de “concreto de agregados confinados”, con el método constructivo Mechanical Concrete®; el cual consiste en concretos con agregados aglutinados, no con el uso de una sustancias ligantes, como el cemento portland, sino por medio de entramamiento mecánico por confinamiento, con un sistema diseñado utilizando

como elemento de refuerzo llantas. Esta idea se encuentra principalmente desarrollada en Estados Unidos, pero poco explorada en otros lugares del mundo, y mucho menos utilizando como material de relleno agregados reciclados de RCD, por lo que presenta una oportunidad de investigar el comportamiento de estos agregados en un sistema constructivo no tradicional.

2.4.2 Sostenibilidad

Blengini y Garbino (2010) introducen el concepto de Sustainable supply mix (SSM), el cual es definido como “la búsqueda de diferentes fuentes de materiales, de acuerdo con económicos, ambientales y eficiencia social. Para juntos maximizar los beneficios en la generación de la cadena de suplencia de agregados.” (Blengini y Garbino, 2010, p.1). Llegan a concluir que los mayores beneficios ambientales del uso de los agregados reciclados de RCD, son la reducción en los espacios para zonas de relleno y reducir la explotación de recursos en canteras; si bien el procesado de los reciclados implica un impacto ambiental por el consumo energético para realizar los procesos de clasificación, triturado, limpieza, entre otros, este consumo energético es menor al de la extracción de agregados en canteras y el transporte de escombros a los rellenos, que se traduce en ganancias ambientales.

Blengini, Garbino, Solar, Shields, Hámor, Vinai, y Agioutantis, (2012) hacen una indicación de la normativa de la Unión Europea 2008/98/EC, conocida como “waste directive”, donde se busca la prevención de generación de desechos, y se incentiva el reuso, el reciclaje y la recuperación de de RCD al 70% en el 2020. Con base en esto, investigan en la reducción del consumo de materias brutas primarias y reducir la dependencia de estos a través de un programa de manejo de los agregados sustentables, sustainable aggregates resource management Project (SARMa), donde concluyen que el reciclaje de RCD permite reducir la explotación de recursos no renovables y reducir las zonas de rellenos, además de que el reciclaje puede convertir a un recurso no renovable en uno renovable, parcialmente.

2.5 Generación de RCD en Colombia

En Colombia, la producción de RCD se estima en 100 mil toneladas por día (Red gestora de residuos, 2016), un equivalente aproximado de más de 65 millones de metros cúbicos

al año. De igual manera, en la ciudad de Bogotá, se generan 14 millones de metros cúbicos de residuos de construcción, anualmente (Red gestora de residuos, 2016).

Es así, que, a nivel nacional, según la Resolución 472 de 2017. “Por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición –RCD y se dictan otras disposiciones.” En el artículo 19. “Metas de aprovechamiento de RCD.” Se fija una meta mínima de aprovechamiento de RCD del 2% en peso del total de los materiales usados en la obra, y el cual debe ir aumentando en 2 puntos porcentuales anualmente, hasta alcanzar un mínimo de 30% de RCD aprovechables (Ministerio Ambiente, 2017b). Ver Figura 2-10.

Figura 2-10: Metas de aprovechamiento de RCD.

Artículo 19. Metas de aprovechamiento de RCD. Los grandes generadores, deberán utilizar RCD aprovechables en un porcentaje no inferior al 2% en peso del total de los materiales usados en la obra, conforme a lo dispuesto en la siguiente tabla:

CATEGORÍA MUNICIPAL	CUMPLIMIENTO DE META
Especial, 1, 2 y 3	1 de enero de 2018
4, 5, y 6	1 de enero de 2023

En los años posteriores se deberá garantizar un incremento anual de dos puntos porcentuales, hasta alcanzar como mínimo un 30% de RCD aprovechables en peso del total de los materiales usados en la obra.

Parágrafo. En el caso de los proyectos, obras o actividades generadoras de RCD sujetos a licenciamiento ambiental, deberán dar cumplimiento a las metas a partir del 1 de enero de 2018.

Fuente: Ministerio Ambiente (2017b).

Sin embargo, según las Especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS. 2012. En el Capítulo 3. Afirmados, sub-bases y bases. En el artículo 300.2 “Materiales”. En el numeral 300.2.1 “Agregados pétreos”, se indica que los agregados para la construcción de afirmados, bases y sub-bases, deben ser naturales clasificados, por lo que no se considera la utilización de agregados reciclados (INVIAS, 2012). Ver Figura 2-11.

Figura 2-11: Especificaciones de agregados pétreos.**300.2 MATERIALES****300.2.1 Agregados pétreos**

Los agregados para la construcción de afirmados, sub-bases y bases serán naturales clasificados, podrán provenir de la trituración de rocas y gravas, o podrán estar constituidos por una mezcla de productos de ambas procedencias, según se establece en el Artículo correspondiente a cada partida de trabajo.

Las partículas de los agregados serán duras, resistentes y durables, sin exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables y sin materia orgánica u otras sustancias perjudiciales.

Los requisitos de calidad, limpieza y grado de trituración que deben cumplir los diferentes materiales a emplear en la construcción afirmados, sub-bases y bases granulares y estabilizadas, se indican en los Artículos respectivos.

Fuente: INVIAS (2012).

De igual manera, en la Resolución 01115 de 2012. Bogotá D.C. “Por medio de la cual se adoptan los lineamientos técnico- ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el distrito capital.” En el artículo 4.” De las entidades públicas y constructoras.” Se define un porcentaje de aprovechamiento para el distrito capital no inferior al 5% del total de volumen o peso del material usado en la obra. Este porcentaje aumentará en 5 puntos porcentuales anualmente, hasta alcanzar un mínimo del 25% (Secretaría Distrital Ambiente, 2012). Ver Figura 2-12.

Figura 2-12: Metas de aprovechamiento de RCD Bogotá D.C.

ARTÍCULO 4º- DE LAS ENTIDADES PÚBLICAS Y CONSTRUCTORAS. Dentro del marco de la Gestión Integral de los Residuos de la Construcción y Demolición- RCD-, a partir de agosto del año 2013, las Entidades Públicas y Constructoras que desarrollen obras de infraestructura y construcción al interior del perímetro urbano del Distrito Capital deberán incluir desde la etapa de estudios y diseños los requerimientos técnicos necesarios con el fin de lograr la utilización de elementos reciclados provenientes de los Centros de Tratamiento y/o Aprovechamiento de RCD legalmente constituidos y/o la reutilización de los generados por las etapas constructivas y de desmantelamiento, en un porcentaje no inferior al 5% del total de volumen o peso de material usado en la obra a construir por la entidad anualmente. Mensualmente deberán reportar a la Secretaría Distrital de Ambiente, a través de su portal web, la cantidad total de materiales usados, y el tipo de productos, volumen y/o peso de material reciclado proveniente de los centros de tratamiento y/o aprovechamiento de RCD que se haya utilizado en el mes anterior al reporte, en las obras de infraestructura o construcción desarrolladas por cada entidad o en desarrollo, indicando además los datos de los centros de aprovechamiento y/o tratamiento de donde provengan dichos materiales.

PARÁGRAFO 1.- Cada año dicho porcentaje aumentará en cinco (5) unidades porcentuales hasta alcanzar mínimo un 25%. En caso de agotamiento comprobado de las reservas de material o que la obra o proyecto no pueda cumplir por razones técnicas con dichos porcentajes deberá, previo al inicio de obra, presentar informe técnico a la Secretaría Distrital de Ambiente, que sustente amplia y suficientemente su cumplimiento por parte del responsable del proyecto.

Fuente: Secretaría Distrital Ambiente (2012).

Sin embargo, en las Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción, para proyectos de infraestructura vial y de espacio público para Bogotá D.C. IDU. 2011. En la Sección 400-11. Capas granulares de base y sub-base. En el numeral 400.2 Materiales. Se define que los materiales granulares para la construcción de capas, pueden

- 38 Estudio del agregado reciclado de residuos de construcción y demolición, en celdas de confinamiento con llantas desechadas, para la construcción de obras viales en Colombia.
-

corresponder a materiales en estado natural clasificados, o podrán estar compuestos por mezclas de agregados naturales con agregados provenientes de trituración de piedra de cantera o grava natural; sin especificar directamente el uso de materiales reciclados (IDU 400-11, 2011). Ver Figura 2-13.

Figura 2-13: Especificaciones de agregados pétreos IDU.

400.2 MATERIALES

Las capas que se construyan en acuerdo a esta Sección deberán estar constituidas por materiales de tipo granular. Dependiendo de su uso y de lo que indiquen los documentos del proyecto, pueden corresponder a materiales en estado natural clasificados o podrán estar compuestos por mezclas de agregados naturales con agregados provenientes de trituración de piedra de cantera o de grava natural.

Fuente: IDU 400-11 (2011).

Dentro de las mismas especificaciones, en la Sección 452-1. Empleo de agregados pétreos a partir de concreto hidráulico reciclado. En la sección 452.3 Materiales. En el numeral 452.3.1 “Agregado proveniente de reciclaje de concreto hidráulico.” Se indica la posibilidad del uso de este material reciclado, siempre y cuando no constituya el 100% de la granulometría en una aplicación específica (IDU 452-11, 2011). Ver Figura 2-14.

Figura 2-14: Empleo de agregados pétreos a partir de concreto hidráulico reciclado IDU.

452.3 MATERIALES

452.3.1 Agregado proveniente del reciclaje de concreto hidráulico

Los agregados serán los resultantes de la selección y trituración mecánica del concreto hidráulico reciclado. Las condiciones de granulometría y demás requisitos serán los indicados en las especificaciones IDU – ET – 2010 de acuerdo a la aplicación específica así:

Rellenos: Sección 320-10

Bases y Subbases: Sección 400-10

Capa de material estabilizado con cemento: Sección 420-10

Capa de material estabilizado con Emulsión Asfáltica: Sección 440-10

Mezclas Asfálticas en Caliente, Densas, Semidensas y Gruesas: Sección 510-10

Pavimento de Losas en Concreto Hidráulico: Sección 600-10

Los materiales triturados no podrán constituir el 100% de la granulometría en una aplicación específica.

Fuente: IDU 452-11 (2011).

2.6 Generación de llantas como residuos en Colombia

En Colombia se generan cada año más de 100.000 toneladas de llantas usadas como residuos (Ministerio de ambiente, 2017c). A partir de esto, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible expidió la Resolución 1326 de 2017. “Por la cual se establecen los

sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas y se dictan otras disposiciones.” (Ministerio Ambiente, 2017a). En el artículo 12. *Del aprovechamiento de llantas usadas*, se definen las actividades por las cuales podrá realizarse el aprovechamiento de llantas usadas, las cuales comprende: la utilización en mobiliarios urbanos, construcción de taludes, jarillones y tuberías, canchas sintéticas, construcción de vías con grano de caucho reciclado, y la valorización del componente energético de las llantas por opciones que ambiental y tecnológicamente sean viables (Ministerio Ambiente, 2017a). Esto permite considerar que las llantas usadas pueden ser aprovechadas como elementos estructurales para la construcción de vías. Ver Figura 2-15.

Figura 2-15: Aprovechamiento de llantas usadas Colombia.

Artículo 12 Del aprovechamiento de llantas usadas. Se deberá fomentar el aprovechamiento de llantas usadas en el territorio nacional, mediante la reutilización, el reciclaje y la valorización de su componente energético.

Parágrafo. El aprovechamiento de llantas usadas podrá realizarse mediante actividades tales como la utilización de llantas usadas en mobiliarios urbanos, construcción de taludes, jarillones y tuberías, canchas sintéticas, construcción de vías urbanas con asfalto modificado con GCR, la valorización del componente energético de las llantas usadas mediante el coprocesamiento, pirólisis, gasificación y demás opciones que ambiental y tecnológicamente sean viables.

Fuente: Ministerio Ambiente (2017a).

En el artículo 13. *Metas*, numeral 13.1. Metas de recolección selectiva y gestión ambiental para llantas usadas de rin 13” a rin 22.5”. tabla 3. Metas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas de vehículos automóviles, camiones, camionetas, buses, busetas y tracto mulas. Se definen las metas para cada año, iniciando con una recolección selectiva y gestión ambiental mínima del 45%, hasta un 80% para el 2025. Ver Figura 2-16.

Por lo que se incentiva a buscar alternativas de aprovechamiento para las llantas usadas y exige el cumplimiento de los mínimos establecidos independientemente de la actividad para tal fin.

En la ciudad de Bogotá, se generan anualmente más de 2’059.555 llantas usadas como residuo, equivalente a más de 18.861 toneladas (OCADE LTDA, SANIPLAN, y AMBIENTAL, 2014), contemplando llantas desde rin 13”, hasta llantas de mayor calibre, utilizadas por camiones, buses, busetas, etc.

Figura 2-16: Metas de recolección de llantas usadas.

Resolución No. **1326** del **06 JUL 2017** Hoja No. 9

“Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas y se dictan otras disposiciones”

Tabla 3. Metas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas de vehículos automóviles, camiones, camionetas, buses, busetas y tractomulas.

Periodo base para el cálculo de la meta (años fiscales)	Periodo de recolección (año fiscal)	Año de presentación de informe de actualización y avances	Meta de recolección selectiva y gestión ambiental mínima (%)
2015 - 2016	2017	2018	45
2016 - 2017	2018	2019	50
2017 - 2018	2019	2020	55
2018 - 2019	2020	2021	60
2019 - 2020	2021	2022	65
2020 - 2021	2022	2023	70
2021 - 2022	2023	2024	75
2022 - 2023	2024	2025	80

Fuente: Ministerio Ambiente (2017a).

Según la resolución 6981 de 2011 de la ciudad de Bogotá “Por la cual se dictan lineamientos para el aprovechamiento de llantas y neumáticos usados, y llantas no conforme en el distrito capital”, en el artículo 4. Programa piloto para el aprovechamiento de llantas y neumáticos usados y de llantas no conforme en obras de infraestructura del transporte urbano., se define el uso de materiales provenientes del aprovechamiento de llantas o neumáticos usados o llantas no conforme, en un porcentaje no inferior al 5% de metros cuadrados por cada contrato de obra, el cual aumenta anualmente en 5% hasta alcanzar el 25% (Secretaría Distrital Movilidad, 2011). Ver Figura 2-17.

Estos porcentajes se han mantenido vigentes con el decreto 442 de 2015 “Por medio del cual se crea el programa de aprovechamiento y/o valorización de llantas usadas en el distrito capital y se adoptan otras disposiciones”, según el capítulo 4. Del aprovechamiento y valorización. En el artículo 10. Aprovechamiento de llantas usadas en obras de infraestructura del transporte en el distrito capital. Modificado por el decreto 265 de 2016 “Por medio del cual se modifica el Decreto Distrital 442 de 2015 y se adoptan otras disposiciones”. (Alcaldía Mayor Bogotá, 2015). Ver Figura 2-18.

Figura 2-17: Metas de recolección de llantas usadas Bogotá D.C.

ARTÍCULO 4º.- PROGRAMA PILOTO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LLANTAS Y NEUMATICOS USADOS Y DE LLANTAS NO CONFORME EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE URBANO. A partir del segundo semestre del 2012, toda persona que ejecute y adelante procesos constructivos de obras de infraestructura del transporte urbano del Distrito Capital deberán prever el uso de materiales provenientes del aprovechamiento de llantas o neumáticos usados o llantas no conforme, en un porcentaje no inferior al 5% de metros cuadrados por cada contrato de obra, con excepción de aquellos que a la entrada en vigencia de la presente resolución tengan estudios y diseños aprobados.

El porcentaje de que trata este artículo aumentará anualmente en cinco (5) unidades porcentuales hasta alcanzar el 25%, y en todo caso, estos procesos constructivos serán reportados en los primeros quince (15) días de los meses de junio y diciembre de cada año a la Secretaría Distrital de Ambiente por medio del formulario que ésta entregue para el efecto. El primer reporte, será en junio de 2013.

Fuente: Secretaria Distrital Movilidad (2011).

Figura 2-18: Aprovechamiento de llantas usadas Bogotá D.C.

"Artículo 10.- Aprovechamiento de llantas usadas en obras de infraestructura del transporte en el Distrito Capital. Desde el 1 de julio de 2016, toda obra de infraestructura de transporte en el Distrito Capital que se ejecute y adelante en procesos constructivos con asfalto, deberá prever el uso de materiales provenientes del aprovechamiento de llantas usadas en las proporciones técnicas que para el efecto exija el Instituto de Desarrollo Urbano, en la totalidad de metro cuadrado de la mezcla asfáltica usada para la obra en un porcentaje no menor al 25% de la totalidad del volumen de la mezcla asfáltica usada en vías vehiculares (Troncales de tráfico mixto, Malla Vial Arterial No Troncal, Malla Vial Intermedia y Malla Vial Local).

Fuente: Alcaldía Mayor Bogotá (2015).

A partir del Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá (OCADE LTDA et al., 2014), se determina que la mayor cantidad de llantas generadas al año, corresponden a automóviles de Rin 13", como se ve en la Figura 2-19:

- 42 Estudio del agregado reciclado de residuos de construcción y demolición, en celdas de confinamiento con llantas desechadas, para la construcción de obras viales en Colombia.

Figura 2-19: Generación de llantas usadas Bogotá D.C.

Cuadro 1. Generación actual de llantas usadas por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá por tipo de vehículo

TIPO DE VEHÍCULO	A	B	C	D	E	F	G
	Número de vehículos	Llantas / Vehículo ¹	A x B	I _{OLL} ²	A x D	C x 0.03	E - F
Total llantas en uso			Llantas Generadas al año		Reencauche	Ajuste por Reencauche	
Automóvil R-13	637,637	4	2,550,548	1.72	1,096,735		1,096,735
Automóvil R-14	63,063	4	252,252	1.72	108,468		108,468
Camión	18,200	6	109,200	4.50	81,900	31,121	50,779
Camioneta	81,900	4	327,600	2.60	212,940		212,940
Campero	72,800	4	291,200	1.68	122,304		122,304
Motos	36,400	2	72,800	1.32	48,048		48,048
SUB - TOTAL	910,000		3,603,600		1,670,395	31,121	1,639,274
PÚBLICO (9%)	Número	Llantas / Vehículo	Total llantas en uso	I _{OLL}	Llantas Generadas al año	Reencauche	Ajuste por Reencauche
Taxi R-13	49,959	4	199,836	4.00	199,836		199,836
Taxi R-14	4,941	4	19,764	4.00	19,764		19,764
Bus	11,700	6	70,200	7.20	84,240	32,011	52,229
Buseta	9,900	4	39,600	4.00	39,600	15,048	24,552
Camioneta	5,400	4	21,600	2.80	15,120		15,120
Campero	3,600	4	14,400	2.00	7,200		7,200
Microbus / Colectivo	4,500	4	18,000	5.20	23,400		23,400
SUB - TOTAL	90,000		383,400		389,160	47,059	342,101
TOTAL	1,000,000		3,987,000		2,059,555	78,180	1,981,375

FUENTE: Unión Temporal OCADE LTDA / SANIPLAN / AMBIENTAL S.A.

Fuente: OCADE LTDA et al., (2014).

3. Metodología

Se plantea una metodología de investigación cuantitativa, con un alcance exploratorio, “Los estudios exploratorios se realizan cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, del cual se tienen muchas dudas o no se ha abordado antes.” (Hernández, Fernández y Baptista, 1998, p91). Debido al estudio poco desarrollado en el uso de agregados reciclados de RCD para construcción de obras viales en Colombia, al igual que el estudio de agregados reciclados bajo confinamiento con elementos no convencionales, se comprende que es un problema de investigación poco estudiado.

Se selecciona seguir un diseño experimental, el cual, según Creswell (2007), corresponde a probar el impacto de una intervención, en un resultado, controlando los demás factores que podrían influir en ese resultado.

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos en el marco investigativo, se plantea el desarrollo de la investigación a través de cinco fases.

3.1 Fase inicial de campo: Identificación del Procedo de Producción de Agregados Reciclados a Nivel Industrial

Esta fase está directamente relacionada con el logro del objetivo general de la investigación y del primer objetivo particular, pues permite determinar la viabilidad técnica del uso del agregado reciclado de RCD para la construcción de infraestructura vial en nuestro medio y, en particular, para rellenar celdas de confinamiento conformadas por llantas vehiculares desechadas. En esta fase, se selecciona un estudio de caso para identificar la composición y caracterización de los residuos de la construcción y demolición típicos en un área de disposición final en nuestro medio.

En principio, se recopiló la información relacionada con centros productivos de agregados reciclados en nuestro medio y se seleccionó una planta de producción cercana a Bogotá, a la cual se programó y efectuó visita técnica. Allí, se conoció la capacidad de producción de agregados reciclados y se reconocieron todos los procedimientos, desde la llegada de los residuos a la planta, hasta la disposición en camiones con fines de distribución de subproductos derivados de ellos.

Igualmente, se realizó una campaña de muestreo para caracterizar los materiales, como parte de la segunda etapa investigativa. Específicamente, se seleccionó el material que se produce en la planta con denominación de subbase granular.

3.2 Fase Experimental en laboratorio: Caracterización de materiales

Esta fase se relaciona directamente con el segundo objetivo específico: Determinar si las propiedades físicas y mecánicas de los agregados reciclados de RCD son adecuadas para su uso como material de construcción de carreteras, según la normativa colombiana.

En ese sentido, los materiales recolectados en la visita de campo se sometieron a pruebas de caracterización establecidas convencionalmente para material de subbase granular; los resultados obtenidos se compararon con las especificaciones establecidas por entidades estatales, para efectos de establecer su competencia, además de compararlo con resultados de otras investigaciones, para evaluar la calidad del agregado reciclado de nuestro país.

Las pruebas realizadas se listan en la Tabla 3-1, con las correspondientes normas de ensayo utilizadas como protocolos estándar. Estas pruebas permitieron establecer, entre otras cosas, las condiciones óptimas de compactación del material, útil para la posterior fase constructiva de un modelo físico.

3.3 Fase de modelación física: Diseño y construcción de modelo a escala reducida en campo

Esta fase se adelantó para lograr el cumplimiento del tercer objetivo específico: mediante la construcción de un modelo de prueba, medir el desempeño técnico de las celdas de llantas desechadas bajo condiciones reales de tráfico y medio ambiente para determinar su comportamiento efectivo.

El modelo físico diseñado, se construyó en un pequeño tramo de vía en afirmado dentro del campus de la Universidad, adyacente al CADE de la Facultad de Ingeniería. Consistió en la excavación, colocación de llantas de confinamiento, colocación y compactación del agregado reciclado dentro de la celda de confinamiento, bajo condiciones óptimas de compactación, establecidas en la fase experimental previa.

El modelo incluye una sección en la cual se colocó un agregado convencional de subbase granular sin ningún confinamiento, para efectos de establecer comparaciones en la respuesta mecánica, con respecto a la alternativa propuesta en esta tesis.

3.4 Fase de experimentación en campo: Pruebas de caracterización mecánica

Esta fase está muy relacionada con el logro tanto del tercer objetivo específico (cuantificar el aporte físico-mecánico de la implementación de confinamiento lateral a los agregados reciclados), como del cuarto (medir el desempeño técnico de las celdas de llantas desechadas bajo condiciones simuladas de tráfico y medio ambiente para determinar su comportamiento efectivo).

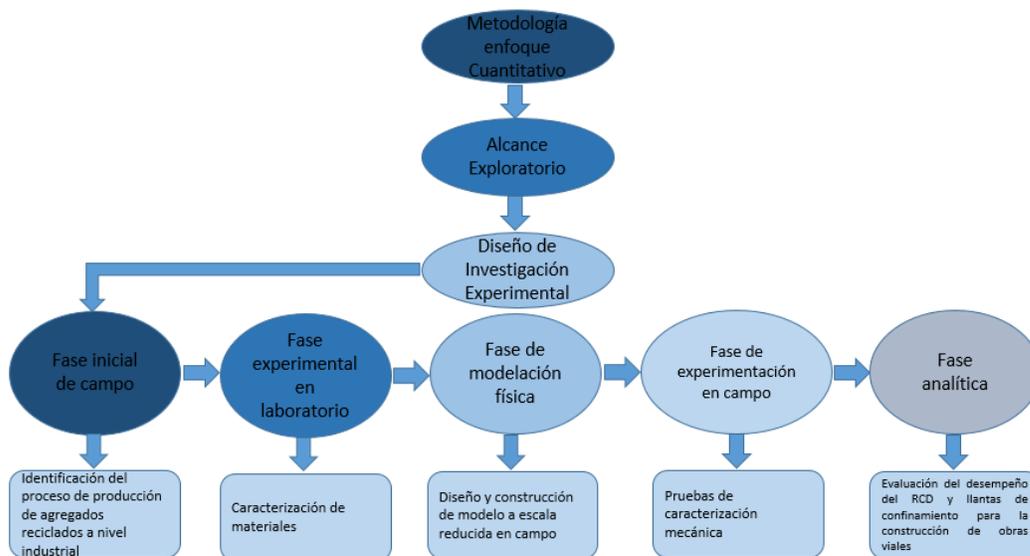
La experimentación en campo incluyó pruebas de capacidad de soporte de la capa compactada mediante pruebas de penetrómetro dinámico con cono PDC y pruebas de deflectometría de impacto con FWD (Falling Weight Deflectometer).

3.5 Fase analítica: Evaluación del desempeño del RCD y llantas de confinamiento para la construcción de obras viales

En esta fase se compilan los análisis que permiten el logro del objetivo general planteado para esta investigación: Determinar la viabilidad técnica del uso del agregado reciclado de RCD en celdas de confinamiento con llantas desechadas, para la construcción de infraestructura vial en nuestro medio. Con base en los resultados de las pruebas de laboratorio y de campo, se logra establecer el efecto combinado producido por la celda de confinamiento y por el agregado reciclado en la respuesta mecánica de la capa compacta, con respecto a la respuesta típica observada en una capa de agregado convencional de subbase. En esta misma etapa, se incluyen propuestas constructivas de posibles secciones transversales que se pueden implementar en la práctica en nuestro medio, teniendo en cuenta las experiencias alcanzadas en esta tesis.

A continuación, en la Figura 3-1 y en la Tabla 3-1 se presenta un esquema de la metodología expuesta, así como los respectivos procedimientos realizados en cada una de las fases mencionadas.

Figura 3-1: Diseño metodológico.



Fuente: Propia.

Tabla 3-1: Metodología de investigación.

FASE	PROCEDIMIENTO
Fase inicial de campo	Visita técnica a planta de producción de agregados reciclados y selección de material producido para posterior fase investigativa.
Fase experimental en laboratorio	<p>A partir del material previamente seleccionado, se realizarán ensayos de laboratorio:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determinación del contenido de humedad INVIAS INV E 122 (2012). • Relación Humedad-Peso Unitario Seco (Ensayo Modificado De Compactación) INV E 142 (2012). • Índices de aplanamiento y alargamiento INV E 230 (2012). • Valor de azul de metileno INV E 235 (2012). • Equivalente de arena INV E 133 (2012). • Resistencia al desgaste en máquina de Los Ángeles INV E 218 (2012). • Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos INV E 123 (2012). • capacidad portante (CBR) INV E 148 (2012). <p>En paralelo, se realiza selección de una llanta de alto uso comercial, para garantizar la disponibilidad para posterior uso en proyectos viales. Se buscará homogeneidad en su diámetro, altura y calidad.</p>
Fase de modelación física	Construcción del modelo de pruebas, correspondiente a la excavación, colocación de llantas de confinamiento, colocación y compactación del agregado reciclado dentro de la celda de confinamiento. Se incluye una sección en la cual se coloca un agregado convencional de subbase granular sin ningún confinamiento, para efectos de establecer comparaciones en la respuesta mecánica.
Fase de experimentación en campo	<p>Se realizan ensayos de seguimiento:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Penetración dinámica con cono. INV E 172 (2012). • Medición de deflexiones mediante deflectómetro de impacto (FWD). INV 798 (2012).
Fase analítica	Análisis y presentación de resultados

En los Capítulos siguientes, 4 a 8, se presenta el desarrollo detallado de las actividades y resultados obtenidos en cada una de las cinco fases investigativas planteadas.

4. Proceso de producción industrial de agregados reciclados

En Colombia, hay un número reducido de plantas para la producción de agregados reciclados, las cuales se ubican en los alrededores de las ciudades de Bogotá y Medellín.

4.1 Plantas de aprovechamiento de RCD en Colombia

A continuación, se presentan las empresas más conocidas en nuestro país en las ciudades previamente indicadas, dedicadas al tratamiento y aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición:

Granulados Reciclados de Colombia GRECO S.A.S

Planta ubicada a las afueras de la ciudad de Bogotá, ofrece los siguientes productos elaborados a partir del tratamiento de RCD, Ver Figura 4-1:

Figura 4-1: Productos GRECO SAS.

GRECO COLOMBIA S.A.S.			
Producto	Descripción de uso	Tamaños (mm)	Observación
Filtros (arena clasificada)	Construcción de filtros de drenaje, camas de tuberías y mejoramiento de vías terciarias	0-10	El RCD tratado proviene de residuos de concreto, asfalto o material mixto
Gravas y arenas trituradas	Elaboración de concreto (sin especificar si es estructural o no estructural)	0-5 arenas 5-25 gravas 5-40 gravas	
Material de relleno	Base para instalar estructuras de pavimento (compactado)	25-40	
Base granular	Conforma la estructura del pavimento (entre la subbase y la capa asfáltica)	25-40	
Subbase granular	Conforma la estructura del pavimento (entre la base y la subrasante)	0-25 0-40	

Fuente: Rosero Alvarez (2019)

CICLOMAT minería urbana S.A.

Planta ubicada a las afueras de la ciudad de Bogotá, ofrece los siguientes productos elaborados a partir del tratamiento de RCD, ver Figura 4-2:

Figura 4-2: Productos CICLOMAT SA.

CICLOMAT S.A.			
Producto	Descripción de uso	Tamaños (mm)	Observación
Bases granulares tipo A, B, C	Conformación de vías vehiculares, ciclovías, vías peatonales y zonas duras	No especifica	El RCD tratado proviene de residuos de concreto, asfalto o material mixto
Subbases granulares tipo A, B, C			
Arena CicloMAT T5	Elaboración de mortero de piso y contrapiso		
Mixto de 1/2"	Andenes y concretos no estructurales	0-13	
Mixto de 3/4"		0-19	
Materiales prefabricados	Adoquín vehicular	200x100x80	
	Adoquín vehicular color	200x100x80	
	Adoquín peatonal	200x100x60	
	Adoquín peatonal color	200x100x60	
	Sardinell tipo A10	800x200x500	
	Bordillo tipo A80	800x200x350	
	Cañuela tipo A120	800x300x225	

Fuente: Rosero Alvarez (2019)

Reciclados industriales de Colombia S.A.S

Planta ubicada a las afueras de la ciudad de Bogotá, ofrece los siguientes productos elaborados a partir del tratamiento de RCD, ver Figura 4-3:

Figura 4-3: Productos Reciclados industriales de Colombia SAS.

RECICLADOS INDUSTRIALES DE COLOMBIA S.A.S.			
Producto	Descripción de uso	Tamaños (mm)	Observación
Base granular	Materiales tipo IDU: BG-A, BG-B, BG-C, PEA 1, PEA 2, rajón	No especifica	No especifica
Subbase granular			
Arena	Materiales tipo IDU: SBG-A, SBG-B, SBG-C, Asfáltica B200, B400 y B600 Arena escombros		
Grava - gravilla	No especifica el uso		
Mixto de 3/4"			

Fuente: Rosero Alvarez (2019)

CONASFALTOS S.A.

Planta ubicada a las afueras de la ciudad de Medellín, ofrece los siguientes productos elaborados a partir del tratamiento de RCD, ver Figura 4-4:

Figura 4-4: Productos CONASFALTOS SA.

CONASFALTOS S.A.			
Producto	Descripción de uso	Tamaños (mm)	Observación
Arena	Arena fina y arena para concretos	No. 4 a 10	El RCD tratado proviene de residuos de concreto, asfalto o material mixto
Base asfáltica	Al 3%, al 4%	No especifica	
Base granular	BG-1, BG-38	40	
Subbase granular	SBG-1	50	
Mezcla asfáltica	MAM-25, MDC-10, MDC-19, MDC-19 con asfalto tipo Ila, MDC-25, MGC-25, MGC-38, MGCR-19 con asfalto caucho tipo 2, MGCR-25 con asfalto tipo caucho 2, Microaglomerado F13 con asfalto tipo 2, MSC-19, MSC-19 con fibra, MSC-25, MSC-25 con fibra, Rodadura metropolitana,	Según producto	
Mixto	3/4", 1 1/2"	20-40	
Triturado	3/8", 3/4", 1"	10-25	

Fuente: Elaboración propia con información tomada de CONASFALTOS (2020).

SINESCO S.A.S.

Planta ubicada a las afueras de la ciudad de Medellín, ofrece los siguientes productos elaborados a partir del tratamiento de RCD, ver Figura 4-5:

Figura 4-5: Productos SINESCO SAS.

SINESCO S.A.S.			
Producto	Descripción de uso	Tamaños (mm)	Observación
Arenas y arenillas	Arena para concretos y arenillas	No especifica	El RCD tratado proviene de residuos de concreto, asfalto o material mixto
Base granular	No especifica	No especifica	
Subbase granular	No especifica	No especifica	
Triturado	No especifica	No especifica	

Fuente: Elaboración propia con datos tomados de SINESCO (2020).

Construcciones con escombros CONESCO S.A.S.

Planta ubicada a las afueras de la ciudad de Medellín, ofrece los siguientes productos elaborados a partir del tratamiento de RCD, ver Figura 4-6:

Figura 4-6: Productos CONESCO SAS.

CONESCO S.A.S.			
Producto	Descripción de uso	Tamaños (mm)	Observación
Arena	No especifica	No especifica	El RCD tratado proviene de residuos de concreto, asfalto o material mixto
Base granular	No especifica	No especifica	
Subbase granular	No especifica	No especifica	
Triturado	No especifica	No especifica	
Material para relleno	No especifica	No especifica	
Grava para filtros	No especifica	No especifica	
Polvo de arcilla	No especifica	No especifica	

Fuente: Elaboración propia con base en datos tomados de CONESCO (2020).

Por su cercanía a Bogotá y la facilidad de consecución de muestras de materiales para las pruebas a realizar en las diferentes fases de la investigación, se seleccionó la Planta de aprovechamiento GRECO SAS, como caso de estudio para identificar la composición y caracterización de los residuos de la construcción y demolición típicos en un área de disposición y transformación en nuestro medio.

4.2 Planta de aprovechamiento de RCD GRECO SAS

En la fase inicial de reconocimiento de campo, se realiza una visita a la planta de producción Granulados Reciclados de Colombia GRECO SAS, para conocer de primera mano, el tratamiento que se realiza a los RCD que se generan en la ciudad de Bogotá y que son transportados a la planta, para su debido proceso y reintegración a la cadena productiva del sector de la construcción. (Figura 4-7. GRECO SAS.)

Figura 4-7: GRECO SAS.



Fuente: GRECO SAS.

La planta se encuentra ubicada en el municipio de Cota, a las afuera de la ciudad de Bogotá. Ver Figura 4-8, e inicio operaciones desde el año 2016.

Figura 4-8: Localización planta GRECO SAS.



Fuente: Propia.

La planta funciona como de aprovechamiento de residuos, cuyo objetivo es aportar al cumplimiento de la resolución 472 de 2017 de la Republica de Colombia a nivel nacional,

y la resolución 115 de 2012 de la ciudad de Bogotá, las cuales indican el porcentaje exigido por ley para la reutilización de material en las obras de construcción.

Durante la visita, se menciona que, en Bogotá, el RCD corresponde a una mezcla, donde el 80% corresponde a tierras de excavación, 15% a materiales pétreos triturados y recuperados de pavimentos hidráulicos y asfálticos, y el 5% restante son residuos como vidrio, caucho, entre otros, correspondiente al material que llega a la planta de diferentes orígenes.

La planta forma parte del ciclo de vida del material reciclado, el cual comienza desde la generación del RCD con la demolición, ya sea de origen privado o público, el transporte hasta la planta, la selección y trituración, la separación por subproductos y la gestión integral de residuos GIR. Ver Figura 4-9. Los pasos seguidos en la planta para la transformación del RCD corresponden a:

1. Inspección visual RCD
2. Pesaje de material
3. Sitio de acopio temporal. Ver Figura 4-9 y Figura 4-10
4. Triage (separación de material)
5. Trituración-Clasificación
6. Mezcla o entrega de productos

Al finalizar el proceso, los productos terminados en la planta pueden ser:

- Bases granulares tipo A, B y C, según especificaciones IDU.
- Sub bases granulares tipo A, B y C
- Arenas finas y gruesas
- Gravas de 1" y ½"
- Otros como RAP y material para filtro granular

En la Figura 4-11 se muestra una panorámica de la planta de reciclaje Hazemag, de origen alemán, para trituración primaria y secundaria combinada, utilizado por GRECO.

Figura 4-9: Transporte y descarga RCD planta GRECO SAS.



Fuente: Propia.

Figura 4-10: RCD planta GRECO SAS.



Fuente: Propia.

Figura 4-11: Planta de trituración Hazemag GRECO SAS.



Fuente: Propia.

El proceso de producción de agregados inicia con una tolva de 20 m³, donde se recibe el material de RCD, según se aprecia en la Figura 4-12.

Figura 4-12: Tolva inicial de la planta de trituración Hazemag.



Fuente: Propia.

Allí el material pasa a una banda transportadora metálica, con criba para separar el material de tamaño de partícula menor de 10 mm; la banda lleva el material a la trituradora de impacto (Ver Figura 4-13), la cual recibe el material con tamaño menor de 0.9 m. La trituradora dispone de 4 martillos de 492 kg cada uno para triturar el material al impactar el agregado contra unas placas metálicas, con el fin de reducirlo a tamaños menores de 40 mm.

Figura 4-13: Trituradora de Impacto de la planta Hazemag.



Fuente: Propia.

El material triturado pasa a un separador magnético primario, y posteriormente a un separador magnético secundario, para retirar objetos metálicos, procurando la limpieza del material reciclado. Ver Figura 4-14.

Figura 4-14: Separadores magnéticos de la planta de trituración.



Fuente: Propia.

Posteriormente el material llega a una cabina de selección manual, donde pasa a 3 diferentes cribas de separación, según el tamaño de los agregados, para asegurar el retiro de fragmentos de madera, plástico, papel, entre otros. Ver Figura 4-15.

Figura 4-15: Cabina selección y limpieza manual.



Fuente: Propia.

Posteriormente, pasa por una criba para selección de material entre 25 y 40 mm de tamaño de partícula. Ver Figura 4-16.

Figura 4-16: Criba para selección de material con tamaño entre 25 y 40 mm.



Fuente: Propia.

A continuación, se encuentra dispuesta una criba con chorro de aire (Wind Shifter) con riñonera o Stacker móvil, para clasificación de 4 grupos diferentes de material: de 0 a 25 mm, de 0 a 40 mm, de 5 a 25 mm y de 5 a 40 mm. Ver Figura 4-17.

Figura 4-17: Criba Wind Shifter con stacker móvil



Fuente: Propia.

La última criba corresponde a una Wind Shifter para separar los agregados de menor tamaño que se producen, de 0 a 5 mm. Ver Figura 4-18.

Figura 4-18: Criba Wind Shifter para tamaños de 0 a 5 mm.



Fuente: Propia.

De igual manera, la planta cuenta con una maquina clasificadora Powerscreen de 3 bandas para clasificación de 800 a 1000 m³ por hora, para preclasificación y trabajos complementarios dentro de la planta. Ver Figura 4-19.

Figura 4-19: Maquina clasificadora Powerscreen GRECO SAS.



Fuente: Propia.

Finalmente, los agregados procesados, clasificados por tipo de material producido, quedan dispuestos en forma de stock piles, como se aprecia en la Figura 4-20.

Figura 4-20: Agregados procesados RCD planta GRECO SAS.



Fuente: Propia.

La planta de producción GRECO SAS tiene una capacidad teórica de producción de 1'382.000 de toneladas de material al año, esto debido a que puede procesar 200 toneladas por hora, en 3 turnos de 8 horas, por 24 días, los 12 meses del año.

Una vez finalizado el recorrido guiado por la planta, para conocer el proceso productivo, se procedió a realizar la toma de muestras de materiales a utilizar en las fases posteriores de la Investigación. El material suministrado por la planta corresponde a Subbase clase A, cuyas características se aprecian en la Figura 4-21.

Figura 4-21: Sub-base A.



Fuente: Propia.

Este material es producido como una mezcla de RCD proveniente de concretos tanto asfálticos como hidráulicos, material denominado como “mixto” y agregado natural seleccionado. Para la toma de la muestra se hace selección por medio del método del cuarteo in situ. Se recoge un total de 7 canecas de agregado reciclado para su posterior caracterización.

El material suministrado por la planta, fue debidamente transportado, rotulado y almacenado en el depósito de materiales del laboratorio de geotecnia de la Universidad Nacional en la sede Bogotá.

5. Caracterización de materiales

5.1 Caracterización de RCD

Los ensayos realizados para los materiales de RCD fueron realizados bajo los lineamientos de las normas INVIAS mostradas a continuación en la Tabla 5-1:

Tabla 5-1: Ensayos realizados para caracterización de agregados reciclados.

ENSAYO	NORMA
<i>Determinación del contenido de humedad</i>	<i>INV-122</i>
<i>Relación humedad-peso unitario seco (ensayo modificado)</i>	<i>INV-142</i>
<i>Índices de aplanamiento y alargamiento</i>	<i>INV-230</i>
<i>Valor de azul de metileno</i>	<i>INV-235</i>
<i>Equivalente de arena</i>	<i>INV-133</i>
<i>Resistencia al desgaste en máquina de los ángeles</i>	<i>INV-218</i>
<i>Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos</i>	<i>INV-123</i>
<i>CBR de suelos compactados en laboratorio</i>	<i>INV-148</i>

5.1.1 Determinación del contenido de humedad

- **Objetivo:**

Este ensayo tiene por objeto determinar en el laboratorio, el contenido de agua (humedad), por masa, de suelo. A partir de este procedimiento, se determina el contenido de agua que posee el material al momento de iniciar las pruebas de caracterización.

- **Datos y resultados:**

Se calcula el contenido de agua del material con la fórmula:

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c} \times 100 = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Dónde: w : contenido de agua, %;

W_1 : Masa del recipiente con el espécimen húmedo, g;

W_2 : Masa del recipiente con el espécimen seco, g;

W_c : Masa del recipiente, g;

W_w : Masa del agua, g;

W_s : Masa de las partículas sólidas, g.

$$w = \frac{11244.2 - 10612.4}{10612.4 - 407.2} \times 100 = \frac{631.8}{10205.2} \times 100$$

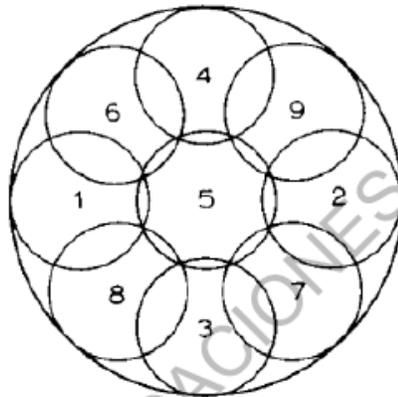
$$w = 6.19\%$$

5.1.2 Relación humedad-peso unitario seco (ensayo modificado de compactación)

- **Objetivo:**

Este ensayo tiene por objeto determinar la relación entre la humedad y el peso unitario seco del suelo. Al material se le aplicaron cuatro diferentes contenidos de agua y se compactó siguiendo un patrón de impactos sobre la probeta según se ve en la Figura 5-1.

Figura 5-1: Patrón de impactos para compactación.



Fuente: INV E 142.

En la Figura 5-2 y Figura 5-3 se puede observar parte del procedimiento seguido.

Figura 5-2: Compactación material ensayo modificado de compactación.



Fuente: Propia.

Figura 5-3: Peso probeta ensayo modificado de compactación.



Fuente: Propia.

- **Datos y resultados:**

Se calcula el peso unitario total de cada sub-muestra:

$$\rho_H = K * \frac{M_T - M_{MD}}{V}$$

Dónde: ρ_H : Peso unitario total, g/cm^3 ;

M_T : Masa del suelo húmedo dentro del molde, g;

M_{MD} : Masa del molde de compactación, g;

V : Volumen del molde de compactación, cm^3 ;

K : Constante de conversión, 1 para g/cm^3 .

Se calcula el contenido de agua del material con la fórmula:

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c} \times 100 = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Dónde: w: contenido de agua, %;

W_1 : Masa del recipiente con el espécimen húmedo, g;

W_2 : Masa del recipiente con el espécimen seco, g;

W_c : Masa del recipiente, g;

W_w : Masa del agua, g;

W_s : Masa de las partículas sólidas, g.

Se calcula la densidad seca de cada sub-muestra:

$$\rho_d = \frac{\rho_H}{1 + \frac{w}{100}}$$

Se calcula el peso unitario seco de cada sub-muestra:

$$\gamma_d = K_1 * \rho_d$$

Dónde: K_1 : Constante de conversión, 9.8066 para densidad en g/cm^3 .

En las Tablas 5-2 y 5-3 se presenta el resumen de datos obtenidos en las cuatro muestras ensayadas, tanto en pesos unitarios como en los contenidos de agua.

Tabla 5-2: Resultados moldes ensayo modificado de compactación RCD.

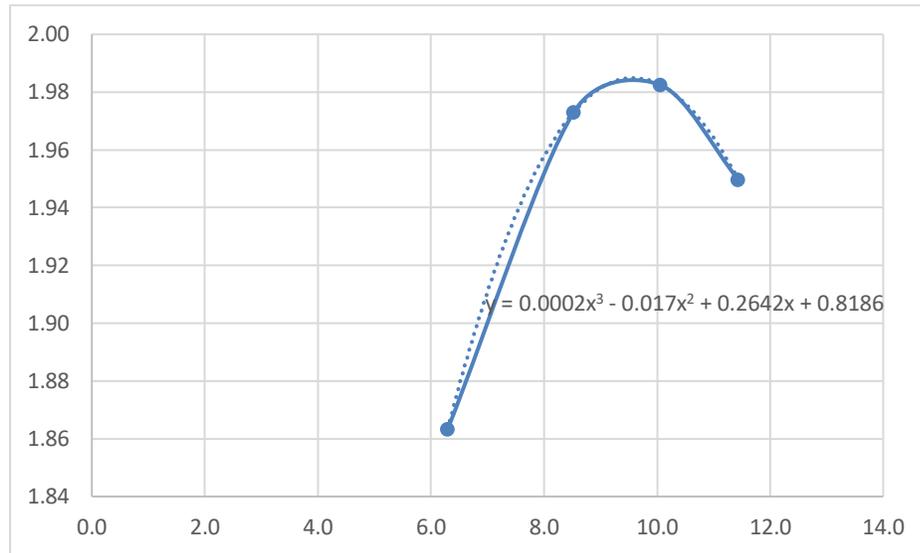
Peso del molde+suelo compactado (g)	10949,4	11287,6	11372,2	10429,2
Peso del molde+base (g)	6772,6	6772,6	6771,4	5802,2
Peso del suelo compactado (g)	4176,8	4515	4600,8	4627
Volumen del suelo compactado (cm3)	2108,7	2108,7	2108,7	2129,6
Peso unitario total (g/cm3)	1,98	2,14	2,18	2,17
Peso unitario seco (g/cm3)	1,86	1,97	1,98	1,95

Tabla 5-3: Resultados contenidos humedad ensayo modificado de compactación RCD.

Peso del recipiente+suelo húmedo (g)	790,8	366,4	508,2	254,6
Peso del recipiente+suelo seco (g)	748,4	340,2	468,5	232,6
Peso del recipiente (g)	75	32,8	73,6	40,2
Contenido de humedad (%)	6,3	8,5	10,1	11,4

A partir de los datos obtenidos en las 4 pruebas, se dibuja la curva de compactación indicada en la Figura 5-4 y se determina el contenido óptimo de humedad, correspondiente al peso unitario seco máximo.

Figura 5-4: Curva compactación ensayo modificado de compactación.



Fuente: Propia.

Contenido Optimo de humedad (%) 9,30

Peso unitario seco Maximo (g/cm3) 1,97

5.1.3 Índices de aplanamiento y alargamiento

- **Objetivo:**

Este ensayo determina los índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados a emplear en la construcción de vías. El ensayo para determinar el índice de aplanamiento no es aplicable a los tamaños de partículas menores de 6.3mm (1/4") o mayores de 63mm (2 1/2"); mientras que la prueba para hallar el índice de alargamiento no aplica a los tamaños de partículas menores de 6.3mm (1/4") o mayores de 50mm (2"). Ver Figura 5-5.

La forma de las partículas de los agregados es importante en la construcción de carreteras, porque las partículas de forma defectuosa suelen generar inconvenientes durante la operación de la vía. En las capas granulares y en las mezclas asfálticas, las partículas planas y alargadas son propensas a rotura y desintegración durante el proceso de

compactación, o por el paso del tránsito, modificando la granulometría del agregado y afectando adversamente su comportamiento.

Figura 5-5: Especificaciones para ensayo de índice de aplanamiento y alargamiento.

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL AGREGADO, mm (pg.)	MASA MÍNIMA DE LA MUESTRA PARA EL ENSAYO DEL ÍNDICE DE APLANAMIENTO, kg	MASA MÍNIMA DE LA MUESTRA PARA EL ENSAYO DEL ÍNDICE DE ALARGAMIENTO, kg
50 mm (2")	35	-
37.5 mm (1 ½")	15	15
25 mm (1")	5	5
19 mm (¾")	2	2
12.5 mm (½")	1	1
9.5 mm (3/8")	0.5	0.5

Fuente: INV E 230.

- **Datos y resultados:**

En la Tabla 5-4 se relacionan los resultados del ensayo:

Tabla 5-4: Índices de alargamiento y aplanamiento del agregado con RCD.

Retiene tamiz	Peso total (g)	Peso alargadas (g)	Porcentaje alargado (%)	Peso aplanadas (g)	Porcentaje aplanado (%)
1"	1400	286	20.43	385	27.50
¾"	1444	324	22.44	245	17.00
½"	2022	210	10.39	364	18.00
3/8"	1151	143	12.42	75	6.52
TOTAL	6017	963	16.40	1069	17.25

5.1.4 Valor de azul de metileno

- **Objetivo:**

Este ensayo determina el valor de azul de metileno de la fracción pasa el tamiz de 4.75mm (No.4) de la mezcla total de agregados. La idea es ir agregando una solución de azul de metileno, la cual queda adsorbida en la superficie de las partículas del mineral arcilloso. Durante la adición y agitación, se va observando mediante el método de la mancha en el

papel filtro, si el material requiere mayor cantidad de solución. En la medida en que esto suceda, para un peso determinado de material, se dice que es más activo.

Un valor significativo de azul de metileno determinado mediante esta norma es indicador de la presencia de arcilla nociva presente en un agregado. (INVIAS, 2012), la cual pueden tener alto potencial de cambio volumétrico

En la Figura 5-6 y Figura 5-7 se presentan aspectos del ensayo realizado. En la Figura 5-8 y Figura 5-9, se muestran aspectos de las manchas de control hasta lograr un resultado positivo, el cual se define como el contenido de solución para el cual ya no hay adsorción de azul a la superficie del mineral arcilloso. Esto queda definido con un resultado positivo como el mostrado en la Figura 5-8.

Figura 5-6: Preparación solución ensayo azul de metileno.



Fuente: Propia.

Figura 5-7: Preparación suspensión ensayo azul de metileno.



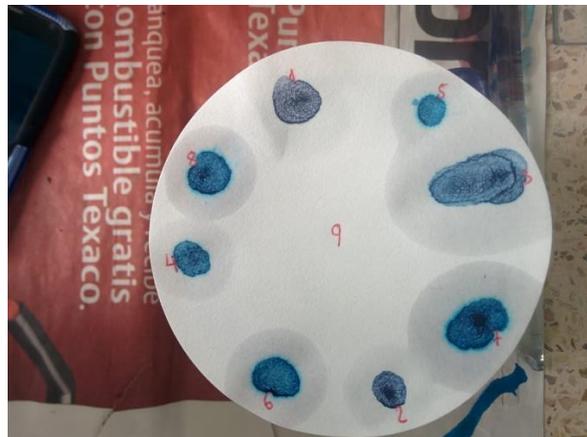
Fuente: Propia.

Figura 5-8: Apariencia de un resultado negativo y positivo ensayo azul de metileno.



Fuente: Propia.

Figura 5-9: Resultado azul de metileno.



Fuente: Propia.

- **Datos y resultados:**

El valor de azul de metileno (VAF), expresado en gramos de colorante por kilogramo de la fracción granulométrica inferior a 75 μm , se calcula con la siguiente expresión:

$$VA_F = \frac{V_1}{M_1}$$

Dónde: M1: Masa de la muestra, g;

V1: Volumen total añadido de la solución de colorante, ml.

Los datos obtenidos fueron:

M_1 (g)	30
Concentración (mg/ml)	5
Cantidad de gotas	6

$$VA_F = \frac{6 * 5 \text{ ml} * 5 \text{ mg/ml}}{30 \text{ g}} = 5 \text{ mg/g}$$

5.1.5 Equivalente de arena

- **Objetivo:**

Este ensayo tiene por objeto determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino o material arcilloso, en los suelos o agregados finos. Es un procedimiento que se puede utilizar para lograr una correlación rápida en campo. Este ensayo produce como resultado un valor empírico de la cantidad relativa, finura y carácter del material arcilloso presente en la muestra de suelo o agregado fino. Se puede especificar un valor mínimo del equivalente de arena, para limitar la cantidad admisible de finos arcillosos en un agregado. (INV E-133)

- **Datos y resultados:**

El equivalente de arena se calculará así:

$$\text{Equivalente de Arena (EA)} = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} \times 100$$

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5-5:

Tabla 5-5: Resultados del ensayo de equivalente de arena RCD.

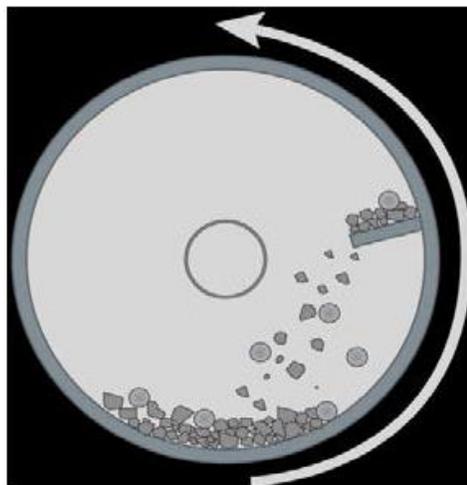
Muestra	1	2	3
Lectura de Arcilla (mm)	160	136	142
Lectura de Arena (mm)	63	64	63
Equivalente de Arena %	39,38	47,06	44,37
Equivalente de Arena %	40,00	48,00	45,00
Promedio	45,00		

5.1.6 Resistencia al desgaste en máquina de Los Ángeles

- **Objetivo:**

Este ensayo sirve para medir la resistencia a la degradación por agentes físicos, de los agregados gruesos de tamaño menor a 37.5mm (1 1/2") por medio de la máquina de los Ángeles. Este ensayo indica la calidad relativa o la competencia del agregado pétreo.

Figura 5-10: Degradación del agregado durante el ensayo de desgaste en máquina de los Ángeles.



Fuente: INV E 218.

Se separa una muestra de material de acuerdo con la granulometría A definida en el ensayo:

Figura 5-11: Especificaciones técnicas de tamaño y masas de muestras para este ensayo de la Máquina de los Ángeles.

TAMAÑOS DE TAMIZ		MASAS DE LAS DIFERENTES FRACCIONES, g			
PASA TAMIZ	RETENIDO EN TAMIZ	GRANULOMETRÍAS			
		A	B	C	D
37.5 (1½")	25.0 (1")				
25.0 (1")	19.0 (¾")	1250 ± 25			
19.0 (¾")	12.5 (½")	1250 ± 25			
12.5 (½")	9.5 (3/8")	1250 ± 10	2500 ± 10		
9.5 (3/8")	6.3 (¼")	1250 ± 10	2500 ± 10	2500 ± 10	
6.3 (¼")	4.75 (No. 4)			2500 ± 10	
4.75 (No.4)	2.36 (No. 8)				5000 ± 10
Total		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Fuente: INV E 218.

- Datos y resultados:**

Los resultados de los pesos de material separados por tamiz, y el peso del material retenido después de pasar por la máquina de Los Ángeles se presenta en la tabla 5-6.

Tabla 5-6: Resultados del ensayo de desgaste en máquina de Los Ángeles RCD.

Retiene	Peso material (g)
1"	1266,4
¾"	1241,6
½"	1252,4
3/8"	1244,6
	5005
Peso Material Ensayado	ANTES DEL ENSAYO
5005 g	
Peso Material retenido	DESPUES DEL ENSAYO
3462 g	

El resultado del ensayo es la diferencia entre la masa original y la masa final de la muestra ensayada, expresada como tanto por ciento de la masa original:

$$\% \text{ perdidas} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100$$

Donde: P_1 : Masa de la muestra seca antes del ensayo, g;

P_2 : Masa de la muestra seca después del ensayo, g.

$$\% \text{ perdidas} = \frac{5005 - 3462}{5005} \times 100 = 30.83\%$$

5.1.7 Distribución Granulométrica

- **Objetivo:**

Cuantificar la distribución de los tamaños por fracciones de las partículas de un suelo, en peso.

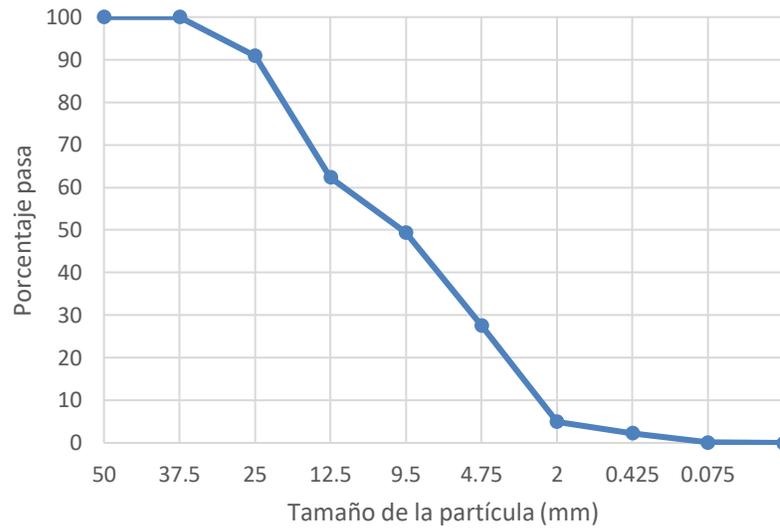
- **Datos y resultados:**

Se determina el porcentaje de material que pasa por un determinado tamiz, dividiendo su masa por la de la muestra en seco original, y multiplicando el resultado por 100. Los datos y resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5-7 y la Figura 5-12.

Tabla 5-7: Granulometría de los agregados reciclados.

Reten tamiz	Peso (g)	P. corr. (g)	% retenido	% retenido acumulado	% pasa	Tamaño (mm)
2"	-	-		0	100	50
1 1/2"	-	-		0	100	37,5
1"	1388,4	1457,25	9,09	9,09	90,91	25
3/4"	1432	1503,02	9,38	18,47	81,53	19
1/2"	2928,8	3074,05	19,18	37,65	62,35	12,5
3/8"	1978,6	2076,72	12,96	50,61	49,39	9,5
#4	3326	3490,95	21,78	72,40	27,60	4,75
#10	3450	3621,09	22,60	94,99	5,01	2
#20	278,6	292,42	1,82	96,82	3,18	0,85
#40	135,6	142,32	0,89	97,71	2,29	0,425
#60	114	119,65	0,75	98,45	1,55	0,25
#100	114,4	120,07	0,75	99,20	0,80	0,15
#200	104,2	109,37	0,68	99,88	0,12	0,075
FONDO	17,8	18,68	0,12	100,00	0,00	
TOTAL	15268,40	16025,60	100			

Figura 5-12: Curva granulométrica del agregado reciclado.



Fuente: Propia.

Se establecen los coeficientes de uniformidad y de gradación para la correspondiente clasificación del material:

Coeficiente de uniformidad:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Donde: D_{60} , diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 60% del suelo

D_{10} , diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 10% del suelo

$$C_u = \frac{12.5}{4.75}$$

$$C_u = 2.63$$

Coeficiente de gradación:

$$C_g = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}}$$

Donde: D_{30} , diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 30% del suelo

D_{60} , diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 60% del suelo

D_{10} , diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 10% del suelo

$$C_g = \frac{(9.5)^2}{4.75 * 12.5}$$

$$C_g = 1.52$$

Con esta información, es posible establecer la clasificación del material según el Unified Soil Classification System (UCSC), a partir de la cual se define que el material pertenece a una Grava pobremente graduada (GP), principalmente por la pobre cantidad de partículas finas en su gradación.

5.1.8 CBR de suelos compactados en laboratorio y sobre muestra inalterada

- **Objetivo:**

Este ensayo permite la determinación de un índice de resistencia de suelos denominado CBR (California Bearing Ratio). El ensayo se realiza sobre una muestra de suelo preparada con condiciones óptimas de contenido de agua para obtener el peso unitario seco máximo.

El CBR se expresa como la relación porcentual entre el esfuerzo requerido para que el pistón penetre 0.1" o 0.2" dentro de la muestra de ensayo, y el esfuerzo que se requirió para penetrar las mismas profundidades una muestra patrón de grava bien graduada.

Se preparan dos sub-muestras, una para ensayo sin inmersión, y otra para ensayo con inmersión en agua. Cada muestra se compacta en un molde de 6" siguiendo la norma INV E-142 de 5 capas, aplicando 56 golpes en cada capa.

- **Datos y resultados:**

En el Anexo A se incluyen las mediciones registradas durante las pruebas, en el formato *Ensayo C.B.R. California Bering Ratio Formato para la toma de datos INV E-148*.

Se presenta en la tabla 5-8 los datos para cada condición de ensayo. En la Tabla 5-9 se presentan las lecturas de carga para las penetraciones en la prensa de sub-muestra sin inmersión y los respectivos cálculos de esfuerzos. Los datos correspondientes a la submuestra con inmersión se indican en la Tabla 5-10.

Tabla 5-8: Datos de la muestra para condiciones de ensayo.

CONTENIDO DE AGUA Y PESO UNITARIO	COMPACTACIÓN	FINAL DE INMERSIÓN
Peso del molde + base (g)	7966	7966
Peso de la muestra + molde (g)	12525	11299
Peso unitario total (g/cm ³)	2,19	1,60
Recipiente número	AA	26
Peso suelo húmedo + recipiente (p1) (g)	309	338,88
Peso suelo seco + recipiente (p2) (g)	285	309,97
Peso del recipiente (p3)	36,8	34,72
Humedad de la muestra (%)	9,7%	10,5%
Peso unitario seco (g/cm ³)	2,00	1,45
Diferencia de humedad (%)		0,8%

Tabla 5-9: Resultados sub-muestras sin inmersión.

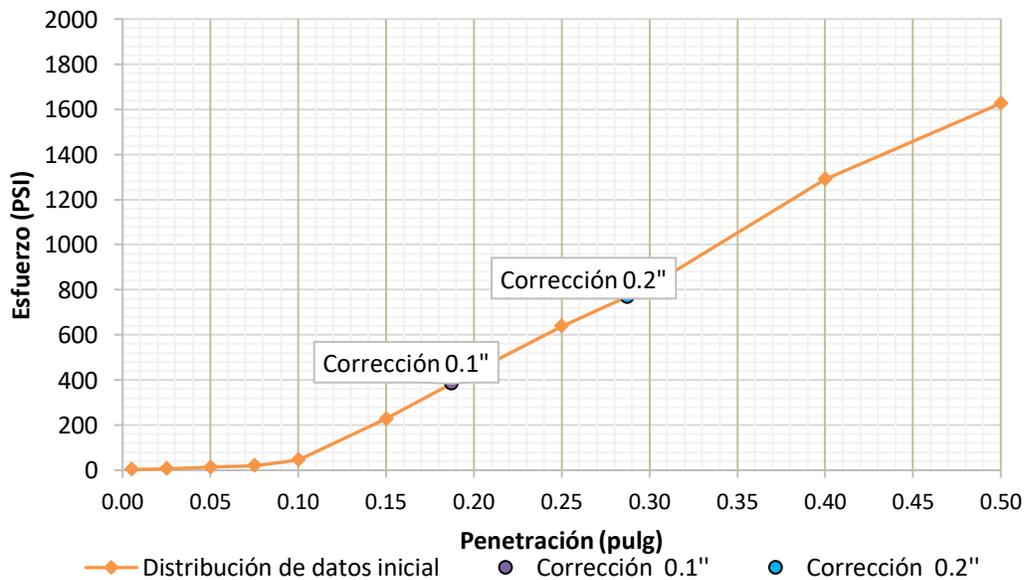
ETAPA DE FALLA SIN INMERSIÓN					
PENETRACIÓN (PULG)	Esfuerzo estándar (lb/pulg ²)	Tiempo	Lectura anillo de carga	Ec. Anillo (lb)	Esfuerzo (lb/pulg ²)
0,005	--	6	1	9,92	3,31
0,025	--	30	2	19,83	6,61
0,050	--	1"	4	39,67	13,22
0,075	--	1'30	6	59,50	19,83
0,100	1000	2	14	138,83	46,28
0,150	--	3	69	684,25	228,08
0,200	1500	4	132	1308,99	436,33
0,250	--	5	193	1913,90	637,97
0,300	1900	6	247	2449,40	816,47
0,400	2300	8	390	3867,47	1289,16
0,500	2600	10	492	4878,97	1626,32

Tabla 5-10: Resultado sub-muestra con inmersión.

ETAPA DE FALLA CON INMERSIÓN					
PENETRACIÓN (PULG)	Esfuerzo estándar (lb/pulg ²)	Tiempo	Lectura anillo de carga	Ec. Anillo (lb)	Esfuerzo (lb/pulg ²)
0,005	--	6	1	9,92	3,31
0,025	--	30	5	49,58	16,53
0,050	--	1"	17	168,58	56,19
0,075	--	1'30	52	515,66	171,89
0,100	1000	2	91	902,41	300,80
0,150	--	3	169	1675,91	558,64
0,200	1500	4	246	2439,48	813,16
0,250	--	5	328	3252,64	1084,21
0,300	1900	6	410	4065,81	1355,27
0,400	2300	8	530	5255,80	1751,93
0,500	2600	10	655	6495,37	2165,12

A partir de estos datos, se traza la curva penetración-esfuerzo con su respectiva corrección en la Figura 5-13 y Tabla 5-11:

Figura 5-13: Curva CBR sin inmersión.



Fuente: Propia.

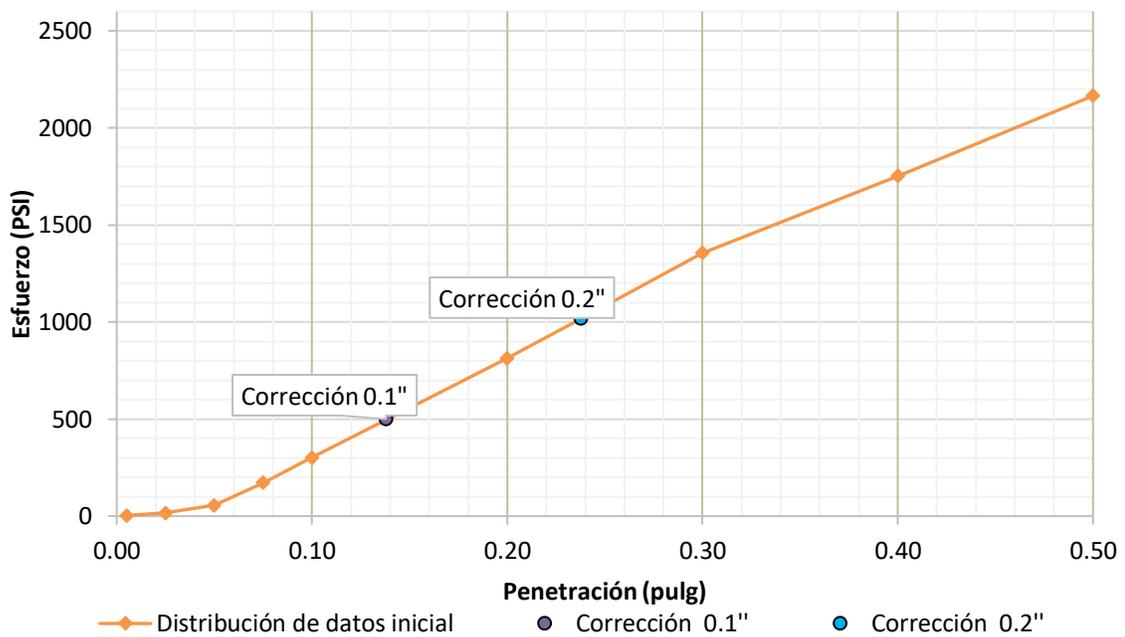
Tabla 5-11: CBR sin inmersión.

	Esfuerzos (psi)	CBR (%)
σ 0,1"	384	38%
σ 0,2"	770	51%

Se aprecia que el CBR de 0.2" es muy superior al de 0.1", presentando una diferencia significativa, se repite el ensayo para corroborar la información, sin embargo, al realizarse, se continúa presentando dicha diferencia.

Se realiza el mismo procedimiento para la sub-muestra ensayada en inmersión, ver Figura 5-14 y Tabla 5-12:

Figura 5-14: Curva CBR con inmersión.



Fuente: Propia.

Tabla 5-12: CBR con inmersión.

	Esfuerzos (psi)	CBR (%)
σ 0,1"	500	50%
σ 0,2"	1020	68%

Se aprecia que el CBR de 0.2” es muy superior al de 0.1”, presentando una diferencia significativa, se repite el ensayo para corroborar la información, sin embargo, al realizarse, se continúa presentando dicha diferencia.

Finalmente se registra el cambio volumétrico de la muestra bajo condición de inmersión en la Tabla 5-13, donde se aprecia que hubo un aumento de volumen del 0.5% respecto al volumen inicial de la sub-muestra.

Tabla 5-13: Expansión volumétrica sub-muestra con inmersión de agregado reciclado.

FECHA	HORA	LECTURA DEFORMÍMETRO (10 ⁻³ PULG)
21/05/2019	02:20 p. m.	495
22/05/2019	02:20 p. m.	474
23/05/2019	12:00 p. m.	472
27/05/2019	11:15 a. m.	472
EXPANSIÓN VOLUMÉTRICA		0,5%

5.1.9 Resumen caracterización RCD

En la Tabla 5-14 se presenta el resumen de parámetros de caracterización y de calidad de los agregados producidos a partir del RCD.

Tabla 5-14: Resultados caracterización RCD.

Ensayo	Resultado ensayos
Humedad óptima de compactación	9,30%
Densidad Seca Máxima	19,7 KN/m ³
Índice de alargamiento	17%
Índice de aplanamiento	18%
Azul de Metileno	5 mg/g
Equivalente de arena	45%
Desgaste por máquina de los ángeles	31%
Coeficiente de uniformidad	2.63
Coeficiente de gradación	1.52
Clasificación UCSC	GP
CBR*	68%

*: Se reporta el CBR a 0.2” bajo condiciones con inmersión, por ser esta la situación previsible de operación vial en las zonas cercanas a Bogotá, donde se viene utilizando el agregado producido en la planta GRECO SAS.

5.2 Caracterización agregado natural de referencia

Dentro del proceso investigativo, se ha considerado tener como referencia comparativa un agregado convencionalmente utilizado como capa de subbase granular, con el ánimo de verificar y validar aspectos técnicos de calidad de los agregados reciclados utilizados. Para esos fines, se caracteriza un agregado natural convencional y se comparan las propiedades obtenidas, teniendo siempre como marco referencial, las especificaciones o exigencias establecidas por entidades competentes. Este agregado fue suministrado por la firma contratista que viene realizando la construcción de las aulas de ciencias, el cual se utilizó para la construcción de vías de acceso temporales al frente de obra.

Adicionalmente, para poder evaluar y comparar los desempeños de la propuesta de la celda de confinamiento rellena con agregados reciclados de RCD, se considera evaluar también una sección adicional con agregado natural sin confinamiento, con el objetivo de establecer si se presenta una mejora en el funcionamiento de la sección vial, considerando el cambio en el tipo de agregado y de sistema constructivo respecto a sistemas tradicionales.

Los ensayos realizados para el agregado natural fueron realizados bajo los lineamientos de las normas INVIAS, mostrados en la Tabla 5-15:

Tabla 5-15: Ensayos caracterización agregado natural.

Ensayo	Norma
<i>Determinación del límite líquido</i>	<i>INV-125</i>
<i>Límite plástico e índice de plasticidad</i>	<i>INV-126</i>
<i>Índices de aplanamiento y alargamiento</i>	<i>INV-230</i>
<i>Relación humedad-peso unitario seco (ensayo modificado)</i>	<i>INV-142</i>
<i>Valor de azul de metileno</i>	<i>INV-235</i>
<i>Equivalente de arena</i>	<i>INV-133</i>
<i>Resistencia al desgaste en máquina de Los Ángeles</i>	<i>INV-218</i>
<i>Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos</i>	<i>INV-123</i>
<i>CBR de suelos compactados en laboratorio</i>	<i>INV-148</i>

5.2.1 Determinación del límite líquido

▪ **Objetivo**

Este ensayo tiene por objeto determinar el contenido de agua a partir del cual el componente arcilloso del agregado exhibe un comportamiento fluido. Este valor suele usarse para clasificar la fracción fina y establecer eventuales relaciones con la permeabilidad, el potencial de cambio volumétrico, entre otras propiedades.

▪ **Datos y resultados**

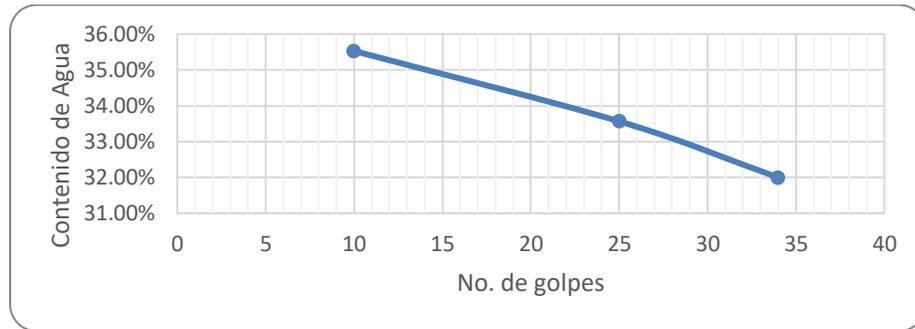
En la Tabla 5-16, se presenta el resumen del ensayo realizado con el número de golpes que deben darse a la Cazuela de Casagrande para que el material fluya, a unas condiciones preestablecidas, bajo diferentes contenidos de agua:

Tabla 5-16: Resultados ensayo límite líquido agregado natural.

	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
<i>Número de golpes</i>	10	25	34
<i>Recipiente</i>	117	142	187
<i>Peso recipiente (g)</i>	10,37	9,92	10,92
<i>P. Rec + m. Húmeda (g)</i>	28,07	23,29	28,74
<i>P. Rec + m. Seca (g)</i>	23,43	19,93	24,42
<i>Contenido de agua (%)</i>	35,53%	33,57%	32,00%

Con estos datos, se representa la curva de fluidez, con la relación entre el número de golpes, y el contenido de agua como se ve en la figura 5-15. A partir de esta gráfica, se determina el límite líquido, como el contenido de agua correspondiente a la intersección de la curva con un número de 25 golpes.

Figura 5-15: Determinación límite líquido agregado natural.



Fuente: Propia.

5.2.2 Límite plástico e índice de plasticidad

- **Objetivo**

Este ensayo tiene por objeto determinar el contenido de agua a partir del cual un material fino arcilloso exhibe un comportamiento plástico. Este valor, junto con el límite líquido, permiten establecer el índice de plasticidad de la fracción fina, además de correlacionar otras propiedades del suelo, como la compresibilidad, la permeabilidad, expansión y contracción, y la resistencia al corte.

- **Datos y resultados**

A continuación, se presenta una tabla resumen de los contenidos de agua obtenidos:

Tabla 5-17: Resultados ensayo límite plástico agregado natural.

	MUESTRA 1	MUESTRA 2
Recipiente	318	31
Peso recipiente (g)	8,97	6,74
P. Rec + m. Húmeda (g)	14,94	11,73
P. Rec + m. Seca (g)	14,06	10,95
Contenido de agua (%)	17,29%	18,53%

A partir de esta información, el límite plástico es el promedio de los contenidos de agua.

Diferencia 1,24%

LP 18%

Para calcular el índice de plasticidad, se calcula de la siguiente manera:

$$IP = LL - LP$$

Dónde: LL: límite líquido (número entero)

LP: límite plástico (número entero)

De manera que se tiene:

$$IP = 33 - 18$$

$$IP = 15\%$$

5.2.3 Índices de aplanamiento y alargamiento

- **Datos y resultados**

En la Tabla 5-18 se relacionan los resultados del ensayo:

Tabla 5-18: Resultados ensayo alargamiento agregado natural.

Retiene tamiz	Peso total (g)	Peso alargadas (g)	Porcentaje alargado (%)
1"	20,86	0	0
3/4"	44,32	16,58	37,41
1/2"	130,5	33,57	25,72
3/8"	200,37	52,85	38,64
TOTAL	584.79	103	17.61

$$I_{Ala} = 18\%$$

Tabla 5-19: Resultados ensayo aplanamiento agregado natural.

Retiene tamiz	Peso total (g)	Peso aplanadas (g)	Porcentaje aplanado (%)
1"	21	21	100
3/4"	19,2	0	0
1/2"	160,4	43,2	26,93
3/8"	116,8	17,4	14,90
TOTAL	317.4	81.6	25.71

$$I_{Apl} = 26\%$$

5.2.4 Relación humedad-peso unitario seco (ensayo modificado de compactación)

- **Datos y resultados:**

Se calcula el peso unitario total de cada sub-muestra:

$$\rho_H = K * \frac{M_T - M_{MD}}{V}$$

Dónde: ρ_H : Peso unitario total, g/cm^3 ;

M_T : Masa del suelo húmedo dentro del molde, g;

M_{MD} : Masa del molde de compactación, g;

V : Volumen del molde de compactación, cm^3 ;

K : Constante de conversión, 1 para g/cm^3 .

Se calcula el contenido de agua del material con la fórmula:

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c} \times 100 = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Dónde: w : contenido de agua, %;

W_1 : Masa del recipiente con el espécimen húmedo, g;

W_2 : Masa del recipiente con el espécimen seco, g;

W_c : Masa del recipiente, g;

W_w : Masa del agua, g;

W_s : Masa de las partículas sólidas, g.

Se calcula la densidad seca de cada sub-muestra:

$$\rho_d = \frac{\rho_H}{1 + \frac{w}{100}}$$

Se calcula el peso unitario seco de cada sub-muestra:

$$\gamma_d = K_1 * \rho_d$$

Dónde: K_1 : Constante de conversión, 9.8066 para densidad en g/cm^3 .

En las Tablas 5-20 y 5-21 se presenta el resumen de datos obtenidos en las cuatro muestras ensayadas, tanto en pesos unitarios como en los contenidos de agua.

Tabla 5-20: Resultados moldes ensayo modificado de compactación RCD.

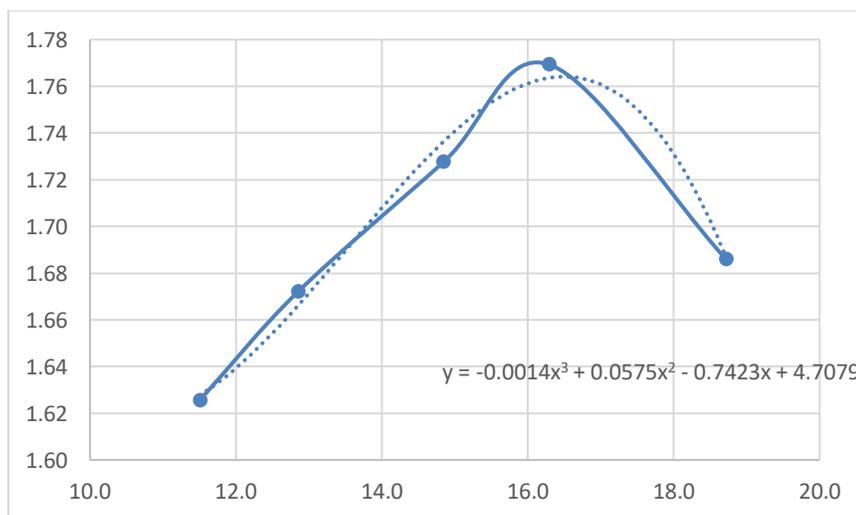
Peso del molde+suelo compactado (g)	5899,2	5969,4	6061,2	6130,6	6077,6
Peso del molde+base (g)	4186,6	4186,6	4186,6	4186,6	4186,6
Peso del suelo compactado (g)	1712,6	1782,8	1874,6	1944	1891
Volumen del suelo compactado (cm ³)	944,8	944,8	944,8	944,8	944,8
Peso unitario seco (g/cm ³)	1,63	1,67	1,73	1,77	1,69

Tabla 5-21: Resultados contenidos humedad ensayo modificado de compactación RCD.

Peso del recipiente+suelo húmedo (g)	385,6	409,2	404,8	391,2	447,4
Peso del recipiente+suelo seco (g)	350,6	367,2	357,2	341,4	382,6
Peso del recipiente (g)	46,4	40,4	36,6	35,8	36,4
Contenido de humedad (%)	11,5	12,9	14,8	16,3	18,7

A partir de los datos obtenidos en las 4 pruebas, se dibuja la curva de compactación indicada en la Figura 5-16 y se determina el contenido óptimo de humedad, correspondiente al peso unitario seco máximo.

Figura 5-16: Curva compactación ensayo modificado de compactación.



Fuente: Propia.

Contenido Optimo de humedad (%) 16.0

Peso unitario seco Maximo (g/cm3) 1,77

5.2.5 Valor de azul de metileno

- **Datos y resultados**

El valor de azul de metileno (VAF), expresado en gramos de colorante por kilogramo de la fracción granulométrica inferior a 75 µm, se calcula con la siguiente expresión:

$$VA_F = \frac{V_1}{M_1}$$

Dónde: M1: Masa de la muestra, g;

V1: Volumen total añadido de la solución de colorante, ml.

Los datos obtenidos fueron:

M₁ (g)	100
Concentración (mg/ml)	5
Cantidad de gotas	37

$$VA_F = \frac{37 * 5 \text{ ml} * 5 \text{ mg/ml}}{100 \text{ g}} = 9.25 \text{ mg/g}$$

5.2.6 Equivalente de arena

- **Datos y resultados**

El equivalente de arena se calculará así:

$$\text{Equivalente de Arena (EA)} = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} \times 100$$

En la tabla 5-22 se presentan los resultados:

Tabla 5-22: Resultados ensayo de equivalente de arena agregado natural.

	1	2	3
Lectura de Arcilla (mm)	242	216	238
Lectura de Arena (mm)	26,8	27,2	28,4
Equivalente de Arena %	11,07	12,59	11,93
Promedio	12%		

5.2.7 Resistencia al desgaste en máquina de Los Ángeles

- **Datos y resultados**

Tabla 5-23: Resultados del ensayo de desgaste en máquina de Los Ángeles agregado natural.

Retiene	Peso material (g)
1/4	1009,2
1/2	1391,4
3/4	1028,4
3/8	892,4
PESO MATERIAL ENSAYADO (ANTES)	4321,4
PESO MATERIAL RET. (DESPUÉS)	2565,2

El resultado del ensayo es la diferencia entre la masa original y la masa final de la muestra ensayada, expresada como tanto por ciento de la masa original:

$$\% \text{ perdidas} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100$$

Donde: P_1 : Masa de la muestra seca antes del ensayo, g;

P_2 : Masa de la muestra seca después del ensayo, g.

$$\% \text{ perdidas} = \frac{4321.4 - 2565.2}{4321.4} * 100 = \mathbf{40.64\%}$$

5.2.8 Distribución Granulométrica

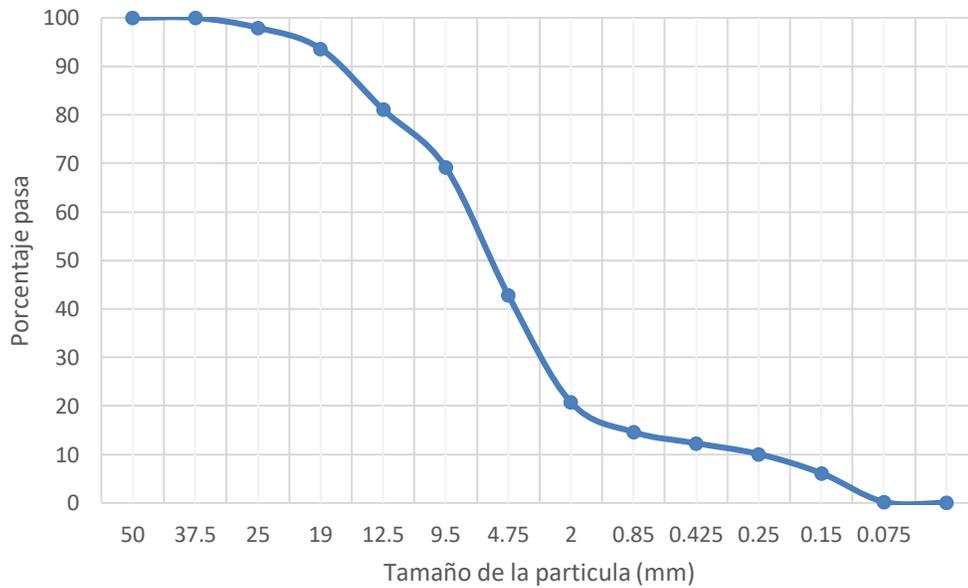
- **Datos y resultados:**

Se determina el porcentaje de material que pasa por un determinado tamiz, dividiendo su masa por la de la muestra en seco original, y multiplicando el resultado por 100. Los datos y resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5-24 y la Figura 5-17.

Tabla 5-24: Granulometría de los agregados naturales.

Reten tamiz	Peso (g)	P. corr. (g)	% retenido	% retenido acumulado	% pasa	Tamaño (mm)
2"	-	-			100	50
1 1/2"	-	-		0	100	37,5
1"	20,81	20,74	2,03	2,03	97,97	25
3/4"	44,14	44,00	4,32	6,35	93,65	19
1/2"	128,37	127,96	12,55	18,90	81,10	12,5
3/8"	122,05	121,66	11,93	30,84	69,16	9,5
#4	269,15	268,30	26,32	57,15	42,85	4,75
#10	226	225,29	22,10	79,25	20,75	2
#20	62,75	62,55	6,14	85,38	14,62	0,85
#40	23,66	23,59	2,31	87,70	12,30	0,425
#60	22,7	22,63	2,22	89,92	10,08	0,25
#100	40,32	40,19	3,94	93,86	6,14	0,15
#200	60,65	60,46	5,93	99,79	0,21	0,075
FONDO	2,15	2,14	0,21	100,00	0,00	
TOTAL	1022,75	1019,52	100			

Figura 5-17: Curva granulométrica del agregado natural de referencia.



Fuente: Propia.

Se establecen los coeficientes de uniformidad y de gradación para la correspondiente clasificación del material:

Coefficiente de uniformidad:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Donde: D_{60} , diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 60% del suelo

D_{10} , diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 10% del suelo

$$C_u = \frac{9.5}{0.25}$$

$$C_u = 38$$

Coefficiente de gradación:

$$C_g = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}}$$

Donde: D_{30} , diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 30% del suelo

D_{60} , diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 60% del suelo

D_{10} , diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 10% del suelo

$$C_g = \frac{(4.75)^2}{0.25 * 9.5}$$

$$C_g = 9.5$$

Con esta información, y los límites calculados anteriormente, es posible establecer la clasificación del material según el Unified Soil Classification System (UCSC), a partir de la cual se define que el material pertenece a una Grava pobremente graduada con arcilla de baja plasticidad (GP-GC).

5.2.9 CBR de suelos compactados en laboratorio y sobre muestra inalterada para agregado natural

- **Datos y resultados:**

En el Anexo A se incluyen las mediciones registradas durante las pruebas, en el formato *Ensayo C.B.R. California Bering Ratio Formato para la toma de datos INV E-148*.

Se presenta en la Tabla 5-25 los datos de los moldes para las sub-muestras ensayadas:

Tabla 5-25: Resultados sub-muestras CBR de Agregado Natural.

CONTENIDO DE AGUA Y PESO UNITARIO	COMPACTACIÓN	FINAL DE INMERSIÓN
Peso del recipiente o molde (g)	7447,8	7447,8
Peso del molde + base (g)	8654,6	8654,6
Peso de la muestra + molde (g)	13155,2	11987,2
Peso unitario (g/cm ³)	2,05	1,52
Recipiente número	CR	121
Peso suelo húmedo + recipiente (p1) (g)	376,6	251,2
Peso suelo seco + recipiente (p2) (g)	326,4	214,8
Peso del recipiente (p3)	40,4	41
Humedad de la muestra (%)	17,55%	20,94%
Peso unitario seco (g/cm ³)	1,74	1,26
Diferencia de humedad (%)	3,4%	

En la Tabla 5-26 se presentan las lecturas de carga para las penetraciones en la prensa de sub-muestra sin inmersión:

Tabla 5-26: Resultados sub-muestras sin inmersión Agregado natural.

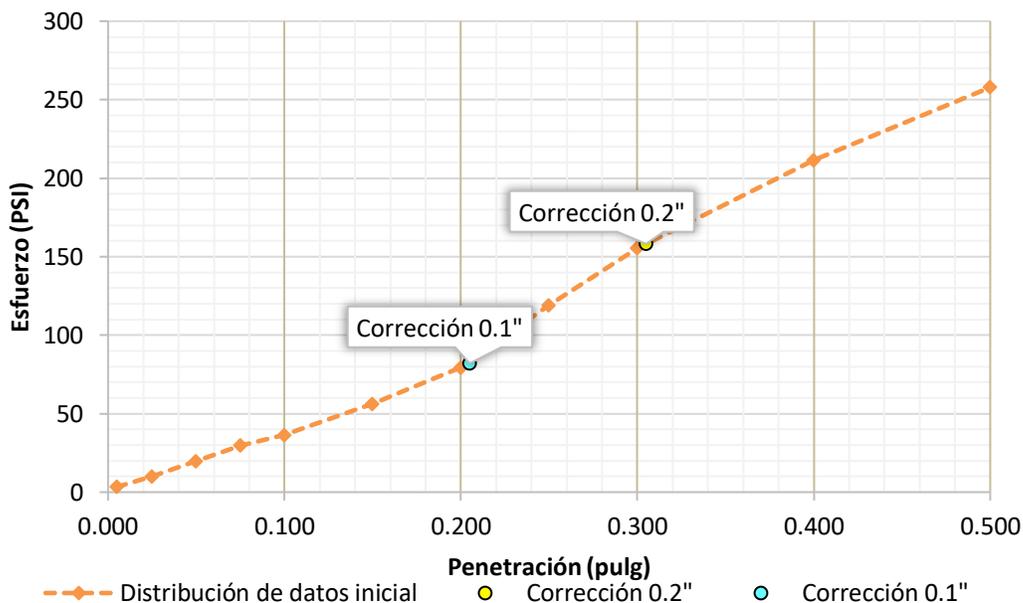
PENETRACIÓN (PULG)	ETAPA DE FALLA SIN INMERSIÓN				
	Carga (lb)	Tiempo	Lectura anillo de carga	Ec. Anillo (lb)	Esfuerzo (lb/plg ²)
0,005	--	6	1	9,92	3,31
0,025	--	30	3	29,75	9,92
0,050	--	1"	6	59,50	19,83
0,075	--	1'30	9	89,24	29,75
0,100	1000	2	11	109,08	36,36
0,150	--	3	17	168,57	56,19
0,200	1500	4	24	237,98	79,33
0,250	--	5	36	356,98	118,99
0,300	1900	6	47	466,05	155,35
0,400	2300	8	64	634,62	211,54
0,500	2600	10	78	773,45	257,82

En la Tabla 5-27 se presentan las lecturas de carga para las penetraciones en la prensa de sub-muestra con ensayo en inmersión. A partir de estos datos, se traza la curva penetración-esfuerzo con su respectiva corrección, ver Figura 5-18 y Tabla 5-28.

Tabla 5-27: Resultado sub-muestra con inmersión Agregado natural.

ETAPA DE FALLA CON INMERSIÓN					
PENETRACIÓN (PULG)	Esfuerzo estándar (lb/pulg ²)	Tiempo	Lectura anillo de carga	Ec. Anillo (lb)	Esfuerzo (lb/plg ²)
0,005	--	6	0,5	4,96	1,65
0,025	--	30	3	29,75	9,92
0,050	--	1"	6	59,50	19,83
0,075	--	1'30	11	109,08	36,36
0,100	1000	2	15	148,74	49,58
0,150	--	3	23	228,07	76,02
0,200	1500	4	28,5	282,61	94,20
0,250	--	5	34	337,14	112,38
0,300	1900	6	39	386,72	128,91
0,400	2300	8	46	456,14	152,05
0,500	2600	10	53	525,55	175,18

Figura 5-18: Curva CBR sin inmersión Agregado natural.



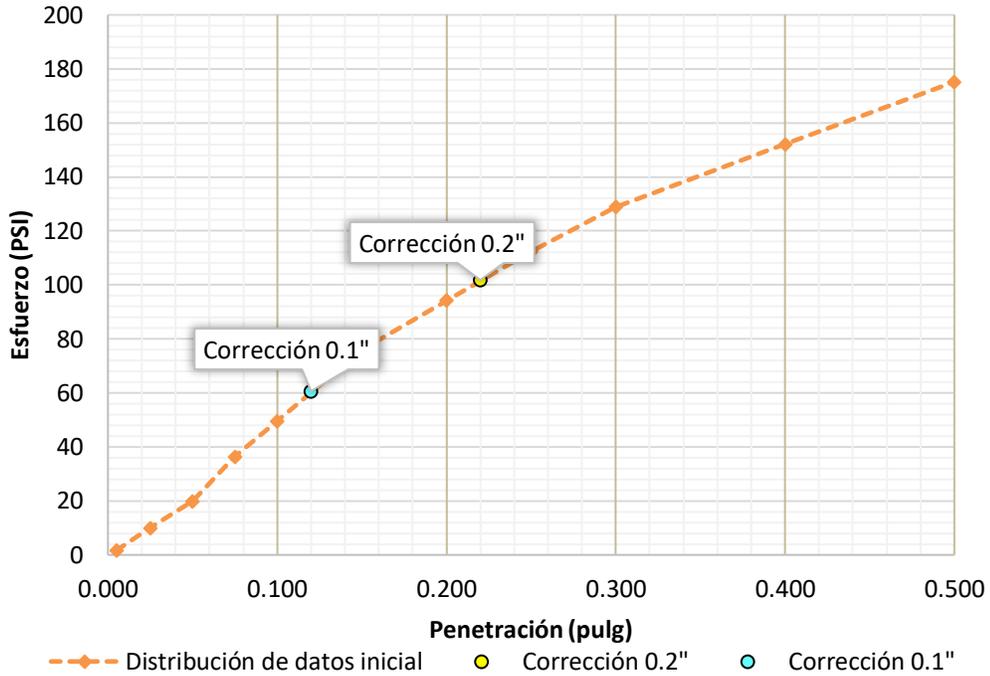
Fuente: Propia.

Tabla 5-28: CBR sin inmersión Agregado natural.

	Esfuerzos (PSI)	CBR (%)
$\sigma_{0,1''}$	82,06	8,21%
$\sigma_{0,2''}$	158,16	10,54%

Se realiza el mismo procedimiento para la sub-muestra ensayada en inmersión, ver Figura 5-19 y Tabla 5-29:

Figura 5-19: Curva CBR con inmersión Agregado natural.



Fuente: Propia.

Tabla 5-29: CBR con inmersión Agregado natural.

	Esfuerzos (PSI)	CBR (%)
$\sigma_{0,1''}$	60,69	6,07%
$\sigma_{0,2''}$	101,84	6,79%

Finalmente se registra el cambio volumétrico de la muestra bajo condición de inmersión en la Tabla 5-30, donde se aprecia que hubo un aumento de volumen del 3% respecto al volumen inicial de la sub-muestra.

Tabla 5-30: Expansión volumétrica sub-muestra con inmersión de agregado natural.

EXPANSIÓN		
FECHA	HORA	Lectura Deformímetro (10⁻³ pulg)
21/03/2019	12:30 p. m.	579
22/03/2019	11:40 a. m.	562
26/03/2019	09:30 a. m.	458
EXPANSIÓN VOLUMÉTRICA		-3%

Se registra un valor negativo, debido netamente a la forma en que registra el deformímetro instalado, que recorre la escala descendientemente.

5.2.10 Resumen caracterización Agregado natural

En la Tabla 5-31 se presenta el resumen de la caracterización del agregado natural de referencia:

Tabla 5-31: Resumen resultado caracterización agregado natural.

Ensayo	Resultado ensayos Agregado Natural
Límite Líquido	33
Límite Plástico	18
Índice de Plasticidad	15
Humedad óptima de compactación	16,0%
Densidad Seca Máxima	17,7 KN/m ³
Índice de alargamiento	18%
Índice de aplanamiento	26%
Azul de Metileno	10 mg/g
Equivalente de arena	12%
Desgaste por máquina de los ángeles	41%
Coeficiente de uniformidad	38
Coeficiente de gradación	9.5
Clasificación UCSC	GP-GC
CBR*	7%

*: Se reporta el CBR a 0.2" bajo condiciones con inmersión, por ser esta la situación previsible de operación vial en las zonas cercanas a Bogotá.

5.3 Caracterización de llantas

De acuerdo al marco teórico y normativo, se seleccionan las llantas Rin 13" para diseñar los módulos de celdas de confinamiento. En la tabla 5-32 se presenta la información de las dimensiones para las llantas seleccionadas para la posterior construcción del modelo físico.

Tabla 5-32: Características de las llantas

Características	Valor
Diámetro externo (cm)	57,5
Espesor (cm)	0,5
Altura (cm)	17,5
Ancho flanco (cm)	12,25
Peso (kg)	3

6. Diseño y construcción de modelo de pruebas

La sola caracterización de los agregados reciclados no resulta suficiente para establecer su competencia para la construcción alternativa de vías con bajos volúmenes de tránsito. Por ello, se plantea la construcción de un modelo físico para poder observar el comportamiento in situ de una celda de confinamiento constituida por el neumático de una llanta desechada, rellena de agregado reciclado de RCD compactado, ubicada sobre el terreno natural y expuesta a condiciones ambientales naturales.

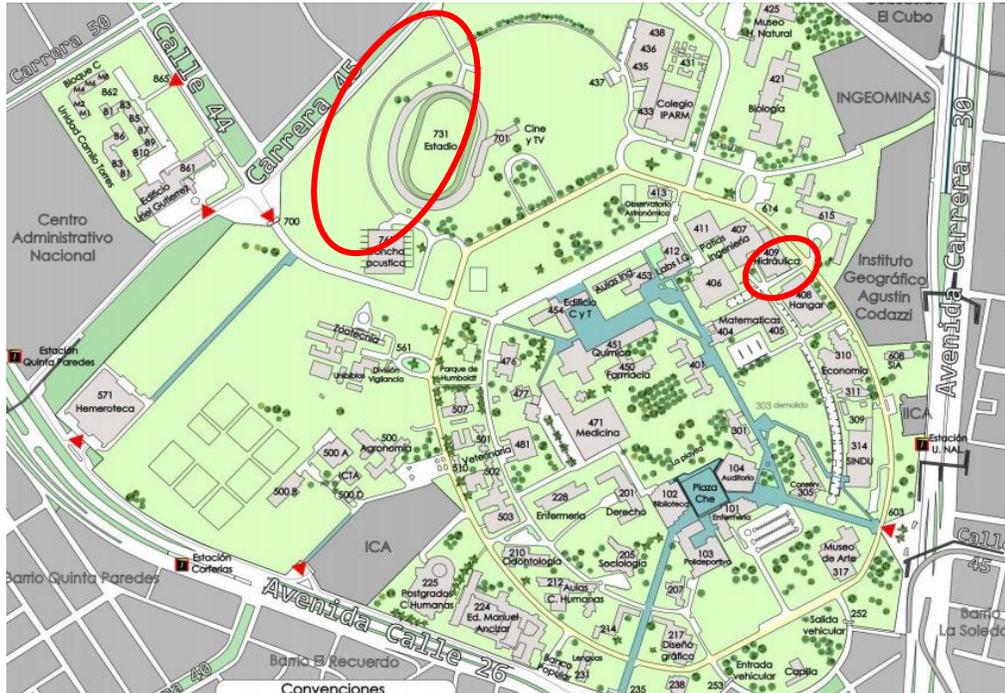
Paralelamente, se construye una sección de observación compuesta por un agregado natural compactado, sin confinamiento lateral. Este tramo, permitirá comparar una solución convencional, con la alternativa estudiada en esta investigación.

Para esos fines, se procedió a seleccionar un lugar apropiado para la construcción del modelo dentro del campus universitario de la Sede Bogotá. Luego, se diseñó el modelo y finalmente, se materializó mediante su construcción. A continuación, se detalla cada actividad realizada en cada proceso.

6.1 Selección de ubicación del modelo de pruebas

Para la construcción del modelo de prueba, se evalúa la opción de construirlo dentro del campus de la Universidad por facilidad de control del proceso constructivo, elaboración de ensayos, y control y seguimiento. Con esto en mente, se hace un recorrido por algunas vías no pavimentadas dentro del campus, y se determinan dos posibles lugares de mayor factibilidad y provecho para el estudio a realizar (Ver Figura 6-1): el primer sitio es sobre la vía aladaña al estadio universitario, que comunica con la carrera 45, por donde ocasionalmente se permite el ingreso de vehículos pesados para las obras de construcción que se están realizando en la Universidad. El segundo sitio es la vía ubicada entre el edificio de hidráulica y el CADE de Ingeniería.

Figura 6-1: Posibles sitios la para fase de modelación física.



Fuente: Pagina Web Universidad Nacional de Colombia.

- **Vía aledaña a Estadio Universitario**

Corresponde a una vía de 3,6m de ancho, con una longitud aproximada de 100m, ver Figura 6-2.

Figura 6-2: Estado de la vía aledaña al estadio universitario.



Fuente: Propia.

Por esta vía transitan actualmente los vehículos pesados que ingresan materiales de construcción y retiran residuos de construcción de las obras que se llevan a cabo dentro del campus. Por lo mismo, podrían no reproducir las condiciones reales de vías con bajos

volúmenes de tránsito. Además, en su momento se consideró inconveniente la posibilidad de suspender las pruebas y el seguimiento, en aras de no obstaculizar el tránsito permanente de vehículos, pues esta vía hace parte del Plan de Manejo del Tránsito de las obras.

- **Vía entre el edificio de Hidráulica y el CADE de Ingeniería**

Corresponde a una vía de ancho aproximado de 3,6m, con una longitud inferior a los 70m, ver Figura 6-3, por la cual transitan vehículos livianos y algunos camiones para llegar al parqueadero de los edificios de IEI, Matemáticas, y CADE de ingeniería. Por su cercanía al laboratorio de geotecnia y su accesibilidad, se selecciona este sitio para el estudio del comportamiento de las celdas de neumático rellenas del agregado reciclado.

Figura 6-3: Estado vía aledaña al CADE de Ingeniería.



Fuente: Propia.

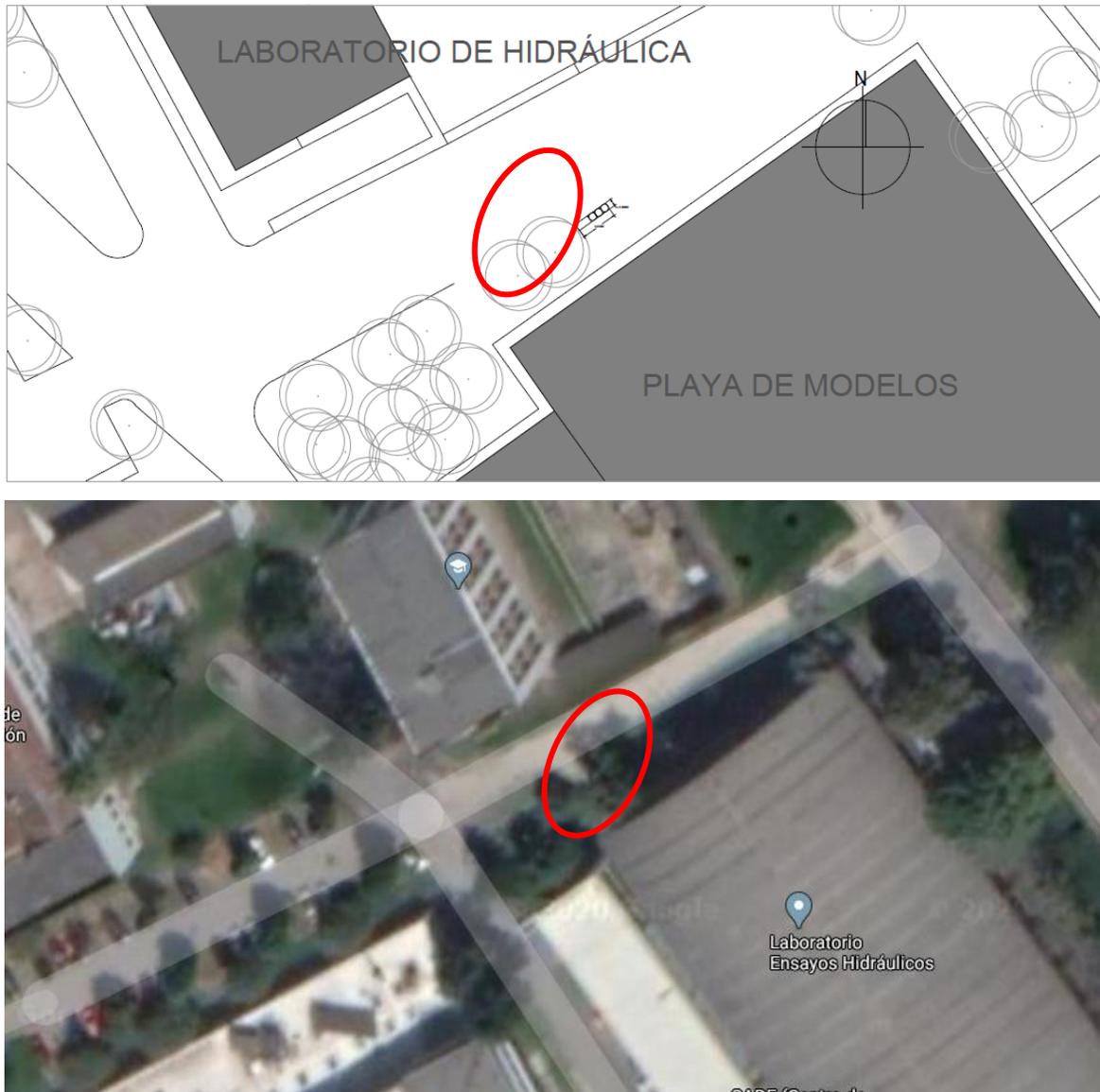
6.2 Diseño del modelo de pruebas

Una vez seleccionado el tramo vial, se estableció el sitio específico donde se ubicaría el modelo físico, buscando facilidad de acceso para la construcción y para las pruebas de desempeño. En la Figura 6-4 se presenta la localización del modelo en el tramo vial.

El modelo físico a escala para pruebas de desempeño contempla varias secciones de capa de pavimento con diversas soluciones. Además de la celda de confinamiento con agregado reciclado de RCD y la sección de referencia con agregado natural sin confinamiento, en el proyecto financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional Sede

Bogotá, se contemplan dos secciones adicionales, una con celdas rellenas de RAP y otra, de una mezcla entre RAP y agregado natural (estudiados en otra tesis de Maestría). En todos los casos, se considera que la capa conformada queda como una rodadura tipo afirmado, típica de las vías terciarias de bajos volúmenes de nuestro medio.

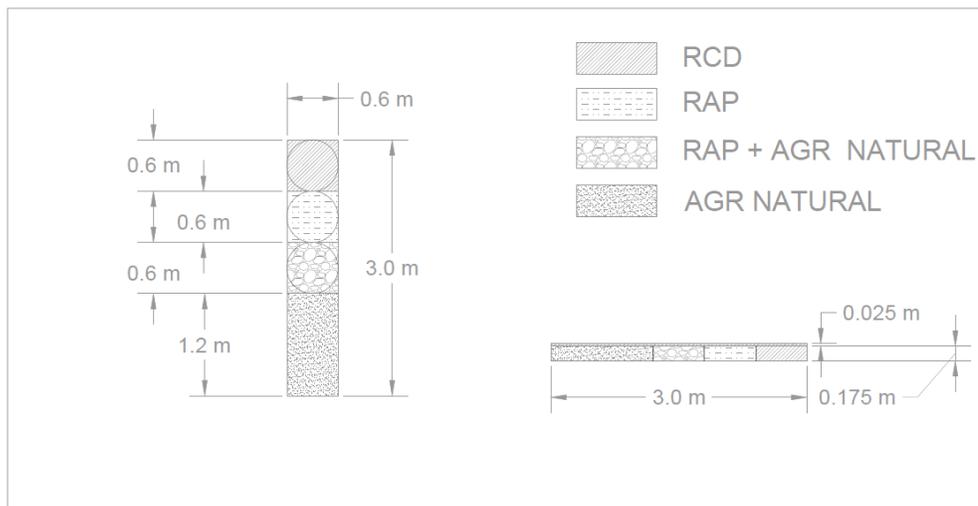
Figura 6-4: Localización modelo de pruebas.



Fuente: Propia.

El tamaño del modelo queda definido por una longitud de 3.0 m y un ancho igual al diámetro de una llanta (0,6 m). En la Figura 6-5 se presenta la distribución de las diferentes secciones dentro del modelo físico de pruebas.

Figura 6-5: Distribución modelo de pruebas.



Fuente: Propia.

Dentro de las celdas de confinamiento se prevé la colocación y compactación de agregados en las siguientes proporciones:

- Reciclado de *RCD 100% + Llanta de confinamiento
- Reciclado de RAP 100% + Llanta de confinamiento
- Reciclado de RAP (75%) + Agregado Natural (25%) + Llanta de confinamiento
- Agregado Natural 100%

*Para esta tesis RCD 100% hace referencia a la mezcla de residuos concreto hidráulico, asfáltico, mampostería, agregado natural, producido por GRECO como subbase clase A.

6.3 Construcción del modelo de pruebas

6.3.1 Preparación de las celdas de confinamiento

Previo a la construcción del modelo en el sitio seleccionado, es necesario preparar las llantas, de manera que queden conformando una celda donde se pueda confinar el material granular que será utilizado como relleno.

Las llantas Rin 13 seleccionadas para conformar los módulos de celdas de confinamiento se pueden apreciar en la Figura 6-6.

Figura 6-6: Llantas seleccionadas como celdas de confinamiento



Fuente: Propia.

Estas llantas fueron adecuadas removiendo una de las partes laterales, para facilitar el vaciado y posterior compactación del material de relleno. Esta actividad se realiza manualmente mediante cortador. Las llantas así preparadas, quedan listas para ser trasladadas y colocadas en el sitio de modelado físico. Ver Figura 6-7 y Figura 6-8.

Figura 6-7: Llantas cortadas.



Fuente: Propia.

Figura 6-8: Retiro de laterales de llantas de modelo de pruebas.



Fuente: Propia.

De acuerdo con el diseño realizado, se procede con la materialización del modelo físico de pruebas, mediante las siguientes actividades.

6.3.2 Preparación de las celdas de confinamiento

Se realizan labores iniciales de desmonte y limpieza, se excava y descapota la capa vegetal y material orgánico inadecuado. Ver Figura 6-9.

Figura 6-9: Excavación de modelo de pruebas.



Fuente: Propia.

6.3.3 Adecuación del confinamiento lateral

Se realizan trabajos previos para la colocación de los módulos de celdas y agregado reciclado de RCD, esto con el fin de generar confinamiento lateral en la zanja para el sistema modular. Ver Figura 6-10.

Figura 6-10: Adecuación del confinamiento lateral de modelo de pruebas.



Fuente: Propia.

6.3.4 Transporte y almacenamiento del material

Se dispone del material que fue obtenido en la planta de agregados reciclados de GRECO, el cual se encontraba debidamente almacenado en el laboratorio de geotecnia de la Universidad Nacional. Éste es transportado hasta el punto de construcción del modelo, donde se prepara a contenido óptimo de agua, para obtener el peso unitario seco máximo, evitando contaminar el material. Ver Figura 6-11.

Figura 6-11: Preparación material de modelo de pruebas.



Fuente: Propia.

6.3.5 Colocación de las celdas sobre la superficie

Las llantas precortadas se instalan sobre la superficie preparada como se indicó anteriormente, garantizando el contacto pleno entre llantas vecinas, para favorecer la interacción y evitar movimientos relativos entre ellas. Ver Figura 6-12.

Figura 6-12: Colocación de llantas en modelo de pruebas.



Fuente: Propia.

Se dispone de un espacio final sin celda, donde se colocará el material de control para posterior comparación de resultados.

6.3.6 Extensión y conformación del material granular

El agregado reciclado se distribuye en una sola capa sobre el ancho de la sección para cada una de las celdas de compactación; debido a que se evalúan diferentes agregados, para evitar posibles mezclas, el material se distribuye manualmente sobre cada celda unitaria, de manera cuidadosa. Ver Figura 6-13.

Figura 6-13: Extensión de material en modelo de pruebas.



Fuente: Propia.

6.3.7 Compactación de la capa granular

Una vez el material está conformado debidamente, y teniendo en cuenta la magnitud del modelo de ensayos, resulta apropiado compactar los materiales con un apisonador tipo canguro. Esta compactación se realiza distribuida sobre toda la superficie del modelo para que haya homogeneidad de la capa de material granular. Ver Figura 6-14.

Figura 6-14: Compactación de material en modelo de pruebas.



Fuente: Propia.

Finalmente, se coloca una capa granular de protección para el modelo de pruebas de un espesor aproximado de 2.5 cm. Ver Figura 6-15.

Figura 6-15: Modelo de pruebas.



Fuente: Propia.

Finalizado el modelo, es posible obtener el nivel de compactación estimado para la sección de interés. Para ello, se calcula la densidad lograda a partir de la masa de material empleada, correspondiente a 85 kg para el agregado reciclado de RCD, y la dimensión de la sección, correspondiente a las dimensiones de 0.6m de ancho y largo, y 0.175m de profundidad; este valor obtenido se compara con la densidad seca máxima obtenida en laboratorio. Igualmente se puede calcular la densidad en la sección de referencia, en la que se emplea un total de 195 kg de agregado natural, en una sección cuyas dimensiones corresponden a 0.6m de ancho, 1.2m de largo, y 0.175m de profundidad. Ver Tabla 6-1.

Tabla 6-1: Compactación del agregado reciclado en el modelo de pruebas

SECCIÓN	DENSIDAD COMPACTACIÓN	
	kN/m^3	(%)
RCD	13.9	71
Agregado natural	15.5	89

Puede observarse que el nivel de compactación de la sección es más bajo de lo esperado, lo cual puede atribuirse, a la distribución granulométrica del material, al poseer bajo contenido de partículas finas, pueden quedar espacios vacíos, resultando una estructura poco densa. Esto se corrobora con el nivel de compactación obtenido en la sección de agregado natural, el cual, al disponer de una mejor gradación en su fracción fina, se obtiene un nivel de compactación más cercano a su densidad seca máxima.

7. Pruebas de caracterización mecánica en campo

7.1 Pruebas de caracterización mecánica en campo

En el marco del proyecto de investigación financiado por la DIB se realizaron pruebas para determinar las propiedades mecánicas in situ, sobre las diferentes secciones del modelo físico. Los ensayos realizados bajo los lineamientos de las normas INVIAS, se indican en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1: Ensayos in situ modelo de pruebas.

Ensayo	Norma
<i>Ensayo de penetración dinámica de cono</i>	<i>INV-172</i>
<i>Medición de deflexiones mediante deflectómetro de impacto (FWD)</i>	<i>INV-798</i>

7.1.1 Ensayo de penetración dinámica de cono

En la Figura 7-1 se muestra el Penetrómetro disponible en el laboratorio de geotecnia de la Universidad Nacional, con el cual se efectuaron las pruebas de capacidad portante in situ.

Figura 7-1: PDC Universidad Nacional de Colombia.



Fuente: Propia.

Inicialmente se seleccionaron tres puntos alrededor del modelo físico, para determinar las características del terreno natural, según se ve el procedimiento en la Figura 7-2.

Figura 7-2: Ensayo PDC alrededor del modelo de pruebas.



Fuente: Propia.

En el Anexo B se incluyen las mediciones registradas durante las pruebas, en el formato *informe de ensayo. uso del penetrómetro dinámico de cono en aplicaciones de pavimentos a poca profundidad INV E-172-13*.

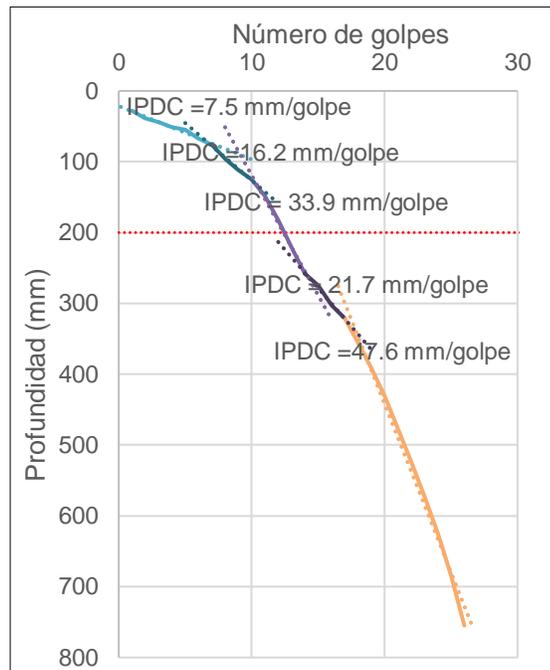
A partir de estos tres ensayos, se obtienen las curvas o perfil de penetración del terreno natural o subrasante, mostradas en las Figuras 7-3, 7-4, 7-5.

Los perfiles de penetración de las pruebas 1 y 2 en la subrasante, resultan muy similares, con los índices de Penetración Dinámicos con Cono IPDC promedio mostrados en la Tabla 7-2. Adicionalmente, se presentan los resultados de CBR estimados con base en la siguiente expresión a partir de la Norma INVIAS INV-172.

$$CBR\% = \frac{292}{IPDC^{1.12}}$$

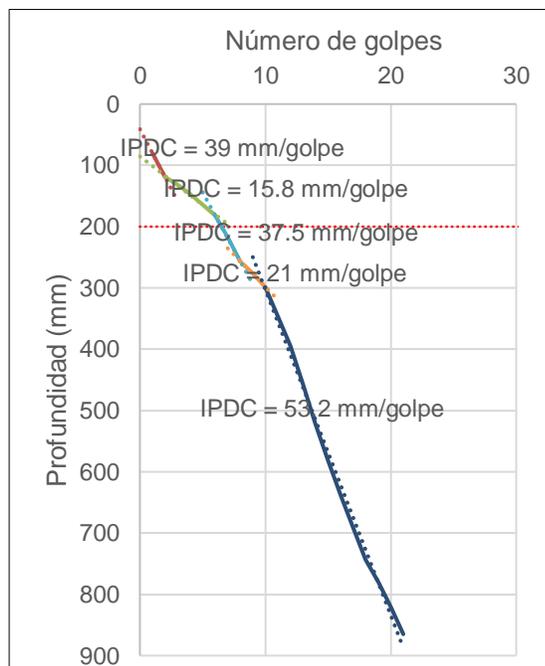
El perfil de la prueba 3, indica que, por debajo de los 500 mm de profundidad, el IPDC se incrementa a 70 mm/golpe. Cabe resaltar, que a mayor valor de IPDC, menor es la capacidad de soporte del suelo de subrasante.

Figura 7-3: Curva de penetración en la subrasante - ensayo 1.



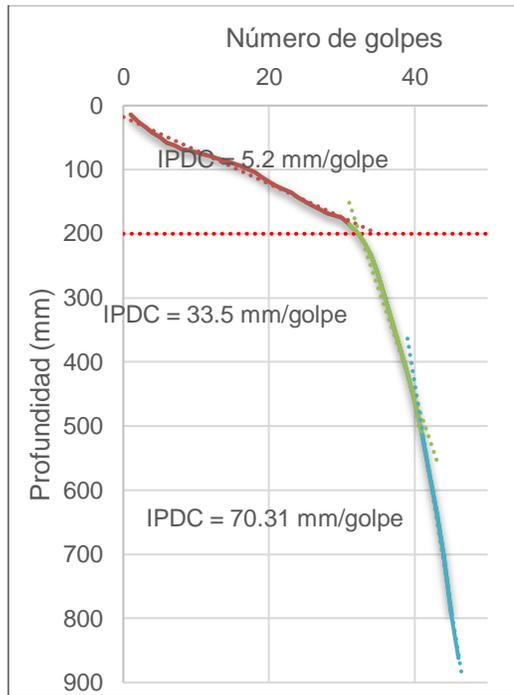
Fuente: Propia.

Figura 7-4: Curva de penetración en la subrasante - ensayo 2.



Fuente: Propia.

Figura 7-5: Curva de penetración en la subrasante - ensayo 3.



Fuente: Propia.

Tabla 7-2: Resultados del ÍPDC para la subrasante.

Prof. (mm)	IPDC (mm/golpe)	CBR (%)
0 a 50	7,5	31
50 a 150	16	13
150 a 260	36	5
260 a 320	21	10
+ 320	50	4

Paralelamente, se realizaron pruebas de Penetración Dinámica con Cono PDC inmediatamente construido el modelo físico, sobre las diferentes secciones.

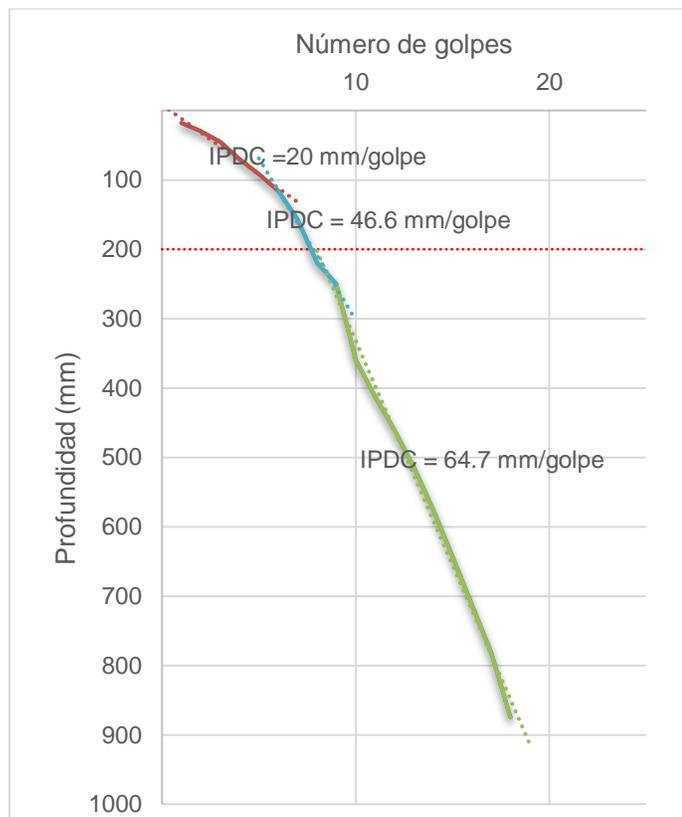
Para esta tesis, resulta de interés los datos medidos tanto en la sección confinada con agregado reciclado de RCD (prueba 4), como en el agregado natural sin confinamiento (prueba 7).

Adicionalmente, Mendoza (2020), realizó mediciones en otros dos momentos: después de 50 ciclos de carga (pruebas 5 y 8) y después de 100 ciclos de carga (pruebas 6 y 9).

Esta carga fue impuesta por medio de un automóvil pasando sobre el modelo a una velocidad promedio de 25 km/h, correspondiente a una frecuencia de carga de 4 Hz.

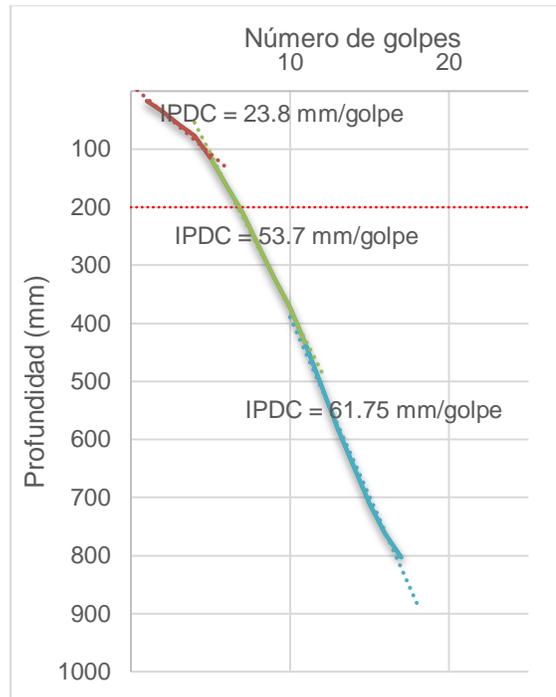
Para la celda con agregado reciclado de RCD, se obtienen las curvas de penetración mostradas en la Figura 7-6, Figura 7-7, Figura 7-8, respectivamente para las condiciones después de construcción y después de 50 y de 100 ciclos de carga.

Figura 7-6: Curva de penetración RCD sin ciclos de carga.



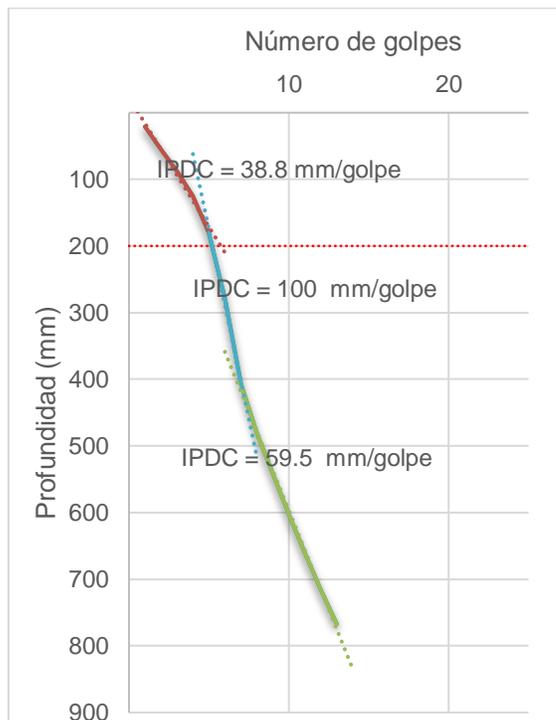
Fuente: Propia.

Figura 7-7: Curva de penetración RCD con 50 ciclos de carga.



Fuente: Mendoza (2020).

Figura 7-8: Curva de penetración RCD con 100 ciclos de carga.



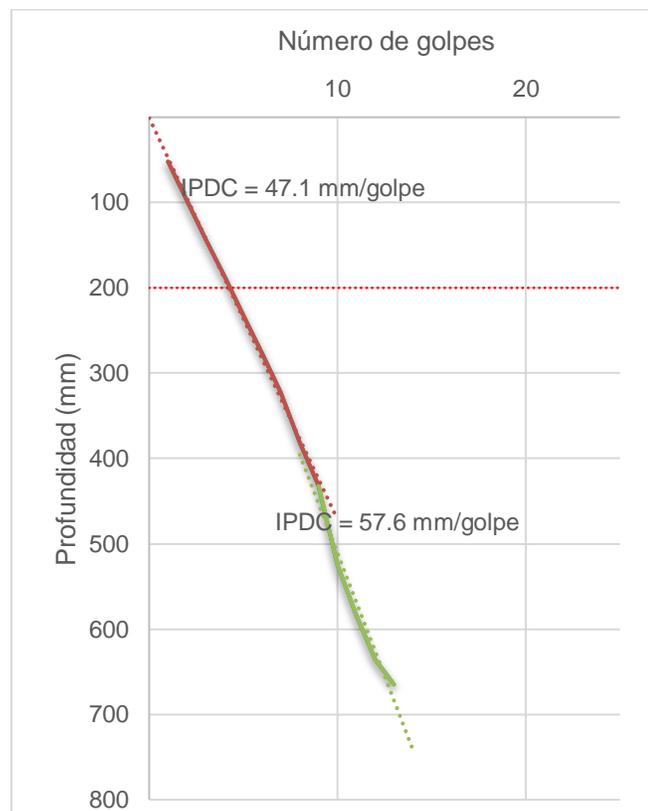
Fuente: Mendoza (2020).

Tabla 7-3: Índice PDC ensayos celda RCD.

ENSAYO	Índice PDC mm/golpe	
	En la Celda	Bajo la Celda
4	20	65
5	24	62
6	39	60

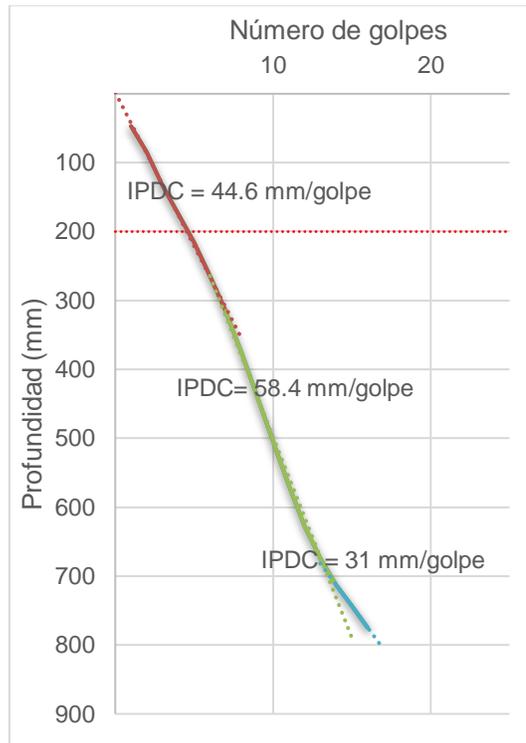
Se realiza el mismo procedimiento con el agregado natural sin confinamiento, para obtener las curvas de penetración y poder comparar los resultados obtenidos. Ver Figura 7-9, Figura 7-10, Figura 7-11:

Figura 7-9: Curva de penetración Agregado natural sin ciclos de carga.



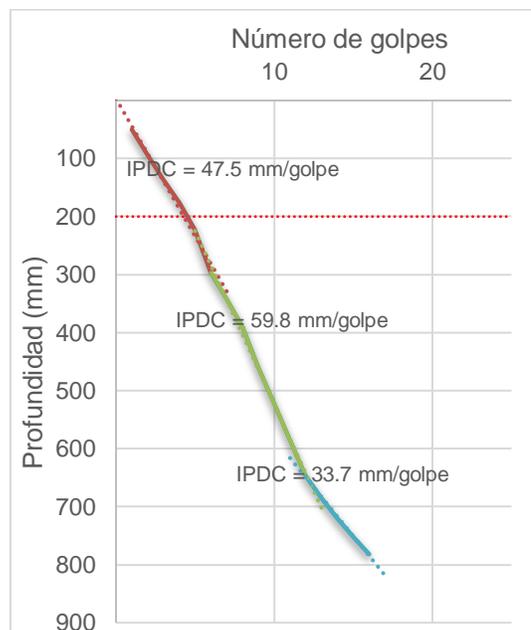
Fuente: Propia.

Figura 7-10: Curva de penetración Agregado natural con 50 ciclos de carga.



Fuente: Mendoza (2020).

Figura 7-11: Curva de penetración Agregado natural con 100 ciclos de carga.



Fuente: Mendoza (2020).

Tabla 7-4: Índice PDC ensayos Agregado natural sin confinamiento.

ENSAYO	Índice PDC mm/golpe	
	En la celda	Bajo la Celda
7	47	53
8	45	50
9	48	51

7.1.2 Medición de deflexiones con FWD

En la fundamentación teórica se expusieron los principios del ensayo de deflexiones por impacto. Estos ensayos fueron realizados por Mendoza (2020), en el marco del proyecto de investigación financiado por la DIB.

El equipo FWD disponible en el laboratorio de Geotecnia de la Universidad Nacional de marca JILS, se transportó hacia la zona del modelo físico. Para cada prueba, se colocó la placa de carga sobre el punto escogido para el ensayo, correspondiente a la zona central de cada sección del modelo.

Durante la prueba, se levanta el generador de fuerza a la altura deseada y se deja caer la masa, registrando las deflexiones superficiales y la carga aplicada.

Si bien el deflectómetro utilizado permite tomar medidas en varios puntos alejados del eje de carga, para esta investigación, solo se tendrá en cuenta la deflexión máxima registrada justo bajo la carga aplicada. Lo anterior, debido a que el arreglo de confinamiento de las celdas no permite garantizar un medio continuo como lo establece el ensayo; es decir que la frontera de la llanta causa interferencias en las mediciones de deflexión.

El rango de carga seleccionado corresponde al menor con que puede operar el equipo, el cual está entre 6000 lb (26.7 kN) y 18000 lb (80.1 kN). La magnitud de la carga aplicada se definió teniendo en cuenta el tipo de tránsito esperado para las vías donde se plantea presentar esta solución, correspondientes a vías con bajo volumen de tránsito BVT. Se optó por una carga de 7000 lb (31.3 kN; 6.4 Ton), nivel inferior al ejercido por un eje simple de dos llantas, tomado típicamente en el país como eje de diseño de 8.2 ton (9000 lb).

Para cada sitio de evaluación se realiza una serie de 3 impactos de carga, utilizando una placa de radio 0.15 cm y área 0,0707 m²

▪ **Datos y resultados**

En la Tablas 7-5 se muestran las deflexiones registradas en el centro de la celda con RCD. Adicionalmente, se realizó una prueba justo en la frontera de la celda, para registrar la respuesta elástica de la llanta; estos resultados se muestran en la Tabla 7-6.

Tabla 7-5: Resultados FWD celda RCD modelo de pruebas.

Carga (kN)	Presión (kPa)	Deflexión (mm)
32,0	453,11	1,753
31,3	443,16	1,866
31,5	445,92	1,644
<u>31,6</u>	<u>447,40</u>	<u>1,75</u>

Tabla 7-6: Deflexión registrada en la frontera de la celda con RCD.

Carga (kN)	Presión (kPa)	Deflexión (mm)
31,5	445,54	1,168
32,0	453,09	1,158
32,2	454,98	1,168
<u>31,9</u>	<u>451,20</u>	<u>1,16</u>

A continuación, en la Tabla 7-7 se muestran los resultados obtenidos sobre el agregado natural sin confinamiento lateral.

Tabla 7-7: Deflexiones registradas sobre el agregado natural

Carga (kN)	Presión (kPa)	Deflexión (mm)
31,0	437,99	2,632
31,5	445,54	2,642
31,4	444,28	2,635
<u>31,3</u>	<u>442,60</u>	<u>2,64</u>

Con base en estos resultados, Mendoza (2020) estimó los módulos elásticos mostrados en la Tabla 7-8, a partir del desarrollo de la aplicación denominada SIMCApave, los cuales fueron corroborados con modelación numérica, mediante el software comercial PLAXIS.

Tabla 7-8: Módulos elásticos estimados con base en deflexiones

Módulo elástico estimado (MPA)		
SECCIÓN	SIMCApave 1.0	PLAXIS 3D
<i>Celda RCD</i>	201	186
<i>Frontera de celda RCD</i>	764	-
<i>Agregado natural</i>	57	55

8. Análisis de resultados

En este Capítulo se efectúa el análisis de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio y de campo, con una visión integradora que permita conocer las características de materiales de construcción reciclados, así como el desempeño de una capa de pavimento conformada con materiales reutilizados: una llanta vehicular desechada y agregados provenientes del reciclaje de RCD, confinados dentro de la llanta. El análisis se lleva de manera comparativa con la caracterización y el desempeño que exhibe un material granular convencional, con métodos constructivos tradicionales.

8.1.1 Evaluación de calidad del agregado reciclado

En la Tabla 8-1 se presenta un resumen de propiedades obtenidas por otros investigadores en Colombia, Latino América, y a nivel mundial, para realizar un análisis comparativo, que permita concluir sobre la calidad del agregado empleado en esta investigación y su aptitud para uso a mayor escala en proyectos viales de bajos volúmenes de tránsito. De igual manera, se incluyen también los resultados obtenidos sobre un agregado natural convencional, utilizado también como referente comparativo.

Vale la pena recordar que el agregado reciclado suministrado por GRECO SAS para esta investigación, resulta ser una mezcla de residuos de concreto asfáltico e hidráulico y de mampostería, con agregado natural, el cual se distribuye como material de subbase granular clase A.

En la Tabla 8-2 se incluyen las especificaciones de calidad establecidas tanto por el INVÍAS a nivel nacional (Cap. 3. Tabla 320-2), como por el IDU en el ámbito Distrital (Sección 400-11. Tabla 400-3), como referentes normativos de comparación de propiedades de un material convencional de subbase.

Tabla 8-1: Comparación resultados caracterización RCD.

Ensayo	Agregado reciclado	A	B	C	D	E	Agregado natural de referencia
Humedad óptima de compactación (%)	9,30	13,50	11,53	13,00	12,00	16,00	16,00
Densidad Máxima (kN/m³)	19,7	18,2	19,9	18,5	19,6	17,4	17,7
Índice de Aplanamiento (%)	17	29	11	-	-	-	18
Índice de Alargamiento (%)	18	-	-	-	-	-	26
Azul de Metileno (mg/g)	5	-	-	-	-	-	10
Expansión por inmersión (%)	0.5	-	-	-	-	-	3
Equivalente de arena (%)	45	-	67	70	46	65	12
Desgaste por máquina de los ángeles (%)	31	51	39	38	28	59	41
CBR (%)	68	117	98	97	118	99	7

A: Leite. F., Motta. R., Vasconcelos. K., y Bernucci. L. (2011. Brasil)

B: Agrela. F., Barbudo. A., Ramírez. A., Ayuso. J., Carvajal. M. y Jiménez. J. (2012. España)

C: Gómez. A. y Farias. M. (2012. Brasil)

D: Arulrajah. A., Disfani. M., Horpibulsuk. S., Suksiripattanapong. C., y Prongmanee. N. (2014. Australia)

E: Olmedo. O. y Barrera. E. (2015. Colombia)

Tabla 8-2: Comparación resultados caracterización RCD.

Ensayo	Agregado reciclado	F	G
<i>Humedad óptima de compactación (%)</i>	9,30	-	-
<i>Densidad Máxima (kN/m3)</i>	19,7	-	-
<i>Índice de Aplanamiento (%)</i>	17	-	-
<i>Índice de Alargamiento (%)</i>	18	-	-
<i>Azul de Metileno (mg/g)</i>	5	-	<10
<i>Equivalente de arena (%)</i>	45	> 25	>18
<i>Desgaste por máquina de los ángeles (%)</i>	31	< 45	<40
<i>CBR (%)</i>	68	> 40	>30

F: INVIAS Cap. 3. Tabla 320-2. Requisitos de los agregados para sub-bases granulares.

G: IDU Sección 400-11. Tabla 400-3. Requisitos de los agregados para subbases granulares

De estos comparativos se puede determinar que los agregados reciclados de RCD estudiados, presentan la menor humedad óptima de compactación, atribuible a la composición de la sub-base A, la cual contiene además de RCD, incluye RAP y agregados naturales triturados, por lo que el requerimiento de agua para obtener la máxima densidad seca es menor.

De igual manera, al presentar un bajo porcentaje de finos en la mezcla, se espera un menor contenido óptimo de humedad, si bien, se considera igualmente que, al contener partículas de cemento adheridas a los agregados, estos requerirán parte del agua adicionada para activarse, por lo que un porcentaje de 9.3% resulte un valor razonable. Con respecto al agregado natural de referencia, al ser un material con fracción fina arcillosa, requiere mayores cantidades de agua para obtener la respectiva densidad seca máxima.

En otras investigaciones no se ha realizado el ensayo de azul de metileno, por lo que no se puede establecer una comparación con los agregados reciclados de otras ciudades. Comparando el resultado con el agregado natural de referencia, se encuentra que presenta un índice muy inferior, lo que indica que el agregado reciclado es un material con poca cantidad de partículas arcillosas, por lo que no presenta un alto potencial de cambio volumétrico. Esto se puede observar en la expansión calculada por inmersión en el ensayo de CBR, donde el agregado natural de referencia presentó un aumento volumétrico del 3%, mientras que el agregado reciclado tan solo presentó un incremento menor del 0.5%. Para el caso que nos ocupa, la Norma IDU indica un valor inferior a los 10 miligramos por gramo de suelo, el cual es cumplido por el agregado reciclado de RCD, indicando que se presenta un material inerte y adecuado para la construcción de capas de sub-base.

Respecto al equivalente de arena, resulta inferior en comparación con otras investigaciones internacionales, lo que indica que el RCD utilizado en esta investigación no presentan la misma limpieza que los agregados reciclados en otras regiones; esto posiblemente es atribuible a la adición de agregado natural que tiene la mezcla, y el contenido de material cerámico triturado de los residuos de construcción. Sin embargo, presenta un resultado mayor al equivalente de arena del agregado natural de referencia, indicando una baja proporción de finos arcillosos respecto al material natural suministrado para esta investigación, el cual puede ser típico del que se utiliza en los alrededores de la ciudad. Respecto a su uso según las normas vigentes, para ambas normas se indican valores superiores al 18% de limpieza de la fracción fina de la mezcla, valor que es cumplido y superado por el agregado reciclado de RCD, indicando que es adecuado para la construcción de capas de sub-base.

Respecto al peso unitario, se encuentra un valor promedio en comparación con otras investigaciones, que se ajusta a las características evaluadas del agregado reciclado de RCD, atribuible al contenido de concreto reciclado, y el contenido adicionado de agregados naturales triturados.

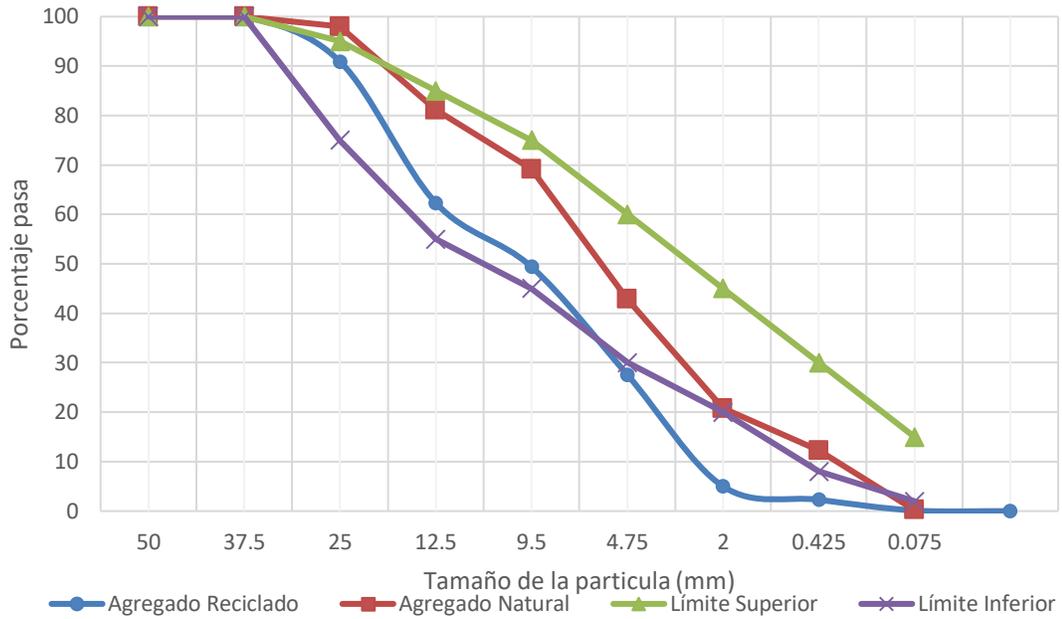
En cuanto a los índices de forma, se observan bajos valores, en comparación con el agregado natural de referencia, indicando un material uniforme en sección, por lo que puede presentar mejor entramamiento mecánico entre partículas, lo que a su vez indica un mejor desempeño ante imposición de cargas.

En relación con el desgaste en Máquina de Los Ángeles, se obtiene un muy buen resultado en comparación con los resultados de otras investigaciones, atribuible a la adición de agregado natural y el contenido de RAP en la mezcla, reduciendo la pérdida de material deleznable. Adicionalmente, el desgaste resulta inferior al presentado por el agregado natural tomado como referente, lo cual indica que el agregado reciclado presenta un menor desgaste bajo la aplicación de cargas de tránsito y circulación respecto a los agregados de la región, reflejando buena dureza del material, siendo indicativo de la permanencia de la gradación durante la vida útil en la obra vial donde se utilicen. En cuanto a las normas, estas indican un valor requerido inferior al 40% de pérdida de material por desgaste, lo cual cumple el agregado reciclado de RCD, de manera que se considera como un material adecuado para la construcción de capas de sub-base.

Respecto al CBR, las normas indican un valor requerido superior al 30% para los materiales de sub-base, valor que se supera por el agregado reciclado de RCD, indicando que presenta una resistencia adecuada para ser material para la construcción de capas de sub-base. Si bien el CBR resulta apropiado para ser utilizado en vías de bajo y medio tráfico en nuestro medio, igual resulta inferior al obtenido en otras investigaciones; esto puede estar asociado con un menor contenido de reciclado de concreto hidráulico, y al contenido de reciclado de materiales cerámicos y de RAP. Igualmente, en comparación con el agregado natural de referencia, se obtiene un CBR aproximadamente 10 veces mayor, lo que indica que el agregado reciclado va a presentar un comportamiento muy superior a la resistencia de cargas, respecto a los agregados naturales encontrados y utilizados en la región.

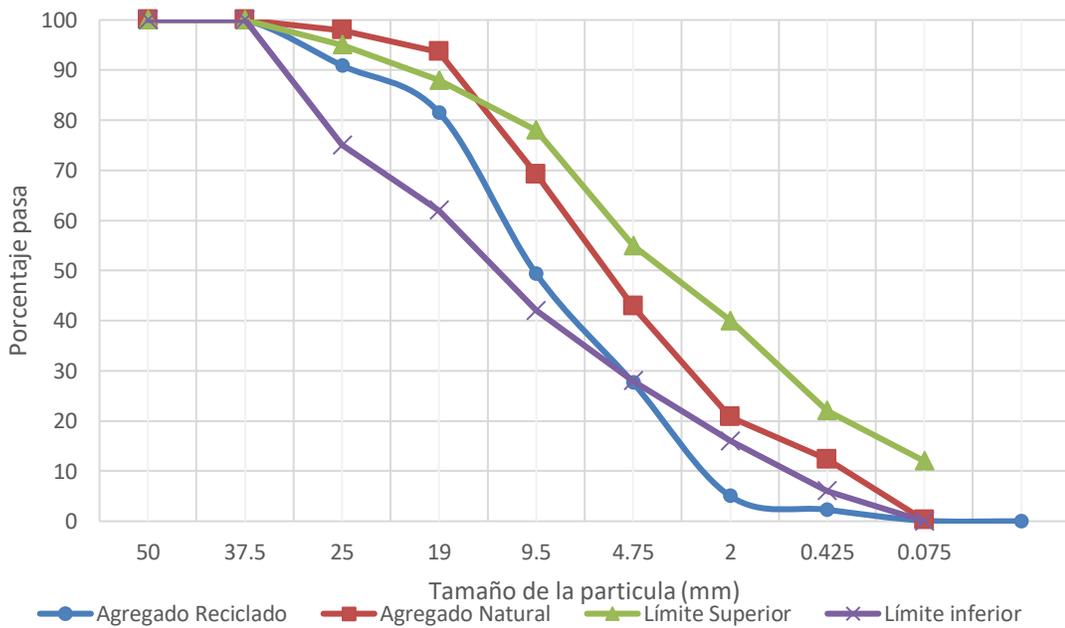
En cuanto a la granulometría exigida por normativas INVÍAS e IDU, La Figura 8-1 y Figura 8-2 muestran la relación del agregado reciclado de RCD respecto a especificaciones.

Figura 8-1: Curvas granulométricas RCD Respecto a Norma INVIAS



Fuente: Propia.

Figura 8-2: Curvas granulométricas RCD respecto a norma IDU.



Fuente: Propia.

Inicialmente, se puede establecer una comparación entre el agregado reciclado y el agregado natural de referencia, donde se observa principalmente que el agregado reciclado presenta una gradación más gruesa respecto al agregado natural; igualmente, se ve la escasez de partículas finas en la mezcla de agregados reciclados. Respecto al cumplimiento de la norma, se puede apreciar que, para el agregado reciclado, la fracción gruesa se encuentra dentro de los límites exigidos; sin embargo, las fracciones de arenas y de finos, están por defecto, respecto a lo exigido por el límite inferior. Esto concuerda con la clasificación UCSC obtenida para el material, la cual indica que es una grava pobremente graduada, principalmente por su menor cantidad de partículas finas. Esta condición discontinua en la curva de gradación hace que no se logren buenas densidades, lo cual puede haber tenido efecto en los resultados obtenidos del grado de compactación in situ, según se mencionó en las pruebas realizadas en campo sobre el modelo físico.

A partir de un análisis global de calidad del material, se puede observar la aptitud del agregado reciclado para ser utilizado en la construcción de infraestructura vial en nuestro país, donde se aprecia que cumple con los requisitos exigidos por las normativas de referencia para la construcción de subbases granulares, presentando incluso un comportamiento superior al agregado natural de referencia, al igual que un comportamiento similar a los agregados reciclados de otros países donde se ha realizado un estudio más detallado de esta problemática. Se hace la indicación que se debe tener mayor cuidado a la hora de la preparación de la mezcla granular, para tener un agregado bien gradado, presentando heterogeneidad en los tamaños de las partículas, para obtener estructuras más compactas y con un comportamiento aun superior al obtenido en esta tesis de Maestría.

8.2 Evaluación del desempeño del agregado reciclado confinado

Esta evaluación se realiza a partir de los resultados obtenidos en ensayos efectuados sobre el modelo físico construido.

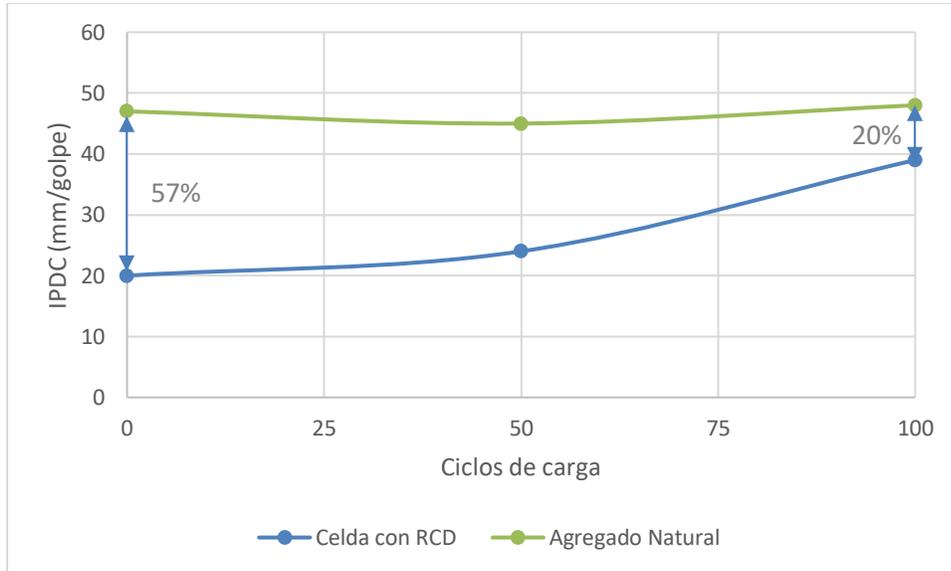
En la Tabla 8-3 se incluyen los parámetros de capacidad portante medidos en pruebas de PDC, en función de los ciclos de repetición de carga vehicular aplicada sobre las secciones construidas tanto con materiales reciclados como naturales.

Tabla 8-3: IPDC en las secciones con RCD y con agregado natural (mm/golpe).

Ciclos	Celda con RCD		Agregado Natural	
	En la Celda	Bajo la Celda	En la capa	Bajo la capa
0	20	65	47	53
50	24	62	45	50
100	39	60	48	51

A partir de la tabla 8-3 se puede apreciar que los IPDC para la celda de RCD, presenta valores inferiores a los Índices del agregado natural sin confinamiento, lo que indica que la celda presenta una mayor capacidad portante respecto a una sección convencional. Los valores indican un aumento de rigidez entre el 20% y el 57% de la celda RCD confinado con respecto al agregado natural sin confinamiento, lo cual da cuenta del efecto combinado del confinamiento lateral y de la calidad del agregado reciclado, esto se puede apreciar de mejor manera en la Figura 8-3.

Figura 8-3: Ciclo de carga vs IPDC



Fuente: Propia.

También se observa que el IPDC en la celda de RCD aumenta a medida que se incrementan los ciclos de carga; esto puede deberse a la mala gradación del agregado reciclado, presentando un mayor número de vacíos en la estructura compactada, que, al

inducir las cargas, se reacomodan las partículas internamente; de igual manera, puede estarse presentando la fracturación del mortero adherido a los agregados, el cual tiende a quebrarse por el desgaste ocasionado por la aplicación de carga.

Aún bajo esta condición de aparente deterioro en la capacidad portante, la estructura continúa presentando una mayor rigidez respecto a la sección de agregado natural sin confinamiento.

Vale la pena resaltar, que la capa de agregado natural no exhibe cambios en su capacidad de soporte ante los ciclos de carga aplicados, lo cual debe estar relacionado con una mejor gradación, logrando buena acomodación de las partículas y, por ende, mayor densidad.

Complementariamente, a partir de las mediciones realizadas con el FWD sobre el modelo físico realizadas por Mendoza (2020), se puede establecer un análisis comparativo de las deflexiones máximas y los módulos elásticos estimados en la capa de agregado reciclado confinado respecto al agregado natural convencional. Adicional a estos dos puntos, se tomó una medición deflexión en la superficie, justo sobre el borde la llanta, para efectos de revisar la rigidez que se presenta en las fronteras de las celdas de confinamiento. En la Tabla 8-4, se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 8-4: Deflexiones máximas y módulos elásticos de secciones

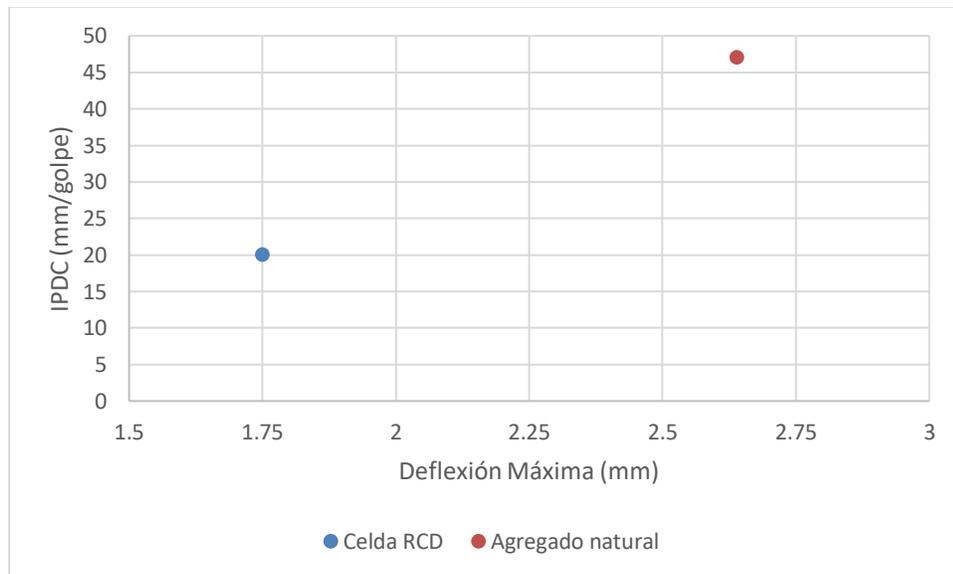
SECCIÓN	Deflexión máxima (mm)	Módulo elástico MPa (SIMCApave)	Módulo elástico MPa (PLAXIS 3D)
<i>Celda RCD</i>	1.75	201	186
<i>Agregado natural</i>	2.64	57	55
<i>Frontera de celda RCD</i>	1.16	764	-

Respecto a las deflexiones máximas, se puede observar que, en la sección de agregado natural, la deflexión fue superior a 2.6 mm, mientras que en la sección de celda de RCD, el valor fue inferior a 1.8 mm, implicando una reducción de la deflexión del 34%. De igual manera, se observa que, en la frontera de la celda, la deflexión máxima se reduce a ser inferior a 1.2 mm, correspondiendo a una reducción del 56% de la deflexión respecto a la

sección de agregado natural sin confinamiento, lo que supone una condición de mayor rigidez en comparación con las zonas centrales de cada sección, y en especial con la sección sin confinamiento lateral. Este incremento no resulta ser demasiado significativo en la zona con RCD, como para esperar comportamientos diferenciados en las fronteras con el paso de los vehículos, al menos desde el punto de vista de respuesta de deflexión.

A partir de la Tabla 8-3 y Tabla 8-4, es posible obtener la Figura 8-4 que relaciona las deflexiones máximas con los Índices PDC:

Figura 8-4: Deflexión Máxima vs IPDC

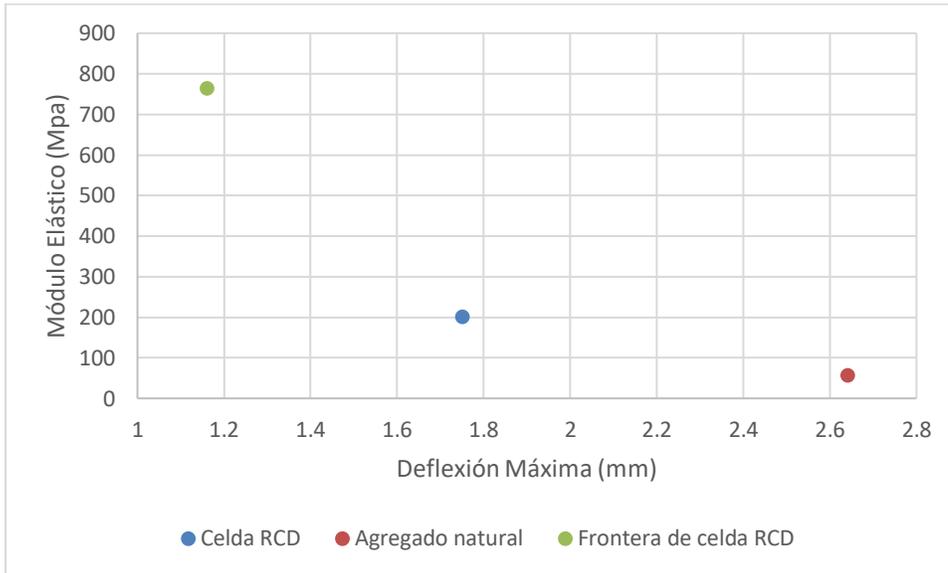


Fuente: Propia.

En esta figura, se puede evidenciar la relación entre la deflexión máxima de la capa de material y el Índice PDC, donde la celda de RCD presenta una menor deflexión máxima que el agregado natural, al igual que un menor IPDC, implicando que, ante las mismas cargas de tráfico, la celda de RCD va a presentar una menor deflexión y una menor alteración de la estructura de pavimento, respecto a una estructura de construcción tradicional con agregado natural sin confinamiento, lo que a su vez indica una mayor durabilidad ante la acción de tránsito continuo.

A partir de la Tabla 8-4, se elabora la Figura 8-5, relacionando la Deflexión Máxima con el Módulo elástico estimado:

Figura 8-5: Deflexión Máxima vs Módulo Elástico



Fuente: Propia.

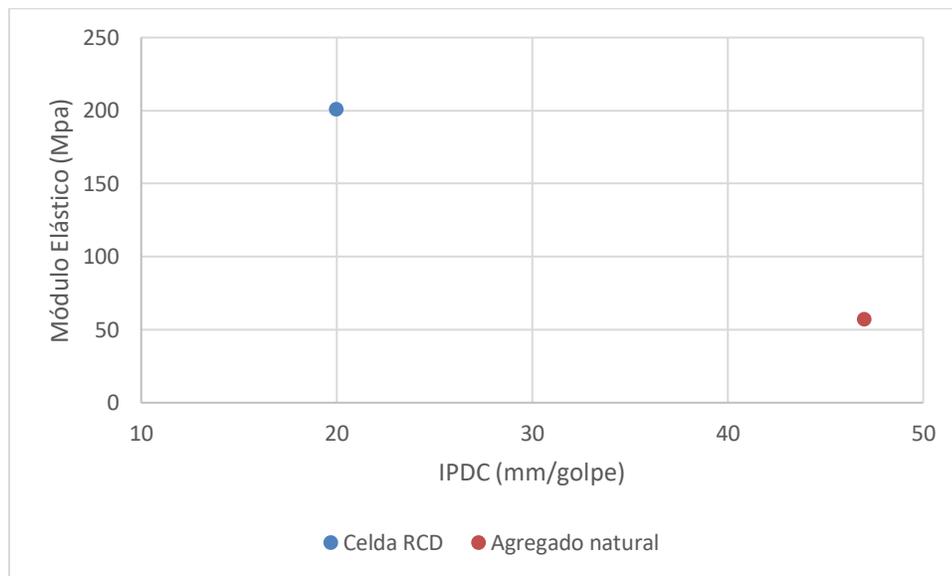
Como se observa en la Figura 8-5, la frontera de celda de RCD y la celda de RCD presentan un mayor módulo elástico, respecto al agregado natural, 13 y 3.5 veces respectivamente, en concordancia con las menores deflexiones máximas que estos presentan respecto al agregado natural, esto atribuible al efecto de confinamiento de la matriz de agregado contenido en la celda, incrementando los esfuerzos normales principales del suelo confinado, y por consiguiente la resistencia a cargas del mismo.

Estos resultados se pueden complementar al comparar los módulos elásticos estimados, con los módulos propuestos en la Tabla 2-1, donde se aprecia que la celda de RCD duplica el módulo típico de subbases granulares (100 MPa), presentando un módulo similar al correspondiente de una base granular, mientras que el módulo estimado en la frontera de la celda sobrepasa al módulo típico de una base e incluso al de un suelo mejorado con cemento. Esto evidencia el buen desempeño en cuanto a rigidez, que puede llegar a presentar la celda de agregado reciclado, debido tanto a la calidad del agregado, como al efecto del confinamiento lateral. Por su parte, el agregado natural de referencia, presenta

un módulo estimado inferior al de una subbase granular, dando cuenta que el agregado presenta una menor calidad de la esperada para ser usada como material estructural en pavimentos. Probablemente, esto se asocia más bien con su posible uso en capas de afirmado, las cuales no resultan tan exigentes en la calidad de sus agregados.

Finalmente, a partir de la Tabla 8-3 y la Tabla 8-4, se elabora la Figura 8-6, relacionando el Índice PDC con el Módulo elástico estimado:

Figura 8-6: IPDC vs Módulo Elástico



Fuente: Propia.

Por medio de esta figura, se puede observar la relación entre el IPDC y el módulo elástico, mientras que el agregado natural presenta un mayor índice de penetración, se tiene un menor módulo elástico, por su parte, la celda de RCD presenta un menor índice de penetración por golpe, a la vez que exhibe un mayor modulo elástico, indicando una mayor resistencia a las cargas impuestas sobre la estructura de pavimento, como una mayor durabilidad, Se hace notar que el módulo elástico de la celda de RCD (201 MPa), corresponde a un IPDC de 20 mm/golpe, guardando una relación de 1 a 10. Por su parte, en el agregado natural la relación es diferente, donde para el módulo elástico de 57 MPa, corresponde un IPDC de 47 mm/golpe.

La diferencia de rigidez en la parte central, respecto a las fronteras, puede generar respuestas deformacionales diferenciales que, a largo plazo, pueden reflejarse en forma de ondulaciones superficiales. Para evitar esto, debe velarse por alcanzar buenos niveles de compactación in situ y en lo posible, dejar un sobre espesor delgado del mismo material del relleno sobre las celdas.

Con la información anterior, se puede afirmar que se obtiene una clara tendencia: a mayor Índice PDC, se obtiene una mayor deflexión máxima y un menor módulo elástico, como se ve con el agregado natural, para el agregado reciclado se obtiene un menor Índice PDC, una menor deflexión máxima, y un mayor módulo elástico, en la frontera de la celda de RCD se aprecia con mayor claridad esta relación, donde se encuentra la menor deflexión máxima, con el mayor módulo elástico. A partir de esto, se puede decir que se obtiene un comportamiento apropiado con la aplicación de confinamiento lateral en las celdas de RCD, donde se mejoran las propiedades del agregado reciclado, para obtener un comportamiento mecánico satisfactorio respecto a las normativas de referencia utilizadas para la construcción de subbases granulares, y, por tanto, se esperaría un buen desempeño al emplearse a modo de capa de rodadura en vías de bajo volumen de tránsito.

Como producto final de esta tesis de Maestría y, con base en los resultados obtenidos en las fases experimentales realizadas en campo y en laboratorio, en el Capítulo siguiente se formula una propuesta constructiva que podría convertirse en una alternativa sustentable, con respecto a la estructura placa-huella que se viene aplicando en vías terciarias.

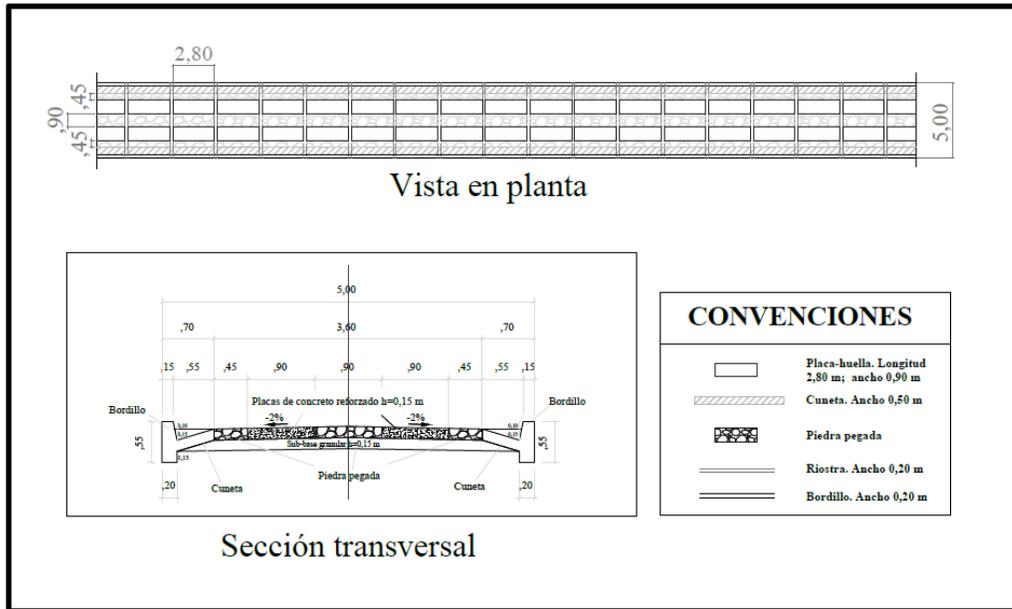
9. Proceso constructivo propuesto

Se propone un proceso constructivo para la implementación del sistema constructivo de módulos celulares de agregado reciclado en las vías terciarias del país, con esto en mente, y a partir de la experiencia en la construcción del modelo físico de pruebas, se plantea una estructura con características similares, para garantizar el buen funcionamiento de las celdas de RCD, por medio del confinamiento lateral.

En el país se encuentran normalizados los pavimentos con Placa-Huella (INVIAS, 2015), sistema constructivo derivado de los pavimentos rígidos, con un funcionamiento en el que se busca mejorar las propiedades de la estructura de pavimento principalmente en las zonas donde pasen los ejes vehiculares, esto por medio de placas de concreto fundidas exclusivamente en estas zonas, presentando reducción de costos y mayores rendimientos constructivos, mientras que en las zonas donde no se considera aplicación continua de cargas por tránsito, se utilizan materiales de menor calidad de resistencia y durabilidad, para garantizar una superficie apta de rodadura. Esto a su vez favorece el recambio de las placas en caso de que presenten fallas estructurales que puedan comprometer la circulación en la vía. En la Figura 9-1 se presenta una sección típica de Placa-Huella.

A partir de este sistema constructivo, se plantea el sistema constructivo para pavimentos de Celda-Huella, en el que las celdas de RCD, reemplazarían a las placas en concreto, presentando un funcionamiento, a grandes trazos, similar al sistema de Placa-Huella, implementando las celdas, en las zonas sometidas a cargas de tránsito, por donde pasan los ejes vehiculares, garantizando la resistencia y durabilidad de la estructura; de igual manera, en caso de que presenten fallas estructurales que puedan comprometer la circulación en la vía, se puede realizar el recambio de la celda, sin afectar la totalidad de la estructura de pavimento.

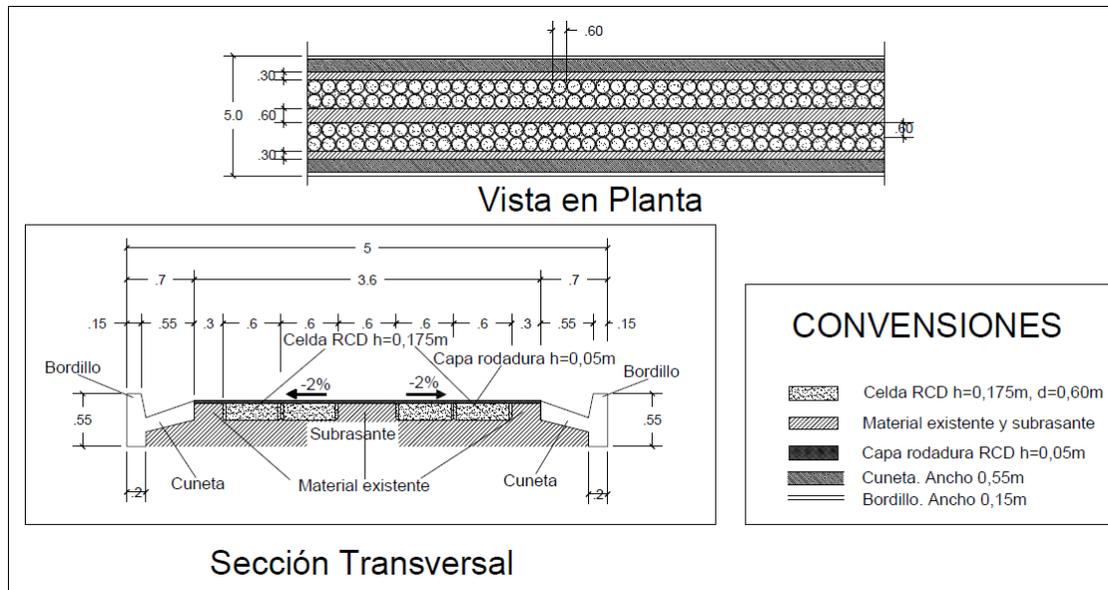
Figura 9-1: Pavimento Placa-Huella



Fuente: INVIAS (2015)

En la Figura 9-2 se presenta la sección de Celda-Huella para mejor comprensión de la propuesta constructiva:

Figura 9-2: Pavimento Celda-Huella



Fuente: Propia

Se presenta a continuación el procedimiento constructivo para el sistema de Celda-Huella.

9.1 Procedimiento

9.1.1 Preparación de la superficie existente

Antes de iniciar la construcción, deben estar terminadas las labores de desmonte y limpieza, según se especifica en el Artículo 200, “Desmonte y limpieza” y las demoliciones de estructuras que se requieran, según se especifica en el Artículo 201, “Demolición y remoción”.

De igual manera, se debe excavar y retirar la capa vegetal y todo material inadecuado, según el Artículo 210 “Excavación de la explanación, canales y préstamos”; también se deben implementar las medidas de drenaje definitivo indicadas en los documentos del proyecto y de drenaje provisional contempladas por el Constructor en su método constructivo.

El material requerido no se descargará hasta que se compruebe que la superficie sobre la cual se va a apoyar tenga la densidad apropiada y las cotas indicadas en los planos o definidas por el Interventor. Todas las irregularidades que excedan las tolerancias admitidas deberán ser corregidas.

La superficie puede ser mejorada o no, en función de su capacidad portante y de su potencial de deformación, evaluados en los diseños de la vía mediante pruebas apropiadas para esos fines: CBR, Índice de Penetración Dinámica, Módulo Resiliente, expansión, dispersividad, consolidación, u otras.

9.1.2 Adecuación del confinamiento lateral

Se realizarán trabajos previos para la colocación de los módulos de celdas y agregado reciclado de RCD, esto con el fin de generar confinamiento lateral para el sistema modular. Para estos trabajos, podrá ser la excavación en el terreno existente de las trincheras donde se dispondrán las celdas de RCD, según la altura correspondiente de la celda a implementar, secciones intermedias de agregado pétreo compactado, un tablestacado con

profundidad de 60 cm +/- 5 cm o cualquier otro sistema que cumpla con la función principal de confinamiento, como la berma-cuneta, por ejemplo.

9.1.3 Transporte y almacenamiento del material

El transporte y el almacenamiento de materiales deberán cumplir lo establecido en los numerales 300.4.5 y 300.4.3 del Artículo 300.

9.1.4 Selección de las celdas (llantas) de confinamiento

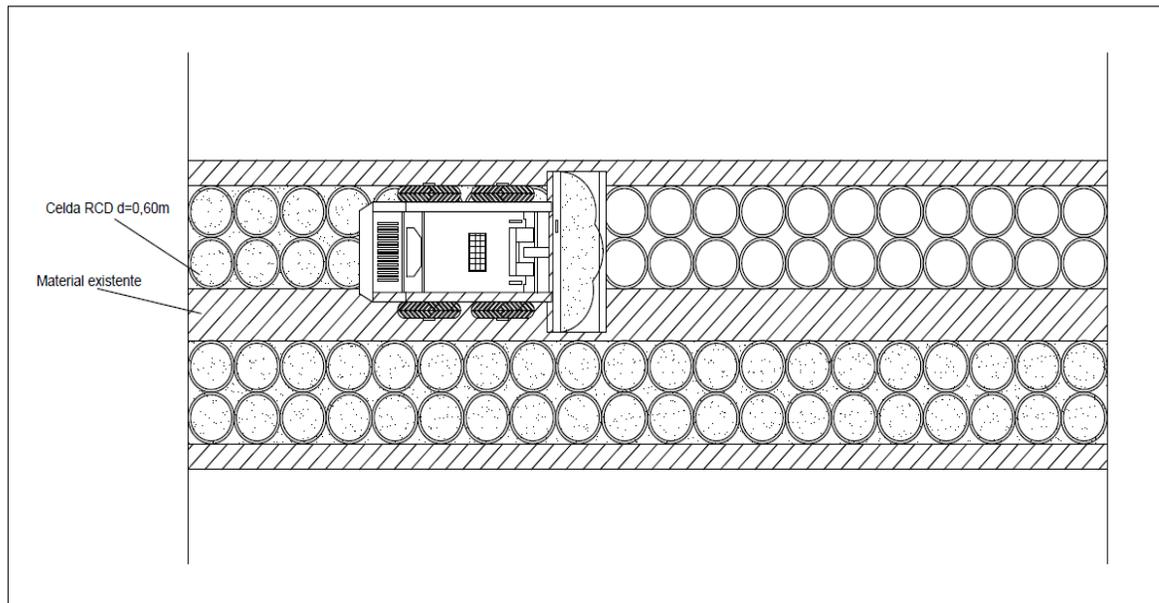
Selección de las celdas de confinamiento o llantas, de tal forma que las dimensiones y características de las llantas sean similares. Las llantas deben ofrecer buenas condiciones de confinamiento y por tanto no deben estar rotas o exhibir alto estado de deterioro.

9.1.5 Adecuación y disposición de las llantas

Uno de los laterales de cada llanta deberá ser removido. Esta actividad se puede realizar en el sitio, si se tiene disponible allí la cortadora. De lo contrario, será necesario precortarlas y luego trasladarlas al sitio. Para no generar desechos, se recomienda conservar el producto del corte para colocarlo al fondo de la llanta, como parte del relleno de la misma. No se recomienda retirar o cortar la cara de la llanta que quedará en contacto con la superficie del terreno, para proveer una mejor interacción llanta -suelo.

9.1.6 Colocación de las celdas sobre la superficie

Las llantas se instalan sobre la superficie preparada como se indicó en el paso 1. Igualmente, se debe proveer el contacto pleno entre llantas vecinas, para favorecer la interacción y que evite movimientos relativos entre ellas. No se recomienda colocar elementos de amarre entre llantas, pues tales elementos dificultan las actividades posteriores durante rehabilitaciones o reparaciones, cuando se requiera el remplazo de celdas. Se debe procurar que cada fila quede debidamente alineada, antes de proceder con la siguiente. A continuación, se presentan los arreglos de llantas en la Figura 9-3.

Figura 9-3: Arreglo de llantas Celda-Huella.

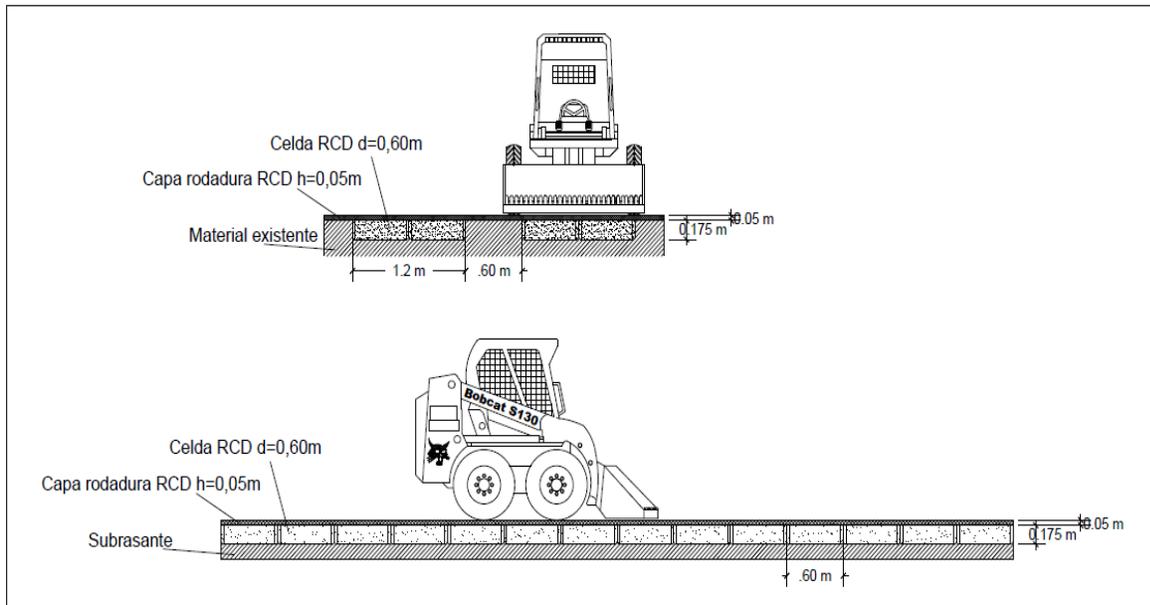
Fuente: Propia.

9.1.7 Extensión y conformación del material granular

El material se dispondrá en una sección uniforme, donde se verificará su homogeneidad. A menos que en el proyecto figure algo diferente o que el Interventor lo ordene, el agregado reciclado de RCD deberá ser distribuido en una sola capa sobre el ancho de la estructura; el equipo que extiende debe ser liviano, tipo minicargador, hasta rellenar y cubrir por completo las llantas colocadas sobre la sección transversal.

Al extender el material en condición suelta, la capa resultante debe tener un espesor uniforme igual a 1.5 veces el espesor de la capa de llantas, para que el equipo que extiende el material perturbe lo menos posible el sistema modular conformado por las llantas. De igual manera, se debe extender sobre toda la estructura material para garantizar tanto la protección de los módulos celulares, como asegurar una adecuada superficie de rodadura. Ver Figura 9-4.

Figura 9-4: Extensión y conformación del material granular.



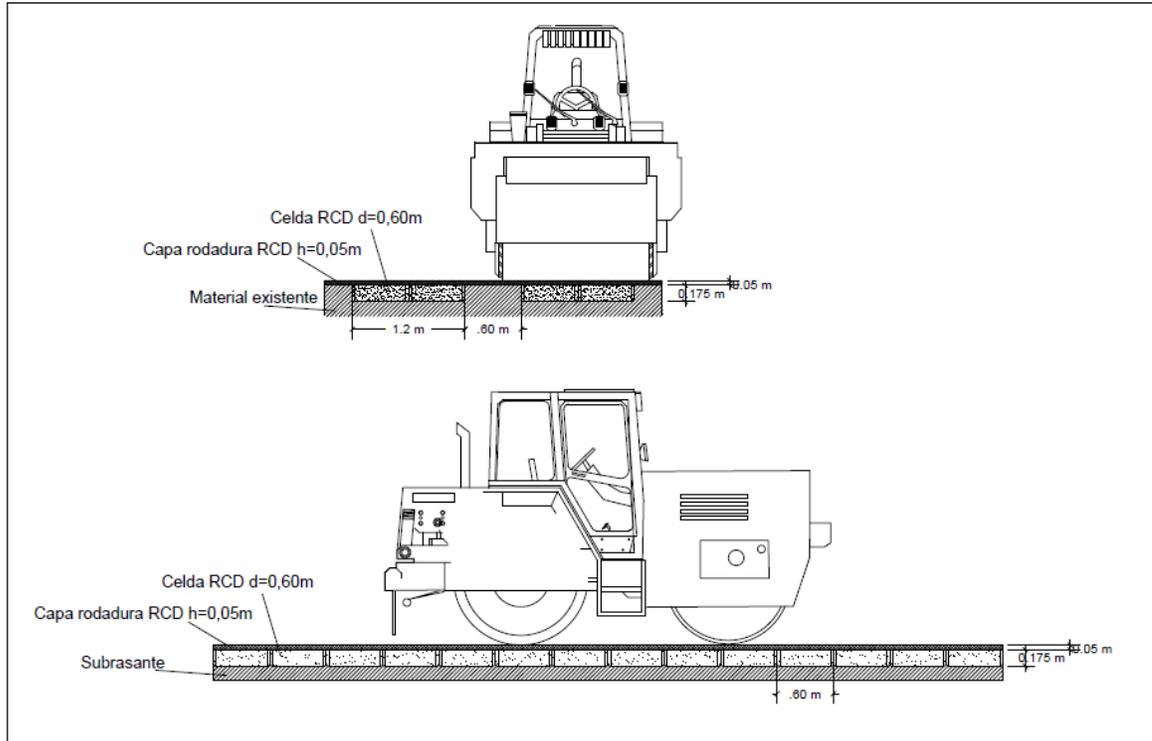
Fuente: Propia.

9.1.8 Compactación de la capa granular

Una vez el material esté conformado debidamente, se compactará con el equipo aprobado hasta lograr la densidad especificada, alcanzando un espesor que sobresalga entre $1/4$ y $1/3$ del espesor del arreglo modular de las llantas, como capa de protección y superficie de rodadura de la estructura de pavimento. Aquellas zonas que por su reducida extensión o su pendiente no permitan la utilización del equipo que normalmente se utiliza, se compactarán con los medios adecuados para el caso, en forma tal que las densidades que se alcancen no sean inferiores a las obtenidas en el resto de la capa. Ver Figura 9-5.

La compactación se efectuará longitudinalmente, comenzando por los bordes exteriores y avanzando hacia el centro, traslapando en cada recorrido un ancho no menor de la mitad del ancho del rodillo compactador.

Figura 9-5: Compactación del material granular.



Fuente: Propia.

9.2 Cantidades de materiales por tramo unitario

A partir del proceso constructivo presentado, es posible determinar las cantidades de agregados reciclados de RCD y de llantas para la construcción de los módulos de celdas de confinamiento, para la construcción de una sección de vía; a manera de ejemplo se calculará para un kilómetro de vía.

Siguiendo la propuesta para la construcción de la estructura de pavimento siguiendo la concepción del sistema Celda-Huella, en la que se ubicarían dos hileras de 2 celdas de confinamiento para las huellas de rodadura, se puede calcular la cantidad de materiales para un tramo teórico de 1 kilómetro de vía:

Se determina una longitud de 1000 metros, un ancho de 4 celdas, cada una de 0.6 metros, para un total de 2.40 metros, un espesor de 0.225 metros, de acuerdo con el ejemplo de proceso constructivo para una celda de confinamiento de 0.175 metros a partir de una llanta Rin 13.

$$V_T = L * A * E$$

Dónde: V_T : volumen, m^3 ;

L: longitud, m ;

A: ancho, m ;

E: espesor, m .

$$V_T = 1000m * 2.40m * 0.225m$$

$$V_T = 540 m^3$$

Este volumen corresponde al total de la sección vial construida.

Como se indicó anteriormente, se realiza el cálculo considerando que los módulos de celdas de confinamiento se realizarán con llantas Rin 13, de manera que se conocen los siguientes datos:

Diámetro (m)	0,6
Altura (m)	0,175
Espesor (m)	0,005

Con estos datos se calcula el volumen de cada una de las llantas sin considerar los laterales de la misma:

$$V_1 = \frac{(0.6m)^2 * \pi}{4} * 0.175m - \frac{(0.6m - 0.005m * 2)^2 * \pi}{4} * 0.175m$$

$$V_1 = 0.001634 m^3$$

De igual manera, se calcula la cantidad de llantas requeridas para el kilómetro de vía:

$$N = \frac{L}{D_{ll}} * \frac{A}{D_{ll}}$$

Dónde: N: numero llantas;

L: longitud, m ;

A: ancho, m ;

D_{ll} : Diámetro llanta, m .

$$N = \frac{1000m}{0.6m} * \frac{2.4m}{0.6m}$$

$$N = 6667 \text{ Llantas}$$

Se requieren 6.667 llantas para construir el tramo vial. El volumen total ocupado por las llantas corresponde a:

$$V_{ll} = V_1 * N$$

$$V_{ll} = 0.001634 \text{ m}^3 * 6667$$

$$V_{ll} = 10.90 \text{ m}^3$$

Con esta información, se puede calcular el volumen de agregado requerido para ocupar el espacio de la sección de Celda-Huella de la siguiente manera:

$$V_{RCD} = V_T - V_{ll}$$

$$V_{RCD} = 540 \text{ m}^3 - 10.90 \text{ m}^3$$

$$V_{RCD} = 529.10 \text{ m}^3$$

Adicionalmente, se considera la capa de protección y de rodadura de la estructura de pavimento, considerando un espesor inicial de 7 cm, para obtener un espesor de acuerdo al proceso constructivo propuesto de entre 1/3 y 1/4 del espesor de la celda de confinada.

$$V_{CP} = L * A_s * E$$

Dónde: V_T : volumen capa protección, m^3 ;

A_s : ancho sección vial, m ;

E : espesor, m .

$$V_{CP} = 1000m * 3.60m * 0.07m$$

$$V_{CP} = 25.20 \text{ m}^3$$

Con esto, se determina un volumen total de RCD.

$$V_{TRCD} = V_{RCD} + V_{CP}$$

$$V_{RCD} = 529.10 \text{ m}^3 + 25.20 \text{ m}^3$$

$$V_{RCD} = 554.30 \text{ m}^3$$

Se determina un peso unitario seco máxima para el agregado reciclado de RCD de 1.97 Ton/m^3 . De manera que se calcula el peso total de agregado reciclado para el tramo vial:

$$P_{RCD} = \gamma_{RCD} * V_{TRCD}$$

$$P_{RCD} = 1.97 \frac{Ton}{m^3} * 554.30m^3$$

$$P_{RCD} = 1091.96 Ton$$

Para calcular el peso de llantas requerido para la sección, se conoce el peso promedio de una llanta Rin 13, correspondiente a 3.0 Kilogramos.

De esta manera es posible calcular el peso total de llantas:

$$P_u = N * P_1$$

$$P_u = 6667 * 0.003 Ton$$

$$P_u = 20 Ton$$

Se presenta a continuación el resumen de los cálculos:

Tabla 9-1: Resumen cálculo cantidades sección vial.

CANTIDAD	
Volumen Agregado (m3)	554,30
Densidad Ton/m3	1,97
Peso Agregado (Ton)	1.091,96
Llantas por km	6.667
Peso promedio llanta (Ton)	0,003
Peso llantas por km (Ton)	20

De acuerdo con la generación anual de RCD a nivel nacional y en la ciudad de Bogotá (Red gestora de residuos, 2016), se puede estimar que una sección vial de 1 kilómetro, consumiría un aproximado de 0.003% del total de residuos de construcción y demolición generados en Colombia, y un aproximado de 0.008% del generado en la ciudad de Bogotá. De igual manera, respecto a la generación anual de llantas desechadas como residuo a nivel nacional (Ministerio de ambiente, 2017c), y en la ciudad de Bogotá (OCADE LTDA et al., 2014), se puede estimar que una sección vial de 1 kilómetro, consumiría un aproximado de 0.02% del total de llantas desechadas en Colombia, y un aproximado de 0.1% de las generadas en la ciudad de Bogotá.

10. Conclusiones y recomendaciones

10.1 Conclusiones

Por medio de la visita a la planta de producción de agregados reciclados GRECO SAS, se pudo identificar la composición y caracterización de residuos de construcción y demolición que se generan típicamente en la ciudad de Bogotá, a través de un estudio de caso. En general, los residuos corresponden principalmente a tierras de excavación (80%); este es un material de pobre calidad, formado por arcillas del suelo lacustre de la sabana de Bogotá, las cuales tienden a presentar características físico-mecánicas deficientes, si se comparan con normativas de referencia de materiales de construcción, lo cual impide su consideración para ser reutilizado en obras civiles. De igual manera, se dispone una proporción menor de materiales pétreos recuperados de la trituración de pavimentos hidráulicos y asfálticos (15%), los cuales todavía presentan mínimas propiedades de calidad, por lo que requieren un proceso de tratamiento primario para recuperar la mayor cantidad posible. Finalmente se disponen residuos de otros materiales no pétreos, como vidrio, caucho, madera, metal; sin embargo, estos corresponden a una medida inferior (5%), debido posiblemente a su recuperación en procesos previos en la gestión integral de los residuos.

A partir de los materiales que llegan a la planta, y por medio del tratamiento de trituración, selección y clasificación, es posible generar nuevos subproductos granulares para ser utilizados en construcción de edificaciones o infraestructura vial, como son gravas, arenas, bases y subbases, RAP o relleno de filtros granulares.

Para el caso de estudio, se buscó determinar si las propiedades físicas y mecánicas de los agregados reciclados de RCD son adecuadas para su uso como material de construcción de carreteras, según la normativa colombiana. Esto fue posible, gracias a la caracterización de los agregados reciclados de RCD suministrados por la Planta Greco SAS y la respectiva

comparación con respecto a normativas locales de subbases granulares, a un agregado natural de referencia y a agregados reciclados analizados en estudios previos de otros países. Se pudo observar la aptitud de dichos agregados para ser utilizados para la construcción de infraestructura vial en nuestro país, donde sus propiedades físicas y mecánicas cumplen holgadamente con los requisitos exigidos por las normas, presentando un comportamiento superior al del agregado natural de referencia, al igual que presentar propiedades similares a los agregados reciclados de otros países, por lo que se esperaría un buen desempeño al emplearse como material granular para construcción de vías de bajo volumen de tránsito. Se resalta la necesidad de tener cuidado en la preparación de la mezcla granular de subbase, para tener un material bien gradado y obtener estructuras más compactas y con un comportamiento aun superior al obtenido en esta tesis de Maestría.

A través de la construcción del modelo físico de pruebas, se pudo evidenciar la facilidad de construcción del sistema de módulos celulares, para el cual no se requirió de herramientas especializadas, maquinaria pesada, ni de personal altamente capacitado para su ejecución. Simplemente, se requieren buenas prácticas de cumplimiento de las especificaciones dadas para la construcción de la estructura de pavimento, especialmente al momento de la compactación de las celdas, ya que una buena ejecución conllevará un mejor desempeño como conjunto estructural. Igualmente, se infiere la facilidad de poder realizar recambios de los módulos celulares en caso de falla de la celda, sin necesidad de afectar el funcionamiento del resto de la estructura, por lo que las actividades de rehabilitación y recuperación de pavimentos, podría ser más eficiente y eficaz. Destaca el hecho de que no fue necesario colocar ningún elemento de fijación ni amarre de las llantas, puesto que la fricción entre celdas adyacentes garantizó adecuada interacción entre ellas, sin apreciarse movimientos relativos, ni verticales, ni horizontales.

Mediante de los ensayos de caracterización mecánica en campo, donde se obtuvieron resultados de Índices de penetración dinámicos IPDC, deflexiones máximas y módulos elásticos estimados, y su posterior análisis, se pudo establecer una tendencia en la que las celdas de agregado reciclado de RCD presentaban una menor deflexión máxima (1.75 mm), y un menor Índice de penetración dinámica IPDC (promedio 27.6 mm/golpe), a la vez que presentaba un mayor modulo elástico (201 MPa), en comparación con la sección

construida con el agregado natural de referencia (2.64 mm, promedio 46.6 mm/golpe, 57 MPa). Todo ello, permite evidenciar una mejor capacidad mecánica de la celda con agregado reciclado respecto a la sección convencional con agregado natural de referencia. De igual manera, se pudo apreciar el aporte físico-mecánico de la implementación de confinamiento lateral al agregado reciclado, en donde en la frontera de la celda de RCD, se obtuvo la menor deflexión máxima y el mayor modulo elástico (1.16 mm y 764 MPa).

A partir de esto, se puede decir que se obtiene un desempeño técnico satisfactorio con la aplicación de confinamiento lateral en las celdas de RCD, donde se mejoran las propiedades del agregado reciclado, y se pueden conformar capas de estructura de pavimento con propiedades superiores a las que poseen vías en afirmado convencional. Igualmente, los agregados reciclados mostraron un comportamiento mecánico satisfactorio respecto a las normativas de referencia utilizadas para la construcción de capas granulares de sub-base para pavimentos.

Por medio de la experiencia en la construcción del modelo físico de prueba, y con los resultados obtenidos en su caracterización mecánica en campo, se propone una alternativa constructiva del sistema de módulos celulares de RCD, denominado Celda-Huella (basado en el sistema constructivo de pavimentos en Placa-Huella). El sistema propone ubicar las celdas (llantas) rellenas de agregado reciclado de RCD compactado, a lo largo de las zonas de huella o rodada de los vehículos sobre la vía. Con ello, se provee una capa resistente ante las cargas impuestas por el tránsito, sin necesidad de alterar drásticamente el terreno existente, ni requerir grandes volúmenes de material, herramientas, personal, equipos o maquinaria. Así mismo constituye una alternativa en la cual se pueden realizar mantenimientos, reparaciones o rehabilitaciones, siendo aún aplicable a lugares remotos o de difícil accesibilidad.

Según la alternativa propuesta de Celda-Huella, se evidenciaría el aporte de la construcción de este sistema de módulos celulares para la reducción de los desechos y residuos de construcción y demolición que se generan anualmente en el país, donde por un tramo vial de 1 kilómetro de Celda-Huella, se utilizaría el 0.003% de los RCD generados anualmente, y el 0.02% del total de llantas desechadas por año. Respecto al Distrito Capital, se reutilizaría el 0.1% de las llantas desechadas y el 0.008% de los RCD

generados anualmente en el distrito, reduciendo en la misma proporción, la explotación de agregados naturales.

Se puede concluir que el sistema de módulos celulares de RCD propuesto, es una alternativa técnicamente viable, desde el punto de vista de su comportamiento mecánico y de la facilidad de construcción y reparación así como la reducida cantidad de material requerida para su ejecución, y también es una alternativa ambientalmente viable, al estar compuesta en la reutilización de materiales de desecho para toda la estructura, aplicable para construirse en lugares de difícil acceso y de difícil obtención de materiales de calidad adecuada, reduciendo la explotación de agregados naturales en canteras, e incentivando el aprovechamiento de los RCD en las zonas de disposición final. Así mismo, como un valor agregado adicional, puede contribuir con el empleo de habitantes de la región, pues para varios procesos de la construcción, no se requiere personal especializado.

10.2 Recomendaciones

Se recomienda construir un tramo físico de prueba en el que se considere un mayor número de módulos celulares, donde se puedan evaluar condiciones reales de tránsito y medio ambientales a las que estaría sujeta la operación del sistema.

Como se ha indicado anteriormente, es necesario hacer una adecuada preparación de la mezcla granular del agregado reciclado para subbase, de manera que se obtenga un material bien gradado, y con esto se puedan construir celdas más compactas y con un comportamiento aun superior al obtenido en esta investigación. Esta mejora en la gradación podría conseguirse con la mezcla de un material que contenga la proporción de finos suficientes y de buena calidad, al igual que llevar un control de la compactación insitu, por medio de ensayos no destructivos.

Por otra parte, se hace cada vez más evidente la necesidad de disponer de un espacio adecuado para la elaboración y realización de ensayos y experimentos en modelos a escala real dentro del campus de la Universidad, donde se pueda disponer del equipo adecuado y el personal capacitado para que se puedan producir más investigaciones de este tipo, y donde se puedan realizar intervenciones en un entorno académico para tener mejores tiempos de realización y ejecución. Esta recomendación se deriva de diversas

dificultades vividas en desarrollo de esta investigación, las cuales afectaron las condiciones que se tenían para para la construcción del modelo físico de pruebas.

En principio, se pensó en la pista de pruebas de la Universidad Militar Nueva Granada en su campus de Cajicá, donde se tenía considerada la construcción e instrumentación del modelo para su constante evaluación. Sin embargo, la operación de esta pista se encontraba suspendida por adecuaciones y mantenimiento en los equipos. Ante esta situación, se pensó en el campus de Bogotá de la Universidad Nacional, donde se presentaron propuestas iniciales de construir un tramo real de prueba en una de las vías en afirmado a la Dirección de Ordenamiento y Desarrollo Físico, quienes mostraron un interés inicial, pero finalmente no se pudo concretar la construcción del tramo, pues estas vías formaban parte del Plan de Manejo del Tránsito de intervenciones que se están realizando a la infraestructura de la universidad.

Aunque se superó el tema de la selección del sitio de modelación física, vinieron dos situaciones que dificultaron su construcción y posteriores pruebas: el paro nacional del segundo semestre de 2019, donde hubo suspensión de actividades por bloqueos en el campus y, posteriormente el cierre del mismo en el semestre 2020 I por cuenta de la emergencia de salud por Covid 19. Esto no permitió realizar un plan de experimentación de mayor alcance con pruebas de campo y simulaciones complementarias, en especial aquellas de durabilidad ante efectos ambientales.

Según la propuesta constructiva de Celda-Huella, se recomienda aplicar una sobre capa delgada del mismo agregado reciclado como capa de protección y superficial que sirva de rodadura del pavimento en afirmado, en lugar del agregado natural que se colocó sobre el modelo en esta investigación, ya que como se evidenció en su caracterización, presenta un mejor comportamiento que el agregado natural convencional.

Se recomienda continuar con más estudios e investigaciones desde el ámbito académico, para complementar el conocimiento del comportamiento y uso de los agregados reciclados en nuestro medio, así como del uso de llantas de desecho como elementos de confinamientos no convencionales para construcción de infraestructura vial, con el objetivo de poder analizar mecanismos de funcionamiento del sistema no estudiados en esta tesis,

que permitan formular, estandarizar e implementar nuevos procedimientos y procesos constructivos, avalados por el adecuado respaldo técnico.

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se recomienda poner a consideración ante las entidades competentes, la regularización y normalización del uso de agregados reciclados de RCD a nivel nacional, para incentivar el uso de estos agregados en la construcción de obras civiles, y específicamente para la construcción de infraestructura vial.

Finalmente, se percibe que las plantas productoras procuran la obtención de agregados reciclados que cumplan especificaciones, pero aún hay un tema cultural difícil de vencer, y es que los clientes potenciales continúan relacionándolos con “desechos” y no como un subproducto. En ese sentido, hay una gran oportunidad, donde la Universidad puede contribuir con investigación y pedagogía, logrando una mejor percepción y acogida que redunden en su aplicación a un mayor nivel, en la industria de la construcción.

Bibliografía

- AASHTO. (2007). *Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate*. Indiana, USA: Purdue University.
- Agrela, F., Barbudo, A., Ramírez, A., Ayuso, J., Carvajal, M. D., y Jiménez, J. R. (2012). Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 98–106.
doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.11.003
- Al-khafaji, A. W., y Andersland, O. (1992). *Geotechnical Engineering & Soil Testing*. New York: Oxford University Press, Inc.
- Alcaldía Mayor Bogotá, D. C. Decreto 442 de 2015, Por medio del cual se crea el Programa de aprovechamiento y/o valorización de llantas usadas en el Distrito Capital y se adoptan otras disposiciones (2015). Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.
- Arriaga Tafhurt, L. E. (2013). *Utilización de agregado grueso de concreto reciclado en elementos estructurales de concreto reforzado* (Tesis Maestría). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Arulrajah, A., Disfani, M. M., Horpibulsuk, S., Suksiripattanapong, C., y Prongmanee, N. (2014). Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications. *Construction and Building Materials*, 58, 245–257.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.025
- ASTM D5858-96. (2015). *Standard Guide for Calculating In Situ Equivalent Elastic Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory*. ASTM International, West Conshohocken, USA.
- ASTM D6951M-09. (2009). *Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications*. ASTM International. West Conshohocken, USA.
- Barbudo, A., Agrela, F., Ayuso, J., Jiménez, J. R., y Poon, C. S. (2012). Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. *Construction and Building Materials*, 28(1), 129–138.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.035

- Baroni, M., Pivoto Specht, L., y Barbosa Pinheiro, R. J. (2012). Construção de estruturas de contenção utilizando pneus inservíveis: análise numérica e caso de obra. *Revista Escola de Minas*, 65, 449–457.
- Bennert, T., Papp, W., Maher, A. y Gucunski, N. (2000). Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading in base and subbase applications. *Transport. Res. Rec.: J. Transp. Res. Board*, 1714, 33–39.
- Bennert, T.A. y Maher, A. (2008). The use of recycled concrete aggregate in a dense graded aggregate base course. *U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration*. New Jersey Department of Transportation, New Jersey, USA.
- Blengini, G.A. y Garbino, E. (2010). Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. *Journal of Cleaner Production*, 18, 1021-1030. doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.01.027
- Blengini, G.A., Garbino, E., Solar, S., Shields, D.J., Hámor, T., Vinai, R. y Agioutantis, Z. (2012). Life Cycle Assessment guidelines for the sustainable production and recycling of aggregates: the Sustainable Aggregates Resource Management project (SARMA). *Journal of Cleaner Production*, 27, 177-181. doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.01.020
- Bojacá Castañeda, N. R. (2013). *Propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos con agregado reciclado* (Tesis Maestría). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Bonasso, S. G. (2008). *The effects of aggregate size and gradation on hoop stresses in steel cylinders and the reuse of waste tire tread cylinders for aggregate confinement in confined aggregate concrete*. *Mechanical Concrete* (Vol. 1). Morgantown, U.S.A. Recuperado de www.mechanicalconcrete.com
- Briaud, J.-L. (2001). Introduction to Soil Moduli. *Geotechnical News*, (June), 1–8.
- Cardona, R., y López, K. M. (2016). *Caracterización de un agregado reciclado de concreto (ARC) para la construcción de la carpeta asfáltica de pavimentos flexibles* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia.
- Cardoso, R., Silva, R. V., Brito, de J., y Dhir, R. (2016). Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. *Waste Management*, 49, 131–145. doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.021
- Chini, A., Kuo, S.-S., Armaghani, J., y Duxbury, J. (2001). Test of recycled aggregate in accelerated test track. *Journal of Transportation Engineering*, (November), 486–492.
- CONAE. (2016). *Manual de información técnica de neumáticos*. México D.F., México.
- Creswell, J. W. (2007). *Qualitative Inquiry & Research Design. Choosing Among Five Approaches*. (Second edition ed.): Sage Publications. United States.

- Cuartas, Cl. (2015). Optimización y refuerzo de pavimento flexible mediante geoceldas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 24, 1–19.
- Dandekar, S., y Kulkarni, P. (2018). *Analytical approach to study performance of demolished waste in rigid pavement using Plaxis 2D*. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), 9(5) , pp. 1260-1271. Disponible en línea: <http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=9&IType=5>
- Dash, S. K., Rajagopal, K., y Krishnaswamy, N. (2004). Performance of different geosynthetic reinforcement materials in sand foundations. *Geosynthetics International*, 11(May 2014), 35–42. <https://doi.org/10.1680/gein.2004.11.1.35>
- DNP, D. N. de P. (2016). CONPES 3857 - Lineamientos de política para la gestión de la red terciaria, 74. recuperado de https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3857_RedTerciaria.pdf
- Duarte Duarte, M. C., y Sierra Parra, V. (2011). *Estudio del comportamiento de un material de subrasante típico de bogotá estabilizado con un sistema de geoceldas ante la aplicación de ciclos de carga y descarga mediante pruebas de laboratorio* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana.
- Edeskär, T. (2004). *Technical and Environmental Properties of Tyre Shreds Focusing on Ground Engineering Applications*. Lulea, Suecia.
- Fonseca Medina, E. E. (2018). *Evaluación comparativa de concreto con agregado natural y concreto a partir de agregado reciclado de prefabricados de concreto, bajo un análisis de ciclo de vida* (Tesis Maestría). Universidad Nacional de Colombia.
- Garzón Pire, W. (2013). *Estudio de durabilidad al ataque de sulfatos del concreto con agregado reciclado* (Tesis Maestría). Universidad Nacional de Colombia.
- Gómez, A., y Farias, M. (2012). Comportamiento físico-mecánico de un residuo de construcción y demolición en la estructura de pavimento. In *XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica* (p. 8). Cancún, México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C.
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (1998). *Metodología de la investigación* (Segunda Edición ed.). México: McGraw Hill.
- Herrick, J. E., y Jones, T. L. (2002). A Dynamic Cone Penetrometer for Measuring Soil Penetration Resistance. *Soil Science Society of America Journal*, 66(July 2002), 1320–1324. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1320>
- Hoffman, M., & Thompson, M. (1981). Mechanistic interpretation of non-destructive pavement testing deflections. *Transportation Engineering Series No. 32*. Illinois Coopertative Highway and Transportation Research Program Series No. 190. University of Urbana-Champaign.

- Horak, E. (1987). Aspectos of Deflection Basin Parameters Used in a Mechanistic Rehabilitation Design Procedure for Flexible Pavements in South Africa (Tesis Doctoral). University of Pretoria.
- Hossain, M. M., y Zaniewski, J. P. (1991). Characterization of Falling Weight Deflectometer Deflection Basin. *Transportation Research Record*, 1293, 1–11.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. New Jersey: Prentice Hall. Second Edition
- Huang, Y. H. (1993). *Pavement analysis and design*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Huat, B. B. K., Aziz, A. A., y Chuan, L. W. (2008). Application of Scrap Tires as Earth Reinforcement for Repair of Tropical Residual Soil Slope. *EJGE*, 13, 1–9.
- IDU 400-11, N. SECCIÓN IDU 400-11, Capas Granulares De Base Y Subbase (2011). Bogotá, Colombia, Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.
- IDU 452-11, N. Sección 452-1, Empleo De Agregados Pétreos a Partir De Concreto Hidráulico Reciclado (2011). Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.
- INVIAS. (2012). Especificaciones generales de construcción de carreteras Capítulo 3. Afirmados, sub-bases y bases. Bogotá, Colombia: INVIAS.
- INVIAS. (2015). Guía de diseño de Pavimentos con Placa-Huella. Bogotá, Colombia: INVIAS.
- INV Afirmados, sub-bases y bases (2012). Especificaciones generales de construcción de carreteras. INVIAS. Bogotá D.C., Colombia.
- INV E 122. (2012). *Determinación del contenido de humedad*. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. INVIAS. Bogotá D.C., Colombia.
- INV E 123. (2012). *Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos*. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. INVIAS. Bogotá D.C., Colombia.
- INV E 125. (2012). *Determinación del límite líquido*. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. INVIAS. Bogotá D.C., Colombia.
- INV E 126. (2012). *Límite plástico e índice de plasticidad*. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. INVIAS. Bogotá D.C., Colombia.
- INV E 133. (2012). *Equivalente de arena*. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. INVIAS. Bogotá D.C., Colombia.

- INV E 142. (2012). *Relación Humedad-Peso Unitario Seco (Ensayo Modificado De Compactación)*. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. INVIAS. Bogotá D.C., Colombia.
- INV E 148. (2012). CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. INVIAS. Bogotá D.C., Colombia.
- INV E 172. (2012). *Uso del penetrómetro dinámico de cono en aplicaciones de pavimentos a poca profundidad*. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. INVIAS. Bogotá D.C., Colombia.
- INV E 218. (2012). *Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 1/2") por medio de la máquina de los ángeles*. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. INVIAS. Bogotá D.C., Colombia.
- INV E 230. (2012). *Índices de aplanamiento y alargamiento*. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. INVIAS. Bogotá D.C., Colombia.
- INV E 235. (2012). *Valor de azul de metileno*. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. INVIAS. Bogotá D.C., Colombia.
- INV E 798. (2012). *Método para medir deflexiones mediante un deflectómetro de impacto (FWD)*. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. INVIAS. Bogotá D.C., Colombia.
- Jiménez, J. R., Ayuso, J., Galvín, A. P., López, M., Y Agrela, F. (2012). Use of mixed recycled aggregates with a low embodied energy from non-selected CDW in unpaved rural roads. *Construction and Building Materials*, 34, 34–43. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.042
- Laverde Laverde, J. A. (2014). *Propiedades mecánicas , eléctricas y de durabilidad de concretos con agregados reciclados . Propiedades mecánicas , eléctricas y de durabilidad de concretos con agregados reciclados* (Tesis Maestría). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá D.C. Colombia.
- Leite, F. D. C., Motta, R. D. S., Vasconcelos, K. L., Y Bernucci, L. (2011). Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2972–2979. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105
- Li, L., Cui, F., Ferreira, P., Xiao, H., y Jie, H. (2019). Experimental study of embankments with different reinforcement materials and spacing between layers. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(4), 477–482. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.03.003
- Li, L., Xiao, H., Ferreira, P., & Cui, X. (2016). *Study of a small scale tyre-reinforced embankment* (Vol. 44). Wuhan, China.

- Li, M., Wang, H., Xu, G., y Xie, P. (2017). Finite element modeling and parametric analysis of viscoelastic and nonlinear pavement responses under dynamic FWD loading. *Construction and Building Materials*, 141, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.096>
- Liévano Ruiz, L. M. (2017). *Análisis, estudio y concepción en la aplicación de concreto con agregado de llanta neumática reciclada en elementos arquitectónicos* (Tesis Maestría). Universidad Nacional de Colombia.
- Long, N. T. (1990). *The Pneusol*. Paris, Francia: Laboratoire Central des Ponts Chaussées.
- Lukanen, E. O. (1992). Effects of Buffers on Falling Weight Deflectometer Loadings and Deflections. *Transportation Research Record*, 1355, 37–51.
- Magnuson, A. H., Lytton, R. L., y Briggs, R. C. (1991). Comparison of Computer Predictions and Field Data for Dynamic Analysis of Falling Weight Deflectometer Data. *Transportation Research Record*, 1293(September), 61–71.
- Marecos, V., Fontul, S., Lurdes, M. De, y Solla, M. (2017). Virtual Special Issue Ground-Penetrating Radar and Complementary Non-Destructive Testing Techniques in Civil Engineering Evaluation of a highway pavement using non-destructive tests : Falling Weight Deflectometer and Ground Penetrating Radar. *Construction and Building Materials*, 154, 1164–1172. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.034>
- Martínez, J., y Castro, R. (2017). *Aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición (RCD) para ser utilizados como agregados en el diseño de mezclas asfálticas en caliente* (Tesis de pregrado). Universidad distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
- Mattey, P., Robayo, R., Silva, Y., Alvarez, N., Y Arjona, S. (2014). Caracterización física y mecánica de agregados reciclados obtenidos a partir de escombros de la construcción. *Informador Técnico*, 121–127.
- Mendoza Rojas, G. A. (2020). *Evaluación del comportamiento mecánico de un sistema modular compuesto por materiales reciclados para uso en pavimentos de vías terciarias* (Tesis Maestría). Universidad Nacional de Colombia.
- Ministerio Ambiente, D. Resolución 1326 de 2017, Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas y se dictan otras disposiciones (2017a). Bogotá, Colombia: República de Colombia.
- Ministerio Ambiente, D. Resolución 472 de 2017 " Por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición-RCD y se dictan otras disposiciones (2017b). Bogotá, Colombia, Bogotá, Colombia: República de Colombia.
- Ministerio Ambiente (2017c). "Productores y comercializadores de llantas en el país deberán tener un Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas": Minambiente. 20 de julio de 2017. Bogotá, Colombia.

- MnRoad. (1996). *User Guide To The Dynamic Cone Penetrometer*. Minnesota, USA: Office of Minnesota Road Research.
- Mora Villota, D. H. (2016). *Propiedades Mecánicas y de Permeabilidad de Concreto Fabricado con Agregado Reciclado* (Tesis Maestría). Universidad Nacional de Colombia.
- Neel, P. R., Navarkar, A. S., Y Hiremath, A. (2015). Confined aggregate concrete, the reuse of waste tire tread cylinders for confined aggregate concrete. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 4(05), 676–680. Recuperado de www.ijert.org
- O'Mahony, M. M. (1990). *Recycling of materials in civil engineering* (Tesis doctoral). Oxford University, Oxford, Inglaterra.
- O'Mahony, M. M., y Milligan, G. W. E. (1991). Use of Recycled Materials Layers Sub base. *Transportation Research Record*, 1310(2), 73–80.
- OCADE LTDA, U. T., SANIPLAN, S., & AMBIENTAL, S. (2014). Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá. Bogotá, Colombia.
- Olmedo, O., y Barrera, E. (2015). *Utilización de residuos de construcción y demolición (RCD) ligados con materiales cementantes en pavimentos* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia.
- Páez García, M. A. (2020). *Concreto con agregado de neumático triturado reciclado en sustitución parcial al agregado fino* (Tesis Maestría). Universidad Nacional de Colombia.
- Pokharel, S. K. (2010). *Experimental Study on Geocell-Reinforced Bases under Static and Dynamic Loading*. University of Kansas. USA.
- Poon, C. S., y Chan, D. (2006). Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. *Construction and Building Materials*, 20(8), 578–585. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.045>
- Porras, Á., Guarín, N., y Cortes, M. (2013). Determinación de propiedades fisico-químicas de los materiales agregados en muestra de escombros en la ciudad de Bogotá D.C. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 12(enero-junio), 45–57.
- Rahman, M. A., Imteaz, M. A., Arulrajah, A., Piratheepan, J., y Disfani, M. M. (2015). Recycled construction and demolition materials in permeable pavement systems: Geotechnical and hydraulic characteristics. *Journal of Cleaner Production*, 90, 183–194. doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.042

- Red Gestora de Residuos, 2016. Manejo actual de residuos de construcción y demolición requiere soluciones y educación. En: Seminario Internacional Estrategias y soluciones para la gestión de RCD para ciudades y municipios de Colombia. 5-6 de mayo de 2016. Sinesco, Conesco, Acodal, Medellín, Colombia.
- Rodríguez González, O. E. (2016). *Estandarización de técnicas de diseño y construcción de muros de tierra reforzada con llantas de desecho* (Tesis Maestría). Universidad Nacional de Colombia.
- Rohde, G. (1994). Determining Pavement Structural Number from FWD Testing. *Transportation Research Record*, 1448, 61–68.
- Rosas Chaves, A. (2014). *Mobiliario urbano prefabricado en concreto con agregado grueso reciclado* (Tesis Maestría). Universidad Nacional de Colombia.
- Rosero Alvarez, D. M. (2019). *Propuesta de guía de uso de los agregados reciclados en Colombia provenientes de rcd, basado en normativa internacional y en el desarrollo de investigaciones de universidades colombianas* (Tesis Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C. Colombia.
- Sánchez G, E. J. (2018). *Muros en tierra reforzada con entramado de llantas de desecho* (Tesis Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Colombia.
- Secretaria Distrital Ambiente, B. RESOLUCIÓN 1115 de 2012, Por medio de la cual se adoptan los lineamientos Técnico - Ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el Distrito Capital. (2012). Bogotá, Colombia, Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.
- Secretaria Distrital Movilidad, B. Resolución 6981 de 2011, Por la cual se dictan lineamientos para el aprovechamiento de llantas y neumáticos usados, y llantas no conforme en el Distrito Capital (2011). Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.
- Suspes Páez, A. C., Carpio Patiño, J., y Maldonado Tinjaca, H. G. (2018). *Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá* (Trabajo final Especialización). Universidad Católica de Colombia.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., y Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice Third Edition*. Jhon Wiley & Sons, Inc. USA.
- Thakur, J. K. (2013). *Geocell-Reinforced Unpaved and Paved Roads with Recycled Asphalt Pavement (RAP) Bases: Experimental Study and Damage Model Development*. University of Kansas. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1797.7763>
- Tholen, O., Sharma, J., y Terrel, R. (1985). Comparison of Falling Weight Deflectometer with Other Deflection Testing Devices. *Transportation Research Record*, 1007(3), 20–26.

- Tuan-Chun Fu, J. y Chen, R. (2005). Test Results of Stone Aggregates Contained in Open-Ended Steel Cylindrical Pipes, West Virginia University, Civil and Environmental Engineering, West Virginia, USA.
- Urresta, M. (2015). *Análisis de alternativas de diseño con geoceldas, en estructuras de pavimento. Estudio de caso carrera 12, Funza-Cundinamarca* (Trabajo final Especialización). Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C. Colombia.
- Vegas, I., Ibañez, J. A., Lisbona, A., Sáez De Cortazar, A., y Frías, M. (2011). Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2674–2682. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.018
- Verian, K. P., Ashraf, W., y Cao, Y. (2018). Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. *Resources, Conservation and Recycling*, 133(October 2017), 30–49. doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.005
- Vieira, C. S., y Pereira, P. M. (2015). Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 103, 192–204. doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.023
- Visser, W., y Koninklijke Shell, L. (1976). Pavement Evaluation With the Falling-Weight Deflectometer. *Transportation Research Record*, (3), 103–104.
- Yang, X., & Han, J. (2013). Geocell-reinforced granular fill under static and cyclic loading: A synthesis of analysis. *Geotechnical Engineering*, 44(4), 17–23.
- Yoder, E. J., y Witczak, M. W. (1975). *Principles of pavement design*. Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc. doi.org/10.1002/9780470172919
- Zárate, M., Lucero, M., & Zárate, B. (2011). Aspectos importantes derivados de la utilización de deflectómetro de impacto HWD, aplicados para la rehabilitación o reconstrucción de los pavimentos flexibles. *Memorias del Séptimo Congreso Mexicano del Asfalto*, S.A. México D.C. México.
- Zhang, L., Zhao, M., Shi, C., y Zhao, H. (2010). Bearing capacity of geocell reinforcement in embankment engineering. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(October), 475–482. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.12.011
- Zhou, H., y Wen, X. (2008). Model studies on geogrid- or geocell-reinforced sand cushion on soft soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 26, 231–238. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2007.10.002

A. Anexo: Formato toma de datos CBR.

	Facultad de Ingeniería LABORATORIO DE GEOTECNIA	ENSAYO C.B.R. California Bearing Ratio FORMATO PARA LA TOMA DE DATOS I.N.V.E 148			
PROYECTO: <u>Evaluación del comportamiento de materiales reciclados y de desecho para su uso en obras de infraestructura vial rural</u>	Tipo de proyecto: <u>CBR</u>	FECHA: <u>08/05/2019</u>			
CLIENTE: _____	MUESTRA: <u>100% RCD</u>	O.T. No. _____			
SONDEO: _____	PROFUNDIDAD: _____	DESCRIPCIÓN: _____			
CARACTERÍSTICAS INICIALES DE LA MUESTRA					
Diámetros de la muestra (cm):	15.17	15.17	15.17		
Alturas de la muestra (cm):	11.54	11.53	11.51		
Volumen de la muestra (cm ³):	2063.36				
CONDICIONES DE COMPACTACIÓN					
Peso del martillo (lb)	10				
Altura de caída (in)	18				
Número de capas:	5				
Golpes por capa:	56				
Energía de compactación (lb·ft/m ³)	57110				
ETAPA DE FALLA SIN INMERSIÓN					
Penetración (pulg)	Esfuerzo estándar (lb/pulg ²)	Tiempo	LECTURA ANILLO DE CARGA	Ec. Anillo (lb)	Esfuerzo (lb/pulg ²)
0.005	—	6	1	9.92	3.31
0.025	—	30	2	19.83	6.61
0.050	—	1*	4	39.67	13.22
0.075	—	1'30	6	59.50	19.83
0.100	1000	2	14	138.83	46.28
0.150	—	3	69	684.25	228.08
0.200	1500	4	132	1308.99	436.33
0.250	—	5	193	1913.90	637.97
0.300	1900	6	247	2449.40	816.47
0.400	2300	8	390	3867.47	1289.16
0.500	2600	10	492	4878.97	1626.32
ETAPA DE FALLA CON INMERSIÓN					
Penetración (pulg)	Esfuerzo estándar (lb/pulg ²)	Tiempo	LECTURA ANILLO DE CARGA	Ec. Anillo (lb)	Esfuerzo (lb/pulg ²)
0.005	—	6	1	9.92	3.31
0.025	—	30	5	49.58	16.53
0.050	—	1*	17	168.58	56.19
0.075	—	1'30	52	515.66	171.89
0.100	1000	2	91	902.41	300.80
0.150	—	3	169	1675.91	558.64
0.200	1500	4	246	2439.48	813.16
0.250	—	5	328	3252.64	1084.21
0.300	1900	6	410	4065.81	1355.27
0.400	2300	8	530	5255.80	1751.93
0.500	2600	10	655	6495.37	2165.12
HUMEDAD Y PESO UNITARIO COMPACTACIÓN FINAL DE INMERSIÓN					
Molde número:	49				
Peso del recipiente o molde (g)					
Peso del molde + base (g)	7966				
Peso de la muestra + molde (g)	12525	11299			
Peso unitario total (g/cm ³)	2.19	1.60			
Recipiente número	AA	26			
Peso suelo húmedo + recipiente (P1) (g)	309	338.88			
Peso suelo seco + recipiente (P2) (g)	285	309.97			
Peso del recipiente (P3) (g)	36.8	34.72			
Humedad de la muestra (%)	9.7%	10.5%			
Peso unitario seco (g/cm ³)	2.00	1.45			
Diferencia de humedad (%)		0.8%			
Molde número: _____ Sobrecarga (lb): _____					
EXPANSIÓN					
Fecha	Hora	Lectura Deformímetro (10 ⁻⁴ pulg)			
21/05/2019	02:20 p. m.	495			
22/05/2019	02:20 p. m.	474			
23/05/2019	12:00 p. m.	472			
27/05/2019	11:15 a. m.	472			
		-0.5%			
Observaciones: _____					

	Facultad de Ingeniería LABORATORIO DE GEOTECNIA	ENSAYO C.B.R. California Bearing Rea... FORMATO PARA LA TOMA DE DATOS LN.V.E 148																																																																																																														
Evaluación del comportamiento de materiales reciclados y de desecho para su uso en obras de Infraestructura vial rural																																																																																																																
PROYECTO: _____ CLIENTE: _____ SONDEO: _____ DESCRIPCIÓN: _____	Tipo de proyecto: CBR MUESTRA: 100% AGREGADO	FECHA: 21/03/2019 O.T. No.: _____ PROFUNDIDAD: _____																																																																																																														
CARACTERÍSTICAS INICIALES DE LA MUESTRA <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Dímetros de la muestra (cm):</td> <td>15.55</td> <td>15.48</td> <td>15.56</td> </tr> <tr> <td>Alturas de la muestra (cm):</td> <td>11.61</td> <td>11.56</td> <td>11.62</td> </tr> <tr> <td>Volumen de la muestra (cm³):</td> <td colspan="3" style="text-align: center;">2194.91</td> </tr> </table>		Dímetros de la muestra (cm):	15.55	15.48	15.56	Alturas de la muestra (cm):	11.61	11.56	11.62	Volumen de la muestra (cm ³):	2194.91			CONDICIONES DE COMPACTACIÓN <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Peso del martillo (lb)</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Altura de caída (in)</td> <td>18</td> </tr> <tr> <td>Número de capas:</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Golpes por capa:</td> <td>56</td> </tr> <tr> <td>Energía de compactación (lb*ft/m³)</td> <td>54207</td> </tr> </table>	Peso del martillo (lb)	10	Altura de caída (in)	18	Número de capas:	5	Golpes por capa:	56	Energía de compactación (lb*ft/m ³)	54207																																																																																								
Dímetros de la muestra (cm):	15.55	15.48	15.56																																																																																																													
Alturas de la muestra (cm):	11.61	11.56	11.62																																																																																																													
Volumen de la muestra (cm ³):	2194.91																																																																																																															
Peso del martillo (lb)	10																																																																																																															
Altura de caída (in)	18																																																																																																															
Número de capas:	5																																																																																																															
Golpes por capa:	56																																																																																																															
Energía de compactación (lb*ft/m ³)	54207																																																																																																															
HUMEDAD Y PESO UNITARIO <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>COMPACTACIÓN</th> <th>FINAL DE INMERSIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Molde número:</td> <td>29</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Peso del recipiente o molde (g)</td> <td>7447.8</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Peso del molde + base (g)</td> <td>8654.6</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Peso de la muestra + molde (g)</td> <td>13155.2</td> <td>11987.2</td> </tr> <tr> <td>Peso unitario (g/cm³)</td> <td>2.05</td> <td>1.52</td> </tr> <tr> <td>Recipiente número</td> <td>CR</td> <td>121</td> </tr> <tr> <td>Peso suelo húmedo + recipiente (P1) (g)</td> <td>376.6</td> <td>251.2</td> </tr> <tr> <td>Peso suelo seco + recipiente (P2) (g)</td> <td>326.4</td> <td>214.8</td> </tr> <tr> <td>Peso del recipiente (P3)</td> <td>40.4</td> <td>41</td> </tr> <tr> <td>Humedad de la muestra (%)</td> <td>17.6%</td> <td>20.9%</td> </tr> <tr> <td>Peso unitario seco (g/cm³)</td> <td>1.74</td> <td>1.26</td> </tr> <tr> <td>Diferencia de humedad (%)</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">3.4%</td> </tr> </tbody> </table>		COMPACTACIÓN	FINAL DE INMERSIÓN	Molde número:	29		Peso del recipiente o molde (g)	7447.8		Peso del molde + base (g)	8654.6		Peso de la muestra + molde (g)	13155.2	11987.2	Peso unitario (g/cm ³)	2.05	1.52	Recipiente número	CR	121	Peso suelo húmedo + recipiente (P1) (g)	376.6	251.2	Peso suelo seco + recipiente (P2) (g)	326.4	214.8	Peso del recipiente (P3)	40.4	41	Humedad de la muestra (%)	17.6%	20.9%	Peso unitario seco (g/cm ³)	1.74	1.26	Diferencia de humedad (%)	3.4%		ETAPA DE FALLA SIN INMERSIÓN <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Penetración (pulg)</th> <th>Esfuerzo estándar (lb/pulg²)</th> <th>Tiempo</th> <th>LECTURA ANILLO DE CARGA</th> <th>Ec. Anillo (lb)</th> <th>Esfuerzo (lb/pulg²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.005</td><td>-</td><td>6</td><td>1</td><td>9.92</td><td>3.31</td></tr> <tr><td>0.025</td><td>-</td><td>30</td><td>3</td><td>29.75</td><td>9.92</td></tr> <tr><td>0.050</td><td>-</td><td>1"</td><td>6</td><td>59.50</td><td>19.83</td></tr> <tr><td>0.075</td><td>-</td><td>1'30</td><td>9</td><td>89.25</td><td>29.75</td></tr> <tr><td>0.100</td><td>1000</td><td>2</td><td>11</td><td>109.08</td><td>36.36</td></tr> <tr><td>0.150</td><td>-</td><td>3</td><td>17</td><td>168.58</td><td>56.19</td></tr> <tr><td>0.200</td><td>1500</td><td>4</td><td>24</td><td>238.00</td><td>79.33</td></tr> <tr><td>0.250</td><td>-</td><td>5</td><td>36</td><td>357.00</td><td>119.00</td></tr> <tr><td>0.300</td><td>1900</td><td>6</td><td>47</td><td>466.08</td><td>155.36</td></tr> <tr><td>0.400</td><td>2300</td><td>8</td><td>64</td><td>634.66</td><td>211.55</td></tr> <tr><td>0.500</td><td>2600</td><td>10</td><td>78</td><td>773.49</td><td>257.83</td></tr> </tbody> </table>	Penetración (pulg)	Esfuerzo estándar (lb/pulg ²)	Tiempo	LECTURA ANILLO DE CARGA	Ec. Anillo (lb)	Esfuerzo (lb/pulg ²)	0.005	-	6	1	9.92	3.31	0.025	-	30	3	29.75	9.92	0.050	-	1"	6	59.50	19.83	0.075	-	1'30	9	89.25	29.75	0.100	1000	2	11	109.08	36.36	0.150	-	3	17	168.58	56.19	0.200	1500	4	24	238.00	79.33	0.250	-	5	36	357.00	119.00	0.300	1900	6	47	466.08	155.36	0.400	2300	8	64	634.66	211.55	0.500	2600	10	78	773.49	257.83
	COMPACTACIÓN	FINAL DE INMERSIÓN																																																																																																														
Molde número:	29																																																																																																															
Peso del recipiente o molde (g)	7447.8																																																																																																															
Peso del molde + base (g)	8654.6																																																																																																															
Peso de la muestra + molde (g)	13155.2	11987.2																																																																																																														
Peso unitario (g/cm ³)	2.05	1.52																																																																																																														
Recipiente número	CR	121																																																																																																														
Peso suelo húmedo + recipiente (P1) (g)	376.6	251.2																																																																																																														
Peso suelo seco + recipiente (P2) (g)	326.4	214.8																																																																																																														
Peso del recipiente (P3)	40.4	41																																																																																																														
Humedad de la muestra (%)	17.6%	20.9%																																																																																																														
Peso unitario seco (g/cm ³)	1.74	1.26																																																																																																														
Diferencia de humedad (%)	3.4%																																																																																																															
Penetración (pulg)	Esfuerzo estándar (lb/pulg ²)	Tiempo	LECTURA ANILLO DE CARGA	Ec. Anillo (lb)	Esfuerzo (lb/pulg ²)																																																																																																											
0.005	-	6	1	9.92	3.31																																																																																																											
0.025	-	30	3	29.75	9.92																																																																																																											
0.050	-	1"	6	59.50	19.83																																																																																																											
0.075	-	1'30	9	89.25	29.75																																																																																																											
0.100	1000	2	11	109.08	36.36																																																																																																											
0.150	-	3	17	168.58	56.19																																																																																																											
0.200	1500	4	24	238.00	79.33																																																																																																											
0.250	-	5	36	357.00	119.00																																																																																																											
0.300	1900	6	47	466.08	155.36																																																																																																											
0.400	2300	8	64	634.66	211.55																																																																																																											
0.500	2600	10	78	773.49	257.83																																																																																																											
Molde número: _____ Sobrecarga (lb): _____	ETAPA DE FALLA CON INMERSIÓN <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Penetración (pulg)</th> <th>Esfuerzo estándar (lb/pulg²)</th> <th>Tiempo</th> <th>LECTURA ANILLO DE CARGA</th> <th>Ec. Anillo (lb)</th> <th>Esfuerzo (lb/pulg²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.005</td><td>-</td><td>6</td><td>0.5</td><td>4.96</td><td>1.65</td></tr> <tr><td>0.025</td><td>-</td><td>30</td><td>3</td><td>29.75</td><td>9.92</td></tr> <tr><td>0.050</td><td>-</td><td>1"</td><td>6</td><td>59.50</td><td>19.83</td></tr> <tr><td>0.075</td><td>-</td><td>1'30</td><td>11</td><td>109.08</td><td>36.36</td></tr> <tr><td>0.100</td><td>1000</td><td>2</td><td>15</td><td>148.75</td><td>49.58</td></tr> <tr><td>0.150</td><td>-</td><td>3</td><td>23</td><td>228.08</td><td>76.03</td></tr> <tr><td>0.200</td><td>1500</td><td>4</td><td>28.5</td><td>282.62</td><td>94.21</td></tr> <tr><td>0.250</td><td>-</td><td>5</td><td>34</td><td>337.16</td><td>112.39</td></tr> <tr><td>0.300</td><td>1900</td><td>6</td><td>39</td><td>386.75</td><td>128.92</td></tr> <tr><td>0.400</td><td>2300</td><td>8</td><td>46</td><td>456.16</td><td>152.05</td></tr> <tr><td>0.500</td><td>2600</td><td>10</td><td>53</td><td>525.58</td><td>175.19</td></tr> </tbody> </table>	Penetración (pulg)	Esfuerzo estándar (lb/pulg ²)	Tiempo	LECTURA ANILLO DE CARGA	Ec. Anillo (lb)	Esfuerzo (lb/pulg ²)	0.005	-	6	0.5	4.96	1.65	0.025	-	30	3	29.75	9.92	0.050	-	1"	6	59.50	19.83	0.075	-	1'30	11	109.08	36.36	0.100	1000	2	15	148.75	49.58	0.150	-	3	23	228.08	76.03	0.200	1500	4	28.5	282.62	94.21	0.250	-	5	34	337.16	112.39	0.300	1900	6	39	386.75	128.92	0.400	2300	8	46	456.16	152.05	0.500	2600	10	53	525.58	175.19																																							
Penetración (pulg)	Esfuerzo estándar (lb/pulg ²)	Tiempo	LECTURA ANILLO DE CARGA	Ec. Anillo (lb)	Esfuerzo (lb/pulg ²)																																																																																																											
0.005	-	6	0.5	4.96	1.65																																																																																																											
0.025	-	30	3	29.75	9.92																																																																																																											
0.050	-	1"	6	59.50	19.83																																																																																																											
0.075	-	1'30	11	109.08	36.36																																																																																																											
0.100	1000	2	15	148.75	49.58																																																																																																											
0.150	-	3	23	228.08	76.03																																																																																																											
0.200	1500	4	28.5	282.62	94.21																																																																																																											
0.250	-	5	34	337.16	112.39																																																																																																											
0.300	1900	6	39	386.75	128.92																																																																																																											
0.400	2300	8	46	456.16	152.05																																																																																																											
0.500	2600	10	53	525.58	175.19																																																																																																											
EXPANSIÓN <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Fecha</th> <th>Hora</th> <th>Lectura Deformetr o (10⁻³)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>21/03/2019</td> <td>12:30 p. m.</td> <td>579</td> </tr> <tr> <td>22/03/2019</td> <td>11:40 a. m.</td> <td>562</td> </tr> <tr> <td>26/03/2019</td> <td>09:30 a. m.</td> <td>458</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td style="text-align: center;">-2.65%</td> </tr> </tbody> </table>	Fecha	Hora	Lectura Deformetr o (10 ⁻³)	21/03/2019	12:30 p. m.	579	22/03/2019	11:40 a. m.	562	26/03/2019	09:30 a. m.	458			-2.65%	Observaciones: _____ _____ _____																																																																																																
Fecha	Hora	Lectura Deformetr o (10 ⁻³)																																																																																																														
21/03/2019	12:30 p. m.	579																																																																																																														
22/03/2019	11:40 a. m.	562																																																																																																														
26/03/2019	09:30 a. m.	458																																																																																																														
		-2.65%																																																																																																														

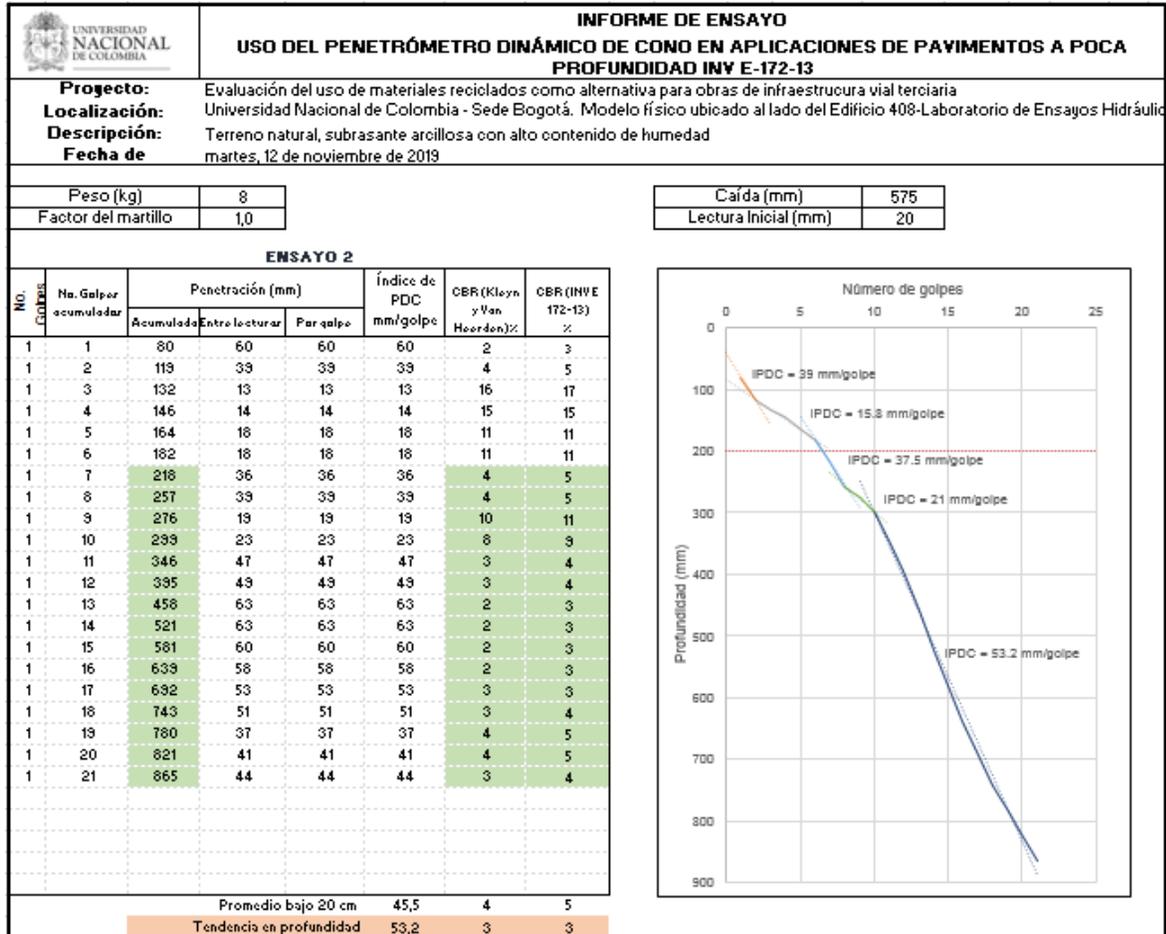
B. Anexo: Ensayos de PDC INV E-172-13

PDC ensayo 1.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		INFORME DE ENSAYO					
		USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO EN APLICACIONES DE PAVIMENTOS A POCA PROFUNDIDAD INV E-172-13					
Proyecto:		Evaluación del uso de materiales reciclados como alternativa para obras de infraestructura vial terciaria					
Localización:		Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá. Modelo físico ubicado al lado del Edificio 408-Laboratorio de Ensayos Hidráulicos					
Descripción:		Terreno natural, subrasante arcillosa con alto contenido de humedad					
Fecha de		martes, 12 de noviembre de 2019					
Peso (kg)		8					
Factor del martillo		1,0					
ENSAYO 1							
No. Golpe	No. Golpes acumulados	Penetración (mm)			Indice de PDC mm/golpe	CBR (Kleya y Van Heerden)%	CBR (INV E-172-13) %
		Acumulada	Entre lecturas	Por golpe			
1	1	28	27	27	27	6	7
1	2	39	11	11	11	20	20
1	3	44	5	5	5	55	48
1	4	51	7	7	7	35	33
1	5	55	4	4	4	73	62
1	6	67	12	12	12	18	18
1	7	76	9	9	9	26	25
1	8	96	20	20	20	9	10
1	9	111	15	15	15	13	14
1	10	125	14	14	14	15	15
1	11	148	23	23	23	8	9
1	12	182	34	34	34	5	6
1	13	221	39	39	39	4	5
1	14	258	37	37	37	4	5
1	15	275	17	17	17	11	12
1	16	303	28	28	28	6	7
1	17	321	18	18	18	11	11
1	18	355	34	34	34	5	6
1	19	391	36	36	36	4	5
1	20	430	39	39	39	4	5
1	21	477	47	47	47	3	4
1	22	524	47	47	47	3	4
1	23	573	49	49	49	3	4
1	24	625	52	52	52	3	3
1	25	683	58	58	58	2	3
1	26	755	72	72	72	2	2
Promedio bajo 20 cm					40,9	5	5
Tendencia en profundidad					47,6	3	4

Caída (mm)	575
Lectura Inicial (mm)	1

PDC ensayo 2.

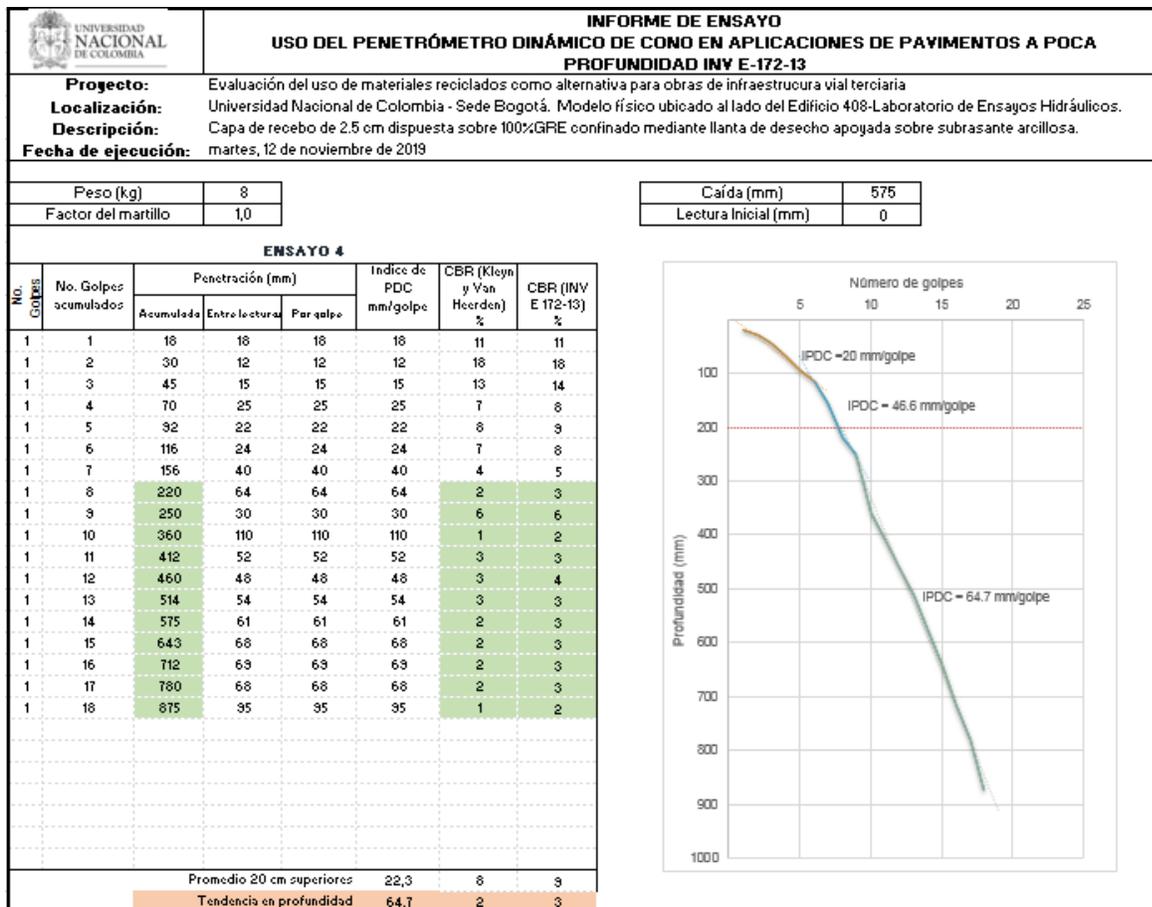


PDC ensayo 3.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		INFORME DE ENSAYO					
		USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO EN APLICACIONES DE PAVIMENTOS A POCA PROFUNDIDAD INV E-172-13					
Proyecto:		Evaluación del uso de materiales reciclados como alternativa para obras de infraestructura vial terciaria					
Localización:		Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá. Modelo físico ubicado al lado del Edificio 408-Laboratorio de Ensayos Hidráulicos.					
Descripción:		Terreno natural, subrasante arcillosa con alto contenido de humedad					
Fecha de ejecución:		martes, 12 de noviembre de 2019					
Peso (kg)		8		Caída (mm)		575	
Factor del martillo		1,0		Lectura Inicial (mm)		7	
ENSAYO 3							
NO. GOLPES	No. Golpes acumulador	Penetración (mm)			Índice de PDC mm/golpe	CBR (Kloyny Van Hoerden) %	CBR (INVE 172-13) %
		Acumulado	Entre lecturas	Por golpe			
1	1	14	7	7	7	35	33
1	2	25	11	11	11	20	20
1	3	33	8	8	8	30	28
1	4	42	9	9	9	26	25
1	5	49	7	7	7	35	33
1	6	58	9	9	9	26	25
1	7	62	4	4	4	73	62
1	8	68	6	6	6	43	39
1	9	70	2	2	2	176	134
1	10	73	3	3	3	105	85
1	11	76	3	3	3	105	85
1	12	79	3	3	3	105	85
1	13	83	4	4	4	73	62
1	14	86	3	3	3	105	85
1	15	90	4	4	4	73	62
1	16	94	4	4	4	73	62
1	17	99	5	5	5	55	48
1	18	104	5	5	5	55	48
1	19	112	8	8	8	30	28
1	20	119	7	7	7	35	33
1	21	126	7	7	7	35	33
1	22	131	5	5	5	55	48
1	23	136	5	5	5	55	48
1	24	143	7	7	7	35	33
1	25	150	7	7	7	35	33
1	26	156	6	6	6	43	39

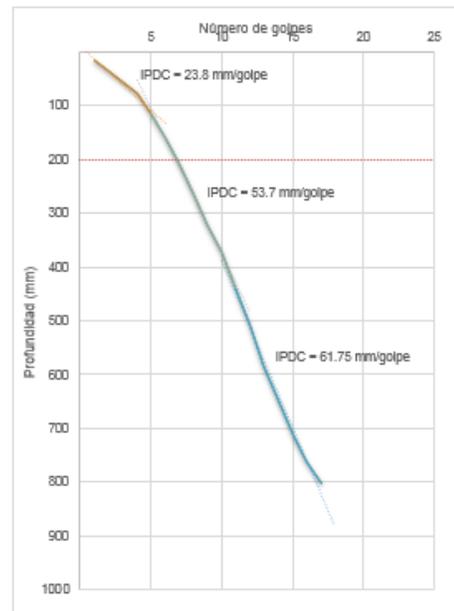
NO. GOLPES	No. Golpes acumulador	Penetración (mm)			Índice de PDC mm/golpe	CBR (Kloyny Van Hoerden) %	CBR (INVE 172-13) %
		Acumulado	Entre lecturas	Por golpe			
1	27	162	6	6	6	43	39
1	28	168	6	6	6	43	39
1	29	171	3	3	3	105	85
1	30	175	4	4	4	73	62
1	31	185	10	10	10	22	22
1	32	197	12	12	12	18	18
1	33	212	15	15	15	13	14
1	34	234	22	22	22	8	9
1	35	265	31	31	31	5	6
1	36	303	38	38	38	4	5
1	37	340	37	37	37	4	5
1	38	378	38	38	38	4	5
1	39	418	40	40	40	4	5
1	40	461	43	43	43	3	4
1	41	514	53	53	53	3	3
1	42	573	59	59	59	2	3
1	43	636	63	63	63	2	3
1	44	703	67	67	67	2	3
1	45	791	88	88	88	1	2
1	46	862	71	71	71	2	2
Promedio bajo 20 cm					47,5	4	5
Tendencia en profundidad					70,3	2	2

PDC ensayo 4.



PDC ensayo 5.

	INFORME DE ENSAYO USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO EN APLICACIONES DE PAVIMENTOS A POCA PROFUNDIDAD INV E-172-13								
Proyecto: Evaluación del uso de materiales reciclados como alternativa para obras de infraestructura vial terciaria Localización: Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá. Modelo físico ubicado al lado del Edificio 408-Laboratorio de Ensayos Hidráulicos. Descripción: Capa de recebo de 2.5 cm dispuesta sobre 100%GRE confinado mediante llanta de desecho apoyada sobre subrasante arcillosa, luego de 50 ciclos de carga. Fecha de ejecución: lunes, 27 de enero de 2020									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%;">Peso (kg)</td> <td style="text-align: center;">8</td> </tr> <tr> <td>Factor del martillo</td> <td style="text-align: center;">1,0</td> </tr> </table>	Peso (kg)	8	Factor del martillo	1,0	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 70%;">Caída (mm)</td> <td style="text-align: center;">575</td> </tr> <tr> <td>Lectura Inicial (mm)</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> </table>	Caída (mm)	575	Lectura Inicial (mm)	0
Peso (kg)	8								
Factor del martillo	1,0								
Caída (mm)	575								
Lectura Inicial (mm)	0								
ENSAYO 5									
No. Cotes	No. Golpes acumulados	Penetración (mm)			Indice de PDC mm/golpe	CBR (Kleyn y Van Heerden) %	CBR (INV E 172-13) %		
		Acumulada	Entre lecturas	Por golpe					
1	1	17	17	17	17	11	12		
1	2	35	18	18	18	11	11		
1	3	57	22	22	22	8	9		
1	4	77	20	20	20	9	10		
1	5	115	38	38	38	4	5		
1	6	162	47	47	47	3	4		
1	7	208	46	46	46	3	4		
1	8	265	57	57	57	2	3		
1	9	321	56	56	56	2	3		
1	10	373	52	52	52	3	3		
1	11	438	65	65	65	2	3		
1	12	510	72	72	72	2	2		
1	13	582	72	72	72	2	2		
1	14	647	65	65	65	2	3		
1	15	712	65	65	65	2	3		
1	16	762	50	50	50	3	4		
1	17	803	41	41	41	4	5		
Promedio 20 cm superiores					27,0	6	7		
Tendencia en profundidad					61,8	2	3		



PDC ensayo 6.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		INFORME DE ENSAYO					
		USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO EN APLICACIONES DE PAVIMENTOS A POCA PROFUNDIDAD INV E-172-13					
Proyecto:		Evaluación del uso de materiales reciclados como alternativa para obras de infraestructura vial terciaria					
Localización:		Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá. Modelo físico ubicado al lado del Edificio 408-Laboratorio de Ensayos Hidráulicos.					
Descripción:		Capa de recibo de 2.5 cm dispuesta sobre 100%GRE confinado mediante llantas de desecho apoyada sobre subrasante arcillosa, luego de 100 ciclos de carga.					
Fecha de ejecución:		lunes, 27 de enero de 2020					
Peso (kg)		8		Caída (mm)		575	
Factor del martillo		1,0		Lectura Inicial (mm)		0	
ENSAYO 6							
No. Golpes	No. Golpes acumulados	Penetración (mm)			Indice de PDC mm/golpe	CBR (Kleyn y Van Heerden) %	CBR (INV E 172-13) %
		Acumulada	Entre lecturas	Por golpe			
1	1	21	21	21	21	3	10
1	2	55	34	34	34	5	6
1	3	87	32	32	32	5	6
1	4	125	38	38	38	4	5
1	5	180	55	55	55	3	3
1	6	280	100	100	100	1	2
1	7	407	127	127	127	1	1
1	8	482	75	75	75	2	2
1	9	542	60	60	60	2	3
1	10	603	61	61	61	2	3
1	11	660	57	57	57	2	3
1	12	716	56	56	56	2	3
1	13	767	51	51	51	3	4
Promedio 20 cm superiores					36,0	4	5
Tendencia en profundidad					58,5	2	3

PDC ensayo 7.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		INFORME DE ENSAYO USO DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO EN APLICACIONES DE PAVIMENTOS A POCA PROFUNDIDAD INV E-172-13					
Proyecto:		Evaluación del uso de materiales reciclados como alternativa para obras de infraestructura vial terciaria					
Localización:		Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá. Modelo físico ubicado al lado del Edificio 408-Laboratorio de Ensayos Hidráulicos.					
Descripción:		Capa de recebo de 20 cm dispuesta sobre una subrasante arcillosa.					
Fecha de ejecución:		martes, 12 de noviembre de 2019					
Peso (kg)		8		Caída (mm)		575	
Factor del martillo		1,0		Lectura Inicial (mm)		0	
ENSAYO 7							
No. Golpes	No. Golpes acumulados	Penetración (mm)			Indice de PDC mm/golpe	CBR (Klein y Van Heerden) %	CBR (INV E 172-13) %
		Acumulada	Entre lecturas	Por golpe			
1	1	52	52	52	52	3	3
1	2	97	45	45	45	3	4
1	3	143	46	46	46	3	4
1	4	187	44	44	44	3	4
1	5	232	45	45	45	3	4
1	6	277	45	45	45	3	4
1	7	323	46	46	46	3	4
1	8	382	59	59	59	2	3
1	9	432	50	50	50	3	4
1	10	525	93	93	93	1	2
1	11	585	60	60	60	2	3
1	12	635	50	50	50	3	4
1	13	665	30	30	30	6	6
Promedio bajo 20 cm					53,1	3	4
Tendencia en profundidad					57,6	2	3

PDC ensayo 8.

