

Diseño de adoquines de suelo prensado y evaluación complementaria de las propiedades físicas, mecánicas y químicas funcionalizados con aditivos tipo organosilano

Terrasil



Karol Eliana Cetina Cano y Eduar Alfonso León Jiménez

insertar licencia creative commons



Universidad Santo Tomás, seccional Tunja

División de Arquitecturas e ingenierías

Ingeniería civil

Tunja

2026

ADOQUINES DE TIERRA PRENSADA CON ADITIVOS ORGANOSILANOS 3
**Diseño de adoquines de suelo prensado y evaluación complementaria de las propiedades físicas,
mecánicas y químicas funcionalizados con aditivos tipo Organosilano**
Terrasil

Eduar Alfonso León Jiménez y Karol Eliana Cetina Cano

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingenieros civiles

Directora

Nidia Margarita Habrán Esteban

Química

Universidad Santo Tomás, seccional Tunja

División de Arquitecturas e ingenierías

Facultad de ingeniería civil

Tunja

2026

Autoridades Académicas

Fray Álvaro José Arango Restrepo, O. P.

Rector General

Fray Eduardo González Gil, O. P.

Vicerrector Académico General

Fray José Fernando Mancipe, O. P.

Rector Sede Tunja

Fray Wilmar Yesid Ruiz Cortés, O. P.

Vicerrector Académico Sede Tunja

Mónica Helena Rodríguez

secretaria de División Sede Tunja

Brigid Hiomara Pacheco García

Decano de la Facultad de ingeniería Civil

Agradecimientos

Al terminar esta etapa académica se agradece a Dios por la fortaleza, la paciencia y la sabiduría que nos permitió mantenernos firmes y llegar a cumplir este logro profesional.

A nuestros padres y familias, quienes con su cariño, apoyo y ejemplo de esfuerzo nos motivaron siempre a continuar más allá, en los instantes más arduos. Sin ellos este camino no habría sido posible.

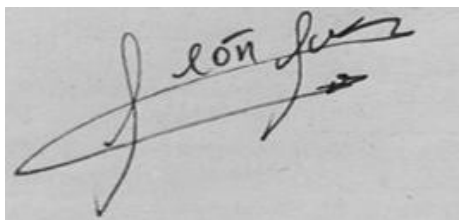
A nuestra directora de tesis, la Química Nidia Margarita Habrán Esteban, por su guía, orientación y la disposición constante para acompañarnos en cada etapa de la investigación. También al personal del Laboratorio de Geotecnia de la Universidad, especialmente a Hans Kurt Wiest Zea y John Fredy Hernández, por su apoyo técnico y por facilitarnos el acceso a los equipos necesarios.

Finalmente, agradecemos a nuestros compañeros de carrera y a la Universidad Santo Tomás, sede Tunja, por ser el espacio donde crecimos académica y personalmente, brindándonos las herramientas para formarnos como futuros profesionales Al Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) y al Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC), por establecer las normativas técnicas que sirvieron de base metodológica para esta investigación.

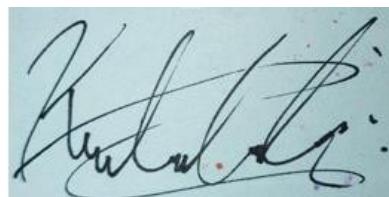
A los profesionales del sector geotécnico que contribuyeron con sus aportes técnicos y experiencia práctica, enriqueciendo el desarrollo educativo.

A mis amigos, por su comprensión durante los períodos de dedicación exclusiva al trabajo de grado y por brindarme momentos de distracción necesarios para mantener el equilibrio personal. A todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron a la realización de este proyecto, mi más sincero agradecimiento. Este logro no es solo personal, sino el resultado del apoyo colectivo de quienes creyeron en este proyecto y en nuestras habilidades para llevarlo a cabo. Que

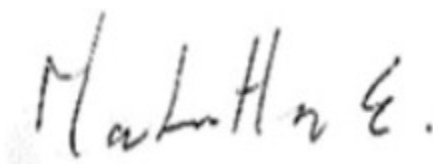
este trabajo contribuya al avance del conocimiento científico y tecnológico en el campo de la ingeniería geotécnica, honrando así la confianza depositada en nosotros.

A handwritten signature in black ink on a light-colored background. The signature is stylized, with the first part resembling 'Eduar' and the last part resembling 'Jimenez'.

[Eduar Alfonso Leon Jimenez]

A handwritten signature in black ink on a light blue background. The signature is stylized, with the first part resembling 'Karoll' and the last part resembling 'Cetina Cano'.

Karoll Eliana Cetina Cano]

A handwritten signature in black ink on a light-colored background. The signature is stylized, with the first part resembling 'Nidia' and the last part resembling 'Habrán Esteban'.

Directora: Nidia Margarita Habrán Esteban

Química

[febrero,2026]

Tabla de contenido

1. RESUMEN	13
2. ABSTRACT	14
3. PALABRAS CLAVE	15
4. GLOSARIO	16
5. INTRODUCCIÓN.....	1G
6. OBJETIVOS	21
6.1. Objetivo general	21
6.2. Objetivos específicos	21
7. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	22
8. JUSTIFICACIÓN	23
G. MARCO TEÓRICO	24
G.1. Fundamentos del suelo-cemento y sus propiedades.....	24
G.2. Criterios de dosificación y selección de la mezcla optima	24
G.3. Nanotecnología (Terrasil) Aditivo orgánico.....	25

ADOQUINES DE TIERRA PRENSADA CON ADITIVOS ORGANOSILANOS	8
G.4. Comportamiento mecánico y durabilidad del suelo tratado	26
G.5. Protocolos de fabricación con estándares de control y calidad	26
G.6. Marco normativo para el diseño y estabilización de adoquines	26
10. ESTADO DEL ARTE	28
11. METODOLOGÍA	32
12. MUESTRA	33
12.1. Extracción del material de la formación Tilatá	33
12.2. Caracterización del material de la formación Tilatá	33
12.2.1 Análisis granulométrico.....	33
12.2.2 Determinación de limite liquido de los suelos método (A).....	34
12.2.3 Limite plástico de plasticidad de los suelos.....	35
12.2.4 Relaciones humedad-peso unitario en los suelos (Ensayo normal de compactación)	35
12.3. Estandarización de diseño de probetas	36
13. SUELO CEMENTO	37
13.1. Determinación de la relación humedad-peso unitario en los suelos (Ensayo normal de compactación por Proctor)	37
13.2. Determinación del número de golpes para la compactación del suelo–cimento	38
13.3. Análisis de métodos para optimizar el desempeño al ensayo resistencia a la compresión de cilindros fundidos de suelo-cemento	

ADOQUINES DE TIERRA PRENSADA CON ADITIVOS ORGANOSILANOS	9
13.3.1 Proctor estándar con 25 golpes y 3 capas.....	39
13.3.2 Proctor modificado con 18 golpes y 3 capas	39
13.3.3 Compactación estática	40
13.4. Modelo y proceso de curado de especímenes de suelo-cemento para pruebas de compresión. 40	
14. DETERMINACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS MOLDEADOS DE SUELO-CEMENTO EN LABORATORIO.....	42
14.1. Estandarización y diseño de probetas	42
15. ADOQUINES.....	43
15.1. Dimensiones.	43
16. DISEÑO DEL MOLDE Y PARÁMETROS TÉCNICOS.....	44
17. DISEÑO DE ADOQUINES	45
18. EVALUACIÓN DE APARIENCIA Y DIMENSIONES EN ADOQUINES DE TIERRA PRENSADA 46	
19. PROCESO DE CURADO DE LOS ADOQUINES DE SUELO-CEMENTO. 47	
20. DETERMINACION A LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS ADOQUINES FUNDIDOS DE SUELO-CEMENTO ESTABILIZADOS CON TERRASIL. 48	
21. FLUORESCENCIA DE RAYOS X DISPERSIVOS DE LONGITUD DE ONDA A ADOQUINES 4G	
22. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	50
22.1. Caracterización del material	50

ADOQUINES DE TIERRA PRENSADA CON ADITIVOS ORGANOSILANOS	10
22.1.1 Material tipo Tilatá.....	50
22.2. muestra.....	51
22.3. Análisis granulométrico	51
22.4. Determinación de limite liquido de los suelos método (A)	51
22.5. Limite plástico de plasticidad de los suelos.	53
22.6. Determinación de las relaciones humedad-peso unitario seco en los suelos (Ensayo normal de compactación).....	54
23. SUELO CEMENTO	56
23.1. Determinación de la relación humedad-peso unitario seco en suelos (Ensayo normal de compactación).56	
24. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE GOLPES PARA LA COMPACTACIÓN DEL SUELO–CEMENTO.....	58
24.1. Proctor estándar con 25 golpes y 3 capas	5G
1. Proctor modificado con 18 golpes y 3 capas.....	60
24.2. Compactación estática	62
24.3. Determinación para la preparación y curado de probetas de suelo-cemento para ensayos de compresión.....	63
24.4. Diseño de adoquines.....	64
24.5. Proceso de curado de los adoquines de suelo-cemento	65
2. Cámara de curado por un lapso de 7 días.	65
3. Cámara de curado por un lapso de 3 días y secado natural	65
24.6. Determinación de la resistencia de compresión en adoquines moldeados de suelo- cemento con Terrasil.....	66

4. Resistencia a la compresión de los adoquines moldeados de suelo-cemento con Terrasil con curado en Cámara húmeda por 7 días
67

24.7. Determinación de la resistencia a la compresión de los adoquines fundidos de suelo- cemento con Terrasil con curado en Cámara húmeda por 3 días y secado natural 74

25. FLUORESCENCIA DE RAYOS X DISPERSIVOS DE LONGITUD DE ONDA A ADOQUINES 7G

26. CONCLUSIONES 80

27. REFERENCIAS 82

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1 : Acción química del terrasil., Fuente: Zydex. (2023).	29
Ilustración 2 Acción química del terrasil., Fuente: Zydex. (2023).	29
Ilustración 3 Variation of USC,0.2% Terrasil	30
Ilustración 4 Variation of USC,0.2% Terrasil	30
Ilustración 5 Variation of USC,0.2% Terrasil	30
Ilustración 6 humedecimiento de molde con acpm	44
Ilustración 7 Diseño de probetas suelo de cemento (1-3-5-7) % y cámara de curado.	45
Ilustración 8 Diseño de adoquines dimensiones	47
Ilustración 9 Molde de adoquines	48
Ilustración 10 Evaluación de apariencia y dimensiones.	50
Ilustración 11 Estratificación del suelo en horizontes A, B y C y material en laboratorio.	54
Ilustración 12 : Diseño Proctor estándar del suelo de la formación Tilatá.	58
Ilustración 13Adoquines en cámara de curado por 7 días.	71
Ilustración 14 Adoquines, secado natural.	72
Ilustración 15Falla a la resistencia.	72
Ilustración 16: Pistola de eflorescencia.	85

Tabla de graficas

Grafica1: limite liquido	52
Grafica 2: Relaciones humedad-peso unitario en los suelos.	55
Grafica 3Relaciones humedad-peso unitario-3%C	56
Grafica 4Relaciones humedad-peso unitario -5%	57
Grafica 5Relaciones humedad-peso unitario-7%	57
Grafica 6Relaciones humedad-peso unitario-10%	58
Grafica 8Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del adoquín con 0.02-1	70
Grafica 9Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del adoquín	70
Grafica 10: Curva carga-tiempo del ensayo de compresión de adoquín con 0.06-1	71
Grafica 11: Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del adoquín con 0.06-2	71
Grafica 12: Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del adoquín con 0.1-1	72
Grafica 13: Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del adoquín con 0.1-2	72
Grafica 14: Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del	73
Grafica 15Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del adoquín 0.15-2	73
Grafica 16Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del	74
Grafica 17Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del del adoquín 0.02-2	74
Grafica 18Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del del adoquín 0.06-1	75
Grafica 19Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del del adoquín 0.06-2	75
Grafica 20Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del del adoquín 0.1-1	76
Grafica 21Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del del adoquín 0.1-1	76
Grafica 22Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del del adoquín 0.15-1	77
Grafica 23Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del del adoquín 0.15-2	77

Tabla de tablas descriptivas

Tabla 1 Contenido de Cemento (%), según la clasificación del Suelo	37
Tabla 2 Determinación de limite liquido de los suelos método	51
Tabla 3 Limite plástico de plasticidad de los suelos.	53
Tabla 4 Limites y índice de plasticidad.....	53
Tabla 5 Relaciones humedad-peso unitario en los suelos	55
Tabla 6 Determinación del número de golpes para la compactación del suelo–cemento	58
Tabla 7 Proctor estándar con 25 golpes y 3 capas.....	59
Tabla 7 Proctor estándar con 25 golpes y 3 capas.....	59
Tabla 8 Probetas Proctor estándar con 25 golpes y 3 capas.....	59
Tabla 9 Resistencia de Proctor estándar con 25 golpes y 3 capas.....	60
Tabla 10 Proctor modificado con 18 golpes y 3 capas.....	60
Tabla 11 Probetas Proctor modificado con 18 golpes y 3 capas resistencia a la compresión	61
Tabla 12 Resistencia de probetas Proctor modificado con 18 golpes y 3 capas	61
Tabla 12 Resistencia de probetas Proctor modificado con 18 golpes y 3 capas	61
Tabla 13 Compactación estática.....	62
Tabla 14 Probetas compactación estática.....	62
Tabla 15 Resistencia de probetas compactación estática	62
Tabla 16 Preparación y curado de probetas de suelo-cemento para pruebas de compresión.	63
Tabla 17 Dosificación 3% cemento,0.02 Terrasil	67
Tabla 18 Dosificación 3% cemento,0.06% Terrasil.....	68
Tabla 19 Dosificación 3% cemento,0.1% Terrasil.....	68
Tabla 20 Dosificación 3% cemento,0.15% Terrasil.....	69

1. Resumen

La presente investigación sobre adoquines, donde se ejecutó una parte experimental, clasificando el material encontrando referencias particulares de dosificaciones en adobe constructivo, mampostería en arcillas, mezclas suelo cemento y dosificaciones de ensayos de materiales para carreteras. El estudio cuenta con un seguimiento a la normativa aplicable para evaluar las propiedades físicas como densidad; químicas como eflorescencia y mecánicas como la compresión de adoquines diseñados a partir de diferentes mezclas de suelo- cemento funcionalizados con aditivo tipo Organosilano el cual se empleó para mejorar la resistencia y durabilidad del producto.

Se realizaron las dosificaciones de los suelos tratados con cemento, ejecutando con la PCA (Portland Cement ssociation), INVAS y posteriormente con adición del Terrasil mediante conceptos teóricos, las cuales mostraron mejoras significativas en su dureza y competencia de desproporción. Estas propiedades dependen de varios factores como las características propias del suelo, la proporción de cemento usado, el proceso de mezcla, compactación, curado y la cantidad de agua presente durante el proceso de estabilización.

Las fases preliminares tales como la extracción, sobre materiales de la formación Tilatá, está ubicada en el municipio de Soracá Boyacá. Los ensayos experimentales se llevaron a cabo en los laboratorios de geotecnia y estructuras de la universidad Santo Tomás, sede Tunja, ensayos guiados con la normativa colombiana que establece criterios de fabricación y su uso en la industria constructiva, siendo una de las materias primas principales de la producción en la región.

Los resultados permitieron establecer dosificaciones optimas de suelo-cemento y Terrasil para el suelo de la formación Tilatá, evaluando su comportamiento mecánico en función del período de la humedad y curado.

2. Abstract

This research on pavers involved executing an experimental phase, classifying the material and identifying specific dosage references for constructive adobe, clay masonry, soil-cement mixes, and material testing dosages for road construction. The study follows applicable standards to evaluate physical properties such as density; chemical properties like efflorescence; and mechanical properties like the compression of pavers designed from different soil-cement mixes functionalized with an organosilane-type additive, which was used to enhance the product's strength and durability.

Dosages of cement-treated soils were prepared following the PCA (Portland Cement Association), INVAS standards, and subsequently with Terrasil addition based on theoretical concepts, showing significant improvements in hardness and disproportion resistance. These properties depend on several factors, such as the soil's inherent characteristics, the cement proportion used, the mixing process, compaction, curing, and the amount of water present during stabilization.

Preliminary phases, such as extraction from materials of the Tilatá Formation located in the municipality of Soracá, Boyacá, were conducted. Experimental tests were carried out in the geotechnics and structures laboratories of Universidad Santo Tomás, Tunja campus, guided by Colombian standards that establish fabrication criteria and use in the construction industry, where it serves as one of the region's primary raw materials.

The results enabled establishing optimal soil-cement and Terrasil dosages for the Tilatá Formation soil, evaluating its mechanical behavior based on humidity and curing periods.

3. Palabras clave

Adobe, adoquines de tierra prensada, aditivo Organosilano, mezclas suelo-cemento, Cemento Portland, Análisis de granulometría, compactación, curado, densidad seca máxima, eflorescencia, ensayo Proctor, formación Tilatá, humedad óptima, Índice de plasticidad, límite líquido, límite plástico, Tilatá, impermeabilización, resistencia a la compresión, Terrasil, Fluorescencia de rayos X (XRF) y Caracterización mineralógica.

4. Glosario

Aditivo: Materiales que se añaden a las mezclas de suelo-cemento con el objetivo de mejorar sus propiedades. Pueden ser de origen natural, como arena y grava, o artificiales, como el Terrasil. Su función principal es modificar la distribución de tamaños de partículas (granulometría) y mejorar la densidad y el comportamiento estructural de la mezcla final.

Adoquines de tierra prensada y Terrasil: Elementos de construcción diseñados a partir de mezclas de suelo, cemento y un aditivo tipo Organosilano.

Análisis granulometría: Procedimiento de laboratorio que determina la repartición porcentual de volúmenes de partículas en una muestra de tierra mediante tamizado progresivo a través de mallas de abertura decreciente.

Cemento Portland: Conglomerante hidráulico obtenido por la molienda conjunta de clinker y yeso, que al mezclarse agua desarrolla propiedades adhesivas y cohesivas mediante reacciones de hidratación.

Compactación: Proceso mecánico que busca reducir el volumen de vacíos en un material granular mediante la aplicación de energía, aumentando su densidad y mejorando sus propiedades de resistencia y estabilidad.

Curado: Conjunto de condiciones ambientales controladas de temperatura y humedad que se mantienen durante un período determinado, para permitir el desarrollo óptimo de las propiedades mecánicas en materiales cementantes.

Densidad seca máxima: Máximo valor que puede alcanzar un suelo compactado bajo condiciones específicas de energía y humedad, determinado mediante ensayos de compactación estándar.

Eflorescencia: Fenómeno que consiste en la cristalización de sales solubles en la superficie de materiales de construcción porosos, manifestándose como depósitos blanquecinos que pueden afectar la apariencia y durabilidad del material.

Ensayo Proctor: Prueba de laboratorio estandarizada que establece la relación entre el agua del material con la densidad seca de un material compactado bajo condiciones controladas de energía de compactación.

Estabilización de suelos: Técnica de mejoramiento que modifica las propiedades físicas, químicas o mecánicas de un suelo natural mediante la adición de agentes estabilizantes, con el objetivo de cumplir requisitos específicos de ingeniería.

Formación Tilatá (Tst): Unidad geológica sedimentaria del Plioceno Superior ubicada en la cuenca del río Chicamocha, caracterizada por intercalaciones de gravas, arcillas abigarradas y capas esporádicas de lignito.

Hidratación: Proceso químico mediante el cual el cemento reacciona con el agua formando productos cementantes que proporcionan cohesión y resistencia mecánica al material tratado.

Agua óptima: Contenido de humedad que admite adquirir la máxima consistencia seca de un suelo bajo condiciones específicas de compactación, determinado experimentalmente mediante curvas de compactación.

Índice de plasticidad: Parámetro que cuantifica la importancia de contenidos de agua, internamente a un suelo cohesivo el cual conserva un comportamiento elástico, calculado como el contraste del límite líquido y el límite plástico.

Límite líquido: Contenido de humedad que define la frontera de los estados líquido y elástico del suelo cohesivo, determinado mediante procedimientos estandarizados que evalúan la resistencia al corte del material.

Límite plástico: Contenido mínimo de humedad en el cual un suelo cohesivo puede moldearse sin desmoronarse, estableciendo la frontera inferior del rango plástico del material.

Organosilano: Compuesto químico que contiene enlaces silicio-oxígeno y grupos orgánicos, utilizado como aditivo para modificar propiedades superficiales de materiales y mejorar características como impermeabilidad y adhesión.

Resistencia a la compresión: Capacidad máxima de un material para soportar cargas axiales antes de la falla, expresada como la relación entre la carga máxima aplicada y el área de la sección transversal del espécimen.

Suelo-cemento: Material compuesto resultante de la mezcla íntima y compactación de suelo, cemento Portland y agua en proporciones controladas, que desarrolla características de rigidez y durabilidad superiores al suelo natural.

Terrasil: Aditivo comercial de tipo Organosilano utilizado en la estabilización de suelos para mejorar propiedades como impermeabilidad, resistencia al agua y durabilidad de materiales geotécnicos tratados.

XRF (Fluorescencia de rayos X): Técnica analítica instrumental que determina la composición elemental de materiales sólidos mediante la excitación de átomos con rayos X de alta energía y el análisis del espectro de fluorescencia emitido.

5. Introducción

Hoy en día, el desarrollo ingenieril pone en riesgo los factores ambientales, recursos naturales, el cambio climático, con sus sequías prolongadas, inviernos extremos y fenómenos meteorológicos cada vez más intensos han cobrado vidas, la agenda 2030 advierte que con el aumento acelerado de gases de efecto invernadero traería consecuencias graves, como la elevación del nivel del mar y los escasos de agua en regiones que nunca han tenido la necesidad de racionar agua. Frente a esta realidad es necesario tomar decisiones drásticas y actuar de inmediato, para evitar consecuencias catastróficas, reduciendo la cantidad de emisiones contaminantes e implementado soluciones de sostenibilidad.

En este contexto la investigación realizada sobre materiales térreos y su aplicación en mezclas suelo-cemento con aditivos, representa un aporte relevante en la ingeniería civil. Es fundamental para el desarrollo de soluciones constructivas más sostenibles sin la necesidad de cocinar estos materiales tradicionales mejorándolos con la funcionalización con aditivos Organosilano. El estudio se enfoca en la evaluación y aprovechamiento de estos materiales, lo cual ha generado un nuevo interés gracias a estudios que muestran la posibilidad de mejorarlos con aditivos modernos como Terrasil, el cual ayuda a aumentar la resistencia y la vida útil del suelo tratado, fueron clasificados diferentes proporciones de cemento y suelo, evaluando propiedades físicas y químicas de estos materiales, especialmente su resistencia y capacidad para soportar cargas combinando variables de curado. Por lo cual, mediante un procedimiento experimental se estudian variables como la proporción de cemento, el contenido de Terrasil aditivo orgánico, las condiciones de compactación y humedad, así mismo influye el contenido de humedad durante la estabilización.

Luego de obtener las dosificaciones óptimas para la fabricación de suelo-cemento se observan mejoras significativas en resistencia a compresión, durabilidad, contribuyendo así al desarrollo de soluciones constructivas adaptadas a las condiciones locales, con impacto positivo en la ingeniería de materiales y una construcción sostenible.

6. Objetivos

6.1. Objetivo general

Evaluar propiedades físicas mecánicas de adoquines de tierra prensada a partir de mezclas de suelo-cemento funcionalizados con Terrasil un aditivo tipo Organosilano.

6.2. Objetivos específicos

Proponer y ejecutar en adoquines, el diseño de las posibles mezclas suelo-cemento más resistente con la cantidad de Terrasil según la teoría y las normas técnicas colombianas (NTC) e instituto nacional de vías (INVIAS).

Determinar los parámetros apropiados mediante las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los adoquines diseñados a partir de las diferentes mezclas.

7. Planteamiento del problema

En la actualidad, el desarrollo de infraestructura vial y urbana enfrenta un doble desafío el alto impacto ambiental derivado de las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la fabricación tradicional, como el asfalto, adoquines cocidos, los elevados costos de adquisición y transporte que limitan el acceso a pavimentación en comunidades de bajos recursos. Ante esta realidad, el uso de tierra cruda surge como una alternativa económica y accesible; sin embargo, su implementación a gran escala se ve severamente restringida por su baja durabilidad y susceptibilidad ante condiciones de alta humedad.

A pesar del potencial de los suelos locales, existe una marcada brecha de conocimiento técnico respecto a protocolos de estabilización que no dependan de procesos de cocción contaminantes. Si bien se reconoce que aditivos químicos avanzados, como los Organosilanos, pueden transformar las propiedades hidrofílicas del suelo, aún no se han estandarizado dosificaciones óptimas que garanticen una mejora definitiva en la adherencia, la resistencia a la fricción y la estabilidad hídrica. lo que hace que la construcción de infraestructuras sea más accesible, especialmente en comunidades de bajos recursos o en proyectos de autoconstrucción, al ser más fáciles de producir y transportar a nivel local, lo que permite a las comunidades generar sus propios materiales para proyectos de pavimentación y poder generar empleo e ingresos, Al aplicar estos aditivos de manera adecuada, se solucionan problemas relacionados con la humedad, la adherencia, la resistencia a la fricción y deterioro.

8. Justificación

Según la especificación técnica el artículo correspondiente, los ensayos de control son esenciales para validar la calidad de los materiales en un macro proyecto en la ingeniería civil, la ejecución de laboratorios sigue la normativa nacional e internacional mediante una secuencia metódica: ensayos de caracterización para clasificar el suelo según AASHTO (grupos CL/CH para arcillas), ensayo Proctor al suelo natural para determinar humedad óptima y densidad máxima, consulta a la tabla de porcentajes de cemento referente de PCA para definir porcentajes de cemento, compactación de 9 probetas (3 por porcentaje) a dicha humedad, y finalmente ensayos de falla post-curado con premediación y determinación de % cemento vs. resistencia para identificar el contenido óptimo, validando así la implementación de Terrasil en probetas con propiedades mecánicas superiores para adoquines geotécnicos. La estabilización de suelos mediante aplicados a adoquines es un reto donde el objetivo es mejorar la durabilidad y estabilidad de las obras geotécnicas, en Colombia se observa una gran diversidad de suelos tales como los arcillosos que son complicados mecánicamente, por su inestabilidad ante la humedad y su baja capacidad portante, existen ciertas investigaciones que hablan del uso de Terrasil como estabilizante en estos suelos complejos. El uso de suelo arcilloso el cual es aprovechado por alfareros también para la construcción de adoquines, bloques, y gran diversidad de mampostería la gran mayoría cocinados, es una gran oportunidad para identificar una alternativa para el aprovechamiento de esta formación geológica sin generar contaminación priorizando la huella de carbono. Esta investigación propone evaluar propiedades en adoquines, con una dosificación óptima mezcla suelo Tilatá con cemento y así evaluar propiedades físicas, químicas y mecánicas de los adoquines propuestos con la implementación de Terrasil. La ejecución de los laboratorios se adelantó aplicando la normativa Nacional e internacional.

9. Marco teórico

9.1. Fundamentos del suelo-cemento y sus propiedades

El suelo-cemento es el resultado de una mezcla racional guiada en relaciones adecuadas de suelo, cemento y agua como resultado se forma un producto endurecido, este proceso es acompañado de unos cuidados especiales como cantidad optima de cemento, agua y peso específico seco aparente a ser alcanzado después de la compactación, estos procesos con el fin de buscar una resistencia optima y durabilidad, para así aprovechar suelos complejos como los arcillosos (Portland Cement Association, 2018). Los suelos o formaciones geológicas están en continuo proceso de transformación ya sea por razones físicas, químicas o tectonismos. Por esta razón se clasifican según su textura y su composición geomecánica, los suelos más usuales son los suelos limosos, arenosos, arcillosos, rocosos y mixtos, cada uno con pertenencias físicas distintas. Las superficies tratadas con cemento muestran mejoras significativas en su resistencia y capacidad de deformación. Estas propiedades dependen principalmente de varios factores en cuenta como, las características propias del suelo, la proporción de cemento utilizada, el proceso de mezcla, compactación y curado aplicado también influye la cantidad de agua presente durante el proceso de estabilización (Portland Cement Association, 2020).

9.2. Criterios de dosificación y selección de la mezcla optima

Con la caracterización del suelo estudiado la formación Tilatá, la muestra de suelo tratada con cemento se observan mejoras significativas en su resistencia y capacidad de deformación. Estas propiedades dependen principalmente de varios factores en cuenta como, las características propias del suelo, la proporción de cemento utilizada en peso, el proceso de mezcla, compactación y curado aplicada, también influyendo la cantidad de agua presente durante el proceso de estabilización. La manejabilidad de las arcillas y su plasticidad al entrar en contacto con el agua la caracteriza en uno

los materiales de construcción a nivel global más antiguos junto al adobe, las arcillas tienen un potencial para acumular agua e hincharse y su respuesta adversa que sin humedad lo que hace es contraerse. Determinar las dosificaciones suelo-cemento y agua, requiere concretar una cantidad de cemento, estableciendo la humedad óptima y el peso específico seco de la muestra ensayada; un ejemplo de la clasificación del suelo según el sistema de clasificación de suelos AASHTO -, (2025). La Cement Association (PCA) indica el aumento de cemento en peso, porcentaje y control de humedad para optimizar la muestra (ACI Committee 230, 2020).

9.3. Nanotecnología (Terrasil) Aditivo orgánico

Es una base de Organosilano el cual contiene enlaces entre un átomo de silicio y un grupo orgánico reactivo y soluble al agua, su uso generalmente es en la estabilización de suelos, es reactivo a la temperatura ambiente, mejora la compactación significativamente incluso con menor humedad de compactación (Terrasil–Optimasoil, 2014). Terrasil es un impermeabilizante que maneja una escala nanométrica, soluble en agua mejora las propiedades mecánicas, hidráulicas y durabilidad frente al paso de cargas. En adoquines las propiedades y comportamientos de la muestra suelo-cemento-Terrasil mejoró tanto en resistencia, compresión en bajas proporciones de cemento y Terrasil en relación entre humedad óptima y densidad máxima puede variar para un mismo tipo de suelo y proporción de cemento si se modifica la energía de compactación aplicada por lo contrario el módulo de elasticidad estático del suelo-cemento presenta una alta variabilidad, influenciado principalmente por el tipo de suelo y la cantidad de cemento (Terrasil–Optimasoil, 2014). Aunque su valor es bajo comparado con el concreto, resulta considerablemente más alto que el del suelo natural. La compactación es un aspecto clave que influye directamente en el comportamiento del suelo-cemento, los procesos de compactación adecuado mejora notablemente

las propiedades mecánicas del material, mientras que una compactación deficiente puede llevar a deducciones menos eficaces (Instituto Nacional de Vías. 2013).

9.4. Comportamiento mecánico y durabilidad del suelo tratado

Para la mezcla suelo-cemento se realiza la clasificación del suelo y sus parámetros mecánicos se clasifica según la normativa AASHTO, mediante la tabla 612-2 (Pérdida de masa de especímenes duplicados en el ensayo de humedecimiento y secado) los cuales indican un (3-5-7-10) % de cemento, este ensayo se realizó con 4 diferentes porcentajes de agua como mínimo de puntos que pide la norma logrando de cada uno de ellos una curva de compactación. Una vez macerado el suelo hasta dejarlo totalmente fino y tamizarlo se ejecutan las dosificaciones planteadas, se mezcla el cemento con el suelo garantizando una mezcla uniforme, seguidamente dosificamos el Terrasil con el agua para finalmente mezclarlo uniformemente con el suelo-cemento humedeciendo toda la mezcla para luego compactarla en el molde.

9.5. Protocolos de fabricación con estándares de control y calidad

La Guía de estabilidad de suelos con cemento (PCA, 2020), proporciona lineamientos técnicos para mejorar propiedades mecánicas del suelo con el complemento de cemento, optimizando así las bases y subbases sobre las cuales se instalan los adoquines. La aplicación conjunta de ambas normativas permite desarrollar pavimentos que no solo cumplen con estándares de calidad en su fabricación, sino que también cuentan con un soporte estructural apropiado, resultando en superficies durables, seguras y adaptadas a las condiciones particulares de tránsito y clima de cada proyecto.

9.6. Marco normativo para el diseño y estabilización de adoquines

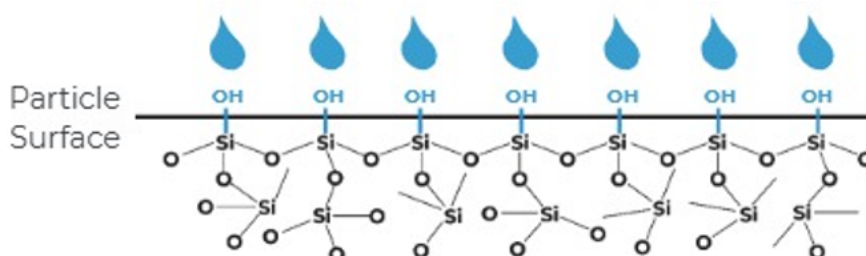
En la investigación realizada para suelo-cemento fue guiada por los procesos del Instituto Nacional de Vías. (2014). Manual de normas de ensayo de materiales para carreteras (Resolución

1375 del 26 de mayo de 2014). Ministerio de Transporte, República de Colombia. Los laboratorios de muestreos de suelos se basan en las normas internacionales ASTM adaptadas para el (INVIAS,2013), el proyecto requiere las normas técnicas colombianas (NTC) de adoquines, el diseño de mezclas de suelo-cemento, agua para adoquines y como aditivo Terrasil se guía de la normativa, los ensayos se respaldan con el instituto colombiano de normas técnicas (ICONTEC).

10. Estado del arte

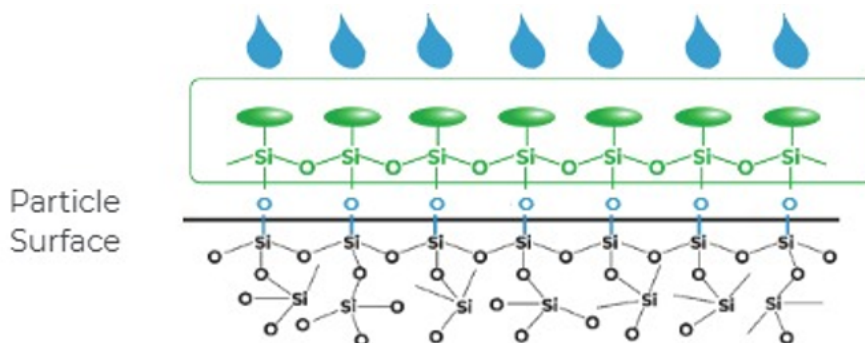
De acuerdo con investigaciones centradas en las variables de las dosificaciones tales como cemento, agua y peso específico seco del suelo, el cual tienen como objetivo determinar la cantidad de cemento óptimo para los ensayos de compactación de suelo cemento (Rocha, 2002). Las dosificaciones deben asegurar las propiedades mecánicas adecuadas. La cantidad de cemento recomendada para suelos A-2 según la clasificación de la AASHTO, es aproximadamente un 7%, es una implementación que indica la cantidad de cemento según la norma general de dosificaciones de cemento para el ensayo de compactación mecánica (Portland Cement Association [PCA], 2020). Dado que estos porcentajes son sugeridos la aplicación de la nanotecnología permite reducir en un porcentaje en 3%.

Ilustración 1 : Acción química del terrasil., Fuente: Zydex. (2023).



En la primera superficie se observa una capa hidrofílica (amante del agua), las moléculas de sílice producen una alta permeabilidad al agua conduce a un ascenso capilar y la entrada de agua en los poros, lo que provoca daños en el suelo.

Ilustración 2 Acción química del terrasil., Fuente: Zydex. (2023).



La segunda superficie es la hidrofóbica (repelente al agua), con la adición de errasil reacciona al contacto con el suelo y crea una capa permanentemente repelente al agua en su superficie como resultado, el suelo se vuelve impermeable a la entrada de agua Zydex. (2023).

En Arasnara, India evaluaron la efectividad del aditivo químico Terrasil en la estabilización de suelos blandos principalmente lo realizan para reducir la plasticidad y el contenido de humedad. Seguidamente se aplicaron 3% porcentajes de Terrasil del 0.2%, 0.5% y 0.8%, donde realizaron ensayos de límites de Atterberg, Gravedad específica, variación del pH, compactación Proctor estándar y análisis granulométrico (Thomas, et al., 2016)

Ilustración 3 Variation of USC,0.2% Terrasil

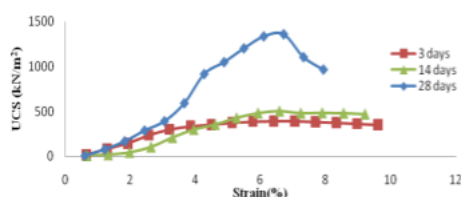


Figure 5. Variation of UCS as per curing days for 0.2% Terrasil dosage

Ilustración 4 Variation of USC,0.2% Terrasil

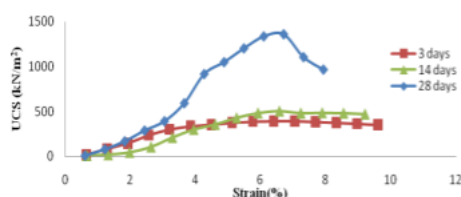
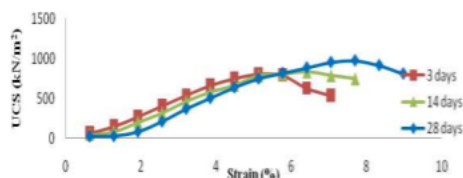


Figure 5. Variation of UCS as per curing days for 0.2% Terrasil dosage

Ilustración 5 Variation of USC,0.2% Terrasil

Figure 6. Variation of UCS as per curing days for 0.5% Terrasil dosage



Ellos manejan variables como el tiempo de curado, los resultados mostraron mejoras en las propiedades del suelo, registraron depreciación en el índice de plasticidad, la gravedad específica de la superficie tuvo un incremento progresivo y una mejora en la densidad seca máxima que aumentó mientras que el contenido de óptima humedad disminuyó. Dado que la formación Tilatá presenta un índice de plasticidad media-alta la acción de Terrasil es fundamental dado que este tipo de arcilla tiende a hincharse con la presencia del agua. El uso de aditivos nanotecnológicos como Terrasil usado para evaluar el efecto en las características técnicas para mejorar la resistencia al agua en bases de suelo en caminos de tierra o gravas, realizando ensayos para extraer información acerca de absorción de agua, medición

expansiva del suelo, ensayos de permeabilidad y pruebas de densidad Proctor. Terrasil en el suelo, esta mejora las propiedades químicas transformando en grupos hidroxilo hidrofílicos en grupos alquilo hidrofílicos, creando una barrera para la infiltración de agua, lo cual sustenta científicamente una reducción en la expansividad del suelo hasta un 90% y una mejora notable en la densidad de compactación, alcanzando valores de Proctor de 100 y 105, esto confirma las estructuras más densas y estables (Zydex Industries, 2023).

La modificación de sustancias húmicas con Organosilanos para mejorar su capacidad de formar agregados en suelos expuestos al agua evaluando su potencial. Recolectaron datos de medición del ángulo de contacto, isothermas de adsorción Langmuir, análisis de distribución de tamaño de agregados, ensayos de estabilidad de agua los cuales demostraron salinización de sustancias húmicas que se modifican en agregados más estables. Puntualmente se incrementa la hidrofobicidad del material, la capacidad de absorción de la arcilla se duplicó en comparación con los humatos (Volikov et al., 2016).

En otro estudio analizaron una mejora en las propiedades de suelos arcillosos blandos de Kuttanad mediante el uso de Terrasil, donde evaluaron propiedades como el impacto de Terrasil, evaluando la compresibilidad, resistencia al corte y permeabilidad del suelo. En el estudio aplicaron una dosificación óptima que maximice la resistencia y controle las características de compresibilidad y permeabilidad, presentan condiciones relevantes como curado, temperatura, humedad de curado, índice de plasticidad, resistencia a la compresión no confinada de suelos (UCS), permeabilidad, índice de compresibilidad, valor del CBR. Aplicaron un 0.3% de Terrasil con 28 días de curado, observando una baja en el índice de plasticidad con un aumento de resistencia a la compresión no confinada experimentó un aumento significativo, de 31.3 KPa a 75.7 KPa con 0.3%

de Terrasil y 28 días de curado, el aumento del 142% muestra una efectividad en mejorar la capacidad portante (Meeravali et al., 2020).

El uso de ceniza de estanque estabilizada con nanomateriales como subbase para pavimentos, se combinarán ensayos de CBR, ASTM D1883, triaxial consolidado drenado, ensayo de durabilidad Slake (SDI), deflectómetro de caída ligera (LFWD), Análisis químico de fluorescencia de rayos X. El CBR alcanzó un impresionante 79%, lo que representa un aumento del 140% comparando al suelo no estabilizados, y una reducción en la prueba del deflectómetro de caída ligera (LFWD), la deflexión promedio de la mezcla óptima fue de 0.45mm, respecto a la disminución del 36.39% respecto a la mezcla sin estabilización (1.38) con lo que podemos concluir que se presenta una mejora sustancial en la rigidez del material (Ghosh et al., 2024).

Científicamente el uso químico de Terrasil para la estabilización del suelo, motivo a evaluar la efectividad de Terrasil en la mejora de las propiedades del suelo para aplicaciones de ingeniería civil, usando métodos de ensayo estándar para determinar las características del suelo tratado con Terrasil, incluyendo pruebas de CBR, UCS y permeabilidad, los resultados de esta investigación también obtienen mejoras en resistencia y durabilidad del suelo estudios (Patel et al., 2015).

En el adobe constructivo se observa una gran diversidad de aditivos como en la investigación de la ceniza, Grosh et al., (2024) o fibra de coco mencionada por Roux Gutiérrez y Olivares Santiago, (2002) la alfarería en Colombia es un arte antiguo utilizado por el estilo indígena muisca que trabajaron barro para construir ollas principalmente. Colombia tiene la materia prima en gran variedad de arcillas y limos, que se moldean compactan y cocinan. Rivera- Salcedo et al., (2021) explican en esta investigación la composición óptima como un 47% de arena, 28% de arcilla y 25% de limo, donde tuvieron resultados promedio a la compresión de 1.8 MPa.

Los aditivos tradicionales usados más efectivos para mejorar sus propiedades fueron pasto y bosta, aplicados en técnicas ancestrales por lo cual es un patrimonio arquitectónico en ciertos lugares de Colombia.

Teniendo en cuenta la estabilización con cemento Portland se evaluó el comportamiento estructural de ladrillos de adobe estabilizados con un 6% de cemento y reforzados con fibra de coco para su aplicación en muros de carga, aplican un 6% de cemento. Los datos fueron obtenidos de la ejecución de la prensa hidráulica para ensayos de compresión, demostrando un aumento significativo en la resistencia y una reducción de la fisuración, incrementando la capacidad portante para muros de carga (Roux Gutiérrez, R. S., & Olivares Santiago, M, 2002).

La caracterización volumétrica durante el proceso de fraguado uso una mezcladora de alta presión controlada. La combinación óptima de 30% yeso, 20% cal viva y 50% suelo produjo lechadas con excelente capacidad de penetración y resistencia a la compresión de 8.5 MPa a los 28 días con contracción mínima del 0.8% indicando una adecuada compatibilidad para su uso en restauración (Jing at al., 2017).

11. Metodología

Esta investigación se enfoca en el diseño y evaluación de las propiedades físicas y químicas de adoquines de tierra prensada destinados a uso vehicular y peatonal, tomando diferentes lineamientos establecidos por la normativa colombiana vigente en cuanto a materiales y ensayos aplicables. El estudio contempla la elaboración de mezclas de suelo-cemento modificadas con Terrasil, un aditivo Organosilano reconocido por su capacidad de mejorar la compactación y cohesión del suelo tratado. A través de una serie de ensayos de laboratorio, se analizará el comportamiento en adoquines bajo distintas proporciones de cemento y aditivo, con el fin de determinar su viabilidad técnica como alternativa sostenible y de bajo costo en aplicaciones de infraestructura. La metodología incluye fases de caracterización del suelo, dosificación, compactación, curado y evaluación de parámetros como resistencia a la compresión, densidad y eflorescencia.

12. Muestra

12.1. Extracción del material de la formación Tilatá

La recolección del material base se llevó a cabo en la Formación Tilatá, localizada en el municipio de Soracá, Boyacá, bajo las coordenadas geográficas 5°30'37"N 73°20'08"W. Con el objetivo de garantizar la representatividad y homogeneidad de las características físicas del material, la extracción se ejecutó en un punto único mediante una excavación manual a una profundidad aproximada de 1 metro, permitiendo el muestreo de los horizontes subsuperficiales del perfil estratigráfico. Se recolectó un volumen total de 4 m³, el cual fue almacenado en sacos de fibra para su traslado al Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Santo Tomás, seccional Tunja. Finalmente, y de acuerdo con los protocolos de preparación de muestras de la norma INV E-106-13, el material se dispuso en bandejas para un proceso de secado natural al aire libre, paso previo indispensable para los ensayos de caracterización y dosificación.

Ilustración 1: Ubicación del municipio de Soracá -



Casallas, F.; Ibañez, M.; & Rodríguez, J. (2022). Study area: the municipalities of Soracá and Nuevo Colón in the Department of Boyacá [Figura]. En *Assessment of geomorphological hazards in Boyacá, Colombia*. ResearchGate.

12.2. Caracterización del material de la formación Tilatá.

12.2.1 Análisis granulométrico.

La ejecución del análisis granulométrico de los agregados se realizó bajo los lineamientos de la

normativa INV-E-213-13, iniciando con un procedimiento de cuarteo técnico para asegurar que la muestra ensayada representara fielmente las propiedades del material original y mitigar posibles errores derivados de una distribución heterogénea de los tamaños de partícula. A partir de este proceso de reducción, se seleccionó una muestra representativa de 100 g, la cual fue macerada y sometida a un proceso de lavado a través del tamiz No. 200, procediendo posteriormente al secado del material retenido en horno a una temperatura de 105–110 °C hasta alcanzar un peso constante. Finalmente, la determinación de la diferencia de masas en este ensayo permite comprender la distribución de las partículas en el suelo, lo que constituye una información técnica para verificar la viabilidad y el comportamiento del material en el diseño de los adoquines de tierra prensada.

12.2.2 Determinación de límite líquido de los suelos método (A).

Se ejecuto el método considerado el más preciso, consiste en realizar varios tanteos con diferente contenido de humedad para obtener una curva de fluidez que permite interpolar el valor del LL con mayor confiabilidad, previamente se tomó la muestra que pase completamente por el tamiz No. 40 (425 μm), realizándole tres ensayos variando ligeramente el contenido de agua. En cada uno, se puso una porción del suelo en la cacerola de Casagrande, se ranura la masa con el dispositivo metálico correspondiente y se aplicó una serie de golpes controlados (a 2 golpes por segundo) hasta que la ranura se cierre en una distancia de 12 mm (aproximadamente), se reconoció el número de golpes necesario y se toma una submuestra para determinar su contenido de humedad.

Con los resultados obtenidos, se construyó una curva de fluidez, graficando el contenido de humedad frente al logaritmo del número de golpes, de (15-25), (20-30), (25-35), y mediante interpolación lineal sobre esta curva, se obtiene el contenido de humedad conveniente a 25 golpes, el cual se define como el límite líquido del suelo.

Este método permite reducir el error y obtener un resultado más representativo, especialmente en suelos de comportamiento complejo, se obtuvieron tres tanteos válidos, en un rango de 15 a 35 golpes, distribuidos de forma amplia para obtener la curva confiable, con calidad de la interpolación entre números de golpes.

12.2.3 Limite plástico de plasticidad de los suelos.

Con el objetivo de caracterizar la plasticidad del suelo, se realizó el laboratorio de caracterización física, siguiendo la norma INVIAS E-126-13, la resistencia a la deformación y la plastificación del suelo, la muestra seca, del suelo ya apto para el ensayo del límite líquido, se utilizó la fracción que pasa por el tamiz No. 40., molida, se sometió a la prueba de deformación mediante el método manual para determinar el límite plástico, consistió en tomar una porción del suelo húmedo y amasarla formando un rollo sobre una superficie de vidrio o entre las manos, el rollo se afino hasta alcanzar un diámetro de 3.2 mm (1/8”), lo cual no se tomó más de dos minutos. Durante el proceso, se aplica solo la presión necesaria para que el rollo sea uniforme sin que se quiebre, pesando lo correspondiente y llevando al horno para después de 24 horas retirar y pesar, el ensayo ayuda a observar visualmente el comportamiento del suelo cuando pierde su plasticidad, el LP es el contenido de agua más bajo en el que el suelo puede moldearse plásticamente (sin agrietarse al enrollarlo), y el IP es la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico

$$IP=LL-LP$$

12.2.4 Relaciones humedad-peso unitario en los suelos (Ensayo normal de compactación).

Para determinar las condiciones óptimas de compactación y establecer una línea base de comparación, se realizó el ensayo de Proctor estándar siguiendo los lineamientos de la norma INV E-141-13, aplicado exclusivamente al suelo natural de la formación Tiltatá en su estado original. El procedimiento consistió en mezclar la muestra seca con cinco contenidos de agua distintos (8%, 10%, 12%, 14% y 16%), compactándola en cilindros de prueba mediante tres capas de 25 golpes mediante un martillo de peso determinado, cada una para determinar la relación precisa entre la humedad y la densidad seca alcanzada. A partir de estos datos, se construyó la curva de compactación que identifica la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad, parámetros críticos para asegurar que el material alcance la estabilidad estructural necesaria para soportar cargas y evitar fallas por asentamientos o inestabilidad volumétrica. Este análisis inicial

del suelo sin aditivos es fundamental para la investigación, ya que proporciona los datos de referencia indispensables para contrastar y evaluar con rigor técnico cómo la incorporación posterior de cemento y el aditivo Terrasil modifican el comportamiento mecánico y la durabilidad de los adoquines finales.

12.3. Estandarización de diseño de probetas.

Para el diseño y preparación de las probetas utilizadas en los ensayos de laboratorio, se estandarizó el procedimiento de acuerdo con la metodología definida por la norma del INVÍAS, usando la relación masa-volumen como base. Las masas del recipiente, del agua y de las partículas sólidas se determinaron siguiendo la fórmula correspondiente, donde:

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

w: Contenido de agua, %

W₁: Masa del recipiente con el espécimen húmedo, g

W₂: Masa del recipiente con el espécimen seco, g

W_c: representa la masa del recipiente vacío,

W_w: la masa del agua incorporada al suelo,

W_s: la masa de las partículas sólidas secas.

Estas variables permitieron calcular de forma precisa el contenido de humedad y garantizar la homogeneidad de las mezclas, lo cual es esencial para obtener resultados representativos y reproducibles en los ensayos como Proctor, en recipientes de suelo-cemento para pruebas de compresión.

Obteniendo la humedad optima y la densidad del suelo se estandarizo el volumen y las masas de las siguientes probetas teniendo en cuenta el molde y las siguientes formulas.

W_{opt} : Humedad optima

ρ = densidad

d = diámetro

h =altura

V_m : Volumen del molde = $\pi * (d/2)^2 * h$

W_m : masa del molde $\rho * V_m$

W_s : masa del suelo: $w_m / (1 + W_{opt})$

W_w : masa del agua: $W_m - w_s$

13. Suelo cemento.

13.1. Determinación de la relación humedad-peso unitario en los suelos (Ensayo normal de compactación por Proctor).

De igual modo se realizó un Proctor estándar, parametrizado con los diferentes porcentajes de cemento según el tipo de suelo que en nuestro caso se clasifico como A-6 según AASHTO y se determinó mediante la tabla 1 (INVIAS 2012 Tabla 612-2 Pérdida de masa de especímenes duplicados en el ensayo de humedecimiento y secado) los cuales indican un (3-5-7-10)% de cemento, este ensayo se realizó con 3 diferentes porcentajes de agua como mínimo de puntos que pide la norma logrando de cada uno de ellos una curva de compactación.

Tabla 1: Contenido de Cemento (%), según la clasificación del Suelo

CLASIFICACIÓN AASHTO	CONTENIDO DE CEMENTO, %
A-1-b (0)	2 3 5
A-4 (5)	3 5 7 10
A-6 (10)	3 5 7 10

Fuente: Normas INVIAS 2012 Tabla 612-2

la obtención de la humedad óptima y la densidad máxima nos permitió definir las condiciones de mezclado y curado en obra, garantizando durabilidad y estabilidad en la estructura final en este caso el adoquín.

13.2. Parámetro de fabricación y estandarización de la energía de compactación del suelo–cemento.

La determinación del número de golpes durante la compactación del suelo–cemento son para preparar la muestra constituye un paso esencial para garantizar la uniformidad y calidad de las probetas elaboradas. A través de este parámetro se controla la energía aplicada a cada capa de material, asegurando que la densidad obtenida refleje las condiciones reales. Un número adecuado de golpes permite alcanzar una compactación eficiente, reduciendo vacíos y mejorando la cohesión entre las partículas del suelo y el cemento. En el desarrollo experimental, este valor se calculó con base en la energía estándar establecida por la normativa, relacionando el peso del pisón, la altura de caída y el volumen del molde, obteniendo el número de golpes adecuado para el molde correspondiente como lo indica la siguiente formula del ensayo.

$$Y = \frac{n \cdot N \cdot P \cdot H}{V}$$

Y – energía a aplicar en la muestra de suelo;

n – número de capas a ser compactadas en el cilindro de moldeado;

N – número de golpes aplicados por capa;

P – peso del pisón;

H – altura de caída del pisón; y

V – volumen del cilindro.

13.3. Análisis de métodos para optimizar el desempeño al ensayo resistencia a la compresión de cilindros fundidos de suelo-cemento.

La tenacidad del material natural se evaluó aplicando tres procesos distintos orientados a mejorar su comportamiento frente a la falla. Dichos procedimientos permitieron analizar cómo cada método influye en el aumento de la capacidad portante del material y, en consecuencia, en su desempeño estructural.

13.3.1 Proctor estándar con 25 golpes y 3 capas.

Este procedimiento se ejecutó aplicando el método de compactación dinámica tradicional sobre la mezcla de suelo-cemento, utilizando el martillo estándar para asegurar una transferencia de energía controlada y uniforme. Para la conformación de cada probeta, se aplicaron 25 golpes por capa en un sistema de tres capas, garantizando una distribución homogénea de la densidad en todo el material. Los especímenes resultantes, con dimensiones de 116.38 mm de diámetro y 101.74 mm de altura, fueron desmoldados con precisión y sometidos al ensayo de compresión uniaxial hasta alcanzar la falla. Esta evaluación de resistencia mecánica fue fundamental para determinar el desempeño estructural inicial del suelo-cemento y sirvió como base comparativa para optimizar el método de moldeo.

13.3.2 Proctor modificado con 18 golpes y 3 capas.

En este método se empleó una variante del Proctor estándar, en la cual se redujo la energía de compactación aplicando únicamente 18 golpes por capa, también distribuidos en tres capas. Se utilizó igualmente el martillo estándar para el proceso de compactación. Las probetas moldeadas presentaron dimensiones de 71 mm de diámetro y 142 mm de altura. Una vez alcanzada la forma

y densidades requeridas, se procedió al desmolde y a la posterior aplicación de carga de compresión hasta su ruptura, con el propósito de analizar el efecto de esta menor energía de compactación en la resistencia final del material.

13.3.3 Compactación estática.

Este procedimiento consistió en la formación de probetas de 71 mm de diámetro y 142 mm de altura mediante la aplicación de presión estática uniforme. A diferencia de los métodos Proctor, no se recurrió a golpes de martillo, sino a la aplicación de una carga directa y constante hasta lograr la densidad deseada. La compactación se realizó en tres capas, asegurando una adecuada conformación de la muestra. Finalmente, las probetas fueron desmoldadas y sometidas al ensayo de compresión, lo que permitió evaluar su comportamiento y resistencia, tomando como referencia lo planteado en la literatura y considerando las características propias del suelo empleado.

La elección del método más adecuado se realizó considerando el comportamiento de las probetas durante los ensayos de compresión. Para cada procedimiento de compactación se registraron tres valores de resistencia a la falla, lo que permitió establecer un rango representativo del desempeño mecánico de cada método. A partir del análisis del comportamiento de los especímenes durante el ensayo de compresión, fue posible identificar cuál de los procesos proporcionó la mayor consistencia estructural y los resultados de carga, de esta manera, la comparación entre los rangos obtenidos no solo facilitó la selección del método óptimo, sino que también brindó una base más confiable para evaluar la calidad y el comportamiento del material bajo condiciones de carga.

13.4. Modelo y proceso de curado de especímenes de suelo-cemento para pruebas de compresión.

El proceso de preparación y curado de las probetas de suelo-cemento se realizó según la norma INV E-613-13. Se elaboraron probetas con dimensiones para los ensayos de compresión

con forma cilíndrica, con una altura igual al doble del diámetro, se usaron probetas de 71 mm (2.8") de diámetro por 142 mm (5.6") de altura, se aplicó una capa delgada de aceite comercial en las paredes interiores del molde, mezclando el suelo tratado y cemento en las proporciones correspondientes, tras conformar las muestras en moldes, se sometieron a un proceso de compactación con la energía de compactación determinada mediante tres capas a 18 golpes cada capa, con el mismo martillo de Proctor estándar de una manera uniforme, en el lugar, realizando tres probetas por porcentaje de cemento (1-3-5-7)% modificando el 10% por 1% ya que la literatura indicaba ensayos de Terrasil con 1% de cemento

Ilustración 6 humedecimiento de molde con acpm



Se sometieron a un curado en condiciones controladas de humedad del 67-69% y temperatura de 17°C, durante 7 días. La calidad del curado fue en la cámara de curado logrando un proceso homogéneo y consistente, antes del ensayo a compresión, no se contó con refrentar los extremos de las probetas ya que estos eran planos dentro de una tolerancia de 0.05 mm (0.002"), siendo perpendiculares al eje del espécimen como lo indica la norma, rotulando cada una de las probetas según sus especificaciones asegurando resultados confiables y repetibles como lo muestra la ilustración 2.

Ilustración 7 Diseño de probetas suelo de cemento (1-3-5-7) % y cámara de curado.



Nota: Elaboración propia.

14. Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento en laboratorio.

14.1. Estandarización y diseño de probetas.

Finalmente, las probetas de suelo-cemento fueron preparadas y curadas de acuerdo con los lineamientos establecidos anteriormente, asegurando condiciones controladas de elaboración y una vez que los especímenes son compactados bajo esta energía controlada y sometidos a su respectivo periodo de curado, se procede a la fase de ensayo de compresión uniaxial, donde se aplica una carga axial progresiva hasta alcanzar la falla estructural, permitiendo así correlacionar la energía de compactación inicial con la resistencia mecánica final del materia

Las probetas empleadas presentaron dimensiones de 71 mm de diámetro y 142 mm de altura, y fueron colocadas en la prensa de compresión para recibir una carga axial creciente y continua hasta producir su fractura. Este procedimiento permitió registrar la máxima carga soportada por cada cilindro antes de la falla, valor que, al relacionarse con el área transversal de la probeta, corresponde a la resistencia a la compresión del material.

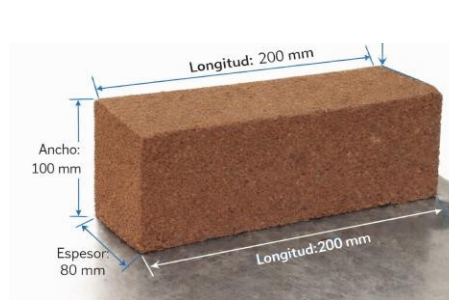
Los resultados obtenidos proporcionaron información fundamental para evaluar el desempeño del suelo-cemento modificado. En particular, permitieron identificar cuál de las variantes analizadas alcanzó la mayor resistencia a la compresión, destacándose sobre las demás en términos de capacidad estructural. Estos resultados, al demostrar un mejor comportamiento frente a las cargas aplicadas, se eligió el mejor porcentaje de cemento para agregarle el Organosilano, con el propósito de mejorar sus propiedades y validar el manejo de un adoquín eficiente a lo propuesto según este aditivo en la mejora del material.

15. Adoquines.

15.1. Dimensiones.

Las dimensiones del adoquín se tomaron siguiendo la normativa, considerando sus medidas principales como lo indica la ilustración 3 (longitud, ancho y espesor) para garantizar su adecuado en zonas de tránsito y el uso y la viabilidad del producto.

Ilustración 8 Diseño de adoquines dimensiones



Nota. Imagen mejorada mediante herramientas de inteligencia artificial para facilitar su Visualización.

16. Diseño del molde y parámetros técnicos

El molde diseñado para la elaboración de adoquines tipo III destinados a tráfico pesado se construyó en acero, como lo muestra la ilustración 4 con el fin de garantizar la rigidez y durabilidad necesarias frente a los esfuerzos de compactación y vibración durante el proceso de moldeo. La configuración del molde responde a las dimensiones establecidas en la normativa para este tipo de adoquines es de 200mm*100mm*80mm, permitiendo obtener piezas con geometría uniforme y bordes definidos, características fundamentales.

Entre los parámetros técnicos considerados en el diseño se incluyeron: el espesor de las placas metálicas, que otorgan estabilidad al molde; la disposición interna de los refuerzos con soldadura, que evitan deformaciones durante el llenado; y el sistema de separación entre cavidades, que garantiza la homogeneidad en el tamaño de cada unidad. Además, el molde fue diseñado para facilitar el proceso de desmoldeo con abrazaderas, reduciendo el riesgo de fisuras o daños en los adoquines durante a extracción.

Ilustración 9 Molde de adoquines



Nota. Molde metálico de diseño propio empleado en la fabricación de adoquines.

17.Diseño de adoquines

La dosificación de cemento utilizada como base para el desarrollo experimental se definió a partir de los lineamientos establecidos por la normativa INVÍAS 2012 (Tabla 612-2), la cual recomienda contenidos de 3%, 5%, 7% y 10% para suelos clasificados como A-6. No obstante, para efectos de esta investigación se decidió sustituir el porcentaje del 10% por una dosificación del 1%, considerando que niveles tan elevados de cementante no resultan técnica ni económicamente viables para la producción sostenible de elementos de pavimentación. Tras el análisis del comportamiento mecánico de las diferentes mezclas, la dosificación del 3% de cemento fue seleccionada como base para el desarrollo experimental, al presentar un comportamiento mecánico estable y representativo (0.50 MPa) frente a las demás proporciones analizadas, lo que permitió establecer un equilibrio adecuado entre desempeño estructural, viabilidad económica y sostenibilidad ambiental. A partir de esta condición se procedió a la funcionalización del material mediante la incorporación de organosilano (Terrasil) en porcentajes de 0.02%, 0.06%, 0.1% y 0.15%, tomando como referencia el estudio de Jerez, Gómez y Murillo (2018) sobre la estabilización de suelos colombianos con compuestos hidrofóbicos. Durante esta etapa se mantuvieron constantes las variables relacionadas con la preparación, moldeo, compactación y curado de las probetas, con el fin de garantizar la validez comparativa de los especímenes evaluados.

18.Evaluación de apariencia y dimensiones en adoquines de tierra prensada

La evaluación de la apariencia y el análisis dimensional de los adoquines de tierra prensada se realizó mediante una inspección visual y geométrica exhaustiva de una muestra representativa de cinco unidades integrales. Inicialmente, se verificó el acabado superficial y la textura de las piezas, corroborando su uniformidad y la inexistencia de defectos estructurales o estéticos visibles, tales como fisuras, porosidad excesiva o desprendimientos en las aristas. Posteriormente, se procedió al registro sistemático de las magnitudes geométricas, longitud, ancho y espesor, empleando un calibrador de precisión de 0.1 mm, complementado con una cinta métrica para la validación de las dimensiones nominales de 200 mm x 100 mm x 80 mm, de acuerdo con lo documentado en la Ilustración 5. Este procedimiento tuvo como propósito contrastar las métricas obtenidas con las tolerancias y rangos estipulados por la normativa técnica (ICONTEC/INVÍAS), garantizando así que los adoquines cumplan con los requisitos de calidad, homogeneidad e idoneidad estructural esperados para su implementación.

Ilustración 10 Evaluación de apariencia y dimensiones



Nota: Elaboración propia.

16. Proceso de curado de los adoquines de suelo-cemento

Durante la etapa de curado, se aplicaron dos protocolos para evaluar la influencia de las condiciones de humedad y temperatura en la hidratación del cemento y el desarrollo de las propiedades mecánicas de los adoquines de suelo-cemento funcionalizados con Organosilano. En el primer protocolo, los especímenes se curaron durante 7 días en una cámara controlada con humedad relativa de 67–69 % y temperatura de 17 °C, asegurando una hidratación uniforme y el fortalecimiento progresivo de la estructura del material. En el segundo protocolo, se realizó un curado inicial de 3 días en cámara controlada, seguido de un secado natural controlado, en un espacio ventilado y protegido de la radiación solar, con el fin de eliminar la humedad superficial sin afectar la estabilización interna del material.

17. Determinación a la resistencia a la compresión de los adoquines fundidos de suelo-cementos estabilizados con Terrasil.

Con todos los adoquines evaluados se sometieron a la máquina de compresión siendo un equipo diseñado para aplicar cargas de manera controlada sobre materiales de construcción, en este caso los adoquines, con el fin de determinar su resistencia consistiendo en ejercer una fuerza que va aumentando poco a poco hasta que el material no puede soportarla y finalmente se falle, permitiéndonos saber con exactitud cuánta carga máxima aguanta el adoquín antes de fallar manejando una velocidad de 0.05 MPa/s en compresión uniaxial, simulando el esfuerzo que soporta el adoquín cuando está colocado en una vía y recibe el peso del tránsito, evaluando de manera confiable si los adoquines fabricados cumplen con los estándares de resistencia exigidos.

18. Fluorescencia de rayos X dispersivos de longitud de onda a adoquines

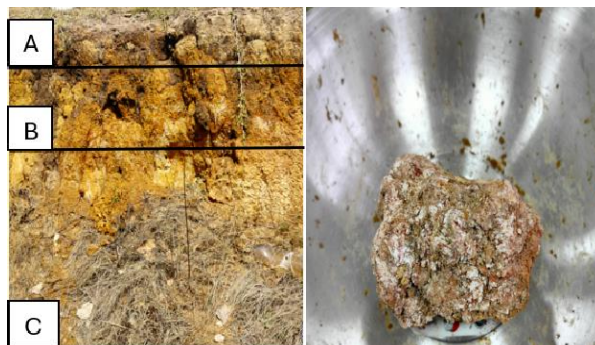
Se les realizo a todos los adoquines propuestos el ensayo de identificar y medir los elementos químicos que forman parte de cada uno de los adoquines al exponer la muestra a rayos X, en una de las caras siendo una superficie plana, los átomos emiten una señal característica que permite reconocer de qué elementos se trata y en qué cantidad están presentes usando las intensidades medidas en la muestra junto con las curvas analíticas previamente establecidas.

19. Resultados y análisis

19.1. Caracterización del material

19.1.1 Material tipo Tilatá

Ilustración 11 Estratificación del suelo en horizontes A, B y C y material en laboratorio.



Nota: Elaboración propia.

En la ilustración 6 se puede identificar claramente un perfil de suelo con desarrollo típico. En la parte superior se encuentra el horizonte A, de color marrón oscuro tirando a negro, compuesto por suelo orgánico con algo de vegetación seca; es una capa delgada, de unos 10 a 15 cm, donde se acumula materia vegetal en descomposición. Más abajo aparece un horizonte B muy marcado con un espesor de 25 cm, con colores que van desde el ocre hasta el naranja y el amarillo fuerte. Por último, en la parte inferior se observa una zona más clara de 60 cm, de tonos amarillo pálido a blanquecino, que correspondería al horizonte C; esta capa tiene menos alteración y representa el material de origen a partir del cual se ha desarrollado el suelo, identificando en el platón de laboratorio una muestra alterada que conserva los colores descritos.

19.2. Muestra

19.3. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico, realizado mediante un ensayo de sedimentación y tamizado (ASTM C136), reveló que las partículas finas (menores a 0.075 mm, tamiz #200) constituyen el 95.7% de la muestra total (pérdida de 95.7 g en lavado sobre 100 g iniciales), mientras que las partículas granulares (mayores a 0.075 mm) representan solo el 4.3% (4.3 g retenidos en tamiz #200).

Fracción	Peso Retenido (g)	Porcentaje (%)
Granulares	4.3	4.3
Finas (limos/arcillas)	95.7	95.7
Total	100	100

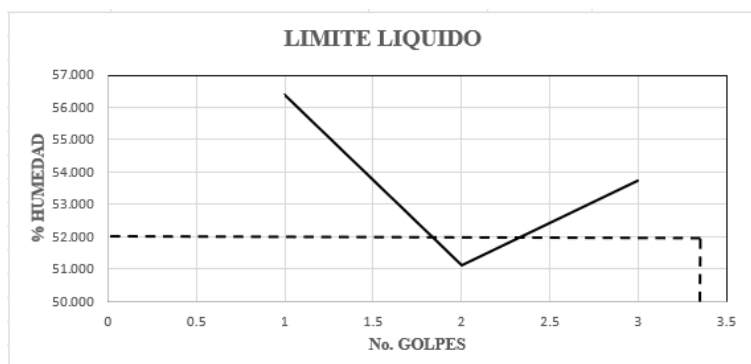
El ensayo de granulometría confirmó una distribución adecuada de partículas para la compactación, composición fina confirma alta plasticidad, baja permeabilidad.

19.4. Determinación de limite liquido de los suelos método (A).

Tabla 2: Determinación de limite liquido de los suelos método.

Limite liquido valores asociados			
Rangos permitidos según norma	15-25	20-30	25-35
No. Golpes	16	22	28
# capsula (#)	1	2	3
Masa de la capsula (g)	14.247	13.336	14.74
Masa capsula + suelo húmedo (g)	40.152	40.044	39.32
Masa suelo húmedo (g)	25.905	26.708	24.58
Masa capsula+ suelo seco (g)	30.813	31.011	30.73
Masa suelo seco (g)	16.566	17.675	15.990
Masa del agua (g)	9.339	9.033	8.590
Humedad (%)	56.375	51.106	53.721

El ensayo de límite líquido se realizó para determinar la capacidad de agua en el cual el suelo pasa del estado elástico al líquido. Se efectuaron tres determinaciones con 16, 22 y 28 golpes, obteniendo humedades de 56.38 %, 51.11 % y 53.72 %, respectivamente.



Grafica 1: Limite líquido.

Los resultados graficados muestran una tendencia descendente con ligera variación, estimando un límite líquido promedio de aproximadamente 53 %. Este valor indica una plasticidad media del suelo, característica de materiales con contenido moderado de finos.

Desde una perspectiva geotécnica, este alto contenido de finos explica la **limitada capacidad drenante** del suelo y su susceptibilidad a cambios volumétricos ante variaciones de humedad. Estos resultados son coherentes con la clasificación **A-6** (suelo arcilloso) y el índice de plasticidad de **24.63%** obtenidos en fases posteriores, lo que evidencia un material con alta cohesión, pero con una resistencia estructural inestable en su estado natural

19.5. Limite plástico de plasticidad de los suelos.

Tabla 3: Limite plástico de plasticidad de los suelos.

Limite plástico		
# Ensayos	Ensayo 1	Ensayo 2
# Capsula	N1	186
Masa de la capsula (g)	14.519	11.692
Masa capsula + suelo húmedo (g)	28.578	24.88
Masa suelo húmedo (g)	14.059	13.188
Masa capsula + suelo seco (g)	25.467	22.083
Masa suelo seco (g)	10.948	10.391
Masa del agua (g)	3.111	2.797
Humedad (%)	28.416	26.918

El ensayo de límite plástico permitió establecer el contenido de humedad en el que la superficie pasa del estado semisólido al plástico. Se realizaron dos mediciones que arrojaron valores de 28.42 % y 26.92 %, con un promedio de 27.67 %

Tabla 4: Limites y índice de plasticidad.

Limite liquido	52.30
Índice plástico	24.633
Limite plástico	27.667

A partir de este resultado y del límite líquido determinado, se calculó un índice de plasticidad de 24.63 %. Estos valores indican que el suelo posee una plasticidad media-alta, lo cual evidencia

una cantidad considerable de partículas finas. Este comportamiento le otorga al material una buena cohesión y capacidad de moldearse sin agrietarse, aspectos que influyen positivamente en su estabilidad y trabajabilidad en aplicaciones de ingeniería geotécnica.

19.6. Determinación de las relaciones de humedad-peso unitario seco en los suelos (Ensayo normal de compactación).

En la ilustración 7 se identifica el proceso del diseño de probeta de Proctor estándar donde el suelo se compacta dentro del molde en capas sucesivas aplicando una energía controlada. Finalizada la compactación, se retira el anillo de extensión, eliminando el material excedente. Posteriormente, se realiza el enrasado del material, asegurando que el volumen del molde sea constante y permitiendo la correcta determinación de la densidad del suelo compactado.

Ilustración 12 : Diseño Proctor estándar del suelo de la formación Tiltatá.



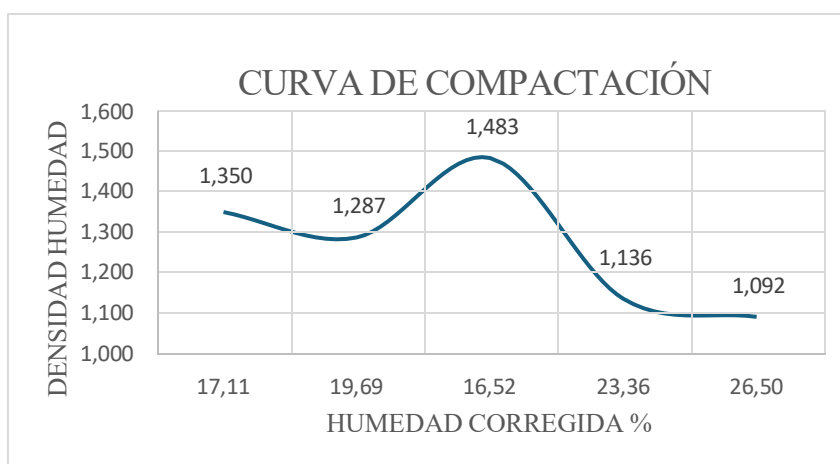
Nota: Elaboración propia.

En el ensayo Proctor Normal (INV E-612) utilizando un molde de 946.17 cm³ y un peso de 1 MPa (972.6 g). Se evaluaron cinco muestras con humedades entre (8,10,12,14,16 %), registrando los pesos húmedos y secos para calcular la densidad. Los resultados indican que la mayor densidad seca (≈ 1.48 g/cm³) se obtuvo con una humedad cercana al 12 %, lo que representa la condición óptima de compactación del suelo.

Tabla 5: Relaciones humedad-peso unitario en los suelos.

Proctor Normal INV E-612										
I	Peso inicial (g)	Volumen del molde cm^3	Peso del molde (g)	Peso Muestra húmeda + molde (g)	Peso Muestra Húmeda [m] (g)	Densidad Muestra Húmeda (y) $\text{m/V (g/cm}^3\text{)}$	Peso Muestra Húm (g)	Peso Muestra Seca (g)	Humedad Corregida(w) (%)	Densidad seca
4	1,800	946.169	1,972.6	3,468.3	1,496	1.58080	479.1	409.10	17.11	1.3498
5				3,430.2	1,458	1.54053	350.7	293.00	19.69	1.2871
6				3,607.1	1,635	1.72749	576.4	494.70	16.52	1.4826
7				3,298.5	1,326	1.40134	418.8	339.5	23.36	1.1360
8				3,279.1	1,307	1.38083	434.9	343.8	26.50	1.0916

La curva de compactación elaborada a partir de las pruebas nos determinó que la humedad óptima para la compactación del suelo es de un 16.52% a esta se es corregida restándole la humedad del suelo que se determinó y correspondió a un 8% y obteniendo un 8,52% de porcentaje optimo de humedad, la cual se utilizó para determinar cuanta agua se necesita como referencia para los siguientes ensayos de determinación de humedad de suelo cemento para compactarse adecuadamente.



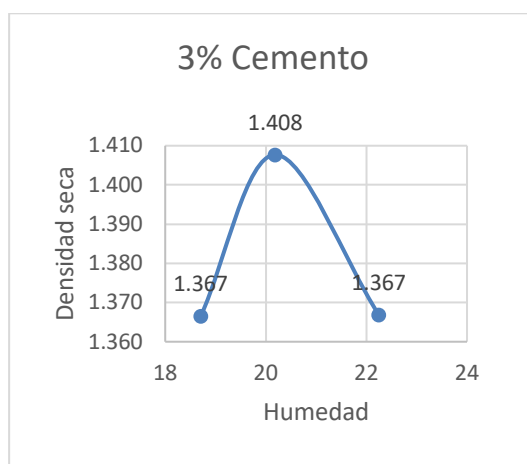
Grafica 2: Relaciones humedad-peso unitario en los suelos.

La curva de compactación elaborada a partir de las pruebas nos determinó que la humedad óptima para la compactación del suelo es de un 16.52% a esta se es corregida restándole la humedad del suelo que se determinó y correspondió a un 8% y obteniendo un 8,52% de porcentaje optimo de humedad, la cual se utilizó para determinar cuanta agua se necesita como referencia para los siguientes ensayos de determinación de humedad de suelo cemento para compactarse adecuadamente.

20. SUELO CEMENTO

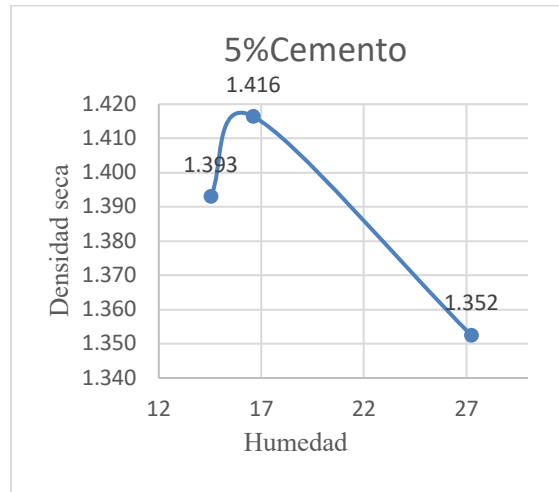
20.1. Determinación de la relación humedad-peso unitario seco en suelos (Ensayo normal de compactación).

Se realizo el ensayo normal de compactación, también conocido como ensayo Proctor estándar, tiene como objetivo determinar la relación entre el contenido de agua y la densidad seca del suelo. A través de este procedimiento se identifica el contenido de agua óptima y la densidad máxima seca de los contenidos de suelo cemento de un (3,5,7,10) % de cemento.



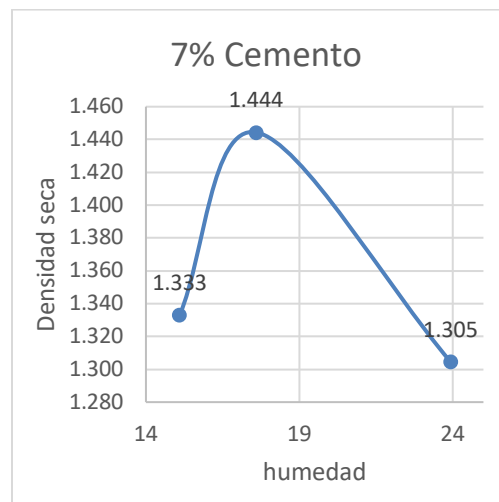
Grafica 3: Relaciones humedad-peso unitario-3%C.

Con un 3% de cemento se manejó un contenido de agua del (10,11,12) % en el 12% su humedad corregida fue de un 20.18% con una densidad seca de un 1.40.



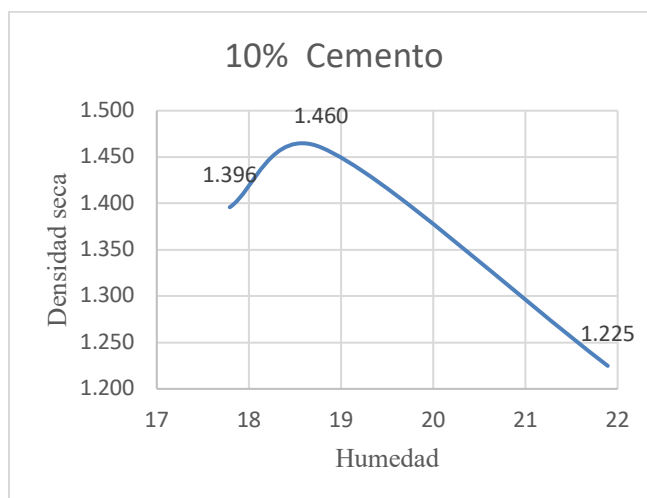
Grafica 4: Relaciones humedad-peso unitario -5%.

Con un 5% de cemento se manejó un contenido de agua del (8,10,14) % en el 10% su humedad corregida fue de un 16.60% con una densidad seca de un 1.41.



Grafica 5: Relaciones humedad-peso unitario-7%.

Con un 7% de cemento se manejó un contenido de agua del (8,10,12) % en el 10% su humedad corregida fue de un 17.58% con una densidad seca de un 1.44.



Grafica 6: Relaciones humedad-peso unitario-10%.

Con un 10% de cemento se manejó un contenido de agua del (10,12,14) % en el 12% su humedad corregida fue de un 18.78% con una densidad seca de un 1.46.

Con base en los parámetros obtenidos del suelo natural de la Formación Tilatá, los resultados del ensayo Proctor estándar para las mezclas suelo–cemento evidencian que la incorporación de cemento genera modificaciones en el comportamiento de compactación del material. El suelo natural presentó una densidad seca máxima de 1.48 g/cm³ con una humedad óptima de 16.52 %, valores que sirvieron como referencia para evaluar las mezclas estabilizadas. Al adicionar cemento, se observó una ligera disminución inicial de la densidad seca, seguida de una tendencia progresiva de incremento conforme aumenta el contenido de cementante, lo cual indica una mejora gradual en la densificación del material. Asimismo, se identificó un aumento en la humedad óptima, asociado a la necesidad de agua tanto para facilitar la compactación de las partículas como para permitir las reacciones de hidratación del cemento que contribuyen al desarrollo de la resistencia.

A partir de este análisis comparativo, se determinó que la dosificación de 3 % de cemento representa un punto de equilibrio adecuado, ya que proporciona un comportamiento mecánico estable y suficiente para aplicaciones peatonales, evitando el uso de contenidos elevados de cementante que incrementarían los costos y el impacto ambiental. De esta manera, el suelo estabilizado adquiere una estructura más densa y cohesionada, lo que permitió establecer una base adecuada para la posterior incorporación del aditivo hidrofóbico Terrasil, orientado a mejorar la

impermeabilidad y durabilidad de los adoquines de suelo-cemento.

21. Determinación del número de golpes para la compactación del suelo-cemento

$$N = \frac{Y * V}{n * P * H}$$

Tabla 6: Determinación del número de golpes para la compactación del suelo-cemento.

y	600	KN-m/m^3
n	3	
N	17.736	18
P	0.0245	KN
H	0.305	M
V	0.00066	m3

Análisis de métodos para optimizar el desempeño al ensayo resistencia a la compresión de cilindros fundidos de suelo-cemento.

Se analizaron diferentes métodos aplicados pruebas de resistencia a la compresión de cilindros fundidos de suelo-cemento, donde se buscó optimizar su desempeño y obtener resultados más uniformes, a través de la evaluación de variables como la compactación y la humedad se buscó mejorar las propiedades mecánicas del suelo-cemento, y determinar cuál de ellos permite alcanzar una mayor resistencia a la compresión y un comportamiento más homogéneo del material

21.1. Proctor estándar con 25 golpes y 3 capas

Tabla 7: Proctor estándar con 25 golpes y 3 capas.

PROBETA PROCTOR ESTÁNDAR 25 GOLPES 3 CAPAS			
Humedad optima (%)	16.5	Material usado considerado por pérdidas	
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.72		
Volumen molde (cm ³)	946.132		
Masa h molde (cm ³)	1627.3	1800	
Masa del suelo (g)	1396.9	1545.06	
Masa del agua (g)	230.5	254.9	

Las dimensiones de las probetas a trabajar fueron establecidas mediante la norma y molde de laboratorio sin cambiar las propiedades del material con un alto de Altura 11.64 cm y un Diámetro 10.17 cm.

Tabla 9: Probetas Proctor estándar con 25 golpes y 3 capas.

# de Ensayos	(KN)	(N)
1	2.602	2602
2	2.575	2575
3	2.6	2600
Área (mm ²)		8129.68

La resistencia a la compresión (σ_n) de un material, que se obtiene dividiendo la fuerza aplicada (F) entre el área de la sección transversal (A).

Tabla 10: Resistencia de Proctor estándar con 25 golpes y 3 capas.

Resistencia a la compresión		
MPa = N/mm ²	1	0.32
	2	0.317
	3	0.32

Mediante las resistencias obtenidas podemos determinar que correspondió a un 0.320 MPa.

1. Proctor modificado con 18 golpes y 3 capas

Tabla 11: Proctor modificado con 18 golpes y 3 capas.

PROBETA DE COMPRESION 18 GOLPES 3 CAPAS		
Humedad optima (%)	16.5	Material usado considerado por pérdidas
Densidad húmeda(g/cm ³)	1.72	
Volumen molde(cm ³)	662.6797	
Masa h molde (cm ³)	1139.81	1220
Masa del suelo (g)	978.38	1047.2103
Masa del agua (g)	161.43	172.79

Las dimensiones de las probetas a trabajar fueron establecidas mediante la norma y molde de laboratorio sin cambiar las propiedades del material con un alto de Altura 15 cm y un Diámetro 7.5cm.

Tabla 12: Probetas Proctor modificado con 18 golpes y 3 capas resistencia a la compresión.

# de Ensayos	(KN)	(N)
1	1.32	1320
2	1.345	1345
3	1.316	1316
Área (mm ²).		4417.8647

La resistencia a la compresión (σ_n) de un material, que se obtiene dividiendo la fuerza aplicada (F) entre el área de la sección transversal (A).

Tabla 13: Resistencia de probetas Proctor modificado con 18 golpes y 3 capas.

# de ensayos			Resistencia corregida (por h/d)
MPa =N/mm ²	1	0.299	0.329
	2	0.304	0.335
	3	0.298	0.328

Se realizo una corrección por el diámetro del molde determinando la energía de compactación y está obteniendo un 0.335 MPa.

21.2. Compactación estática

Tabla 14: Compactación estática.

PROBETA DE COMPRESION CON COMPACTACION ESTATICA		
Humedad optima (%)	16.5	Material usado considerado por pérdidas
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.72	
Volumen molde cm ³	662.6797	
Masa h molde (cm ³)	1139.81	1220
Masa del suelo(g)	978.38	1047.2103
Masa del agua (g)	161.43	172.79

Las dimensiones de las probetas a trabajar fueron establecidas mediante la norma y molde de laboratorio sin cambiar las propiedades del material con un alto de Altura 15 cm y un Diámetro 7.5cm.

Tabla 15: Probetas compactación estática.

# de Ensayos	KN	N
1	0.394	394
2	0.285	285
3	0.305	305
Área(mm ²)		4417.8647

La resistencia a la compresión (σ_n) de un material, que se obtiene dividiendo la fuerza aplicada (F) entre el área de la sección transversal (A)

Tabla 16: Resistencia de probetas compactación estática.

Resistencia a la compresión		
MPa =N/mm ²	1	0.089
	2	0.065
	3	0.069

Mediante las resistencias obtenidas podemos determinar que correspondió a un 0.089 MPa, Evaluando cada una de las siguientes resistencias el Proctor modificado con 18 golpes y 3 capas fue el mejor método con una resistencia promedio de 0.33MPa en las 3 probetas realizadas escogiéndolo como la forma más adecuada para el siguiente ensayo.

21.3. Determinación para la preparación y curado de probetas de suelo-cemento para ensayos de compresión.

A partir de los parámetros de humedad óptima obtenidos en las fases de caracterización, se procedió a la estandarización de las probetas destinadas a los ensayos de resistencia mecánica. Un factor determinante en este proceso fue la **corrección de la densidad aparente**, la cual se incrementó de los 1.48 g/cm³ hallados en el suelo natural a un valor objetivo de **1.8 g/cm³**. Este ajuste técnico se justifica plenamente al permitir una reducción significativa de la porosidad del material y un aumento en su masa seca, garantizando especímenes con un material estructural más densa y homogénea que mitiga errores derivados de dimensiones inadecuadas.

Para la conformación de estas muestras, se aplicó de manera rigurosa el método de Proctor modificado con 18 golpes distribuidos en tres capas, identificado previamente como el procedimiento de optimización con mejor desempeño estructural (Sección 24.1). El proceso incluyó la incorporación precisa de cemento en proporciones de 1%, 3%, 5% y 7% respecto al peso seco del suelo, manteniendo volúmenes controlados y uniformes en todas las muestras para asegurar la repetibilidad de los resultados. La síntesis de las variables de preparación y los datos de resistencia obtenidos bajo este esquema de compactación se presentan en la Tabla 18, la cual constituye el fundamento técnico para la selección de la mezcla base que será funcionalizada con el Organosilano.

Tabla 18: Elaboración y curado de recipientes de suelo-cemento para pruebas de

Compresión.

A= (mm ²)	(%) cemento	# muestras	(g) de Suelo	Peso del platón más muestra humedad (g)	Peso del platón más muestra seca (g)	N(Newton)	MPa =N/mm ²
4717.30	1	1	1133.05	296.50	264.80	1449	0.41
4741.68		2	1075.28	282.50	252.10	1645	
4680.85		3	1042.92	284.60	254.70	1905	
4753.89	3	1	1044.64	150.30	131.90	1841	0.50
4680.85		2	1030.04	308.40	271.50	2113	
4741.68		3	1098.71	315.60	272.70	2350	
4753.89	5	1	1098.71	303.70	265.50	1668	0.47
4753.89		2	1098.71	297.30	261.00	2091	
4753.89		3	1098.71	307.20	267.70	2258	
4692.98	7	1	1098.71	308.30	272.40	3026	0.65
4729.48		2	1098.71	257.50	225.20	3085	
4729.48		3	1098.71	205.50	183.70	2828	

21.4. Diseño de adoquines

Con base en los parámetros mecánicos registrados en la Tabla 18, se realizó un análisis comparativo de la resistencia a la compresión simple para las cuatro dosificaciones evaluadas (1%, 3%, 5% y 7%), se fabricaron tres muestras por cada porcentaje de cemento, lo que garantizó la repetibilidad y confiabilidad de los datos de compresión bajo una densidad corregida de 1.8 g/cm^3 . Los resultados obtenidos mostraron un comportamiento incremental en la capacidad portante: la mezcla con 1% de cemento alcanzó una resistencia de 0.41 MPa, mientras que las dosificaciones de 3%, 5% y 7% arrojaron valores de 0.50 MPa, 0.47 MPa y 0.65 MPa, respectivamente. Aunque la dosificación del 7% presentó la mayor resistencia absoluta, se seleccionó el 3% de cemento como la base definitiva para la adición del Organosilano se fundamentó en tres criterios esenciales: el desempeño técnico, al demostrar una resistencia mecánica estable de 0.50 MPa que garantiza el equilibrio estructural necesario; la viabilidad económica y ambiental, ya que esta proporción permite una producción sostenible al reducir los costos y las emisiones de CO_2 asociadas al uso excesivo de cementante; y el rigor experimental, debido a que la consistencia y homogeneidad de sus resultados proporcionan la línea base ideal para evaluar con precisión los efectos de mejora en la cohesión e impermeabilidad aportados por el aditivo Terrasil.

21.5. Proceso de curado de los adoquines de suelo-cemento

2. Cámara de curado por un lapso de 7 días.

Se monitorio cada uno de los adoquines curados asegurando las condiciones adecuadas como la temperatura y la humedad controlando que se alcancen las propiedades deseadas, se mantuvo el método como un adoquín tradicional de suelo cemento.

Ilustración 13 Adoquines en cámara de curado por 7 días.



Nota: Elaboración propia.

3. Cámara de curado por un lapso de 3 días y secado natural

De nuevo se monitorio cada uno de los adoquines curados asegurando las condiciones adecuadas como la temperatura y la humedad de los tres días en la cámara de curado y luego controlando que se alcancen las propiedades deseadas correlacionando que el concreto en tres días

y, mediante un secado natural se mantuvo el método como un adobe de suelo método más tradicional y eficiente a la hora de producción como se muestra en la ilustración 9.

Ilustración 14 Adoquines, secado natural.



Nota: Elaboración propia.

21.6. Determinación de la resistencia de compresión en adoquines moldeados de suelo-cemento con Terrasil.

Ilustración 15 Falla a la resistencia.



A partir de esto se estandarizó la dosificación de las variables de Organosilano mediante la misma parametrización del diseño de las probetas, con las diferentes cantidades de Organosilano (0.02-0.06-0.1-0.15) %, compactando, rotulando cada una de las probetas según sus especificaciones asegurando resultados confiables y repetibles, realizando los dos procesos de curado que de las probetas para la respectiva falla esto obteniendo los siguientes resultados teniendo en cuenta que mediante las tablas de dosificación se realizaron dos adoquines por % para

cada uno de los métodos de curado lo cual cada adoquín tenía como dimensiones un largo (20cm) un alto de (10cm) y un ancho de (8cm) como se estableció en el molde y según el tipo de uso dosificando correspondientemente.

4. Resistencia a la compresión de los adoquines moldeados de suelo-cemento con Terrasil con curado en Cámara húmeda por 7 días.

Se parametrizo mediante el área del adoquín y su humedad optima y densidad cada uno de los pesos para su mezcla como lo muestran las siguientes tablas.

Tabla 19: Dosificación 3% cemento,0.02%Terrasil.

Cemento 3% - Terrasil 0.02%				
Humedad optima (%)	16.5	Masa del suelo (g) compuesta teniendo en cuenta el 0.02 % Terrasil	Terrasil	0.49
Densidad húmeda(g/cm3)	1.8			
Volumen molde (cm3)	1600		Suelo	2397.45
Masa h molde (cm3)	2880.00			
Masa del suelo (g)	2472.103		Cemento	74.16
Masa del agua (g)	407.90			

Mediante esta dosificación se realizaron 4 adoquines iguales teniendo en cuenta el peso del Terrasil a un 0.02 % como lo muestra la tabla número 17 de allí tomando dos muestras para cada uno de los procesos de curado.

Tabla 20: Dosificación 3% cemento,0.06% Terrasil.

Cemento 3% - Terrasil 0.06%				
Humedad optima (%)	16.5	Masa del suelo (g) compuesta teniendo en cuenta el 0.02 % Terrasil	Terrasil	1.48
Densidad húmeda(g/cm3)	1.8			
Volumen molde (cm3)	1600		Suelo	2396.46
Masa h molde (cm3)	2880.00			
Masa del suelo (g)	2472.103		Cemento	74.16
Masa del agua (g)	407.90			

Mediante esta dosificación se realizaron 4 adoquines iguales teniendo en cuenta el peso del Terrasil a un 0.06% como lo muestra la tabla número 18 de allí tomando dos muestras para cada uno de los procesos de curado.

Tabla 21: Dosificación 3% cemento,0.1% Terrasil.

Cemento 3% - Terrasil 0.1%				
Humedad optima (%)	16.5	Masa del suelo (g) compuesta teniendo en cuenta el 0.02 % Terrasil	Terrasil	2.47
Densidad húmeda(g/cm3)	1.8			
Volumen molde (cm3)	1600		Suelo	2395.47
Masa h molde (cm3)	2880.00			
Masa del suelo (g)	2472.103		Cemento	74.16
Masa del agua (g)	407.90			

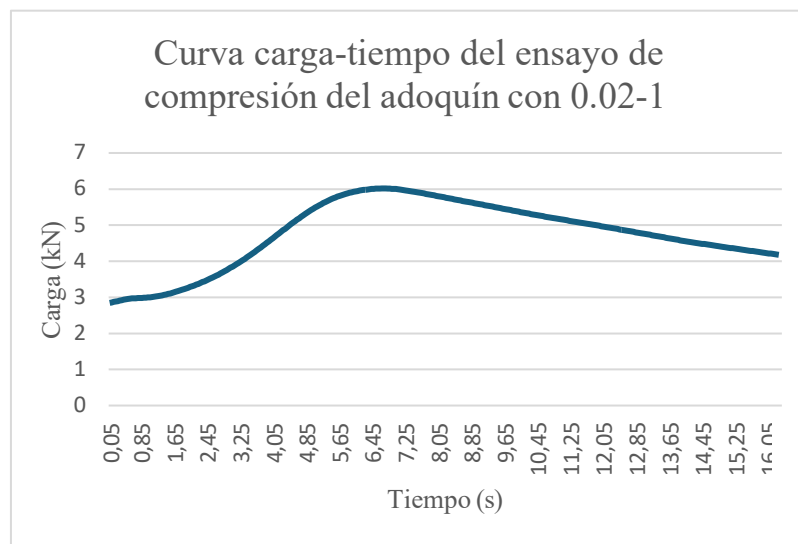
Mediante esta dosificación se realizaron 4 adoquines iguales teniendo en cuenta el peso del Terrasil a un 0.1 % como lo muestra la tabla número 19 de allí tomando dos muestras para cada uno de los procesos de curado.

Tabla 22: Dosificación 3% cemento,0.15% Terrasil.

Cemento 3% - Terrasil 0.15%				
Humedad optima (%)	16.5	Masa del suelo (g) compuesta teniendo en cuenta el 0.02 % Terrasil	Terrasil	3.71
Densidad húmeda(g/cm3)	1.8			
Volumen molde (cm3)	1600		Suelo	2394.23
Masa h molde (cm3)	2880.00			
Masa del suelo (g)	2472.103		Cemento	74.16
Masa del agua (g)	407.90			

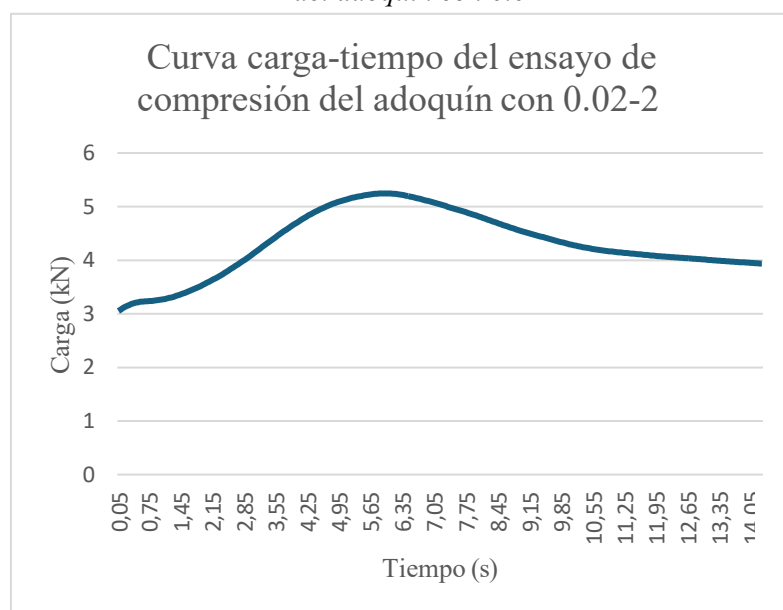
Mediante esta dosificación se realizaron 4 adoquines iguales teniendo en cuenta el peso del Terrasil a un 0.15 % como lo muestra la tabla número 20 de allí tomando dos muestras para cada uno de los procesos de curado.

A partir de estas dosificaciones se realizaron dos adoquines por cada porcentaje de Terrasil determinando cada uno sus resistencias a la compresión con un curado en la Cámara húmeda de 7 días.



Gráfica 7: Curva carga-tiempo del ensayo de compresión

del adoquín con 0.02-1

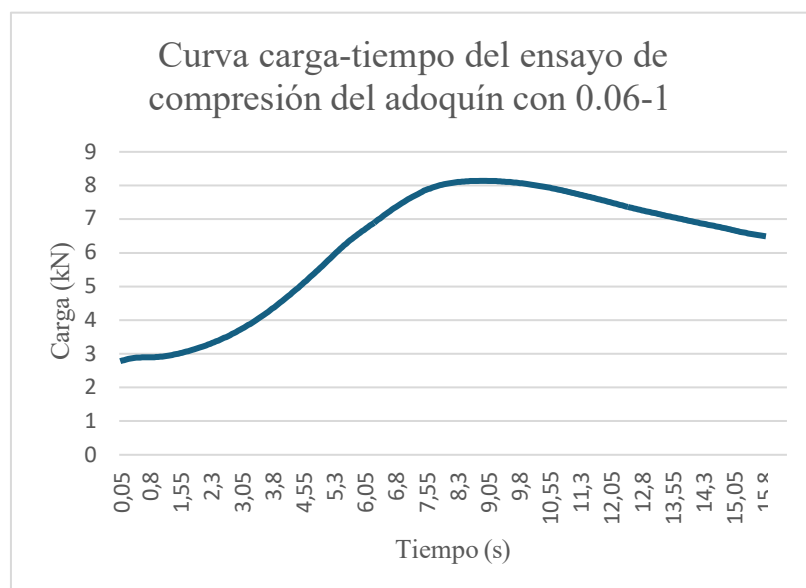


Gráfica 8: Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del adoquín

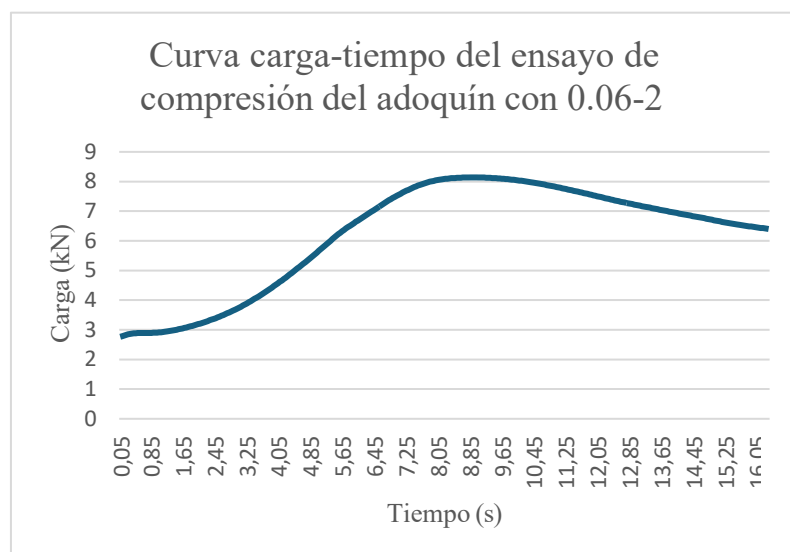
con 0.02-2.

El adoquín 0.02-1 evaluado soportó una carga máxima de 6.017 KN antes de presentar falla. Con base en este valor y el área de apoyo, se determinó una resistencia máxima a la compresión de 0.291 MPa como lo indica la gráfica 7.

El adoquín 0.02-2 evaluado soportó una carga máxima de 5.245 KN antes de presentar falla. Con base en este valor y el área de apoyo, se determinó una resistencia máxima a la compresión de 0.253 MPa como lo indica la gráfica 8.



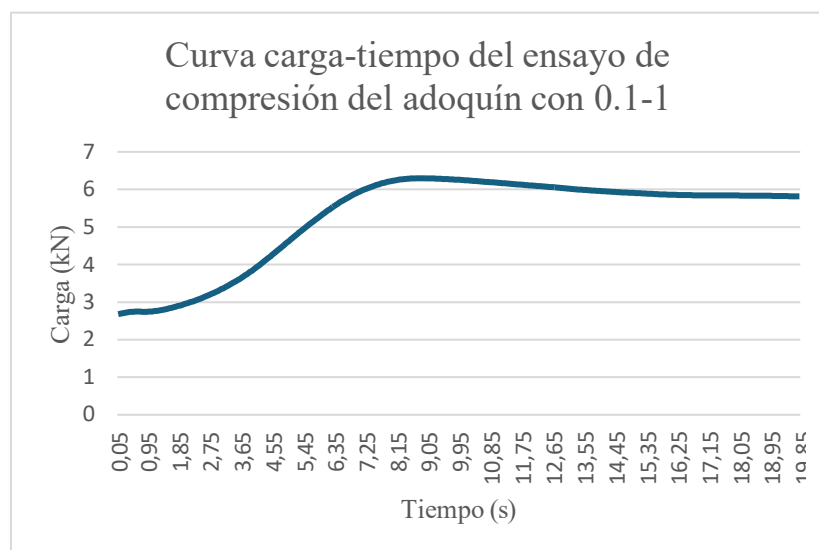
Grafica 9: Curva carga-tiempo del ensayo de compresión de adoquín con 0.06-1.



Grafica 10: Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del adoquín con 0.06-2.

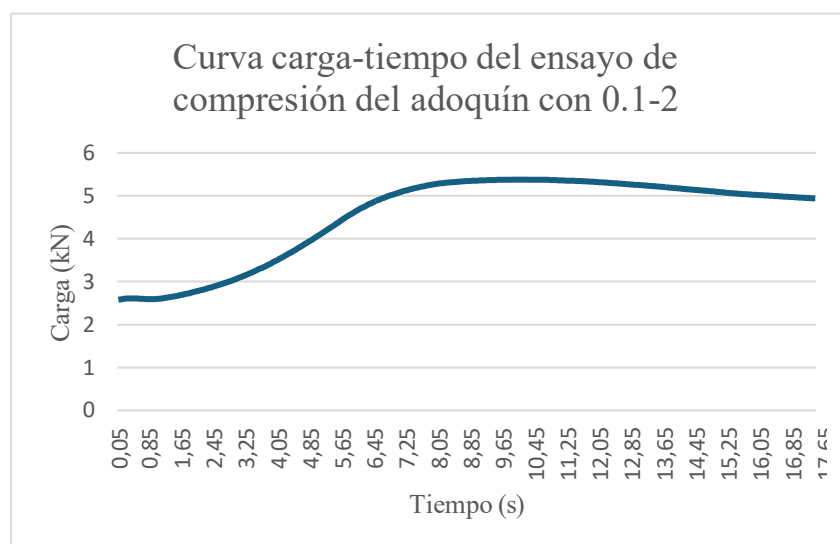
El adoquín 0.06-1 evaluado soportó una carga máxima de 7.620 KN antes de presentar falla. Con base en este valor y el área de apoyo, se determinó una resistencia máxima a la compresión de 0.381 MPa como lo indica la gráfica 9.

El adoquín 0.06-1 evaluado soportó una carga máxima de 8.138 KN antes de presentar falla. Con base en este valor y el área de apoyo, se determinó una resistencia máxima a la compresión de 0.393 MPa como lo indica la gráfica 10.



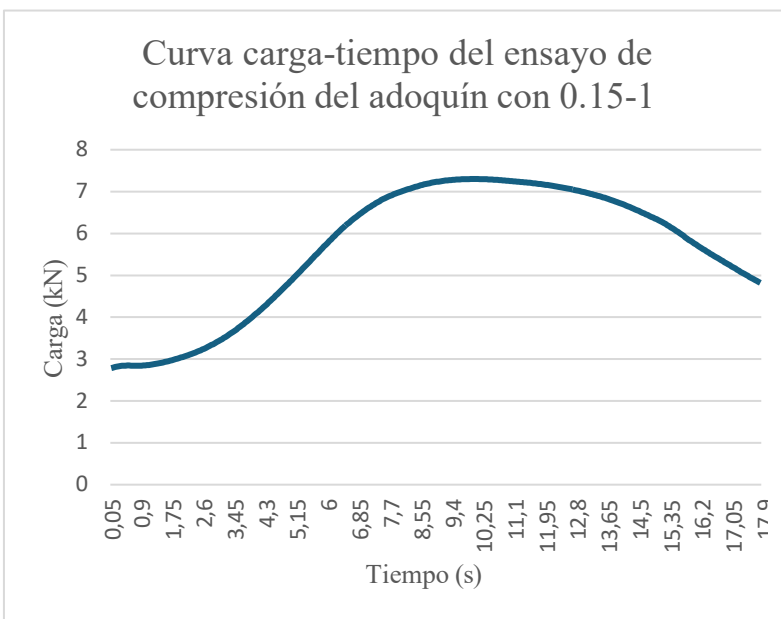
Gráfica 11: Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del adoquín con 0.1-1.

El adoquín 0.1-1 evaluado soportó una carga máxima de 5.376 KN antes de presentar falla. Con base en este valor y el área de apoyo, se determinó una resistencia máxima a la compresión de 0.269 MPa como lo indica la gráfica 11.

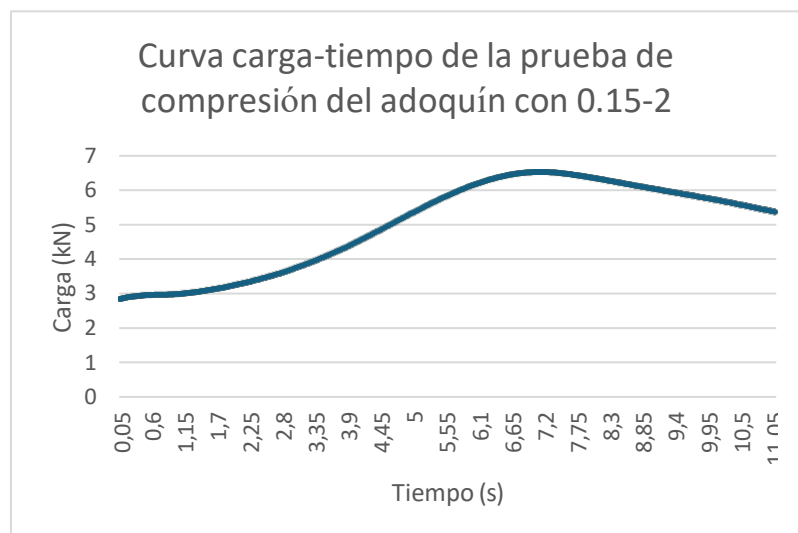


Gráfica 12: Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del adoquín con 0.1-2.

El adoquín 0.1-2 evaluado soportó una carga máxima de 6.269 KN antes de presentar falla. Con base en este valor y el área de apoyo, se determinó una resistencia máxima a la compresión de 0.315 MPa como lo indica la gráfica 12.



Gráfica 13: Curva carga-tiempo de la prueba de compresión del adoquín con 0.15-1.

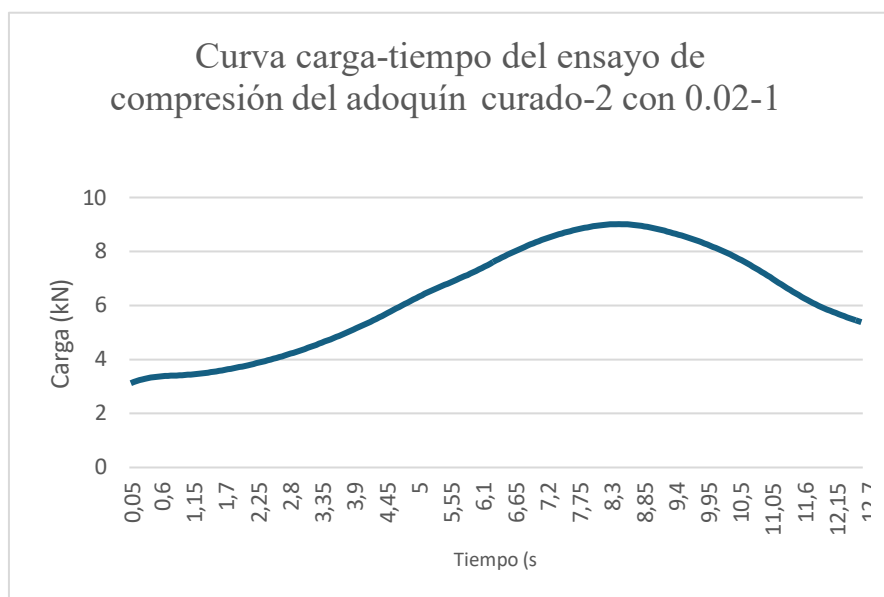


Gráfica 14: Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del adoquín 0.15-2.

El adoquín 0.15-1 evaluado soportó una carga máxima de 7.301 KN antes de presentar falla. Con base en este valor y el área de apoyo, se determinó una resistencia máxima a la compresión de 0.365MPa como lo indica la gráfica 11.

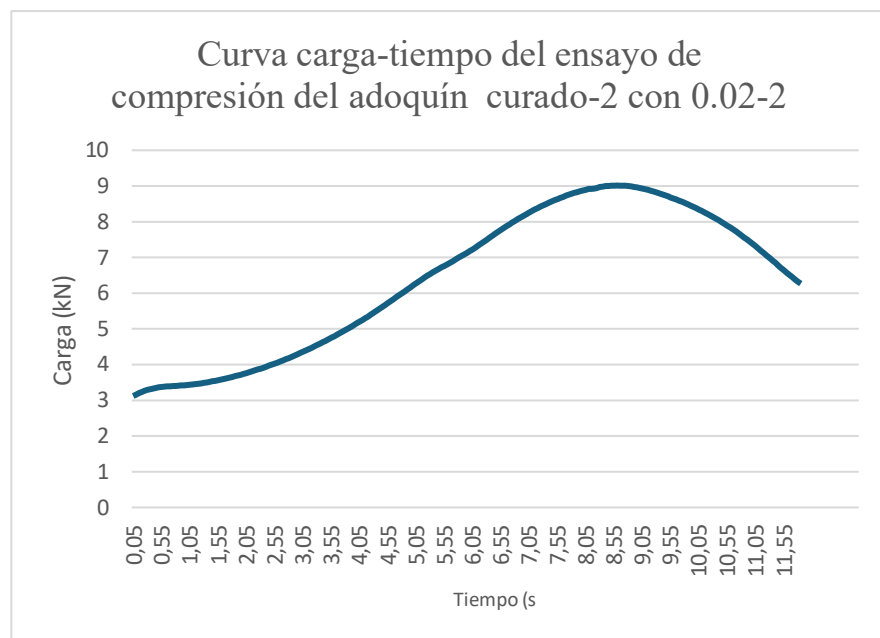
El adoquín 0.15-2 evaluado soportó una carga máxima de 6.504 KN antes de presentar falla. Con base en este valor y el área de apoyo, se estableció la fuerza máxima a la compresión de 0.325MPa como lo indica la gráfica 14.

21.7. Determinación de la resistencia a la compresión de los adoquines fundidos de suelo-cemento con Terrasil con curado en Cámara húmeda por 3 días y secado natural.



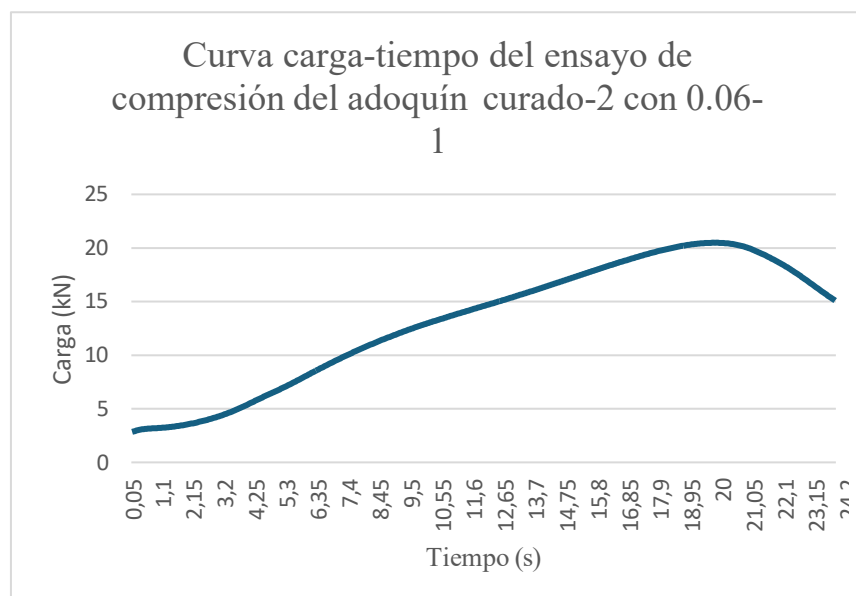
*Gráfica 15: Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del
del adoquín 0.02-1.*

El adoquín 0.02-1 evaluado soportó una carga máxima de 9.013 KN antes de presentar falla. Con base en este valor y el área de apoyo, se determinó una resistencia máxima a la compresión de 0.451MPa como lo indica la gráfica 15.



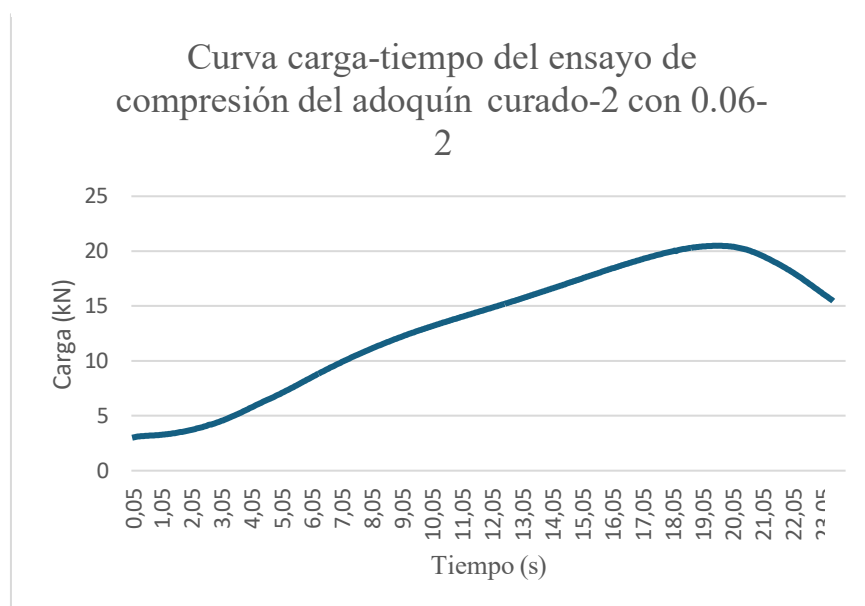
*Gráfica 16: Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del
del adoquín 0.02-2.*

El adoquín 0.02-2 evaluado soportó una carga máxima de 9.013 KN antes de presentar falla. Con base en este valor y el área de apoyo, se determinó una resistencia máxima a la compresión de 0.421MPa como lo indica la gráfica 16.



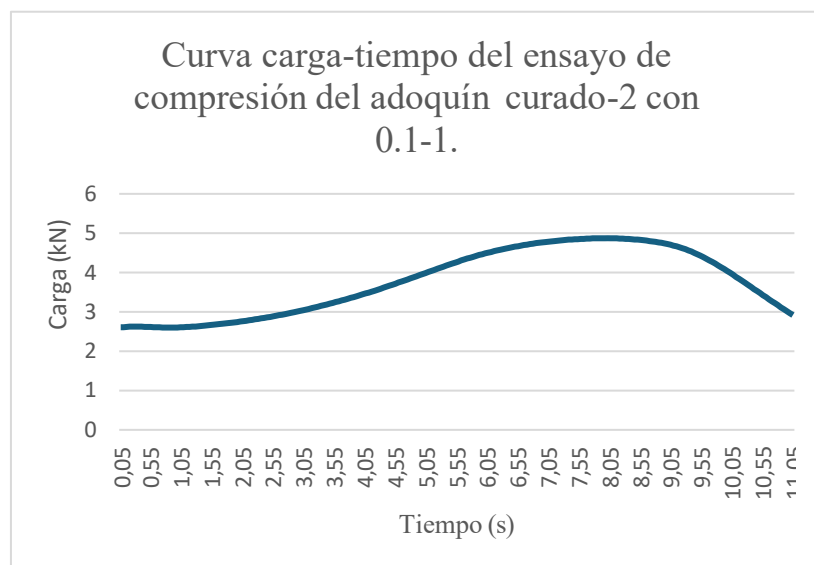
*Gráfica 17: Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del del
adoquín 0.06-1.*

El adoquín 0.06-1 evaluado soportó una carga máxima de 20.488 KN antes de presentar falla. Con base en este valor y el área de apoyo, se determinó una resistencia máxima a la compresión de 1.824 MPa como lo indica la gráfica 17.



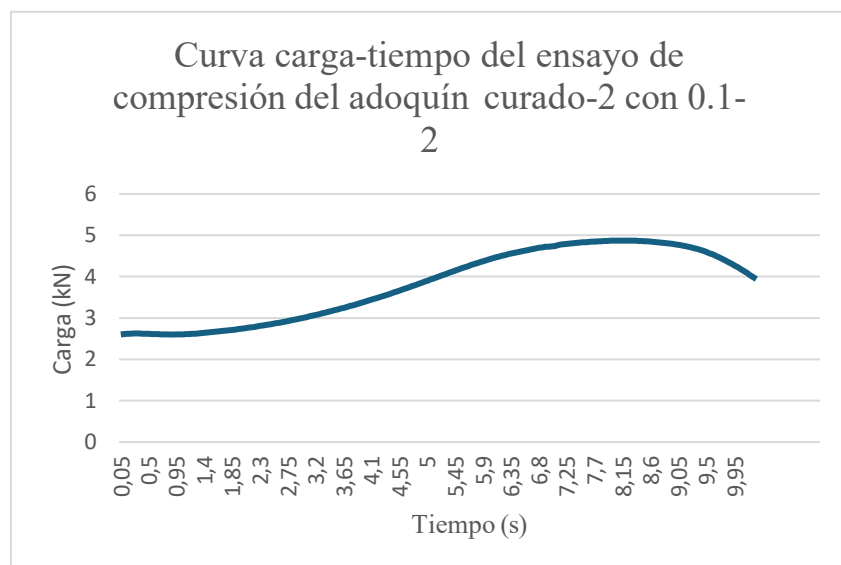
*Gráfica 18: Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del del
adoquín 0.06-2.*

El adoquín 0.06-2 evaluado soportó una carga máxima de 20.760 KN antes de presentar falla. Con base en este valor y el área de apoyo, se determinó una resistencia máxima a la compresión de 1.038 MPa como lo indica la gráfica 18.



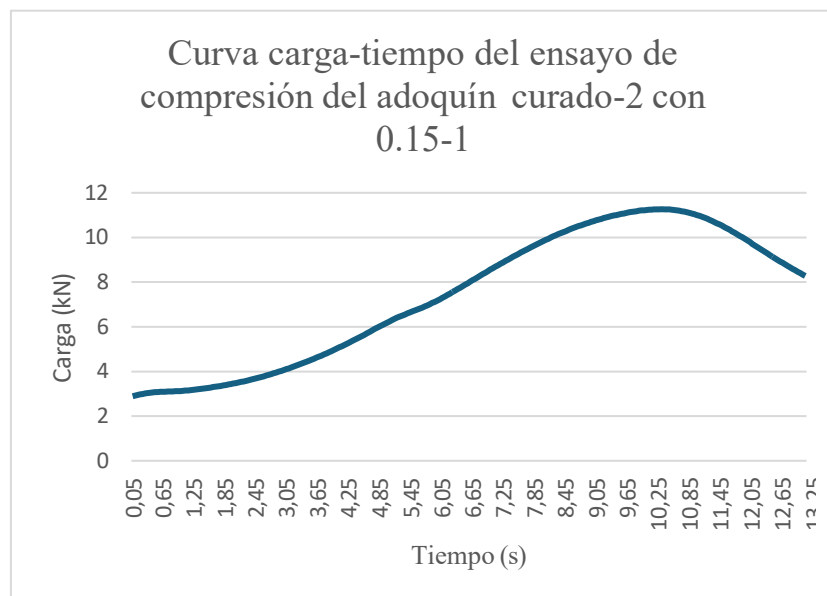
Grafica 19: Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del del adoquín 0.1-1.

El adoquín 0.1-1 evaluado soportó una carga máxima de 4.872 KN antes de presentar falla. Con base en este valor y el área de apoyo, se determinó una resistencia máxima a la compresión de 0.284Mpa como lo indica la gráfica 19.



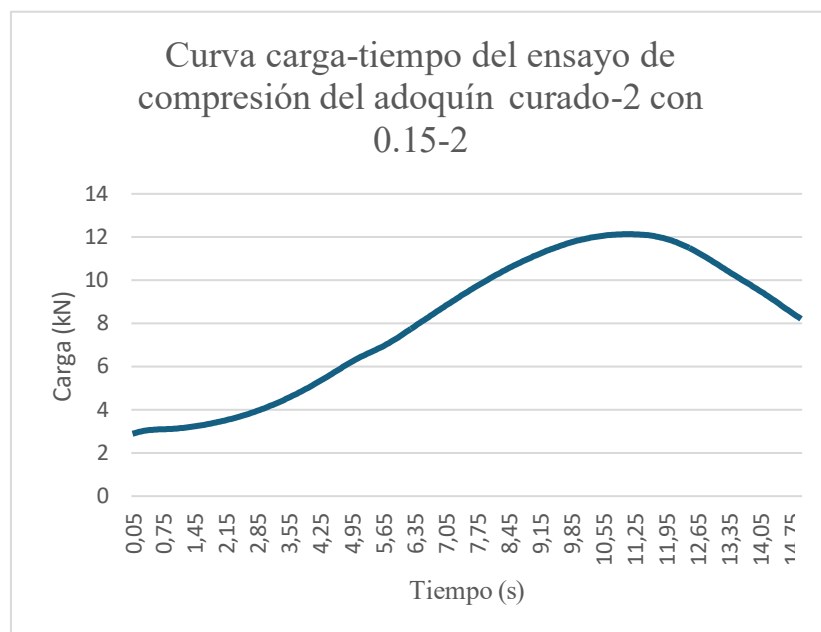
Grafica 20: Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del del adoquín 0.1-1

El adoquín 0.1-2 evaluado soportó una carga máxima de 4.720 KN antes de presentar falla. Con base en este valor y el área de apoyo, se determinó una resistencia máxima a la compresión de 0.326 MPa como lo indica la gráfica 20.



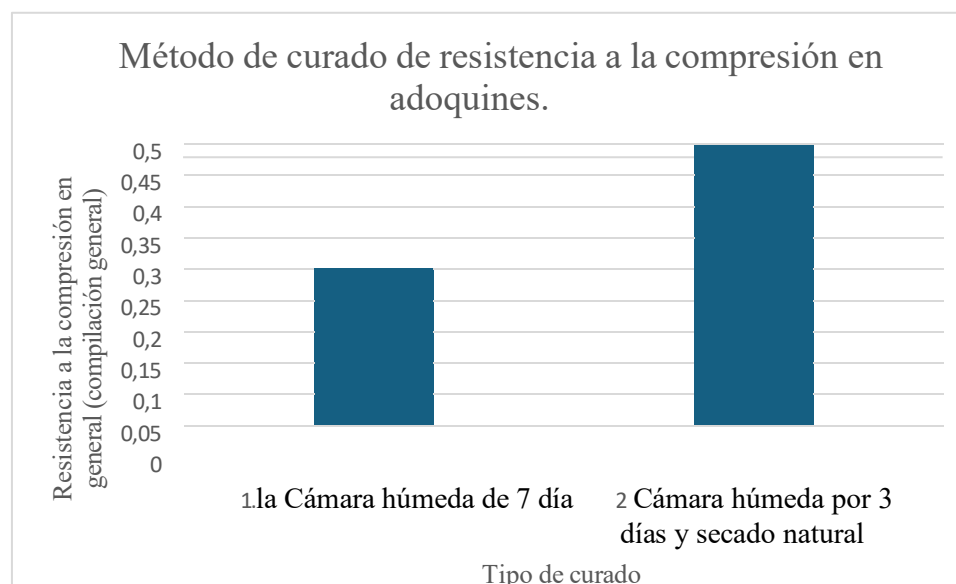
Grafica 21: Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del
del adoquín 0.15-1

El adoquín 0.15-1 evaluado soportó una carga máxima de 11.261 KN antes de presentar falla. Con base en este valor y el área de apoyo, se determinó una resistencia máxima a la compresión de 0.563MPa como lo indica la gráfica 21.



Grafica 22: Curva carga-tiempo del ensayo de compresión del
del adoquín 0.15-2.

El adoquín 0.15-2 evaluado soportó una carga máxima de 12.134 KN antes de presentar falla. Con base en este valor y el área de apoyo, se determinó una resistencia máxima a la compresión de 0.607 MPa como lo indica la gráfica 22.



De acuerdo con los resultados mostrados en la gráfica, el método de curado que combina 3 días en cámara húmeda seguidos de secado natural demostró ser el más efectivo para mejorar la resistencia a la compresión de los adoquines. Este procedimiento permitió un proceso de hidratación más controlado y una consolidación más uniforme del material de suelo-cemento. Los ensayos evidenciaron que este método alcanzó una resistencia máxima como lo indica la barra de recopilación numero 2 superando ampliamente el método de 7 días continuos en cámara húmeda, Por lo tanto, se puede concluir que la combinación de curado húmedo inicial con secado natural no solo mejora el desempeño mecánico del material, sino que también representa una alternativa más eficiente y viable para su aplicación en procesos de producción a mayor escala o industrial.

Se determinó que la dosificación óptima para el suelo arcilloso de la formación Tílatá (A-6) consiste en un 3% de cemento y 0.06% de Terrasil, procesada con una energía de compactación de 18 golpes y una densidad corregida de 1.8 g/cm^3 para minimizar la porosidad y maximizar la cohesión interna. Finalmente, la implementación de un protocolo de curado mixto (3 días en cámara húmeda seguidos de secado natural) permitió alcanzar una resistencia máxima de 1.024 MPa, validando el uso de estos elementos en zonas peatonales y tráfico ligero como una alternativa estructuralmente estable, económica y de bajo impacto ambiental."

22. Fluorescencia de rayos X dispersivos de longitud de onda a adoquines

De acuerdo con los resultados y análisis obtenidos mediante fluorescencia de rayos X (FRX), muestra una composición en los adoquines de suelo-cemento los cuales presentaron una composición predominante de sílice (SiO_2), entre el 66 % y el 69 % permitiendo la reactividad con el cemento, seguida de alúmina (Al_2O_3) con contenidos promedio del 22 % al 24 %, y óxidos de hierro (Fe_2O_3) en torno al 4 %. Estas proporciones confirman que el material base corresponde a un suelo con características arcillosas y alto contenido silíceo, lo que favorece la estabilidad y cohesión del suelo-cemento tras el proceso de curado.

Asimismo, se detectaron pequeñas cantidades de compuestos como CaCO_3 , MgCO_3 , TiO_2 , K_2O y P_2O_5 , los cuales contribuyen a mejorar la reactividad del cemento con el suelo y a fortalecer los enlaces internos del material. El contenido controlado de sulfatos (SO_3), cercano al 0.1 %, indica que no existen concentraciones que puedan afectar negativamente la durabilidad o provocar expansiones indeseadas.

Ilustración 16: Pistola de eflorescencia.



23. Conclusiones

La corrección de la densidad de 1.4 g/cm^3 a 1.8 g/cm^3 permitió obtener probetas más homogéneas, con menor presencia de vacíos y una mejor compactación. Este ajuste fue determinante para lograr resultados más consistentes y reproducibles en los ensayos, evidenciando la importancia del control de compactación y humedad.

Según los análisis y resultados se diseñaron y evaluaron las propiedades físicas mecánicas de adoquines de tierra prensada a partir de unas mezclas de suelo cemento funcionalizados con Terrasil un aditivo tipo Organosilano considerando la mezcla optima de cemento de un 3%, en la mezcla del suelo genera una mejora significativa en las propiedades mecánicas del material, permitiendo alcanzar una mayor cohesión y estabilidad estructural en los adoquines.

La adición del Organosilano Terrasil al 0.06 % actuó sobre esta base química mejorando significativamente la adherencia entre las partículas del suelo y el cemento, reduciendo la porosidad y aumentando la densidad del material gracias a su acción hidrofóbica favoreció la impermeabilidad y estabilidad del suelo-cemento, lo que se reflejó en un incremento constante de la resistencia a la compresión. También se observa en los resultados de los ensayos un buen desempeño mecánico optimo, obteniendo resistencias de 0.393 MPa en curado húmedo y valores mayores de hasta 1.824 MPa bajo condiciones de curado seco y natural.

La baja presencia de sulfatos ($\text{SO}_3 \approx 0.1\%$) identificada en la (FRX) asegura que el material no se expanda inesperadamente garantizando resistencia mecánica a largo plazo.

Propiedad	Parámetros clave	Implicaciones
Mecánicas	0.393 MPa (húmedo); 1.024-1.824 MPa (seco/natural)	Adecuadas para mampostería no estructural, senderos peatonales rurales (bajo impacto), estabilización taludes y pavimentos Inter trabados con bases compactas (NTC 5324); insuficientes para tráfico vehicular (NTC 2017).

Físicas	Densidad 1.8 g/cm ³ (vs. 1.4 inicial)	Mayor homogeneidad, menor vacíos, compactación reproducible.
Químicas (FRX)	↑ CaO; SO ₃ ≈ 0.1%	Integración cemento validada; durabilidad larga sin expansiones.

Esta formulación equilibra resistencia mecánica, sostenibilidad y bajo costo, viable para pavimentación ligera en contextos urbanos/rurales.

El estudio comparativo de métodos de curado evidenció que el curado en seco generó los mejores resultados en términos de resistencia y estabilidad, al permitir una hidratación controlada y una consolidación más uniforme del suelo-cemento. Este proceso se tradujo en adoquines con una resistencia máxima de aproximadamente 1.024 MPa, bajo condiciones de curado seco, se reconoce que el material no cumple los requisitos mínimos de las normas técnicas colombianas (NTC 2017) para ser clasificados como “adoquín que soporte resistencias para tráfico vehicular pero bajo las normas técnicas colombianas (NTC 5324) se puede optar para bloques de suelo cemento para muros y divisiones como mampostería no estructural, senderos peatonales en zonas rurales un uso de bajo impacto o en el uso de estabilización de taludes valor que los hace adecuados para aplicaciones peatonales y zonas de tráfico ligero , siempre que se empleen diseños Inter trabados y bases firmes y bien compactadas.

El estudio químico mediante fluorescencia de rayos X (FRX) confirmó la presencia del componente cementante a través del aumento en el contenido de óxido de calcio (CaO), validando la correcta integración del 3 % de cemento en la matriz del suelo por lo cual se traduce a la resistencia máxima adquirida de 0.393 MPa realizada en las pruebas mecánicas de la mezcla óptima. Esta composición refuerza la capacidad del material para desarrollar enlaces estables durante el proceso de fraguado y curado.

En términos generales, la combinación de un 3 % de cemento y un 0.06 % de Organosilano Terrasil actuó bajo condiciones de curado en seco y con densidad controlada, representa la formulación más eficiente para la elaboración de adoquines de suelo-cemento. Dicha mezcla logra un equilibrio entre resistencia mecánica, sostenibilidad, siendo viable para su aplicación en proyectos de pavimentación y desarrollo urbano.

En el análisis de los resultados se diseñaron y evaluaron en adoquines con la mezcla suelo cemento,

determinado la cantidad de Terrasil guiado de las normas técnicas colombianas (NTC) e instituto nacional de vías INVIAS.

Tabla 21: comparación técnica frente a estándares INCONTEC e instituto nacional de vías (INVIAS)

Propiedad	Valor obtenido	Requisito Normativo (NTC 2017 / INVIAS)	Cumplimiento
Resistencia a la compresión	1.024MPa	>20 MPa (Adoquín tráfico)	No cumple
Densidad seca máxima	1.8 g/cm ³	Según diseño de mezcla.	Cumple
Contenido de cemento	3.0%	3% – 10% (Clasificación A-6)	Cumple

Se determinaron las propiedades físicas y químicas de los adoquines diseñados a partir de las diferentes mezclas, obtenido mejoras en la resistencia a la compresión y flexión.

Los términos generales, la composición química encontrada evidencia una adecuada integración del suelo con el cemento y los aditivos utilizados, garantizando una buena compatibilidad entre las fases minerales. Esto se traduce en una mayor resistencia a la compresión y durabilidad del adoquín frente a condiciones ambientales. Los resultados permiten concluir que el proceso de fabricación y dosificación fue apropiado, generando materiales con una estructura homogénea y un comportamiento óptimo para su uso en pavimentos y elementos constructivos de bajo impacto estructural. Con la incorporación de Terrasil (0.06%) transformando los grupos hidroxilo hidrofílicos de la arcilla en grupos alquilo hidrofóbicos. La barrera creada a escala nanométrica crea una barrera química que reduce la absorción de agua a escala nanométrica crea una barrera química que reduce la absorción del agua y la expansividad del suelo es menor hasta de un 90%. Teniendo en cuenta la baja resistencia mecánica para pavimentos la principal ventaja es la durabilidad ante la intemperie, demostrando una cohesión superior antes el proceso de degradación hídrica que normalmente

afectan a los bloques de tierra prensado.

Este macroproyecto genera un impacto social profundo al democratizar la construcción de infraestructura sostenible, haciendo accesible y participativa la autoconstrucción mediante un proceso local sencillo que empodera comunidades para producir adoquines suelo-cemento con Terrasil, fomentando microemprendimientos, generación de ingresos y empleo regional; simultáneamente, mejora la calidad de vida en zonas vulnerables al resolver problemas crónicos de movilidad con vías duraderas y resistentes a la humedad, facilitando acceso a servicios esenciales,

Finalmente, el proceso de investigación permitió comprender que la calidad del suelo- cemento no depende únicamente de la dosificación, sino también del control integral de los parámetros de compactación, humedad y curado. Estos factores, trabajados en conjunto, garantizan un material más estable, resistente y acorde con los principios de construcción sostenible que orientan las prácticas actuales de la ingeniería civil.

24. Referencias

American Society for Testing and Materials. (2021). ASTM E1621: Guía estándar para el análisis elemental mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X con dispersión por longitud de onda. ASTM International.

Argos Colombia. (2021, agosto 12). Suelo cemento, una opción para la construcción de caminos terciarios. <https://colombia.argos.co/suelo-cemento-una-alternativa-para-la-construcción-de-vías-terciarias/>

Argos Colombia. (2022, julio 26). Información esencial sobre el cemento y su uso en la estabilización de suelos Argos. <https://colombia.argos.co/lo-que-debes-saber-del-cemento-uso-estabilización-de-suelos-argos/>

Cementos Argos Honduras. (2023, noviembre 14). Guía paso a paso para la estabilización de suelo con cemento. <https://honduras.argos.co/constructor/paso-a-paso-para-la-estabilizacion-del-suelo-con-cemento/>

Escuela Superior de Administración Pública. (2024). Planificación del Ordenamiento Territorial del Municipio de Tunja. (Repositorio CDIM ESAP). <https://repositoriocdim.esap.edu.co/bitstream/handle/20.500.14471/9902/3344-8.pdf>

Ghosh, A. S., Roy, A., & Roy, T. K. (2024). Estudio del desempeño de ceniza de lago estabilizada con nanomateriales como material subbase para pavimentos viales. *Construction and Building Materials*, 411, 134-147.

Instituto Nacional de Vías. (2014). Manual de normas de ensayo de materiales para carreteras (Resolución 1375 del 26 de mayo de 2014). Ministerio de Transporte, República de Colombia.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas. (2019). NTC 3459: Agua para la elaboración de concreto. ICONTEC.

Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-106-13: Preparación de muestras de suelo a través de método seco para análisis granulometría y determinación de características físicas. INVÍAS.

Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-125-13: Determinación del límite líquido en suelos. INVÍAS.

Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-126-13: Límites plásticos e índice de plasticidad en suelos. INVÍAS.

Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-141-13: Relaciones entre humedad y peso unitario seco en suelos (prueba estándar de compactación). INVÍAS.

Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-213-13: Análisis granulometría de agregados finos y gruesos. INVÍAS.

Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-613-13: Preparación y curado de muestras de suelo-cemento para ensayos de compresión y flexión en laboratorio. INVÍAS.

Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-614-13: Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento. INVÍAS.

Instituto Nacional de Vías. (2013). Normativas de prueba para materiales viales. INVÍAS.

Jing, L., Tianhua, Z., Qiang, D., & Hanheng, W. (2017). Investigación experimental sobre las propiedades del material de mezcla de yeso-cal-suelo en la reparación de fisuras en sitios de tierra. *Construction and Building Materials*, 157, 253-262.

Meeravali, K., Ruben, N., & Rangaswamy, K. (2020). Estabilización de arcilla blanda mediante nanomaterial: Terrasil. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1030-1037.

Patel, N. A., Mishra, C. B., & Pancholi, V. V. (2015). Evaluación científica del uso del producto químico Terrasil para la estabilización del suelo. *International Journal of Research in Advent Technology*, 3(6), 77-84.

Pro-Road Global. (2024). INVIAS lanza nueva normativa para la estabilización de suelos. <https://www.proroadglobal.com/invias-publica-nueva-normativa-para-la-estabilizacion-de-suelos/>

Rivera-Salcedo, H., Valderrama-Gutiérrez, O. M., Daza-Barrera, A. A., & Plazas-Jaimes, G. S. (2021). Adobe, un conocimiento ancestral empleado en construcciones tradicionales de Pore y Nunchía, Casanare (Colombia). *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 23(1), 74-85.

Rocha, A. (2002). Dosificación de suelo-cemento: Métodos y consideraciones técnicas. Editorial Técnica.

Roux Gutiérrez, R. S., & Olivares Santiago, M. (2002). Uso de ladrillos de adobe estabilizados con un 6% de cemento Portland y reforzados con fibra de coco para estructuras de carga en Tampico. *Informes de la construcción*, 54(484), 21-26.

Thomas, A., Tripathi, R. K., Yadu, L. K., & Roy, S. (2016). Estabilización de suelos utilizando Terrasil. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 9(3), 1049-1052.

Volikov, A. B., Kholodov, V. A., Kulikova, N. A., Philippova, O. I., Ponomarenko, S. A., Lasareva, E. V., Yaroslavtseva, N. V., & Perminova, I. V. (2016). Sustancias húmicas silanizadas

funcionan como modificadores hidrofóbicos de los separadores del suelo, lo que provoca la creación de agregados estables al agua en los suelos. Catena, 137, 229-236.

Zydex Industries. (2023). Terrasil: Especificaciones técnicas y usos. Zydex Industries Limited.