

ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DE AGREGADOS RECICLADOS DERIVADOS DE RCD EN OBRA

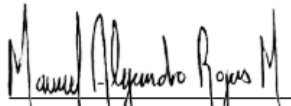
JAZMINE ADRIANA DEVIA AGUDELO

Nota de Aceptación

Certificamos que el presente Trabajo de Grado Satisface, en alcances y calidad, todos los requisitos Que demanda un Trabajo de Grado de Maestría.



IVÁN FERNANDO OTÁLVARO CALLE
Director

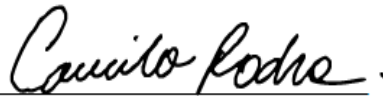


MANUEL ALEJANDRO ROJAS MANZANO
Jurado



ANIBAL MAURY RAMÍREZ
Jurado

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana Cali, para optar el título de Magister en Ingeniería Civil.



HERNÁN CAMILO ROCHA NIÑO Ph. D.
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias



JUAN CARLOS MARTÍNEZ ARIAS
Director Posgrados de Ingeniería y Ciencias

Santiago de Cali, 09 de Julio del 2021

**Maestría en Ingeniería
Facultad de Ingeniería y Ciencias**



Acta de Correcciones al Documento de Trabajo de Grado

Santiago de Cali, 09 de Julio del 2021

Autor:

Título del Trabajo de Grado: “ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DE AGREGADOS RECICLADOS DERIVADOS DE RCD EN OBRA”

Director:

Como indica el artículo 2.13 de las Directrices para Trabajo de Grado de Maestría, he verificado que el estudiante indicado arriba ha implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Trabajo de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Evaluación correspondiente.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Iván Fernando Otálvaro Calle'.

IVÁN FERNANDO OTÁLVARO CALLE
Director

DATOS DEL ESTUDIANTE

Nombre: Jazmine Adriana Devia Agudelo

Dirección: Calle 46#109-39 Apto 501 torre G

Correo electrónico: jazminedevia @gmail.com

Teléfono fijo: (2) 398 8505

Celular: +57 300 779 1163

Profesión: Ingeniera Civil

Nombre de Empresa: Constructora Bolívar S.A.

Cargo: Ingeniera Civil



DECLARACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD Y NO DIVULGACIÓN DE INFORMACIÓN CONFIDENCIAL

Escriba

Proyecto:	Análisis de las alternativas de aprovechamiento de agregados reciclados derivados de RCD En obra
Entidad Aliada:	Constructora Bolívar S.A. NIT 860037900-4
Fecha declaración:	07 de Mayo de 2021
Nombre e identificación de los Investigadores:	Iván Fernando Otálvaro Calle C.C. 15'308.209 Jazmine Adriana Devia Agudelo C.C. 1.094'882.875
Nombre e identificación de partícipes entidad aliada:	Gustavo Helbert Cuervo

Por medio del presente documento, obrando en calidad de Investigador o Partícipe, y previo al inicio del Proyecto arriba relacionado, manifiesto la declaración de confidencialidad y reserva que sigue a las siguientes:

CONSIDERACIONES

1. Que, **LA UNIVERSIDAD** y **LA ENTIDAD ALIADA**, están adelantando de forma conjunta el proyecto de investigación arriba señalado. Como parte de la ejecución de este proyecto, **LA ENTIDAD ALIADA** suministrará a los investigadores y a su vez, estos suministrarán a los partícipes en el proyecto, información clasificada con carácter de reservada, razón por la cual, tal información se define como: **para uso académico, confidencial y altamente restringido.**
2. Que, esta información es de suma importancia tanto para **LA ENTIDAD ALIADA** como para los investigadores y por tanto la revelación, empleo o divulgación de la misma puede ser gravemente perjudicial para los intereses de la misma.

Atendiendo a las anteriores consideraciones, procedo a firmar la presente declaración de Confidencialidad, en los siguientes términos:

PRIMERO: INFORMACIÓN CONFIDENCIAL: Para los efectos de esta **DECLARACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD Y NO DIVULGACIÓN DE INFORMACIÓN CONFIDENCIAL**, manifiesto que conozco, entiendo, acepto y declaro que se entiende como "Información Confidencial" toda aquella información de propiedad de **LA ENTIDAD ALIADA**, o derivada de los resultados de esta investigación a la que tenga acceso en virtud de los convenios y contratos celebrados entre las partes, especialmente, aquella información a la que tenga acceso en virtud del proyecto de investigación referido en el encabezado de este documento.

Conozco, entiendo, acepto y declaro que la información confidencial que suministren ambas partes podrá ser utilizada para la ejecución de las actividades propias o inherentes a la ejecución del proyecto de investigación, y por lo tanto, cualquier uso diferente, incluyendo su divulgación por cualquier medio escrito, electrónico y/o verbal, sin previa autorización expresa y por escrito del Funcionario Autorizado de **LA ENTIDAD ALIADA**, será considerada como incumplimiento de las obligaciones asumidas en

[Handwritten signature]

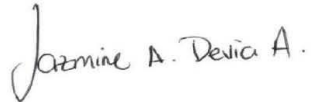
el presente documento y dará lugar a la aplicación de las sanciones correspondientes. Así mismo, LA ENTIDAD ALIADA se obliga a no revelar, divulgar, exhibir, mostrar, explotar, comercializar y en consecuencia a proteger la información recibida para evitar su divulgación no autorizada, ejerciendo sobre ésta el mismo grado de diligencia que utiliza para proteger información confidencial de su propiedad.

SEGUNDA: OBLIGACIONES: En desarrollo del presente **DECLARACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD Y NO DIVULGACIÓN DE INFORMACIÓN CONFIDENCIAL** me comprometo a cumplir con las siguientes obligaciones:

1. Tomar todas las precauciones y medidas necesarias para garantizar la reserva de la información confidencial.
2. Utilizar la información suministrada por LA ENTIDAD ALIADA únicamente y exclusivamente para realizar las actividades y evaluaciones académicas que sean requeridas.
3. Abstenerme de poner a disposición del público general la información confidencial de LA ENTIDAD ALIADA, a través de bases de datos, repositorios u otros medios conocidos o por conocer.
4. Abstenerme de divulgar o revelar, a terceros o a ninguna otra persona o entidad, la información confidencial sin el consentimiento previo y por escrito del funcionario competente para dar dicha autorización.
5. No divulgar, ni difundir, publicar, ni usar, ni negociar por ningún medio, sin consentimiento de las partes, la información que conozca en virtud del proyecto de investigación y que puedan constituir materia de patente, secreto comercial (know-how), modelo de utilidad, diseño industrial o derechos de autor de propiedad.
6. La obligación de confidencialidad sobre la información no se extenderá en ningún caso a:
 - 6.1. Información que sea del dominio público con anterioridad a la fecha en la cual me hubiere sido entregada.
 - 6.2. Información que se haya hecho pública lícitamente antes o durante la existencia de este compromiso.
 - 6.3. Información que haya sido previamente conocida sin la obligación de mantenerla bajo confidencialidad.
 - 6.4. Información que haya sido conocida a través de terceros sin que exista la obligación de mantenerla bajo confidencialidad, a menos que tenga pleno conocimiento que dichos terceros no están autorizados para revelar o divulgar sin restricción alguna dicha información.
 - 6.5. Información sobre la cual sea aprobada su publicación por medio de autorización escrita LA ENTIDAD ALIADA, y sólo hasta el límite de dicha autorización.
7. Las obligaciones de confidencialidad y no divulgación de información aquí señaladas deberán ser cumplidas indefinidamente en el tiempo, independientemente de la duración de la ejecución del proyecto de investigación.
8. La violación de los compromisos de confidencialidad y no divulgación de información confidencial contenidos en esta **DECLARACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD Y NO DIVULGACIÓN DE INFORMACIÓN CONFIDENCIAL** pueden generar graves consecuencias legales y económicas en mí contra. En consecuencia, manifiesto expresamente conocer la responsabilidad tanto civil, como penal consagrada en la ley colombiana y que se genera por cualquier violación a alguno de los compromisos que adquiero mediante este acuerdo.



En señal de conformidad las partes suscriben el presente documento en dos ejemplares del mismo tenor, en Santiago de Cali, en la fecha señalada en el encabezado de este contrato.



JAZMINE ADRIANA DEVIA AGUDELO
C.C. 1.094.882.875
Estudiante
Pontificia Universidad Javeriana Cali



IVÁN FERNANDO OTÁLVARO CALLE
C.C. 15.384.209
Asesor del Proyecto
Docente Pontificia Universidad Javeriana Cali



GUSTAVO HELBERT CUERVO
C.C. 79299088
Gerente de construcción
CONSTRUCTORA BOLIVAR

AGRADECIMIENTOS

A Dios, quien me ha brindado el entendimiento y la capacidad de realizar este proyecto que concluye una valiosa etapa de mi vida y por todas sus bendiciones.

A mi Esposo Walter Bastidas, por el apoyo incondicional a través de los años y por el acompañamiento, oportunidad y tranquilidad para desarrollar tan maravilloso proceso.

A mi hijo Jacobo Bastidas Devia, quien es mi motor para avanzar en la vida.

A mis padres Jaime y Myriam, que me han apoyado en todo momento y me han brindado su gran amor. Es un orgullo poder presentarme como una profesional gracias a tantos esfuerzos suyos.

Agradecimientos infinitos al Dr. Iván Fernando Otálvaro, quien es el director de este proyecto y que sin él no habría tenido la calidad de información y valor integral del proyecto, adicionalmente me brindó su apoyo y ánimos para la culminación, así como al

Dr. Alejandro Rojas quién me brindó siempre su apoyo y conocimiento.

A mis apoyos en el laboratorio Erlo travy, Victoria Cerón y Mayra Galvis quienes me brindaron su aporte en este proyecto.

A Constructora Bolívar por la valiosa disposición para suministro de la información y recopilación de muestras que fueron analizadas.

A mis amigos que fueron partícipes de este proceso.

A todos ellos, muchas gracias.

RESUMEN

El aumento poblacional en un país trae consigo crecimiento en el sector de la construcción, acelerando la demanda de vivienda e infraestructura pública causando a su vez un incremento en el uso de recursos naturales, además del incremento en la generación de residuos de construcción y demolición (RCD). Para un número importante de países en América Latina, este tipo de residuos no son valorados y terminan reduciendo la capacidad de rellenos sanitarios, en vertederos irregulares y con mala disposición generando una serie de problemas ambientales y sociales. Como respuesta a la problemática que traen los RCD, el gobierno de Colombia ha legislado poniendo metas de aprovechamiento, sin embargo, en muchas de las empresas de la construcción no hay conocimiento acerca de los posibles usos de agregados reciclados derivados de los RCD. En este trabajo se abordan dos posibles alternativas de aprovechamiento de los RCD, en un proyecto de construcción de viviendas de dos pisos en mampostería estructural. Inicialmente, son producidos agregados reciclados a partir de los residuos cerámicos (ARCe), además de producir material de relleno a partir de la separación del material de las excavaciones. Con estos nuevos materiales reciclados son evaluadas dos alternativas de aprovechamiento: i) reemplazo de agregados naturales en concretos, y ii) mezcla de ARCe y la parte final del geomaterial de excavación como nuevo material para relleno contra estructuras. El análisis del reemplazo de agregados grueso para concreto contempló la sustitución del 10, 20 y 40% del peso, fueron estudiadas propiedades en estado fresco y en estado endurecido para una mezcla con resistencia objetivo de 21 MPa, los resultados mostraron un incremento en la variabilidad de las propiedades y una reducción en la resistencia a la compresión conforme se incrementa la cantidad de reemplazo, lo que limita el uso de estos nuevos concretos a elementos de urbanismo o no estructurales. Las mezclas del suelo y ARCe fueron estudiadas en función de la resistencia a la compresión simple, los resultados mostraron que la mezcla con ARCe mejora la trabajabilidad en la compactación y produce en general un material con características de rigidez mejores a las del suelo original. De forma complementaria, se evaluó el impacto ambiental en función de la huella de carbono, los resultados mostraron que la sustitución permite reducir las emisiones totales.

ABSTRACT

The increase population in a country brings with it growth in the construction sector, speeding up demand for housing and public infrastructure causing at the time and increasing on the use of natural resources, in addition the increase of the generation is construction of waste and demolition (RCD). For important numbers of country's in America Latina, this type of waste are not valued and they ends reducing the capacity of sanitary fillers, in traditional landfills and with bad disposition generating environmental problems and socials. In response to the problem that brings RCD, the government from Colombia has legislated setting harvest dates, however, on many of the business of constructions don't have knowledge of the possible use of aggregates derivatives of recycling from the ceramic waste (ARCe), in addition to producing filler material from the separation of the material from the excavations. With this new materials already recycle are evaluated two alternatives of use: 1) replacement of natural aggregates in concrete, and 2) mix the ARCe and the final part of the excavation geomaterial as a new material for filling against structures. The analysis of the replacement of coarse aggregates for concrete contemplated the substitution of 10, 20 and 40% of the weight, properties were studied in the fresh state and in the hardened state for a mixture with a target resistance of 21 MPa, the results showed an increase in the variability properties and a reduction in compressive strength as the amount of replacement increases, limiting the use of these new concretes to urban or non-structural elements. The mixtures of the soil and ARCe were studied based on the resistance to simple compression, the results showed that the mixture with ARCe improves workability in compaction and generally produces a material with better stiffness characteristics than the original soil. In a complementary way, the environmental impact was evaluated based on the carbon footprint, the results showed that the substitution allows to reduce total emissions.



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

JAZMINE ADRIANA DEVIA AGUDELO

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR:

Dr. IVÁN FERNANDO OTÁLVARO CALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS

SANTIAGO DE CALI

2021

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Identificación del problema.....	3
1.2	Objetivos	4
1.2.1	Objetivo general.....	5
1.2.2	Objetivos específicos	5
1.3	Organización del documento escrito	5
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Generación de Residuos de construcción y demolición.....	7
2.1.1	Breve panorama mundial de la generación de RCD.....	7
2.1.2	Generación en Europa.....	8
2.1.3	Generación en américa latina y el caribe	10
2.1.4	Generación a nivel nacional.....	14
2.2	Normativa para la gestión de los residuos de construcción y demolición RCD	17
2.3	Aprovechamiento de residuos de construcción y demolición (RCD) como material de construcción.....	22
2.3.1	Aprovechamiento de RCD en Concretos y Morteros:.....	22
2.3.2	Usos de residuos de ladrillo.....	24
2.3.3	Uso como material para pavimentos, bases y subbases.....	28
2.3.4	Uso en elementos prefabricados de concreto.....	30
2.3.5	Uso como material de relleno	32
3.	METODOLOGIA	36
3.1	Selección del proyecto de caso de estudio	36
3.1.1	Identificación y criterios de selección del sistema constructivo y/o estructural	36
3.1.2	Criterios de selección de la obra.....	37
3.1.3	Proyecto seleccionado para el caso de estudio	39
3.1.4	Proceso constructivo del caso de estudio.....	40
3.2	Análisis y selección de las alternativas de aprovechamiento a estudiar en el laboratorio	41
3.2.1	Oferta de RCD	41

3.2.2	Análisis de alternativas de aprovechamiento.....	42
3.3	Muestreo de los materiales y producción de agregados reciclados.....	45
3.3.1	Residuo generado por Cerámicos (zona de corte del ladrillo).....	45
3.3.2	Residuo generado de excavaciones	46
3.4	Alternativa 1 de aprovechamiento: Concreto.....	48
3.4.1	Análisis de mezcla de referencia	48
3.4.1.1	Caracterización de materiales.....	48
3.4.1.2	Dosificación	53
3.4.2	Agregado reciclado de cerámicos (ARCe)	54
3.4.2.3.	Caracterización del agregado reciclado de cerámico (ARCe).....	55
3.4.2.4.	Producción de concreto	55
3.4.3	Análisis del efecto de remplazo del agregado natural por ARCe.....	57
3.4.3.1	Propiedades en estado fresco.....	59
3.4.3.2.	Propiedades en estado endurecido	60
3.5	Caracterización de los materiales para la alternativa 2 de aprovechamiento	61
3.5.1	Análisis de suelo original.....	62
3.5.2	Muestreo y producción de los materiales de relleno reciclados	63
3.5.3	Caracterización geotécnica de los materiales reciclados para rellenos	64
3.5.4	Elaboración de probetas para verificar el comportamiento del material de relleno	
	68	
3.5.5	Análisis del comportamiento esfuerzo deformación	70
4.	ALTERNATIVA 1 DE APROVECHAMIENTO: CONCRETO	72
4.1	Caracterización de los materiales	72
4.1.1	Granulometría por tamizado.....	72
4.1.1.1	Granulometría del agregado grueso natural	72
4.1.1.2	Granulometría del agregado fino natural	73
4.1.1.3	Granulometría del agregado reciclado ARCe	74
4.1.2	Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos	76
4.1.3	Gravedad específica y absorción de los agregados finos.....	78
4.1.4	Peso unitario aparente del ARCe.....	78

4.1.5	Caracterización del cemento.....	79
4.2	Resultados obtenidos en los concretos elaborados en laboratorio	80
4.2.1	Propiedades en estado fresco	80
4.2.2	Propiedades en estado endurecido	81
4.2.2.1	Resistencia a la compresión	81
4.2.2.2	Velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos.....	85
5.	ALTERNATIVA DE APLICACIÓN 2: MATERIAL DE RELLENO.....	88
5.1	Caracterización básica del suelo.....	88
5.2	Verificación de la condición de expansión.....	93
5.2.1	Uso de métodos indirectos en la identificación del potencial de expansión.....	94
5.2.2	Uso de métodos directos en la identificación del potencial de expansión.....	98
5.2.3	Análisis de mezclas suelo -ARCe (Sustituciones con polvo de ladrillo).....	99
5.3	Resistencia al corte no drenada mediante compresión simple	102
5.4	Análisis de resultados	105
6.	ESTIMACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL.....	107
7.	CONCLUSIONES	115
7.1	Conclusiones	115
7.2	Recomendaciones para trabajos futuros	117
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119
	ANEXOS	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relación entre la población de Estados Unidos, Europa y China y la generación de RCD.	8
Figura 2. Porcentaje de Residuo generado en el año 2014. Fuente: (Villoria-Saez & Osmani, 2019).	9
Figura 3. Recuperación de residuos en países de la Unión Europea en 2016. Fuente: (Eurostat, 2016).	10
Figura 4. Ejemplos de la composición del RCD en Brasil (Marques Neto, 2003).	11
Figura 5. Clasificación de los RCD encontrada por (Bueno et al., 2013).	11
Figura 6. Composición típica de los RCD en Costa Rica (Modificado de UICN, 2011).	13
Figura 7. Composición de los RCD en Chile (Grupo de Residuos Sólidos, 2012).	14
Figura 8. Proyección de la generación de RCD en Santiago de Cali Bolaños Zambrano & Coqueco Duque (2021).	15
Figura 9. Composición del RCD en la ciudad de Ibagué. Fuente: (Mahecha & Calderón, 2018).	16
Figura 10. Efecto del reemplazo por polvo de ladrillo en la resistencia a la compresión del concreto (Ge et al., 2015).	25
Figura 11. Resistencia a flexión y a compresión de morteros a 7, 28, y 120 días de curado Navratilova & Rovnanikova (2016).	26
Figura 12. Resistencia a la compresión del concreto elaborado en obra curado en inmersión. Fuente: Martínez (2021)	28
Figura 13. Composición de la muestra de RCD (Olmedo & Barrera 2015)	29
Figura 14. Composición RCD para estudio de reutilización (Embus & Quintero, 2015).	29
Figura 15. Efecto de la composición del agregado reciclado de RCD en el módulo resiliente (Rengifo & Chávez, 2015).	30
Figura 16. Efecto del reemplazo del agregado natural por RCD en la resistencia a flexotracción (Caicedo & Perez, 2015).	31
Figura 17. Resultados de la prueba de corte directo en material fino de RCD (Gil & Orozco, 2016).	33

Figura 18. Envolvente ensayo corte directo interface geotextil – RCD (Granda et al., 2017).	34
Figura 19. Distribución de área iniciada por sistema constructivo (DANE, 2017).....	37
Figura 20. Localización del proyecto en la comuna 22 donde se realizó la recolección de los materiales (https://images.app.goo.gl/fRDHTMajCrrxfxnUA).....	38
Figura 21. Vista aérea del proyecto a agosto 2018. Fuente: Constructora Bolívar.	39
Figura 22. Planta Arquitectónica casa tipo. Fuente: Constructora Bolívar	40
Figura 23. (a), (b) Construcción de casas en mampostería estructural Fuente: el autor.....	41
Figura 24. a) Acopio del residuo; b) y recolección en acopios temporales. Fuente: el autor.	46
Figura 25. Material excavado para toma de muestras (a), (b), (c) terraza, (d), (e) y (f) zanja de excavación para filtro. Fuente: el autor.....	47
Figura 26 Metodología para la aplicación 1. Fuente: el autor.	48
Figura 27. Serie de tamices para realización de granulometría. Fuente: el autor.....	50
Figura 28. Ensayo de gravedad específica y absorción en la grava. Fuente: el autor.	51
Figura 29. Gravedad específica y absorción en arena. Fuente: el autor.	51
Figura 30. Finura de cemento mediante aparato de Blaine. Fuente: el autor.	52
Figura 31. Tiempo de fraguado y control de temperatura. Fuente: el autor.	53
Figura 32. Trituradora de mandíbula. Fuente el autor.....	54
Figura 33. Separación en el cuarteador de las muestras en el laboratorio. Fuente: el autor.	55
Figura 34. Elaboración de concreto diseño base. Fuente: el autor.	57
Figura 35. Modelos de fractura típicos. Fuente: (NTC 673, 2010).	59
Figura 36. Toma de asentamiento utilizando el cono de Abrams. Fuente: el autor.	59
Figura 37. Ensayo de resistencia a compresión. Fuente: el autor.....	60
Figura 38. Metodología para la alternativa 2 de aprovechamiento. Fuente: el autor	61
Figura 39. Suelo seleccionado para el retiro: a) en el sitio de obra; b) fracción gruesa retenida en el No. 4 después de tamizado y lavado; y c) matriz fina pasante No. 4 seca al aire.	63
Figura 40. Muestras de suelo para iniciar proceso de tamizaje. Fuente: el autor.....	65

Figura 41. a) Muestras en preparación; b) muestra en probeta lista a inicio de ensayo. Fuente el autor.	65
Figura 42. (a) Muestra por el tamiz No. 4; (b) ensayo de gravedad específica. Fuente: el autor.	66
Figura 43. Anillo para ensayo de expansión. Fuente el autor.....	67
Figura 44. Realización de ensayo de Proctor estándar: a) compactación de las muestras; b) pesaje; c) ajuste de la humedad y reposo; y d) enrase al final del ensayo. Fuente: el autor.	68
Figura 45. Molde para la compactación de los especímenes con mezclas de suelo y ARCe. Fuente: el autor.	69
Figura 46. Montaje del molde en la prensa triaxial para la compactación semi-estática.	70
Figura 47. Forma de obtención del módulo de elasticidad E_{50} para las muestras de suelo y ARCe. Fuente: Plaxis (2006).....	71
Figura 48. Granulometría del agregado grueso natural y husos de la NTC. Fuente: el autor.	73
Figura 49. Granulometría del agregado fino natural y husos de la NTC. Fuente: el autor. .	74
Figura 50. Granulometría de las muestras de ARCe. Fuente: el autor.	75
Figura 51. Granulometría del ARCe comparada con los límites de la (NTC 174, 2000) para agregados de 1". Fuente: el autor.	75
Figura 52. Granulometría del ARCe comparada con los límites de la NTC para agregados de 3/4". Fuente: el autor.	76
Figura 53. Resultados de peso unitario de los ARCe del presente estudio y otros autores. Fuente: el autor.	79
Figura 54. Comparación de los resultados de la resistencia a la compresión a los 3 días. Fuente: el autor.	82
Figura 55. Comparación de los resultados de la resistencia a la compresión a los 7 días. Fuente: el autor.	82
Figura 56. Comparación de los resultados de la resistencia a la compresión a los 28 días. Fuente: el autor.	83

Figura 57. Cilindros ensayados a 28 días: a) diseño base; b) diseño con 10% ARCe; c) diseño con 20% ARCe; y d) diseño con 40% ARCe. Fuente: el autor.	84
Figura 58. Efecto de la edad en la resistencia en función de la sustitución de agregado natural por ARCe. Fuente: el autor.	85
Figura 59. Toma de dimensiones del cilindro y ensayo de velocidad de pulso ultrasónico. Fuente: el autor.	86
Figura 60. Aumento de velocidad de pulso ultrasónico a edades de ensayo. Fuente: el autor.	86
Figura 61. Relación entre la resistencia a la compresión a los 28 días y la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos.	87
Figura 62. Granulometría por tamizado del suelo muestreado en el sitio de obra.	88
Figura 63. Ubicación en la carta de plasticidad de los materiales muestreados.	90
Figura 64. Clasificación de las muestras de suelo. Fuente: propia.	91
Figura 65. Curva de compactación para el suelo homogenizado.	92
Figura 66. Curva de compactación para el RCD de Rb.....	93
Figura 67. Agrupación de los minerales de arcilla en la carta de plasticidad. Fuente: Holtz, Kovacs & Sheahan (2011).	95
Figura 68. Clasificación de expansión de acuerdo con el método de van Der Merve (1964).	96
Figura 69. Clasificación de expansión de acuerdo con el método de Williams, (1957).	97
Figura 70. Carta de identificación de suelos expansivos según Seed et al., (1962).	98
Figura 71. Variación de la humedad de compactación en los cuerpos de prueba de suelo con ARCe.	100
Figura 72. Variación del grado de saturación en los cuerpos de prueba de suelo con ARCe.	101
Figura 73. Variación del peso unitario seco en los cuerpos de prueba de suelo con ARCe.	101
Figura 74. Efecto de la adición en la resistencia a la compresión.	102
Figura 75. Relación entre la resistencia a la compresión y el peso unitario seco.....	103

Figura 76. Variación del módulo de elasticidad E_{50} en función de la adición de residuos de Rb.....	104
Figura 77. Efecto del grado de saturación inicial en el módulo de elasticidad E_{50}	104
Figura 78. Distribución de la emisión de CO_2 eq en la producción de los materiales de construcción del caso de estudio.....	112
Figura 79. Distribución de la emisión de CO_2 eq en el transporte de los materiales hasta la obra.	112

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Población, aumento medio anual y tasa de crecimiento anual con referencia a 2014 (Naciones Unidas, 2014).	7
Tabla 2. Clasificación de residuos según (Conama, 2002). Fuente: (Bueno et al., 2013)....	12
Tabla 3. Listado de proyección de RCD a generar. Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).	20
Tabla 4. Listado de proyección de RCD a generar. Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).....	21
Tabla 5. Muestras evaluadas para análisis de ensayos mecánicos (Bravo & Bravo, 2019) .	32
Tabla 6. Usos potenciales de los agregados y material de relleno estructural derivados de los RCD.	43
Tabla 7. Listado de la clasificación de la composición según la norma EN 933-11.....	45
Tabla 8. Procedimientos de ensayo para la caracterización de los materiales que componen la mezcla de concreto.....	50
Tabla 9. Diseño de mezcla para 21MPa. Fuente: Constructora Bolívar.....	53
Tabla 10. Caracterización del ARCe derivado de RCD en la zona de corte de ladrillo.	55
Tabla 11. Descripción de los reemplazos empleados. Fuente: el autor.....	56
Tabla 12. Cantidad de concreto a preparar en litros. Fuente: el autor.....	56
Tabla 13. Dosificación de diseño base para la elaboración de concretos de 21MPa de acuerdo con el caso de estudio. Fuente: el autor.	57
Tabla 14. Ensayos al concreto. Fuente: el autor.	58
Tabla 15. Guía de calidad del concreto en función de la velocidad de pulsos ultrasónicos (Neville, 1997).....	58
Tabla 16. Matriz experimental de concreto. Fuente: el autor.....	61
Tabla 17. Perfil de suelo típico del proyecto objeto de estudio (Espinosa & Restrepo, 2017).	62
Tabla 18. Ensayos de caracterización básicos efectuados sobre los suelos provenientes de excavaciones.	64
Tabla 19. Nomenclatura y descripción de las muestras analizadas. Fuente: el autor.....	70

Tabla 20. Características de la granulometría ARCe. Fuente: el autor.	74
Tabla 21. Resultados promedio de gravedad específica y absorción de los agregados gruesos. Fuente: el autor.	77
Tabla 22. Resultados promedio de gravedad específica y absorción de los agregados finos. Fuente: el autor.	78
Tabla 23. Propiedades físicas y mecánicas del cemento. Fuente: el autor.	79
Tabla 24. Resultado del asentamiento, propiedades en estado fresco. Fuente: el autor.	80
Tabla 25. Resultados de la resistencia a la compresión de los cilindros. Fuente: el autor. ..	81
Tabla 26. Resultados de la velocidad de pulso ultrasónico para los concretos realizados. Fuente: el autor.	86
Tabla 27. Resultados de ensayo de ultrasonido según tabla de (Neville, 1997). Fuente: el autor.	87
Tabla 28. Fracciones del tamaño de las partículas de los ensayos de tamizado e hidrometría para los suelos muestreados.	89
Tabla 29. Propiedades índices de las muestras estudiadas	89
Tabla 30. Parámetros empleados en la clasificación de suelos finos.	90
Tabla 31. Clasificación de suelos según USCS. Fuente: propia.	91
Tabla 32. Criterios de identificación de arcillas expansivas. Fuente: Holtz and Gibbs (1956).	95
Tabla 33. Identificación indirecta de la expansión del suelo con la propuesta de Holtz and Gibbs (1956).	95
Tabla 34. Identificación de suelos expansivos según la NSR-10. Fuente:(Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica., 2010).	97
Tabla 35. Resumen de la identificación indirecta de la expansión del suelo.	98
Tabla 36. Parámetros iniciales y resultados de la expansión en consolidómetro según la ASTM D4829-11.	99
Tabla 37. Definición de los objetivos y alcance del LCA dentro de la estimación de la reducción del impacto ambiental.	107
Tabla 38. Factores de emisión típicos de la cuna a la puerta empleados para el cálculo de huella de carbono (tomado de Gómez, 2019).	109

Tabla 39. Cantidades de obra del caso de estudio	110
Tabla 40. Cálculo de la huella de carbono sin gestión del RCD para las condiciones de análisis descritas en el caso de estudio. Fuente: el autor	111
Tabla 41. Cálculo de la huella de carbono con gestión del RCD. Fuente: el autor	113
Tabla 42. Reducción de CO2 en actividades. Fuente: el autor.....	114
Tabla 43. Cumplimiento de meta sin inclusión de material. Fuente: el autor	114
Tabla 44. Cumplimiento de meta con inclusión de material. Fuente: el autor	114

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico y su consecuente aumento exponencial en la producción de bienes, servicios, actividades industriales, y de ingeniería, crea una gran preocupación a nivel mundial por la contaminación ambiental que produce. En busca de satisfacer la demanda constante del aumento poblacional, el sector de la construcción viene generando de manera continua y acelerada los residuos de construcción y demolición (RCD) en las ciudades, productos de: excavaciones, demoliciones, restauraciones, y la realización de nuevos proyectos; normalmente constituidos por: hormigón, restos de pavimentos, ladrillos, plástico, acero, madera, entre otros. Robayo, Matthey, Silva & Burgos (2015). Se estima que el mundo produce aproximadamente de 7 a 10 mil millones de toneladas métricas de residuos cada año; los cuales el 36% son residuos de construcción y demolición, el 32% son residuos comerciales e industriales, el 24% son urbanos (Duan, Miller, Liu, & Tam, 2019). En Europa se genera cada año alrededor de 850 Mton de Residuos de construcción y demolición (RCD), componiéndose un tercio en residuos de concreto. Pepe, Toledo Filho, Koenders, & Martinelli (2014), en un informe de las Naciones Unidas, reportaron que en los Estados Unidos se producen anualmente 145 Mton de RCD. Para el departamento de protección ambiental de Hong Kong la producción de RCD para el año 2015 fue de 1,53 Mton. En China en el año 2013 se generó 1Gton. De otro lado Lum, Hung, Poh, & Alengaram (2018), mencionan que en el Reino Unido e Inglaterra se generaron 55 y 49,1 Mton y en la India 14,5 Mton.

Según Acevedo, Vásquez & Ramírez (2012), el sector de la construcción es uno de los principales contaminantes del medio ambiente con un 35% de la producción total de residuos sólidos. Eurostat (2017) afirma además, que en la Unión Europea el sector de la construcción es un consumidor de recursos y generador de residuos; requiriendo el 40% de materias primas (equivalentes a 3000 Mton/año), el 17% de agua potable, 25% de madera cultivada, el 20% del consumo de energía durante el proceso de construcción, a lo cual se le

atribuye el 33% de las emisiones de CO₂ para esta actividad, destacando que la industria de la construcción es una de los principales contribuyentes a la contaminación a nivel mundial.

El Departamento Administrativo del Medio Ambiente DAGMA, informa que en la ciudad de Santiago de Cali en el año 2015 se produce un promedio diario de 2.500 m³ de RCD, discriminados entre el 77% por construcciones nuevas y el 23% por remodelaciones. La problemática se presenta en la disposición final de estos residuos, pues la mayoría de escombreras no son legales, lo cual conlleva desaprovechamiento de energía y material que puede ser reutilizable, y como consecuencia mayor impacto al medio ambiente (Ingenier, 2006).

La información recopilada por Urbana (2017); manifiesta que para Santiago de Cali las unidades de vivienda de interés social VIS (70 a 135 SMMLV), tuvieron un incremento del 10,2% entre los meses de enero a septiembre del año 2016 y para las viviendas No VIS (135 a 335 SMMLV) el incremento fue de 4,9%. En los primeros meses del año 2017, el incremento de las viviendas VIS fue de 20% respecto al año 2016.

De acuerdo a Camacol Seccional Valle, en el año 2017 se ofrecieron 12.411 unidades habitacionales en Cali, de las cuales en el primer trimestre se reportaron 13.793 unidades de vivienda vendidas, teniendo un crecimiento del 48% comparado con el mismo periodo del año anterior, teniendo ese año un nivel histórico entre los últimos 10 años.

Debido al crecimiento en la demanda de materiales naturales, y a las regulaciones ambientales en algunos lugares del territorio nacional se ha implementado el uso de algunos RCD como sustituto de materiales pétreos, como el caso de Martínez (2021), quien emplea residuos cerámicos en la elaboración de concretos en obra, minimizando el impacto ambiental y sanciones estipuladas por cada ciudad. Londoño (2016), realizó estudios que permiten dar viabilidad al uso de los residuos después de ser procesados para la utilización como materiales en la construcción y así alcanzar medidas para un desarrollo sostenible.

El término sostenible implica el uso eficiente de energía, agua, recursos y materiales no perjudiciales para el medio ambiente, dando un resultado más saludable, reduciendo los impactos ambientales, incentivando un cambio a la mentalidad en la industria y concientizando el reciclaje. Lo anterior conlleva a la conservación de los recursos naturales

y a maximizar la reutilización de los recursos, fomentando la utilización de procesos constructivos y energéticos basados en productos y energías renovables (Hernández Tascón, 2009).

En Colombia no hay suficientes alternativas para el tratamiento, aprovechamiento o disposición final de los RCD generados, debido a la falta de investigaciones, concientización, y planificación adecuada de los procesos que estos requieren, desconociendo el uso potencial en diferentes actividades constructivas, minimizando el impacto ambiental, y conservando recursos naturales (materias primas).

Esta investigación se estudió el aprovechamiento del residuo de construcción ladrillo, como sustituto parcial de agregado grueso, y polvo de ladrillo para la estabilización de suelos, en un proyecto de Santiago de Cali. Debido a que las constructoras no cuentan con altos potenciales de aprovechamiento en los materiales derivados de los RCD.

1.1 Identificación del problema

Para Salazar, Centeno, & Silva (2015), en la ciudad de Cali se producen aproximadamente 1 Mton/año; mientras que Bogotá presenta una generación promedio de 12 Mton/año, información registrada por los organismos de control como el Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA). Debido al manejo local, en ciudades vecinas como Candelaria y Puerto Tejada, se desconoce el impacto ambiental en términos de disposición de RCD, más allá de las evidencias en contaminación visual por los acopios ilegales y la proliferación de vectores por su mezcla con residuos sólidos urbanos.

Ante la evidencia de incremento en la generación de RCD, con la participación de diferentes organismos, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible & Instituto de Estudios Ambientales, (2017) identificó los seis problemas fundamentales de la gestión de residuos de construcción y demolición en el país, los cuales se listan a continuación:

1. Inicio de obras constructivas sin contar con planeación para la gestión integral de los RCD que genera;

2. No se realiza separación en la fuente de cada uno de los materiales potencialmente aprovechables que componen el RCD;
3. No hay suficientes alternativas para el tratamiento, aprovechamiento o disposición final para la totalidad de los RCD generados;
4. Poca demanda de materiales provenientes de procesos de tratamiento de RCD;
5. Ineficiencia en la logística de gestión de los RCD por parte de los generadores;
6. Falta de educación y sensibilización en la gestión adecuada de RCD.

Adicionalmente, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible & Instituto de Estudios Ambientales, (2017), menciona que el país no cuenta con estrategias de investigación, innovación y desarrollo - I+D para identificar alternativas de reúso y reciclaje de RCD, teniendo en cuenta que este tipo de residuos tiene altos potenciales de aprovechamiento y es uno de los que más se genera en el país; afirmación que refuerza la necesidad de investigación a nivel local de alternativas de aprovechamiento, de preferencia en obra.

En la actualidad, las constructoras en la Ciudad actúan sobre los problemas 1, 2 y 6; debido a esto, el presente trabajo se concentró en el problema 3, analizando alternativas de aprovechamiento en obra según el IDEA, cumpliendo con lo establecido en el Decreto Municipal 0771 de 2018 de Santiago de Cali, donde entre otros se genera la obligación de utilizar RCD aprovechable, donde se indica que para las empresas privadas se debe iniciar con un valor igual o superior al 5% del peso total de los materiales y para empresas públicas su valor correspondiente es igual o mayor del 10% y para los dos casos deberá incrementarse anualmente en un 2%.

1.2 **Objetivos**

A continuación, se describen los objetivos del trabajo de grado:

1.2.1 Objetivo general

- Estudiar dos alternativas de aprovechamiento de residuos de construcción y demolición, dentro de la obra en que se generan

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar las actividades potenciales para la incorporación de agregados reciclados, derivados de los residuos de construcción y demolición, como materia prima.
- Desarrollar dos pilotos de implementación en el laboratorio.
- Estudiar el escenario de reducción de impacto ambiental de la implementación de pilotos en obra.

1.3 Organización del documento escrito

En el primer capítulo se presenta la introducción e identificación del problema. Presentando los objetivos del presente trabajo para el aprovechamiento de RCD en obra con base en la resolución vigente para su cumplimiento.

En el capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica en la generación de residuos de construcción y demolición (RCD) a nivel mundial y nacional, normativas y clasificación para la gestión de RCD en el panorama nacional, y el aprovechamiento como material de construcción usado en base, sub-base, adoquines, morteros, concreto y suelo.

El capítulo 3 explica la metodología a implementar, teniendo en cuenta las actividades principales de una obra, definiendo el material de RCD a aprovechar, clasificándolo, procesándolo, y recolectándolo, para la incorporación en dos actividades específicas; y posteriormente la verificación de su aplicación cumpliendo con la normativa vigente.

En el capítulo 4 se define la aplicación en concreto, como lo indica una de las actividades de la metodología, realizando los ensayos de los materiales, las dosificaciones de reemplazos para la realización del concreto, y las propiedades en estado endurecido.

El capítulo 5 define la aplicación como material de relleno, la segunda actividad descrita en la metodología, se realizan ensayos de caracterización, ensayos mecánicos, y análisis de los resultados.

En el capítulo 6 se estima la reducción del impacto ambiental por la implementación de las alternativas en obra, mediante el cálculo de la huella de carbono.

Finalmente, en el capítulo 7 se presentan las conclusiones y recomendaciones, además de un análisis de los remplazos como material de agregado grueso en la realización de concreto, evaluando las propiedades mecánicas como resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico; de igual manera se evalúa la sustitución de polvo de ladrillo en el suelo como material de estabilización, verificado mediante la resistencia a la compresión simple.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La revisión bibliográfica se encuentra organizada en tres partes fundamentales: la primera se enfoca en la generación de residuos de construcción y demolición en obra; la segunda hace referencia a la normativa vigente de residuos; y finalmente, la tercera parte se concentra en las alternativas de aprovechamiento.

2.1 Generación de Residuos de construcción y demolición

Cuando es necesario caracterizar un residuo para su utilización se debe de considerar por un lado el tipo de residuos y por otra la disponibilidad del mismo para su implementación, es por esto que el presente numeral incluye la revisión de la generación de RCD para conseguir estimar la oferta del mismo dentro de dos posibles aplicaciones en obra.

2.1.1 Breve panorama mundial de la generación de RCD

En términos generales, la generación de RCD se puede relacionar con el crecimiento de la población mundial que trae a su vez un aumento de la actividad edificadora. A groso modo en la Tabla 1 se presenta un resumen de la población mundial. Se destacan por su tamaño Asia y particularmente China, que de acuerdo con Naciones Unidas (2014), en un futuro será superada por India.

Tabla 1. Población, aumento medio anual y tasa de crecimiento anual con referencia a 2014 (Naciones Unidas, 2014).

Región	Población en millones			Tasa media de crecimiento 2010-2015
	1994	2014	2050	
Todo el mundo	5.661	7.244	9.551	1,15
África	699	1.138	2.393	2,46
Asia	3.342	4.342	5.164	1,03
Europa	729	743	709	0,08
América latina y el Caribe	478	621	782	1,11
América del norte	294	358	446	0,83

Oceanía	29	39	57	1,42
China	1.192	1.364	1.402	--

De acuerdo con Villoria-Saez & Osmani (2019), indican que en el año 2014 las actividades de construcción y demolición generaron 1,13 Bton en China, más de 530 Mton en los Estados Unidos, y en la Unión Europea alrededor de 858 Mton. Cruzando la información anterior con la Tabla 1 se obtiene la dependencia entre ambas variables mostrada en la Figura 1. En la misma es clara la relación mencionada en el numeral 2.1.

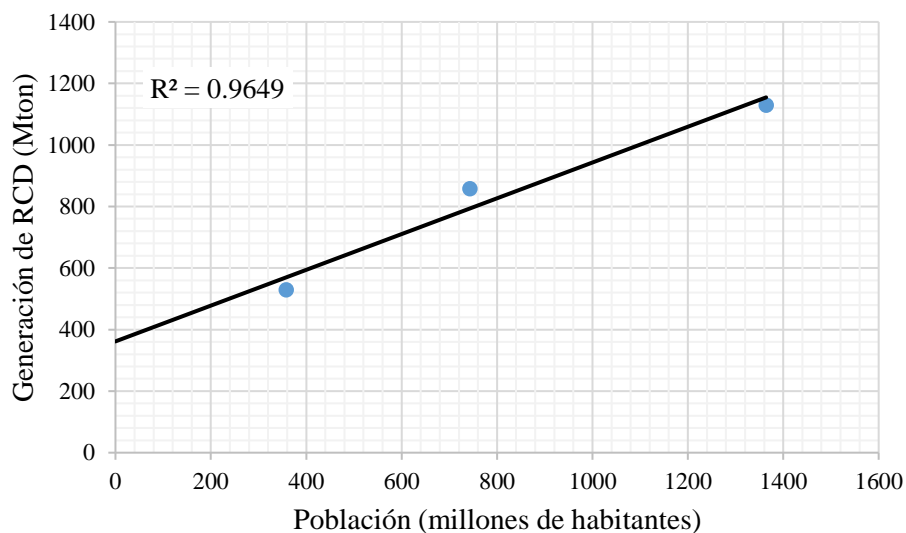


Figura 1. Relación entre la población de Estados Unidos, Europa y China y la generación de RCD.

2.1.2 Generación en Europa

De acuerdo con Villoria-Saez & Osmani (2019) la tasa de generación para el sector de la construcción es el más alto comparado con otros sectores, representando un 35% de la generación total de los residuos; lo que conduce a una crisis ambiental impulsada por los recursos de materiales derrochados y el ritmo acelerado de la construcción; que genera 858Mton, de los cuales 522 Mton corresponden a residuos de excavaciones de suelo, y el

restante generado (336 Mton) a desechos de minerales de construcción y demolición (RCD) los cuales son: desechos de concreto, ladrillos, yeso, vidrio, plástico, madera y residuos hidrocarbonados para pavimentación como se muestra en la Figura 2.

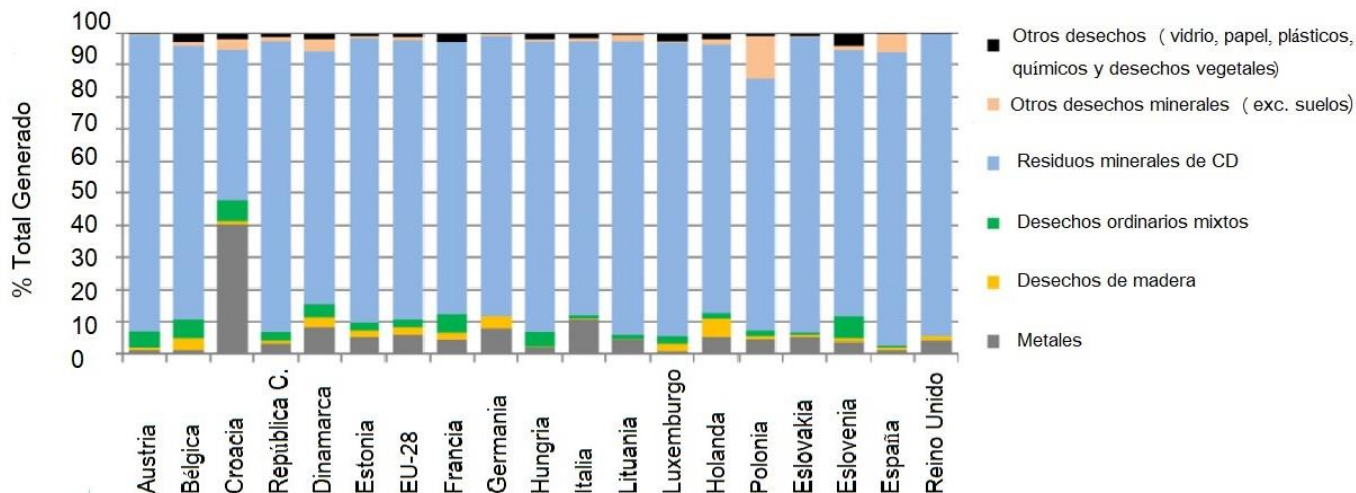


Figura 2. Porcentaje de Residuo generado en el año 2014. Fuente: (Villoria-Saez & Osmani, 2019).

De forma similar a lo mostrado en la Figura 1, Villoria-Saez & Osmani (2019), concluyen que los países más grandes en términos de población generan mayor cantidad de RCD, razón por la cual encontraron que no solo se debe considerar la cantidad de residuo generado como único parámetro para la cuantificación de la tasa de generación de residuos, sino que debe tenerse en cuenta el producto interno bruto, per cápita, y ventas por construcción, debido a que influyen en la generación de residuos para cada país. De manera que, para alcanzar el objetivo específico en la reutilización, reciclaje, y recuperación de los materiales, se deben regular las normativas para recuperar el 70% de los residuos para el año 2020.

Eurostat (2016), indican que la gestión de los RCD a nivel mundial alcanza tasas muy altas, en la Unión Europea en países como Malta, Holanda y Luxemburgo alcanzan hasta el 100%, Islandia y Hungría con un 99%, letonia, Italia y Eslovenia con un 98%, Portugal, Lituania y estonia con un 97 %, Reino Unido e Irlanda con un 96%, como se muestra en la Figura 3.

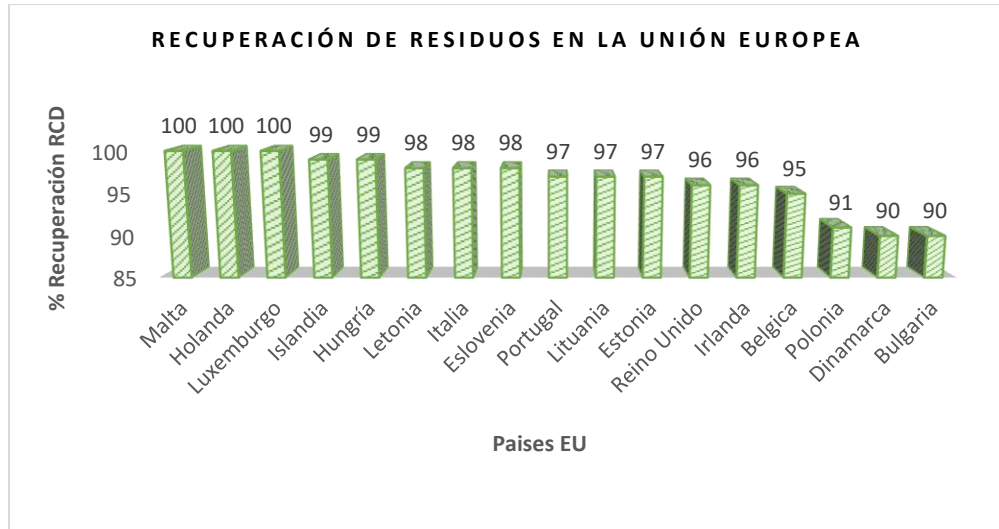
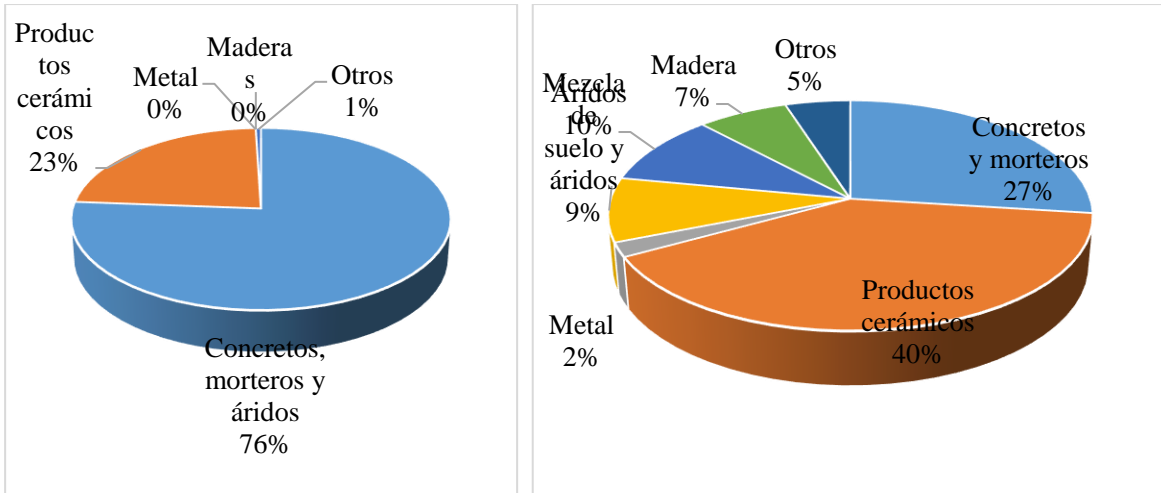


Figura 3. Recuperación de residuos en países de la Unión Europea en 2016. Fuente: (Eurostat, 2016).

Ortiz, Pasqualino, & Castelles (2010) encontraron que la cantidad de residuos de construcción y demolición de edificios está generando uno de los mayores problemas en Europa, se calcula que cada año se producen más de 300 Mton. Para el año 2006, España tuvo una producción de RCD de 1 ton/habitante por año, considerando que para alcanzar un desarrollo sostenible se debe conceptualizar los impactos ambientales ocasionados durante los procesos constructivos, por lo que estimó que la fase de ocupación de una edificación o vivienda representa aproximadamente un 80 a 90% del consumo energético, 10 a 20% durante la fase de extracción y fabricación de los materiales y un 1% en el tratamiento de residuos y disposición final. Las categorías de impacto analizadas son: cambio climático, agotamiento de recursos abióticos, acidificación y eutrofización.

2.1.3 Generación en América Latina y el Caribe

En Brasil, debido a la falta de control público las autoridades locales argumentan no conocer la generación de RCD, sin embargo, Carneiro et al. (2001), mencionan que la generación oscila en torno de 68 Mton al año. Con relación a la composición de los RCD, presenta bastante variación, en la Figura 4 se presentan algunos resultados recopilados por Marques Neto (2003).



Ribeirao Preto (Zordan, 1997)

Sao Carlos (Marques-Neto, 2003)

Figura 4. Ejemplos de la composición del RCD en Brasil (Marques Neto, 2003).

Con relación a la generación en función del área construida, Bueno et al. (2013), estudiaron la construcción de una vivienda típica de la ciudad, un edificio de 4 pisos de 1900 m² ubicada en el municipio de Candelaria Brasil. Con base en la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** Bueno et al. (2013), encontraron que los residuos generados en la fase de construcción tienen un alto potencial para su reutilización, además, los materiales cerámicos presentaban un peso del 86% de la generación semanal de toda la obra, en la Figura 5 se presenta la clasificación obtenida para los residuos generados.

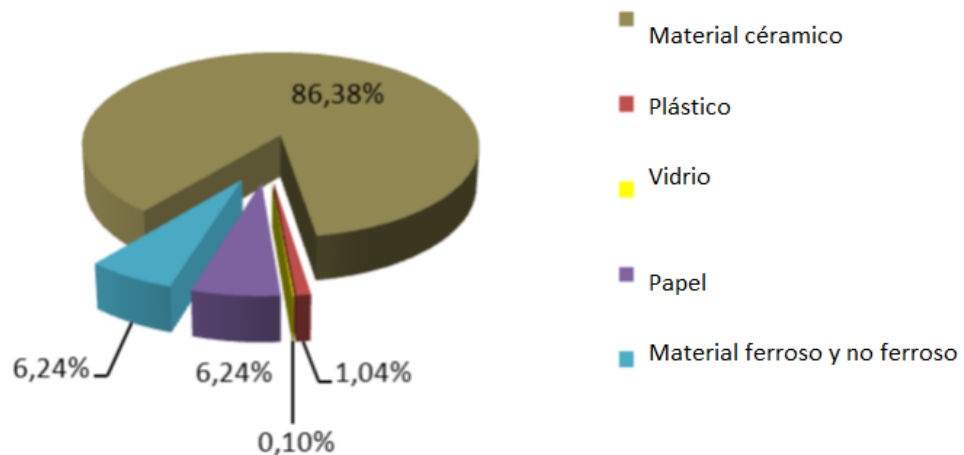


Figura 5. Clasificación de los RCD encontrada por (Bueno et al., 2013).

Tabla 2. Clasificación de residuos según (Conama, 2002). Fuente: (Bueno et al., 2013).

Clasificación	Clase
Residuos reutilizables o reciclables como agregados:	
a. Construcción, demolición, remodelación y reparación de pavimentos, suelo de movimientos de tierra.	
b. Construcción, demolición, remodelación y reparación de edificios: componentes cerámicos, mortero y hormigón.	Clase A
c. Proceso de fabricación y / o demolición de elementos prefabricados de hormigón	
Residuos reciclables a otros destinos como: plásticos, papel / cartón, metales, vidrio, madera y otros.	Clase B
Residuos para los que no se han desarrollado las tecnologías como productos del yeso	Clase C
desechos peligrosos derivados del proceso de construcción, tales como pinturas, disolventes, aceites y otros contaminados o los procedentes de demoliciones, remodelaciones y reparaciones de las clínicas de radiología, instalaciones industriales y otros.	Clase D

Bueno et al.(2013), encontraron que durante la etapa constructiva se genera un total de residuo de 480.8 kg/semana y su tasa de generación de residuo fue de 2.02 kg/m² estando por debajo del valor de referencia que por lo general en las obras de Brasil es de 150 kg/m², donde se concluye que esta diferencia se considera solo para la etapa inicial como cimentaciones, teniendo como objetivo encontrar alternativas a la eliminación de los residuos generados como por ejemplo indican que los residuos cerámicos pueden ser molidos y clasificados de acuerdo con su tamaño de partícula y se utilizan como agregado en la composición del concreto mezclando agregados naturales y reciclados siendo una posible solución para reducir la extracción de agregados naturales y así contribuir con el medio ambiente. Estas investigaciones muestran el potencial de aprovechamiento que se tiene, debido a la generación de residuos que pueden ser aprovechables.

De acuerdo con UICN (2011), en Costa Rica, país con unos 4,77 millones de habitantes para 2014, se generan del orden de 1.794 ton/día de RCD, lo que corresponde aproximadamente al 45% de todos los residuos sólidos generados, estos RCD no son separados en el origen adecuadamente y por lo general su destino son los botaderos ilegales o lotes baldíos en los alrededores de las obras en construcción. En la Figura 6 se presenta la composición típica de los RCD en Costa Rica. En general el material predominante corresponde a residuos de excavación con el 40%, residuos de concretos, morteros y productos de cemento con el 30%, y residuos de ladrillos cerámicos el 25%, entre otros.

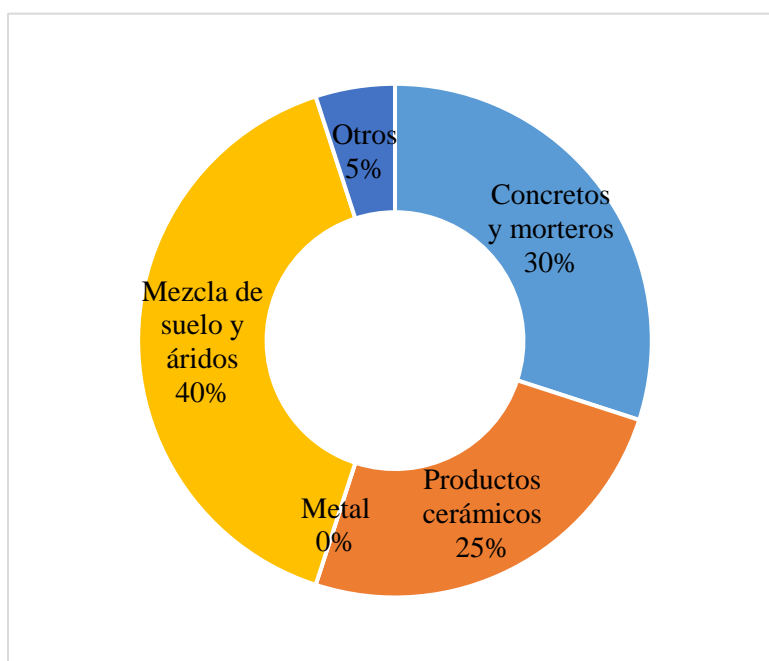


Figura 6. Composición típica de los RCD en Costa Rica (Modificado de UICN, 2011).

Según el Grupo de Residuos Sólidos (2012), de la Universidad Católica de Valparaíso, en Chile para 2016 se generaron 7'500.000 ton de RCD, lo que representa del orden del 5% de los residuos sólidos totales, para un país con 18 millones de habitantes. En la Figura 7 se muestra la composición de los RCD, donde predominan los áridos y los residuos de cemento.

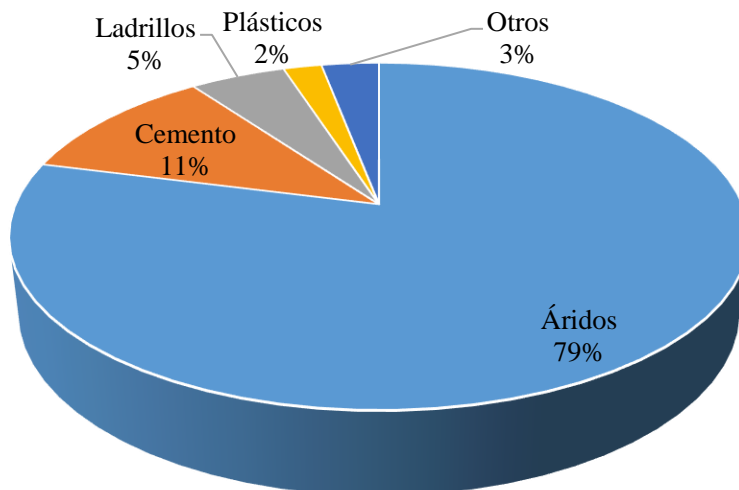


Figura 7. Composición de los RCD en Chile (Grupo de Residuos Sólidos, 2012).

2.1.4 Generación a nivel nacional

En Colombia se producen aproximadamente 22 millones de toneladas de residuos de construcción al año en Colombia, cifra que es equivalente al 40% del total de residuos sólidos del país (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Instituto de Estudios Ambientales, 2017). Para la ciudad de Santiago de Cali se producen cerca de 2.500 m³ diarios (912.500 m³ anuales), de este volumen se estima que un 76,6% es aportado por las constructoras y obras de infraestructura, conocida como generación formal y 23,4% es aportado por construcciones y remodelaciones regulares, conocido como sector informal (Robayo Salazar, Matthey Centeno, Silva Urrego, Burgos Galindo, & Delvasto Arjona, 2015).

Con las proyecciones de vivienda, y a partir de los reportes de licencias de nuevas construcciones y remodelaciones de Cali en cifras (Departamento Administrativo de Planeación, 2020), Bolaños Zambrano & Coqueco Duque (2021) estimaron la generación de RCD en la ciudad de Santiago de Cali (ver Figura 8), esta proyección generada con datos locales de índices de oferta de RCD oscila alrededor de la proyección efectuada por el DAGMA, muestra que la generación de RCD está cercana a los 482.000 m³ anuales, cifra inferior a la de 912.500 m³ anuales suministrada por Robayo Salazar et al. (2015). En la misma es importante tener en cuenta que ella no incluye reformas y demoliciones ilegales,

es decir, que no tienen licencia de construcción, pero otorga un panorama realista en función de la construcción actual.

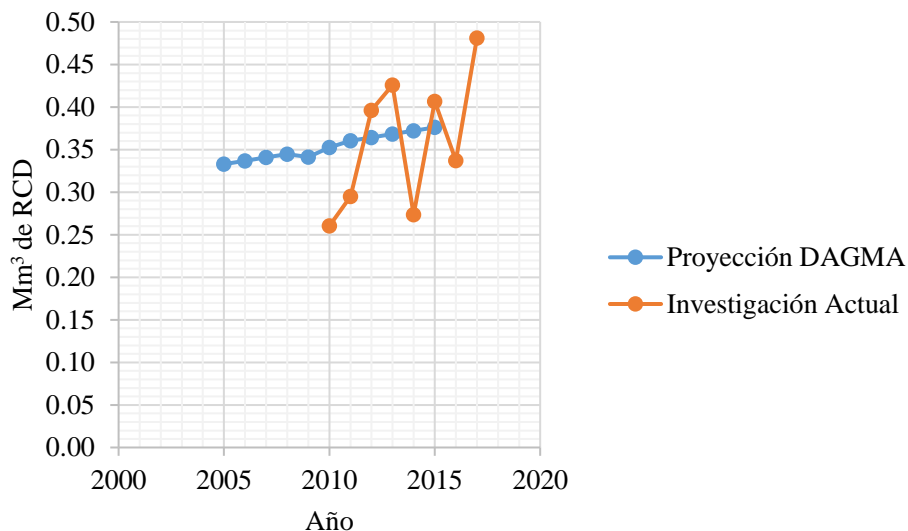


Figura 8. Proyección de la generación de RCD en Santiago de Cali Bolaños Zambrano & Coqueco Duque (2021).

Mahecha & Calderón, (2018), al analizar los RCD de la ciudad de Ibagué diagnosticaron el estado actual de la gestión, utilizando las técnicas y procedimientos de recopilación, selección, estudio y análisis. La información fue recopilada con entidades gubernamentales y privadas de la industria de la construcción; las cuales indican que en su mayoría los residuos generados están constituidos por actividades de excavación en un 80%, seguidos por concreto en un 10% y cerámico en un 4% y en menor dimensión metales, plástico y yeso en un 2%.

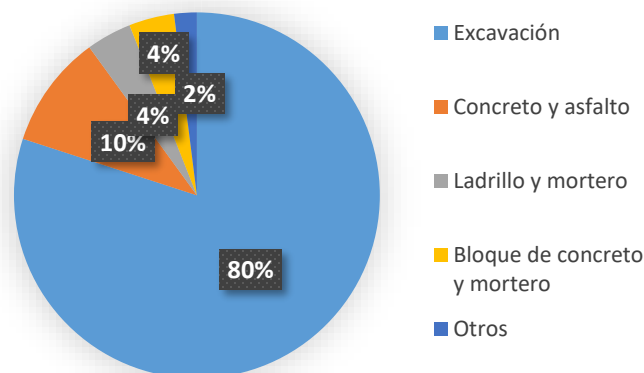


Figura 9. Composición del RCD en la ciudad de Ibagué. Fuente: (Mahecha & Calderón, 2018)

Armijos (2019), midió la generación de RCD en cuatro obras de proyectos de vivienda en la ciudad de Santiago de Cali. Dicha medición se realizó a partir de indicadores que permitieron medir las relaciones entre las actividades de obra ejecutadas y la cantidad de residuos de construcción y demolición, influenciados por el entorno como sistemas constructivos, propiedades de los materiales y gestión de residuos. Los resultados de los indicadores medidos incluyeron el aprovechamiento de los residuos en volumen y en masa así:

- Índice de generación Volumétrico (IGR^V): utilizado para obtener cifras generadoras de residuos, que permitan reflejar las condiciones directas de las variables analizadas y medibles en obra.

$$IGR^V = \frac{\text{Volumen de RCD generado (m}^3\text{)}}{\text{Área construida (m}^2\text{)}}$$

Indicador de aprovechamiento volumétrico por superficie m^3/m^2 en los RCD para las etapas de estructura y acabados, oscilaron entre un 0.22 hasta $0.065 m^3/m^2$ teniendo en la etapa de estructura la mayor generadora de residuos;

- Índice de generación Gravimétrico (IGR^W): se relaciona entre el peso de RCD generado en obra y el área construida

$$IGR^W = \frac{\text{Peso de RCD generado (kg)}}{\text{Área construida (m}^2\text{)}}$$

Indicador de aprovechamiento gravimétrico de residuo por superficie kg/m^2 , se obtuvo un resultado variable entre 14 y 30 kg/m^2 obtenidos mayormente en las etapas de estructura y acabados;

- Indicador de aprovechamiento gravimétrico ton/ton, está representado hasta un 2.4% del peso de la edificación, pudiendo ser utilizado en las actividades de excavaciones y movimientos de tierras.

De otro lado, Marin (2019), empleó los indicadores propuestos por Armijos (2019) para estudiar la producción de residuos en un proyecto institucional en la ciudad de Belén de los Andaquies en Caquetá, en un período igual a un año. Los resultados mostraron que: la generación total de residuo en términos de volumen por superficie fue de $0.41 \text{ m}^3/\text{m}^2$ y de 317 kg/m^2 en términos de masa por superficie, presentando el mayor volumen de desperdicio en los ladrillos de arcilla y un 11% del peso total en material aprovechable, equivalente a un 64% de todos los residuos generados. El estudio también propuso el índice de generación volumétrico (IGR^V) el cual permitió medir el volumen de residuo por clases (material vegetal, material de excavación, papel, plástico, metal, madera, bloque de concreto, ladrillo de arcilla, residuos de mortero y cerámica, baldosín en granito y residuos mezclados) y el índice de generación gravimétrico (IGR^W). El índice de generación gravimétrico permitió identificar que en la etapa de material de excavación se genera la mayor cantidad de residuos llegando a 181.4 kg/m^2 .

2.2 Normativa para la gestión de los residuos de construcción y demolición RCD

En Colombia dentro de las políticas públicas se ha pretendido reducir el impacto ambiental que genera la industria de la construcción, dentro de ellas diferentes organismos gubernamentales han emitido las normativas que se listan a continuación:

- El decreto 2811 de 1974 se dicta el Código Nacional De Recursos Renovables y De Protección Del Medio Ambiente, el cual busca reglamentar el uso conservación, preservación, explotación de aguas y servidumbres.

- Constitución Política de Colombia 1991: indica que las personas deben cumplir con la constitución y las leyes las cuales son deberes del ciudadano proteger los recursos naturales del país y velar por la conservación de un ambiente sano como también el estado proteger la diversidad e integridad del ambiente fomentando la educación para lograr este fin.
- Ley 99 de 1993: se crea el ministerio del medio ambiente y se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables. Se indica que el patrimonio nacional deberá ser protegida prioritariamente y aprovechada en forma sostenible como también informa que las instituciones ambientales se estructurarán con criterios de manejo integral del medio ambiente y la interrelación con los procesos de planificación, económica, social y física.
- El decreto 1600 de 1994: se reglamenta parcialmente el sistema nacional ambiental en relación con los sistemas nacionales de investigación ambiental y de información ambiental, los cuales comprenden los datos, estadísticas, información, modelos y manejo de la información.
- Resolución 541 de 1994: se regula el cargue, descargue, transporte, almacenamiento y disposición final de escombros, materiales, elementos, concretos y agregados sueltos, de construcción, de demolición y capa orgánica, suelo y subsuelo de excavación. Estableciéndose la disposición final, escombreras, manejo ambiental de escombreras, sanciones, tarifas y vigencias.
- Decreto 357 de 1997: se regula el manejo, transporte y disposición final de escombros y materiales de construcción. Constituye formas de conducta, sanciones, lugares de disposición y medidas en caso de incumplimiento.
- Decreto 1713 de 2002: hace relación a la gestión integral de residuos sólidos. Adoptándose las definiciones y disposiciones generales. La responsabilidad

de los productores de escombros la recolección, transporte y disposición final en escombreras autorizadas.

- Acuerdo 79 de 2003: dictamina normas y lineamientos para el manejo del transporte y disposición de escombros.
- Decreto 312 de 2006: Se adopta plan maestro para el manejo de residuos sólidos en Bogotá, teniendo como objetivo la gestión, manejo ambiental y sanitario el cual busca aprovechar en un 25% los residuos provenientes de escombros.
- Decreto 620 de 2007: es un complemento del plan maestro de residuos sólidos, donde se informa que podrán constituirse como escombrera si la recepción de los escombros constituye un medio para la recuperación ecológica, pudiendo establecer plantas de trituración y reciclaje de los materiales.
- Resolución 2397 de 2011: Se regula técnicamente el tratamiento y/o aprovechamiento de escombros en el distrito capital
- Resolución 1115 de 2012: se adoptan lineamientos técnico-ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en Bogotá. Estableciendo interpretaciones, aplicaciones, procedimientos, disposición final medidas preventivas y sancionatorias para el cumplimiento de la misma.
- Decreto 586 de 2015: Adopta el modelo eficiente y sostenible de gestión de los residuos de construcción y demolición en Bogotá. Proponiendo la recuperación y reincorporación mediante la participación de los agentes del ciclo.
- Resolución 0472 de 2017: Se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición RCD y se dictan otras disposiciones. Teniendo en cuenta que es aplicable para personas

naturales y jurídicas que generen, recolecten, transporten, almacenen, aprovechen y dispongan de los RCD.

- Decreto 0771 de 2018 Para la ciudad de Santiago de Cali, indica que los grandes generadores de RCD son los que tengan un área construida igual o superior a 2.000 m² y deben de utilizar para su aprovechamiento un porcentaje no inferior al 5% en el peso del total de los materiales usados en obra y en sus años siguientes se incrementarán dos puntos porcentuales cada año hasta alcanzar como mínimo un 30%. Para el gran generador de RCD en obras públicas su aprovechamiento no deberá ser inferior al 10% en peso total de los materiales usados en obra y en sus años posteriores se incrementará dos puntos anualmente hasta alcanzar un mínimo del 30% de RCD aprovechables en peso del total de los materiales usados en obra.
- Miniambiente (2020) informa que en Colombia se produce más de 22 Mton de residuos de construcción y demolición que son en promedio el 40% de los residuos. Por esto el Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible expidió la resolución 0472 de 2017 que tiene como objeto disminuir la demanda de materias primas como también el aprovechamiento y disposición final de los RCD, permitiéndonos incorporar los residuos aprovechables en las obras ejecutadas por los grandes generadores, que van desde el 2% hasta alcanzar un mínimo del 30% del peso total de los materiales usados en la obra definidas en la Tabla 3.

Tabla 3. Listado de proyección de RCD a generar. Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

1. Residuos de construcción y demolición RCD - Susceptibles de aprovechamiento

1.1 Productos de excavación y sobrantes de la adecuación del terreno: coberturas vegetales, tierra, limos y materiales pétreos productos de la excavación, entre otros.

1.2 Productos de cimentaciones y pilotajes: arcillas, bentonitas y demás

1.3 Pétreos: hormigón, arenas, gravas, gravillas, cantos, pétreos asfálticos, trozos de ladrillo y bloques, cerámicas, sobrantes de mezcla de cementos y concretos hidráulicos, entre otros.

1.4 No pétreos: vidrio, metales como acero, hierro, cobre, aluminio, con o sin recubrimiento de zinc o estaño, plásticos tales como PVC, polietileno, policarbonato, acrílico, espuma de poliestileno y de poliuretano, gomas y cauchos, compuestos de madera o cartón-yeso (drywall), entre otros.

2. Residuos de construcción y demolición RCD - No susceptibles de aprovechamiento

2.1 Los contaminados con residuos peligrosos

2.2 Los que por su estado no pueden ser aprovechados

2.3 Los que tengan características de peligrosidad, estos se registrarán por la normatividad ambiental especial establecida para su gestión.

La Alcaldía de Bogotá presenta dentro del plan de gestión de los residuos de construcción y demolición la clasificación de los mismos las cuales se dividen en aprovechables y no aprovechables tal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Listado de proyección de RCD a generar. Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Categoría	Grupo	Clase	Componentes
A – RCD Aprovechables	I - Residuos mezclados	1- Residuos pétreos	Concretos, cerámicos, ladrillos, arenas, gravas, cantos, bloques, o fragmentos de roca, baldosín, mortero y materiales inertes que sobrepasen el tamiz #200.
		II - Residuos de material fino	1 – Residuos finos no expansivos
	III – Otros residuos	1 – Residuos no pétreos	Plásticos, PVC, maderas, cartones, papel, siliconas, vidrios y cauchos.
		2 – Residuos de carácter metálico	Acero, hierro, cobre, aluminio, estaño y zinc.
		3 – Residuos orgánicos	Residuos de tierra negra
		4 – Residuos orgánicos (cespedones)	Residuos vegetales y otras especies básicas.
B – RCD no aprovechables	IV – Residuos peligrosos	Residuos corrosivos, reactivos, radioactivos,	Desechos de productos químicos, emulsiones, alquitrán, pinturas, disolventes, orgánicos, aceites, resinas, plastificantes, tintas, betunes, bamices,

Categoría	Grupo	Clase	Componentes
		explosivos tóxicos, patógenos (biológicos)	tejas de asbesto, escorias, plomo, cenizas volantes, luminarias, desechos explosivos, y los residuos o desechos incluidos en el Anexo I y II o que presenten características de peligrosidad descritas en el Anexo III del Decreto 4741 de 2005.
	V	No definida	Poliestireno expandido, cartón-yeso (drywall) entre otros.
	VI – Residuos contaminados con otros residuos	1 – Residuos contaminados con residuos peligrosos	Materiales pertenecientes los grupos anteriores que se encuentren contaminados con residuos peligrosos. Estos deben ser dispuestos como peligrosos.
		No definida	Residuos contaminados con otros residuos que hayan perdido las características propias para su aprovechamiento.
	VII – Otros residuos	No definida	Residuos que por requisitos técnicos no es permitido su empleo en la obra.

2.3 Aprovechamiento de residuos de construcción y demolición (RCD) como material de construcción.

A partir de la Resolución 072 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), se formula una de las mayores preguntas acerca del potencial de aprovechamiento de los RCD como materiales de obra, en este apartado se revisan algunas aplicaciones para intentar dar respuesta a las mismas.

2.3.1 Aprovechamiento de RCD en Concretos y Morteros:

Soutsos, Tang & Millard (2011a), investigan la fabricación de bloques de concreto con una sustitución parcial del agregado natural por agregado reciclado de concreto (fuente: cimentación de un edificio) y agregado derivado de mampostería (fuente: casas) encontrando que la densidad es un parámetro crítico para lograr la resistencia a la compresión. Donde se evidenció que la trituración del agregado de concreto reciclado resulto ser más fino que la piedra natural; dado que las características físicas de los agregados reciclados de demolición

pueden afectar las propiedades mecánicas, se determinó que el nivel de remplazo de los agregados naturales con agregados de demolición es del 60% para la fracción gruesa y 20% para la fracción fina. Los niveles máximos de reemplazo para agregado derivado de mampostería son del 20% para la fracción gruesa y fina. Debido a que la mampostería tiene un mayor efecto perjudicial sobre la resistencia se recomendó que el nivel de mampostería permitido en agregado reciclado de concreto debe limitarse al 10%.

Soutsos, Tang & Millard (2011b), estudiaron la utilización de los RCD entre el 85 y 90% como agregado en los prefabricados de concreto, involucrando dos pruebas, una con adición del agregado reciclado de concreto (ARC) y otra con agregado derivado de mampostería (RMA). En donde remplazaron hasta un 60% los agregados gruesos y finos con ARC, y para los RMA hasta un 40%.

Wagih, El-Karmoty, Ebid, & Okba, (2013) Estudiaron la posibilidad de reemplazar el agregado grueso natural (NA) por agregado reciclado de concreto (ARC), encontrando que una sustitución de hasta el 100% de agregado natural por ARC y 400 kg/m³ de contenido de cemento no cambia en la resistencia, siendo adecuada para la mayoría de las aplicaciones en concreto estructural, aunque la trabajabilidad es menor y la resistencia presentó una disminución se usaron aditivos para solucionarlo mejorando el concreto estructural. Como también se estudió remplazos del 25 a 50% logrando una resistencia óptima y con un remplazo del 25% no se presentó un efecto significativo en el desempeño del concreto estructural y cuando se aumentó el remplazo en un 50% se redujo la resistencia a la compresión entre un 7 y 13%.

Rodríguez et al. (2016) estudiaron la posibilidad de utilizar residuos de construcción y demolición (agregado mixto reciclado) para producir concreto en elementos prefabricados (concreto, bordillos, adoquines, tejas), para verificar su afectación utilizaron diferentes sustituciones en porcentajes del 25, 50, 75 y 100% del volumen del agregado probando su influencia en términos de resistencia, flexión, absorción, densidad y resistencia al deslizamiento. Se evidencia que en las sustituciones con baldosa la resistencia a los 90 días se redujo entre el 14 al 36% y una composición del 75% con concreto, 15% ladrillo y 10% tierra se obtuvo pérdidas en la resistencia de aproximadamente un 23%.

Sharkawi, Almofty, & Abbass (2016), exploraron la posibilidad de reemplazar el agregado grueso natural por concreto reciclado y agregado de residuos de demolición en concretos de uso general (baja resistencia), utilizando dentro de las muestras diferentes tipos de RCD como ladrillo, concreto, entre otros. Realizaron 7 diseños con contenido constante de cemento de 300 kg/m^3 , donde las curvas de clasificación cerca al diseño base con dolomita todas se encuentran dentro del límite del agregado, el resultado de gravedad específica presentó un resultado de 77% frente al 88% con agregado natural, la densidad del RCD estuvo en el rango del 73% frente al 86% y la absorción del RCD presentó un rango mayor en un 6% a 20% y en los resultados de compresión y tracción indirecta, flexión y adherencia se redujeron en un 37%, 16%, 26% y 64% con el uso del RCD frente al agregado natural. concluyendo que algunas propiedades del agregado de RCD era inferiores a los requeridos, y que se pueden utilizar como agregados para pavimentos y sardineles teniendo como resultado resistencias de 17 MPa.

2.3.2 Usos de residuos de ladrillo

Lum, Hung, Poh, & Alengaram (2018), indican que el ladrillo es el segundo material más usado después del concreto. Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos muestra que alrededor de 44 Mton de desperdicio de ladrillos se generan en actividades de construcción y demolición entre el 2012 y 2014. Debido a esto investigaron la utilización del ladrillo reciclado como material para reducir la cantidad de agregado natural (fino y grueso) y/o sustitución parcial del cemento evaluando las resistencias mecánicas y de durabilidad. Teniendo como resultado que el uso más favorable es como polvo de ladrillo hasta en un 20% de remplazo de cemento pudiendo mejorar resistencia y durabilidad en el concreto debido a la reactividad puzolánica de las partículas del polvo de ladrillo. Y para la sustitución como agregado a un nivel máximo del 20% sin tener diferencias en la resistencia a la compresión, puesto que el ladrillo como sustituto del agregado natural podría reducir la durabilidad del concreto atribuyéndosele a la porosidad que presenta el ladrillo reciclado.

O'Farrell, Sabir, & Wild (2001) emplearon cuatro tipos de polvo de ladrillo provenientes de diferentes lugares, utilizados para reemplazar parcialmente el cemento en

proporciones del 10 hasta el 30% en morteros. Los resultados arrojaron que la resistencia a la compresión del mortero aumentó aproximadamente el 10% a los 90 días cuando el porcentaje de polvo de ladrillo empleado fue del 10%. De otro lado cuando la inclusión de polvo de ladrillo en la mezcla varió al 30%, la resistencia a compresión del mortero aumento aproximadamente un 15%.

Mena & Valdés (2014), estudiaron del reemplazo de agregados naturales por agregados reciclados derivados de RCD en la elaboración de concretos convencionales. Trabajaron tres reemplazos en el laboratorio del 25, 50 y 100% en peso. En general, al estudiar una posible aplicación en pavimentos rígidos con volúmenes bajos de tránsito, ninguna de las sustituciones cumplió desde el punto de vista estadístico, el módulo promedio de rotura en la muestra con agregados naturales fue de 36.6 MPa, reduciéndose a 29.7 y 28.7 MPa con los reemplazos de 25 y 50% respectivamente.

Ge, Wang, Sun, Wu, & Guan (2015), estudiaron la influencia de reemplazar parcialmente el cemento por ladrillo de arcilla molido en las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto. Efectuaron reemplazos de 10, 20 y 30%. En general, la adición redujo la resistencia a la compresión (ver Figura 10), pero trae consigo un mejoramiento de la durabilidad.

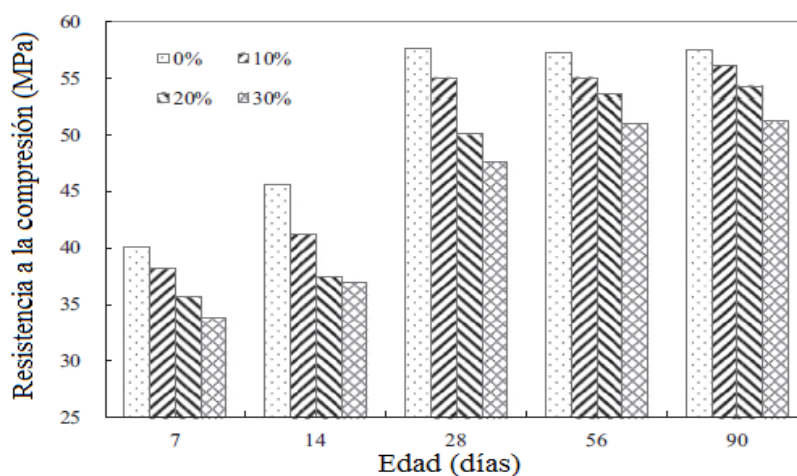


Figura 10. Efecto del reemplazo por polvo de ladrillo en la resistencia a la compresión del concreto (Ge et al., 2015).

Navrátilová & Rovnaníková (2016) estudiaron el comportamiento mecánico de morteros a base de cal con una inclusión del 50% de polvo de ladrillo. Los resultados mostraron un comportamiento satisfactorio a flexión y a compresión para todas las edades analizadas tal y como lo presenta la Figura 11.

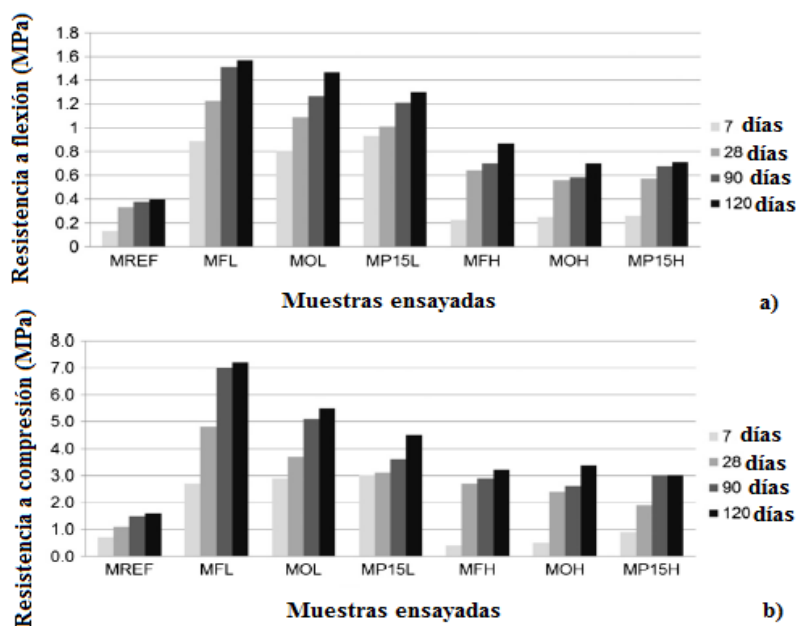


Figura 11. Resistencia a flexión y a compresión de morteros a 7, 28, y 120 días de curado Navratilova & Rovnanikova (2016).

Liu, Dai, Cao & Gao (2017), emplearon polvo de ladrillo con superficies específicas de 460 y 632 m²/kg, en la fabricación de morteros variando la inclusión entre el 15 y el 45%. La resistencia a la compresión redujo (hasta aproximadamente el 31%) cuando el reemplazo fue de 45%. Sin embargo, se comprobó que en la pasta de cemento en la que se incluyó el 45% de polvo de ladrillo con mayor superficie específica, la resistencia a la compresión a los 28 días era 20% mayor que en las mezclas donde se empleó el polvo de ladrillo con menor superficie.

Jiménez et al. (2019), estudiaron como alternativa el aprovechamiento de los RCD en la fabricación de ladrillos prensados, obtuvieron resistencias a la compresión de 17.9 MPa y absorción de agua máxima de 9.79 % a los 28 días de curado, de acuerdo con los autores es

posible concluir que es factible utilizar los RCD como agregado para la producción de ladrillos cumpliendo con la normatividad colombiana vigente, ya que de acuerdo con la NTC-4026 la resistencia a la compresión a los 28 días debe ser como mínimo de 13MPa y una absorción no mayor del 17%. Según los autores consultados, los resultados varían ampliamente y los mismos dependen de los porcentajes de polvo de ladrillo incluidos en las mezclas. Lo que indica, además, que la cantidad de residuos de cerámicos debe controlarse minuciosamente a fin de evitar caídas súbitas en el comportamiento mecánico de los morteros.

Shubbar, Sadique, Kot, & Atherton (2019), indicaron que una de las técnicas más antiguas es la mezcla y estabilización de arcilla con otros materiales cementantes y de desechos presentando beneficios en la reducción de los mismos protegiendo el medio ambiente y ahorro de energía, como también manifiestan que el uso de productos a base arcilla mezclados y estabilizados como técnicas de activación alcalina llamada geopolimerización es atrayente ya que puede proporcionar resistencia estructural en muy poco tiempo siendo suficientemente duraderos y a su vez reduce las emisiones de CO₂.

Diosa (2020), investiga el efecto de remplazo parcial del agregado grueso natural por agregado reciclado de concreto, en las propiedades mecánicas del concreto de alta resistencia. El autor analiza la sustitución del 0, 10, 20 y 40% de agregados naturales por agregados reciclados provenientes de concretos confeccionados en el laboratorio. De acuerdo con los resultados la sustitución de agregados naturales por agregados reciclados de concreto de alta resistencia mejora el desempeño de los concretos.

Martinez (2021), realizó un estudio de caso sobre una alternativa de aprovechamiento de residuos cerámicos de construcción como agregado para la elaboración de concreto no estructural, donde en su metodología realizó el análisis del proyecto, la evaluación de la generación de RCD, la fabricación del agregado reciclado y posteriormente la elaboración de concreto en obra con incorporaciones de agregados reciclados en volumen del 10, 20 y 33%. Adicionalmente, realizó una sustitución del 20% en laboratorio. El autor concluye que la resistencia aumentó cuando se adicionó más contenido de agregados reciclados (ver

Figura 12), obteniendo el mejor resultado tanto en obra como en laboratorio la incorporación del 20% en volumen.

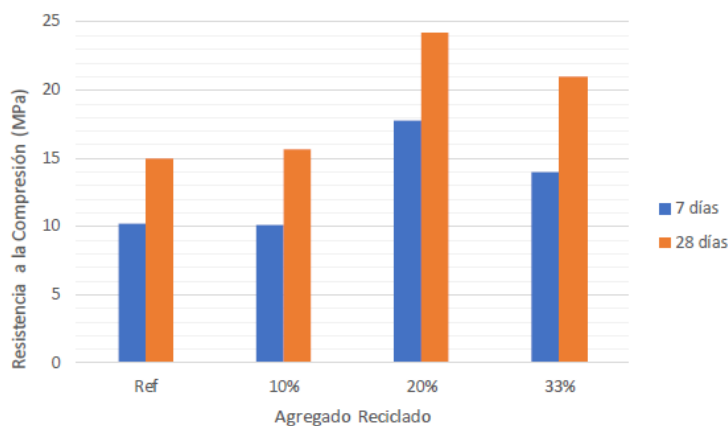
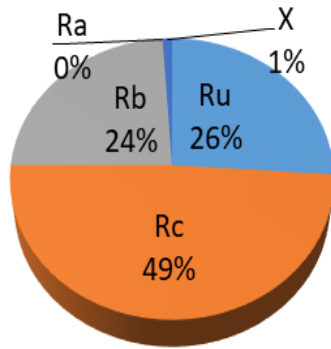


Figura 12. Resistencia a la compresión del concreto elaborado en obra curado en inmersión. Fuente: Martínez (2021)

2.3.3 Uso como material para pavimentos, bases y subbases

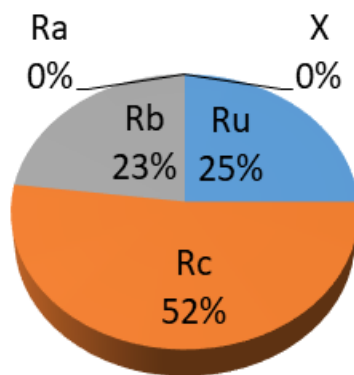
Olmedo & Barrera (2015), estudiaron el comportamiento de una base granular derivada de RCD en el laboratorio. En su programa experimental analizaron el efecto de la adición de cemento en el material granular, encontrando que el módulo resiliente crece con la adición de cemento con la edad presentando valores superiores a los agregados no ligados disponible en la ciudad de Cali. En la Figura 13 se muestra la composición del agregado reciclado estudiado en la misma es evidente que el material predominante en la fracción gruesa corresponde a concretos, productos de concreto, morteros y bloques de concreto (Rc, según la normativa española).



Rc: Concretos, productos de concreto, morteros y bloques de concreto
 Ru: Agregados no ligados
 Rb: Cerámicos
 Ra: Materiales bituminosos
 Rg: Vidrio
 X: Otros (Arcillas-limos, hierro, plástico, maderas no flotantes, cauchos, yeso y estuco)

Figura 13. Composición de la muestra de RCD (Olmedo & Barrera 2015)

Embus & Quintero (2015), investigaron RCD provenientes de la ciudad de Santiago de Cali para su reutilización como material de base o subbase granular en una de las capas de la estructura del pavimento. Estudiando el efecto de la humedad de compactación de una base con agregado reciclado, encontrando que la quiebra de las partículas se reduce cuando se incrementa la humedad de compactación, adicionalmente el material presentó una capacidad de soporte apropiada para su uso con valores de CBR superiores al 106%, sin embargo, estos materiales exhibieron módulos resilientes inferiores a los de los agregados naturales. En la Figura 14 se presenta la composición del RCD analizado.



Rc: Concretos, productos de concreto, morteros y bloques de concreto
 Ru: Agregados no ligados
 Rb: Cerámicos
 Ra: Materiales bituminosos
 Rg: Vidrio
 X: Otros (Arcillas-limos, hierro, plástico, maderas no flotantes, cauchos, yeso y estuco)

Figura 14. Composición RCD para estudio de reutilización (Embus & Quintero, 2015).

Rengifo & Chavez (2015), estudiaron el efecto de la composición de una base de agregado reciclado de RCD proveniente de la ciudad de Santiago de Cali en el módulo

resiliente. Los autores encontraron que a medida que se reduce la cantidad de productos cerámicos (R_b) aumenta el módulo resiliente (ver Figura 15).

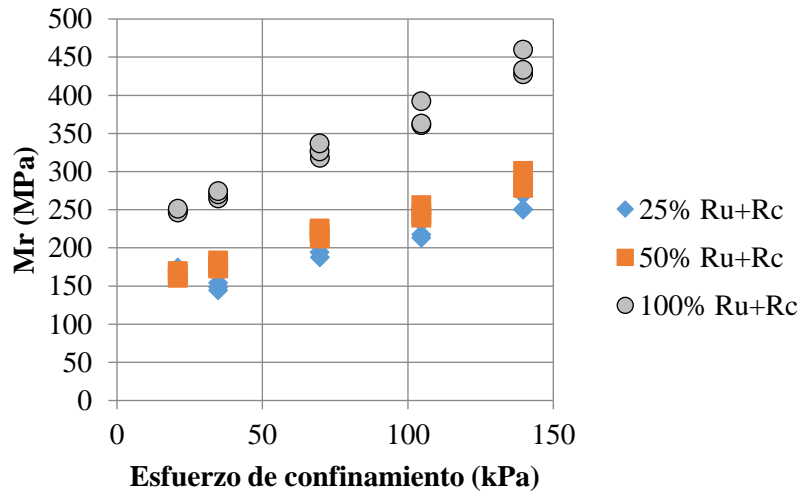


Figura 15. Efecto de la composición del agregado reciclado de RCD en el módulo resiliente (Rengifo & Chávez, 2015).

2.3.4 Uso en elementos prefabricados de concreto

Caicedo & Perez (2015), estudiaron prefabricados de concretos, particularmente adoquines para el uso en pavimento articulado, ajustando las curvas granulométricas con diseño Fuller en remplazos del agregado grueso y fino; observando que el incremento de sustitución reduce la resistencia flexotracción de los adoquines, alterando el comportamiento estructural presentado en la Figura 16.

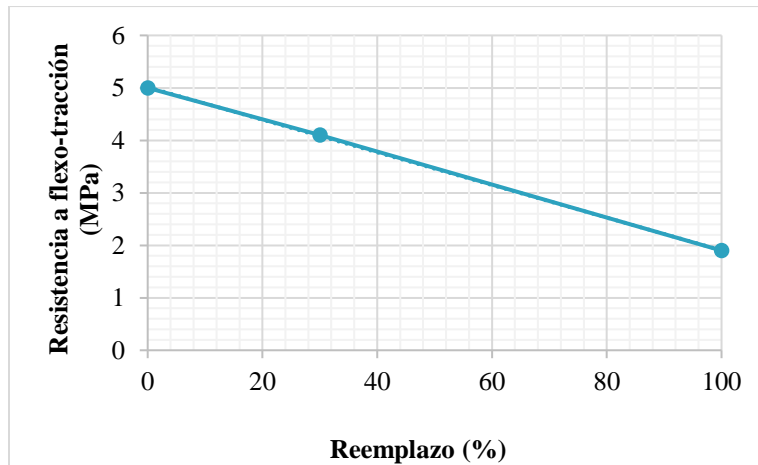


Figura 16. Efecto del reemplazo del agregado natural por RCD en la resistencia a flexotracción (Caicedo & Perez, 2015).

Londoño (2016), sustituyó el 50% del agregado grueso por agregado reciclado para la realización de bordillos y escaleras internas de uso residencial obteniendo un resultado satisfactorio, encontrando que el comportamiento mecánico no es diferente al concreto convencional en elementos prefabricados con concreto reciclado compuesto por agregado grueso reciclado, logrando resistencias a los 28 días superiores a 28 MPa. Explorando por otra parte, la producción y el uso de los agregados gruesos reciclados resultantes del proceso de trituración del residuo de concreto seleccionado, dentro de la fuente donde se generan, siendo económicamente viable y dependiendo fundamentalmente de 3 variables: Rendimientos en el proceso de producción; ubicación de la obra respecto a la fuente del agregado natural contra el que se compara el costo y la cantidad de reciclado que puede obtenerse en cada obra de construcción a partir de los RCD. Con base en lo anterior se determinaron reemplazos del 30 y 100% en los agregados naturales, con el reemplazo del 30% el módulo de rotura se redujo en un 10% frente a los resultados de 14 días con agregado natural y con el reemplazo del 100% no se presentó homogeneidad, el comportamiento estructural produce fallas y los resultados son dispersos disminuyendo un 64% con respecto al del agregado natural. Concluyendo que no es viable un reemplazo del 100% ya que no alcanza a cumplir con la resistencia óptima exigida en la norma.

Bravo & Bravo (2019), evaluaron la resistencia a flexión y compresión de 9 mezclas de concreto con remplazos parciales y totales del agregado grueso natural fino y grueso por agregado reciclado derivado de la trituración de adoquines de concreto del municipio de Almaguer Cauca, en donde se compone de 5 fases, iniciando por el muestreo, caracterización, diseño de mezcla, evaluación mecánica y finalmente selección de la mezcla y posterior fabricación. Los remplazos usados fueron:

Tabla 5. Muestras evaluadas para análisis de ensayos mecánicos (Bravo & Bravo, 2019)

Nomenclatura	Sustitución de agregados naturales por reciclados
M1	Sin sustitución
M2	50% del fino
M3	100% del fino
M4	50% del grueso
M5	50% del grueso y 50% del fino
M6	50% del grueso y 100% del fino
M7	100% del grueso
M8	100% del grueso y 50% del fino
M9	Sustitución total

Finalmente se utilizaron dos mezclas para la fabricación de adoquines, teniendo el 50% de remplazo en el agregado grueso y fino de origen natural (M2 y M4) y se concluyó que estas muestras cumplen con la resistencia a flexión y compresión, como también se presenta un mejor comportamiento al desgaste cumpliendo con la NTC-2017 para la fabricación de adoquines.

2.3.5 Uso como material de relleno

Gil & Orozco (2016), estudiaron el uso de un suelo de relleno fino derivado de la trituración de RCD como material alternativo para la construcción de diques zonificados. El material presentó una humedad natural de 14%, un límite líquido de 36%, un índice plástico

de 6%, una gravedad específica de 2.95 y un contenido de finos del 46%. El trabajo se enfocó en las características de resistencia al cortante sobre muestras compactadas en el laboratorio, en la Figura 17 se presentan los resultados de corte directo sobre muestras compactadas en el lado seco y el lado húmedo del Proctor Normal, el material exhibió diferencias en los parámetros de resistencia entre el lado seco y húmedo, sin embargo por su baja compresibilidad y baja posibilidad de expandirse en la presencia de agua puede ser tenido en cuenta para el reforzamiento de diques.

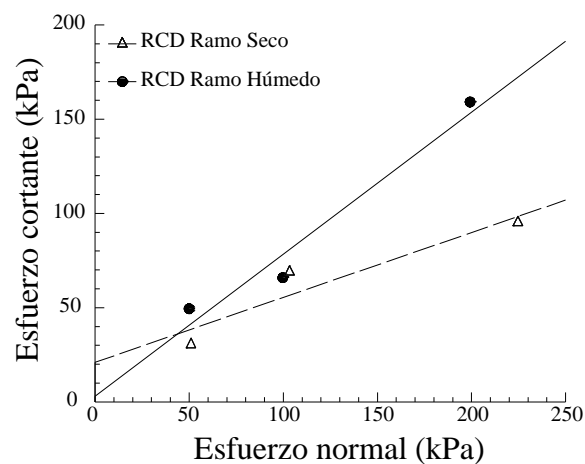


Figura 17. Resultados de la prueba de corte directo en material fino de RCD (Gil & Orozco, 2016).

Zamora & Jimenez (2016) estudiaron la problemática en la estructura de pavimento flexible, donde encontraron que la arcilla expansiva era uno de las causas principales de la falla tomando en cuenta este problema emplearon materiales reciclados como la ceniza volante y el polvo de ladrillo como propuestas estabilizadoras para reducir el potencial expansivo y posible mejoramiento en las propiedades mecánicas del suelo donde se instalará la estructura de pavimento, encontraron que los suelos expansivos mezclados con polvo de ladrillo fue la mejor alternativa para estabilización en un 60% debido a que las propiedades físicas y mecánicas de los suelos mezclados con el material no se ven afectados, mientras que la ceniza volante redujo la resistencia en casi un 33% de la resistencia inicial del suelo, por lo que concluyeron que el material resultante de la demolición y desperdicios en la

construcción como el polvo de ladrillo sirve para mitigar el impacto ambiental y la explotación de recursos naturales como solución alterna con el medio ambiente.

Granda, Padilla & Patiño (2017), evalúan el uso de material fino en la construcción de diques reforzados con geotextil tejido, buscando la optimización del tamaño y aumento de estabilidad. Analizando tres ensayos como: resistencia al corte del RCD, carga de rotura - elongación del geotextil tejido (3 tipos) y resistencia al cizallamiento, indicando que los resultados en los ensayos de tracción dan como resultado que los valores de carga de rotura son más altos que los estipulados para cada geotextil según el catálogo, teniendo una variación máxima del 5% presentando mejor comportamiento de acuerdo a su referencia, en los datos de elongación a la rotura varían los porcentajes según lo estipulado en el manual de geo textiles sin superar el 12% para el caso más crítico y una variación nula en el mejor de los casos. Utilizan el método de prueba estándar para determinar la resistencia en las interfaces del suelo-geo sintético y el geo sintético - geo sintético, para lo que emplearon tres ensayos con tres geotextiles con las mismas condiciones y compactación a una humedad óptima del 21%, presentando una similitud en el comportamiento en la resistencia al corte con el mismo ángulo de fricción como se muestra en la Figura 18.

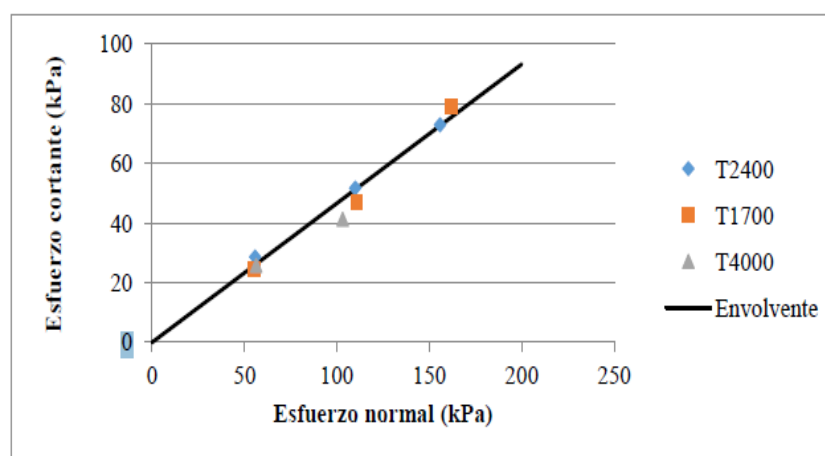


Figura 18. Envolvente ensayo corte directo interface geotextil – RCD (Granda et al., 2017).

Debido a la tendencia de los materiales en comportarse de la misma manera con respecto a la cohesión y ángulo de fricción da como resultado que la interacción en la interface no depende del geotextil si no del material constituyente del mismo.

Augusto & Montoya (2019) identifican la utilización de residuos industriales como materiales de construcción como alternativa funcional, económica y ambiental para el mejoramiento de carreteras de bajo tránsito y residuos en la industria de la construcción con altos contenidos de polvo de ladrillo, teniendo como característica en estos materiales la disminución de la permeabilidad lo que hace tener una mayor durabilidad al disminuir la acción de agua sobre los suelos que también permiten la utilización para la impermeabilización de llenos. Como objetivo determinaron las propiedades hidráulicas no saturadas de un suelo estabilizado con polvo de ladrillo para uso en la construcción de vías de bajo volumen de tránsito siendo utilizado como materiales un suelo arenoso representado en vías terciarias de Colombia. Teniendo como conclusiones que el polvo de ladrillo disminuye la permeabilidad de los materiales debido a que se produce un reacomodamiento interno de los granos del suelo reduciendo el porcentaje de vacíos limitando el paso del flujo del agua, la cual garantiza la protección de los materiales de la rasante permitiendo un uso en la impermeabilización de llenos, como también indican que para un proceso de impermeabilización es mejor compactar los materiales con contenidos de humedad altos.

3. METODOLOGIA

La metodología determinística trabajada inicialmente a partir de un proyecto de construcción en ejecución (el cual se denominará caso de estudio), con la que se abordó el presente trabajo tuvo en cuenta las siguientes etapas:

1. Selección del proyecto de caso de estudio;
2. Análisis y selección de las alternativas de aprovechamiento a estudiar en el laboratorio;
3. Muestreo de los materiales y producción de agregados reciclados;
4. Caracterización de los materiales para la alternativa 1 de aprovechamiento;
5. Caracterización de los materiales para la alternativa 2 de aprovechamiento;
6. Estimación del impacto ambiental;
7. Actividades propias de la elaboración del trabajo de grado, como la escritura del documento y la preparación de la sustentación.

A continuación, son descritas las seis primeras etapas del presente trabajo.

3.1 Selección del proyecto de caso de estudio

A continuación, son descritos todos los elementos y variables tenidos en cuenta para la selección del caso de estudio, así como sus características principales.

3.1.1 Identificación y criterios de selección del sistema constructivo y/o estructural

De acuerdo con las cifras reportadas por el DANE (DANE, 2017) en el primer trimestre del año 2017 el crecimiento de la vivienda fue del 15% para las ciudades como Bogotá, Cali y municipios de Cundinamarca, e informa que uno de los sistemas constructivos más utilizados es la mampostería confinada con un 40% seguido por el sistema prefabricado

industrializado con un 30,5% y finalmente la mampostería estructural con un 5,8% como lo muestra la Figura 19.

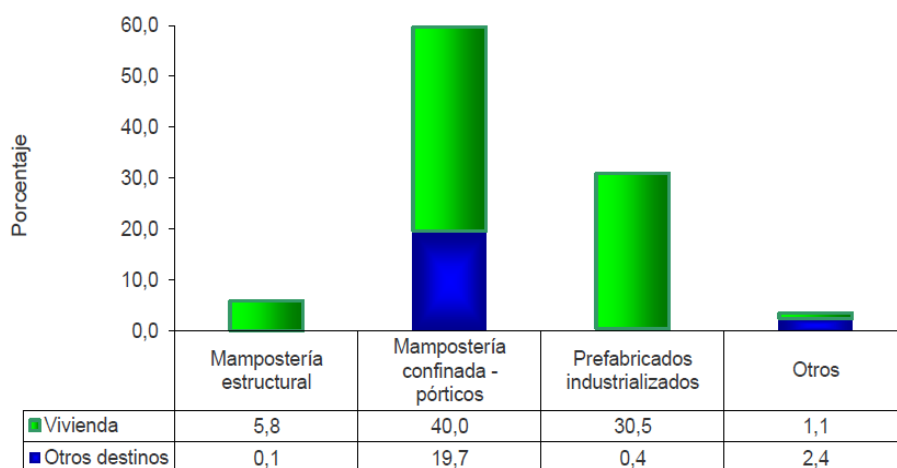


Figura 19. Distribución de área iniciada por sistema constructivo (DANE, 2017).

Se obtuvieron los siguientes aspectos y/o parámetros de selección para definir el sistema constructivo en el presente trabajo de investigación:

- I. Tiempo de ejecución de las actividades en obra.
- II. Actividades realizadas al momento de la toma de muestras
- III. Gran generador de desperdicio en obra debido a: mal almacenamiento, mal traslado interno de obra, modulaciones o cortes y/o malos manejos en el recurso humano y supervisión, mencionado por Bejarano (2019) y Ashqui & Pulgar (2017)
- IV. Potencial aplicación para minimización de recursos naturales.
- V. Tipo de material más usado en el sector de la construcción.

3.1.2 Criterios de selección de la obra

Los criterios de selección de la obra se establecieron de acuerdo con los proyectos en auge ubicados al sur de Santiago de Cali, una de la característica más relevante para ser tenido

en cuenta es el volumen de construcción, donde se puede identificar durante el proceso constructivo en que actividades específicamente se obtienen más residuos de construcción y demolición para así poder dar viabilidad de incorporación a estos materiales en la misma obra. Teniendo en cuenta la facilidad de acceso al proyecto y la proximidad de la obra hasta el laboratorio de la universidad para facilitar el transporte de muestras y la realización de los ensayos requeridos, como se observa la ubicación de la comuna en el cual se encuentra ubicado el proyecto (ver Figura 20).

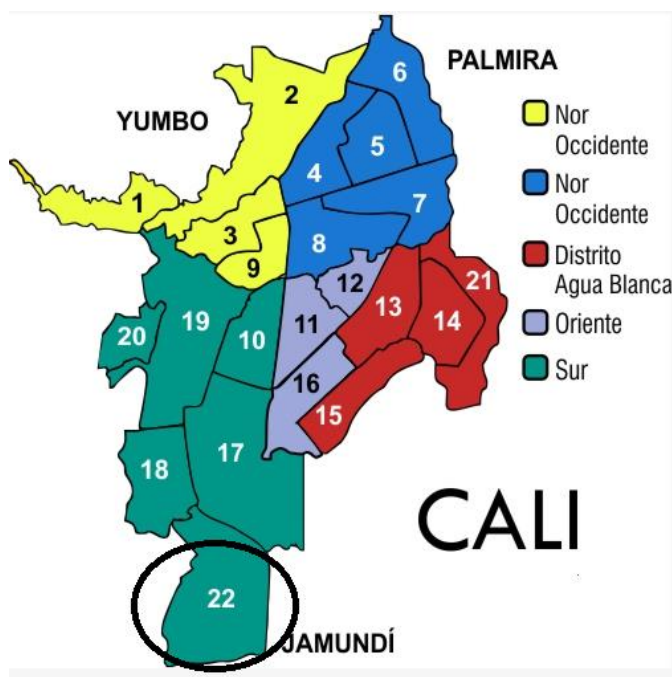


Figura 20. Localización del proyecto en la comuna 22 donde se realizó la recolección de los materiales (<https://images.app.goo.gl/fRDHTMajCrrxfnUA>).

Otro factor importante fue la disposición del personal que trabaja en el proyecto para suministrar información y autorizar la recolección de muestras para realizar los estudios y ensayos respectivos, posteriormente la verificación en la utilización de los RCD dentro de la misma obra.

3.1.3 Proyecto seleccionado para el caso de estudio

El estudio se realiza en un megaproyecto ubicado entre la calle 25 entre carreras 120 y 122, con alrededor de 800.000 m² y 117.000 m² de zonas verdes; teniendo en cuenta que presenta vías de acceso hasta la obra como también andenes, sardineles, excavaciones y rellenos con roca meteorizada en su cimentación (ver Figura 21).



Figura 21. Vista aérea del proyecto a agosto 2018. Fuente: Constructora Bolívar.

El proyecto es vivienda bifamiliar compuesta por casas de dos pisos con un área construida de 94 m² ubicada al sur de Santiago de Cali, presentando como sistema constructivo muros en mampostería estructural y presentando una tipología arquitectónica compuesta de sala, comedor, tres alcobas, tres baños, patio, cocina, zona de oficios y parqueadero privado (ver Figura 22).



Figura 22. Planta Arquitectónica casa tipo. Fuente: Constructora Bolívar

3.1.4 Proceso constructivo del caso de estudio

El proceso implementado para la construcción de las casas en mampostería estructural (Figura 23) se basó en estabilizar el terreno mediante el retiro de materia orgánica y reemplazarlo con recebo (roca muerta o roca parcialmente meteorizada) del material de apoyo de la cimentación superficial en espesores aproximados de 50 cm, una vez el terreno queda conformado por el procedimiento establecido se realizan las instalaciones eléctricas e hidrosanitarias para continuar con las excavaciones de las vigas de cimentación y su posterior fundición; sucesivamente se arma y se funde la losa de contrapiso para dar inicio al trazado en la instalación del ladrillo estructural reforzado con dovelas y mortero de pega y así dar continuidad al armado y fundición de la losa de entrepiso y finalmente la instalación de la cubierta.



(a)



(b)

Figura 23. (a), (b) Construcción de casas en mampostería estructural Fuente: el autor.

3.2 Análisis y selección de las alternativas de aprovechamiento a estudiar en el laboratorio

Una vez seleccionado el proyecto objeto de estudio se procedió a evaluar las posibilidades de aprovechamiento.

3.2.1 Oferta de RCD

El proyecto seleccionado comparte tipología constructiva y características urbanísticas con el caso de estudio analizado por Gonzalez (2021). Debido a ello en términos de la evaluación de la generación de residuos se adoptó lo encontrado por la autora mencionada.

Gonzalez (2021), a partir de un seguimiento quincenal en obra encontró que las fuentes de generación se pueden clasificar en las siguientes tres:

1. Material proveniente de excavación;
2. Residuos de construcción generados en cada unidad de vivienda;
3. Residuos de construcción generados en la zona de corte de ladrillo.

De la muestra analizada por Gonzalez (2021), que cuenta con 251 mediciones y un volumen total cercano a los 500 m³ se puede concluir que el 41% de los residuos generados que pueden ser aprovechados de forma directa corresponden a la zona de corte de ladrillo.

Teniendo en cuenta lo anterior en el presente trabajo se tomaron como fuentes de generación las excavaciones y la zona de corte de ladrillo. En esta última se tienen dos residuos diferenciados por tamaño, uno fino con partículas tamaño arena y menores que puede ser aprovechado de forma directa, y uno grueso que debe de ser triturado antes de su aprovechamiento. Por facilidad de trabajo en el laboratorio se utilizó este último para producir dos tipos de agregados reciclados: uno grueso (tamaños mayores a 4,75 mm), y uno fino (tamaños menores a 4,75 mm). Por otro lado, de la oferta de material de excavación, se utilizó un tercer material, el cual fue el producto de separar la parte gruesa de la excavación que corresponde a gravas de la parte fina donde predominan los limos y arcillas, el primer material sería un subproducto para filtros que no fue estudiado en la presente investigación, y el segundo fue el material base estudiado para rellenos estructurales después de modificado con la adición del residuo fino de ladrillo.

3.2.2 Análisis de alternativas de aprovechamiento

De acuerdo con la revisión bibliográfica se elaboró el resumen contenido en la Tabla 6, al combinar esta información con la contenida en la Tabla 39, donde las cantidades de obra más representativas en peso son las excavaciones, rellenos y concretos, se seleccionaron dos posibles alternativas de aprovechamiento: el uso de materiales reciclados derivados de RCD en concretos o en material de relleno.

Tabla 6. Usos potenciales de los agregados y material de relleno estructural derivados de los RCD.

Categoría	Aplicación	Desventajas	Fuente
Agregado	Concreto con sustitución de RCD derivados de concretos y de ladrillo	Reducción de la granulometría con relación al agregado natural en la trituración	Soutsos et al. (2011a)
Agregado	Elementos prefabricados de concreto con sustitución de agregado natural	Límite de reemplazo del 10% del agregado natural.	Soutsos et al. (2011b)
Agregado	Concretos estructurales	Efecto en la trabajabilidad en estado endurecido. Límite de reemplazo del 25% por pérdida de resistencia.	Wagih et al. (2013)
Agregado	Reemplazo de agregado natural en elementos prefabricados	Mayor pérdida de resistencia cuando se usan residuos cerámicos en relación a los de concreto	Rodríguez et al. (2016)
Agregado	Reemplazo de agregado natural en concretos de baja resistencia	Límite de 17MPa en la resistencia de los concretos	Sharkawi et al. (2016)
Material llenante	Uso de polvo de ladrillo como reemplazo del cemento	Límite del 20% de reemplazo	Lum et al. (2018)
Material llenante	Reemplazo del cemento por polvo de ladrillo en morteros	Límite de uso del 10% sin reducción de propiedades	O'Farrell et al. (2001)
Material de relleno	Arena derivada de la trituración de RCD compactada en el laboratorio	Análisis efectuado para la compactación con la energía Proctor Normal	Gil & Orozco (2016)

Categoría	Aplicación	Desventajas	Fuente
Material de relleno	Estabilización de suelos expansivos con polvo de ladrillo	Límite de mezcla 60% de polvo de ladrillo sin afectar las propiedades mecánicas	Zamora & Jimenez (2016)
Material de relleno	Arena derivada de la trituración de RCD compactada en el laboratorio como material de muros de suelo reforzado	Uso en muros de suelo reforzado con la compactación Proctor Normal.	Granda, Padilla, & Patiño (2017)

Al evaluar las dos posibles alternativas se encontró que era necesario producir al menos dos tipos de materiales para su uso:

1. Agregados gruesos reciclados de RCD cerámicos (ARCe);
2. Fracción fina de los agregados reciclados de RCD (ARCe pasante No. 4).

Los primeros para su uso como reemplazo de los agregados naturales en el concreto, y los segundos para la mezcla de un material de relleno que además contemplara parte de los residuos de las excavaciones. Por la naturaleza del material excavado se decidió generar un tercer material, separando las gravas del depósito natural y revalorizándolas como material para la construcción de filtros después de su lavado, material que no será objeto de análisis en el presente estudio, con el material más fino se adelantó la caracterización de la mezcla con un agregado fino (menor a tamaño grava) para su uso como material de relleno contra estructuras.

Finalmente, se seleccionaron las dos alternativas de aprovechamiento que se describen a continuación:

- Alternativa 1: análisis de la sustitución parcial del agregado grueso en concretos no estructurales de hasta 21 MPa (3000 psi);
- Alternativa 2: rellenos estructurales de mezcla con suelo y ARCe (andenes y antejardines).

3.3 Muestreo de los materiales y producción de agregados reciclados

Se inicia con la clasificación del tipo de residuo de construcción y demolición de los materiales implementados en las alternativas de aprovechamiento, descritos por la norma europea EN 933-11 según la Tabla 7:

Tabla 7. Listado de la clasificación de la composición según la norma EN 933-11.

Constituyente	Descripción
Rc	Concreto, productos de concreto, mortero y ladrillos de concreto.
Ru	Piedra natural, agregado reciclado limpio (sin mortero).
Rb	Ladrillos de cerámica, tejas, fachaletas, cerámicos, y otros productos de construcción que no flotan.
Ra	Materiales bituminosos
Rg	Vidrio
FLs	Agregados flotantes (con densidad menor a 1Mg/m^3)
FLns	Material flotante (con densidad menor a 1Mg/m^3)
X	Otros, material arcilloso, metales, no flotante (maderas), plástico y caucho

3.3.1 Residuo generado por Cerámicos (zona de corte del ladrillo)

En este proyecto el residuo de construcción y demolición usado fue clasificado como Rb de tipo cerámico, implementado en la construcción de viviendas en mampostería estructural y seleccionado de la zona de corte del ladrillo, donde su almacenamiento se realizó en acopios temporales dispuestos por la constructora. Una vez identificados estos acopios, el tiempo estimado para la etapa de muestreo fue de dos meses, donde las muestras se ejecutaron durante un periodo de 15 días; obteniendo un total de 6 muestras recolectados en cuñetes con un peso aproximado de 20 kg.

Las muestras fueron recogidas del residuo generado de las últimas 40 casas del primer proyecto, proveniente de la zona de corte, identificando mediante el cronograma de obra que la actividad más generadora y representativa de desperdicio fue en la etapa de estructura, presentando un desperdicio promedio de ladrillo por casa de $0,241\text{ m}^3$ o 241 kg (información suministrada por la empresa constructora). En la Figura 24a) se muestra los acopios

temporales de residuos cerámicos, mientras que en la Figura 24b) se observa la recolección de muestras representativas para los ensayos de laboratorio.



a)



b)

Figura 24. a) Acopio del residuo; b) y recolección en acopios temporales. Fuente: el autor.

3.3.2 Residuo generado de excavaciones

Tal como se mencionó anteriormente, en la Resolución 0472 de 2017 del MADS, el material generado de la excavación puede ser considerado como RCD, según la clasificación de la EN 933-11, donde entraría en la categoría de otros residuos (X).

Dentro del megaproyecto escogido para el trabajo investigativo se encontró en ejecución dos sistemas constructivos para la realización de viviendas, un sistema fue industrializado en la construcción de apartamentos en muros en concreto y el otro sistema fue en mampostería estructural para la realización de casas conformada por dos niveles, los dos sistemas fueron empleados con la misma metodología para el mejoramiento del terreno según el estudio de suelos realizado por la empresa constructora, el cual; consiste en estabilizar el terreno mediante el retiro de materia orgánica y reemplazo con recebo (roca muerta o roca parcialmente meteorizada) del material de apoyo de la cimentación superficial en espesores aproximados de 50 cm. En esta condición la generación de residuos de excavación era del orden de 32 m³ por unidad de vivienda y de 8.067m³ por etapa (estos valores fueron suministrados por la empresa constructora).

En la Figura 25 se muestra la recolección del material excavado realizado en la zona para la toma de muestras.

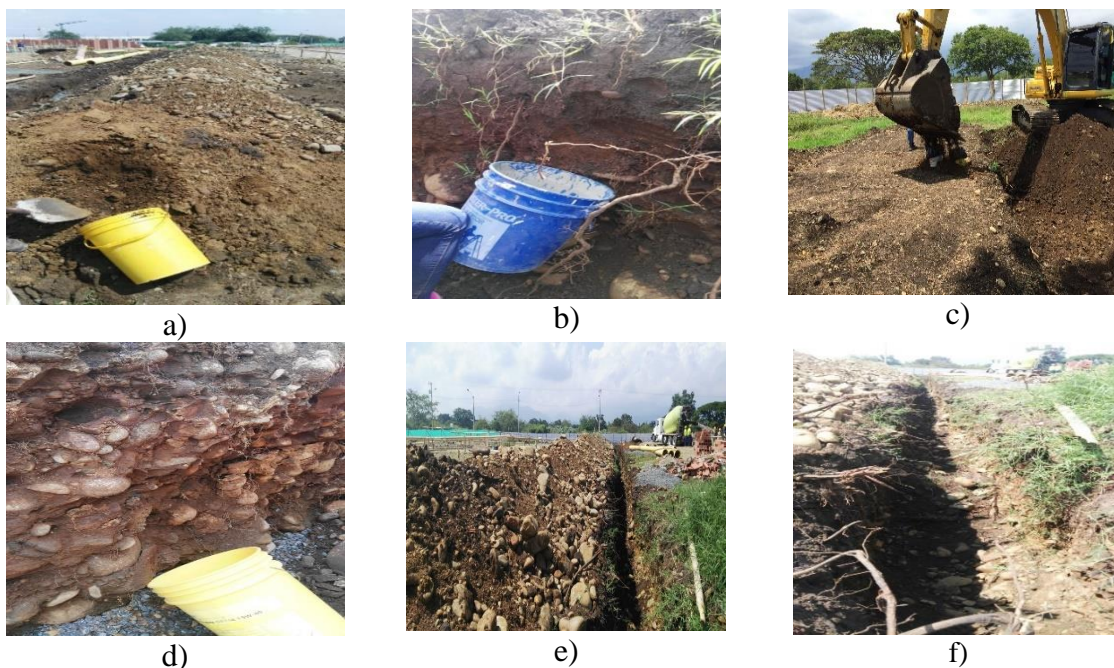


Figura 25. Material excavado para toma de muestras (a), (b), (c) terraza, (d), (e) y (f) zanja de excavación para filtro. Fuente: el autor.

Las muestras se obtienen mediante un recorrido de obra identificando los lugares para la extracción del material proveniente de una zanja excavada para instalación de tubería y de terrazas excavadas para inicio de cimentación. El material se recolecta teniendo en cuenta que su estructura fue alterada debido a la manera de extracción manual depositándolo en cuñetes, extrayendo un total de seis muestras con pesos entre 15 hasta 25 kg por cada cuñete. Una vez recolectadas se trasladaron al laboratorio para el procesamiento y análisis de cada una de ellas.

Finalmente, en el laboratorio se empleó el tamizado mecánico para separar la fracción gruesa de la fracción fina, en la generación del material de relleno reciclado para la mezcla con suelo natural.

3.4 Alternativa 1 de aprovechamiento: Concreto

La alternativa 1 de aprovechamiento corresponde a la utilización de los residuos de la zona de corte de ladrillo una vez reciclados para la elaboración de concretos.

A continuación, se presenta la metodología implementada por el siguiente esquema:

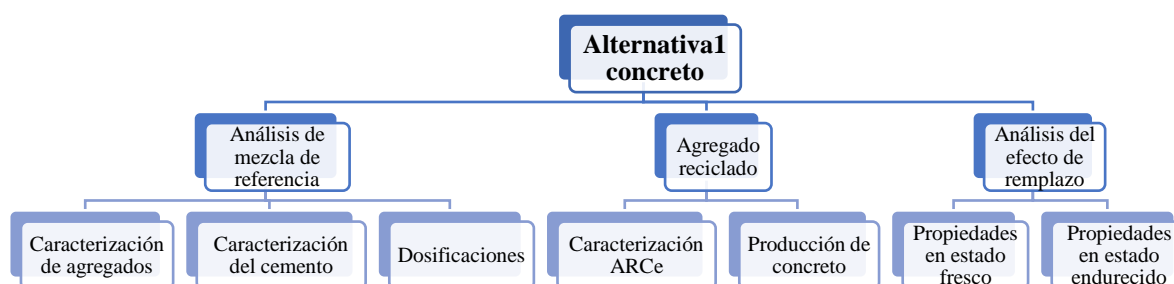


Figura 26 Metodología para la aplicación 1. Fuente: el autor.

3.4.1 Análisis de mezcla de referencia

En esta metodología se estudió una de las alternativas de aprovechamiento con remplazo parcial del agregado grueso natural por agregado reciclado de tipo cerámico como el ladrillo (ARCe) como materia prima para la fabricación de concreto no estructural de 21 MPa (3.000 Psi), teniendo como objetivo emplearlo en las actividades de obras de arte como en cunetas, sardineles, andenes o huellas.

3.4.1.1 Caracterización de materiales

Para iniciar con la alternativa 1 se mencionarán los materiales y sus fuentes, los cuales fueron suministrados por la empresa constructora como son: agregados naturales (grueso y fino) y cemento derivado de las siguientes fuentes:

- i. Arena mediana proveniente del río Paila
- ii. Grava de $\frac{3}{4}$ de la empresa agregados y mezclas Cachibí,
- iii. Cemento de uso general de la marca Argos

Una vez con los materiales recolectados y dispuestos en el laboratorio de la Universidad Javeriana de Cali se inicia la caracterización con base en la Tabla 8.

Tabla 8. Procedimientos de ensayo para la caracterización de los materiales que componen la mezcla de concreto.

Material	Procedimiento de ensayo	Norma empleada
Agregado grueso	Granulometría	NTC 77-2007
	Gravedad Específica y Absorción en el agregado grueso	NTC 176-1995
Agregado fino	Gravedad Específica y Absorción	NTC 237-1995
	Granulometría	NTC 77-2007
Cemento	Finura de cemento	NTC 33-1997
	Peso específico del cemento	NTC 221-2017
	Tiempo de fraguado	NTC 118- 2017

Granulometría (NTC 77, 2007):

Este ensayo permite la distribución de las partículas de un agregado, determinando los tamaños en agregado grueso y fino de un material por medio de tamices con abertura cuadrada de forma decreciente. En este ensayo fue tomada una muestra de 5 kg y llevada al horno durante 24 horas, fue pesada y lavada nuevamente y se llevó al horno durante 24 horas se pesa y se realiza la granulometría con los siguientes tamaños de tamices 11/2”, 1”, 3/4”, 1/2”, 3/8”, No.4, No.8, No.10, No.16, No.30, No 40, No 50, No. 100, No.200, pasante No.200 (ver Figura 27).



Figura 27. Serie de tamices para realización de granulometría. Fuente: el autor.

Gravedad Específica y Absorción en el agregado grueso (NTC 176, 1995)

Este ensayo es usado para determinar la densidad relativa y la absorción de una muestra del agregado, siguiendo el proceso el cual consiste en coger una parte del agregado pasarlo por el tamiz # 4, dejarlo en inmersión durante 24 horas retirar el agua y separar la muestra en 3 partes iguales. Una vez separado se seca superficialmente con un paño y se procede a pesar, después se sumerge el material en una canastilla y nuevamente se pesa, finalmente se lleva el material al horno durante 24 horas y luego se pesa, una vez se obtienen los datos se implementan las ecuaciones correspondientes para el cálculo.



Figura 28. Ensayo de gravedad específica y absorción en la grava. Fuente: el autor.

Gravedad específica y absorción en el agregado fino (NTC 237, 1995):

Este ensayo tiene como objetivo determinar el peso específico, la densidad y absorción del agregado fino de acuerdo con las recomendaciones de la norma NTC 237 -95 (ver Figura 29).



Figura 29. Gravedad específica y absorción en arena. Fuente: el autor.

Finura de cemento (NTC 33, 1997)

Este ensayo se utiliza para determinar la finura del cemento mediante el aparato de Blaine de permeabilidad al aire expresado en términos de superficie específica de la muestra ensayada como área total en centímetros cuadrados por gramo de cemento o metros cuadrados por kilogramo de cemento como se observa en la Figura 30.



Figura 30. Finura de cemento mediante aparato de Blaine. Fuente: el autor.

Peso específico del cemento (NTC 221, 2017)

Peso específico del cemento (NTC 221, 2017): este ensayo determina la densidad del cemento hidráulico, presentando utilidad en el diseño y control de las mezclas de concreto.

La norma NTC 221(2017) establece el método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico, relacionando su principal utilidad con el diseño y control de mezclas de concreto definida como la masa del volumen unitario de sólidos.

Tiempo de fraguado (NTC 118, 2017)

Se determina el tiempo de fraguado del cemento por medio de la aguja de Vicat, con mediciones de cada 15 min hasta obtener la penetración de 25 mm (ver Figura 31)



Figura 31. Tiempo de fraguado y control de temperatura. Fuente: el autor.

3.4.1.2 Dosificación

Posterior a la caracterización se continua con la elaboración del concreto de 21 MPa, el cual se decide realizar con base en el diseño de mezcla suministrado por la empresa constructora, presentando la siguiente dosificación indicado en la Tabla 9:

Tabla 9. Diseño de mezcla para 21MPa. Fuente: Constructora Bolívar.

Material	Unidad	Sin aditivo
Cemento uso general	kg	350
Arena mediana	kg	800
Grava triturada 3/4"	kg	1050
Agua	l	190

(relación a/c: 0.54)

Con esta información se replica en el laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana Seccional Cali un diseño de mezcla base, el cual fue ajustado de acuerdo con la cantidad de volumen a preparar, siendo para este caso de 29,6 litros, donde la dosificación ajustada se basa en la cantidad requerida para toma de asentamiento y cilindros (para ensayos de resistencia a la compresión).

3.4.2 Agregado reciclado de cerámicos (ARCe)

Para dar continuidad con la alternativa 1, se inicia el proceso de transformación del material suministrado como RCD proveniente de los residuos cerámicos de la zona de corte, el cual es ladrillo estructural proveniente de la ladrillera San Benito.

Una vez recolectadas estas muestras y suministradas por obra son transportadas al laboratorio de la Universidad Javeriana Cali, iniciando el proceso de trituración y tamizaje. El mecanismo empleado fue con un equipo mecánico con mandíbula de 3/4" (ver



Figura 32) luego se introduce el material en un cuarteador donde la actividad se realiza manualmente, esto permite que se distribuyan uniformemente las partículas como se muestra en la Figura 33. Cabe aclarar que en la zona de muestreo del RCD tuvo como criterio que el mismo no estaba libre de otro tipo de residuos y de contaminantes, y no fue necesario ningún proceso como limpieza o clasificación previa, y el proceso de producción del ARCe sólo requirió muestreo, trituración y cuarteo, empleando como se dijo; muestreo manual en sacos; trituración por compresión con mandíbulas; cuarteo manual (ver Figura 33).



Figura 32. Trituradora de mandíbula. Fuente el autor.



a)



b)

Figura 33. Separación en el cuarteador de las muestras en el laboratorio. Fuente: el autor.

3.4.2.3. Caracterización del agregado reciclado de cerámico (ARCe)

Antes del reemplazo del ARCe se hicieron ensayos básicos de caracterización, con los procedimientos listados en la Tabla 10.

Tabla 10. Caracterización del ARCe derivado de RCD en la zona de corte de ladrillo.

Material	Procedimiento de ensayo	Norma empleada
ARCe	Masa Unitaria o Densidad Bulk	NTC 92-1995
	Granulometría	NTC 77-2007
	Gravedad Específica Gruesa y Absorción	NTC 176-1995
	Gravedad Específica fina y Absorción	NTC 237-1995

3.4.2.4. Producción de concreto

En esta etapa del análisis de aprovechamiento, se estudió el reemplazo parcial del agregado natural por agregado reciclado ARCe. Partiendo del diseño base se da inicio al reemplazo parcial del agregado natural en este caso la grava por ARCe, donde los reemplazos fueron en cantidades del 10, 20 y 40% en peso (de acuerdo con la nomenclatura definida en la Tabla 11) , en el que conserva el mismo método de mezclado utilizado por la constructora, el cual; presenta la siguiente secuencia de dosificación en el trompo: 50% agua, 100% cemento, 100% grava (dejando mezclar 30 segundos), 50% agua, juntos los materiales se deja un tiempo mínimo de mezclado de 2 minutos.

Tabla 11. Descripción de los reemplazos empleados. Fuente: el autor.

Tipología	Descripción
DM	Mezcla de referencia
ARCe10	Sustitución del 10% del agregado natural con ARCe
ARCe20	Sustitución del 20% del agregado natural con ARCe
ARCe40	Sustitución del 40% del agregado natural con ARCe

Con base en la dosificación suministrada se realizaron los ajustes correspondientes dando inicio al concreto llamado diseño base, elaborado en el laboratorio. Para ello se tuvo en cuenta la mezcladora del laboratorio que presentó una capacidad para 40 lt; donde se calculó la mezcla necesaria para: tomar asentamiento mediante el cono de Abrams y los cilindros requeridos para comprobar su resistencia. Adicionalmente se calculó un desperdicio del 20% preparando una mezcla total de 29,6 l como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Cantidad de concreto a preparar en litros. Fuente: el autor.

Ensayo	Capacidad (lt)	Cantidad	Total
Slump	5,5	1	5,5

Cilindros	1,6	12	19,0
			25,0
Desperdicio		20%	4,9
		Total(lt)	29,6

Teniendo en cuenta la capacidad de mezcla a preparar en el laboratorio se ajusta el diseño base con el diseño suministrado para concretos de 21MPa, fijando los parámetros para la preparación de acuerdo con la Tabla 13. En la se presenta una imagen con el aspecto del concreto fresco preparado con la dosificación base.



Figura 34. Elaboración de concreto diseño base. Fuente: el autor.

Tabla 13. Dosificación de diseño base para la elaboración de concretos de 21MPa de acuerdo con el caso de estudio. Fuente: el autor.

Humedad de los materiales						
Agregado fino	% abs	1,11	Cont Hum.	3,52	%	
Agregado grueso	% abs	1,83	Cont Hum.	1,52	%	
ARCe	% abs	17,23	Cont Hum	2,79	%	
Original						
Material	Masa Seca	Masa húmeda	Agua en los agregados	Absorción	Agua libre	Aporte
Agua	5,63					
Cemento	10,37					
Ag Fino	23,71	24,55	0,83	0,26	0,57	
Ag Grueso	31,12	31,60	0,47	0,57	-0,09	0,5
Dosificación Base						
	Agua		5,13	lt		
	Cemento		10,37	kg		
	Ag Fino		24,55	kg		
	Ag Grueso		31,60	kg		

3.4.3 Análisis del efecto de remplazo del agregado natural por ARCe

Una vez preparada la mezcla se analiza el efecto de remplazo mediante dos propiedades (ver Tabla 14) la primera, en estado fresco mediante la toma de asentamiento para conocer la consistencia y trabajabilidad, y la segunda en estado endurecido mediante ensayos de resistencia a la compresión y ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (tomando como guía la propuesta de Neville (1997) como un indicador de calidad, para tal fin se empleó la escala mostrada en la Tabla 15, definiendo edades de ensayos a los de 3, 7 y 28 días; y se realiza la toma de 12 especímenes por cada diseño para un total de 48 cilindros, divididos de a 4 cilindros por cada edad de ensayo, conforme con las sustituciones de ARCe.

Tabla 14. Ensayos al concreto. Fuente: el autor.

Propiedades	Tipo de ensayo	Norma empleada
Estado Fresco	Asentamiento	NTC 396-92
	Resistencia a compresión	NTC 673
Estado endurecido	Velocidad de pulso ultrasónico	NTC 4325-97
	Tipo de modelo de fractura	NTC 673

Tabla 15. Guía de calidad del concreto en función de la velocidad de pulsos ultrasónicos (Neville, 1997).

Velocidad(M/S)	Calidad Del Concreto
>4.500	Excelente
3.500 - 4.500	Bueno
3.000 - 3.500	Regular
2.000 -3.000	Malo
< 2.000	Muy malo

Después de cada ensayo destructivo de resistencia a la compresión de los cilindros en las edades indicadas se describió el tipo de modelo de fractura siguiendo la normativa colombiana, de acuerdo con los patrones mostrados en la Figura 35.

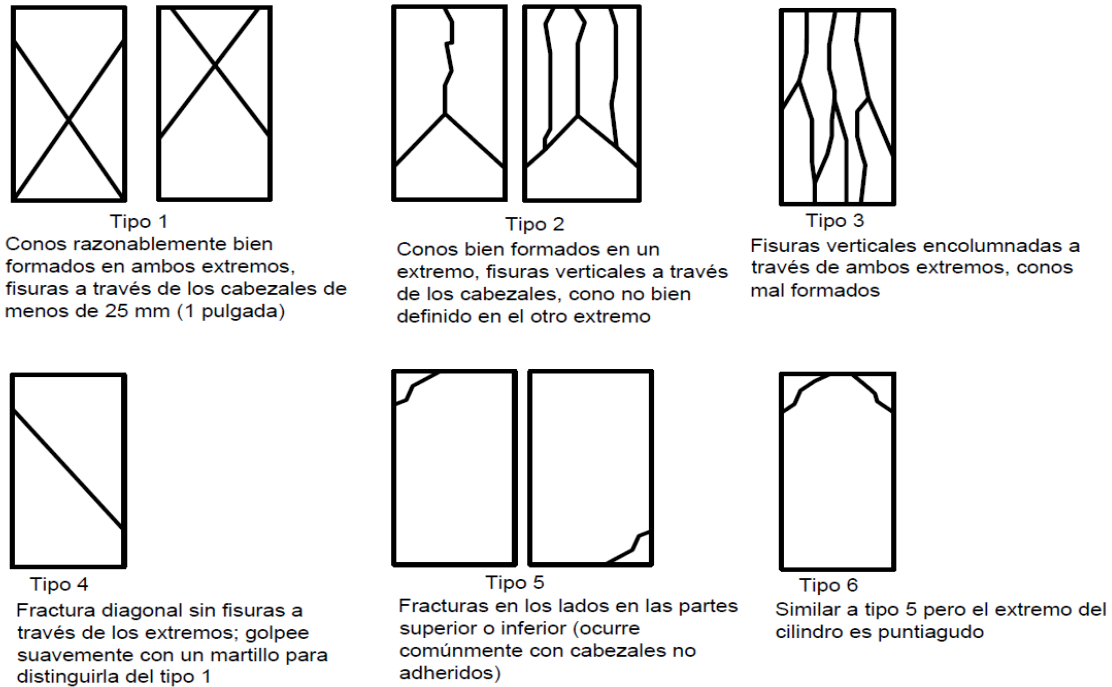


Figura 35. Modelos de fractura típicos. Fuente: (NTC 673, 2010).

3.4.3.1 Propiedades en estado fresco

Para verificar la manejabilidad de los concretos realizados se realiza la toma de asentamiento utilizando el cono de Abrams descrito en la norma NTC 396-1992, como se observa en la Figura 36.



Figura 36. Toma de asentamiento utilizando el cono de Abrams. Fuente: el autor.

3.4.3.2. Propiedades en estado endurecido

Previa al ensayo destructivo de resistencia a la compresión, se empleó el ensayo no destructivo denominado velocidad de pulso ultrasónico. Usado con base en la norma NTC 4325-97. Dicha norma indica que la velocidad del pulso ultrasónico se ve influenciada por las propiedades del concreto que determinan el comportamiento elástico y la resistencia mecánica. Verificando con el tiempo en su estructura el incremento o reducción en la velocidad de pulso ultrasónico siendo usados para evaluar la uniformidad y calidad del concreto como también indica la presencia de grietas y vacíos. Este método se usó como un segundo criterio de evaluación en la resistencia de los cilindros en concreto verificando el ensayo antes de someterlos a compresión a las mismas edades de rotura (3, 7 y 28 días).

Para determinar la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos, se utiliza la metodología con base en la NTC 673, este método de ensayo es usado como base para el control de calidad en concreto y consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros moldeados o núcleos a una velocidad dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla siendo calculado dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo por la sección transversal de área del espécimen. En la Figura 37.



Figura 37. Ensayo de resistencia a compresión. Fuente: el autor.

Resumiendo, el programa experimental se realizaron las matrices mostradas en la Tabla 16, identificando las variables dependientes e independientes.

Tabla 16. Matriz experimental de concreto. Fuente: el autor.

Independientes		Variables			Dependientes
Mezcla	Tiempo (días)	ARCe (%)	Resistencia a la compresión	Ultrasonido	
DM	3, 7 y 28	0	3, 7 y 28	3, 7 y 28	
ARCe10	3, 7 y 28	10	3, 7 y 28	3, 7 y 28	
ARCe20	3, 7 y 28	20	3, 7 y 28	3, 7 y 28	
ARCe40	3, 7 y 28	40	3, 7 y 28	3, 7 y 28	

3.5 Caracterización de los materiales para la alternativa 2 de aprovechamiento

La alternativa 2 de aprovechamiento emplea dos tipos de residuos, los provenientes de las excavaciones y los de la zona de corte de ladrillo. En la Figura 38 se presenta un resumen de la metodología empleada, en principio la metodología incluye la revisión del estudio geotécnico para la obtención de la licencia de construcción, a partir del cual se derivó la etapa 2 enfocada en la revisión de potencial de expansión de la matriz fina del depósito aluvio-torrencial hallada en el sitio de obra, para finalmente definir una serie de mezclas y evaluar su desempeño mediante el ensayo de resistencia a la compresión simple.

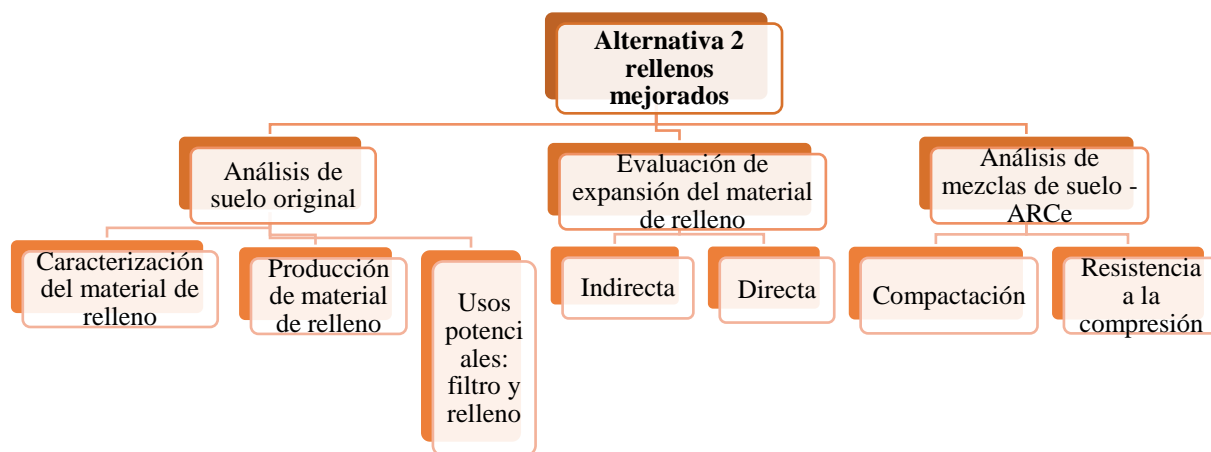


Figura 38. Metodología para la alternativa 2 de aprovechamiento. Fuente: el autor

3.5.1 Análisis de suelo original

En la Resolución 0472 de 2017 del MADS incluye dentro de los RCD y las posibilidades de aprovechamiento el material proveniente de excavaciones, por tal motivo se utilizó el material del sitio para evaluar esta aplicación. De acuerdo con Espinosa & Restrepo (2017) en el sitio del proyecto se encontró el perfil de suelo descrito en la Tabla 17.

Tabla 17. Perfil de suelo típico del proyecto objeto de estudio (Espinosa & Restrepo, 2017).

Profundidad (m)	Descripción
0 a 0.5	Capa vegetal y limo orgánico arenoso carmelito con raíces y algunas gravas de aluvión.
0.5 a 1.5 (2.0)	Arcilla arenosa carmelita y/o habana oscura de consistencia muy dura, con algunas raíces y alto potencial expansivo (50 % del ensayo de expansión libre en probeta). La resistencia al corte no drenada, medida con penetrómetro de bolsillo, varía entre 250 y 300 kPa. N del ensayo de penetración estándar varía entre 15 y 22 golpes/pie.
1.5 (2.0) a 3.5	Arcilla arenosa habana oscura de consistencia muy dura y medio a alto potencial expansivo (30, 40 y 50 % del ensayo de expansión libre en probeta). La resistencia al corte no drenada, medida con penetrómetro de bolsillo, varía entre 350 y 400 kPa. N del ensayo de penetración estándar arrojó valores entre 21 y 27 golpes/pie.
3.5 a 4.0	Arcilla arenosa habana oscura de consistencia muy dura, con gravas de aluvión. La resistencia al corte no drenada, medida con penetrómetro de bolsillo, en los estratos arcillosos arrojó valores >450 kPa. N del ensayo de penetración estándar arrojó valores entre 31 y 37 golpes/pie, obteniendo rechazo en algunos sondeos a 4.0 m de profundidad.

De acuerdo con la estratigrafía detectada donde predominan suelos de alto potencial expansivo y el nivel de cargas previsto el cual no contrarrestaría dicho potencial, Espinosa & Restrepo (2017) recomendaron que el sistema de cimentación superficial se conformara a partir de en una serie de vigas corridas en concreto reforzado apoyadas directamente sobre un relleno en material granular seleccionado de mínimo 0.80 m de espesor, medidos a partir del nivel inferior del cimient, rellenos que deberán conformarse en material granular seleccionado (roca muerta), adicionalmente y previo a la construcción de rellenos se efectuará en el suelo un riego de agua cal (5%) con el objeto de buscar la estabilización del suelo de fundación ante el fenómeno de expansión.

Debido a esta recomendación se consideró mejorar las propiedades de los dos estratos expansivos reportados por los ingenieros geotecnistas como una aplicación de RCD, teniendo

como premisa la estabilización del suelo expansivo por vía física con la incorporación del residuo de ladrillo. Dado que en términos del peso total de los materiales empleados en obra este constituye un ítem relevante, el cual puede ascender al 50% del peso total de los materiales para el proyecto en cuestión.

3.5.2 Muestreo y producción de los materiales de relleno reciclados

Esta alternativa, como ya se mencionó, corresponde a la generación de dos tipos de materiales: el primero derivado del suelo natural presente en el material sobrante de excavaciones; y el segundo, correspondiente al material fino derivado de la extracción del pasante tamiz No. 4 del ARCe.

A partir de las excavaciones activas en obras que correspondían a trabajos de alcantarillados, filtros y otras excavaciones varias se tomaron seis muestras independientes de suelo, numerándolas de la MS1 a la MS6, debido a la naturaleza del depósito aluvio-torrencial encontrado (ver Figura 39a), en una primera etapa se hicieron ensayos sobre la totalidad del material, y en una segunda se separó el material en el retenido y pasante tamiz No. 4 que corresponden al material de revalorización para filtro (ver Figura 39b), y el material pasante para rellenos estructurales (ver Figura 39c).



Figura 39. Suelo seleccionado para el retiro: a) en el sitio de obra; b) fracción gruesa retenida en el No. 4 después de tamizado y lavado; y c) matriz fina pasante No. 4 seca al aire.

3.5.3 Caracterización geotécnica de los materiales reciclados para rellenos

La caracterización de las propiedades geotécnicas para el material obtenido de los residuos de excavación y posterior mezcla con el pasante No. 4 del ARCe se llevó a cabo en tres etapas como se describe a continuación:

1. Caracterización básica: los ensayos de caracterización básicos efectuados se presentan en la Tabla 18, estos tuvieron como objeto conocer el material y contrastar los resultados obtenidos con el estudio de suelos inicial.
2. Verificación del potencial expansivo: como método directo se empleó la expansión en consolidómetro, este se efectuó según la norma ASTM D2487-17.
3. Evaluación de la resistencia y las características de deformabilidad mediante la compresión simple siguiendo el procedimiento ASTM D2216-16.

Tabla 18. Ensayos de caracterización básicos efectuados sobre los suelos provenientes de excavaciones.

Ensayo	Norma empleada
Granulometría por tamizado	ASTM D2488-17
Hidrometría	ASTM D4221-18
Gravedad Específica	ASTM D2854-14
Límites de Atterberg	ASTM D4318-17
Clasificación USCS	ASTM D2487-17
Índice de Expansión	ASTM D4829-11

A continuación, se relacionan algunos detalles empleados en la determinación de las propiedades del suelo.

Granulometría por tamizado (ASTM D2488, 2017): este ensayo ayuda a definir la distribución de los diferentes tamaños de las partículas de un suelo, el cual se expresa como un porcentaje en relación del peso total de la muestra seca a través de un proceso de tamizado. Donde para cada una de las muestras se sumergió el material 24 horas en agua para ser lavado en el tamiz No. 200 y continuar con el secado al horno; una vez seco se realiza la granulometría de acuerdo con los tamices 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", No.4, No.8, No.10, No.16, No.30, No 40, No 50, No. 100, No.200 y pasante 200 (ver Anexos del 24 al 29). El ensayo

fue ejecutado posterior al lavado sobre el tamiz No. 200, en Figura 40 se presentan las muestras secas después del lavado previo al tamizado mecánico.



Figura 40. Muestras de suelo para iniciar proceso de tamizaje. Fuente: el autor.

Hidrometría (ASTM D4221, 2018): el hidrómetro se utiliza para determinar el porcentaje de partículas de suelos dispersados que permanecen en suspensión por un determinado tiempo. Su procedimiento fue haber pasado el material por el tamiz No. 200 sacando 50 g de material dejándolo en un recipiente con agente flocculante (hexametáfosfato de sodio) dejando en reposo por 1 día para favorecer la acción del defloculante (ver Figura 41). Posteriormente se agita el material mediante un agitador mecánico durante 1 minuto para introducirla en la probeta de 1000 cm³ con agua destilada, agitando nuevamente la mezcla dentro de la probeta manualmente para luego dejar sedimentar e iniciar el registro de los datos con el cronómetro y el termómetro eléctrico (ver Anexos del 36 al 41).

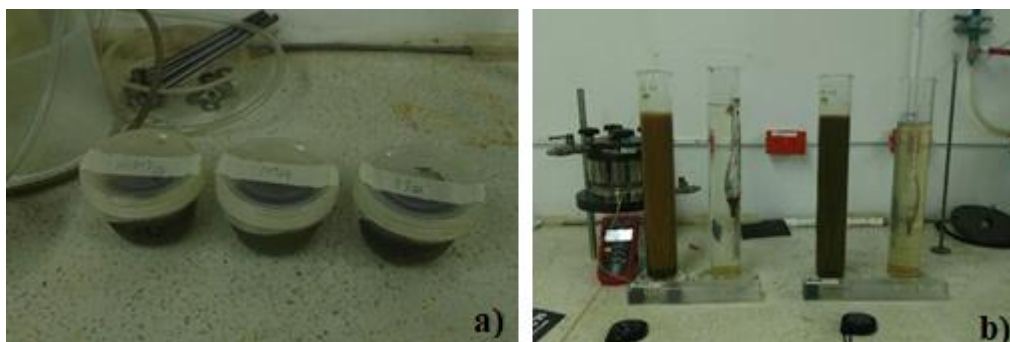


Figura 41. a) Muestras en preparación; b) muestra en probeta lista a inicio de ensayo. Fuente el autor.

Gravedad específica (ASTM D2854-14): es la relación de la densidad de un material con respecto a la densidad del agua, la cual es usada para calcular el grado de saturación y la relación de vacíos. Para este estudio se empleó el método A en el que consistió en pasar por el tamiz No. 4 las muestras de suelo para introducirlas en el picnómetro luego se adicionó el agua y mediante la bomba de vacío se extrajo el aire atrapado, posteriormente se llenó con agua destilada hasta la línea de aforo procediendo a pesar y a tomar la temperatura. Una vez tomado los datos anteriores se introduce la muestra en un recipiente para ser llevado al horno y obtener el cálculo final. Para cada una de las muestras se realizaron 3 ensayos de gravedad específica (ver Anexos del 30 al 35).



Figura 42. (a) Muestra por el tamiz No. 4; (b) ensayo de gravedad específica. Fuente: el autor.

Límites de Atterberg (ASTM D4318-17): los límites se efectuaron sobre muestras preparadas vía húmeda y después de secado al horno.

Clasificación USCS (ASTM D2487-17): debido a la posibilidad de material orgánico en los dos primeros estratos, identificado como con presencia de limos orgánicos. Se adelantó como parámetro complementario el límite líquido a partir de la humedad natural y el límite líquido después del secado al horno, tal como lo sugiere la norma especificada.

Índice de Expansión (ASTM D4829-11): En este ensayo se realizó a cada una de las 6 muestras aplicando los procedimientos indicados en la norma disponiendo por cada ensayo aproximadamente 2 kg de suelo donde se realiza 3 capas cada una aplicando 25 golpes en cada capa con el martillo compactador, una vez finalizada la compactación se enrasa y se

separa la camisa superior para posteriormente tallar y adquirir la muestra en el anillo. Con este método se determinará de forma directa si las muestras de suelos son potencialmente expansivos, mediante el consolidómetro servo controlado, teniendo en cuenta previamente el grado de saturación del $50\pm 2\%$, requiriendo los datos del anillo (diámetro, altura, peso), el proceso para obtener la muestra del anillo se obtuvo de la compactación y posteriormente el tallado del anillo se toma los datos del peso del anillo + muestra y se ingresa a ensamblar la muestra debidamente con su papel filtro para ser saturada. Se ingresa al horno la muestra para la obtención de los datos como peso húmedo y seco, peso unitario húmedo y seco y así verificar la saturación inicial antes del proceso de expansión en el consolidómetro. En la Figura 43 se muestra una probeta de material después del ensayo.

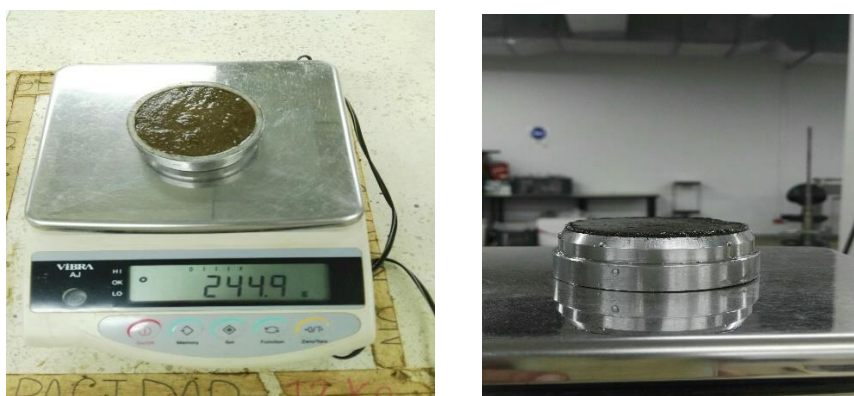


Figura 43. Anillo para ensayo de expansión. Fuente el autor.

De manera previa se llevó a cabo el Proctor estándar en los dos materiales en suelo y polvo de ladrillo (3 capas de 25 golpes cada capa con la misma energía de compactación (la misma persona) obteniendo los datos de peso del molde, peso del molde más muestra y peso seco después de ser llevada al horno). Previo a la ejecución del ensayo Proctor se separó el material para emplear el molde pequeño y todos los puntos se humedecieron con al menos 14 horas de reposo antes de la compactación, en la Figura 44 se muestran los momentos empleados. Cabe resaltar también que se proyectaron sólo dos ensayos de compactación Proctor para tener la referencia de los pesos unitarios ambos sobre material pasante el tamiz No. 4, el primero en el suelo después de retirar las gravas y el segundo en el ARCe.



Figura 44. Realización de ensayo de Proctor estándar: a) compactación de las muestras; b) pesaje; c) ajuste de la humedad y reposo; y d) enrase al final del ensayo. Fuente: el autor.

3.5.4 Elaboración de probetas para verificar el comportamiento del material de relleno

Para la elaboración de los cuerpos de prueba, necesarios para verificar el desempeño a partir de la resistencia a la compresión simple y el módulo de elasticidad de las mezclas de suelo y ARCe ambos pasantes del tamiz No. 4 se empleó el peso unitario seco del Proctor normal como referencia a alcanzar. Con el objeto de evitar tallar muestras compactadas con el molde pequeño del Proctor se construyó el molde mostrado en la Figura 45. El molde consiste en cuatro piezas de acero, una pieza tubular, una base, un falso fondo, y un émbolo o tarugo, dimensionados para obtener muestras finales de 50 mm de diámetro y 100 mm de altura.

Para el método de compactación se siguió el siguiente procedimiento para la confección de cada cuerpo de prueba:

1. Mezcla de suelo con ARCe, o con ausencia de él en la humedad después de secado (humedad higroscópica);
2. Ajuste de la humedad a partir de los resultados del Proctor normal, considerando la absorción del ARCe;
3. Guarda de cada muestra en doble bolsa para garantizar al menos 14 horas de reposo con la humedad objetivo;
4. A las 14 horas, separación de cada muestra en tres partes iguales para el proceso de compactación semiestática con la ayuda de la prensa de compresión triaxial;
5. Compactación de cada capa, empleando el molde una vez lubricado con vaselina sólida, cada capa fue compactada empleando una velocidad de 40 mm/min hasta una altura de un tercio de la altura total de la muestra o hasta alcanzar una fuerza máxima de 10 kN en el embolo o tarugo (ver Figura 46). Es importante anotar que esta compactación se hace en una trayectoria confinada o k_0 , ya que el molde no permite ninguna deformación lateral o radial en el espécimen, dada su rigidez.;
6. Retiro y desmoldado de cada muestra, etiquetado y reservado en doble bolsa previo al ensayo de resistencia a la compresión, dejando un reposo de un día.



Figura 45. Molde para la compactación de los especímenes con mezclas de suelo y ARCe.
Fuente: el autor.



Figura 46. Montaje del molde en la prensa triaxial para la compactación semi-estática.

Con este procedimiento se compactaron, cuatro muestras por cada proporción de mezcla siguiendo las relaciones que se listan en la Tabla 19.

Tabla 19. Nomenclatura y descripción de las muestras analizadas. Fuente: el autor

Nomenclatura	Descripción
MS	Muestra de suelo
S+5ARCe	Muestra de suelo con una adición del 5% en peso de ARCe
S+10 ARCe	Muestra de suelo con una adición del 10% en peso de ARCe
S+20 ARCe	Muestra de suelo con una adición del 20% en peso de ARCe
S+40 ARCe	Muestra de suelo con una adición del 40% en peso de ARCe

3.5.5 Análisis del comportamiento esfuerzo deformación

Una vez confeccionados los cuerpos de prueba se procedió a cargarlos de forma uniaxial para evaluar sus características de resistencia y deformabilidad. En todos los casos el tiempo máximo entre la elaboración del cuerpo de prueba y la ejecución del ensayo no superó un día, razón por la cual se elimina el efecto del tiempo o curado además de la pérdida de humedad que puedan tener los mismos.

El procedimiento se hizo basado en la norma ASTM D 2166 (Método de Ensayo para Resistencia a la compresión no confinada de Suelo Cohesivo), cumpliendo con las

características de relación diámetro altura de la muestra y de velocidad de aplicación de la carga, así como la corrección del área para calcular el esfuerzo axial.

La resistencia a la compresión se obtuvo a partir del criterio de esfuerzo desviador máximo o resistencia pico ($q_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_{Max}$). Para el caso del módulo de elasticidad se empleó el módulo E_{50} , definido como el módulo secante al 50% de la resistencia máxima (ver Figura 47).

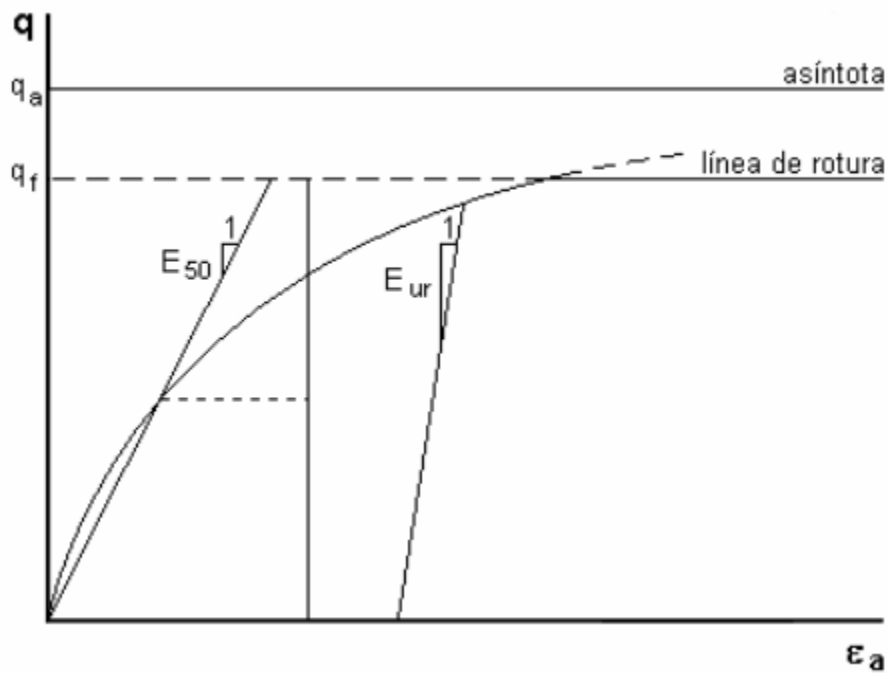


Figura 47. Forma de obtención del módulo de elasticidad E_{50} para las muestras de suelo y ARCe. Fuente: Plaxis (2006).

4. ALTERNATIVA 1 DE APROVECHAMIENTO: CONCRETO

Tal como se mencionó en el Capítulo 3, la primera alternativa de aplicación es en la sustitución del agregado natural para la elaboración de concreto. A continuación, se describirá la caracterización de los materiales utilizados, la dosificación de los concretos usados y las propiedades en estado fresco y endurecido para finalmente realizar el análisis de las conclusiones.

4.1 Caracterización de los materiales

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización de los materiales empleados en la mezcla del concreto, los cuales son:

- Agregado grueso derivado de diabasa proveniente de la cantera Cachibí;
- El agregado fino, arena mediana proveniente del río Paila;
- Cemento portland tipo I de la marca Argos;
- Agregado reciclado derivado de residuos de ladrillo ARCe.

En este trabajo se empleó el agua del laboratorio de Mezclas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, de la Sede Pance, la cual es un agua potable tratada localmente que no fue sujeta a caracterización.

4.1.1 Granulometría por tamizado

El tamaño y distribución de las partículas se llevó a cabo mediante tamizado mecánico por vía seca. A continuación, se describen los resultados obtenidos en cada uno de los materiales mencionados anteriormente.

4.1.1.1 Granulometría del agregado grueso natural

En la Figura 48 se presenta la curva de distribución granulométrica del agregado grueso natural (en el Anexo 1, se reportan los datos obtenidos). El módulo de finura de este material fue de 7, y el tamaño máximo nominal de 25,4 mm. Con base en los resultados, se

puede establecer que el agregado grueso natural cumple con la franja granulométrica estipulada dentro de los rangos establecidos por la NTC 174 (2000), que indica la especificación de los agregados para la elaboración de concreto.

En el diseño de mezcla se indica que la grava utilizada es de $\frac{3}{4}$ ", para ello se realiza la granulometría y vemos que el tamaño máximo nominal es de 1" cumpliendo con los parámetros de la NTC 174 (2000) que indica los parámetros para la realización de los concretos.

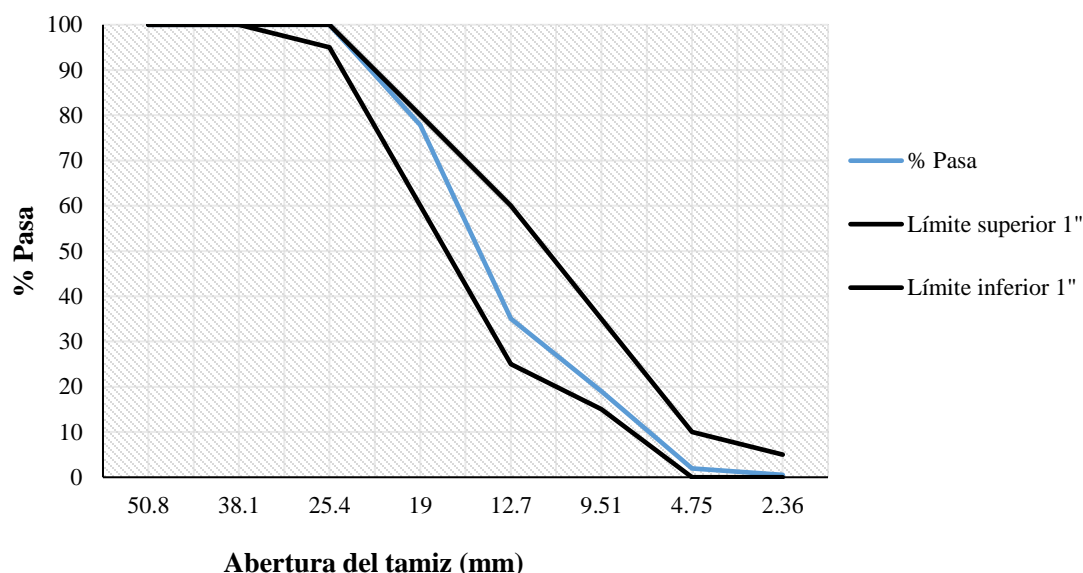


Figura 48. Granulometría del agregado grueso natural y husos de la NTC. Fuente: el autor.

4.1.1.2 Granulometría del agregado fino natural

La función de distribución del tamaño de las partículas para el agregado fino, presentó un comportamiento multimodal (gap curve), con tres tamaños medios dominantes en 4,75, 1,18 y 0,3 mm (ver Figura 49), en términos del módulo de finura este exhibe un valor de 3,1. Con relación a los husos definidos en la normativa colombiana se observa que para los tamices superiores se encuentra por fuera de los rangos delimitados en la curva del límite inferior, pero después el material se cumple con los límites especificados en la norma NTC 174 (2000), estableciendo la gradación en el agregado fino.

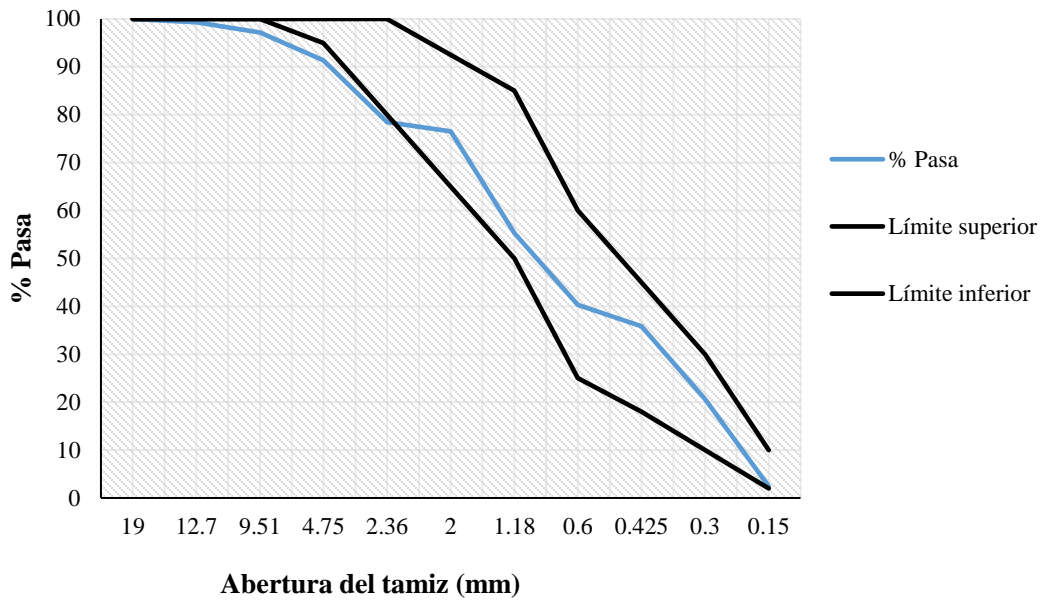


Figura 49. Granulometría del agregado fino natural y husos de la NTC. Fuente: el autor.

4.1.1.3 Granulometría del agregado reciclado ARCe

Dada la variabilidad reportada por otros autores en las propiedades de los agregados derivados de residuos de construcción y demolición (Rengifo & Chavez, 2015), se trabajaron 5 muestras de forma independiente para la determinación del tamaño y distribución de las partículas, en la Figura 50 se presentan los resultados obtenidos, en general todas las curvas son unimodales con un tamaño máximo nominal de 38,1 mm. Se puede observar que las cinco muestras después de ser trituradas y cuarteadas son similares en los resultados de la granulometría. En la Tabla 20 se presentan los valores de referencia del tamaño de las partículas, incluyendo el módulo de finura

Tabla 20. Características de la granulometría ARCe. Fuente: el autor.

Descriptor	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Tamaño Máximo	1½"	1½"	1½"	1½"	1½"
Tamaño Máximo Nominal	¾"	1"	¾"	¾"	1"
Módulo de Finura	5,9	6,4	5,7	6,1	6,3

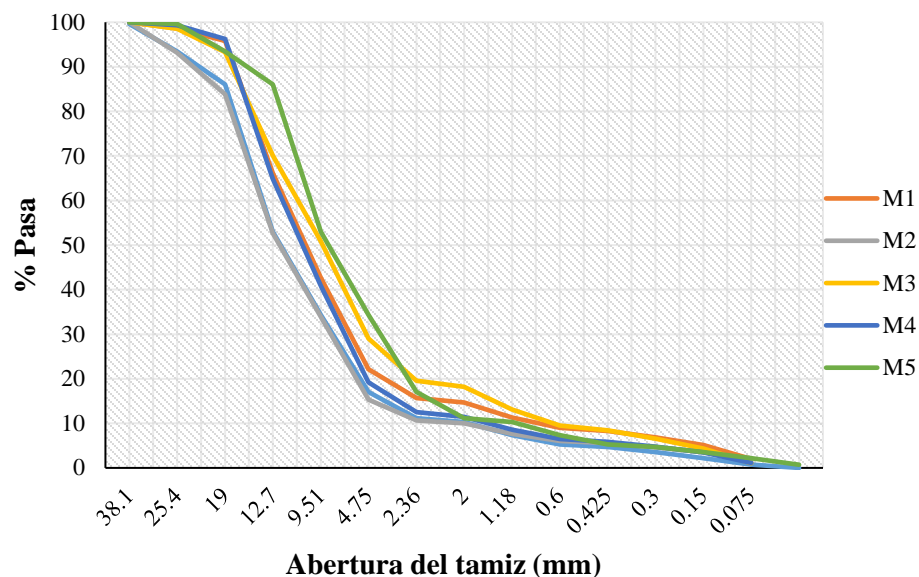


Figura 50. Granulometría de las muestras de ARCe. Fuente: el autor.

Con la información de la Tabla 20 se determinó la ubicación relativa respecto a la franja granulométrica con base en el tamaño máximo nominal de cada muestra; encontrando que a pesar que presentan una similitud en los resultados las cinco muestras se encuentran en diferentes franjas granulométricas como se muestra en Figura 51 y Figura 52.

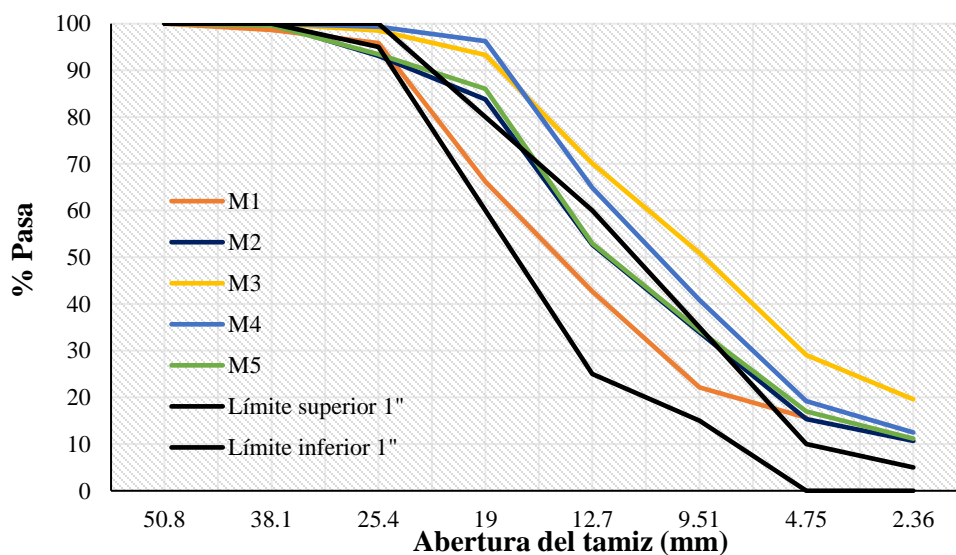


Figura 51. Granulometría del ARCe comparada con los límites de la (NTC 174, 2000) para agregados de 1". Fuente: el autor.

En la curva granulométrica para agregados de 1" se puede evidenciar que las muestras 1, 2 y 5 se encuentran dentro de la franja establecida, aunque en ciertos tamaños de tamices se sale de la franja del límite superior.

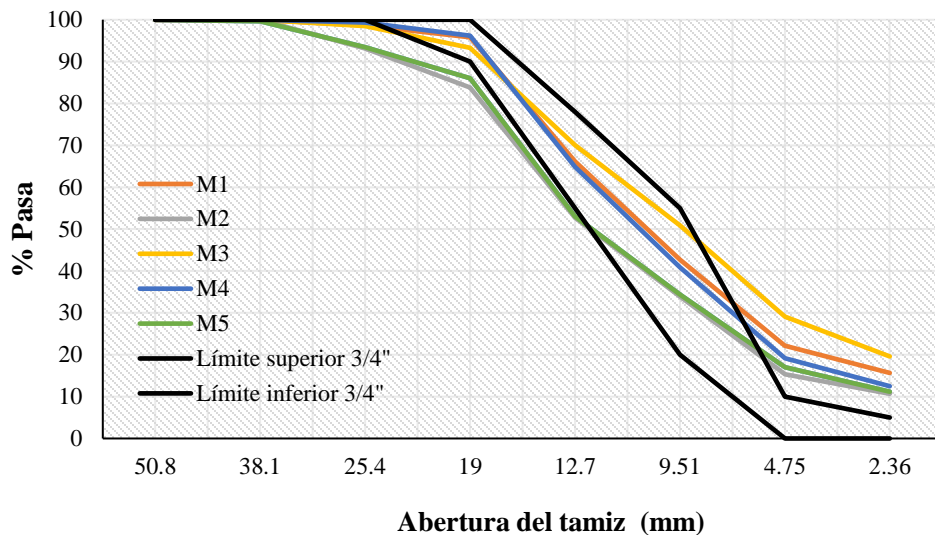


Figura 52. Granulometría del ARCe comparada con los límites de la NTC para agregados de 3/4". Fuente: el autor.

Para la curva granulométrica con agregado de 3/4", se observa que las muestras 1, 3 y 4 se encuentran dentro de la franja exceptuando en los tamices finales que se aleja de la curva del límite superior.

En general La curva granulométrica del ARCe, se encuentra dentro de la franja permitida, pero existe un porcentaje en ciertos tamaños de tamices que podrán ser ajustados mediante la inclusión de agregado para que la curva sea más uniforme y por ende también mejore las propiedades físicas del agregado reciclado de concreto. Se concluye que las cinco muestras presentan una aceptación en las curvas granulométricas de 3/4 y 1", estando dentro de los parámetros para la realización del remplazo en porcentajes de la grava como agregado natural.

4.1.2 Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos

Considerando que la alternativa de aplicación 1, en mezclas de concreto como sustitución del agregado natural es el objeto de esta caracterización se analizaron los

resultados de gravedad específica y absorción tanto del agregado natural como del ARCe. En la Tabla 21 se muestran los resultados promedio por tipo de material.

Tabla 21. Resultados promedio de gravedad específica y absorción de los agregados gruesos. Fuente: el autor.

Tipo de agregado	Gravedad específica bulk (Gsb)	Gravedad específica bulk saturada superficialmente seca (Gsb sss)	Gravedad específica aparente (Gsa)	Absorción (%)
Agregado natural	2,85	2,90	3,03	1,8
ARCe	1,85	2,16	2,70	17,3

Martínez (2021), caracterizó las propiedades de ambos agregado en un proyecto similar, de la misma constructora y con materiales de los mismos proveedores, encontrando valores ligeramente más bajos con relación a la gravedad específica 2,67, 2,76 y 2,96 (para Gsb, Gsb sss y Gsa, respectivamente), y una absorción ligeramente menor de 1,01%; por otro lado, Bravo & Bravo (2019) caracterizaron el mismo material obteniendo valores de 2,93, 2,85 y 2,81 (para Gsb, Gsb sss y Gsa, respectivamente), y una absorción apenas menor de 1,5%, en términos generales se puede decir que el material natural se encuentra dentro del mismo rango, y que las diferencias encontradas pueden reflejar la variabilidad natural del material y los errores en la ejecución del ensayo

Martínez (2021), evaluó un ARCe de características similares, encontró valores de gravedad específica de 1,87, 2,19 y 2,74 (para Gsb, Gsb sss y Gsa, respectivamente), ligeramente más altas que las evaluadas en este trabajo, y una absorción de 16,8%, que es ligeramente menor a la obtenida en la presente investigación. Nuevamente, estos valores son similares a los encontrados, sin embargo, al compararse con los naturales presentan una absorción elevada. Debido a ello, este parámetro es crítico en la elaboración de concretos, ya que se debe de hacer una correcta saturación de todos los agregados para no afectar el valor final de la relación agua cemento en las mezclas.

4.1.3 Gravedad específica y absorción de los agregados finos

En la Tabla 22 se presentan los resultados promedio de la gravedad específica de los agregados finos. En términos generales se aprecia como la absorción es mayor en los ARCe con relación a los agregados naturales, y particularmente la absorción es mayor en los ARCe del presente estudio con relación a los estudiados por Martínez (2021) cuyo material original es del mismo fabricante.

Tabla 22. Resultados promedio de gravedad específica y absorción de los agregados finos. Fuente: el autor.

Tipo de agregado	Gravedad específica bulk (Gsb)	Gravedad específica bulk saturada superficialmente seca (Gsb sss)	Gravedad específica aparente (Gsa)	Absorción (%)
Agregado natural (Presente estudio)	2,68	2,71	2,76	1,09
ARCe (Presente estudio)	2,07	2,41	3,16	16,2
ARCe (Martínez, 2021)	2,04	2,30	2,76	12,7

La determinación individual de la gravedad específica en el ARCe fue la que presentó mayor variabilidad, con coeficientes de variación muestral entre 8 y 12%, con relación a la absorción que fue del 6%, lo que refleja de algún modo la variabilidad intrínseca del material reciclado proveniente de cerámicos, el hecho de que la variabilidad de la absorción sea menor es positivo ya que no se afectaría de manera significativa la relación agua cemento de las mezclas y los ajustes de humedad por absorción serían más efectivos. Si bien, se caracterizó la fracción fina del ARCe, en las sustituciones sólo se trabajó con la fracción gruesa.

4.1.4 Peso unitario aparente del ARCe

Dentro de la cuantificación de la producción de residuos en obra, y en muchos casos en la elaboración de concretos en obra es más común dosificar por volumen que por peso, por ello los pesos unitarios aparentes cobran una importancia vital en la conversión de unidades y correcta dosificación o cuantificación. En la Figura 53 se presentan los resultados obtenidos en el diagrama de caja y bigotes, en general los pesos unitarios del ARCe oscilaron entre 839 y 989 kgf/cm³, con un sesgo de la distribución hacia los valores bajos, de forma

prácticamente igual a los resultados obtenidos por González (2021), en un proyecto de igual configuración de la misma constructora, resultados que son inferiores a los encontrados por Martínez (2021) en un proyecto diferente de la misma constructora.

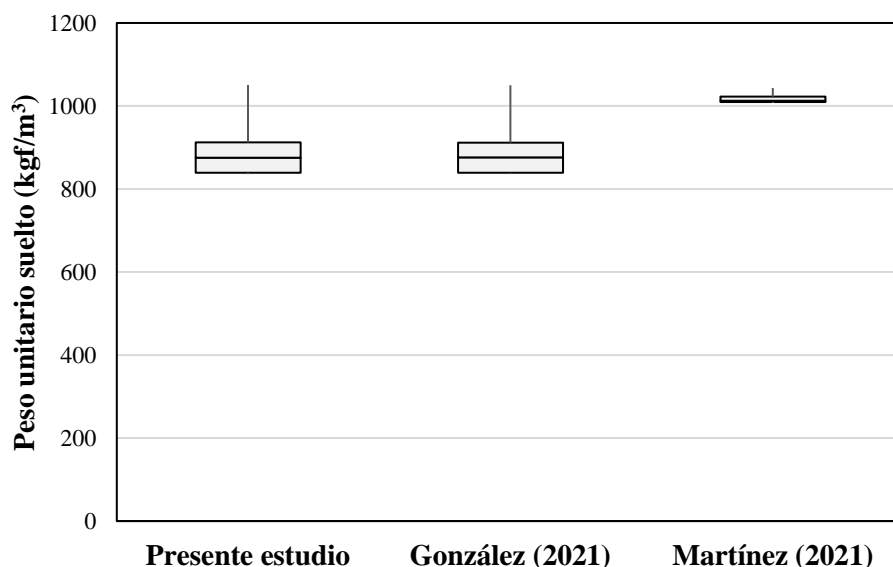


Figura 53. Resultados de peso unitario de los ARCe del presente estudio y otros autores. Fuente: el autor.

4.1.5 Caracterización del cemento

El cemento utilizado para las fundiciones de los concretos es el cemento portland tipo I de la marca Argos, en la Tabla 23 se resumen las propiedades físicas del mismo. En general el cemento cumple con las especificaciones.

Tabla 23. Propiedades físicas y mecánicas del cemento. Fuente: el autor.

Ensayo	Resultado	Unidad	Referencia NTC-121
Finura	4.623	cm ² /g	mínimo 2.800
Peso específico	3,05	g/cm ³	--
Tiempo de fraguado	Inicial 125	min	45
	Final 3	horas	8

4.2 Resultados obtenidos en los concretos elaborados en laboratorio

Tal como se mencionó en la metodología, la evaluación de la alternativa de uso reemplazando agregados naturales en el concreto se llevó a cabo a partir de una serie de reemplazos y con el seguimiento del asentamiento para las mezclas en estado fresco, y propagación de pulsos ultrasónicos y resistencia a la compresión para el estado endurecido. Las sustituciones o reemplazos del agregado natural por ARCe se efectuaron a partir de la dosificación empleada por la constructora en el caso de estudio, haciendo los ajustes necesarios para no modificar la relación agua cemento ni las cantidades de material estipuladas para obtener una resistencia de 21MPa (3000 psi).

4.2.1 Propiedades en estado fresco

Para verificar la trabajabilidad en cada diseño de concreto realizado se determinó la toma de asentamiento determinada por el cono de Abrahams, una vez se realiza la elaboración del concreto se efectúa para cada mezcla. En la Tabla 24 se resumen los resultados obtenidos, en general a mayor sustitución del agregado natural por ARCe mayor es el efecto en el asentamiento, esta tendencia es análoga a la encontrada por Diosa (2020) al sustituir agregados derivados de concreto. Al comparar los resultados con los obtenidos por Martínez (2021), a mayor reemplazo mayor el efecto en el asentamiento, si es excluido el asentamiento base sin el reemplazo.

Tabla 24. Resultado del asentamiento, propiedades en estado fresco. Fuente: el autor.

Mezcla	Presente estudio		Martínez (2021) *		Diosa (2020)	
	Asentamiento (cm)	Cambio relativo (%)	Asentamiento (cm)	Cambio relativo (%)	Asentamiento (cm)	Cambio relativo (%)
DM	8	--	4,8	--	10	--
ARCe10	6	-25	10,0	108	8	-20
ARCe20	6	-25	9,8	104	12	20
ARCe40	3	-63	8,7**	81	3,5	-65

* Concretos elaborados en obra; ** Concreto con reemplazo del 33% del agregado grueso por ARCe.

Diferentes teorías o ideas han sido expuestas para entender dicho efecto como la mencionada por Martínez (2021), citando a Kumar (2017), donde la reducción del

asentamiento en este tipo de concretos se puede presentar por cambios en la superficie específica y la forma de los agregados reciclados en comparación con los naturales.

4.2.2 Propiedades en estado endurecido

Para conocer el comportamiento mecánico se realizaron los ensayos de resistencia a la compresión y simultáneamente los ensayos de velocidad de pulso ultrasónico descritos a continuación:

4.2.2.1 Resistencia a la compresión

Se realizaron los ensayos de resistencia a compresión de los cilindros nombrados como lo indica la NSR10 y NTC 673, el cual consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros a una velocidad que se encuentra dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla, en la Tabla 25 se presentan los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión, en general el incremento de ARCe en la mezcla reduce la resistencia a la compresión, hecho que ha sido observado por diferentes autores. Con relación al remplazo del 20 y 40% se obtuvieron resultados muy similares.

Tabla 25. Resultados de la resistencia a la compresión de los cilindros. Fuente: el autor.

Referencia	3 días (MPa)	7 días (MPa)	28 días (MPa)
DM	12,6	16,6	26,6
ARCe10	8,4	14,4	23,3
ARCe20	7,3	12,0	20,2
ARCe40	6,6	12,1	21,1

En las Figura 54, 55 y 56 se presentan los resultados en las edades de 3, 7 y 28 días de la resistencia a la compresión en función de la sustitución de agregado grueso natural por ARCe. Para los cilindros ensayados a los tres días es evidente la reducción de la resistencia a la compresión cuando se incrementa la sustitución de agregado natural por ARCe, siendo del orden del 50% para la sustitución del 40%, además se aprecia que dicha tendencia tiene un comportamiento no lineal, otro rasgo importante es la amplitud en la caja y los bigotes con el uso de ARCe, mostrando que se incrementa la variabilidad del material y por tanto la confiabilidad de los resultados, en términos de diseño esto podría implicar el uso de un coeficiente de reducción de resistencia mayor.

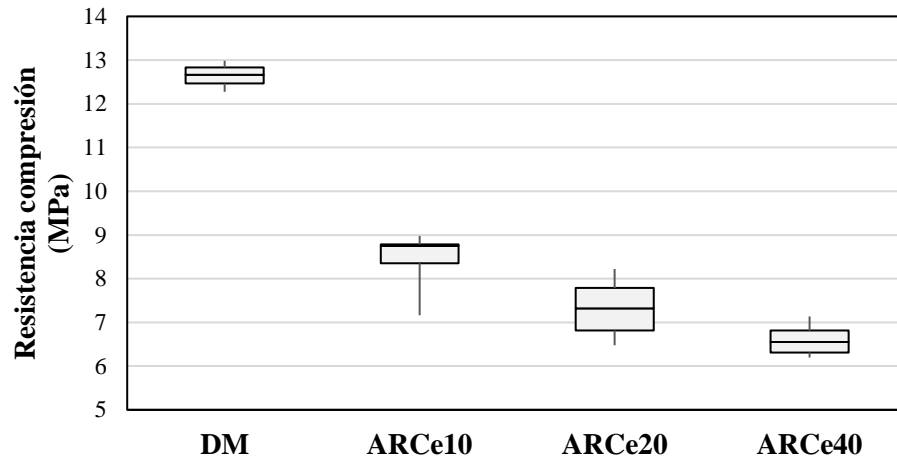


Figura 54. Comparación de los resultados de la resistencia a la compresión a los 3 días. Fuente: el autor.

Los resultados de las probetas ensayados a los siete días tienen un comportamiento similar a las de 3 días, es decir, el incremento de reemplazo reduce la resistencia, sin embargo, difiere en que la muestra sin reemplazo presentó la mayor variabilidad (ver Figura 55), este puede ser un comportamiento derivado de algún error de laboratorio que no fue detectado, como la compactación de los cilindros.

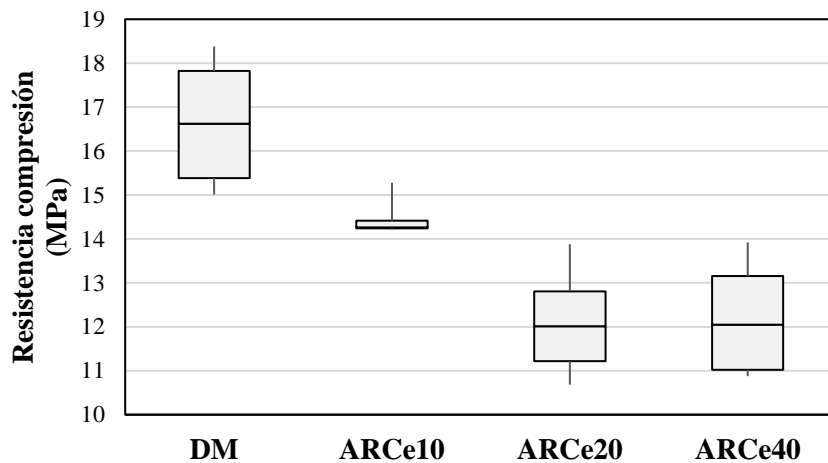


Figura 55. Comparación de los resultados de la resistencia a la compresión a los 7 días. Fuente: el autor.

El efecto de la sustitución de agregado natural por ARCe en cilindros con 28 días de curado fue similar al observado para los otros tiempos de ensayo, es decir, hay una reducción de la resistencia con el incremento del reemplazo. No obstante, en las muestras elaboradas con

el 20% de ARCe se presentó la menor resistencia media y la mayor variabilidad (ver Figura 56). Al hacer la inspección visual de las muestras, se observó que los cilindros del 20% presentaban algunos defectos notorios en su textura superficial como hormigueros que podrían estar influenciando los resultados y la variabilidad de los mismos.

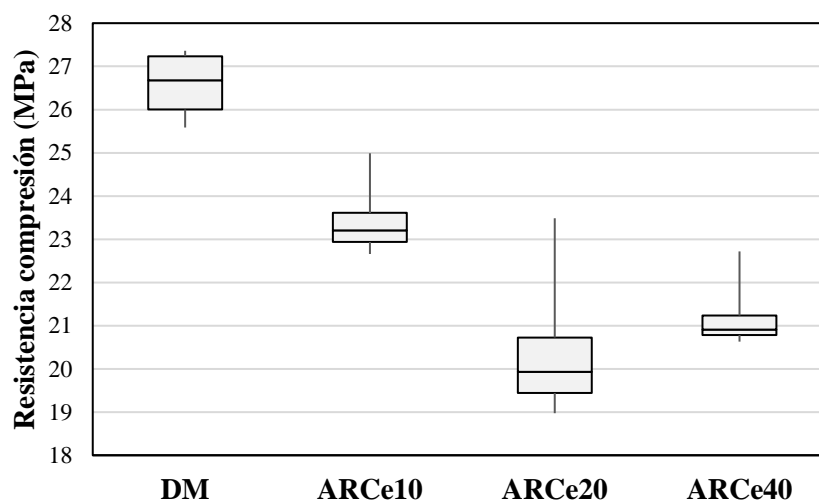


Figura 56. Comparación de los resultados de la resistencia a la compresión a los 28 días. Fuente: el autor.

En los resultados a los 28 días presentó una mejor resistencia con ARCe40, sin embargo, en la Figura 57 se muestran los cilindros ensayados a los 28 días, en la misma es posible observar que los cilindros del 20% presentaban algunos defectos notorios en su textura superficial como hormigueros, y la reducción alta de la resistencia a la compresión puede ser debida a defectos en la confección de los mismos.

Martínez (2021), analizó dos concretos, uno en obra y otro en el laboratorio, para los concretos en laboratorio obtuvo resistencias sin sustitución de 13,3 y 17,9 MPa en edades de 7 y 28 días respectivamente, y para mezclas con sustitución de ARCe del 20% obtuvo resistencias de 12,6 y 18,3 9 MPa en edades de 7 y 28 días respectivamente; lo que implica una reducción de la resistencia, de forma análoga a la encontrada la sustitución incrementó la variabilidad del resultado.



Figura 57. Cilindros ensayados a 28 días: a) diseño base; b) diseño con 10% ARCe; c) diseño con 20% ARCe; y d) diseño con 40% ARCe. Fuente: el autor.

En la Figura 58 se muestran los resultados promedios de la resistencia a la compresión en función de la sustitución de agregado natural por ARCe para diferentes edades, en general la menor reducción en la resistencia se obtiene para el menor remplazo del agregado natural. También es de destacar que todos los concretos con remplazo tuvieron resistencias a los 28 días del orden de los 21MPa.

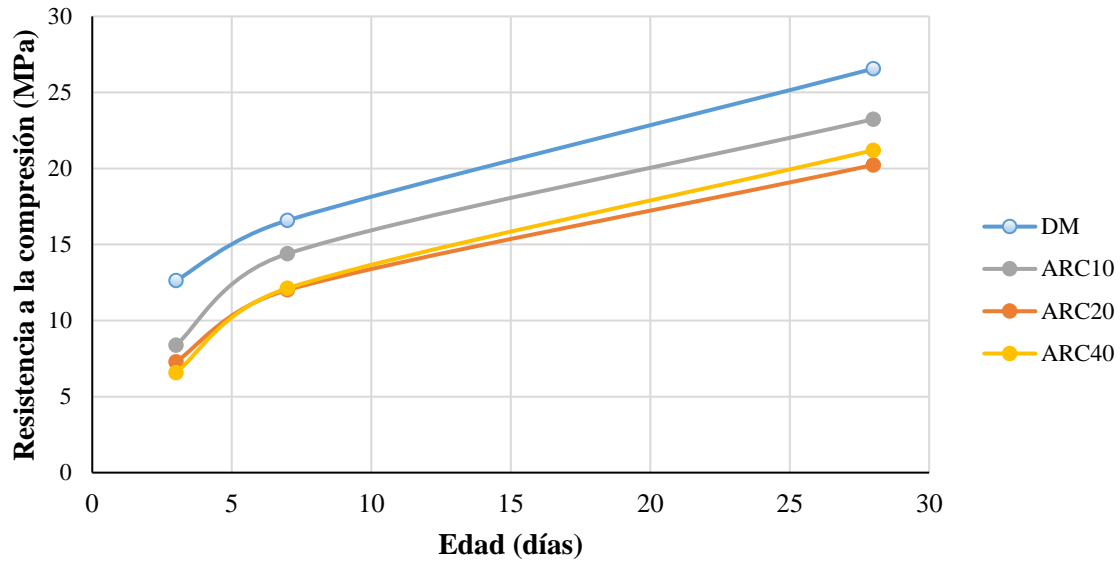


Figura 58. Efecto de la edad en la resistencia en función de la sustitución de agregado natural por ARCe. Fuente: el autor.

4.2.2.2 Velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos

Este método determina el comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico en función del tiempo, aplicable para evaluar la uniformidad y calidad del concreto como también indica la presencia de grietas y vacíos. Este método se usó como un segundo criterio de evaluación en la resistencia de los cilindros en concreto ensayados en las mismas edades (ver Figura 59). En la Tabla 26 se presentan los promedios obtenidos para la UPV, de forma similar a la resistencia, para las muestras de 28 días la velocidad decrece con el incremento en el porcentaje de remplazo (ver Figura 60).



Figura 59. Toma de dimensiones del cilindro y ensayo de velocidad de pulso ultrasónico. Fuente: el autor.

Tabla 26. Resultados de la velocidad de pulso ultrasónico para los concretos realizados. Fuente: el autor.

Diseño	UPV (m/s)		
	3 días	7 días	28 días
DM	3440	-	4518
ARCe10	3742	3868	4163
ARCe20	3458	3521	4125
ARCe40	3328	3643	3971

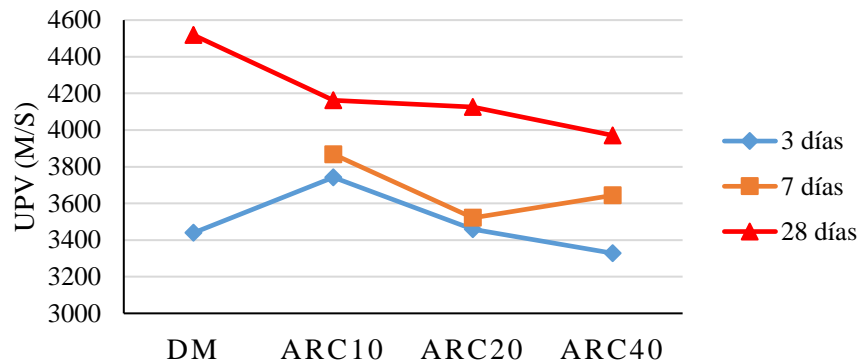


Figura 60. Aumento de velocidad de pulso ultrasónico a edades de ensayo. Fuente: el autor.

Para la propagación de pulsos ultrasónicos, después de los 7 días todas las mezclas arrojaron resultados buenos (ver Tabla 27).

Tabla 27. Resultados de ensayo de ultrasonido según tabla de (Neville, 1997). Fuente: el autor.

Diseño	3 días Velocidad (m/s)	7 días Velocidad (m/s)	28 días Velocidad (m/s)
DM	Regular	-	Excelente
ARC10	Bueno	Bueno	Bueno
ARC20	Regular	Bueno	Bueno
ARC40	Regular	Bueno	Bueno

De forma similar a los concretos convencionales con agregados naturales hay una relación entre la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos y la resistencia a la compresión (ver Figura 61), y para el caso de la resistencia a los 28 días la misma tiene un coeficiente de correlación lineal ρ igual a 0,878.

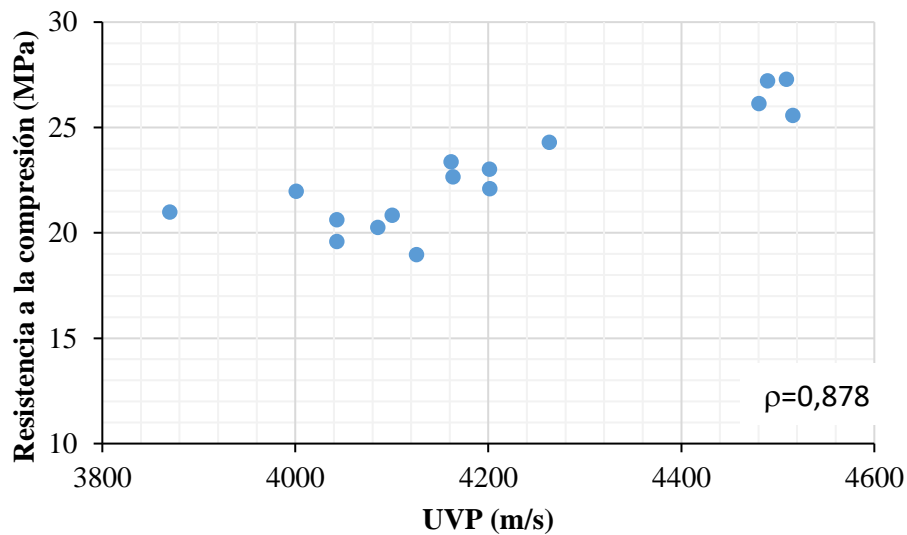


Figura 61. Relación entre la resistencia a la compresión a los 28 días y la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos.

5. ALTERNATIVA DE APLICACIÓN 2: MATERIAL DE RELLENO

Tal como se mencionó en el Capítulo 3 para el proyecto objeto de estudio el ingeniero geotecnista recomendó remplazar parte de los dos primeros estratos por un relleno conformado con balastro (roca muerta o roca parcialmente meteorizada). En este capítulo se estudia la segunda posibilidad de aplicación, mezclándole a los residuos finos de la excavación polvo de ladrillo derivado de la zona de corte.

5.1 Caracterización básica del suelo

Tal como fue proyectado en la metodología se tomaron seis muestras independientes de suelo, numerándolas de la MS1 a la MS6, debido a la naturaleza del depósito torrencial encontrado (ver Figura 25), se llevó a cabo inicialmente la humedad natural y la granulometría.

En la Figura 62 se presenta la distribución granulométrica de las muestras obtenidas, en general las muestras MS1 y MS6 son las que presentan mayor porcentaje de gravas con valores de 72 y 44% respectivamente, mientras que en las muestras MS2 a MS5 el porcentaje de finos es del orden del 65 al 76%, es decir, predominan los tamaños limo y arcilla.

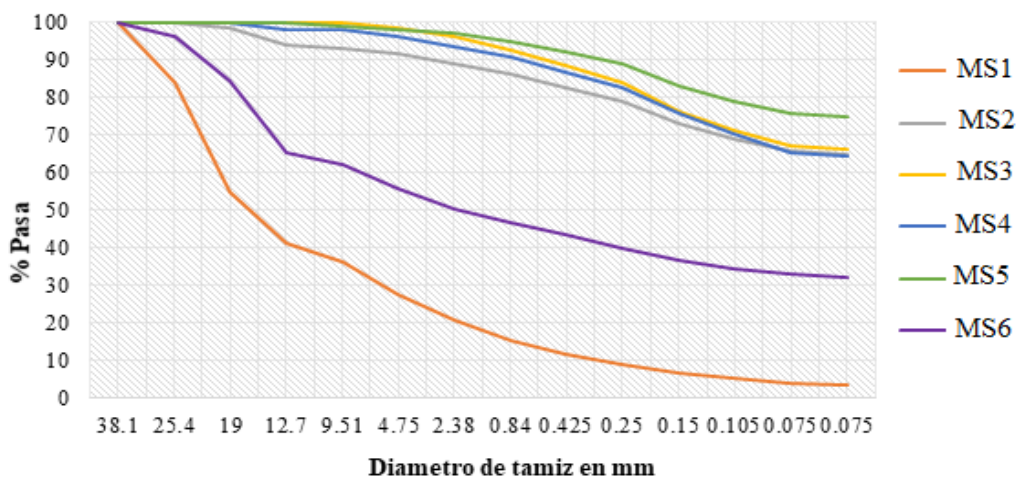


Figura 62. Granulometría por tamizado del suelo muestrado en el sitio de obra.

Debido a las características granulométricas descritas en el desarrollo del trabajo experimental se llevó a cabo una separación inicial tomando como referencia el tamiz No. 4 (4,75 mm), condición en la cual se pueden obtener dos tipos de materiales: grava redondeada para filtros y concretos y suelo fino para rellenos estructurales (ver Figura 39). El interés de esta aplicación será la parte fina del depósito torrencial, que para este caso incluye arenas limos y arcillas, la cual constituye aproximadamente el 50% del volumen total.

Con el objeto de clasificar adecuadamente el suelo, la granulometría por tamizado se complementó con la granulometría por hidrómetro, en la Tabla 28 se presentan los resultados de los tipos de tamaños encontrados, a partir de la granulometría el mayor contenido de partículas tamaño arcilla está en la muestra MS5 que equivale al 26% del peso total del material analizado, el contenido promedio de arcilla para las muestras MS2 a MS5 es del orden del 23% que sería el material dominante en el sitio de obra.

Tabla 28. Fracciones del tamaño de las partículas de los ensayos de tamizado e hidrometría para los suelos muestreados.

Muestra de suelo	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
MS1	72	24	3	1
MS2	8	26	42	24
MS3	2	31	44	23
MS4	4	31	46	19
MS5	2	22	50	26
MS6	44	23	20	13

Tal como se mencionó, se hicieron todos los ensayos de caracterización básicos, en la Tabla 29 se resumen los resultados de las propiedades índice de los suelos muestreados, en general se trata de materiales de baja plasticidad, debido a que la mayoría presenta un límite líquido menor o igual a 50, además se ubican arriba de la línea “A” de la carta de plasticidad (ver Figura 63), lo que conduce a una predominancia de suelos arcillosos.

Tabla 29. Propiedades índices de las muestras estudiadas

Muestra de suelo	Gs	LL	LP	IP
MS1	2,81	35	19	16
MS2	2,72	48	20	28
MS3	2,75	43	23	21
MS4	2,79	43	22	21
MS5	2,64	55	29	26
MS6	2,79	50	29	22

Gs= gravedad específica; LL = Límite líquido; LP= límite plástico; IP = LL-LP índice de plasticidad.

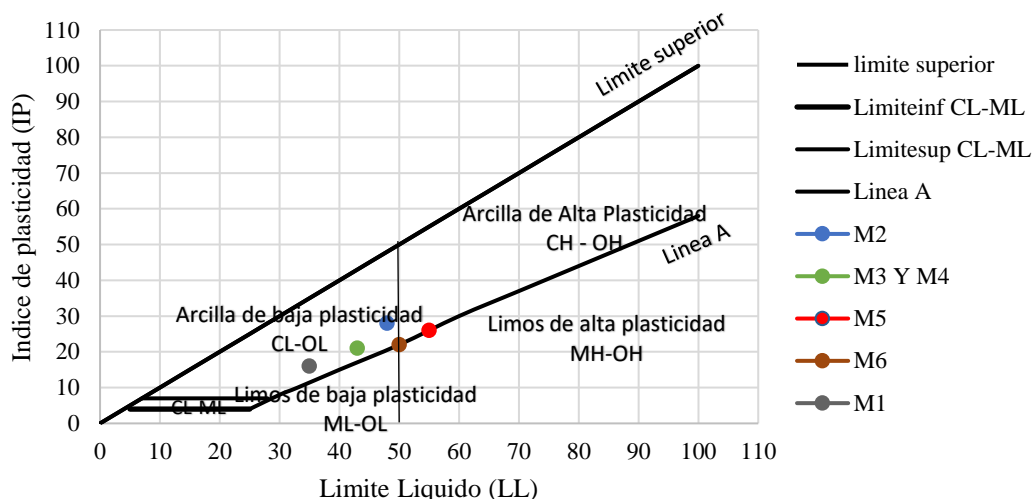


Figura 63. Ubicación en la carta de plasticidad de los materiales muestreados.

Tal como fue descrito en la metodología el ensayo de límite líquido se ejecutó con dos tratamientos previos de la muestra, preparación a partir de la humedad natural y preparación después del material secado al horno, en la Tabla 30 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 30. Parámetros empleados en la clasificación de suelos finos.

Muestra de suelo	% Finos (<No.200)	Límite líquido		$LL_{seco\ al\ horno}$
		Sin secar	Seco al horno	$LL_{sin\ secar}$
MS1	4	35	35	1,00
MS2	66	48	43	0,90
MS3	67	43	40	0,93
MS4	65	43	40	0,93
MS5	76	55	41	0,75
MS6	33	50	43	0,86

De acuerdo con el procedimiento de clasificación de suelos USCS (ASTM D2487, 2017), para que un suelo fino sea considerado orgánico el cociente entre el límite líquido seco al horno y el límite líquido sin secar debe ser menor a 0,75, por tanto ninguno de los materiales muestreados será considerado como orgánico. En la Tabla 31 se resume la clasificación de los suelos muestreados, estas son consistentes con los reportado por Espinosa & Restrepo (2017).

Tabla 31. Clasificación de suelos según USCS. Fuente: propia.

Muestra	LL	IP (línea A)	IP	Símbolo	Nombre
MS1	35	11	16	GP	Grava pobremente gradada con arena
MS2	48	21	28	CL	Arcilla magra arenosa con grava
MS3	43	17	21	CL	Arcilla magra arenosa con grava
MS4	43	17	21	CL	Arcilla magra arenosa con grava
MS5	55	26	26	CH	Arcilla grasa con arena
MS6	50	22	22	GC	Grava arcillosa con arena

En la Figura 64 se presenta la carta de plasticidad de Casagrande complementada con la carta de actividad de Skempton, en general los materiales muestreados se ubican en la línea de actividad igual a la unidad donde predominan los minerales de arcilla no expansivos, mientras que las muestras MS1 y MS6 presentan valores de actividad superiores a 30, lo que puede sugerir la presencia de arcillas expansivas, más adelante será verificado esto con el ensayo directo de expansión en el consolidómetro y la clasificación por el índice de expansión.

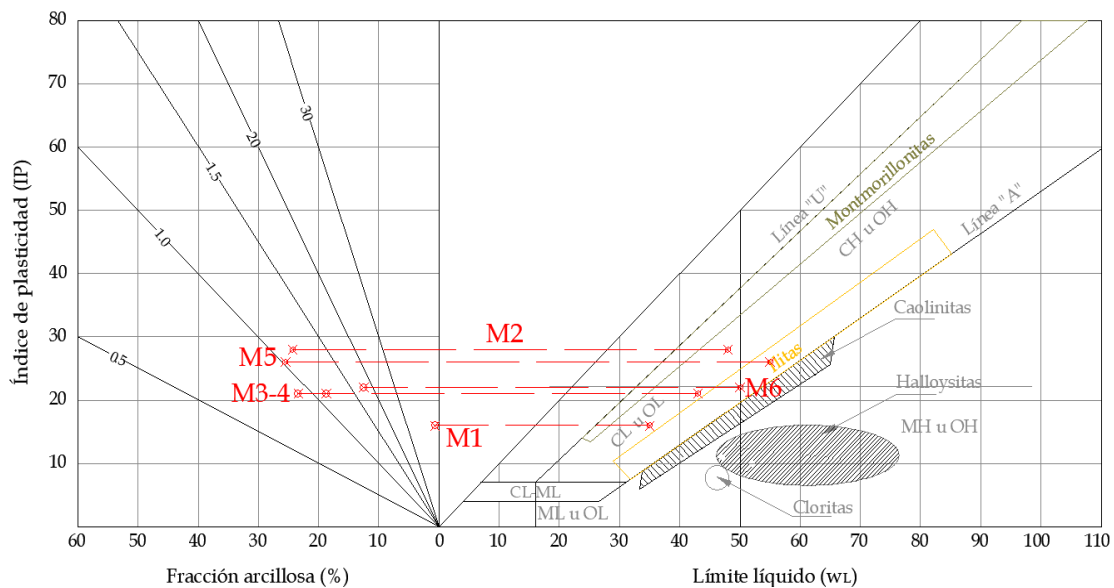


Figura 64. Clasificación de las muestras de suelo. Fuente: propia.

Las características de compactación del suelo y del residuo de ladrillo fueron definidas a partir del procedimiento Proctor normal en el molde pequeño, para el caso del suelo se homogenizó mediante la mezcla de las muestras MS2 a MS4 cuya matriz fina arrojó la misma clasificación. En la Figura 65 se presenta la curva obtenida, la humedad óptima

estuvo en 29% y el peso unitario seco máximo en 15 kN/m^3 , el comportamiento fue típico de un material arcilloso donde el inicio de la rama seca es prácticamente horizontal y después crece hasta la humedad óptima decreciendo luego de forma paralela a la curva de saturación teórica.

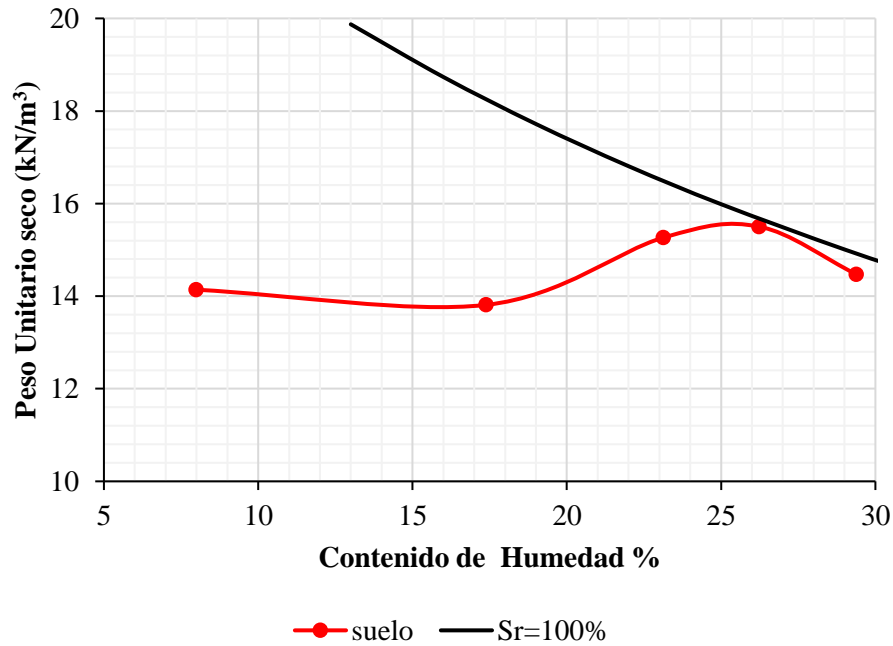


Figura 65. Curva de compactación para el suelo homogenizado.

En la Figura 66 se presenta la curva de compactación del RCD de Rb obtenida para el Proctor normal, ella es similar a las curvas de suelos o geomateriales de baja plasticidad, su humedad óptima es de 12% y el peso unitario seco máximo de $14,5 \text{ kN/m}^3$.

Debido a la humedad natural presente en el sitio de estudio para los suelos más superficiales oscila entre el 20 al 30%, no se consideró emplear la energía Proctor modificada ya que para su aplicación en campo requeriría secar el suelo, proceso que puede ser inviable desde el punto de vista económico.

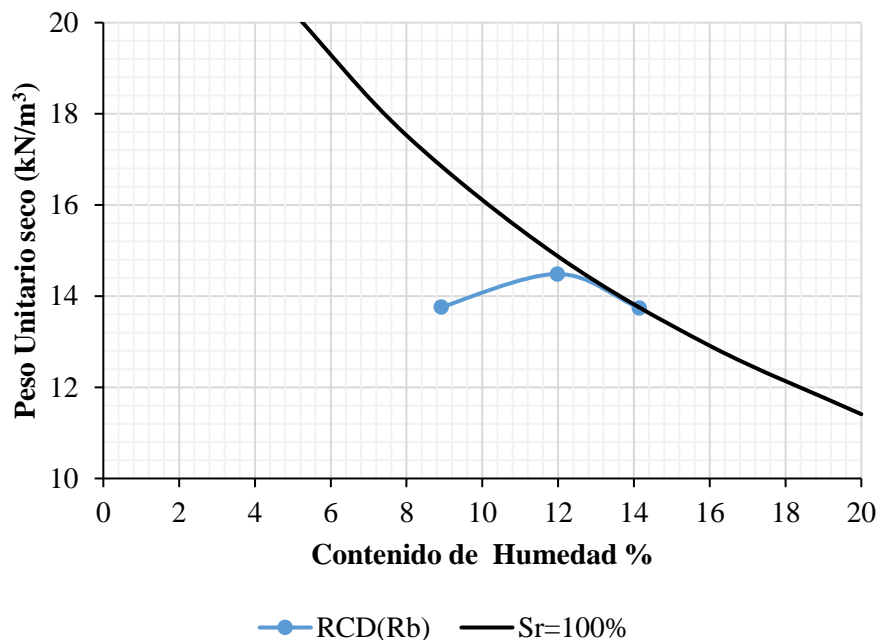


Figura 66. Curva de compactación para el RCD de Rb.

5.2 Verificación de la condición de expansión

Según Rawas, Goosen & Rawas (2006) la expansión en un suelo es la propiedad física que tiene un suelo para incrementar su volumen con la adición de agua. En general es asociado a regiones áridas y semiáridas donde la alta evaporación genera una deficiencia de humedad en el suelo caracterizado por periodos cortos de lluvia seguidos por periodos largos de sequía que provocan fenómenos cíclicos de humedecimiento y secado.

Para Yong & Warkentin, (1975); Subba Rao & Satyadas, (1987); Chen, (1988); Nelson & Miller, (1992); Day, (1994); Al-Homoud, Husein, & Al-Bashabshah, (1995); Subba Rao, Rao, & Gangadhara, (2000) el potencial y presión de hinchamiento dependen de varios factores como: la cantidad de minerales arcillosos presentes, la densidad seca inicial, contenido de agua inicial de la muestra de suelo, la naturaleza del fluido de los poros del suelo, la presión de sobre carga y efectos de humedecimiento y secado.

Holtz & Gibbs, (1956); Seed, Woodward, & Lundgren, (1962) indican que el potencial y la presión de hinchamiento aumentan cuando aumenta el contenido de arcilla y

la densidad seca y disminuye con el aumento de contenido de agua inicial, la presión de sobrecarga, la concentración de sal en poros.

Gromko (1974), sugiere que los suelos arcillosos podrían compactarse con contenidos de agua superiores a los valores de contenido de humedad óptimo para controlar el potencial de hinchamiento.

La identificación de un suelo expansivo se puede hacer por dos vías, a través de correlaciones con las propiedades índice o mediante pruebas de expansión en el laboratorio. Una tercera vía, poco usada en la práctica es a través de la mineralogía de las arcillas, cantidad y mezclas de arcillas, que usualmente se reflejan en sus características de plasticidad.

5.2.1 Uso de métodos indirectos en la identificación del potencial de expansión

Tal como se mencionó, parte de las características expansivas en el suelo están asociadas a sus minerales constituyentes, por ello la plasticidad es una propiedad propia de los minerales de arcilla a través de la cual se puede determinar el potencial de expansión en el suelo. Por ejemplo, dentro de los suelos se ha demostrado que entre mayor contenido de montmorillonita dentro de las arcillas, el suelo es más expansivo por lo que se espera una correlación positiva entre la plasticidad del suelo y el potencial de expansión, así una primera forma de identificación sería mediante la carta de plasticidad como se muestra en la Figura 67. De acuerdo con Holtz, Kovacs & Sheahan (2011), la zona donde se ubican las montmorillonita se encuentran cerca de la línea U, así las arcillas con alto potencial de expansión deberían ubicarse en la misma zona.

Además, según Holtz & Gibbs (1956) a partir de resultados de expansión en el consolidómetro bajo un esfuerzo axial de 7 kPa propusieron los criterios de identificación que se presentan en la Tabla 32. En la Tabla 33 se presentan los resultados de la identificación de la expansión en el suelo por esta vía, sólo la muestra MS5 presentó un potencial alto de expansión.

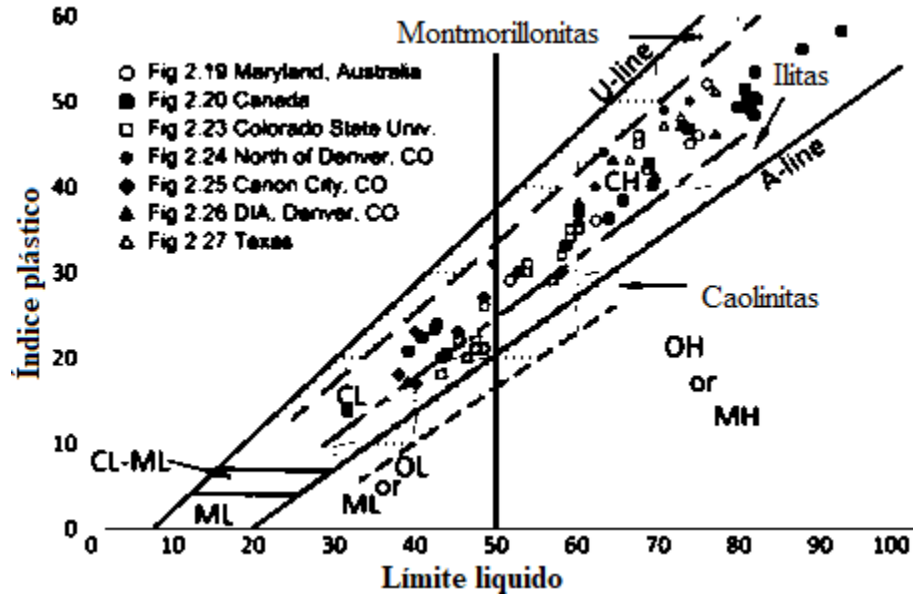


Figura 67. Agrupación de los minerales de arcilla en la carta de plasticidad. Fuente: Holtz, Kovacs & Sheahan (2011).

Tabla 32. Criterios de identificación de arcillas expansivas. Fuente: Holtz and Gibbs (1956).

Contenido de coloides (%)	Índice de Plasticidad (%)	Límite de contracción (%)	Grado de expansión	Expansión probable (% de cambio de volumen total)
<15	<18	<10	Bajo	<10
13-23	15-28	10-20	Medio	10-20
20-31	25-41	20-30	Alta	20-30
>28	>35	>30	Muy Alta	>30

Tabla 33. Identificación indirecta de la expansión del suelo con la propuesta de Holtz and Gibbs (1956).

Muestra de suelo	Contenido de coloides (%)	Índice de plasticidad	Posible clasificación
MS1	1	16	Bajo
MS2	24	28	Medio a alto
MS3	23	21	Medio a alto
MS4	19	21	Medio
MS5	26	26	Alto
MS6	13	22	Bajo a alto

Otro método comúnmente empleado por su simplicidad, es el método van Der Merve (1964), este fue desarrollado a partir de relaciones empíricas entre el grado de expansión, índice de plasticidad, porcentaje de fracción de arcilla y presión de sobrecarga, en donde se describe a PE como potencial de expansión con valores relacionado como nivel bajo, PE ¼

Nivel medio, PE1/2 nivel alto y PE1 nivel alto. En la Figura 68 se presenta la carta de clasificación, en la misma se puede observar que la muestra MS1 presenta un potencial de expansión bajo, mientras que las muestras MS2, MS3, MS5 y MS6 un potencial medio y la muestra MS4 un potencial medio a alto.

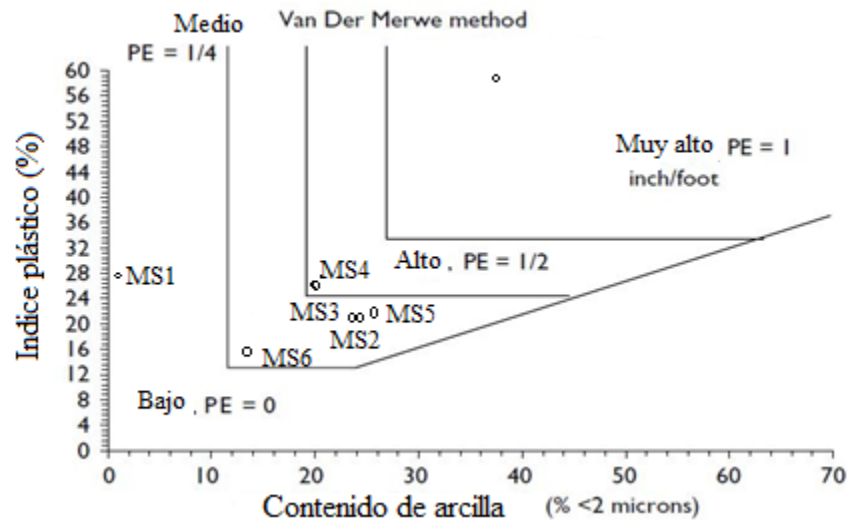


Figura 68. Clasificación de expansión de acuerdo con el método de van Der Merve (1964).

Según la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010) se reproducen los criterios de laboratorios más aceptados para el reconocimiento de los suelos expansivos basados en altos valores del límite líquido, índice de plasticidad, contenido de partículas coloidales y bajos valores del límite de contracción definidos en la Tabla 34. Donde deben verificarse en el laboratorio mediante ensayos de las propiedades índice correspondiente y expansión en el consolidometro.

Seed et al. (1962), correlacionaron el potencial de hinchamiento con los rangos de valores mostrados en la Figura 70, en dicha carta los suelos clasifican como bajos a medios en potencial de expansión.

Tabla 34. Identificación de suelos expansivos según la NSR-10. Fuente: (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica., 2010).

Potencial de expansión	Expansión en el consolidómetro	Límite líquido LL (%)	Límite de contracción SL (%)	Índice de plasticidad PI (%)	Porcentaje de partículas inferiores a una micra	Expansión libre medida en probeta (%)
Muy alto	>30	>63	<10	>32	>37	>100
Alto	20 – 30	50 – 63	6 – 12	23 – 45	18 – 37	>100
Medio	10 – 20	39 – 50	8 – 18	12 – 34	12 – 27	50 – 100
Bajo	<10	<39	>13	<20	<17	<50

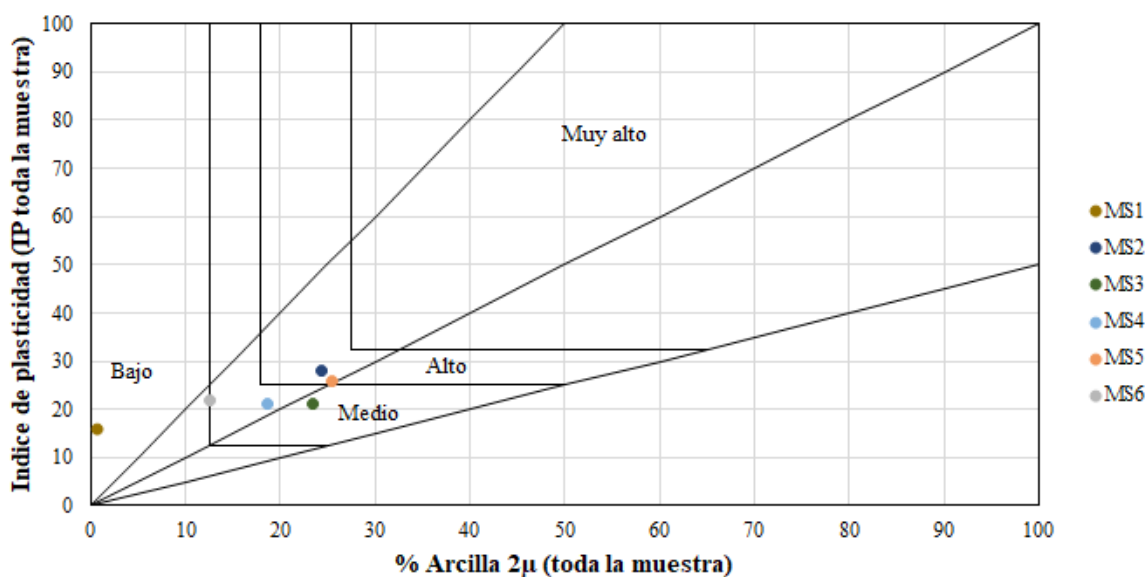


Figura 69. Clasificación de expansión de acuerdo con el método de Williams, (1957).

En la

Tabla 35 se resumen los resultados de la identificación del potencial de expansión para los suelos muestreados, en general se puede concluir que la muestra MS1 presenta un potencial bajo y que las muestras MS2, MS3 y MS4 presentan potenciales medios, mientras que en las muestras MS5 y MS6 se presentan algunos resultados contradictorios.

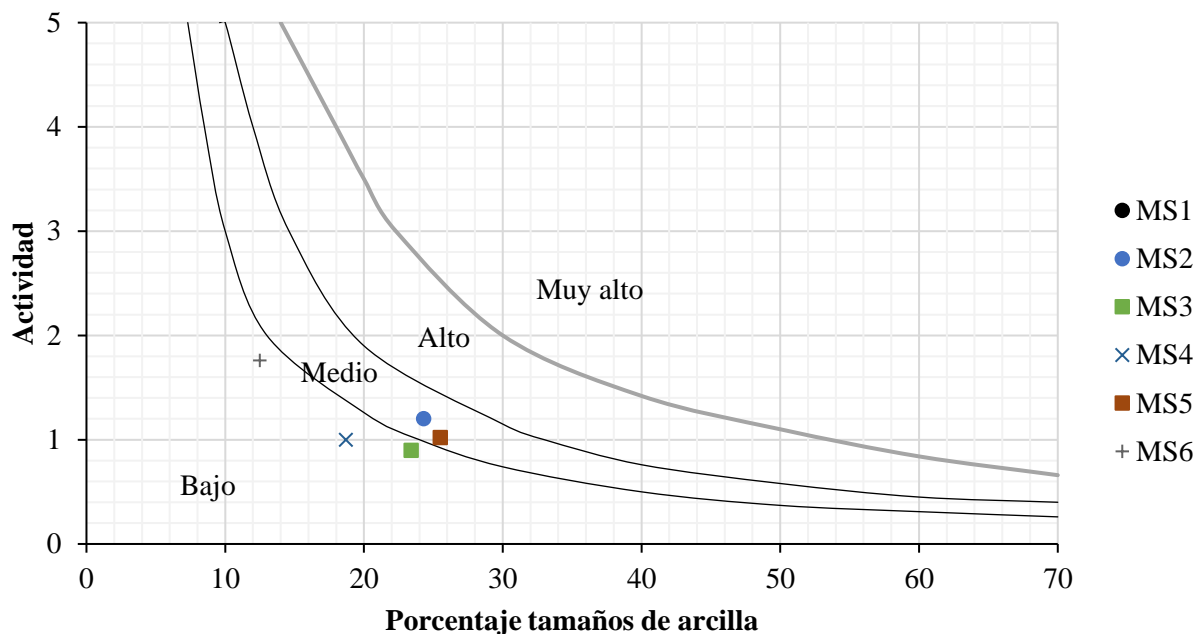


Figura 70. Carta de identificación de suelos expansivos según Seed et al., (1962).

Tabla 35. Resumen de la identificación indirecta de la expansión del suelo.

Muestra de suelo	Holtz and Gibbs (1956)	van Der Merve (1964)	Williams (1957)	Seed et al. (1962)	NSR-10
MS1	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
MS2	Medio a alto	Medio	Medio a Alto	Medio	Medio
MS3	Medio a alto	Medio	Medio	Bajo	Medio
MS4	Medio	Medio a alto	Medio	Bajo	Medio
MS5	Alto	Medio	Medio a Alto	Medio	Alto
MS6	Bajo a alto	Medio	Medio	Bajo	Medio

5.2.2 Uso de métodos directos en la identificación del potencial de expansión

Tal como fue indicado en la metodología, en la presente investigación el método directo para la identificación de la expansión empleado fue la expansión en el consolidómetro y clasificación por el índice de expansión según la ASTM D4829-11.

En este ensayo se realizó a cada una de las 6 muestras aplicando los procedimientos indicados en la norma disponiendo por cada ensayo aproximadamente 2 kg de suelo donde se realiza 3 capas cada una aplicando 25 golpes en cada capa con el martillo compactador, una vez finalizada la compactación se enrasa y se separa la camisa superior para

posteriormente tallar y posicionar la muestra en el anillo, los parámetros iniciales así como la expansión se presentan en la Tabla 36. De acuerdo con la evaluación directa, los suelos no presentan potencial expansivo, y por tanto pueden ser empleados como rellenos estructurales en la obra.

Tabla 36. Parámetros iniciales y resultados de la expansión en consolidómetro según la ASTM D4829-11.

Muestra	Humedad (%)	Peso unitario seco (kN/m ³)	Sr (%)	IE	Potencial de Expansión
MS1	8	19,3	51	25	Bajo
MS2	16	14,6	50	16	Muy Bajo
MS3	16	14,5	49	0	Muy Bajo
MS4	16	15,1	52	14	Muy Bajo
MS5	16	14,5	52	1	Muy Bajo
MS6	16	14,8	49	4	Muy Bajo

A partir de los resultados obtenidos con la expansión en el consolidómetro es posible concluir que la identificación de este tipo de suelos con las relaciones de otros países encontradas en la literatura no es válida para los suelos analizados en el presente estudio.

5.2.3 Análisis de mezclas suelo -ARCe (Sustituciones con polvo de ladrillo)

Caracterizado el material, y descartada la posibilidad de tratarse de un material expansivo que deba ser descartado o estabilizado, se evaluó la posibilidad de incorporar el residuo de la cortadora (denominado polvo de ladrillo) mezclado con el suelo para mejorar su trabajabilidad con relación a la compactación, bien sea como material de relleno en las cimentaciones o como relleno estructural contra otro tipo de elementos en contacto con el suelo.

Por facilidad de manipulación del material en el laboratorio, el mismo fue secado al aire después de pasar el tamiz No. 4 (4,75mm), tal como se mencionó en las características de compactación se trabajó con una muestra homogenizada a partir de las muestras iniciales que presentaron la misma clasificación según el sistema unificado, para el caso particular los materiales CL.

El objeto de la compactación semi-estática era la compactación de los cuerpos de prueba en el tamaño propio del ensayo y la obtención de muestras más homogéneas. En la Figura 71 se presentan los resultados de la humedad de compactación, en general la humedad promedio se redujo con la adición de ARCe partiendo del 23% y llegando a valores del orden de 18%, las muestras que tuvieron una menor afectación en el contenido de humedad fueron las compactadas sólo con el suelo seleccionado, mientras que la mayor variación se presentó en la adición del 5% de ARCe.

En la Figura 72 se presentan los diagramas de caja y bigotes de las muestras confeccionadas en función del grado de saturación previo a la ejecución del ensayo de compresión simple, a diferencia del contenido de humedad, la saturación presentó una menor variación con la adición de ARCe al suelo, y de forma igual que en la humedad la menor saturación promedio se presentó en las muestras con mayor adición de agregados reciclados.

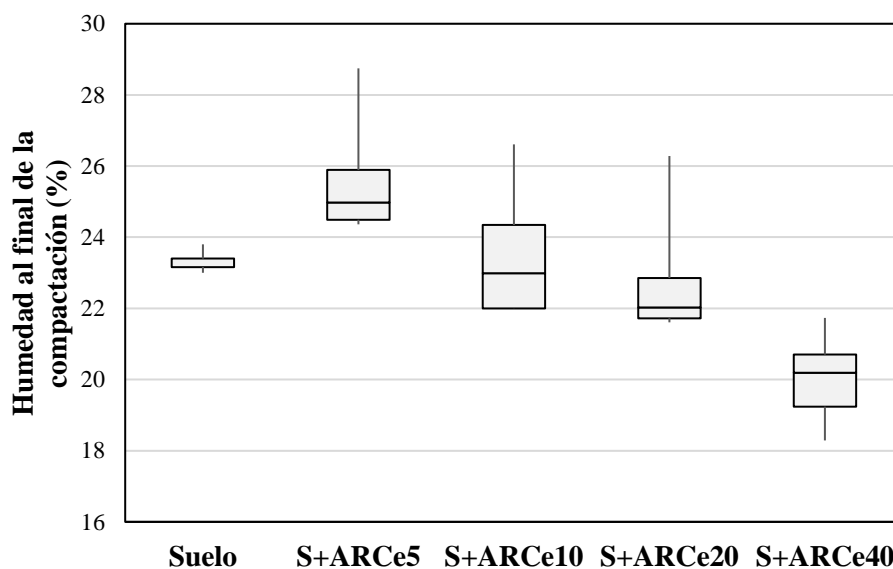


Figura 71. Variación de la humedad de compactación en los cuerpos de prueba de suelo con ARCe.

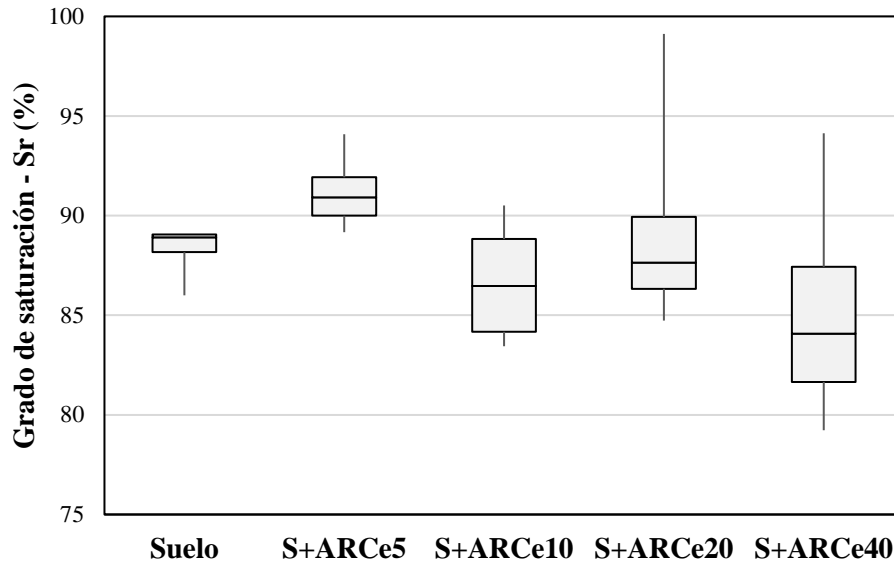


Figura 72. Variación del grado de saturación en los cuerpos de prueba de suelo con ARCe.

La variación del peso unitario seco en función de las adiciones de residuos en las muestras con suelo se presenta en el diagrama de caja y bigotes de la Figura 73, en general el peso unitario seco se incrementó con la adición de Rb, esto nos permite confirmar que la adición mejora la trabajabilidad en función de la eficiencia de compactación en el suelo fino seleccionado, lo que permite su uso en rellenos. Adicionalmente, la menor variabilidad se presentó en la adición del 20% de ARCe.

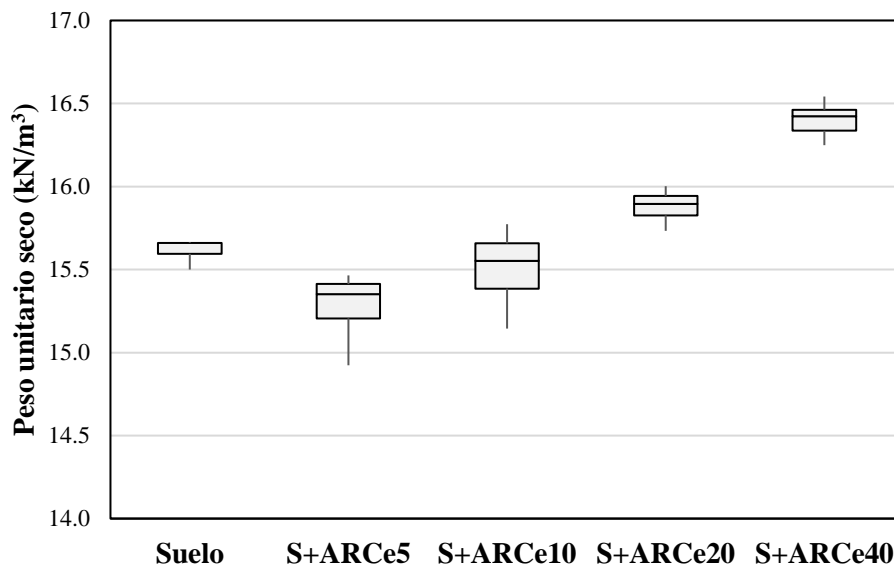


Figura 73. Variación del peso unitario seco en los cuerpos de prueba de suelo con ARCe.

5.3 Resistencia al corte no drenada mediante compresión simple

Una vez confeccionados los cuerpos de prueba se procedió a cargarlos de forma uniaxial para evaluar sus características de resistencia y deformabilidad. En todos los casos el tiempo máximo entre la elaboración del cuerpo de prueba y la ejecución del ensayo no superó un día, razón por la cual se elimina el efecto del tiempo o curado además de la pérdida de humedad que puedan tener los mismos.

En la Figura 74 se presentan los diagramas de caja y bigotes para la resistencia a la compresión simple en función de la adición de residuo Rb, en general el promedio estuvo alrededor de los 240 kPa, superior a los 200 kPa tomados por Espinosa & Restrepo (2017) para el diseño geotécnico del material por debajo de los 0,5 m.

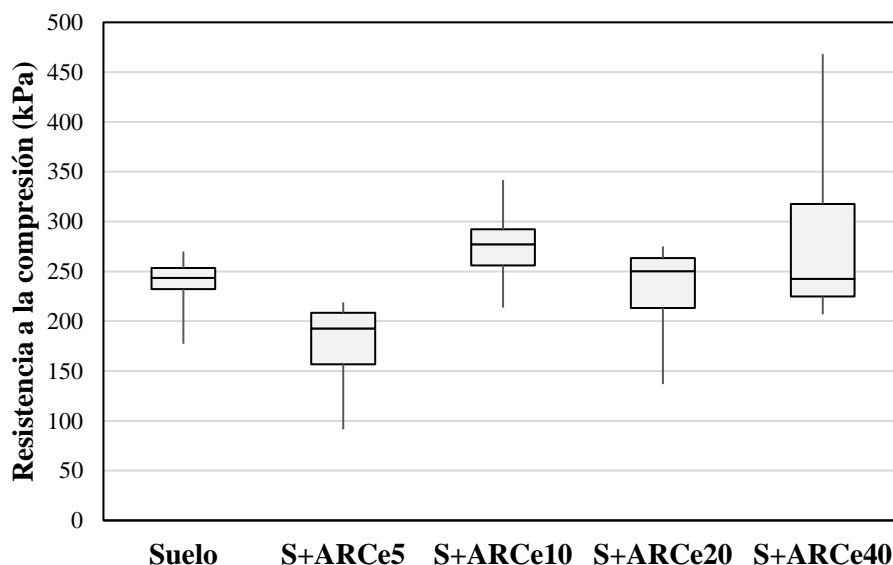


Figura 74. Efecto de la adición en la resistencia a la compresión.

Las probetas con la adición del 5% de ARCe (S+ARCe5) fueron las que presentaron menores resistencias a la compresión, sin embargo, también fueron las de menor peso unitario seco en promedio, así que los valores bajos de resistencia pueden estar asociados con valores bajos de peso unitario seco al final de la compactación. En la Figura 75 se presenta el efecto del peso unitario seco inicial en la resistencia a la compresión simple, en ella al incrementarse el peso unitario se incrementa la resistencia a la compresión, al observar la tendencia lineal

entre las dos variables esto permite inferir que las adiciones empleadas por sí solas no modifican la resistencia a la compresión, favoreciendo la facilidad de compactación en obra, ya que es posible que no sea necesario emplear un compactador pata de cabra y se pueda sustituir por un rodillo liso.

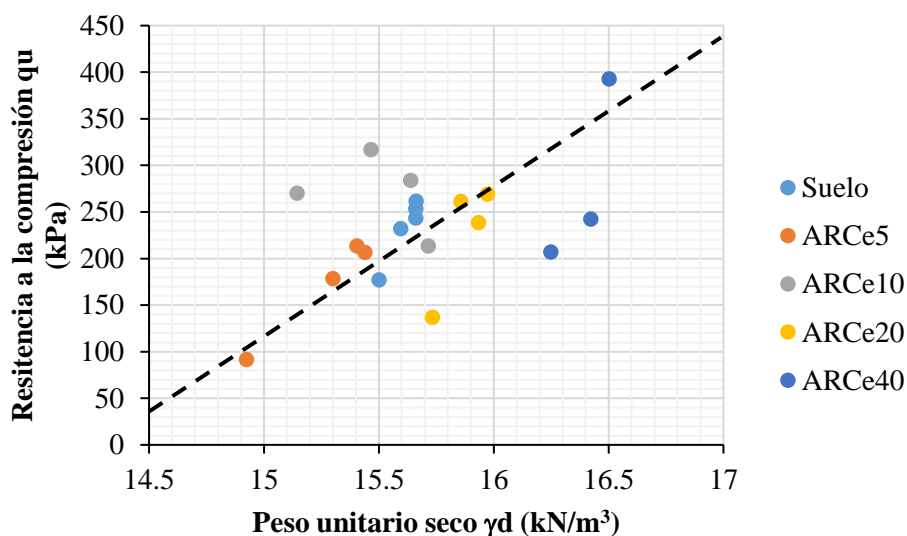


Figura 75. Relación entre la resistencia a la compresión y el peso unitario seco.

Como características de deformabilidad se calculó el módulo de elasticidad E_{50} , el cual es el más empleado para análisis geotécnicos estáticos, como los presentados por Espinosa & Restrepo (2017), este módulo es un módulo secante que resulta del cociente formado entre la mitad de la resistencia máxima a la compresión y la deformación en la cual una recta que parte del origen intercepta la curva esfuerzo deformación en este nivel de tensión. En la Figura 76 se presentan los diagramas de caja y bigotes para el módulo E_{50} , en general se observa una reducción del módulo con el incremento de residuos. El módulo para el 5% de ARCe es el más bajo en promedio, de forma similar como ocurrió en la resistencia a la compresión, esto podría asociarse de igual forma al peso unitario seco que fue el más bajo en promedio.

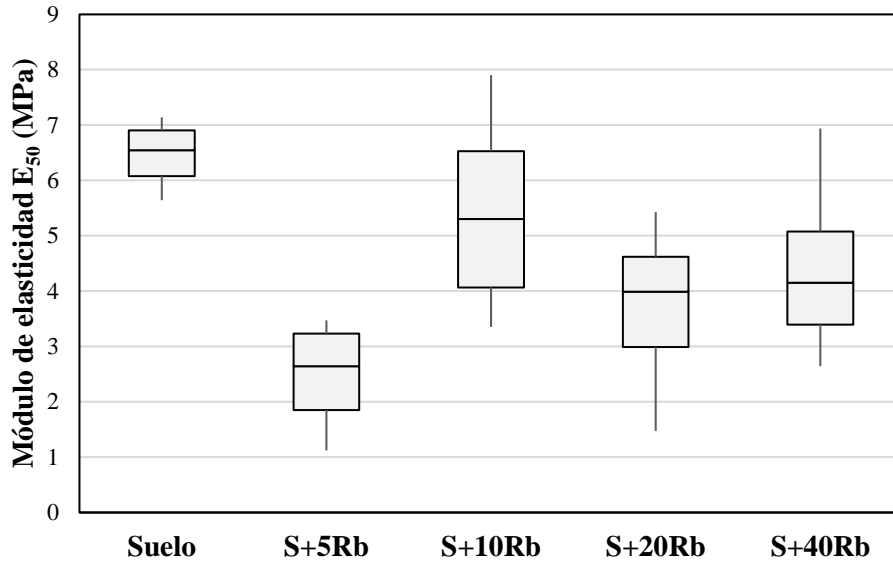


Figura 76. Variación del módulo de elasticidad E_{50} en función de la adición de residuos de Rb.

De forma análoga a la resistencia, cuanto menor es el grado de saturación mayor es la rigidez del suelo, en la Figura 77 se presenta la relación entre el módulo E_{50} y el grado de saturación, confirmando la observación anterior.

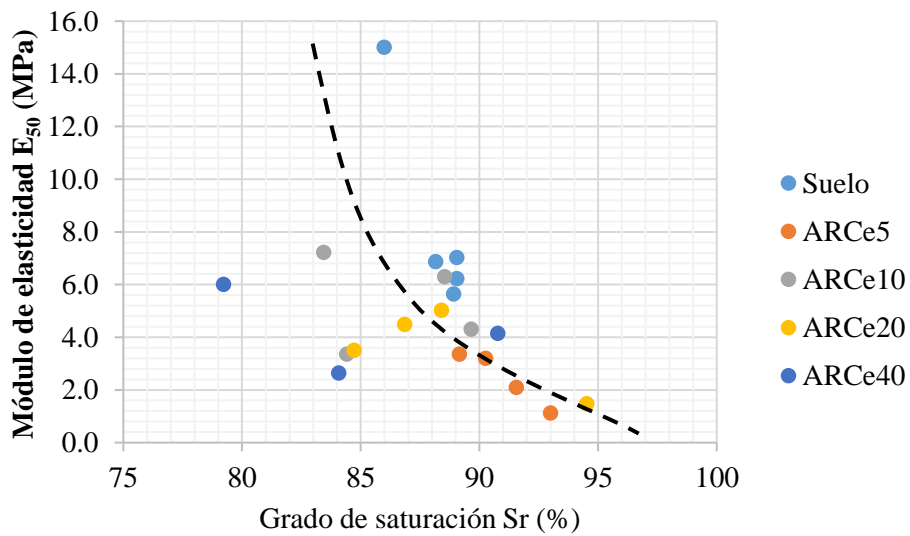


Figura 77. Efecto del grado de saturación inicial en el módulo de elasticidad E_{50} .

5.4 Análisis de resultados

En esta sección se presenta los resultados realizados en esta investigación, donde acuerdo con la caracterización del suelo, las seis muestras recolectadas presentan como material predominante el limo y la arcilla, con un 50% del volumen total; una vez realizado los ensayos mencionados en el desarrollo de este trabajo de grado se evaluó la posibilidad de su aplicabilidad, mezclando el suelo con polvo de ladrillo para así dar una alternativa de aprovechamiento en el mejoramiento del terreno o como rellenos estructurales.

Donde adicionalmente al suelo se realiza ensayos de expansividad teniendo en cuenta criterios como las propiedades índice (índice de expansión, límite líquido, índice de plasticidad y porcentaje de coloides). Y a su vez un segundo criterio de verificación mediante el consolidómetro definiendo la humedad óptima y el peso unitario seco.

Se investigó su clasificación con base en los parámetros definidos por la USCS y métodos indirectos investigados por diferentes autores, presentando los resultados con un potencial de expansión entre bajo y medio en su mayoría.

- En la determinación de los límites de Atterberg se encontró que el límite líquido es de gran importancia para clasificar el suelo en primera medida como orgánico o inorgánico; encontrando que su valor fue menor de 50 en la mayoría de las muestras y en segunda instancia el índice de plasticidad nos definió la clasificación y la simbología; donde las muestras en su mayoría predominaron como arcillas no expansivas mediante la carta de Casagrande.
- Se unificaron las muestras MS2 a MS4 ya que sus resultados arrojaron la misma clasificación para realizar los ensayos de expansión en el consolidómetro y compactación del suelo mediante el Proctor.
- De acuerdo con los criterios de identificación para las arcillas expansivas por autores como Holtz, Kovacs y Sheahan la plasticidad es una propiedad determinante del potencial de expansión en el suelo con base en esta información se obtiene que los resultados se encuentran alejados de la línea U por lo que no representan ser suelos expansivos.

- Con los parámetros de identificación de suelos expansivos por Holtz and Gibbs, donde el contenido de coloides e índice de plasticidad se usa como criterios para la evaluación, se compara los resultados de las muestras realizadas con los parámetros mencionados y se obtuvieron resultados de no expansividad en los suelos exceptuando por la muestra MS5.
- El método van Der Merve utiliza el índice de plasticidad y contenido de arcilla para describir el potencial expansivo, relacionando las muestras estudiadas se clasifican en rangos de baja expansividad.
- Para la asociación colombiana de ingeniería sísmica los criterios de expansividad son basados en límite líquido, índice de plasticidad, porcentaje coloidal y expansión verificado en consolidómetro, arrojando resultados en esta investigación entre un bajo y medio contenido de expansividad, exceptuando la muestra MS5.

6. ESTIMACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

En términos de la estimación de los impactos generados en las alternativas de aprovechamiento se puede indicar que en la actualidad una forma de analizar el impacto ambiental de productos y servicios es a través del Análisis de Ciclo de Vida (LCA por sus siglas en inglés). El LCA permite evaluar las cargas ambientales identificando y cuantificando las cantidades de materia y energía utilizados, y los residuos generados, y evaluando los impactos ambientales derivados de estos.

De acuerdo con Dossche, Boel, & De Corte,(2017) dentro de las etapas del LCA se pueden destacar las siguientes:

1. Definición de objetivos y alcance (Unidad funcional)
2. Análisis general de inventario
3. Evaluación del impacto
4. Interpretación de los resultados.

De forma resumida en la Tabla 37 se presentan las condiciones adoptadas para el análisis del caso de estudio. La interpretación de resultados se reducirá a la variación de la categoría de impacto definida, sin incluir análisis de otros impactos y una valoración cualitativa en función de ecopuntos.

Tabla 37. Definición de los objetivos y alcance del LCA dentro de la estimación de la reducción del impacto ambiental.

Etapas	Aspecto clave / pregunta	Justificación / Respuesta
1	Aplicación pretendida	Análisis de la reducción de impacto por la utilización de RCD en obra
	Motivación	Estudio cuantitativo entre el uso de RCD o su disposición final.
	Dirigido a	Sector de la construcción local
	Límites	En este análisis se incluye el efecto de la producción de materiales de construcción (de la cuna a la puerta), y el transporte hasta el sitio de obra o disposición final.

Etapas	Aspecto clave / pregunta	Justificación / Respuesta
	Unidad funcional	Se toma como unidades funcionales las actividades representativas derivadas de las cantidades de obra, y la reducción sobre las dos alternativas de aprovechamiento empleadas. En este caso finalmente sobre m ³ de concreto y m ³ de rellenos.
2	Análisis de Inventario	Se considera dentro del inventario como entrada inicial las cantidades de obra convertidas en masa y como salida las emisiones de gases de efecto invernadero en función de kg de CO ₂ equivalentes.
3	Evaluación del impacto	De acuerdo con el análisis de inventario es reportado una única categoría de impacto en función de la emisión de gases de efecto invernadero.

Para cuantificar el impacto ambiental generado en obra de acuerdo con las actividades más representativas que generan un alto consumo de materias primas y por ende un mayor impacto, como también las actividades donde se implementaron las alternativas para el aprovechamiento del RCD. El indicador utilizado para dicha evaluación, tal como se mencionó, es la huella de carbono (HC). La huella de carbono según Rodríguez, Martínez, & Udaquiola, (2014), es un indicador ambiental que busca cuantificar la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, donde su medición se convierte en una herramienta que permite trabajar bajo el concepto de eco eficiencia e identifica oportunidad de reducción de consumo energético ya que es el principal emisor a nivel mundial. Para Viglizzo (2010) la huella de carbono adquiere importancia cuando nos damos cuenta que las emisiones de gases de efecto invernadero presentan un impacto directo sobre el calentamiento global que sufre el planeta, debido a que HC trata de cuantificar la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) expresadas en kg de CO₂ equivalentes, las cuales son liberadas a la atmósfera como resultado de intervenciones humanas, comprendidas en el proceso que se describe en el ciclo de vida de un producto desde las materias primas utilizadas hasta el desecho final como residuo.

Según Gómez (2019), uno de los principales pilares para el proceso edificatorio es la selección de materiales empleados siendo una pieza clave ya que pueden generar la diferencia en la reducción de impacto ambiental identificado en tres etapas como:

1. Producción de materiales;
2. Transporte e instalación;
3. Reutilización o disposición final.

En la cuantificación de la huella de carbono se empleará la metodología determinística usada por Gómez (2019), la cual se basa en la conversión en peso de los materiales empleados en obra, así como la identificación de las distancias de transporte hasta la misma. Y la forma de cálculo se tomará de acuerdo con la formulación de Sinha et al. (2016), empleando la siguiente ecuación:

$$\text{kg CO}_2 \text{ eq} = \sum QM_j \cdot FEM_j + \sum DT_j \cdot QM_j \cdot FET_i \quad (1)$$

donde, QM_j = es la cantidad del material j; FEM_j es el factor de emisión por la extracción, manufactura y producción del material j; DT_j = es la distancia de transporte del material j hasta la obra; y FET_j = es el factor de emisión por transporte de acuerdo con el medio i. En la Tabla 38 se presentan los factores de emisión empleados, según el análisis determinístico de Gómez (2019).

Tabla 38. Factores de emisión típicos de la cuna a la puerta empleados para el cálculo de huella de carbono (tomado de Gómez, 2019).

Descripción	kg CO ₂ eq/kg					Factor empleado
Suelo del sitio	0,0063 ^l	0,0095 ^l	0,00526 ^m	0,00515 ^m		0,007
Roca muerta	0,0032 ^j	0,00322 ^p				0,032
Concreto premezclado	0,280 ^c	0,218 ⁴	0,140 ^j	0,107 ^j	0,118 ^k	0,219
Cemento	0,411 ^d	0,394 ^f	0,355	0,740 ^j		0,616
Arena	0,008 ^c	0,006 ^j	0,004 ^{jg}	0,005 ^j	0,0048 ^j	0,006
Grava	0,003 ^c	0,00303 ^h	0,005 ^j			0,004
Ladrillo farol	0,792 ^e	0,525	0,270	0,550 ^j	0,294 ^k	0,530
Cerámica	0,780 ^j	0,675 ⁿ	0,554 ⁿ			0,780
Transporte kg CO ₂ eq /tkm	0,150 ^j	0,140 ^a	0,136 ^a	0,103 ^a	0,133 ^k	0,1320

^a Diosa et al. (2017); ^b Maeso Gonzales et al. (2012); ^c Badilla et al. (2015); ^d (Mercader Moyano et al., 2010); ^e ITEC (2019); ^f (Zabalza Bribián & Aranda Usón, 2011); ^g (Pedreño Manresa et al., n.d.); ^h (Inhobe et al., 2012); ⁱ IMN (2018); ^j Hammond y Jones (2011); ^k Martínez-Rocamora et al. (2016); ^l Ben-Alon et al., (2019); ^m Chistoforou et al., (2016); ⁿ Silvestre et al., (2014); ^p Sarah et al. (2015).

Tal como se expresa en la Ecuación (1), es necesario definir las cantidades de obra y las distancias de transporte. En la Tabla 39 se resumen las cantidades representativas en función de su magnitud y peso.

Tabla 39. Cantidades de obra del caso de estudio

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad
1.0	Movimiento de tierra		
1.1	Excavación en terrazas con maquina	m ³	4646
1.2	Distancia de transporte Interno de excavación	km	2
1.3	Distancia de transporte externo de excavación	km	22
2.0	Rellenos		
2.1	Relleno con material de sitio	m ³	1900
2.2	Relleno con roca muerta	m ³	8103
2.3	Distancia de transporte interno con material de sitio	km	2
2.4	Distancia de transporte de roca muerta	km	25
3.0	Estructura		
3.1	Concreto 3000 psi	m ³	626
3.2	Distancia de transporte interno de concreto	km	4
3.3	Mampostería	m ²	22878
3.4	Distancia de transporte de ladrillo	km	30
4.0	Residuos de construcción		
4.1	Material de sitio	m ³	127
4.2	Distancia de transporte	km	127
4.3	Ladrillo	m ³	1373
4.4	Distancia de transporte de ladrillo	km	1373

Fuente: el autor.

De los capítulos mostrados en la tabla anterior, se identifican las actividades clave donde el mayor peso es aportado por el material de relleno, y de allí este es el que presenta mayor potencial para la reducción del impacto de forma inicial, donde en la Tabla 40 se presenta el cálculo de la huella de carbono sin gestión del RCD.

Tabla 40. Cálculo de la huella de carbono sin gestión del RCD para las condiciones de análisis descritas en el caso de estudio. Fuente: el autor

DESCRIPCIÓN	Trayecto (km)	Cantidad (kg)	Cantidad (tkm)	Factor de Conversión kg eCO ₂ /kg	CO ₂ eq TransportE(kg)	CO ₂ eq Produccion (kg)
MOVIMIENTO DE TIERRA						
Excavación en terrazas con maquina		7.665.900		0,0063		48.295
Transporte Interno de excavación	2	1.533.180	6132.72		810	
Transporte externo de excavación	22	7.665.900	337299.6		44.524	
RELLENOS						
Relleno con material de sitio		3.135.000		0,007		21.945
Relleno con roca muerta		16.043.940		0,0032		51.341
Transporte interno con material de sitio	2	3.135.000	12.540		1.655	
Transporte de roca muerta	25	13.775.100	688.755		90.916	
ESTRUCTURA						
Concreto premezclado 3000 PSI		1.576.800		0,219		345.319
Transporte interno de concreto	4	1.576.800	12.614,4		1.665	
Mampostería		2.546.787		0,27		687.632
Transporte de ladrillo	30	2.546.787	152.807.21		20.171	
Residuos de construcción						
Residuos de concretos, morteros & grouting (Rc)		149.479		0,007		1.046
Transporte de residuos cementicios (Rc)	22		6.577.076		868	
Residuos de ladrillo (Rb)		1.220.313		0,007		8.542
Transporte de residuos de ladrillo (Rb)	22		53.693,7509		7.088	
TOTAL					167.695	1.164.121
					ton CO₂ eq	1.332

En las Figuras 78 y 79 se presenta la contribución de cada ítem en la emisión de gases de efecto invernadero.

Vemos que las actividades más generadoras de CO₂ para la producción resultó ser la actividad de mampostería y en el transporte la roca muerta.

Una vez identificadas se inició la gestión del cálculo de la huella de carbono incluyendo el RCD mostrada en la Tabla 41, donde en el primer escenario se incluyó la mayor cantidad de residuos para el relleno de las terrazas, por lo cual el segundo escenario se identificó en la elaboración de concreto; donde el residuo faltante no fue significativo para

utilizarlo en la elaboración de concretos. Con base en lo anterior solo se realiza la utilización para la gestión en la actividad de relleno mejorado con RCD.

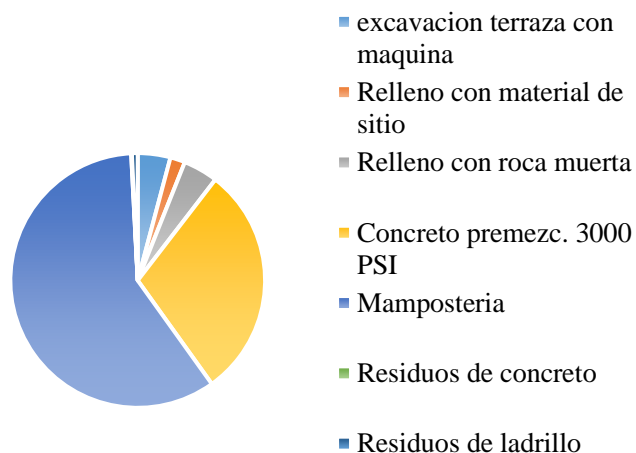


Figura 78. Distribución de la emisión de CO₂ eq en la producción de los materiales de construcción del caso de estudio.

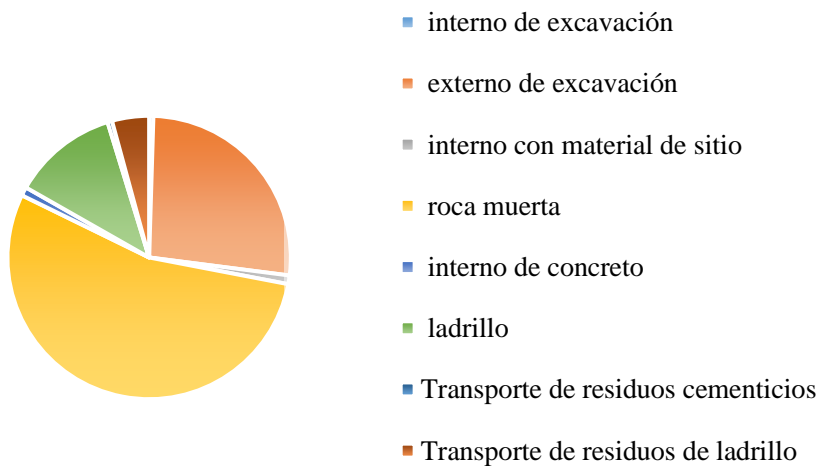


Figura 79. Distribución de la emisión de CO₂ eq en el transporte de los materiales hasta la obra.

Tabla 41. Cálculo de la huella de carbono con gestión del RCD. Fuente: el autor

DESCRIPCIÓN	TRAYECTO (Km)	CANTIDAD (kg)	CANTIDAD (Tkm) 1x3x4	FACTOR DE CONVERSIÓN eCO2/kg	kg	CO2 eq TRANSPORTE(Kg)	CO2 eq PRODUCCION (Kg)
MOVIMIENTO DE TIERRA							
Excavación en terrazas con maquina		7,665,900		0.0063			48,295
Transporte Interno de excavación	2	1,533,180	6132.72			810	
Transporte externo de excavación	22	7,665,900	337299.6			44,524	
RELLENOS							
Relleno con material de sitio		3,135,000		0.007			21,945
Relleno con roca muerta		10,697,940		0.0032			34,233
Relleno mejorado con RCD		4,384,800		0.0014			6,257.52
Transporte interno con material de sitio	2	3,135,000	12540			1,655	
Transporte de roca muerta	25	9,185,100	459255			60,622	
ESTRUCTURA							
Concreto premezclado 3000 PSI		1,576,800		0.219			345,319
Transporte interno de concreto	4	1,576,800	12614.4			1,665	
Mampostería		2,546,787		0.27			687,632
Transporte de ladrillo	30	2,546,787	152807.2208			20,171	
Residuos de construcción							
Residuos de concretos, morteros & grouting (Rc)		149,479		0.007			1,046
Transporte de residuos cementicios (Rc)	22		6577.076			868	
Residuos de ladrillo (Rb)		266,700		0.007			1,867
Transporte de residuos de ladrillo (Rb)	22		11734.8			1,549	
				TOTAL		131,863	1,146,596

ton CO2 eq	1,278
------------	-------

Los transportes de viajes referente a excavaciones, roca muerta y retiro de material fueron asumidos con una volqueta con capacidad de 14 m3

Cantidad (Tkm) Se asumen dos veces el trayecto (Ida y Regreso)

De acuerdo con las tablas anteriores podemos analizar que en el escenario implementado tuvo una reducción por transporte, material y de la cuna a la puerta como se indica en la Tabla 42.

Tabla 42. Reducción de CO2 en actividades. Fuente: el autor.

Escenario	ton CO ₂ eq por transporte	ton CO ₂ eq por material	ton CO ₂ eq cuna a la puerta
Sin gestión de RCD	168	1.164	1.332
Con gestión de RCD	132	1.147	1.278
Reducción	21%	2%	4%

Como también podemos concluir que se obtuvo un cumplimiento de meta indicado en las Tabla 43 y Tabla 44.

Tabla 43. Cumplimiento de meta sin inclusión de material. Fuente: el autor

Sin la inclusión del material de excavación

Peso Total Materiales (ton)	RCD generado (ton)	RCD utilizado (ton)	Generación RCD (%)	Aprovechamiento	Cumplimiento meta (%)
28.423	1.37	1.221	4.80%	89.10%	4.30%

Tabla 44. Cumplimiento de meta con inclusión de material. Fuente: el autor

Con inclusión del material de excavación

Peso Total Materiales (ton)	RCD generado+material de excavación (ton)	RCD aprovechable (ton)	Generación Rcd (%)	Aprovechamiento	Cumplimiento meta (%)
28.423	9.036	4.383	31.80%	48.50%	15.40%

7. CONCLUSIONES

En este capítulo son incluidas las conclusiones derivadas del trabajo de laboratorio y el análisis de los impactos, así como una serie de recomendaciones para trabajos futuros.

7.1 Conclusiones

Fueron estudiadas dos alternativas potenciales de aprovechamiento de residuos de construcción y demolición en obra. Una primera alternativa analizó el uso del residuo de mayor volumen en la estructura (residuos de ladrillo Rb) como sustitución parcial del agregado natural en concretos de resistencia común hasta 21 MPa. La segunda alternativa consistió en emplear tanto los residuos de excavación como de ladrillo como material de relleno, variando la mezcla entre ambos y retirando el material tamaño grava dado su alto valor en otro tipo de aplicaciones como filtros y concretos. Finalmente, se hizo una valoración cuantitativa dentro del análisis de ciclo de vida de los impactos en función de la generación de gases de efecto invernadero, determinando que la reutilización de residuos de construcción y demolición en obra podría disminuir la emisión de GEI para el ítem de rellenos como actividad de gestión con RCD identificadas en el transporte con un 21%, material en un 2% y de la cuna a la puerta en un 4% , adicionalmente presentó un cumplimiento de meta del 15.4 % debido a la inclusión.

Para la alternativa de aprovechamiento en concretos de 21 MPa se derivan las siguientes conclusiones:

- Aunque el ladrillo y el agregado grueso natural presentan diferencias tanto físicas como mecánicas, las sustituciones realizadas no afectaron la realización de los concretos, ni su resistencia hasta un 40% como sustituto parcial del agregado; presentando valores permitidos por la normativa colombiana.
- El diseño de mezclas del concreto propone el empleo de un 44% de agregado natural, el cual podría ser reemplazado hasta en un 40% por agregado reciclado. Este potencial de sustitución debe tener en cuenta que la absorción presente en el

material cerámico en este caso el ladrillo es más alta que el del agregado natural para la elaboración de concretos.

- A medida que incrementa la sustitución de ladrillo como agregado natural se dificulta la trabajabilidad en el concreto; para ello se podría utilizar un aditivo y así no verse afectada la sustitución en la trabajabilidad para la realización de nuevos concretos.
- Los resultados obtenidos en la resistencia a la compresión se evidencia que a medida que se incrementa el RCD en la mezcla de concreto se reduce la resistencia a compresión. En sustituciones de RCD cerámico como el ladrillo por agregado grueso se evidencia que en sustituciones del 20 y 40% los resultados a los 3, 7 y 28 días fueron similares, sin perder la resistencia de diseño.
- Las sustituciones con mejores resultados en la resistencia a compresión son las inferiores al 20 % de remplazo de RCD por agregado grueso natural.

En la alternativa de uso como material de relleno mezclando parte del material de excavación con residuos de ladrillo Rb se derivan las siguientes conclusiones:

- En la caracterización del material de excavación ninguno de los materiales analizados presentó contenidos de materia orgánica que cambiaran su clasificación a suelos orgánicos según el sistema de clasificación unificado de suelos. Y en general la clasificación arrojó como resultados limos inorgánicos de baja plasticidad.
- Con relación al potencial de expansión la clasificación a partir de propiedades índice mostró materiales con rangos bajos a medios, mientras que la prueba directa de índice de expansión en el consolidómetro presentó niveles de bajos y muy bajos. Esto indica que la clasificación de expansión por límites de consistencia puede no reflejar el comportamiento expansivo de estos suelos, trayendo consigo un manejo ultraconservador con relación a la expansión que deriva en un alto impacto ambiental en función de las excavaciones y reemplazos para emplazar viviendas livianas.

- El remplazo o mezcla de residuos en la matriz fina del suelo excavado reduce la humedad óptima de compactación y mejora la facilidad de ejecución de esta actividad en laboratorio, y por ende lo hará en obra. Esto se vió reflejado adicionalmente en el incremento del peso unitario de la mezcla cuando se mantiene la energía de compactación, lo que se traduce en una eficiencia mayor del proceso.
- De forma análoga al proceso de compactación, la inclusión de residuos Rb en la mezcla con la matriz fina del suelo incrementa tanto el peso unitario como la resistencia a la compresión simple. Este incremento también se ve reflejado en el módulo de elasticidad, lo que se traduce en un material que será más rígido con la incorporación de estos residuos.

7.2 Recomendaciones para trabajos futuros

- El presente trabajo de investigación cumplió con los objetivos planteados realizados con base en la caracterización de los materiales, los cuales permitieron conocer las propiedades y la calidad de los materiales a utilizar; donde se presume que esta investigación sirva para trabajos futuros en temas de utilización de residuos de construcción y demolición para así enfocarse en nuevas líneas de aplicación y optimización en los recursos naturales.
- Se recomienda continuar investigando el comportamiento de los materiales mediante las propiedades físicas y mecánicas frente a las sustituciones con materiales de residuos de construcción y demolición enfocados en la viabilidad de reutilización como lo realizan en diferentes países del mundo.
- La información descrita en el trabajo de grado se realizó para el sistema constructivo de mampostería estructural en viviendas unifamiliares, donde se recomendaría realizar la investigación en otro tipo de sistema constructivo como sistemas industrializados o sistemas de mampostería confinada.

- Estudiar los efectos de la incorporación de los residuos de construcción y demolición cerámicos en campo.
- Analizar la viabilidad técnica y económica de la implementación en campo de la reutilización de los RCD en obra.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. Marin. (2019). *Análisis de la generación de residuos de construcción y demolición (RCD) en un proyecto institucional: estudio de caso*. Pontificia Universidad Javeriana Cali.
- Acevedo, H., Vásquez, A., & Ramirez, D. A. (2012). Sostenibilidad: actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia. *Gestión y Ambiente*, 15(1), 105–118.
- Al-Homoud, A. S. B., Husein, M., & Al-Bashabshah, M. A. (1995). Cyclic swelling behaviour of clays. *Of Geotechnical Engineering*.
- Armijos Jonathan. (2019). *Caracterización de la generación de residuos de construcción en sistemas industrializados para viviendas de interés social, en la ciudad de Santiago de Cali* [Pontificia Universidad Javeriana Cali]. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ashqui, V., & Pulgar, J. (2017). Relación entre desperdicios de materiales y desperdicios de mano de obra en la ejecución de los proyectos de construcción. In *Universidad Nacional de Chimborazo*.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). Nsr-10: Título H — Estudios Geotécnicos. *Reglamento Colombiano de Diseño y Construcción Sismo Resistente-NSR-10*, 72.
- ASTM D2487. (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). *Annual Book of ASTM. Committee D18.07 on Identification and Classification of Soils, 04*, 249–260. <https://doi.org/10.1520/D2487-17>.
- ASTM D2488. (2017). Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual). *ASTM Standards for Testing and Evaluation*, 1–11. <https://doi.org/10.1520/D2488-17E01.2>
- ASTM D4221. (2018). *Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double*. 99(Reapproved 2005), 99–101. <https://doi.org/10.1520/D4221-18.2>

- Augusto, C., & Montoya, H. (2019). *Caracterización hidráulica de un suelo residual estabilizado con polvo de ladrillo y residuos de cal Hydraulic characterization of a stabilized residual soil with brick dust and lime waste. October.*
- Bejarano, A. (2019). *MEJORES PRÁCTICAS CONSTRUCTIVAS EN MAMPOSTERÍA EN PROYECTOS DE VIVIENDA EN LA CONSTRUCTORA JARAMILLO MORA S.A.: ESTUDIO DE CASO.*
- Bolaños Zambrano, J. D., & Coqueco Duque, M. A. (2021). *Parámetros para el diseño mecanicista con agregados granulares reciclados derivados de residuos de construcción y demolición en Santiago de Cali.* Pontificia Universidad JAveriana Cali.
- Bravo, I., & Bravo, M. (2019). *Evaluación de las propiedades mecánicas de concreto fabricado con agregados reciclados provenientes de adoquines.*
- Bueno, C., Jaenisch, R., Martins, J. C. S., Casarotto, S., Moraes, J. A. R., Silva, A. L. E., & Nara, E. O. B. (2013). Caracterización cuantitativa y cualitativa de los residuos de la construcción sólida para nuevas construcciones de edificios. *VI Congreso Argentino de Ingeniería Industrial*, 1–8.
- Caicedo, S., & Perez, J. (2015). *Estudio del uso agregados reciclados de residuos de construcción y/o demolición (RCD-R) provenientes de la ciudad de cali como material para la construcción de elementos prefabricados de concreto, caso de los adoquines.*
- Carneiro, A. P., Quadros, B. E. C., Oliveira, A. M. V., Brum, I. A. S., Sampaio, T. S., Alberte, E. P. V., & Costa, D. E. (2001). Características do entulho e do agregado reciclado no desempenho mecanico do concreto. *Reciclagem de Entulho Para Produção de Materiais de Construção: Projeto Entulho Bom Da Caixa Econômica Federal*, 144–187.
- Chen, F. H. (1988). *Foundations on expansive soils.*
- Conama. (2002). *Resolución No. 307 de 5 julio de 2002.*
- DANE. (2017). *Boletín Técnico: Censo Edificaciones - CEED I trimestre de 2017.* 1–48.
- Day, R. W. (1994). Swell-shrink behaviour of compacted clay. *Of Geotechnical Engineering.*

- Departamento Administrativo de Planeación. (2020). *Cali en cifras 2020*.
- Diosa, J. S. (2020). *Análisis experimental de las propiedades mecánicas del concreto de alta resistencia fabricado con agregados reciclados de concreto*. Pontificia Universidad JAveriana Cali.
- Dossche, C., Boel, V., & De Corte, W. (2017). Use of Life Cycle Assessments in the Construction Sector: Critical Review. *Procedia Engineering*, 171, 302–311. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.338>
- Duan, H., Miller, T. R., Liu, G., & Tam, V. W. Y. (2019). Construction debris becomes growing concerns of growing cities. *Waste Management*, 83, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.044>
- Embus, D., & Quintero, L. (2015). *Influencia del contenido de humedad en el comportamiento mecánico de un residuo de construcción y demolición (RCD) como material de la estructura del pavimento*. Pontificia universidad Javeriana de Cali.
- Espinosa & Restrepo. (2017). *Estudio de suelos del proyecto Mirasol*.
- Eurostat. (2016). *Tasa de recuperación de residuos de construcción y demolición*.
- Eurostat. (2017). *Estadísticas sobre Residuos*. European Commission.
- Ge, Z., Wang, Y., Sun, R., Wu, X., Guan, Y. (2015). *Influence of ground waste clay brick on properties of fresh and hardened concrete*.
- Gil, J., & Orozco, J. (2016). *Diseño de la rehabilitación del dique del río cauca entre el km18+925 a km 19+025 empleando cuatro materiales disponibles en la ciudad de cali*.
- Gonzalez, C. (2021). *Análisis para la gestión de residuos de construcción y demolición del sector vivienda en santiago de cali: estudio de caso*.
- Granda, D., Padilla, N., & Patiño, C. (2017). *Diseño de Dique con Residuos de Construcción y Demolición Reforzado con Geotextil* (Vol. 4, Issue 1).
- Grupo de Residuos Sólidos. (2012). *Levantamiento, análisis y generación de información sobre residuos de la construcción*.

- Hernández Tascón, M. (2009). La construcción sostenible. *Alarife: Revista de Arquitectura*, 17, 9.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2011). *An introduction to geotechnical engineering* (2nd ed.).
- Holtz, W. G., & Gibbs, H. J. (1956). *Engineering properties of expansive clays*.
- Ingenier, M. (2006). *RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN*.
- Inhobe, S.L, B. V., & UPC. (2012). *Manual para la redacción de estudios de gestión de RCD en obras de edificación , rehabilitación y demolición*.
- Jiménez, L. M. B., N.F.S., T., & R.Y.D., D. (2019). Estudio para aprovechamiento de RCD en Santiago de Cali como agregado en materiales de construcción. *Bistua:Revista de La Facultad de Ciencias Básicas*, 17(1), 87–93.
- Liu, S., Dai, R., Cao, K., Gao, Z. (2017). *The role of sintered clay brick powder during the hydration process of cement pastes*.
- Londoño, J. (2016). *Comportamiento mecánico de elementos prefabricados de concreto con agregados reciclados dentro de la fuente que los genera*. Pontificia Universidad Javeriana Cali.
- Lum, C., Hung, K., Poh, S., & Alengaram, U. J. (2018). Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials : A review. *Journal of Cleaner Production*, 195, 226–239. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.193>
- Mahecha, L., & Calderón, L. (2018). *Diagnóstico y propuestas para la gestión de los residuos de construcción y demolición en la ciudad de Ibagué (Colombia)*. 21(1), 9–21.
- Marques Neto, J. da C. (2003). *Diagnóstico para estudo de gestão dos resíduos de construção e demolição do município de São Carlos-SP*. USP, Escola de Engenharia de São Carlos.
- Martinez, N. (2021). *Aprovechamiento de residuos cerámicos de construcción en concretos no estructurales fabricados en obra: estudio de caso*.

- Mena, C., & Valdés, Y. (2014). *Dosificación óptima de una mezcla de concreto con materiales reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) de la ciudad de cali para uso en obras viales de bajo tránsito.*
- Mercader Moyano, M. del P., Olivares Santiago, M., Ramírez de Arellano Agudo, A., Universidad de Sevilla. Vicerrectorado de Postgrado y Doctorado., Universidad de Sevilla. Departamento de Construcciones Arquitectónicas I., & Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. (2010). *Cuantificación de los recursos consumidos y emisiones de CO2 producidas en las construcciones de Andalucía y sus implicaciones en el protocolo de Kioto.* Universidad de Sevilla.
- Miniambiente. (2020). *Manejo y disposición de residuos de construcción y escombros.*
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Resolución No. 0472 “Por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición - RDC y se dictan otras disposiciones.” In *Resolución No. 0472* (p. 11).
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, & Instituto de Estudios Ambientales. (2017). *Consultoría para el análisis y evaluación de la situación actual de la internalización de costos ambientales y en salud por la gestión de residuos sólidos en Colombia. Fase II.* 166.
- Naciones Unidas. (2014). *La situación demográfica en el mundo.*
- Navrátilová, E., & Rovnaníková, P. (2016). Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. *Construction and Building Materials*, 120, 530–539. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.062>
- Nelson, J. D., & Miller, D. J. (1992). *Expansive soils problems and practices in foundation and pavement engineering.*
- Neville, A. (1997). *Propiedades do concreto* (E. Pini (ed.); 2 ed.).
- NTC 118. (2017). MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE FRAGUADO DEL CEMENTO HIDRÁULICO MEDIANTE EL APARATO DE

- VICAT. In *NTC 118* (Vol. 53, Issue 9, pp. 1689–1699).
- NTC 174. (2000). Especificaciones De Los Agregados Para Concreto. *Norma Tecnica Colombiana*, 22.
- NTC 176. (1995). Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso. In *Norma Técnica Colombiana* (Vol. 1, pp. 1–12).
- NTC 221. (2017). *Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico*. 1–8.
- NTC 237. (1995). *Método Para Determinar La Densidad Y La Absorción Del Agregado Fino*.
- NTC 33. (1997). *NORMA TÉCNICA NTC*.
- NTC 673. (2010). *ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECIMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO*. 571, 1–13.
- NTC 77. (2007). *Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos: Vol. i* (Issue 200, pp. 1–5).
- O'Farrell, M., Sabir, B., Wild, S. (2001). *Pore size distribution and compressive strength of waste clay brick mortar*.
- Omar Olmedo; David Barrera. (2015). *Utilización de residuos de construcción y demolición (RCD) ligados con materiales cementantes en pavimentos*.
- Ortiz, O. O., Pasqualino, J., & Castelles, F. (2010). Evaluación ambiental basado en el análisis del ciclo de vida (ACV) en la fase de construcción de una edificación en cataluña. *Afinidad LXVII*, 547(Jun), 175–181.
- Pedreño Manresa, A., Molina, Á., Codirector, G., & García-Legaz Quesada, I. (n.d.). *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA*.
- Pepe, M., Toledo Filho, R. D., Koenders, E. A. B., & Martinelli, E. (2014). Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete. *Construction and Building Materials*, 69, 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.084>

- Rengifo, D., & Chavez, H. (2015). *Influencia de la composición en el comportamiento mecánico de un residuo de construcción y demolición (RCD) como elemento de la estructura del pavimento*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Rengifo, D. V., & Chavez, H. (2015). *Influencia de la composición en el comportamiento mecánico de un residuo de construcción y demolición (RCD) como elemento de la estructura del pavimento*. Pontificia universidad Javeriana Cali.
- Robayo, R., Matthey, P., Silva, Y., Burgos, D., & Del Vasto, S. (2015). *Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento*. *19(44)*, 157–170.
- Robayo Salazar, R. A., Matthey Centeno, P. E., Silva Urrego, Y. F., Burgos Galindo, D. M., & Delvasto Arjona, S. (2015). Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento. *Revista Tecnura*, *19(44)*, 157. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a12>
- Rodríguez, C., Parra, C., Casado, G., Miñano, I., Albaladejo, F., Benito, F., & Sánchez, I. (2016). The incorporation of construction and demolition wastes as recycled mixed aggregates in non-structural concrete precast pieces. *Journal of Cleaner Production*, *127*, 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.137>
- Salazar, R., Centeno, P., & Silva, Y. (2015). *Residuos de construcción y demolición: Análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento*.
- Sharkawi, A. E.-D. M., Almofty, S. E.-D. M., & Abbass, E. S. M. (2016). Performance of Green Aggregate Produced by Recycling Demolition Construction Wastes (Case Study of Tanta City). *Engineering*, *08(02)*, 52–59. <https://doi.org/10.4236/eng.2016.82006>
- Shubbar, A. A., Sadique, M., Kot, P., & Atherton, W. (2019). Future of clay-based construction materials – A review. *Construction and Building Materials*, *210*, 172–187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.206>
- Soutsos, M. N., Tang, K., & Millard, S. G. (2011a). Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate. *Construction and Building Materials*, *25(2)*, 726–735. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.014>

- Soutsos, M. N., Tang, K., & Millard, S. G. (2011b). Use of recycled demolition aggregate in precast products, phase II: Concrete paving blocks. *Construction and Building Materials*, 25(7), 3131–3143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.024>
- Subba Rao, K. S., Rao, S. ., & Gangadhara, S. (2000). *Swelling behaviour of desiccated clay*.
- Subba Rao, K. S., & Satyadas, G. C. (1987). *Swelling potential with cycles of swelling and partial shrinkage*.
- UICN. (2011). *Guía de manejo de escombros y otros residuos de la construcción*.
- Urbana, C. (2017). Diagnóstico de la oferta. *Octava Edición*.
- Van Der Merve, H. (1964). *The prediction of heave from plasticity index and percentage clay fraction of the soils*.
- Villoria Sáez, P., & Osmani, M. (2019). A diagnosis of construction and demolition waste generation and recovery practice in the European Union. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118400. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118400>
- Wagih, A. M., El-Karmoty, H. Z., Ebid, M., & Okba, S. H. (2013). Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. *HBRC Journal*, 9(3), 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.08.007>
- Williams, A. A. B. (1957). Discussion on the prediction of total heave from the double oedometer test. *Symposium on Expansive Clays, South African Institution of Civil Engineer*, 57.
- Yong, R. N., & Warkentin, B. P. (1975). *Soil properties and behaviour*.
- Zabalza Bribián, I., & Aranda Usón, J. A. (2011). *Ecodiseño en la edificación*. Pressas Universitarias de Zaragoza.
- Zamora, C., & Jimenez, A. (2016). “*Diseño De Pavimento Flexible Sobre Suelos Expansivos Estabilizados Usando Ceniza Volante Y Polvo De Ladrillo*.”

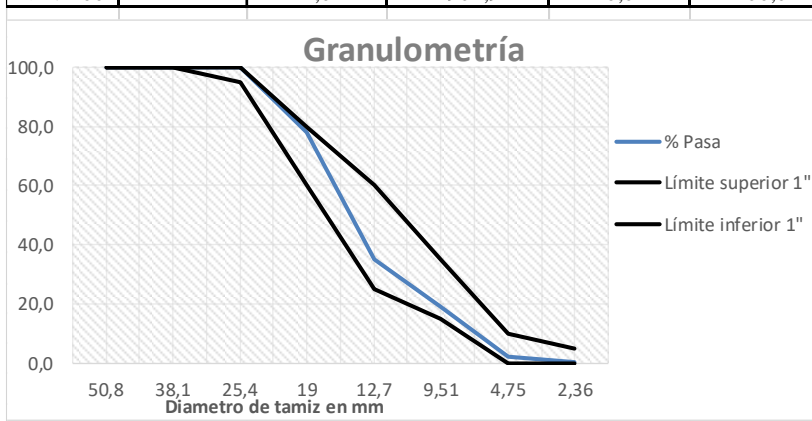
ANEXOS

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
	LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS
	MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO	Proyecto de Maestría	LOTE	1
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	Agregado grueso	MUESTRA	1
CLASIFICACIÓN	Agregado grueso	FECHA	
		HOJA No.	1 DE 1


Peso Inicial seco antes de lavado	g	4936
Peso seco después de lavado sobre malla 200	g	4902

Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Retenido (g)	Peso Retenido acum. (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa	Límite superior 1"	Límite inferior 1"
2"	50,8	0	0	0,0	0,0	100,0	100	100
1½"	38,1	0	0	0,0	0,0	100,0	100	100
1"	25,4	0	0	0,0	0,0	100,0	100	95
¾"	19	1086,7	1086,7	22,2	22,2	77,8	80	60
½"	12,7	2097	3183,7	42,8	64,9	35,1	60	25
⅜"	9,51	788,8	3972,5	16,1	81,0	19,0	35	15
Nº4	4,75	835,3	4807,8	17,0	98,1	1,9	10	0
Nº8	2,36	68,31	4876,11	1,4	99,5	0,5	5	0
Nº10	2	10,29	4886,4	0,2	99,7	0,3		
Nº16	1,18	3,75	4890,15	0,1	99,8	0,2		
Nº30	0,6	2,65	4892,8	0,1	99,8	0,2		
Nº40	0,425	0,8	4893,6	0,0	99,8	0,2		
Nº50	0,3	1,18	4894,78	0,0	99,9	0,1		
Nº100	0,15	1,42	4896,2	0,0	99,9	0,1		
Nº200	0,075	4,1	4900,3	0,1	100,0	0,0		
< Nº200		1,6	4901,9	0,0	100,0	0,0		




MF	7,0
TM	1"
TMN	1"


Anexo 1. Granulometría de agregado grueso (NTC 77-2007). Fuente: propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA					
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL					
	LABORATORIO DE PAVIMENTOS					
	PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS GRUESOS					
	MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL					
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría			LOTE		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Grava			MUESTRA	1	
CLASIFICACION	Grava	FECHA		HOJA No.	1	1
Ensayo No.				1	2	3
Masa de la muestra saturada y superficialmente seca , g		(B)	569,9	542,7	544,4	
Masa de la muestra sumergida en agua, g		(C)	373,4	355,7	356,9	
Masa al aire de la muestra de seca al horno, g		(A)	559,7	532,6	535,2	
CALCULOS						
Gravedad específica bulk,	Gsb		2,85	2,85	2,85	
Gravedad específica bulk saturada y superficialmente seca,	Gsb sss		2,90	2,90	2,90	
Gravedad específica aparente,	Gsa		3,00	3,01	3,00	
Absorción	%Abs		1,82%	1,90%	1,72%	

Anexo 2. Gravedad específica gruesa y absorción (NTC176-95). Fuente: propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA				
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL				
	LABORATORIO DE PAVIMENTOS				
	PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL				
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría			LOTE	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Arena			MUESTRA	1
CLASIFICACION	Arena	FECHA		HOJA No.	1 DE 1
ENSAYOS					
Ensayo No.				1	2
Picnómetro No.				1	3
Masa de la muestra saturada y superficialmente seca, g		(S)	500	500	500
Masa total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua, g		(C)	958,6	958,8	958,5
Temperatura de ensayo (°C)			34	32	33
Masa del picnómetro aforado lleno de agua, g		(B)	643,3	643,9	643,2
Masa al aire de la muestra de seca al horno, g		(A)	494,9	494,1	494,8
CÁLCULOS					
Gravedad específica bulk,		Gsb	2,68	2,67	2,68
Gravedad específica bulk saturada y superficialmente seca,		Gsb sss	2,71	2,70	2,71
Gravedad específica aparente,		Gsa	2,76	2,76	2,76
Absorción		%Abs	1,03	1,19	1,05


Anexo 4. Gravedad específica y absorción agregado fino (NTC237-95). Fuente: propia.

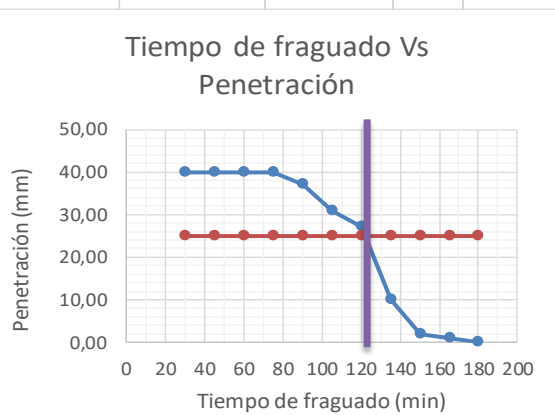
	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA				
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL				
	LABORATORIO DE PAVIMENTOS				
	FINURA DEL CEMENTO PORTLAND METODO DEL APARATO BLAINE MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL				
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría			LOTE	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cemento			MUESTRA	1
CLASIFICACION	Cemento	FECHA		HOJA No.	1 DE 1
ENSAYO					
			1	2	3
TEMPERATURA LABORATORIO		°C	26,4		
TEMPERATURA DEL CEMENTO		°C	26		
Ss SUPERFICIE ESPECIFICADE LA MUESTRA PATRON.		cm ² /g	3818		
Ts TIEMPO DE LA MUESTRA PATRON		Seg	82,52		
T TIEMPO DE LA MUESTRA ENSAYADA		Seg	121		
S SUPERFICIE ESPECIFICA DE LA MUESTRA ENSAYADA		cm ² /g	4623		
SUPERFICIE ESPECIFICA DE LA MUESTRA ENSAYADA PROMEDIO				4623,27	cm²/g

Anexo 5. Finura del cemento (NTC33-97). Fuente: propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL LABORATORIO DE PAVIMENTOS PESO ESPECIFICO CEMENTO HIDRAULICO MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL			
	PROYECTO Proyecto de Grado de Maestría	LOTE		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cemento		MUESTRA 1	
CLASIFICACION Cemento	FECHA		HOJA No. 1	DE 1
ENSAYO		1	2	3
TEMPERATURA DEL CEMENTO	°C	26	26	26
TEMPERATURA BAÑO DE AGUA	°C	26	26	26
PESO DE CEMENTO	g	64	64	64
LECTURA INICIAL ml	cm ³	0,2	0,2	0
LECTURA FINAL ml	cm ³	21	21,10	21,20
VOLUMEN DE LA MUESTRA DE CEMENTO	cm ³	21	20,90	21,20
PESO ESPECIFICO DEL CEMENTO	g/cm ³	3,08	3,06	3,02
PESO ESPECIFICO PROMEDIO		g/cm³	3,05	

Anexo 6. Peso específico del cemento (NTC221-17). Fuente: propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL LABORATORIO DE PAVIMENTOS TIEMPO DE FRAGUADO DEL CEMENTO HIDRAULICO METODO APARATO DE VICAT MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL			
	PROYECTO Proyecto de Grado de Maestría	LOTE		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Cemento		MUESTRA 1	
CLASIFICACION Cemento	FECHA		HOJA No. 1	DE 1
ENSAYO		1	Tiempo de fraguado	Penetración
TEMPERATURA DEL CEMENTO	°C	26	min	mm
TEMPERATURA DE AGUA	°C	26	30	40,00
			45	40,00
			60	40,00
			75	40,00
			90	37,00
			105	31
			120	27
			135	<u>10,00</u>
			150	<u>2,00</u>
			165	<u>1,00</u>
			180	0,00
			195	
			210	
			225	
			240	
			TIEMPO DE FRAGUADO INICIAL 25 mm	125,00
			TIEMPO DE FRAGUADO FINAL 0 mm	180,00



Anexo 7. Tiempo de fraguado (NTC118-17). Fuente: propia.

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL LABORATORIO DE PAVIMENTOS MASA UNITARIA MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL					
		PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría			LOTE	
		DESCRIPCION DEL MATERIAL	RCD Cerámico			MUESTRA	Cortadora
		CLASIFICACION	Ladrillo	FECHA		HOJA No.	1 DE 1
		Componentes de muestra		G (kg)	V (m3)	Masa unitaria	Datos Recipiente Grande:
RB Cortadora,	Muestra 1	24,94	0,0254	981,5	Diamtro Prom	0,344	
RB Cortadora,	Muestra 2	26,4	0,0316	835,7	Prof (m)	0,339	
RB Cortadora,	Muestra 3	27,66	0,0316	875,6	V (m3)	0,032	
RB Cortadora,	Muestra 4	28,82	0,0316	912,3	Peso (kg)	22,8	
RB Cortadora,	Muestra 5	26,52	0,0316	839,5			

Anexo 8. Masa unitaria (NTC92-95). Fuente: propia.

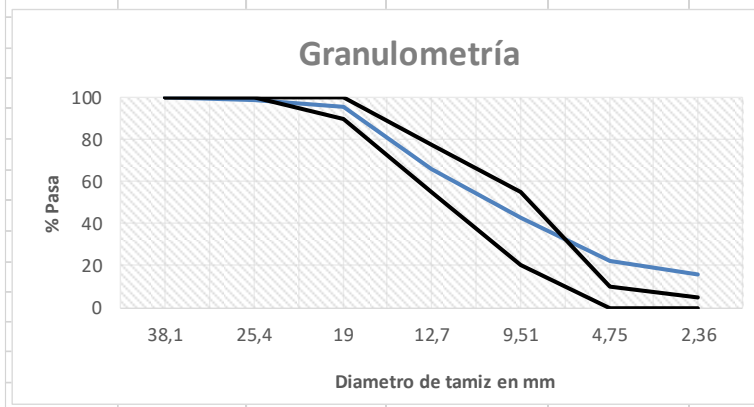


PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS
MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO	Proyecto de Maestría	LOTE		
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	RCD Cerámico	MUESTRA	Muestra 1	
CLASIFICACIÓN	Ladrillo	FECHA		
		HOJA No.	1	DE 1

Peso Inicial seco antes de lavado	g	4918
Peso seco después de lavado sobre malla 200	g	4061

Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Retenido (g)	Peso Retenido acum. (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa	superior 3/4"	Límite inferior 3/4"
1½"	38,1					100	100	100
1"	25,4	55	55	1,4	1,4	98,6	100	100
¾"	19	115	170	2,8	4,2	95,8	100	90
½"	12,7	1204	1374	29,6	33,8	66,2	78	55
3/8"	9,51	954	2328	23,5	57,3	42,7	55	20
Nº4	4,75	833	3161	20,5	77,8	22,2	10	0
Nº8	2,36	264,2	3425,2	6,5	84,3	15,7	5	0
Nº10	2	39,8	3465	1,0	85,3	14,7		
Nº16	1,18	135,89	3600,89	3,3	88,7	11,3		
Nº30	0,6	96,11	3697	2,4	91,0	9,0		
Nº40	0,425	29	3726	0,7	91,8	8,2		
Nº50	0,3	58,18	3784,18	1,4	93,2	6,8		
Nº100	0,15	69,82	3854	1,7	94,9	5,1		
Nº200	0,075	126	3980	3,1	98,0	2,0		
< Nº200		81	4061	2,0	100,0	0,0		



MF	5,9
TM	1½"
TMN	¾"

Anexo 9. Granulometría RCD Muestra1 (NTC77-2007). Fuente: propia.

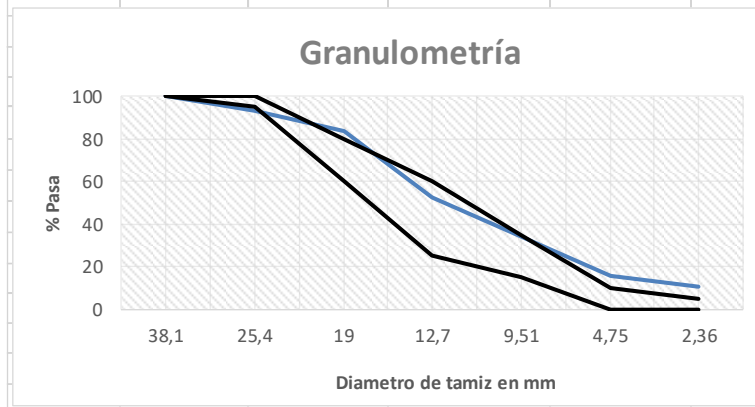


PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS
MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO	Proyecto de Maestría		LOTE	
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	RCD Cerámico		MUESTRA	Muestra 2
CLASIFICACIÓN	Ladrillo	FECHA	HOJA No.	1 DE 1

Peso Inicial seco antes de lavado	g	4523
Peso seco después de lavado sobre malla 200	g	3811

Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Retenido (g)	Peso Retenido acum. (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa	Límite superior 1"	Límite inferior 1"
1½"	38,1	60	60	1,6	1,6	100	100	100
1"	25,4	202	262	5,3	6,9	93,1	100	95
¾"	19	355	617	9,3	16,2	83,8	80	60
½"	12,7	1186	1803	31,1	47,3	52,7	60	25
3/8"	9,51	716	2519	18,8	66,1	33,9	35	15
N°4	4,75	707	3226	18,6	84,6	15,4	10	0
N°8	2,36	177,9	3403,9	4,7	89,3	10,7	5	0
N°10	2	26,8	3430,7	0,7	90,0	10,0		
N°16	1,18	88,3	3519	2,3	92,3	7,7		
N°30	0,6	62,46	3581,46	1,6	94,0	6,0		
N°40	0,425	18,84	3600,3	0,5	94,5	5,5		
N°50	0,3	34,09	3634,39	0,9	95,4	4,6		
N°100	0,15	40,91	3675,3	1,1	96,4	3,6		
N°200	0,075	82,4	3757,7	2,2	98,6	1,4		
< N°200		53,3	3811	1,4	100,0	0,0		



MF	6,4
TM	1½"
TMN	1"

Anexo 10. Granulometría RCD Muestra2 (NTC77-2007). Fuente: propia.

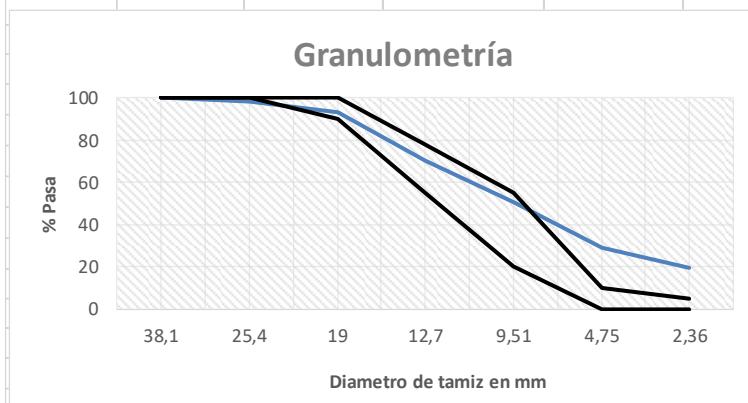


PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS
MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO	Proyecto de Maestría	LOTE		
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	RCD Cerámico	MUESTRA	Muestra 3	
CLASIFICACIÓN	Ladrillo	FECHA		
		HOJA No.	1	DE 1

Peso Inicial seco antes de lavado	g	4399
Peso seco después de lavado sobre malla 200	g	4180

Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Retenido (g)	Peso Retenido acum. (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa	Límite superior 3/4"	Límite inferior 3/4"
1½"	38,1	0	0	0,0	0,0	100	100	100
1"	25,4	62	62	1,5	1,5	98,5	100,0	100,0
¾"	19	218	280	5,2	6,7	93,3	100,0	90,0
½"	12,7	970	1250	23,2	29,9	70,1	78,0	55,0
3/8"	9,51	803	2053	19,2	49,1	50,9	55,0	20,0
Nº4	4,75	912	2965	21,8	70,9	29,1	10,0	0,0
Nº8	2,36	396,31	3361,31	9,5	80,4	19,6	5,0	0,0
Nº10	2	59,69	3421	1,4	81,8	18,2		
Nº16	1,18	211,9	3632,9	5,1	86,9	13,1		
Nº30	0,6	149,88	3782,78	3,6	90,5	9,5		
Nº40	0,425	45,22	3828	1,1	91,6	8,4		
Nº50	0,3	77,27	3905,27	1,8	93,4	6,6		
Nº100	0,15	92,73	3998	2,2	95,6	4,4		
Nº200	0,075	138	4136	3,3	98,9	1,1		
< Nº200		44	4180	1,1	100,0	0,0		



MF	5,7
TM	1½"
TMN	¾"

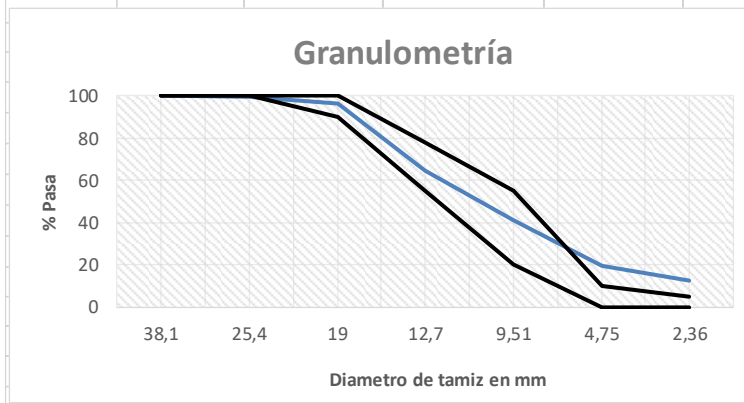
Anexo 11. Granulometría RCD Muestra3 (NTC77-2007). Fuente: propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA		
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL		
	LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES		
	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS		
	MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL		

PROYECTO	Proyecto de Maestría	LOTE		
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	RCD Cerámico	MUESTRA	Muestra 4	
CLASIFICACIÓN	Ladrillo	FECHA		
		HOJA No.	1	DE 1

Peso Inicial seco antes de lavado	g	4713
Peso seco después de lavado sobre malla 200	g	4445

Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Retenido (g)	Peso Retenido acum. (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa	Límite superior 3/4"	Límite inferior 3/4"
1½"	38,1	0	0	0,0	0,0	100	100	100
1"	25,4	29	29	0,7	0,7	99,3	100,0	100,0
¾"	19	139	168	3,1	3,8	96,2	100,0	90,0
½"	12,7	1394	1562	31,4	35,1	64,9	78,0	55,0
3/8"	9,51	1067	2629	24,0	59,1	40,9	55,0	20,0
Nº4	4,75	963	3592	21,7	80,8	19,2	10,0	0,0
Nº8	2,36	298,1	3890,1	6,7	87,5	12,5	5,0	0,0
Nº10	2	44,9	3935	1,0	88,5	11,5		
Nº16	1,18	130,16	4065,16	2,9	91,5	8,5		
Nº30	0,6	92,06	4157,22	2,1	93,5	6,5		
Nº40	0,425	27,78	4185	0,6	94,2	5,8		
Nº50	0,3	48,64	4233,64	1,1	95,2	4,8		
Nº100	0,15	58,36	4292	1,3	96,6	3,4		
Nº200	0,075	103	4395	2,3	98,9	1,1		
< Nº200		50	4445	1,1	100,0	0,0		



MF	6,1
TM	1½"
TMN	¾"

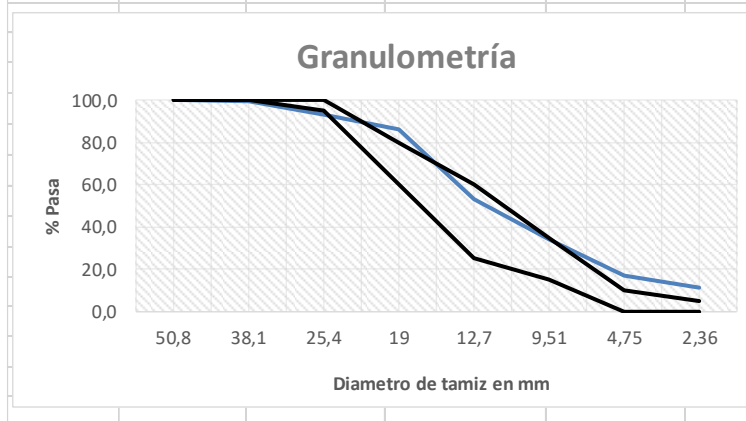
Anexo 12. Granulometría RCD Muestra4 (NTC77-2007). Fuente: propia.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS
MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO	Proyecto de Maestría	LOTE	
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	RCD Cerámico	MUESTRA	Muestra 5
CLASIFICACIÓN	Ladrillo	FECHA	
		HOJA No.	1 DE 1
Peso Inicial seco antes de lavado	g	4885	
Peso seco después de lavado sobre malla 200	g	4780	

Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Retenido (g)	Peso Retenido acum. (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa	Límite superior 1"	Límite inferior 1"
2"	50,8	0	0	0,0	0,0	100,0	100	100
1½"	38,1	18,9	18,9	0,4	0,4	99,6	100	100
1"	25,4	292,9	311,8	6,1	6,5	93,5	100	95
¾"	19	355,2	667	7,4	14,0	86,0	80	60
½"	12,7	1579,9	2246,9	33,1	47,0	53,0	60	25
3/8"	9,51	891,8	3138,7	18,7	65,7	34,3	35	15
Nº4	4,75	828	3966,7	17,3	83,0	17,0	10	0
Nº8	2,36	279,41	4246,11	5,8	88,8	11,2	5	0
Nº10	2	42,09	4288,2	0,9	89,7	10,3		
Nº16	1,18	140,05	4428,25	2,9	92,6	7,4		
Nº30	0,6	99,06	4527,31	2,1	94,7	5,3		
Nº40	0,425	29,89	4557,2	0,6	95,3	4,7		
Nº50	0,3	53,55	4610,75	1,1	96,5	3,5		
Nº100	0,15	64,25	4675	1,3	97,8	2,2		
Nº200	0,075	71	4746	1,5	99,3	0,7		
< Nº200		34	4780	0,7	100,0	0,0		




MF	6,3
TM	1½"
TMN	1"

Anexo 13. Granulometría RCD Muestra5 (NTC77-2007). Fuente: propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA			
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL			
	LABORATORIO DE PAVIMENTOS			
	PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS GRUESOS			
	MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL			
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría	LOTE	Cortadora	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	RCD Cerámico	MUESTRA	Muestra 1	
CLASIFICACION	Ladrillo	HOJA No.	1	DE 1
CÁLCULOS		Muestra 1		
Gravedad específica bulk,	Gsb	1,84	1,86	1,85
Gravedad específica bulk saturada y superficialmente seca.	Gsb sss	2,16	2,17	2,17
Gravedad específica aparente,	Gsa	2,71	2,70	2,71
Absorción	%Abs	17,44%	16,71%	17,23%

Anexo 14. Gravedad específica gruesa y absorción RCD Muestra1 (NTC176-95). Fuente: propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA			
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL			
	LABORATORIO DE PAVIMENTOS			
	PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS GRUESOS			
	MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL			
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría	LOTE	Cortadora	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	RCD Cerámico	MUESTRA	Muestra 2	
CLASIFICACION	Ladrillo	HOJA No.	1	DE 1
CÁLCULOS		Muestra 2		
Gravedad específica bulk,	Gsb	1,85	1,85	1,85
Gravedad específica bulk saturada y superficialmente seca.	Gsb sss	2,17	2,16	2,16
Gravedad específica aparente,	Gsa	2,70	2,69	2,70
Absorción	%Abs	17,06%	16,78%	16,98%

Anexo 15. Gravedad específica gruesa y absorción RCD Muestra2 (NTC176-95). Fuente: propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA				
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL				
	LABORATORIO DE PAVIMENTOS				
	PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS GRUESOS				
MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL					
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría		LOTE	Cortadora	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	RCD Cerámico		MUESTRA	Muestra 3	
CLASIFICACION	Ladrillo		HOJA No.	1	DE 1
CÁLCULOS			Muestra 3		
Gravedad específica bulk,	Gsb	1,85	1,81	1,83	
Gravedad específica bulk saturada y superficialmente sec	Gsb sss	2,16	2,14	2,15	
Gravedad específica aparente,	Gsa	2,70	2,71	2,71	
Absorción	%Abs	17,18%	18,33%	17,89%	

Anexo 16. Gravedad específica gruesa y absorción RCD Muestra3 (NTC176-95). Fuente: propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA				
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL				
	LABORATORIO DE PAVIMENTOS				
	PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS GRUESOS				
MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL					
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría		LOTE	Cortadora	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	RCD Cerámico		MUESTRA	Muestra 4	
CLASIFICACION	Ladrillo		HOJA No.	1	DE 1
CÁLCULOS			Muestra 4		
Gravedad específica bulk,	Gsb	1,85	1,84	1,88	
Gravedad específica bulk saturada y superficialmente se	Gsb sss	2,17	2,17	2,20	
Gravedad específica aparente,	Gsa	2,73	2,72	2,77	
Absorción	%Abs	17,32%	17,49%	17,20%	

Anexo 17. Gravedad específica gruesa y absorción RCD Muestra4 (NTC176-95). Fuente: propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA				
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL				
	LABORATORIO DE PAVIMENTOS				
	PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS GRUESOS				
	MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL				
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría		LOTE	Cortadora	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	RCD Cerámico		MUESTRA	Muestra 5	
CLASIFICACION	Ladrillo		HOJA No.	1	DE 1
CÁLCULOS			Muestra 5		
Gravedad específica bulk,	Gsb	1,85	1,85	1,86	
Gravedad específica bulk saturada y superficialmente se	Gsb sss	2,17	2,17	2,17	
Gravedad específica aparente,	Gsa	2,72	2,70	2,70	
Absorción	%Abs	17,09%	16,92%	16,79%	


Anexo 18. Gravedad específica gruesa y absorción RCD Muestra5 (NTC176-95). Fuente: propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA				
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL				
	LABORATORIO DE PAVIMENTOS				
	PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS				
	MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL				
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría		LOTE	Cortadora	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	RCD Cerámico		MUESTRA	Muestra 1	
CLASIFICACION	Ladrillo		HOJA No.	1	DE 1
CÁLCULOS			Muestra 1		
Gravedad específica bulk,	Gsb	2,19	2,22	2,22	
Gravedad específica bulk saturada y superficialmente se	Gsb sss	2,54	2,58	2,57	
Gravedad específica aparente,	Gsa	3,38	3,47	3,43	
Absorción	%Abs	16,04	16,25	15,96	

Anexo 19. Gravedad específica fina y absorción RCD Muestra1 (NTC237-95). Fuente: propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA				
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL				
	LABORATORIO DE PAVIMENTOS				
	PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS				
MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL					
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría		LOTE	Cortadora	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	RCD Cerámico		MUESTRA	Muestra 2	
CLASIFICACION	Ladrillo		HOJA No.	1	DE 1
CÁLCULOS			Muestra 1		
Gravedad específica bulk,	Gsb		2,19	2,20	2,19
Gravedad específica bulk saturada y superficialmente se	Gsb sss		2,54	2,54	2,54
Gravedad específica aparente,	Gsa		3,37	3,35	3,36
Absorción	%Abs		15,85	15,50	15,90

Anexo 20. Gravedad específica fina y absorción RCD Muestra2 (NTC237-95). Fuente: propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA				
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL				
	LABORATORIO DE PAVIMENTOS				
	PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS				
MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL					
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría		LOTE	Cortadora	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	RCD Cerámico		MUESTRA	Muestra 3	
CLASIFICACION	Ladrillo		HOJA No.	1	DE 1
CÁLCULOS			Muestra 1		
Gravedad específica bulk,	Gsb		1,85	1,85	1,84
Gravedad específica bulk saturada y superficialmente se	Gsb sss		2,17	2,17	2,17
Gravedad específica aparente,	Gsa		2,75	2,75	2,74
Absorción	%Abs		17,79	17,79	17,67


Anexo 21. Gravedad específica fina y absorción RCD Muestra3 (NTC237-95). Fuente: propia.

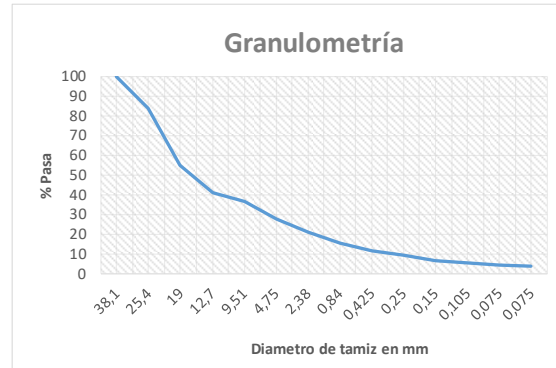
	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA				
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL				
	LABORATORIO DE PAVIMENTOS				
	PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS				
	MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL				
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría		LOTE	Cortadora	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	RCD Cerámico		MUESTRA	Muestra 4	
CLASIFICACION	Ladrillo		HOJA No.	1	DE 1
CÁLCULOS			Muestra 1		
Gravedad específica bulk,	Gsb	1,90	1,91	1,90	
Gravedad específica bulk saturada y superficialmente se	Gsb sss	2,21	2,22	2,21	
Gravedad específica aparente,	Gsa	2,74	2,76	2,75	
Absorción	%Abs	16,09	16,01	16,25	

Anexo 22. Gravedad específica fina y absorción RCD Muestra4 (NTC237-95). Fuente: propia.


	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA				
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL				
	LABORATORIO DE PAVIMENTOS				
	PESO ESPECIFICO Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS				
	MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL				
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría		LOTE	Cortadora	
DESCRIPCION DEL MATERIAL	RCD Cerámico		MUESTRA	Muestra 5	
CLASIFICACION	Ladrillo		HOJA No.	1	DE 1
CÁLCULOS			Muestra 1		
Gravedad específica bulk,	Gsb	2,17	2,19	2,18	
Gravedad específica bulk saturada y superficialmente se	Gsb sss	2,55	2,56	2,55	
Gravedad específica aparente,	Gsa	3,50	3,51	3,49	
Absorción	%Abs	17,45	17,29	17,34	

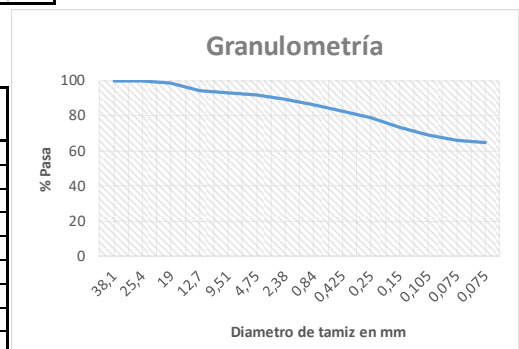
Anexo 23. Gravedad específica fina y absorción RCD Muestra5 (NTC237-95). Fuente: propia.

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL LABORATORIO DE SUELOS ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL				
PROYECTO	Proyecto de Maestría	LOTE				
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	Suelo	MUESTRA	Muestra 1			
CLASIFICACIÓN	Suelo	FECHA	HOJA No.	1	DE 1	
Peso Inicial seco antes de lavado (g)		1010,8				
Peso seco g		966,2				
Peso seco después de lavado sobre malla 200 (g)		930,3				
Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Retenido (g)	Peso Retenido acum. (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
1½"	38,1					100
1"	25,4	156,1	156,1	16,1	16,1	83,9
¾"	19	279,4	435,5	28,9	45,0	55,0
1/2"	12,7	134	569,5	13,9	58,9	41,1
3/8"	9,51	47,3	616,8	4,9	63,8	36,2
Nº4	4,75	82,7	699,5	8,6	72,3	27,7
Nº10	2,38	67,4	766,9	7,0	79,3	20,7
Nº20	0,84	50,6	817,5	5,2	84,5	15,5
Nº40	0,425	37,6	855,1	3,9	88,4	11,6
Nº60	0,25	24,1	879,2	2,5	90,9	9,1
Nº100	0,15	23,4	902,6	2,4	93,3	6,7
Nº140	0,105	13,4	916	1,4	94,7	5,3
Nº200	0,075	10,6	926,6	1,1	95,8	4,2
< Nº200	0,075	3,7	930,3	0,5	96,3	3,7
< Nº200						




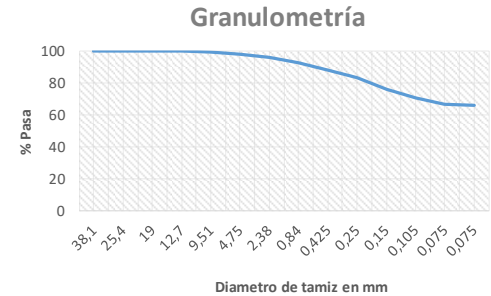
Anexo 24. Granulometría de suelo Muestra1 (ASTMD2488-17). Fuente: propia.

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL LABORATORIO DE SUELOS ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL				
PROYECTO	Proyecto de Maestría	LOTE				
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	Suelo	MUESTRA	Muestra 2			
CLASIFICACIÓN	Suelo	FECHA	HOJA No.	1	DE 1	
Peso Inicial seco antes de lavado (g)		1020,2				
Peso seco g		893,42				
Peso seco después de lavado sobre malla 200 (g)		313,1				
Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Retenido (g)	Peso Retenido acum. (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
1½"	38,1	-				100
1"	25,4	-	0	0,0	0,0	100,0
¾"	19	14,2	14,2	1,6	1,6	98,4
1/2"	12,7	40,1	54,3	4,5	6,1	93,9
3/8"	9,51	7,0	61,3	0,8	6,8	93,2
Nº4	4,75	13,4	74,7	1,5	8,3	91,7
Nº10	2,38	23,7	98,4	2,6	11,0	89,0
Nº20	0,84	25,3	123,7	2,8	13,8	86,2
Nº40	0,425	32,4	156,1	3,6	17,4	82,6
Nº60	0,25	34,9	191	3,9	21,3	78,7
Nº100	0,15	51,3	242,3	5,7	27,0	73,0
Nº140	0,105	36,5	278,8	4,1	31,1	68,9
Nº200	0,075	29,8	308,6	3,3	34,4	65,6
< Nº200	0,075	4,5	313,1	0,7	35,0	65,0
< Nº200						




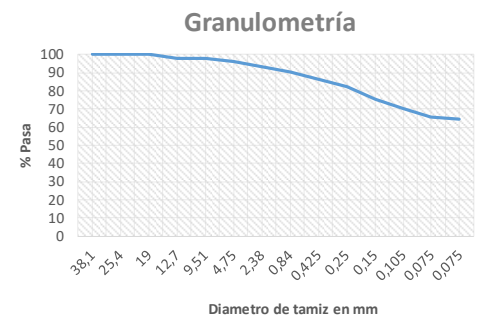
Anexo 25. Granulometría de suelo Muestra2 (ASTMD2488-17). Fuente: propia.

 PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL LABORATORIO DE SUELOS ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL						
PROYECTO	Proyecto de Maestría			LOTE		
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	Suelo			MUESTRA	Muestra 3	
CLASIFICACIÓN	Suelo			FECHA	HOJA No.	1 DE 1
Peso Inicial seco antes de lavado (g)				1017		
Peso seco g				874,5		
Peso seco después de lavado sobre malla 200 (g)				295		
Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Retenido (g)	Peso Retenido acum. (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
1½"	38,1	-			-	100
1"	25,4	-			-	100,0
¾"	19	-			-	100,0
½"	12,7	-			0	100,0
3/8"	9,51	3,1	3,1	0,4	0,4	99,6
Nº4	4,75	9,7	12,8	1,1	1,5	98,5
Nº10	2,38	21,8	34,6	2,5	4,0	96,0
Nº20	0,84	28,9	63,5	3,3	7,3	92,7
Nº40	0,425	38,3	101,8	4,3	11,6	88,4
Nº60	0,25	41,0	142,8	4,7	16,3	83,7
Nº100	0,15	64,8	207,6	7,4	23,7	76,3
Nº140	0,105	44,2	251,8	5,1	28,8	71,2
Nº200	0,075	36,0	287,8	4,1	32,9	67,1
< Nº200	0,075	7,2	295	0,8	33,7	66,3
< Nº200						




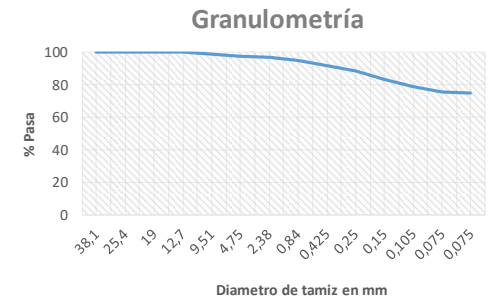
Anexo 26. Granulometría de suelo Muestra3 (ASTMD2488-17). Fuente: propia.

 PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL LABORATORIO DE SUELOS ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL						
PROYECTO	Proyecto de Maestría			LOTE		
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	Suelo			MUESTRA	Muestra 4	
CLASIFICACIÓN	Suelo			FECHA	HOJA No.	1 DE 1
Peso Inicial seco antes de lavado (g)				1018,8		
Peso seco g				923,998		
Peso seco después de lavado sobre malla 200 (g)				330,2		
Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Retenido (g)	Peso Retenido acum. (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
1½"	38,1					100
1"	25,4	0,0	0	0,0	0,0	100,0
¾"	19	0,0	0	0,0	0,0	100,0
½"	12,7	17,4	17,4	1,9	1,9	98,1
3/8"	9,51	1,5	18,9	0,1	2,0	98,0
Nº4	4,75	16,5	35,4	1,8	3,8	96,2
Nº10	2,38	23,3	58,7	2,6	6,4	93,6
Nº20	0,84	29,5	88,2	3,1	9,5	90,5
Nº40	0,425	35,6	123,8	3,9	13,4	86,6
Nº60	0,25	37,2	161	4,0	17,4	82,6
Nº100	0,15	64,8	225,8	7,0	24,4	75,6
Nº140	0,105	50,5	276,3	5,5	29,9	70,1
Nº200	0,075	42,5	318,8	4,6	34,5	65,5
< Nº200	0,075	11,4	330,2	1,2	35,7	64,3
< Nº200						




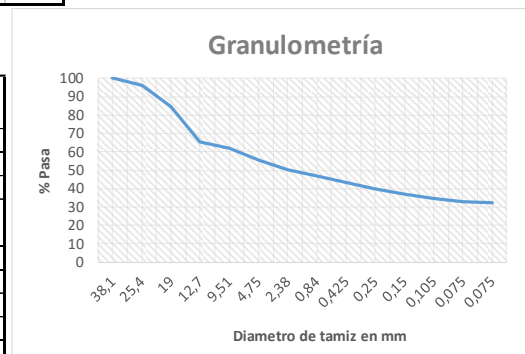
Anexo 27. Granulometría de suelo Muestra4 (ASTMD2488-17). Fuente: propia.

 PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL LABORATORIO DE SUELOS ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL						
PROYECTO	Proyecto de Maestría			LOTE		
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	Suelo			MUESTRA	Muestra 5	
CLASIFICACIÓN	Suelo		FECHA	HOJA No.	1	DE 1
Peso Inicial seco antes de lavado (g)				1047,9		
Peso seco g				921,64		
Peso seco después de lavado sobre malla 200 (g)				231,2		
Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Retenido (g)	Peso Retenido acum. (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
1½"	38,1	-	-	-	-	100
1"	25,4	-	0	0,0	-	100,0
¾"	19	-	0	0,0	-	100,0
½"	12,7	-	0	0,0	-	100,0
3/8"	9,51	9,4	9,4	1,0	1,0	99,0
Nº4	4,75	9,7	19,1	1,1	2,1	97,9
Nº10	2,38	6,6	25,7	0,7	2,8	97,2
Nº20	0,84	21,3	47	2,3	5,1	94,9
Nº40	0,425	26,0	73	2,8	7,9	92,1
Nº60	0,25	31,5	104,5	3,4	11,3	88,7
Nº100	0,15	50,5	155	5,5	16,8	83,2
Nº140	0,105	38,2	193,2	4,2	21,0	79,0
Nº200	0,075	31,9	225,1	3,4	24,4	75,6
< Nº200	0,075	6,1	231,2	0,7	25,1	74,9
< Nº200						




Anexo 28. Granulometría de suelo Muestra5 (ASTMD2488-17). Fuente: propia.

 PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL LABORATORIO DE SUELOS ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL						
PROYECTO	Proyecto de Maestría			LOTE		
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	Suelo			MUESTRA	Muestra 6	
CLASIFICACIÓN	Suelo		FECHA	HOJA No.	1	DE 1
Peso Inicial seco antes de lavado (g)				1033,1		
Peso seco g				975,91		
Peso seco después de lavado sobre malla 200 (g)				661,3		
Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Retenido (g)	Peso Retenido acum. (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
1½"	38,1	-	-	-	-	100
1"	25,4	37,9	37,9	3,9	3,9	96,1
¾"	19	115,0	152,9	11,8	15,7	84,3
½"	12,7	186,2	339,1	19,0	34,7	65,3
3/8"	9,51	30,7	369,8	3,2	37,9	62,1
Nº4	4,75	62,9	432,7	6,4	44,3	55,7
Nº10	2,38	49,9	482,6	5,2	49,5	50,5
Nº20	0,84	35,6	518,2	3,6	53,1	46,9
Nº40	0,425	35,4	553,6	3,6	56,7	43,3
Nº60	0,25	31,5	585,1	3,3	60,0	40,0
Nº100	0,15	33,1	618,2	3,3	63,3	36,7
Nº140	0,105	20,3	638,5	2,1	65,4	34,6
Nº200	0,075	15,9	654,4	1,7	67,1	32,9
< Nº200	0,075	6,9	661,3	0,7	67,8	32,2
< Nº200						




Anexo 29. Granulometría de suelo Muestra6 (ASTMD2488-17). Fuente: propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA				
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL				
	LABORATORIO DE SUELOS				
	PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN DE SUELOS				
	MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL				
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría		LOTE		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Suelo		MUESTRA	Muestra 1	
CLASIFICACION	Suelo		HOJA No.	1	DE 1
Ensayo No.			1	2	3
Masa de la muestra saturada y superficialmente seca , g		(B)	42,13	42,90	43,51
Masa de la muestra sumergida en agua, g		(C)	31,7	32,3	32,8
Masa al aire de la muestra de seca al horno, g		(A)	29,2	29,8	30,3
CÁLCULOS					
Gravedad específica bulk,		Gsb	2,80	2,81	2,83
Gravedad específica bulk saturada y superficialmente seca.		Gsb sss	4,04	4,05	4,06
Absorción		%Abs	44%	44%	44%


Anexo 30. Gravedad específica y absorción de suelo Muestra1 (ASTMD854-14). Fuente: propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA				
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL				
	LABORATORIO DE SUELOS				
	PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN DE SUELOS				
	MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL				
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría		LOTE		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Suelo		MUESTRA	Muestra 2	
CLASIFICACION	Suelo		HOJA No.	1	DE 1
Ensayo No.			1	2	3
Masa de la muestra saturada y superficialmente seca , g		(B)	20,60	19,96	21,09
Masa de la muestra sumergida en agua, g		(C)	15,6	15,2	16
Masa al aire de la muestra de seca al horno, g		(A)	13,5	13,1	13,8
CÁLCULOS					
Gravedad específica bulk,		Gsb	2,70	2,75	2,71
Gravedad específica bulk saturada y superficialmente seca.		Gsb sss	4,12	4,19	4,14
Absorción		%Abs	53%	52%	53%


Anexo 31. Gravedad específica y absorción de suelo Muestra2 (ASTMD854-14). Fuente: propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA				
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL				
	LABORATORIO DE SUELOS				
	PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN DE SUELOS				
	MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL				
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría		LOTE		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Suelo		MUESTRA	Muestra 3	
CLASIFICACION	Suelo		HOJA No.	1	DE 1
Ensayo No.			1	2	3
Masa de la muestra saturada y superficialmente seca , g		(B)	46,24	50,66	51,72
Masa de la muestra sumergida en agua, g		(C)	35,3	38,5	39,4
Masa al aire de la muestra de seca al horno, g		(A)	30,4	33,2	34
CÁLCULOS					
Gravedad específica bulk,		Gsb	2,78	2,73	2,76
seca.		Gsb sss	4,23	4,17	4,20
Absorción		%Abs	52%	53%	52%


Anexo 32. Gravedad específica y absorción de suelo Muestra3 (ASTMD854-14). Fuente: propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA				
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL				
	LABORATORIO DE SUELOS				
	PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN DE SUELOS				
	MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL				
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría		LOTE		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Suelo		MUESTRA	Muestra 4	
CLASIFICACION	Suelo		HOJA No.	1	DE 1
Ensayo No.			1	2	3
Masa de la muestra saturada y superficialmente seca , g		(B)	44,48	45,24	44,45
Masa de la muestra sumergida en agua, g		(C)	33,9	34,4	34,1
Masa al aire de la muestra de seca al horno, g		(A)	29,3	29,7	29,5
CÁLCULOS					
Gravedad específica bulk,		Gsb	2,77	2,74	2,85
seca.		Gsb sss	4,20	4,17	4,29
Absorción		%Abs	52%	52%	51%

Anexo 33. Gravedad específica y absorción de suelo Muestra4 (ASTMD854-14). Fuente: propia.

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA				
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL				
	LABORATORIO DE SUELOS				
	PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN DE SUELOS				
	MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL				
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría		LOTE		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Suelo		MUESTRA	Muestra 5	
CLASIFICACION	Suelo		HOJA No.	1	DE 1
Ensayo No.			1	2	3
Masa de la muestra saturada y superficialmente seca , g		(B)	45,43	45,67	46,95
Masa de la muestra sumergida en agua, g		(C)	34,3	34,5	35,3
Masa al aire de la muestra de seca al horno, g		(A)	29,5	29,7	30,4
CÁLCULOS					
Gravedad específica bulk,		Gsb	2,65	2,66	2,61
seca.		Gsb sss	4,08	4,09	4,03
Absorción		%Abs	54%	54%	54%

Anexo 34. Gravedad específica y absorción de suelo Muestra5 (ASTMD854-14). Fuente: propia.

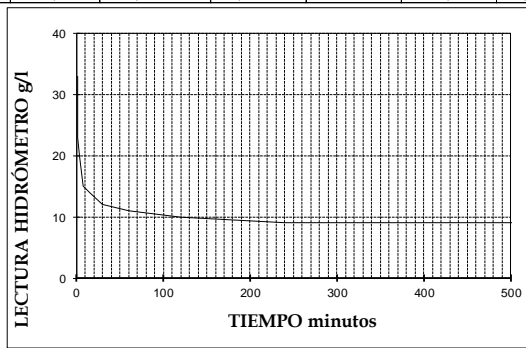
	PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA				
	DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL				
	LABORATORIO DE SUELOS				
	PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN DE SUELOS				
	MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL				
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría		LOTE		
DESCRIPCION DEL MATERIAL	Suelo		MUESTRA	Muestra 6	
CLASIFICACION	Suelo		HOJA No.	1	DE 1
Ensayo No.			1	2	3
Masa de la muestra saturada y superficialmente seca , g		(B)	44,60	52,17	52,04
Masa de la muestra sumergida en agua, g		(C)	34,1	39,8	39,7
Masa al aire de la muestra de seca al horno, g		(A)	29,5	34,5	34,3
CÁLCULOS					
Gravedad específica bulk,		Gsb	2,81	2,79	2,78
Gravedad específica bulk saturada y superficialmente seca.		Gsb sss	4,25	4,22	4,22
Absorción		%Abs	51%	51%	52%

Anexo 35. Gravedad específica y absorción de suelo Muestra6 (ASTMD854-14). Fuente: propia.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS
ENSAYO DE HIDROMETRÍA

PROYECTO		Proyecto de Maestría			LOTE								
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL		Suelo			MUESTRA		Muestra 1						
CLASIFICACIÓN		FECHA			HOJA No.		1		DE		1		
Hidrometro #	28481/10	Ecuación de calibración (ASTM 152H)			a=	-0,1639	b=	16,298					
Peso de suelo húmedo (g)	50	Gravedad específica de la muestra			2,82	Humedad del suelo (%)		0,0					
PH de la muestra		Factor de corrección por gravedad			0,965	Peso del suelo seco (g)		50,0					
Tipo de dispersante	Hexametafos	Corrección por menisco			0,5	Pasante de la malla #200		3,7119					
Tiempo lectura	Temperatura suspensión	Lectura del Hidrómetro	Lectura del Agente	Corrección por temperatura	Viscosidad del agua h	Gravedad específica suspensión G1	Corrección por agente dispersante	Profundidad efectiva hidrómetro L	Díámetro partícula D	Lectura hidrómetro corregida	Porcentaje que pasa P	Porcentaje que pasa referido P200	
(min)	°C	g/lt	g/lt	g/lt	g/cm.s	g/cm ³	g/lt	cm	mm	g/l	%	%	
1	26,4	33	2	1,0	0,00863	1,00002	0	10,97	0,03990	34,0	65,6	2,4	
2	26,5	23	2	1,0	0,00861	1,00002	0	12,61	0,03021	24,0	46,3	1,7	
4	26,4	20	2	1,0	0,00863	1,00002	0	13,10	0,02180	21,0	40,5	1,5	
8	26,4	15	2	1,0	0,00863	1,00002	0	13,92	0,01589	16,0	30,9	1,1	
15	26,4	14	2	1,0	0,00863	1,00002	0	14,09	0,01167	15,0	28,9	1,1	
30	26,4	12	2	1,0	0,00863	1,00002	0	14,41	0,00835	13,0	25,1	0,9	
60	26,4	11	2	1,0	0,00863	1,00002	0	14,58	0,00594	12,0	23,2	0,9	
120	26,4	10	2	1,0	0,00863	1,00002	0	14,74	0,00422	11,0	21,2	0,8	
240	26,4	9	2	1,0	0,00863	1,00002	0	14,90	0,00300	10,0	19,3	0,7	
480	26,4	9	2	1,0	0,00863	1,00002	0	14,90	0,00212	10,0	19,3	0,7	
1440	24,7	9	2	1,0	0,00898	1,00002	0	14,90	0,00125	10,0	19,3	0,7	



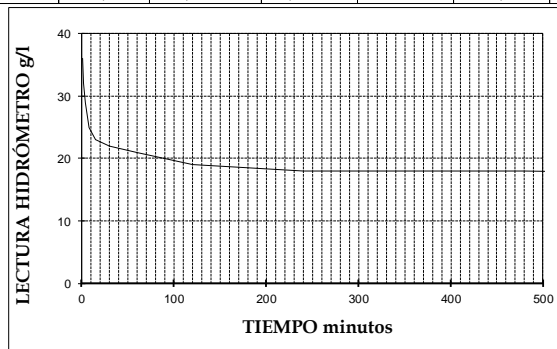
Anexo 36. Resultados ensayo Hidrometría Muestra1 (ASTMD4221-18). Fuente: propia.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS
ENSAYO DE HIDROMETRÍA

PROYECTO		Proyecto de Maestría		LOTE									
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL		Suelo		MUESTRA		Muestra 2							
CLASIFICACION		FECHA		HOJA No.		1		DE		1			
Hidrometro #	28481/10	Ecuación de calibración (ASTM 152H)		a=	-0,1639	b=	16,298						
Peso de suelo húmedo	50	Gravedad específica de la muestra		2,72	Humedad del suelo (%)		0,0						
PH de la muestra		Factor de corrección por gravedad		0,985	Peso del suelo seco (g)		50,0						
Tipo de dispersante	Hexametaf	Corrección por menisco		0,5	Pasante de la malla #200		64,955						

Tiempo lectura	Temperatura suspensión	Lectura del Hidrómetro	Lectura del Agente	Corrección por temperatura	Viscosidad del agua h	Gravedad específica suspensión G1	Corrección por agente dispersante	Profundidad efectiva hidrómetro L	Diámetro partícula D	Lectura hidrómetro corregida	Porcentaje que pasa P	Porcentaje que pasa referido P200
(min)	°C	g/lt	g/lt	g/lt	g/cm.s	g/cm ³	g/lt	cm	mm	g/l	%	%
1	26,4	36	3	1,0	0,00863	1,00102	0	10,48	0,04012	37,0	72,9	47,3
2	26,4	32	3	1,0	0,00863	1,00102	0	11,14	0,02925	33,0	65,0	42,2
4	26,2	29	3	1,0	0,00867	1,00102	0	11,63	0,02118	30,0	59,1	38,4
8	26,2	25	3	1,0	0,00867	1,00102	0	12,28	0,01539	26,0	51,2	33,3
15	26,3	23	4	1,0	0,00865	1,00202	0	12,61	0,01138	24,0	47,3	30,7
30	26,3	22	4	1,0	0,00865	1,00202	0	12,77	0,00810	23,0	45,3	29,4
60	26,3	21	4	1,0	0,00865	1,00202	0	12,94	0,00576	22,0	43,3	28,1
120	26,3	19	4	1,0	0,00865	1,00202	0	13,27	0,00413	20,0	39,4	25,6
240	26,4	18	4	1,0	0,00863	1,00202	0	13,43	0,00293	19,0	37,4	24,3
480	26,4	18	4	1,0	0,00863	1,00202	0	13,43	0,00207	19,0	37,4	24,3
1440	25,1	16	4	1,0	0,00889	1,00202	0	13,76	0,00123	17,0	33,5	21,7

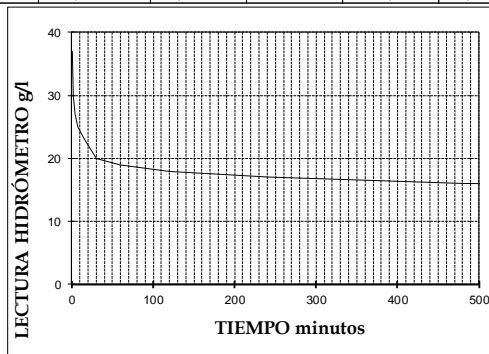


Anexo 37. Resultados ensayo Hidrometría Muestra2 (ASTMD4221-18). Fuente: propia.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS
ENSAYO DE HIDRÓMETRÍA

PROYECTO		Proyecto de Maestría			LOTE							
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL		Suelo			MUESTRA		Muestra 3					
CLASIFICACION		FECHA			HOJA No.		1		DE		1	
Hidrometro #	28481/10	Ecuación de calibración (ASTM 152H)			a=	-0,1639	b=	16,298				
Peso de suelo húmedo (g)	50	Gravedad específica de la muestra			2,75	Humedad del suelo (%)		0,0				
PH de la muestra		Factor de corrección por gravedad			0,978	Peso del suelo seco (g)		50,0				
Tipo de dispersante	Hexametafos	Corrección por menisco			0,5	Pasante de la malla #200		66,497				
Tiempo lectura	Temperatura suspensión	Lectura del Hidrómetro	Lectura del Agente	Corrección por temperatura	Viscosidad del agua h	Gravedad específica suspensión G1	Corrección por agente dispersante	Profundidad efectiva hidrómetro L	Diámetro partícula D	Lectura hidrómetro corregida	Porcentaje que pasa P	Porcentaje que pasa referido P200
(min)	°C	g/lt	g/lt	g/lt	g/cm.s	g/cm ³	g/lt	cm	mm	g/l	%	%
1	26,1	37	4	1,0	0,00869	1,00202	0	10,32	0,03962	38,0	74,4	49,5
2	25,9	30	4	1,0	0,00873	1,00202	0	11,46	0,02960	31,0	60,7	40,3
4	25,8	27	4	1,0	0,00875	1,00202	0	11,95	0,02140	28,0	54,8	36,4
8	25,8	25	4	1,0	0,00875	1,00202	0	12,28	0,01534	26,0	50,9	33,8
15	25,8	23	4	1,0	0,00875	1,00202	0	12,61	0,01135	24,0	47,0	31,2
30	25,8	20	4	1,0	0,00875	1,00202	0	13,10	0,00818	21,0	41,1	27,3
60	25,9	19	4	1,0	0,00873	1,00202	0	13,27	0,00581	20,0	39,1	26,0
120	26	18	3	1,0	0,00871	1,00102	0	13,43	0,00413	19,0	37,2	24,7
240	26	17	3	1,0	0,00871	1,00102	0	13,59	0,00294	18,0	35,2	23,4
480	26,2	16	3	1,0	0,00867	1,00102	0	13,76	0,00209	17,0	33,3	22,1
1440	25,9	15	3	1,0	0,00873	1,00102	0	13,92	0,00122	16,0	31,3	20,8

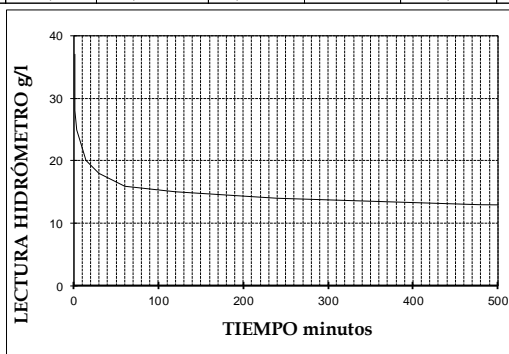


Anexo 38. Resultados ensayo Hidrometría Muestra3 (ASTMD4221-18). Fuente: propia.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS
ENSAYO DE HIDRÓMETRÍA

PROYECTO		Proyecto de Maestría			LOTE							
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL		Suelo			MUESTRA		Muestra 4					
CLASIFICACIÓN		FECHA			HOJA No.		I		DE		I	
Hidrometro #	28481/10	Ecuación de calibración (ASTM 152H)			a=	-0,1639	b=	16,298				
Peso de suelo húmedo (g)	50	Gravedad específica de la muestra			2,79	Humedad del suelo (%)		0,0				
PH de la muestra		Factor de corrección por gravedad			0,970	Peso del suelo seco (g)		50,0				
Tipo de dispersante	Hexametafos	Corrección por menisco			0,5	Pasante de la malla #200		64,264				
Tiempo lectura	Temperatura suspensión	Lectura del Hidrómetro	Lectura del Agente	Corrección por temperatura	Viscosidad del agua h	Gravedad específica suspensión G1	Corrección por agente dispersante	Profundidad efectiva hidrómetro L	Diámetro partícula D	Lectura hidrómetro corregida	Porcentaje que pasa P	Porcentaje que pasa referido P200
(min)	°C	g/lt	g/lt	g/lt	g/cm.s	g/cm ³	g/lt	cm	mm	g/l	%	%
1	25,7	37	4	1,0	0,00877	1,00202	0	10,32	0,03935	38,0	73,8	47,4
2	25,6	28	4	1,0	0,00879	1,00202	0	11,79	0,02979	29,0	56,3	36,2
4	25,7	25	4	1,0	0,00877	1,00202	0	12,28	0,02147	26,0	50,5	32,4
8	25,7	23	4	1,0	0,00877	1,00202	0	12,61	0,01538	24,0	46,6	29,9
15	25,8	20	4	1,0	0,00875	1,00202	0	13,10	0,01144	21,0	40,8	26,2
30	25,8	18	4	1,0	0,00875	1,00202	0	13,43	0,00819	19,0	36,9	23,7
60	25,7	16	4	1,0	0,00877	1,00202	0	13,76	0,00587	17,0	33,0	21,2
120	26	15	4	1,0	0,00871	1,00202	0	13,92	0,00416	16,0	31,1	20,0
240	26,2	14	4	1,0	0,00867	1,00202	0	14,09	0,00295	15,0	29,1	18,7
480	26,1	13	4	1,0	0,00869	1,00202	0	14,25	0,00210	14,0	27,2	17,5
1440	26	12	4	1,0	0,00871	1,00202	0	14,41	0,00122	13,0	25,2	16,2

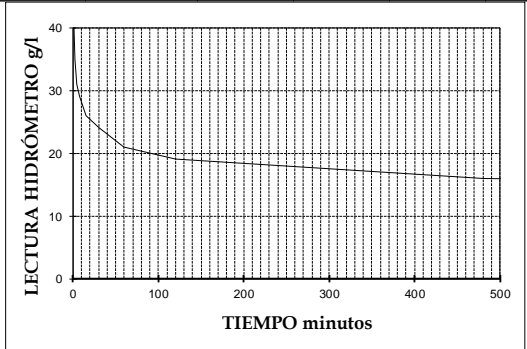


Anexo 39. Resultados ensayo Hidrometría Muestra4 (ASTMD4221-18). Fuente: propia.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS
ENSAYO DE HIDRÓMETRÍA

PROYECTO		Proyecto de Maestría				LOTE							
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL		Suelo				MUESTRA		Muestra 5					
CLASIFICACIÓN		FECHA				HOJA No.		1 DE 1					
Hidrometro #	28481/10	Ecuación de calibración (ASTM 152H)				a=	-0,1639	b=	16,298				
Peso de suelo húmedo (g)	50	Gravedad específica de la muestra				2,64	Humedad del suelo (%)		0,0				
PH de la muestra		Factor de corrección por gravedad				1,002	Peso del suelo seco (g)		50,0				
Tipo de dispersante	Hexametafos	Corrección por menisco				0,5	Pasante de la malla #200		74,914				
Tiempo lectura	Temperatura suspensión	Lectura del Hidrómetro	Lectura del Agente	Corrección por temperatura	Viscosidad del agua h	Gravedad específica suspensión G1	Corrección por agente dispersante	Profundidad efectiva hidrómetro L	Diámetro partícula D	Lectura hidrómetro corregida	Porcentaje que pasa P	Porcentaje que pasa referido P200	
(min)	°C	g/l	g/l	g/l	g/cm.s	g/cm ³	g/l	cm	mm	g/l	%	%	
1	25,2	40	5	1,0	0,00887	1,00302	0	9,82	0,04037	41,0	82,2	61,6	
2	25,1	35	5	1,0	0,00889	1,00302	0	10,64	0,02975	36,0	72,2	54,1	
4	25,1	31	5	1,0	0,00889	1,00302	0	11,30	0,02167	32,0	64,2	48,1	
8	25	29	5	1,0	0,00891	1,00302	0	11,63	0,01556	30,0	60,1	45,1	
15	25	26	5	1,0	0,00891	1,00302	0	12,12	0,01160	27,0	54,1	40,5	
30	25	24	5	1,0	0,00891	1,00302	0	12,45	0,00832	25,0	50,1	37,5	
60	25	21	4	1,0	0,00891	1,00202	0	12,94	0,00599	22,0	44,1	33,0	
120	25	19	4	1,0	0,00891	1,00202	0	13,27	0,00429	20,0	40,1	30,0	
240	25	18	4	1,0	0,00891	1,00202	0	13,43	0,00305	19,0	38,1	28,5	
480	24,4	16	4	1,0	0,00904	1,00202	0	13,76	0,00220	17,0	34,1	25,5	
1440	26	14	4	1,0	0,00871	1,00202	0	14,09	0,00126	15,0	30,1	22,5	



Anexo 40. Resultados ensayo Hidrometría Muestra5 (ASTMD4221-18). Fuente: propia.




**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS
ENSAYO DE HIDROMETRÍA**


PROYECTO		Proyecto de Maestría		LOTE									
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL		Suelo		MUESTRA		Muestra 6							
CLASIFICACIÓN		FECHA		HOJA No.		1		DE		1			
Hidrometro #	28481/10	Ecuación de calibración (ASTM 152H)	a=	-0,1639	b=	16,298							
Peso de suelo húmedo (g)	50	Gravedad específica de la muestra	2,79	Humedad del suelo (%)	0,0								
PH de la muestra		Factor de corrección por gravedad	0,970	Peso del suelo seco (g)	50,0								
Tipo de dispersante	Hexametafó	Corrección por menisco	0,5	Pasante de la malla #200	32,238								
Tiempo lectura	Temperatura suspensión	Lectura del Hidrómetro	Lectura del Agente	Corrección por temperatura	Viscosidad del agua h	Gravedad específica suspensión G1	Corrección por agente dispersante	Profundidad efectiva hidrómetro L	Diámetro partícula D	Lectura hidrómetro corregida	Porcentaje que pasa P	Porcentaje que pasa referido P200	
(min)	°C	g/lt	g/lt	g/lt	g/cm.s	g/cm ³	g/lt	cm	mm	g/l	%	%	
1	26,2	41	4	1,0	0,00867	1,00202	0	9,66	0,03786	42,0	81,5	26,3	
2	26,2	34	4	1,0	0,00867	1,00202	0	10,81	0,02832	35,0	67,9	21,9	
4	26,2	31	4	1,0	0,00867	1,00202	0	11,30	0,02047	32,0	62,1	20,0	
8	26,2	28	4	1,0	0,00867	1,00202	0	11,79	0,01479	29,0	56,3	18,1	
15	26,2	26	4	1,0	0,00867	1,00202	0	12,12	0,01095	27,0	52,4	16,9	
30	26,2	24	4	1,0	0,00867	1,00202	0	12,45	0,00785	25,0	48,5	15,6	
60	26,3	22	4	1,0	0,00865	1,00202	0	12,77	0,00561	23,0	44,6	14,4	
120	26,3	21	4	1,0	0,00865	1,00202	0	12,94	0,00400	22,0	42,7	13,8	
240	26,6	19	3	1,0	0,00859	1,00102	0	13,27	0,00285	20,0	38,8	12,5	
480	26,8	18	3	1,0	0,00855	1,00102	0	13,43	0,00202	19,0	36,9	11,9	
1440	25,9	16	3	1,0	0,00873	1,00102	0	13,76	0,00119	17,0	33,0	10,6	

The graph plots 'LECTURA HIDRÓMETRO g/b' on the y-axis (0 to 40) against 'TIEMPO minutos' on the x-axis (0 to 500). The curve starts at approximately 41 g/b at 1 minute and rapidly descends, crossing 30 g/b at about 2 minutes, 20 g/b at about 10 minutes, and 16 g/b at about 15 minutes. It continues to decrease slowly, reaching approximately 10,6 g/b at 1440 minutes.

Anexo 41. Resultados ensayo Hidrometría Muestra6 (ASTMD4221-18). Fuente: propia.

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL PROCTOR ESTÁNDAR MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL									
		PROYECTO					Suelo			LOTE	
		DESCRIPCION DEL MATERIAL					Suelo			MUESTRA	
		CLASIFICACION					Suelo			HOJA No.	
					Suelo			Muestra 2,3 y 4			
					Suelo			1 DE 1			
Ensayo	Peso muestra+molde (kg)	Peso muestra (kg)	Peso U. Humedo (kg/cm3)	contenido de humedad (%)	Peso unitario Seco	Peso unitario Seco kn/m3	Gs	Sr	w (%)	gd (kN/m3)	
1	3189,2	1480,6	1,5565	7,9877	1,4414	14,1398	2,75	100	13	19,8729	
2	3278,8	1570,2	1,6527	17,3858	1,4079	13,8116			16	18,7344	
3	3531	1822,4	1,9158	23,1252	1,5560	15,2643			19	17,7192	
4	3603,8	1895,2	1,9948	26,2258	1,5803	15,5028			22	16,8084	
5	3515,1	1806,5	1,9089	29,3795	1,4754	14,4737			25	15,9867	
									29	15,0083	
									32	14,3497	

Anexo 42. Resultados de ensayo de Proctor estándar del suelo. Fuente: el autor

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL PROCTOR ESTÁNDAR MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL									
		PROYECTO					Suelo			LOTE	
		DESCRIPCION DEL MATERIAL					Suelo			MUESTRA	
		CLASIFICACION					Suelo			HOJA No.	
					Suelo			Muestra 2,3 y 4			
					Suelo			1 DE 1			
Ensayo	Peso muestra+molde (kg)	Peso muestra (kg)	Peso U. Humedo (kg/cm3)	contenido de humedad (%)	Peso unitario Seco	Peso unitario Seco kn/m3	Gs	Sr	w (%)	gd (kN/m3)	
1	3189,2	1480,6	1,5565	7,9877	1,4414	14,1398	2,75	100	13	19,8729	
2	3278,8	1570,2	1,6527	17,3858	1,4079	13,8116			16	18,7344	
3	3531	1822,4	1,9158	23,1252	1,5560	15,2643			19	17,7192	
4	3603,8	1895,2	1,9948	26,2258	1,5803	15,5028			22	16,8084	
5	3515,1	1806,5	1,9089	29,3795	1,4754	14,4737			25	15,9867	
									29	15,0083	
									32	14,3497	

Anexo 43. Resultados de ensayo de Proctor estándar del ladrillo. Fuente: el autor



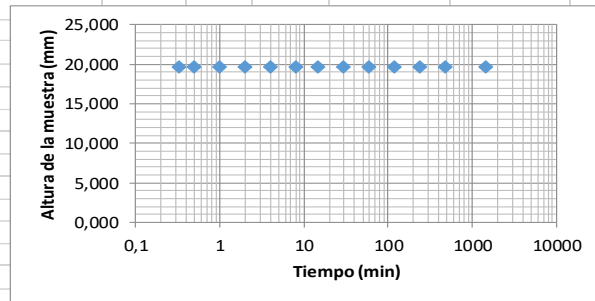
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS
ENSAYO DE ÍNDICE DE EXPANSIÓN
MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO		Proyecto de Maestría				LOTE	
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL		Suelo				MUESTRA	
CLASIFICACIÓN		Suelo		FECHA		Muestra 1	
D (cm)	6,34	6,34	6,32	6,33		1	DE 1
H(cm)	1,97	1,97	1,96	1,97			
Wa (g)	108	Vol(cm ³)	62,0	gh (kN/m ³)	gd (kN/m ³)		
Wa+sh inicial	237,5	W sh ini. (g)	129,5	20,5	18,9		
Wa+sh final	245	W sh fin. (g)					

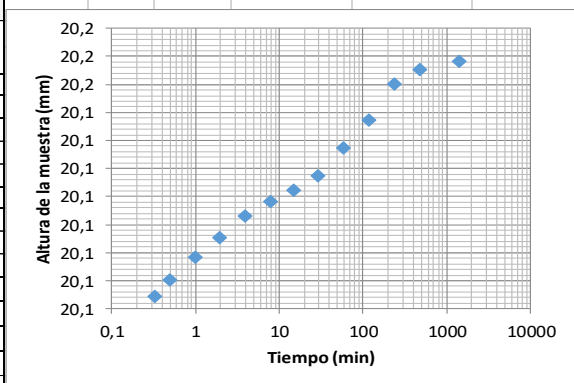
Humedad inicial				Humedad final			
Tara	32p	53p	48p	Tara	15p	28p	16p
W tara (g)	10,9	10,5	11	W tara (g)	9,9	13	10,4
W t+sh	42,6	42,8	43,8	W t+sh	50,3	54,3	50,2
W t+ss	40,1	40,3	41,3	W t+ss	44,4	48,4	44,3
w (%)	8,6	8,4	8,3	w (%)	17,1	16,7	17,4
w prom. (%)	8,4			w prom. (%)	17,1		

Gs	2,82	Sr (%)	51
e	0,463		
Peso (g)			
Brazo X:1			
Carga (g)			
Esfuerzo (kPa)	7,0		
Comparador (in)	1E-04		

Carga inicial				
Tiempo (min)	Lecturas		Despl. (mm)	H (mm)
	Vueltas	Grande		
0	0	200	0,0000	19,667
0,33	0	200	0,0000	19,667
0,5	0	200	0,0000	19,667
1	0	200	0,0000	19,667
2	0	200	0,0000	19,667
4	0	200	0,0000	19,667
8	0	200	0,0000	19,667
15	0	200	0,0000	19,667
30	0	200	0,0000	19,667
60	0	200	0,0000	19,667
120	0	200	0,0000	19,667
240	0	200	0,0000	19,667
480	0	200	0,0000	19,667
1440	0	200	0,0000	19,667



Expansión Muestra I					
Tiempo (min)	Lecturas		Vueltas	Despl. (mm)	H (mm)
	Vueltas	Grande			
0	0	0	0	0,000	19,667
0,33	0	0	0	0,4455	20,112
0,5	0	0	0	0,4485	20,115
1	0	0	0	0,4525	20,119
2	0	0	0	0,4560	20,123
4	0	0	0	0,4600	20,127
8	0	0	0	0,4625	20,129
15	0	0	0	0,4645	20,131
30	0	0	0	0,4670	20,134
60	0	0	0	0,4720	20,139
120	0	0	0	0,4770	20,144
240	0	0	0	0,4835	20,150
480	0	0	0	0,4860	20,153
1440	0	0	0	0,4875	20,154



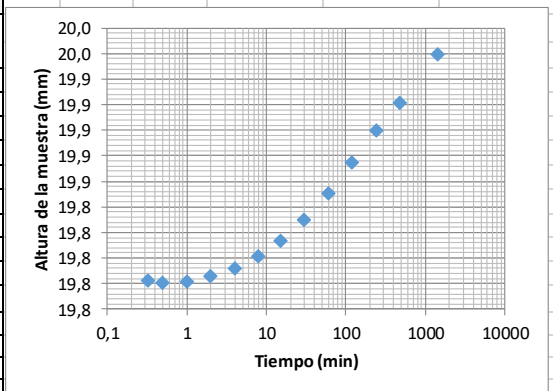
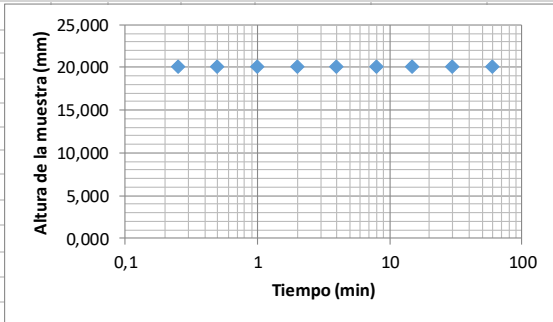
EI	25
Potencial de expansión	Bajo

Anexo 44. Dato índice de expansión digital Muestra 1. Fuente: propia.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS
ENSAYO DE ÍNDICE DE EXPANSIÓN
MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO		Proyecto de Maestría			LOTE	
DESCRIPCION DEL MATERIAL		Suelo			MUESTRA	
CLASIFICACION		Suelo			MUESTRA HOJA	
		FECHA			Muestra 2	
					1 DE 1	
D (cm)	6,33	6,33	6,31	6,32		
H(cm)	2,01	2,01	2,01	2,01		
Wa (g)	108	Vol(cm ³)	63,1	gh (kN/m ³)	gd (kN/m ³)	
Wa+sh inicial	213,1	W sh ini. (g)	105,1	16,3	14,1	
Wa+sh final	229,8	W sh fin. (g)				
Humedad inicial			Humedad final			
Tara	134	508	510	Tara	26p	130 19p
W tara (g)	11,9	11,9	14,7	W tara (g)	10,9	12,5 11,4
W t+sh	27,5	27,1	30,7	W t+sh	45	43,9 43,4
W t+ss	25,4	25	28,5	W t+ss	36,1	35,6 35,1
w (%)	15,6	16,0	15,9	w (%)	35,3	35,9 35,0
w prom. (%)	15,8			w prom. (%)	35,4	
Gs	2,72	Sr (%)	48			
e	0,892					
Peso (g)						
Brazo X: 1						
Carga (g)						
Esfuerzo (kPa)	7,0					
Comparador (in)	0,0001					
Carga inicial						
Tiempo (min)	Lecturas		Despl. (mm)	H (mm)		
	Vueltas	Grande				
0	0	200	0,0000	20,100		
0,25	0	200	0,0000	20,100		
0,5	0	200	0,0000	20,100		
1	0	200	0,0000	20,100		
2	0	200	0,0000	20,100		
4	0	200	0,0000	20,100		
8	0	200	0,0000	20,100		
15	0	200	0,0000	20,100		
30	0	200	0,0000	20,100		
60	0	200	0,0000	20,100		
Expansión Muestra II						
Tiempo (min)	Lecturas		Despl. (mm)	H (mm)		
	Vueltas	Grande				
0	0	0	0	20,100		
0,33	0	0,319	0	0,31850	19,782	
0,5	0	0,32	0	0,31950	19,781	
1	0	0,32	0	0,31900	19,781	
2	0	0,315	0	0,31450	19,786	
4	0	0,309	0	0,30900	19,791	
8	0	0,299	0	0,29950	19,801	
15	0	0,286	0	0,28700	19,813	
30	0	0,269	0	0,27050	19,830	
60	0	0,25	0	0,25000	19,850	
120	0	0,227	0	0,22600	19,874	
240	0	0,202	0	0,20100	19,899	
480	0	0,181	0	0,17950	19,921	
1440	0	0,144	0	0,14150	19,959	
				EI	16	
				Potencial de expansión	Muy Bajo	



Anexo 45. Dato índice de expansión digital Muestra 2. Fuente: propia.



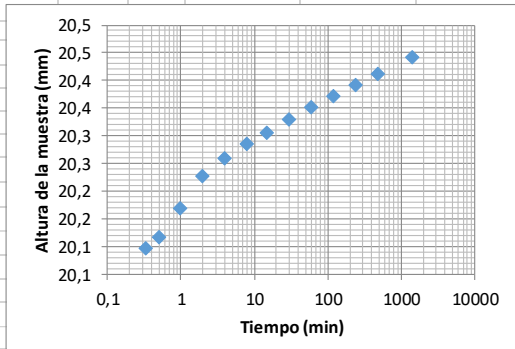
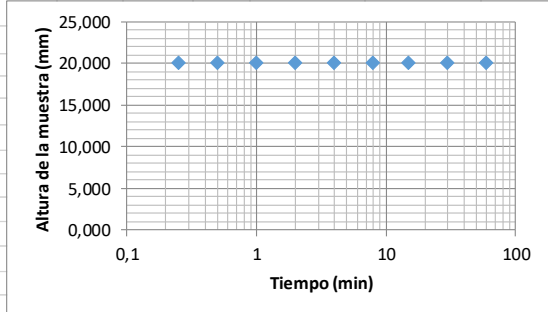
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS
ENSAYO DE ÍNDICE DE EXPANSIÓN
MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO		Proyecto de Maestría				LOTE	
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL		Suelo		FECHA		MUESTRA	
CLASIFICACIÓN		Suelo		FECHA		Muestra 3	
D (cm)	6,33	6,33	6,31	6,32			
H(cm)	2,01	2,01	2,01	2,01			
Wa (g)	108	Vol(cm3)	63,1	gh (kN/m3)	gd (kN/m3)		
Wa+sh inicial	212	W sh ini. (g)	104	16,2	13,9		
Wa+sh final	229,4	W sh fin. (g)					
Humedad inicial				Humedad final			
Tara	15p	16p	69p	Tara	73p	41p	121
W tara (g)	9,9	10,4	12,6	W tara (g)	11,7	11,8	14,3
W t+sh	45,2	48,9	52	W t+sh	48,7	48,4	49,1
W t+ss	40,3	43,6	46,6	W t+ss	39	39	40,4
w (%)	16,1	16,0	15,9	w (%)	35,5	34,6	33,3
w prom. (%)	16,0			w prom. (%)	34,5		
Gs	2,75	Sr (%)	47				
e	0,936						
Peso (g)							
Brazo X: 1							
Carga (g)							
Esfuerzo (kPa)	7,0						
Comparador (in)	1E-04						

Carga inicial				
Tiempo (min)	Lecturas		Despl. (mm)	H (mm)
	Vueltas	Grande		
0	0	200	0,0000	20,100
0,25	0	200	0,0000	20,100
0,5	0	200	0,0000	20,100
1	0	200	0,0000	20,100
2	0	200	0,0000	20,100
4	0	200	0,0000	20,100
8	0	200	0,0000	20,100
15	0	200	0,0000	20,100
30	0	200	0,0000	20,100
60	0	200	0,0000	20,100

Expansión Muestra III					
Tiempo (min)	Lecturas		Vueltas	Despl. (mm)	H (mm)
	Vueltas	Grande			
0	0	0	0	0,0000	20,100
0,33	0	0,009	0	0,0045	20,096
0,5	0	-0,011	0	-0,0160	20,116
1	0	-0,058	0	-0,0675	20,168
2	0	-0,119	0	-0,1260	20,226
4	0	-0,152	0	-0,1585	20,259
8	0	-0,177	0	-0,1835	20,284
15	0	-0,199	0	-0,2050	20,305
30	0	-0,222	0	-0,2280	20,328
60	0	-0,243	0	-0,2500	20,350
120	0	-0,263	0	-0,2710	20,371
240	0	-0,283	0	-0,2915	20,392
480	0	-0,301	0	-0,3105	20,411
1440	0	-0,329	0	-0,341	20,441

EI	0
Potencial de expansión	Muy Bajo



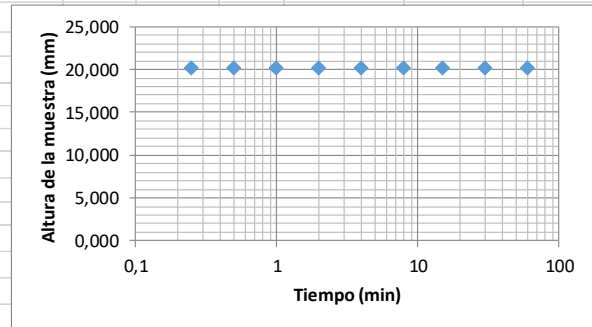
Anexo 46. Dato índice de expansión digital Muestra 3. Fuente: propia.



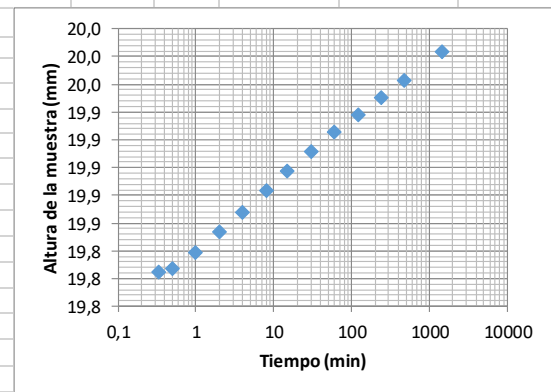
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS
ENSAYO DE ÍNDICE DE EXPANSIÓN
MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO		Proyecto de Maestría			LOTE		
DESCRIPCION DEL MATERIAL		Suelo			MUESTRA		Muestra 4
CLASIFICACION		FECHA			HOJA No.		1 DE 1
D (cm)	6,33	6,33	6,31	6,32			
H(cm)	2,01	2,01	2,01	2,01			
Wa (g)	108	Vol(cm3)	63,1	gh (kN/m3)	gd (kN/m3)		
Wa+sh inicial	216,2	W sh ini. (g)	108,2	16,8	14,5		
Wa+sh final	231,1	W sh fin. (g)					
Humedad inicial				Humedad final			
Tara	19	22p	133	Tara	28p	19p	18p
W tara (g)	11,4	11,9	12,3	W tara (g)	13	11,4	9,5
W t+sh	45,3	46,3	46,4	W t+sh	56,1	47,1	48,3
W t+ss	40,7	41,6	41,8	W t+ss	46,1	38,4	38,9
w (%)	15,7	15,8	15,6	w (%)	30,2	32,2	32,0
w prom. (%)	15,7			w prom. (%)	31,5		
Gs	2,79	Sr (%)	50				
e	0,883						
Peso (g)							
Brazo X:1							
Carga (g)							
Esfuerzo (kPa)	7,0						
Comparador (in)	1E-04						

Carga inicial				
Tiempo (min)	Lecturas		Despl. (mm)	H (mm)
	Vueltas	Grande		
0	0	200	0,0000	20,100
0,25	0	200	0,0000	20,100
0,5	0	200	0,0000	20,100
1	0	200	0,0000	20,100
2	0	200	0,0000	20,100
4	0	200	0,0000	20,100
8	0	200	0,0000	20,100
15	0	200	0,0000	20,100
30	0	200	0,0000	20,100
60	0	200	0,0000	20,100


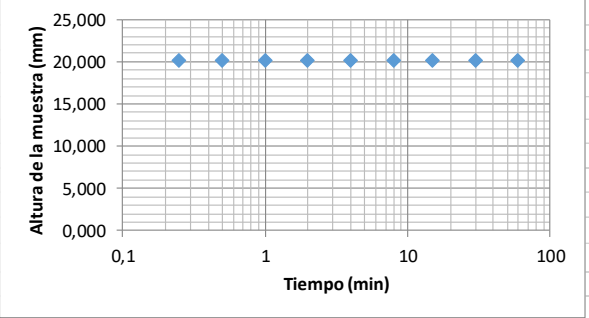
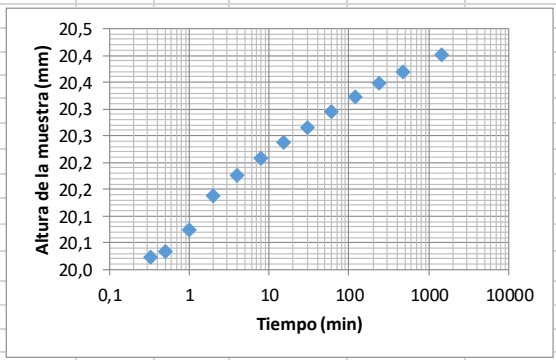


Expansión Muestra IV					
Tiempo (min)	Lecturas		Despl. (mm)	H (mm)	
	Vueltas	Grande			
0	0	-0,001	0	0,0000	20,100
0,33	0	0,27	0	0,2750	19,825
0,5	0	0,268	0	0,2730	19,827
1	0	0,257	0	0,2610	19,839
2	0	0,243	0	0,2460	19,854
4	0	0,229	0	0,2320	19,868
8	0	0,213	0	0,2165	19,884
15	0	0,198	0	0,2025	19,898
30	0	0,184	0	0,1885	19,912
60	0	0,17	0	0,1740	19,926
120	0	0,158	0	0,1615	19,939
240	0	0,146	0	0,1490	19,951
480	0	0,134	0	0,1370	19,963
1440	0	0,113	0	0,1160	19,984




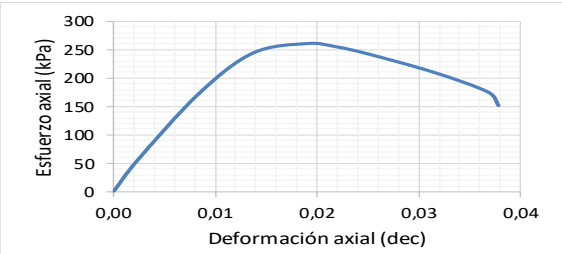
EI	14
Potencial de expansión	Muy Bajo

Anexo 47. Dato índice de expansión digital Muestra 4. Fuente: propia.


 PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS ENSAYO DE ÍNDICE DE EXPANSIÓN MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL										
PROYECTO		Proyecto de Maestría				LOTE				
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL		Suelo				MUESTRA		Muestra 6		
CLASIFICACIÓN		Suelo		FECHA		HOJA No.		1 DE		
D (cm)	6,33	6,33	6,31	6,32						
H(cm)	2,01	2,01	2,01	2,01						
Wa (g)	108	Vol(cm3)	63,1	γh (kN/m3)	γd (kN/m3)					
Wa+sh inicial	213,7	W sh ini. (g)	105,7	16,4	14,2					
Wa+sh final	229,8	W sh fin. (g)								
Humedad inicial					Humedad final					
Tara	107	130	508		Tara	101	37p	73p		
W tara (g)	12,6	12,5	11,9		W tara (g)	12,7	11,7	11,7		
W t+sh	46,7	52,3	51,6		W t+sh	51,5	51,9	50,6		
W t+ss	42,1	47	46,2		W t+ss	43,1	42,9	41,6		
w (%)	15,6	15,4	15,7		w (%)	27,6	28,8	30,1		
w prom. (%)	15,6				w prom. (%)	28,9				
Gs	2,79	Sr (%)	47							
e	0,925									
Peso (g)										
Brazo X:1										
Carga (g)										
Esfuerzo (kPa)	7,0									
Comparador (in)	0,0001									
Carga inicial										
Tiempo (min)	Lecturas		Despl. (mm)	H (mm)						
	Vueltas	Grande								
0	0	200	0,0000	20,100						
0,25	0	200	0,0000	20,100						
0,5	0	200	0,0000	20,100						
1	0	200	0,0000	20,100						
2	0	200	0,0000	20,100						
4	0	200	0,0000	20,100						
8	0	200	0,0000	20,100						
15	0	200	0,0000	20,100						
30	0	200	0,0000	20,100						
60	0	200	0,0000	20,100						
Expansión Muestra VI										
Tiempo (min)	Lecturas		Vueltas	Despl. (mm)						H (mm)
	Vueltas	Grande								
0	0	-0,002	0	-0,0010						20,101
0,33	0	0,072	0	0,0775						20,023
0,5	0	0,064	0	0,0655						20,035
1	0	0,026	0	0,0255						20,075
2	0	-0,035	0	-0,0375						20,138
4	0	-0,075	0	-0,0765						20,177
8	0	-0,108	0	-0,1085						20,209
15	0	-0,138	0	-0,1370	20,237					
30	0	-0,168	0	-0,1660	20,266					
60	0	-0,198	0	-0,1950	20,295					
120	0	-0,224	0	-0,2220	20,322					
240	0	-0,25	0	-0,2480	20,348					
480	0	-0,272	0	-0,2700	20,370					
1440	0	-0,303	0	-0,3005	20,401					
El				4						
Potencialde expansión				Muy Bajo						

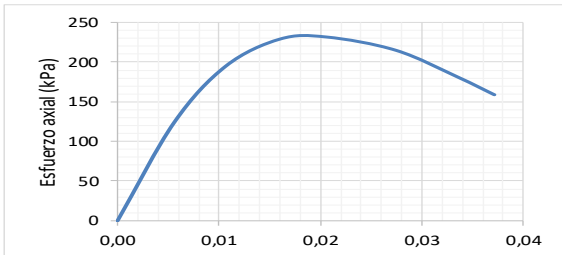
Anexo 49. Dato índice de expansión digital Muestra 6. Fuente: propia.

 PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS COMPRESIÓN SIMPLE MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL							
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría			LOTE	suelo unificado		
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	Suelo			MUESTRA	Ensayo 1		
CLASIFICACION	Suelo			HOJA No.	1		DE 1
Tiempo seg.	Lectura	0,001 Pulg.	Lectura (mm)	Carga(N)	Deformación axial	Área corregida (m2)	Esfuerzo (kPa)
0	0	0	0	0	0,000000	0,001964	0,0
0,5	9	0,009	0,2286	106,3	0,002286	0,001968	54,0
1	33	0,033	0,8382	342,6	0,008382	0,001980	173,0
1,5	54	0,054	1,3716	487,4	0,013716	0,001991	244,8
2	75	0,075	1,905	523,6	0,019050	0,002002	261,6
2,16	86	0,086	2,1844	514	0,021844	0,002007	256,1
2,5	98	0,098	2,4892	491,1	0,024892	0,002014	243,9
3	124	0,124	3,1496	427,4	0,031496	0,002027	210,8
3,5	145	0,145	3,683	358,6	0,036830	0,002039	175,9
3,43	149	0,149	3,7846	310,7	0,037846	0,002041	152,2
Resistencia a la compresión							261,6
$\sigma_{Max}/2$							130,79333
Deformación 50 E50 (MPa)							0,019050 7

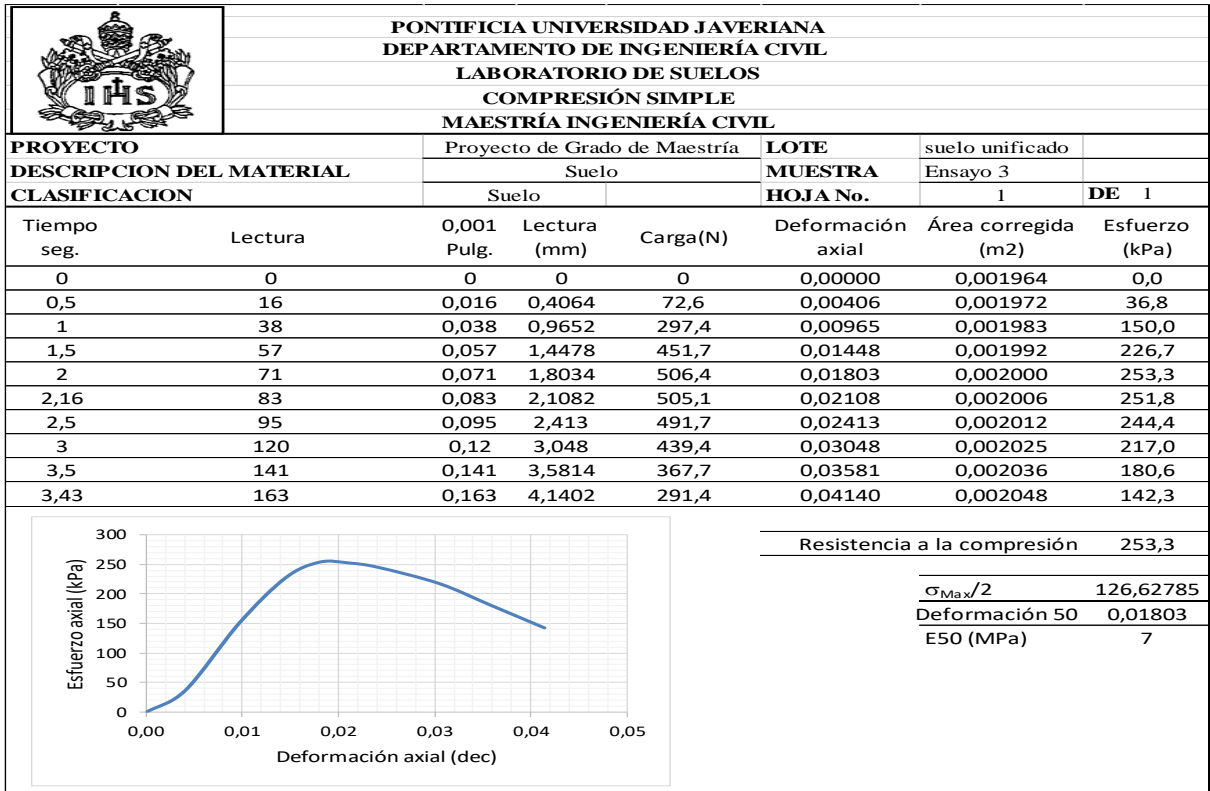


Anexo 50. Datos compresión simple suelo ensayo 1. Fuente: propia.

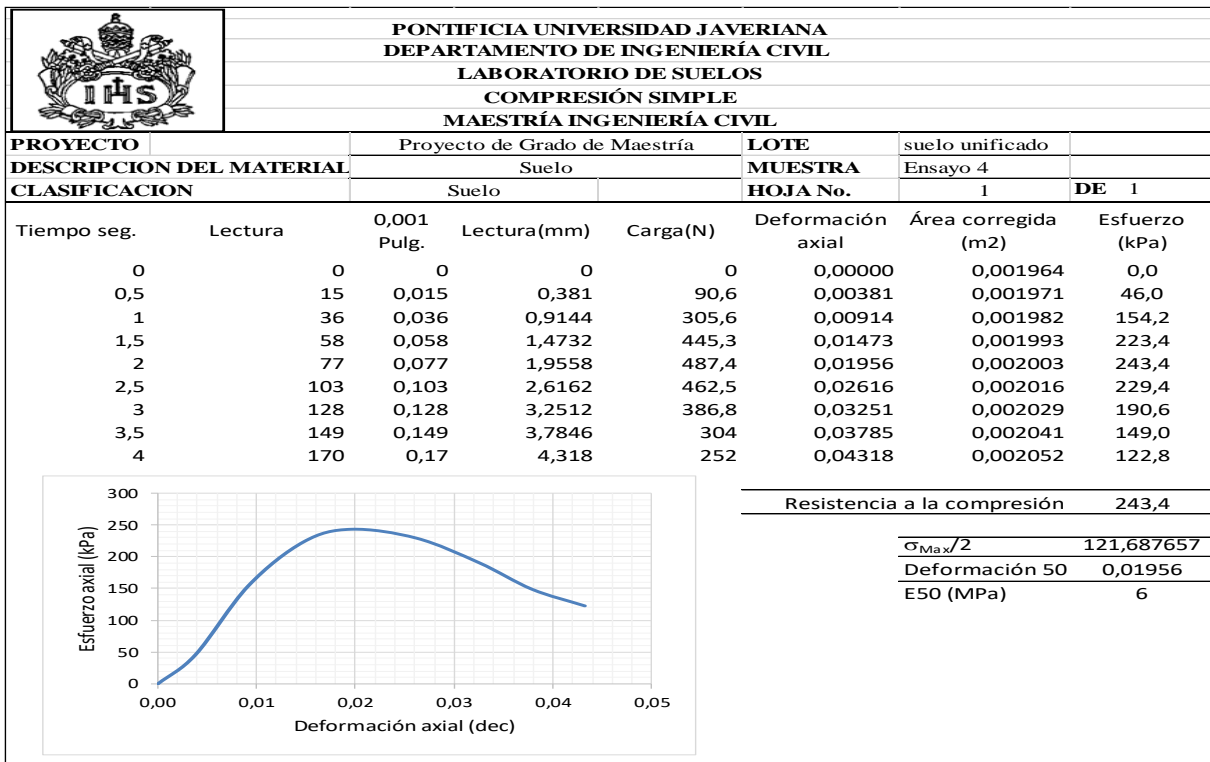
 PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS COMPRESIÓN SIMPLE MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL							
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría			LOTE	suelo unificado		
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	Suelo			MUESTRA	Ensayo 2		
CLASIFICACION	Suelo			HOJA No.	1		DE 1
Tiempo seg.	Lectura	0,001 Pulg.	Lectura(mm)	Carga(N)	Deformación axial	Área corregida (m2)	Esfuerzo (kPa)
0	0	0	0	0	0,0000	0,001964	0,0
0,5	22	0,022	0,5588	245,7	0,0056	0,001975	124,4
1	42	0,042	1,0668	388	0,0107	0,001985	195,5
1,5	63	0,063	1,6002	458,2	0,0160	0,001995	229,6
2	81	0,081	2,0574	465,5	0,0206	0,002005	232,2
2,5	108	0,108	2,7432	434,6	0,0274	0,002019	215,3
3	132	0,132	3,3528	368,4	0,0335	0,002032	181,3
3,2	146	0,146	3,7084	324,7	0,0371	0,002039	159,2
Resistencia a la compresión							232,2
$\sigma_{Max}/2$							116,099517
Deformación 50 E50 (MPa)							0,0206 6




Anexo 51. Datos compresión simple suelo ensayo 2. Fuente: propia.



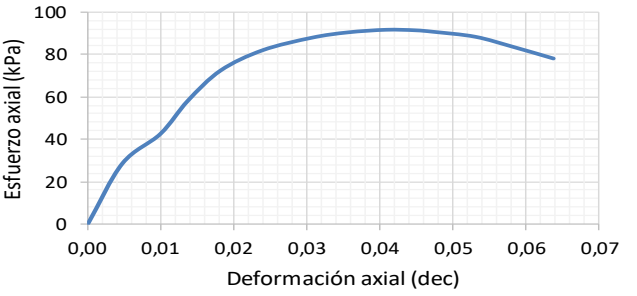
Anexo 52. Datos compresión simple suelo ensayo 3. Fuente: propia.



Anexo 53. Datos compresión simple suelo ensayo 4. Fuente: propia.

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS COMPRESIÓN SIMPLE MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL					
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría				LOTE		
DESCRIPCION DEL M	Suelo + Polvo de ladrillo				MUESTRA	Ensayo 1	
CLASIFICACION	Suelo + Polvo de ladrillo 5%				HOJA No.	1	DE 1
Tiempo seg.	Lectura	0,001 Pulg.	Lectura(mm)	Carga(N)	Deformación axial	Área corregida (m2)	Esfuerzo (kPa)
0	0	0	0	0	0,000000	0,001964	0,0
0,5	19	0,019	0,4826	56,3	0,004731	0,001973	28,5
1	40	0,04	1,016	84,4	0,009961	0,001983	42,6
1,5	55	0,055	1,397	115,7	0,013696	0,001991	58,1
2	73	0,073	1,8542	144,7	0,018178	0,002000	72,4
2,5	96	0,096	2,4384	164,7	0,023906	0,002012	81,9
3	123	0,123	3,1242	177,8	0,030629	0,002026	87,8
3,5	143	0,143	3,6322	183,9	0,035610	0,002036	90,3
4	164	0,164	4,1656	187,4	0,040839	0,002047	91,5
4,17	180	0,18	4,572	187,7	0,044824	0,002056	91,3
4,5	190	0,19	4,826	186,7	0,0473	0,002061	90,6
5	213	0,213	5,4102	183	0,0530	0,002073	88,3
5,5	234	0,234	5,9436	174	0,0583	0,002085	83,5
6	256	0,256	6,5024	163,6	0,0637	0,002097	78,0

Resistencia a la compresión	91,5
$\sigma_{Max}/2$	45,77202215
Deformación 50	0,040839
E50 (MPa)	1



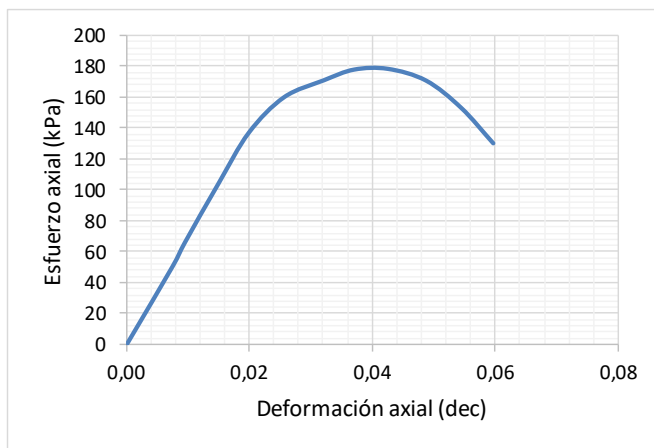
Anexo 54. Datos compresión simple de suelo con sustitución polvo ladrillo 5% ensayo 1.

Fuente: propia.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS
COMPRESIÓN SIMPLE
MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL


PROYECTO		Proyecto de Grado de Maestría			LOTE		
DESCRIPCION DEL MATE		Suelo + Polvo de ladrillo			MUESTRA	Ensayo 2	
CLASIFICACION		Suelo + Polvo de ladrillo 5%			HOJA No.	1	DE 1
Tiempo seg.	Lectura	0,001 Pulg.	Lectura(mm)	Carga(N)	Deformación axial	Área corregida (m ²)	Esfuerzo (kPa)
0	0	0	0	0	0,0000	0,001964	0,0
0,47	30	0,03	0,762	99,9	0,0075	0,001978	50,5
1	38	0,038	0,9652	130,6	0,0095	0,001982	65,9
1,5	60	0,06	1,524	207,5	0,0149	0,001993	104,1
2	80	0,08	2,032	274,9	0,0199	0,002003	137,2
2,5	103	0,103	2,6162	322,6	0,0256	0,002015	160,1
3	129	0,129	3,2766	347	0,0321	0,002029	171,0
3,5	149	0,149	3,7846	363	0,0371	0,002039	178,0
4	171	0,171	4,3434	366	0,0426	0,002051	178,5
4,5	196	0,196	4,9784	352,7	0,0488	0,002064	170,9
5	219	0,219	5,5626	318,2	0,0545	0,002077	153,2
5,3	240	0,24	6,096	272	0,0598	0,002088	130,2

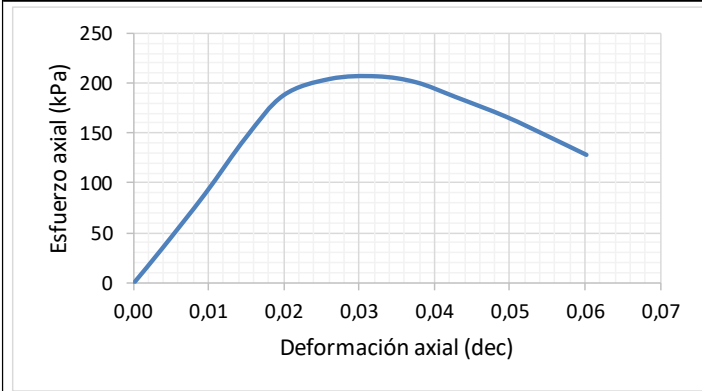


Resistencia a la compresión	178,5
$\sigma_{Max}/2$	89,2322024
Deformación 50	0,0426
E50 (MPa)	2

Anexo 55. Datos compresión simple de suelo con sustitución polvo ladrillo 5% ensayo 2.

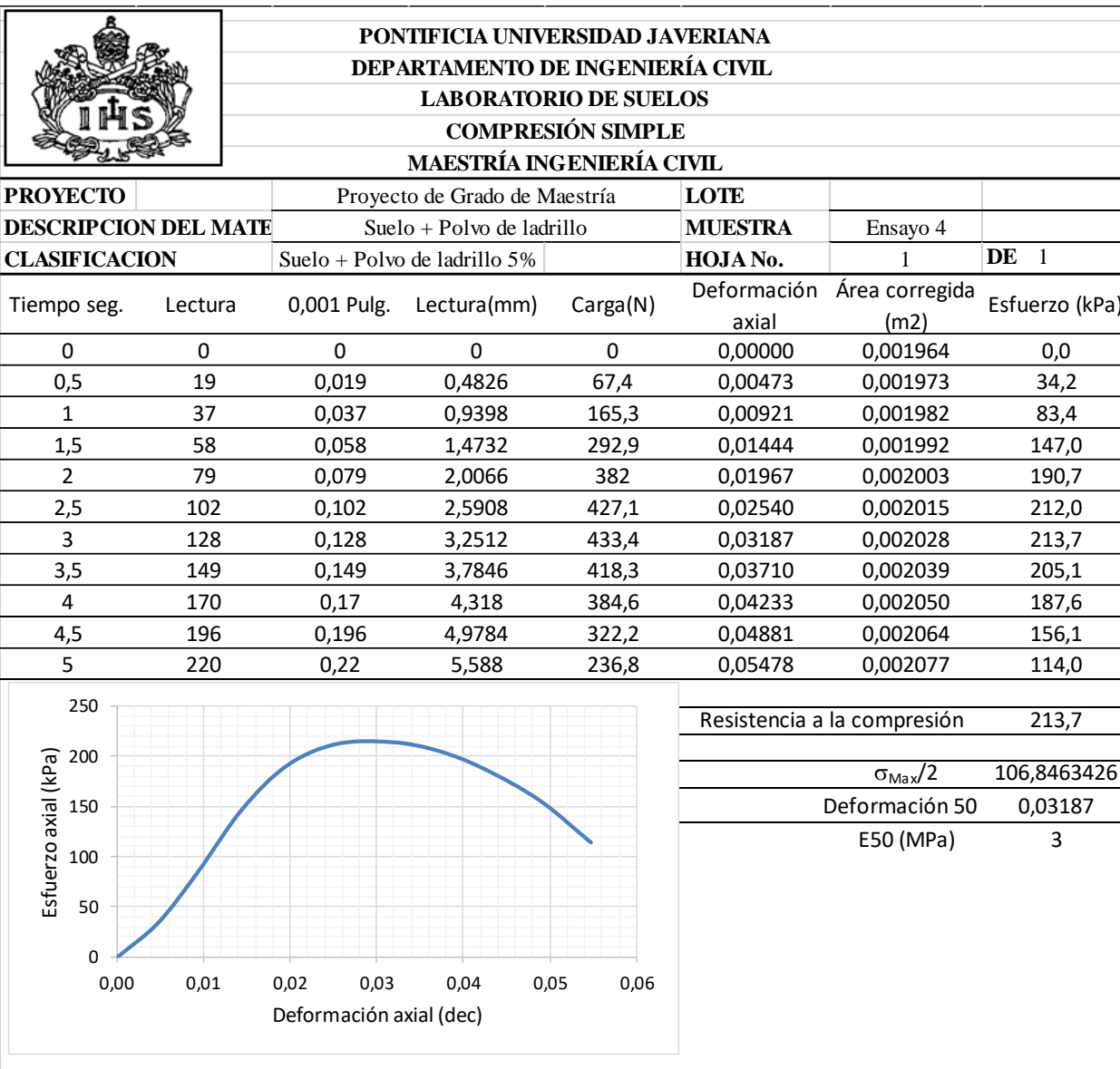
Fuente: propia.

							
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS COMPRESIÓN SIMPLE MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL							
PROYECTO		Proyecto de Grado de Maestría			LOTE		
DESCRIPCION DEL M		Suelo + Polvo de ladrillo			MUESTRA		
CLASIFICACION		Suelo + Polvo de ladrillo 5%			HOJA No.		DE 1
Tiempo seg.	Lectura	0,001 Pulg.	Lectura(mm)	Carga(N)	Deformación axial	Área corregida (m2)	Esfuerzo (kPa)
0	0	0	0	0	0,00000	0,001964	0,0
0,5	15	0,015	0,381	67,4	0,00374	0,001971	34,2
1	38	0,038	0,9652	176,4	0,00946	0,001982	89,0
1,5	60	0,06	1,524	290,6	0,01494	0,001993	145,8
2	80	0,08	2,032	376,2	0,01992	0,002003	187,8
2,5	105	0,105	2,667	411,8	0,02615	0,002016	204,2
3	130	0,13	3,302	419,6	0,03237	0,002029	206,8
3,5	151	0,151	3,8354	409,7	0,03760	0,002040	200,8
4	172	0,172	4,3688	381,9	0,04283	0,002051	186,2
4,5	199	0,199	5,0546	343,8	0,04955	0,002066	166,4
5	222	0,222	5,6388	304,1	0,0553	0,002078	146,3
5,5	242	0,242	6,1468	267,9	0,0603	0,002089	128,2
Resistencia a la compresión							206,8
$\sigma_{Max}/2$							103,3910055
Deformación 50							0,03237
E50 (MPa)							3



Anexo 56. Datos compresión simple de suelo con sustitución polvo ladrillo 5% ensayo 3.

Fuente: propia.



Anexo 57. Datos compresión simple de suelo con sustitución polvo ladrillo 5% ensayo 4.

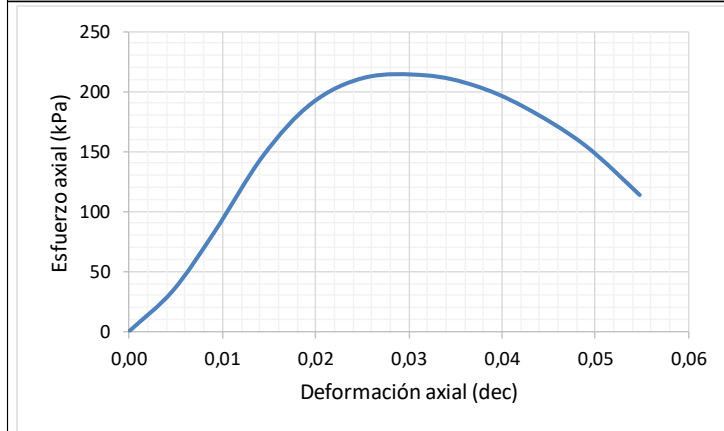
Fuente: propia.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS
COMPRESIÓN SIMPLE
MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría	LOTE	
DESCRIPCION DEL MATER	Suelo + Polvo de ladrillo	MUESTRA	Ensayo 1
CLASIFICACION	Suelo + Polvo de ladrillo 10%	HOJA No.	1 DE 1

Tiempo seg.	Lectura	0,001 Pulg.	Lectura(mm)	Carga(N)	Deformación axial	Área corregida (m2)	Esfuerzo (kPa)
0	0	0	0	0	0,00000	0,001964	0,0
0,5	19	0,019	0,4826	67,4	0,00473	0,001973	34,2
1	37	0,037	0,9398	165,3	0,00921	0,001982	83,4
1,5	58	0,058	1,4732	292,9	0,01444	0,001992	147,0
2	79	0,079	2,0066	382	0,01967	0,002003	190,7
2,5	102	0,102	2,5908	427,1	0,02540	0,002015	212,0
3	128	0,128	3,2512	433,4	0,03187	0,002028	213,7
3,5	149	0,149	3,7846	418,3	0,03710	0,002039	205,1
4	170	0,17	4,318	384,6	0,04233	0,002050	187,6
4,5	196	0,196	4,9784	322,2	0,04881	0,002064	156,1
5	220	0,22	5,588	236,8	0,05478	0,002077	114,0



Resistencia a la compresión	213,7
$\sigma_{Max}/2$	106,8463426
Deformación 50	0,03187
E50 (MPa)	3

Anexo 58. Datos compresión simple de suelo con sustitución polvo ladrillo 10% ensayo

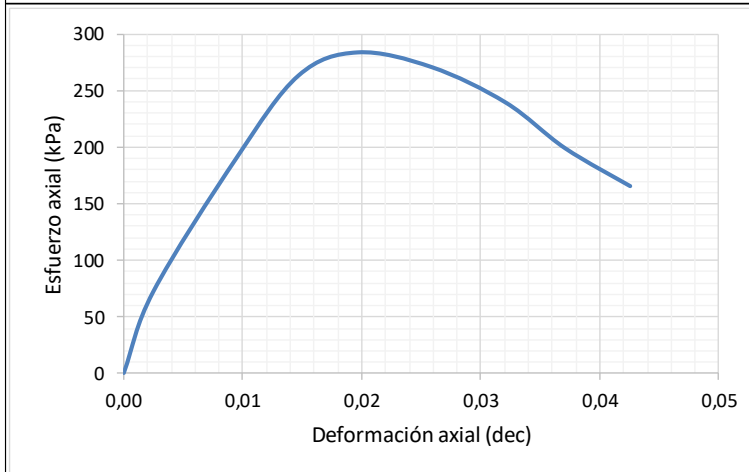
1. Fuente: propia.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS
COMPRESIÓN SIMPLE
MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría	LOTE	
DESCRIPCION DEL MATE	Suelo + Polvo de ladrillo	MUESTRA	Ensayo 2
CLASIFICACION	Suelo + Polvo de ladrillo 10%	HOJA No.	1 DE 1

Tiempo seg.	Lectura	0,001 Pulg.	Lectura(mm)	Carga(N)	Deformación axial	Área corregida (m2)	Esfuerzo (kPa)
0	0	0	0	0	0,0000	0,001964	0,0
0,5	10	0,01	0,254	142,1	0,0025	0,001968	72,2
1	38	0,038	0,9652	377	0,0095	0,001982	190,2
1,5	59	0,059	1,4986	524,9	0,0147	0,001993	263,4
2	79	0,079	2,0066	568,7	0,0197	0,002003	283,9
2,5	104	0,104	2,6416	546	0,0259	0,002016	270,9
3	129	0,129	3,2766	485,8	0,0321	0,002029	239,5
3,5	149	0,149	3,7846	406	0,0371	0,002039	199,1
4	171	0,171	4,3434	339,4	0,0426	0,002051	165,5



Resistencia a la compresión	283,9
$\sigma_{Max}/2$	141,9689894
Deformación 50	0,0197
E50 (MPa)	7

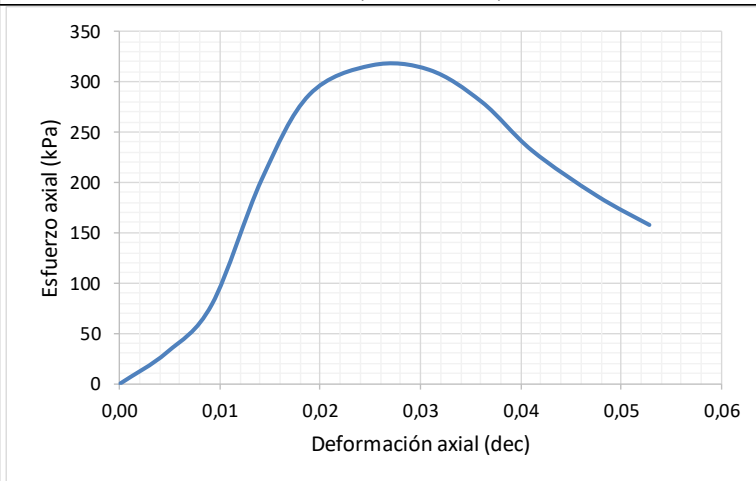
Anexo 59. Datos compresión simple de suelo con sustitución polvo ladrillo 10% ensayo

2. Fuente: propia.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS
COMPRESIÓN SIMPLE
MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO		Proyecto de Grado de Maestría			LOTE		
DESCRIPCION DEL MATER.		Suelo + Polvo de ladrillo			MUESTRA		Ensayo 3
CLASIFICACION		Suelo + Polvo de ladrillo 10%			HOJA No.		1 DE 1
Tiempo seg.	Lectura	0,001 Pulg.	Lectura(mm)	Carga(N)	Deformación axial	Área corregida (m2)	Esfuerzo (kPa)
0	0	0	0	0	0,00000	0,001964	0,0
0,5	19	0,019	0,4826	62,2	0,00473	0,001973	31,5
1	37	0,037	0,9398	156,8	0,00921	0,001982	79,1
1,5	57	0,057	1,4478	405,8	0,01419	0,001992	203,7
2	76	0,076	1,9304	575,8	0,01893	0,002001	287,7
2,5	101	0,101	2,5654	638,3	0,02515	0,002014	316,9
3	124	0,124	3,1496	632,9	0,03088	0,002026	312,4
3,5	145	0,145	3,683	571,3	0,03611	0,002037	280,5
4	165	0,165	4,191	475,7	0,04109	0,002048	232,3
4,5	191	0,191	4,8514	385,9	0,04756	0,002062	187,2
5	212	0,212	5,3848	328	0,0528	0,002073	158,2



Resistencia a la compresión	316,9
$\sigma_{Max}/2$	158,4533051
Deformación 50	0,02515
E50 (MPa)	6

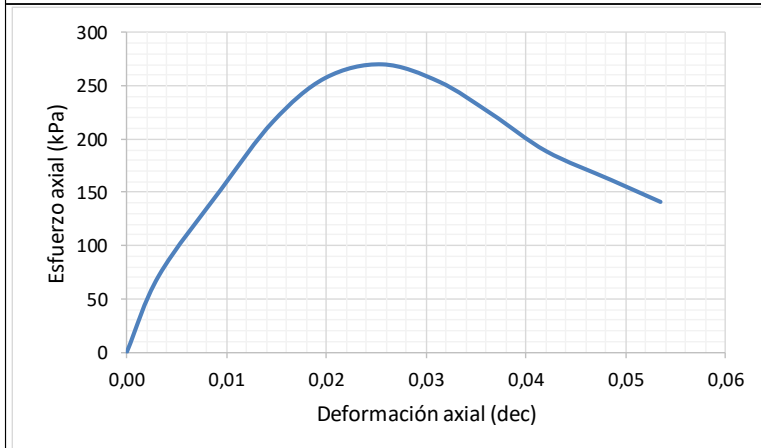
Anexo 60. Datos compresión simple de suelo con sustitución polvo ladrillo 10% ensayo

3. Fuente: propia.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS
COMPRESIÓN SIMPLE
MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL

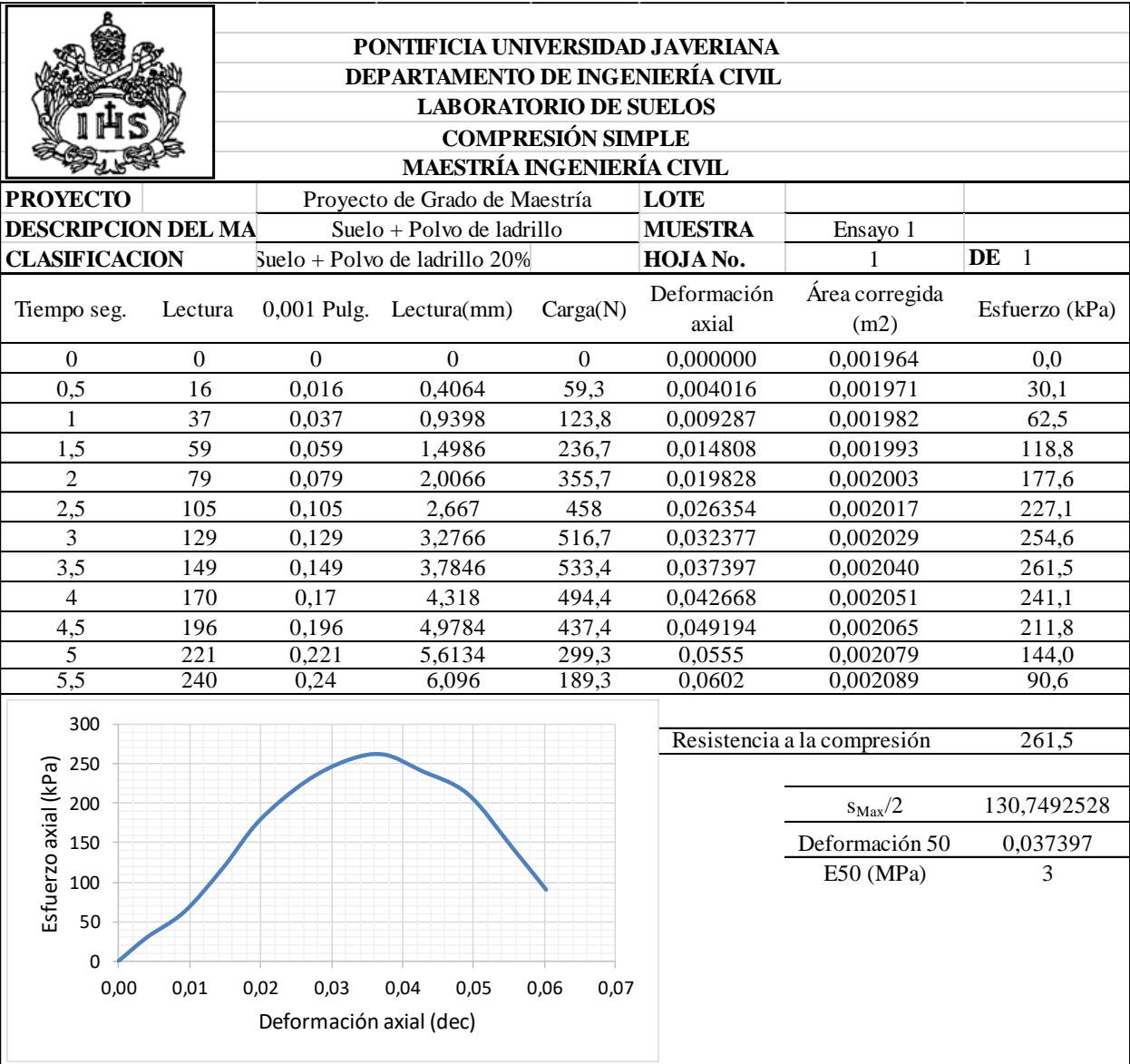
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría			LOTE			
DESCRIPCION DEL MATE	Suelo + Polvo de ladrillo			MUESTRA	Ensayo 4		
CLASIFICACION	Suelo + Polvo de ladrillo 10%			HOJA No.	1	DE 1	
Tiempo seg.	Lectura	0,001 Pulg.	Lectura(mm)	Carga(N)	Deformación axial	Área corregida (m ²)	Esfuerzo (kPa)
0	0	0	0	0	0,00000	0,001964	0,0
0,5	13	0,013	0,3302	142	0,00324	0,001970	72,1
1	38	0,038	0,9652	302,9	0,00946	0,001982	152,8
1,5	59	0,059	1,4986	431,5	0,01469	0,001993	216,5
2	80	0,08	2,032	515,6	0,01992	0,002003	257,4
2,5	103	0,103	2,6162	544,4	0,02565	0,002015	270,1
3	126	0,126	3,2004	514,4	0,03138	0,002027	253,8
3,5	147	0,147	3,7338	455,9	0,03661	0,002038	223,7
4	169	0,169	4,2926	386,9	0,04208	0,002050	188,8
4,5	195	0,195	4,953	334,2	0,04856	0,002064	161,9
5	215	0,215	5,461	293,1	0,05354	0,002075	141,3



Resistencia a la compresión	270,1
$\sigma_{Max}/2$	135,0742739
Deformación 50	0,03138
E50 (MPa)	4


Anexo 61. Datos compresión simple de suelo con sustitución polvo ladrillo 10% ensayo

4. Fuente: propia.



Anexo 62. Datos compresión simple de suelo con sustitución polvo ladrillo 20% ensayo

1. Fuente: propia.

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS COMPRESIÓN SIMPLE MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL					
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría			LOTE			
DESCRIPCION DEL MA	Suelo + Polvo de ladrillo			MUESTRA	Ensayo 2		
CLASIFICACION	Suelo + Polvo de ladrillo 20%			HOJA No.	1 DE 1		
Tiempo seg.	Lectura	0,001 Pulg.	Lectura(mm)	Carga(N)	Deformación axial	Área corregida (m ²)	Esfuerzo (kPa)
0	0	0	0	0	0,0000	0,001964	0,0
0,5	22	0,022	0,5588	26,9	0,0055	0,001974	13,6
1	39	0,039	0,9906	80,2	0,0098	0,001983	40,4
1,5	52	0,052	1,3208	128,9	0,0131	0,001989	64,8
2	71	0,071	1,8034	180,3	0,0178	0,001999	90,2
2,5	95	0,095	2,413	225,7	0,0238	0,002011	112,2
3	119	0,119	3,0226	252,5	0,0299	0,002024	124,8
3,5	140	0,14	3,556	270,8	0,0351	0,002035	133,1
4	161	0,161	4,0894	279,2	0,0404	0,002046	136,4
4,5	185	0,185	4,699	281,8	0,0464	0,002059	136,9
4,45	197	0,197	5,0038	282,5	0,0494	0,002066	136,8
5	207	0,207	5,2578	281,8	0,0520	0,002071	136,1
5,3	227	0,227	5,7658	278,7	0,0570	0,002082	133,9
6	248	0,248	6,2992	270,4	0,0622	0,002094	129,1
6,5	271	0,271	6,8834	253,8	0,0680	0,002107	120,5
7	293	0,293	7,4422	232	0,0735	0,002119	109,5

Resistencia a la compresión	136,9
$s_{Max}/2$	68,42761273
Deformación 50	0,0464
E50 (MPa)	1

Anexo 63. Datos compresión simple de suelo con sustitución polvo ladrillo 20% ensayo

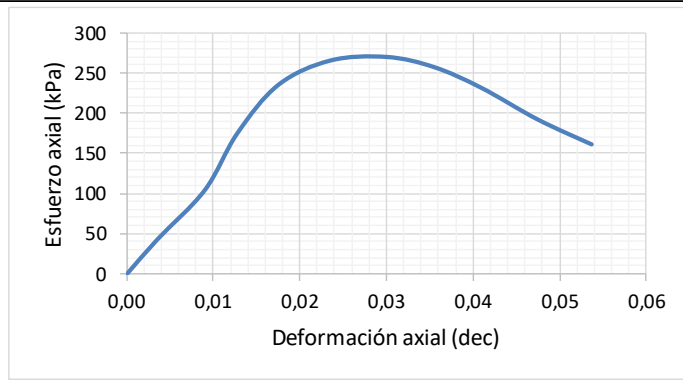
2. Fuente: propia.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS
COMPRESIÓN SIMPLE
MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría	LOTE	
DESCRIPCION DEL MATE	Suelo + Polvo de ladrillo	MUESTRA	Ensayo 3
CLASIFICACION	Suelo + Polvo de ladrillo 20%	HOJA No.	1 DE 1

Tiempo seg.	Lectura	0,001 Pulg.	Lectura(mm)	Carga(N)	Deformación axial	Área corregida (m2)	Esfuerzo (kPa)
0	0	0	0	0	0,000000	0,001964	0,0
0,5	14	0,014	0,3556	84	0,003514	0,001970	42,6
1	36	0,036	0,9144	206,1	0,009036	0,001981	104,0
1,5	51	0,051	1,2954	346,8	0,012800	0,001989	174,4
2	70	0,07	1,778	468,7	0,017569	0,001999	234,5
2,5	94	0,094	2,3876	532,3	0,023593	0,002011	264,7
3	120	0,12	3,048	545	0,030119	0,002024	269,2
3,5	142	0,142	3,6068	522,5	0,035640	0,002036	256,6
4	164	0,164	4,1656	472,6	0,041162	0,002048	230,8
4,5	190	0,19	4,826	395	0,047688	0,002062	191,6
5	215	0,215	5,461	333,4	0,0540	0,002075	160,6



Resistencia a la compresión	269,2
$s_{Max}/2$	134,6028458
Deformación 50	0,030119
E50 (MPa)	4

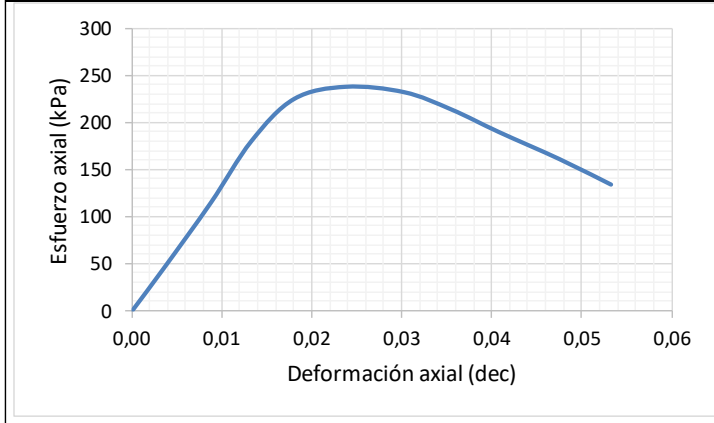
Anexo 64. Datos compresión simple de suelo con sustitución polvo ladrillo 20% ensayo

3. Fuente: propia.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS
COMPRESIÓN SIMPLE
MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL


PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría				LOTE		
DESCRIPCION DEL MATE	Suelo + Polvo de ladrillo				MUESTRA	Ensayo 4	
CLASIFICACION	Suelo + Polvo de ladrillo 20%				HOJA No.	1	DE 1
Tiempo seg.	Lectura	0,001 Pulg.	Lectura(mm)	Carga(N)	Deformación axial	Área corregida (m2)	Esfuerzo (kPa)
0	0	0	0	0	0,0000	0,001964	0,0
0,5	14	0,014	0,3556	88,9	0,0035	0,001970	45,1
1	35	0,035	0,889	228,2	0,0088	0,001981	115,2
1,5	53	0,053	1,3462	359,6	0,0133	0,001990	180,7
2	72	0,072	1,8288	451,2	0,0181	0,002000	225,6
2,5	95	0,095	2,413	480	0,0238	0,002011	238,6
3	121	0,121	3,0734	471,5	0,0304	0,002025	232,8
3,5	142	0,142	3,6068	436,5	0,0356	0,002036	214,4
4	163	0,163	4,1402	390	0,0409	0,002047	190,5
4,5	190	0,19	4,826	333,2	0,0477	0,002062	161,6
5	213	0,213	5,4102	278,8	0,0535	0,002074	134,4

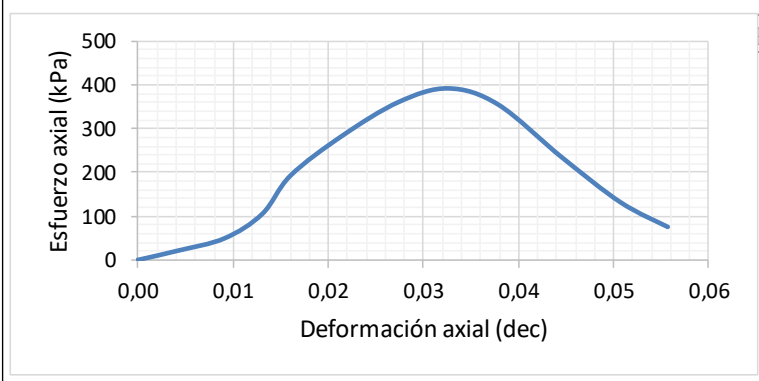


Resistencia a la comprt	238,6
$s_{Max}/2$	119,3162569
Deformación 50	0,0238
E50 (MPa)	5

Anexo 65. Datos compresión simple de suelo con sustitución polvo ladrillo 20% ensayo 4.


Fuente: propia.

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS COMPRESIÓN SIMPLE MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL					
		PROYECTO Proyecto de Grado de Maestría			LOTE		
		DESCRIPCION DEL M Suelo + Polvo de ladrillo			MUESTRA Ensayo 1		
		CLASIFICACION Suelo + Polvo de ladrillo 40%			HOJA No. 1 DE 1		
		Tiempo seg.	Lectura	0,001 Pulg.	Lectura(mm)	Carga(N)	Deformación axial
0	0	0	0	0	0,000000	0,001964	0,0
0,5	17	0,017	0,4318	41,9	0,004211	0,001972	21,2
1	37	0,037	0,9398	98,7	0,009166	0,001982	49,8
1,5	53	0,053	1,3462	210,4	0,013129	0,001990	105,7
2	65	0,065	1,651	386,4	0,016102	0,001996	193,6
2,5	87	0,087	2,2098	571,6	0,021552	0,002007	284,8
3	111	0,111	2,8194	731,2	0,027497	0,002019	362,2
3,5	132	0,132	3,3528	797,6	0,032700	0,002030	392,9
4	153	0,153	3,8862	726,9	0,037902	0,002041	356,2
4,5	180	0,18	4,572	483,9	0,044590	0,002055	235,5
5	205	0,205	5,207	273,3	0,0508	0,002069	132,1
5,5	225	0,225	5,715	157,8	0,0557	0,002079	75,9
						Resistencia a la compresión	392,9
						$s_{Max}/2$	196,4651875
						Deformación 50	0,032700
						E50 (MPa)	6

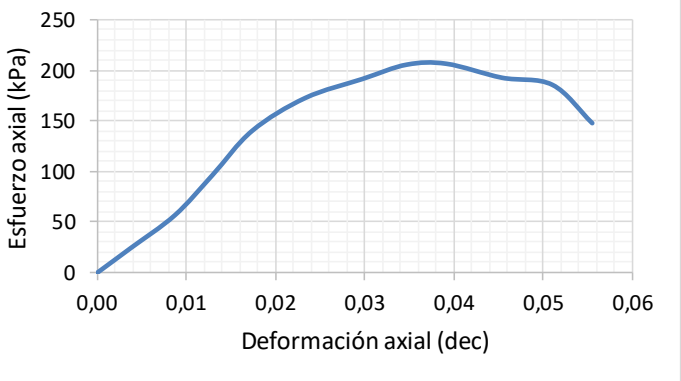


Anexo 66. Datos compresión simple de suelo con sustitución polvo ladrillo 40% ensayo

1. Fuente: propia.

		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE SUELOS COMPRESIÓN SIMPLE MAESTRÍA INGENIERÍA CIVIL					
PROYECTO	Proyecto de Grado de Maestría			LOTE			
DESCRIPCION DEL M	Suelo + Polvo de ladrillo			MUESTRA	Ensayo 2		
CLASIFICACION	Suelo + Polvo de ladrillo 40%			HOJA No.	1		DE 1
Tiempo seg.	Lectura	0,001 Pulg.	Lectura(mm)	Carga(N)	Deformación axial	Área corregida (m2)	Esfuerzo (kPa)
0	0	0	0	0	0,0000	0,001964	0,0
0,5	15	0,015	0,381	47,7	0,0037	0,001971	24,2
1	35	0,035	0,889	112,5	0,0087	0,001981	56,8
1,5	52	0,052	1,3208	192	0,0129	0,001989	96,5
2	70	0,07	1,778	280,7	0,0173	0,001998	140,5
2,5	94	0,094	2,3876	347,8	0,0233	0,002010	173,0
3	120	0,12	3,048	388,4	0,0297	0,002024	191,9
3,5	140	0,14	3,556	419,2	0,0347	0,002034	206,1
4	158	0,158	4,0132	422,9	0,0391	0,002043	207,0
4,5	183	0,183	4,6482	397,3	0,0453	0,002057	193,2
5	206	0,206	5,2324	384,9	0,0510	0,002069	186,0
5,5	224	0,224	5,6896	307,8	0,0555	0,002079	148,1

Resistencia a la compresión	207,0
$s_{Max}/2$	103,475301
Deformación 50	0,0391
E50 (MPa)	3



Anexo 67. Datos compresión simple de suelo con sustitución polvo ladrillo 40% ensayo

1. Fuente: propia.