

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE
ADOQUINES DE SUELO-CEMENTO-ADITIVO TIPO ORGANOSILANOS, CON POSIBLE
APLICACIÓN EN PAVIMENTOS.



ANGIE FERNANDA PÉREZ MAHECHA
JUAN SEBASTIAN TORRES GUAJES

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTA DE INGENIERIA CIVIL

TUNJA

2025

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE
ADOQUINES DE SUELO-CEMENTO-ADITIVO TIPO ORGANOSILANOS, CON POSIBLE
APLICACIÓN EN PAVIMENTOS.

ANGIE FERNANDA PÉREZ MAHECHA
JUAN SEBASTIAN TORRES GUAJES

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingenieros Civiles

Asesor
Dr. NYDIA MARGARITA HABRAN ESTEBAN

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA
2025

Autoridades Académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O. P.

Rector General

P. Mauricio Antonio CORTÉS GALLEGUO, O. P.

Vicerrector Académico General

P. José Fernando MANCIPE, O. P.

Rector Sede Tunja

P. Wilmar Yesid RUIZ CORTÉS, O. P.

Vicerrector Académico Sede Tunja

Laura Natalia GARAVITO RINCÓN

Secretaria de División Sede Tunja

Ing. Brigid Hiomara PACHECO GARCÍA

Decano de la Facultad de ingeniería civil

Agradecimientos

En primer lugar, expresamos nuestra más profunda gratitud a Dios por permitirnos culminar con éxito este trabajo de grado, el cual representa un aporte significativo como alternativa de cambio para nuestra sociedad. Asimismo, extendemos un especial agradecimiento a la Dra. Nydia Margarita Habran Esteban, tutora de este proyecto, por su valiosa orientación, acompañamiento y constante disposición durante el proceso investigativo. También agradecemos a la ingeniera Sandra Elodia Ospina por sus aportes y sugerencias, los cuales fueron determinantes para el fortalecimiento de la estructura y el desarrollo de esta investigación.

Del mismo modo, expresamos nuestro reconocimiento a los laboratoristas Jhon Fredy Hernández y Hans Kurt Wiest Zea por su apoyo técnico, supervisión y consejos, fundamentales para la correcta ejecución de los ensayos. Agradecemos igualmente a Camilo Esteban Vargas Zea por su compromiso y colaboración en la caracterización del suelo, proceso esencial para el avance del estudio. Así mismo, manifestamos nuestro agradecimiento a la Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja, por brindarnos los espacios, equipos e infraestructura necesarios para llevar a cabo este trabajo académico.

Finalmente, queremos expresar nuestra más sincera gratitud a nuestras familias por su apoyo incondicional, comprensión y motivación a lo largo de nuestra formación profesional. Su respaldo constante y los valores inculcados han sido pilares fundamentales para nuestro crecimiento personal y académico, así como para el cumplimiento de cada uno de los objetivos propuestos.

Nota de aceptación:

MaLH n E.

Firma del director

Firma jurado 1

Firma jurado 2

Contenido

Resumen.....	11
Abstract	12
Introducción	13
1. CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.1. Planteamiento del problema.....	17
1.2. Formulación del problema	17
1.3. Objetivos de investigación.....	17
1.3.1 Objetivo general.....	17
1.3.2 Objetivos específicos	18
1.4. Justificación	18
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	19
2.1. Generalidades de los suelos	19
2.1.1 Tipos de suelos.....	19
2.1.2 Propiedades de los suelos.....	20
2.1.3 Clasificación de los suelos	21
2.1.4 Variación de los suelos	21
2.2. Tipos de suelos en Colombia	21
2.2.1 Tipos de suelos en Boyacá.....	22
2.2.2 Formación Tilatá.....	22
2.3. Técnicas de caracterización del suelo	23
2.3.1 Ensayos que se necesitan para la caracterización del suelo	24
2.4. Terrasil	24
3. CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO	28
3.1. Determinación de dosificaciones	28
3.1.1 Caracterización fisicoquímica del suelo de estudio	28
3.2. Diseño de mezcla	29
3.2.1 Suelo control	29

3.2.2	Determinación de dosificaciones de terrasil	29
3.3.	Ensayos de laboratorio	30
3.3.1	Relaciones humedad–densidad de mezclas de suelo cemento (Proctor)	30
3.3.2	Preparación y curado de probetas de suelo–cemento para pruebas de compresión y flexión en el laboratorio	30
3.3.3	Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo–cemento	34
3.3.4	Resistencia a la compresión de adoquines de concreto	35
3.3.5	Absorción de agua por los adoquines de concreto	36
4.	CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y RESULTADOS	36
4.1.	Determinación de dosificaciones	36
4.1.1	Caracterización de suelo	36
4.1.2	Suelo control	39
4.1.3	Dosificaciones Suelo-cemento-terrasil	40
4.2.	Ensayos de laboratorio	40
4.2.1	Relaciones humedad–densidad de mezclas de suelo cemento	40
4.2.2	Preparación y curado de probetas de suelo–cemento para pruebas de compresión y flexión en el laboratorio	47
4.2.3	Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo–cemento	50
4.2.4	Resistencia a la compresión de adoquines de concreto	56
4.2.5	Absorción de agua por los adoquines de concreto	60
5.	CAPITULO V: RECOMENDACIONES	63
5.1.	Recomendaciones para futuras investigaciones	63
5.1.1	Optimización de dosificaciones de Terrasil y cemento	63
5.1.2	Ampliación de tipos de suelo	63
5.1.3	Evaluación de propiedades hidráulicas y térmicas:	63
5.1.4	Investigación ambiental y sostenible:	63
5.2.	Recomendaciones para mejorar el proceso de fabricación de probetas y adoquines	63
5.2.1	Control estricto de dosificaciones y humedad	63
5.2.2	Homogeneidad de la mezcla	63
5.2.3	Optimización de compactación	64
5.2.4	Curado controlado	64
5.2.5	Registro detallado de datos	64

5.2.6 Validación continua	64
6. CONCLUSIONES.....	65
Bibliografía	66

Lista de Tablas

Tabla 1 Beneficios mecánicos y de desempeño del Terrasil	25
Tabla 2 Propiedades físicas y químicas del terrasil.	26
Tabla 3 Resultados de ensayos de caracterización del suelo de Soracá (Zea, 2025).	39
Tabla 4 Datos utilizados para la elaboración de las probetas.	48
Tabla 5 Datos extraídos de las probetas solicitados por la INV E-613-13.	49
Tabla 6 Datos extraídos de las probetas de 0% solicitados por la INV E-614-13.	50
Tabla 7 Datos extraídos de las probetas de 0.03% solicitados por la INV E-614-13.	51
Tabla 8 Datos extraídos de las probetas de 0.15% solicitados por la INV E-614-13.	52
Tabla 9 Datos extraídos de las probetas de 0.3% solicitados por la INV E-614-13.	53
Tabla 10 Datos extraídos de las probetas de 0.5% solicitados por la INV E-614-13.	54
Tabla 11 Datos utilizados para la elaboración de adoquines.	57
Tabla 12 Datos extraídos de los adoquines suelo control solicitados por la INV E-626-13.....	58
Tabla 13 Datos extraídos de los adoquines con 0.15% de terrasil solicitados por la INV E-626-13.	59

Lista de Figuras

Figura 1 Curva de compactación de suelo-cemento.	41
Figura 2 Curva de compactación de suelo-cemento+0.03% de terrasil.....	42
Figura 3 Curva de compactación de suelo-cemento+0.15% de terrasil.....	43
Figura 4 Curva de compactación de suelo-cemento+0.3% de terrasil.....	44
Figura 5 Curva de compactación de suelo-cemento+0.5% de terrasil.....	45
Figura 6 Gráficas de contenido óptimo de humedad con respecto a las distintas dosificaciones de terrasil.	46
Figura 7 Gráficas de densidad seca máxima con respecto a las distintas dosificaciones de terrasil.	46
Figura 8 Gráficas de densidad seca máxima con respecto a las distintas dosificaciones de terrasil.	55
Figura 9 Gráfica de resistencia a la compresión unitaria con respecto a las distintas dosificaciones de terrasil.....	56
Figura 10 Gráfica de resistencia a la compresión vs contenido de terrasil.....	60
Figura 11 Adoquín suelo control después de una hora de inmersión.	61
Figura 12 Adoquín suelo-cemento-aditivo en diferentes horas de inmersión.	62

Resumen

La presente investigación aborda el diseño y la caracterización físico-mecánica de adoquines elaborados artesanalmente a partir de mezclas de suelo-cemento modificadas con aditivos organosilanos, más específicamente con Terrasil, evaluando su viabilidad técnica para su aplicación en estructuras de pavimentación. Se utilizó suelo arcilloso de la formación Tilatá (Boyacá), conforme a normativas técnicas vigentes, y se desarrollaron diferentes dosificaciones con variaciones en el contenido de cemento y aditivo. El proceso metodológico incluyó fases de diseño, fabricación, curado y ensayo de compresión, a fin de determinar el desempeño estructural de los especímenes. Los resultados obtenidos evidencian mejoras significativas en la resistencia a la compresión, la impermeabilidad y otros parámetros físico-mecánicos de los adoquines tratados con Terrasil, en comparación con mezclas convencionales. Estos hallazgos sugieren el potencial del uso de aditivos organosilanos en el desarrollo de soluciones sostenibles y eficientes para infraestructura vial, en especial en contextos urbanos y climáticamente exigentes.

Palabras clave: adoquines, organosilanos, terrasil, cemento, aditivo.

Abstract

The present research addressed the design and physico-mechanical characterization of artisanal pavers manufactured from soil–cement mixtures modified with organosilane additives, specifically Terrasil, assessing their technical feasibility for application in pavement structures. Clayey soil from the Tilatá formation (Boyacá) was used in accordance with current technical standards, and different mix proportions were developed with variations in cement and additive content. The methodological process included the stages of design, fabrication, curing, and compression testing in order to determine the structural performance of the specimens. The results showed significant improvements in compressive strength, impermeability, and other physico-mechanical parameters of the pavers treated with Terrasil, compared to conventional mixtures. These findings suggest the potential of organosilane additives in the development of sustainable and efficient solutions for road infrastructure, particularly in urban and climatically demanding contexts.

Keywords: pavers, organosilanes, Terrasil, cement, additive.

Introducción

Este proyecto se centra en el desarrollo artesanal de adoquines elaborados a partir de suelo arcilloso de la Formación Tilatá, ubicada en el municipio de Soracá, Boyacá. Para ello, se incorpora Terrasil, un compuesto orgánico tipo organosilanos, como aditivo estabilizante con el propósito de evaluar su desempeño y su potencial aplicación en pavimentos. Asimismo, la investigación busca determinar las propiedades físico-mecánicas de distintas dosificaciones y, a partir de los resultados, proponer lineamientos técnicos para la fabricación de adoquines suelo-cemento-aditivo acordes con la normatividad vigente. Aunque la normativa específica para adoquines en suelo-cemento es limitada, se consideran las NTC aplicables a adoquines de concreto y los documentos técnicos relacionados con la estabilización de suelos. En conjunto, esta iniciativa apunta a la producción de adoquines más duraderos y resistentes, con beneficios para la infraestructura urbana y el entorno, especialmente en zonas con alta demanda peatonal o vehicular y bajo condiciones climáticas extremas.

En cuanto al adoquín, este se define como un elemento estructural que usualmente viene en forma de bloque rectangular o cuadrado, generalmente fabricado en concreto, granito, basalto u otros tipos de piedra. Estos materiales son seleccionados por su durabilidad y resistencia a la intemperie. Además, están diseñados para soportar y distribuir uniformemente las cargas tanto vehiculares como peatonales que actúan sobre la superficie (NTC 2017, 2018).

El uso de adoquines en la construcción de pavimentos no solo ha sido relevante por su funcionalidad, sino también por su estética y versatilidad. De hecho, su implementación en calles, plazas y otros espacios públicos ha permitido desarrollar infraestructuras más resistentes y visualmente atractivas. Asimismo, debido a su capacidad para soportar cargas y su durabilidad frente a agentes climáticos, los adoquines ofrecen la ventaja de un mantenimiento sencillo, pues permiten reemplazar unidades individuales sin intervenir toda la superficie del pavimento (Pérez Machado et al., 2022).

Ahora bien, existen diferentes tipos de adoquines según su utilidad, forma y material. En primer lugar, su utilidad depende del nivel de carga al que estarán sometidos, ya sea vehicular o peatonal. En segundo lugar, su forma puede ser cuadrada, triangular, hexagonal o rectangular, siendo esta última la más utilizada gracias a su resistencia estructural y capacidad de drenaje, factores que influyen directamente en la seguridad y funcionalidad. Finalmente, su material de

fabricación depende de las características físico-mecánicas requeridas para su desempeño (NTC 2017, 2018).

En relación con los procesos de fabricación, los adoquines pueden producirse tanto mediante métodos industriales como mediante técnicas artesanales. En estas últimas se mezcla el material base con agua y otros aditivos para crear una masa moldeable. Dichos aditivos modifican y mejoran propiedades físicas, mecánicas y químicas, permitiendo cumplir requisitos específicos de rendimiento y durabilidad. Según la Norma Técnica Colombiana NTC 1299, los aditivos se clasifican por tipo desde la categoría A hasta la H, e influyen en características como plastificación, aceleración o retardación del fraguado (Aditivos et al., n.d.).

Otro aspecto relevante en la producción de adoquines es la sostenibilidad. En la actualidad, la industria de la construcción busca reducir su impacto ambiental mediante el uso de materiales reciclados y la optimización de sus procesos productivos. Así, la incorporación de residuos industriales o de construcción en la elaboración de adoquines constituye una estrategia eficiente para disminuir la explotación de recursos naturales y reducir la generación de desechos (Development of Technologies for Paving in Local, 2019). En este mismo sentido, diversas tecnologías recientes han implementado el uso de nanopartículas, fibra de carbono, residuos de construcción y demolición (RCD) y biomateriales, con el fin de modificar granulométricamente las dosificaciones de los adoquines y mejorar su rendimiento (Development of Technologies for Paving in Local, 2019).

Sin embargo, el cambio climático, provocado por las excesivas emisiones de gases de efecto invernadero, ha generado la necesidad de transformar los hábitos de consumo y los procesos industriales a nivel global. La industria de la construcción civil que incluye obras como viviendas, edificios, proyectos viales e hidráulicos es una de las mayores generadoras de emisiones, especialmente debido al elevado consumo de concreto, uno de los materiales más utilizados después del agua y el asfalto. Desde el enfoque geotécnico, los impactos ambientales asociados a la instalación de superficies asfálticas incluyen contaminación del aire, aumento del efecto invernadero, desgaste de la capa de ozono y acidificación del suelo (Gomez Villarino et al., 2017).

Por otro lado, es importante destacar que materiales como los térreos, a pesar de haber sido utilizados desde la antigüedad, rara vez se emplean en la construcción moderna debido a la poca investigación sobre sus propiedades, las cuales pueden ser altamente variables. No obstante, su uso podría representar una alternativa viable y económicamente favorable (Gomez Villarino et al.,

2017). En consecuencia, la búsqueda de nuevos materiales de construcción se ha convertido en una necesidad tanto a corto como a largo plazo para minimizar el impacto ambiental (Gomez Villarino et al., 2017).

En este contexto, el desarrollo de adoquines artesanales con organosilanos no solo atiende los problemas ambientales y de rendimiento en pavimentación, sino que también genera conocimientos y tecnologías que podrían otorgar ventajas competitivas a las empresas en el futuro (Gomez Villarino et al., 2017).

El Terrasil, específicamente, se clasifica como un modificador de suelos de naturaleza reactiva compuesto por organosilanos 100 % solubles en agua. Se caracteriza por su estabilidad frente a la radiación ultravioleta y a condiciones térmicas variables. Su mecanismo de acción, basado en reacciones químicas, confiere al suelo propiedades de impermeabilidad duradera, lo que se traduce en una mayor densidad de compactación, incremento de la capacidad portante y reducción de riesgos asociados al ascenso capilar y a los ciclos de congelación y deshielo (Resistant & Bases, n.d.). Además, su aplicación sencilla y su bajo impacto ambiental lo posicionan como una alternativa eficaz y sostenible para mejorar el desempeño de suelos empleados en infraestructura vial (Resistant & Bases, n.d.).

Actualmente, la humanidad enfrenta cambios ambientales que parecen irreversibles, resultado del escaso compromiso con la sostenibilidad. Esto ha originado retos globales como el calentamiento climático y el deterioro de los recursos naturales (SB Sosa, 2010). En este marco, el uso de pavimentos adquiere una importancia fundamental, ya que deben soportar cargas de tráfico, condiciones ambientales y garantizar la seguridad y durabilidad en la conducción. Los métodos de diseño tradicionales basados en pavimentos rígidos y flexibles dieron origen al pavimento articulado compuesto por adoquines. Aunque su uso se remonta al Imperio Romano, fue a partir de la década de 1970 cuando se popularizó en estacionamientos, accesos y áreas públicas, impulsando a países como Países Bajos, Australia y Reino Unido a desarrollar sus propios métodos de diseño mediante adoquines de concreto (Echaveguren et al., 2013).

Una alternativa tecnológica reciente consiste en el empleo de compuestos de organosilicio, en particular los organosilanos, utilizados comúnmente en recubrimientos de alto rendimiento y en productos químicos industriales. La incorporación de silicio en estos compuestos suele requerir procesos complejos y condiciones extremas, lo que implica una carga ambiental significativa. Sin

embargo, los organosilanos destacan por ser menos tóxicos, más estables y fáciles de procesar debido a su naturaleza nucleófila flexible (Piers-rubinsztajn et al., n.d.).

Finalmente, la implementación de tecnologías avanzadas como nanopartículas y fibras sintéticas ha permitido mejorar notablemente las propiedades mecánicas y de conservación de los adoquines. Estos avances contribuyen a desarrollar pavimentos con mayor resistencia a la abrasión, menor absorción de agua y mejor capacidad de drenaje, favoreciendo la construcción de espacios urbanos más seguros y funcionales. En este sentido, la constante innovación en la fabricación y diseño de adoquines seguirá siendo clave para el desarrollo de infraestructuras sostenibles y eficientes (Piers-rubinsztajn et al., n.d.).

1. CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

La industria de la construcción civil es uno de los sectores que más emiten gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO_2), debido a su gran dependencia de materiales convencionales como el asfalto y el concreto. Esta dependencia produce impactos ambientales representativos, incluyendo contaminación del aire, el agotamiento de la capa de ozono y acidificación de los suelos, especialmente en proyectos de pavimentación.

Históricamente, los materiales térreos establecen una alternativa sostenible y abundante utilizada en la construcción. No obstante, su uso en la actualidad es limitado, principalmente por la falta de conocimiento sobre sus propiedades físico-mecánicas y cómo se comporta al combinarse con aditivos modernos. Esta falta de información limita el desarrollo de soluciones de pavimentación más sostenibles y eficientes.

En respuesta a la problemática, esta investigación se enfoca en el diseño y evaluación de las propiedades físico-mecánicas de adoquines de suelo-cemento-aditivo tipo organosilanos. Esta propuesta une la tradición en el empleo de suelos compactados con tecnologías químicas avanzadas, con el objetivo de optimizar el rendimiento de los adoquines, fomentar la sostenibilidad en la construcción y generar conocimiento que potencie la competitividad del sector.

1.2. Formulación del problema

¿Cómo influye la adición de organosilanos en las propiedades físico-mecánicas de adoquines de suelo-cemento, y cuál es su potencial de aplicación en sistemas de pavimentación?

1.3. Objetivos de investigación

1.3.1 Objetivo general

Evaluar las propiedades físico-mecánicas de adoquines hechos a partir de una mezcla de suelo-cemento-aditivos funcionalizados con organosilanos, con el fin de determinar su viabilidad y desempeño para su posible aplicación en pavimentos.

1.3.2 Objetivos específicos

Determinar la dosificación óptima de organosilanos en mezclas de suelo-cemento, mediante la evaluación comparativa de su estabilidad y trabajabilidad identificando las proporciones que permitan alcanzar un desempeño óptimo del material.

Caracterizar la elaboración adoquines con mezclas suelo-cemento incorporando organosilanos, verificando su conformidad con los criterios de calidad establecidos en la normativa técnica colombiana NTC 2017 “Adoquines de concreto para pavimento”.

Evaluar las propiedades físico-mecánicas de la mezcla suelo-cemento-aditivo y finalmente en adoquines fabricados por medio de pruebas estandarizadas en laboratorio.

1.4. Justificación

El desarrollo económico de un país está relacionado con la eficiencia y calidad de su infraestructura vial, que a su vez depende en gran medida de la disponibilidad y rendimiento de materiales apropiados para la construcción y mantenimiento de pavimentos. En Colombia, la compleja geomorfología, la localización en el ecuador y la limitada red vial representan desafíos significativos para la conectividad y movilidad, lo que impacta el transporte de personas y bienes y servicios, además de la seguridad y el bienestar social.

Las soluciones convencionales de pavimentación, basadas principalmente en materiales como el concreto y el asfalto, presentan limitaciones económicas como ambientales. Su producción y uso generan altas emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo al cambio climático, además de requerir recursos no renovables y costosos. Por otra parte, la durabilidad y el mantenimiento recurrente de estos materiales incrementan los costos a largo plazo y afectan la sostenibilidad de la infraestructura vial.

En este contexto, el estudio y desarrollo de materiales alternativos, como los adoquines hechos con mezclas de suelo-cemento estabilizadas con aditivos funcionalizados tipo organosilanos, se vislumbran como una solución sostenible e innovadora. Los organosilanos, que son compuestos químicos que optimizan la interacción entre el suelo y el cemento, potencian las propiedades físico-mecánicas de los adoquines al aumentar su resistencia a la compresión, reducir la absorción de agua y mejorando la durabilidad ante la abrasión y agentes ambientales. Esto no solo disminuye la dependencia de aglutinantes tradicionales, sino que además prolonga la vida útil de los pavimentos y reduce los costos de mantenimiento.

Asimismo, el uso de materiales locales y abundantes, como los suelos, favorece la economía circular y al uso sostenible de los recursos, adaptándose a las condiciones específicas del territorio colombiano. Esta propuesta tecnológica promueve la innovación en el sector de materiales de construcción al proporcionar productos de alta calidad que satisfacen a las necesidades ambientales, económicas y sociales del país.

Por lo tanto, esta investigación es esencial para mejorar la infraestructura vial colombiana mediante el desarrollo de adoquines sostenibles y viables desde un punto de vista técnico, contribuyendo a la mitigación del impacto ambiental y al mejoramiento de la competitividad del sector construcción.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades de los suelos

Los suelos constituyen la capa más externa de la corteza terrestre y se generan a partir de la descomposición de materia orgánica y la desintegración química y física de las rocas. Este complejo sistema natural desempeña múltiples funciones esenciales. No solo regula el ciclo del agua y sostiene la vegetación, sino que también alberga una amplia variedad de organismos, desde microorganismos hasta fauna de mayor tamaño, que interactúan para conservar la fertilidad, la estructura y la estabilidad del suelo (Hillel, 2008; Brady & Weil, 2017).

Por otra parte, los suelos cumplen un papel estratégico en la agricultura, la forestación y la construcción, ya que su composición y características determinan la capacidad de soporte de cargas, la retención de nutrientes y la disponibilidad de agua, elementos fundamentales para el desarrollo sostenible de los ecosistemas y de la sociedad.

2.1.1 Tipos de suelos

En Ingeniería Civil, los suelos se clasifican fundamentalmente según su granulometría, plasticidad y comportamiento mecánico, parámetros que determinan su resistencia, estabilidad y desempeño frente a cargas externas. Para ello se emplean sistemas ampliamente aceptados como el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) propuesto por Casagrande (1948) y la clasificación AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993), utilizados en pavimentación, cimentaciones y estabilización.

Los suelos granulares, tales como arenas y gravas, presentan partículas de mayor tamaño, baja cohesión y elevada permeabilidad. Su resistencia está dominada por el ángulo de fricción interna, que controla su capacidad para soportar esfuerzos cortantes (Terzaghi & Peck, 1967).

Debido a su naturaleza no cohesiva, estos suelos requieren compactación adecuada o agentes cementantes cuando se desea emplearlos en elementos estructurales o en la fabricación de unidades como adoquines.

Por otro lado, los suelos finos, principalmente limos y arcillas, poseen partículas de menor tamaño y alta área superficial, lo que les confiere mayor cohesión y plasticidad. Las arcillas muestran un comportamiento fuertemente dependiente del contenido de humedad, con fenómenos de expansión, contracción y alta compresibilidad (Holtz & Kovacs, 1981). Estas características influyen en su respuesta ante cargas, estabilidad volumétrica y capacidad de soporte, aspectos críticos en procesos de estabilización con cementantes o aditivos químicos.

Los limos, aunque menos cohesivos que las arcillas, presentan baja resistencia al corte y son susceptibles a la pérdida de rigidez bajo cargas repetidas o en condiciones de saturación (Das, 2015). Dicho comportamiento limita su uso directo en estructuras y pavimentos, por lo que suelen requerir técnicas de mejoramiento como la estabilización con cemento o la incorporación de aditivos que modifiquen su estructura.

Desde la perspectiva geomecánica, variables como la composición mineralógica, la plasticidad determinada mediante los límites de Atterberg (LL, LP, IP), la distribución granulométrica y la capacidad de soporte, comúnmente medida mediante el ensayo CBR (California Bearing Ratio), son determinantes para evaluar la idoneidad de un suelo en mezclas suelo-cemento (Transport Research Board, 2004). Estos parámetros permiten predecir la respuesta del material a la compactación, su resistencia mecánica final y su durabilidad, aspectos esenciales al estudiar su interacción con aditivos como los organosilanos, los cuales modifican la humectabilidad y la estabilidad estructural del suelo (Kazanova et al., 2019).

2.1.2 Propiedades de los suelos

- Las propiedades de los suelos se dividen en físicas, químicas y biológicas, y cada una determina su comportamiento frente a los procesos naturales y actividades humanas.
- Propiedades físicas: incluyen textura, estructura, densidad, porosidad, color y permeabilidad, que regulan directamente la disponibilidad de agua, aire y nutrientes para la vegetación (Marshall & Holmes, 1988).
- Propiedades químicas: abarcan pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y salinidad, factores determinantes para la fertilidad del suelo y su capacidad de retener elementos esenciales como calcio, potasio y magnesio (Sparks, 2003).

- Propiedades biológicas: incluyen la presencia de microorganismos, actividad enzimática y biomasa microbiana, elementos que participan activamente en la descomposición de materia orgánica, la formación de humus y el ciclo de nutrientes, contribuyendo a mantener la productividad y estabilidad del ecosistema. (Sparks, 2003).

2.1.3 Clasificación de los suelos

La Taxonomía de suelos del USDA es el sistema de clasificación de suelos más utilizado a nivel mundial, organizando los suelos en categorías jerárquicas según sus propiedades medibles y observables (Soil Survey Staff, 2014). Este sistema considera factores como el relieve, la vegetación y el clima, permitiendo entender los procesos de formación y la distribución de los suelos.

De manera complementaria, el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) se centra en la granulometría y plasticidad, clasificando los suelos en arcilla, limo, arena y grava, e indicando el grado de uniformidad y plasticidad mediante símbolos. Estas clasificaciones son fundamentales para la ingeniería civil, la agricultura y la gestión ambiental, ya que permiten prever el comportamiento del suelo frente a cargas, humedad, erosión y otras condiciones externas.

2.1.4 Variación de los suelos

La variación de los suelos se explica por la interacción de factores como el clima, el relieve, el material parental y el tiempo (Jenny, 1941). En zonas de alta precipitación, los suelos tienden a ser más ácidos y lixiviados, mientras que en regiones áridas suelen acumular sales y presentar menor fertilidad (Szabolcs, 1994).

Asimismo, la acción humana, a través de la agricultura intensiva, la urbanización y la construcción, puede modificar la estructura, composición y capacidad productiva de los suelos, provocando problemas como compactación, erosión y pérdida de materia orgánica. Por ello, el manejo sostenible del suelo es clave para garantizar la productividad agrícola, la conservación ambiental y la prevención de riesgos geotécnicos.

2.2. Tipos de suelos en Colombia

La posición ecuatorial, la diversidad de los ecosistemas y la variada topografía de Colombia dan lugar a una amplia gama de tipos de suelo (IGAC, 2013).

- Andisoles: formados a partir de cenizas volcánicas, son uno de los tipos de suelo más característicos; se distinguen por su elevada fertilidad y habilidad para retener agua. Estos suelos predominan en la región andina (Buurman et al., 2006).
- Ultisoles: presentes en áreas húmedas y cálidas, son tierras con poca fertilidad natural y ácidas, lo que restringe las variedades de cultivos que se pueden implantar sin enmiendas (Sanchez, 1976).
- Oxisoles: abundantes en la Amazonía y Orinoquía, tienen elevada intemperización, minerales muy alterados y poca fertilidad natural, lo que los hace más difíciles de manejar a nivel agrícola. (Sanchez, 1976)

2.2.1 Tipos de suelos en Boyacá

El relieve accidentado y el clima frío de la región andina, donde se encuentra el departamento de Boyacá, tienen un impacto directo en cómo se forman y distribuyen sus suelos (CORPOBOYACÁ, 2010).

Los Humicryepts son los que predominan en las áreas altas; se trata de suelos con mucha materia orgánica y temperaturas bajas, lo que resulta ideal para sembrar papa y otras cosechas propias del clima frío (IDEAM, 2015).

La fertilidad y la aptitud para la agricultura de los terrenos en esta zona se ven afectadas por una mezcla de geología compuesta por rocas volcánicas y sedimentarias, un clima frío y una alta precipitación (INGEOMINAS, 2000). Estas propiedades, además, hacen que los suelos sean propensos a la erosión y la compactación, lo que exige una gestión agrícola apropiada.

2.2.2 Formación Tilatá

La Formación Tilatá es una unidad geológica ubicada en la Sabana de Bogotá, que tiene depósitos lacustres y fluvio-lacustres, correspondientes a los periodos Pleistoceno y Holoceno (Van der Hammen, 1998). Los suelos que resultan de esta formación tienen, sobre todo, texturas arcillosas y limosas, con una gran aptitud para retener agua, un drenaje restringido y una tendencia a compactarse y erosionarse (Andrade, 2004).

Esta fertilidad natural ha posibilitado el progreso de la agricultura en la zona, aunque necesita prácticas de gestión concretas para prevenir problemas de salinización y encharcamientos (FAO, 2005). Para preservar la calidad del suelo y mantener la productividad, los agricultores deben usar enmiendas orgánicas y sistemas de drenaje.

Los terrenos del municipio de Soracá, en la provincia de Tunja, están afectados por la Formación Tilatá y otros depósitos cuaternarios. El terreno que predomina es arcilloso, tiene un color oscuro, una textura fina y baja permeabilidad. Esto restringe el crecimiento de ciertos cultivos; sin embargo, es propicio para plantar papa y otros productos que requieren clima frío (CORPOBOYACÁ, 2010).

Para mejorar la productividad, se aconseja implementar prácticas de gestión del suelo, como el drenaje controlado, la adición de materia orgánica y las estrategias para conservar los suelos; estas acciones ayudan a optimizar la estructura, la aireación y la fertilidad natural del terreno (MADR, 2018).

2.3. Técnicas de caracterización del suelo

La caracterización del suelo es un proceso fundamental para analizar, evaluar y describir sus propiedades físico-mecánicas, especialmente en proyectos de ingeniería donde es necesario comprender cómo se comporta el material bajo diferentes condiciones. El conocimiento detallado del suelo permite identificar tanto condiciones favorables como desfavorables según su uso previsto, y además constituye una herramienta clave para anticipar y estimar los costos asociados a la ejecución de un proyecto, favoreciendo una planificación más precisa (studysmarter, 2025).

Existen tres clases de caracterización de suelos, dependiendo de las propiedades que se deseen estudiar. La primera y más relevante en el ámbito de la ingeniería civil es la caracterización física, la cual se enfoca en las propiedades relacionadas con el comportamiento mecánico del material. Entre los ensayos más empleados se encuentran el análisis granulométrico, la determinación de la densidad, los límites de plasticidad y de contracción, y los ensayos de resistencia mecánica. Estos parámetros permiten comprender la capacidad del suelo para soportar esfuerzos externos, su comportamiento hídrico y su estabilidad estructural (studysmarter, 2025).

La caracterización química, por su parte, se basa en el estudio de la composición mineralógica y los procesos químicos presentes en el suelo. Este análisis incluye la determinación del pH, el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, la presencia de sales solubles y la conductividad eléctrica, entre otros aspectos relevantes. Este tipo de caracterización es esencial para evaluar la reactividad del suelo ante aditivos o estabilizadores, así como su susceptibilidad a procesos de degradación química o contaminación (studysmarter, 2025).

Finalmente, la caracterización biológica analiza la actividad microbiana y la diversidad de organismos presentes en el suelo. Aunque este tipo de caracterización es más común en estudios

agrícolas, ecológicos y de remediación ambiental, también puede aportar información complementaria sobre la estabilidad del material en función de su composición

2.3.1 *Ensayos que se necesitan para la caracterización del suelo*

Para la realización de la caracterización del suelo se tuvo en cuenta un conjunto de ensayos de laboratorio que permitieron determinar sus propiedades físicas y mecánicas, parámetros esenciales para su clasificación y evaluación de comportamiento en este proyecto de investigación.

Primeramente, se evaluó la granulometría que se llevó a cabo mediante técnicas de tamizado y sedimentación, con el fin de establecer la proporción relativa de partículas de grava, arena, limo y arcilla. Este ensayo es fundamental para comprender la textura y permeabilidad del material, así como para su clasificación según la USC, mientras que por otro lado se avaluaron los límites de Atterberg que definieron los rangos de humedad en los que el material puede pasar entre diferentes estados de consistencia, información crucial para evaluar su plasticidad, compresibilidad y potencial de expansión. Complementariamente, se determinó el límite de contracción para conocer el punto en el que el suelo de estudio deja de experimentar reducción volumétrica con la pérdida de agua, parámetro importante para analizar el comportamiento frente a fenómenos de retracción y expansividad.

Para el análisis de la resistencia mecánica del suelo, se usó el ensayo de corte directo en condición consolidada drenada que proporcione valores de cohesión y ángulo de fricción. Por último, se realizó el ensayo de peso específico relativo de sólidos que permitió establecer la densidad de las partículas que conforman el suelo, Estudio preciso para el cálculo de propiedades volumétricas y contenido de materia orgánica.

2.4. Terrasil

El Terrasil es un modificador de suelo reactivo, 100% organosilanos, soluble en agua, ultravioleta y estable al calor, basado en nanotecnología para impermeabilizar un cierto tipo de suelo fino o granular, que ofrece una solución al convertir químicamente los grupos hidroxilo (grupos formados por un átomo de oxígeno y otro de hidrógeno) absorbentes de agua en grupos alquilo (estructuras que se obtienen a partir de alcanos, se separa un átomo de hidrógeno de uno de los átomos de carbono) resistentes al agua, haciendo que el suelo sea hidrofóbico de manera permanente. Este producto mejora la densidad de compactación, la capacidad de carga y previene problemas como el ascenso capilar, la congelación y descongelación, al mismo tiempo que es fácil de aplicar y amigable con el medio ambiente, lo que lo convierte en una opción efectiva y

sostenible para mitigar los efectos de la humedad en las estructuras viales (Resistant & Bases, s/f).

La empresa OptimaSoil, fundada en 2009, reúne información sobre la aplicación de nanomateriales basados en organosilanos solubles en agua (Terrasil y Terrasil +) esta pionera en la comercialización de esta nanotecnología en América Latina, mientras que Zydex Industries, creada en 1997, desarrolla químicos sostenibles aplicados a la agricultura, la construcción y la protección de materiales (Industries, 2009).

Terrasil es un impermeabilizante revolucionario a escala nanométrica, creado para la estabilización duradera de terrenos de todo tipo, su mecanismo de funcionamiento se basa en la interacción química entre sus moléculas y los grupos polares presentes en las partículas del suelo. Al aplicar disuelto en agua, las moléculas de Terrasil se adhieren a estos grupos polares y tras la evaporación del agua, se forma un enlace covalente de tipo siloxano entre el producto y el suelo (Industries, 2009).

Este enlace siloxano es extremadamente resistente, manteniendo su integridad frente a factores ambientales adversos como la humedad constante, la radiación ultravioleta y las variaciones de temperatura. La unión de este enlace transforma las partículas del terreno en superficies hidrofóbicas, disminuyendo la permeabilidad del suelo y salvaguardando su estructura en contra de perjuicios provocados por el agua (Industries, 2009).

Adicionalmente, en beneficios de aplicación se ha comprobado que Terrasil incrementa considerablemente la durabilidad o vida útil del suelo tratado, demostrando un desempeño superior en ensayos de distintas propiedades fundamentales para la ingeniería geotécnica y la construcción de infraestructura. A continuación, se presentan los principales beneficios observados en términos de capacidad de soporte, rigidez y resistencia, los cuales reflejan el potencial del producto en la mejora integral del comportamiento del suelo.

Tabla 1 Beneficios mecánicos y de desempeño del Terrasil

Propiedad evaluada	Efecto Terrasil	Magnitud	Fuente
CBR	Incremento significativo	+200% a +400% según curado	
Modulo resiliente	Aumento de rigidez	Hasta 40.000 psi en subbases.	
Resistencia no confinada (UCS)	Aumento notable	+30% a +100%	
Hidrofobicidad	Permanente	Impermeabilización molecular	Industries (2009).

Propiedad evaluada	Efecto Terrasil	Magnitud	Fuente
Durabilidad	Mayor vida útil	Resistencia a UV, agua, ciclos térmicos	.
Compatibilidad con otros estabilizantes	Muy alta	Cal, cemento, polímeros catiónicos (Zycobond)	

Para comprender el comportamiento del Terrasil en aplicaciones de estabilización de suelos, es fundamental revisar sus propiedades físicas y químicas. A continuación, se presenta una descripción detallada de sus características fundamentales, su composición y los aspectos que deben considerarse durante su almacenamiento, manipulación y aplicación en campo.

Tabla 2 *Propiedades físicas y químicas del terrasil.*

Propiedad	Descripción / Valor	Fuente
Estado físico	Líquido	
Color	Amarillo pálido	
Viscosidad	100-500 cps (similar al agua)	
Densidad	1.01 g/ml	Zydex & Road (2014); La et al. (2016).
Punto de congelación	5°C	.
Punto de inflamación	>80°C	
Solubilidad	Totalmente soluble en agua	
Método de aplicación	Riego o spray	
Componentes principales	Alcohol bencílico (65–70%); etilenglicol (25–27%); otros (3–5%)	

Terrasil es un producto innovador que mejora el comportamiento del suelo cuando se utiliza en combinación con otros materiales. Su utilidad es interesante, especialmente en suelos expansivos o con baja capacidad portante, donde, al mezclarse con cal reduce costos en comparación con el empleo de altas dosificaciones de Terrasil de forma individual. Por otro lado,

la incorporación de otro material como es el cemento, por su parte aumenta la resistencia a la tracción del suelo y ofrece una protección adicional frente a la humedad y la acción de los sulfatos. Asimismo, otro material un poco menos comercial son los polímeros catiónicos como Zycobond aportan mayor elasticidad y durabilidad a los suelos tratados, disminuyendo la rigidez excesiva y mejorando la resistencia al agua (Industries, 2009).

Una propiedad distintiva de Terrasil es que no depende únicamente de la reacción cementante tradicional, sino que actúa mediante la modificación molecular de la superficie del árido, lo que da lugar a una característica de impermeabilización permanente. Esta propiedad ayuda a combatir notablemente los problemas comunes en las obras civiles, tales como el hinchamiento, la capilaridad y la erosión. La adaptabilidad del producto se refleja en su capacidad de ser utilizado solo o combinado con cal, cemento o polímeros catiónicos, potenciando las propiedades hidráulicas, mecánicas y de resistencia química del suelo tratado (Industries, 2009).

Además, la mezcla con cemento protege el material de procesos degradantes como la carbonatación y la creación de etringita, que pueden afectar negativamente el terreno y las estructuras relacionadas a estos. En conjunto estos atributos transforman a Terrasil en una tecnología adaptable y eficiente, adecuada para una extensa gama de problemas geotécnicos y condiciones propias del terreno (Industries, 2009).

La última Ficha de Datos de Seguridad del Terrasil, elaborada y distribuida por Industrias Zydex en abril del año 2016, muestra un producto de tipo un aditivo utilizado mayormente en la alteración de betún y en el manejo de suelos áridos. En este documento se recopila información esencial sobre los riesgos vinculados a su manejo, las condiciones más adecuadas para su almacenamiento, las medidas de control de exposición requerida, los procedimientos para la gestión y eliminación segura de residuos, y el cumplimiento con las normativas internacionales en vigor (Zydex & Road, 2014) , (La et al., 2016).

Debido a su composición química, el producto Terrasil debe ser manipulado bajo condiciones controladas, evitando la exposición a agentes oxidantes fuertes como percloratos, peróxidos y ácidos, fuentes de humedad y cargas electrostáticas que puedan inducir reacciones no deseadas. La ficha de datos de seguridad señala que una manipulación inadecuada puede generar efectos agudos, como irritación ocular, cutánea, respiratoria y gastrointestinal, así como impactos crónicos sobre órganos internos como hígado, riñones, sistema nervioso central y cerebro. En este sentido, se establece la necesidad de un almacenamiento seguro y del uso obligatorio de equipo de

protección personal (EPP), incluyendo guantes, gafas de seguridad, tapabocas y vestimenta adecuada; mientras que, en caso de incendio, se recomienda la utilización de respiradores autónomos y trajes especializados, dado que el producto puede liberar vapores inflamables. Estas directrices forman parte de los protocolos de seguridad industrial, orientados a minimizar riesgos y garantizar la protección tanto del personal como del entorno en aplicaciones a escala de obra (Zydex & Road, 2014) (La et al., 2016)

El producto no está regulado por DOT (Departamento de Transporte de Estados Unidos), IMDG (Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas) o IATA (Asociación Internacional de Transporte Aéreo), pero si cumple con regulaciones REACH (Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias y Mezclas Químicas), TSCA (Ley de Control de Sustancias Tóxicas) , EINECS (Inventario Europeo de Sustancias Químicas Comercializadas Existentes) y NDSL (Lista de sustancias no domésticas), lo que evidencia su reconocimiento y control en diversas regiones (Zydex & Road, 2014) (La et al., 2016).

3. CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Determinación de dosificaciones

3.1.1 Caracterización fisicoquímica del suelo de estudio

Para el desarrollo del proyecto fue necesario identificar las propiedades físicas y químicas del suelo empleado, con el fin de establecer criterios técnicos que permitieran planificar adecuadamente los ensayos posteriores. Como referencia se tomó la tesis de grado de (Zea, 2025), titulada *“Caracterización geomecánica de materiales térreos con posible aplicación en la fabricación de adoquines artesanales en el municipio de Sora, Boyacá”*, la cual aportó información sobre suelos de la misma formación geológica (Tilatá) y sirvió como punto de partida para la recopilación de antecedentes analizados en la caracterización de suelos (Zea, 2025).

La caracterización del material se llevó a cabo mediante ensayos de granulometría, límites de contracción, resistencia al corte, determinación de la gravedad específica y límites de Atterberg, entre otros procedimientos, lo que permitió establecer con precisión el comportamiento y la calidad del suelo proveniente del municipio de Sora–Boyacá. A partir de estos resultados se definieron los parámetros técnicos de referencia para la planificación y ejecución de los ensayos complementarios en esta investigación.

3.2. Diseño de mezcla

3.2.1 Suelo control

De acuerdo con la información técnica disponible en la literatura especializada y los antecedentes experimentales previamente descritos (ensayos de corte directo, granulometría, gravedad específica, límites de contracción, sondeos y límites de Atterberg), se estableció que el rango de dosificación de cemento para su uso combinado con Terrasil se encuentra entre 1% y 3% en peso del suelo seco.

Estos valores se tomaron como referencia debido a que, dentro de este intervalo, se han observado mejoras significativas en las propiedades mecánicas y físicas del suelo; por ejemplo, un aumento de la resistencia a la compresión de aproximadamente 2.5%, una reducción del índice de plasticidad en un 31.91%%, y una optimización de la densidad seca máxima y de la humedad óptima de compactación, según los resultados de los ensayos de Proctor (Meeravali et al., 2020).

En este trabajo, se seleccionó un contenido de 1,5% de cemento, criterio adoptado con base en la metodología reportada por Meeravali et al. (2020), quienes aplicaron diversos ensayos geotécnicos y demostraron que este porcentaje permite un equilibrio adecuado entre resistencia, impermeabilidad y estabilidad del suelo tratado. Esta elección asegura la trabajabilidad de la mezcla, optimiza el desempeño mecánico y constituye una base confiable para la posterior adición de Terrasil en las mezclas experimentales.

3.2.2 Determinación de dosificaciones de terrasil

La determinación de la dosificación de Terrasil se estableció a partir de la revisión de estudios previos que evaluaron su desempeño en distintos tipos de suelos y mezclas estabilizadas. (Shankar Ghosh et al., 2023) reportaron que una proporción equivalente al 0,3% de nanomateriales, obtenida mediante la dosificación estándar SPL 1:1:300, mejoró significativamente la compactación, el CBR, la resistencia triaxial y la permeabilidad en mezclas de arena natural con aditivos. De manera complementaria, (Thomas et al., 2016) demostraron que una dosis del 0,5% de Terrasil generaba un equilibrio adecuado entre resistencia y estabilidad química, mientras que valores superiores (0,8%) ocasionaban reacciones incompletas. Finalmente, (Meeravali et al., 2020) concluyeron que en mezclas suelo–cemento dosis reducidas de Terrasil (0,03%) eran suficientes para optimizar propiedades como la permeabilidad y el CBR, evidenciando la eficacia del producto en combinación con aditivos cementantes.

3.3. Ensayos de laboratorio

3.3.1 *Relaciones humedad–densidad de mezclas de suelo cemento (Proctor)*

El ensayo relaciones humedad-densidad en mezclas de suelo-cemento, conocido como el ensayo de Proctor en suelo-cemento, tiene como finalidad determinar la humedad óptima de compactación y la densidad seca máxima, parámetros indispensables para la preparación y moldeo de especímenes en estudios de resistencia y durabilidad (Humedad et al., s/f).

En el marco del presente estudio, se realizaron cinco ensayos Proctor, uno correspondiente a la mezcla de suelo–cemento base (suelo control) y cuatro adicionales para las dosificaciones que integran Terrasil. Los resultados permitieron obtener las curvas de compactación de cada mezcla, identificando el contenido de humedad óptimo y el peso unitario seco máximo. Estos valores parámetros son la base para la correcta elaboración de los especímenes de laboratorio sean en probetas o en los adoquines y complementando para que se pueda hacer una buena comparación del efecto de las distintas dosificaciones de Terrasil en el comportamiento del material.

3.3.2 *Preparación y curado de probetas de suelo–cemento para pruebas de compresión y flexión en el laboratorio*

La norma INV E–613–13 dicta las directrices para la elaboración de probetas de suelo-cemento para pruebas de resistencia a la compresión y flexión, este estándar define el método para moldear y curar en laboratorio las muestras, garantizando un control estricto sobre las proporciones y volúmenes de materiales, en los que resaltan el cemento y el agua, con el objetivo de conseguir resultados fiables y reproducibles (Suelo et al., s/f).

La preparación de las probetas se realizó mezclando suelo, cemento y terrasil en proporciones determinadas teniendo en cuenta la humedad óptima de comparación y la densidad seca máxima valores determinados mediante el ensayo de Proctor, posteriormente las mezclas se compactaron en moldes cilíndricos y se curaron en condiciones controladas con el fin de estabilizar sus propiedades antes de los ensayos mecánicos. Estas etapas son fundamentales para evaluar con precisión la resistencia del material ante ciclos de humedecimiento y secado.

Para la presente investigación, se fabricaron cinco tipos de probetas, evaluándose tres especímenes por cada tipo, con el fin de obtener datos más representativos y aumentar la exactitud de los resultados experimentales.

Antes de iniciar la elaboración de las probetas se tuvo que hacer unos cálculos previos para cada tipo de probeta, explicados en la siguiente metodología:

En primer lugar, se calculó la densidad humedad

$$\text{Densidad húmeda } (\rho_m) = \rho_d * (1 + \frac{w}{100})$$

Donde:

- ρ_d : Densidad seca del espécimen de suelo-cemento compactado, kg/m^3
 w : Humedad optima de suelo-cemento compactado, %

Luego, Con la densidad humedad se calcula la masa húmeda

$$\text{Masa húmeda } (mh) = V * \rho$$

Donde:

- V : Volumen del molde, cm^3
 P_m : Densidad húmeda, g/cm^3

Ya conociendo la masa humedad que sería lo que teóricamente pesara la probeta, se calcula la masa seca para conocer las proporciones de los secos (suelo, cemento, terrasil).

$$\text{masa seca } (ms) = \frac{mh}{1 + w\%}$$

Donde:

- w : Humedad optima de suelo-cemento compactado, %
 mh : Masa húmeda, g

Después se calculó la cantidad de material por capas para compactar las probetas, se estableció que se harán 3 capas igual que en el ensayo de Proctor.

$$\text{Cantidad de material por capa} = \frac{mh}{3}$$

- mh : Masa húmeda, g

Se calculo una nueva masa húmeda, con el fin de que sobre un poco de material para poder enrasar bien la probeta y hacer pruebas de humedad.

$$\text{Nueva Masa húmeda } (Nm_h) = mh * (mh * 3\%) \quad (\text{redondeando a multiples de 5})$$

Donde:

- mh : Masa húmeda, g

Para que los cálculos tengan coherencia se halla una nueva masa seca.

$$\text{Nueva masa seca} = \frac{Nmh}{1 + w\%}$$

Donde:

w: Humedad optima de espécimen de suelo-cemento compactado, %
 Nmh: Nueva masa húmeda, g

Y por último en términos de mezcla, se calculó la cantidad de agua de la mezcla.

$$\text{Cantidad de agua} = \text{nueva masa húmeda} - \text{nueva masa seca}$$

Como no se tiene maquina compactadora para hacer probetas suelo-cemento se tiene que partir de una energía de compactación de 600 KN.m/m³ que es la misma con la que se trabaja cuando se hace un Proctor, calcular el número de golpes que se necesita por capa para que sean comparable.

$$N = \frac{Ee * V}{n * W * H}$$

Donde:

N: Número de golpes por capa
 Ee: Energía de compactación, 600 KN.m/m³
 V: Volumen del suelo compactado o volumen del molde, 0.00073109 m³
 n: Número de capas, 3
 W: Fuerza del martillo, 0.0245 KN
 H: Altura de caída libre del martillo, 0.305 m

Después de la realización de los ensayos mecánicos, se calculan los siguientes parámetros para conocer las características reales de las probetas

Se calcula la humedad real

$$w_{real} (\%) = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Donde:

Mh: Masa de la probeta húmeda (antes de secar en horno), g

Ms: Masa de la probeta seca al horno (110 ± 5 °C, hasta masa constante), g

También se calcula el peso unitario seco (al horno) real

$$\gamma_{d,real} = \frac{Ms}{V}$$

Donde:

V: Volumen de la probeta (en el momento del pesado), m³ o cm³

Ms: Masa de la probeta seca al horno (110 ± 5 °C, hasta masa constante), g

Luego se calculó el contenido de cemento real, para saber el contenido real de cemento primero se tuvo que conocer la fracción de cemento por mezcla, porqué de la mezcla total con la que se trabajó tuvo sobrantes.

$$Pc = \frac{Mc, lote}{Ms, lote - Mc, lote}$$

Donde:

Mc, lote: Masa de cemento incorporada en la mezcla, g

Ms, lote: Masa del suelo ceno usado en la mezcla, g

Conociendo la fracción de cemento de la mezcla se calculó la cantidad de cemento por probeta.

$$C_{realp} = Pc * Ms$$

Donde:

Pc: Fracción de cemento por mezcla

Ms: Masa de la probeta seca al horno (110 ± 5 °C, hasta masa constante), g

Se tienen dos fórmulas para calcular el contenido de cemento real por probeta, la primera la cantidad de cemento sobre el suelo de la probeta y la segunda sobre el peso total de la probeta, se debe tener en cuenta que en la mezcla se añadió terrasil por ende la segunda fórmula es más fiable.

$$\%C(\text{sobre suelo}) = \frac{C_{realp}}{M_s - C_{realp}} * 100$$

Donde:

C_{realp} : Cemento real por probeta, g

M_s : Masa de la probeta seca al horno (110 ± 5 °C, hasta masa constante), g

$$\%C(\text{sobre total}) = \frac{C_{realp}}{M_s} * 100$$

Donde:

C_{realp} : Cemento real por probeta, g

M_s : Masa

3.3.3 Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento

El ensayo de resistencia a la compresión del suelo-cemento, consiste en someter cilindros moldeados a una carga axial progresiva hasta llegar a su falla, con el fin de determinar su capacidad de soportar esfuerzos de compresión (Compresi & Suelo, s/f).

Los resultados mecánicos, se registraron la carga máxima soportada por cada espécimen y resistencia unitaria a la compresión, resultados que se compararon en una gráfica con el fin de verificar la resistencia relativa del suelo-cemento para optimizar el diseño de las mezclas. Se fallaron todas las probetas que se venían apreciando en los ensayos anteriores.

Se calculo la resistencia unitaria a la compresión de la siguiente forma:

$$\sigma_c = \frac{P_{max}}{A}$$

Donde:

P_{max}: Carga máxima registrada en el ensayo, N o kN

A: Área transversal de la sección cargada, m² o mm²

3.3.4 Resistencia a la compresión de adoquines de concreto

En esta investigación se emplearon, en primer lugar, especímenes cilíndricos de suelo–cemento elaborados con distintas dosificaciones, con el propósito de identificar cuál presentaba el mejor comportamiento a compresión (Compresi & Concreto, s/f). A partir de estos resultados se seleccionó la mezcla de mayor resistencia, la cual se utilizó para fabricar tres adoquines experimentales siguiendo la misma metodología aplicada en los cilindros. Conforme a la Norma Técnica Colombiana NTC 2017 “Adoquines de concreto”(NTC 2017, 2018), los adoquines se moldearon con dimensiones de 200 mm de longitud, 100 mm de ancho y 80 mm de espesor, cumpliendo así los parámetros geométricos exigidos. En primer lugar, la relación entre la longitud nominal (ln) y el espesor estándar (ee) es de $200/80 = 2,5$, valor inferior al límite máximo de 5 definido por la norma, lo que garantiza la estabilidad dimensional de la unidad. En segundo lugar, el espesor de 80 mm se encuentra dentro de los valores normalizados, al ser superior al mínimo requerido de 40 mm para uso peatonal y de 60 mm para uso vehicular, lo cual permite su aplicación en ambos tipos de tránsito. Finalmente, las dimensiones adoptadas corresponden a múltiplos de 20 mm, en concordancia con lo recomendado por la NTC 2017 (NTC 2017, 2018). Estos adoquines fueron posteriormente comparados con otros elaborados únicamente con suelo–cemento, sin la adición de Terrasil, Cabe resaltar que tanto en los ensayos de cilindros como en los de adoquines, se evaluó la resistencia a la compresión, entendiendo que ambas pruebas actúan de manera equivalente y complementaria.

Este procedimiento buscó optimizar recursos y centrar la validación en la dosificación más prometedora, sin dejar de lado la comparación con el material tradicional, asegurando así una evaluación práctica de la viabilidad de Terrasil en la producción de adoquines.

3.3.5 Absorción de agua por los adoquines de concreto

El ensayo de absorción de agua se aplicó a tres adoquines elaborados con la mezcla seleccionada en el estudio, siguiendo el procedimiento normativo para determinar el porcentaje de agua absorbida. La prueba consistió en registrar la masa de cada adoquín en estado seco, someterlo posteriormente a inmersión en agua durante el tiempo indicado y medir la masa saturada. Con estos valores se calculó el porcentaje de absorción de agua, parámetro que permitió complementar la evaluación experimental del comportamiento de los adoquines fabricados (Por & Concreto, s/f).

4. CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1. Determinación de dosificaciones

4.1.1 Caracterización de suelo

4.1.1.1 Granulometría

Según los resultados de laboratorio del ensayo de granulometría reportado por (Zea, 2025) proveniente del municipio de Soraca, Boyacá mostró una clasificación SUCS de GM (grava limosa) y GC (grava arcillosa) (Zea, 2025). Esta caracterización evidencia la presencia de fracciones finas como limos y arcillas, que inciden de manera directa en propiedades geotécnicas como la permeabilidad y la compresibilidad del material. La mezcla de gravas con finos otorga al suelo un comportamiento heterogéneo: mientras la fracción gruesa aporta cierta capacidad de soporte, el contenido de limos y arcillas reduce su desempeño hidráulico y aumenta su susceptibilidad a deformaciones. Estos resultados son fundamentales, ya que permiten anticipar el comportamiento del material en condiciones de compactación y estabilización, aspectos claves para el diseño y ejecución de esta tesis.

4.1.1.2 Ensayo de límites de atterberg

El ensayo de límites de Atterberg realizado al suelo de Soracá permitió diferenciar dos fracciones finas con comportamientos claramente distintos. En la fracción fina de arcilla, con clasificación USC de CH (arcillas inorgánicas de alta plasticidad), se tiene un Límite líquido (LL) de 56.429%, un límite plástico (LP) de 27.273%, un índice de plasticidad (IP) de 29.156% y un índice de consistencia de 0.68, este tipo de suelo tiene una gran capacidad de retener agua y

comportamientos expansivos, lo cual puede ser problemático en obras de ingeniería (asentamientos diferenciales, expansiones) (Zea, 2025).

En la otra porción fina que es de limos, se tiene una clasificación USC de ML (limos inorgánicos de baja plasticidad), se tiene un Límite líquido (LL) de 30.481 %, un límite plástico (LP) de 25.000%, un índice de plasticidad (IP) de 5.481% y un índice de consistencia de 1.82, este suelo a diferencia del anterior es menos plástico y más estable volumétricamente, pero tiene poca cohesión y puede perder resistencia fácilmente cuando se satura (Zea, 2025).

4.1.1.3 Límites de contracción de suelos finos

El ensayo de límite de contracción aplicado al suelo de Soracá permitió evaluar directamente su susceptibilidad a la reducción volumétrica durante el secado, según los resultados de laboratorio del ensayo de límites de contracción de suelos finos reportado por (Zea, 2025). En la capa más superficial que es la que donde se extrajo todo el material para la elaboración de esta tesis, se tienen los siguientes resultados:

Límite de contracción (LC): 67.31

Relación de contracción (R): 0.26

Cambio volumétrico (CV): 1.24

Contracción lineal: (CL): 0.41

El suelo analizado tiene un límite de contracción (67.31%) se interpreta un poco alto, lo que sugiere que requiere perder mucha agua antes de estabilizar su volumen. Sin embargo, los valores relativamente bajos de relación de contracción (0.26), cambio volumétrico (1.24%) y contracción lineal (0.41%) indican que, en la práctica, el material no es muy susceptible a sufrir grandes reducciones de volumen ni a presentar fisuras por contracción durante ciclos de secado. Esto sugiere que, aunque el suelo retiene agua en su estructura, mantiene una estabilidad volumétrica aceptable, lo que favorece su desempeño como material de base para mezclas de suelo–cemento–Terrasil en este estudio

4.1.1.4 Resistencia al corte directo en condición consolidada drenada (CD)

El ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD) realizado al suelo de Soracá permitió caracterizar su resistencia al esfuerzo cortante reportado por (Zea, 2025). En este caso se tuvieron 3 muestras de un sondeo que queda justo en el punto de extracción, se extraen los siguientes resultados:

1. Arcillas limosas marrones y pardo amarillentas

Con un esfuerzo máximo cortante de 56 KPa y un esfuerzo normal de 18.99 KPa

2. Limos arcillosos pardo amarillentos y grises

Con un esfuerzo máximo cortante de 58.25 KPa y un esfuerzo normal de 38.00 KPa

3. Limos arcillosos pardo amarillentos y grises

Con un esfuerzo máximo cortante de 60 KPa y un esfuerzo normal de 79.99 KPa

Teniendo como parámetros un promedio de ángulo de fricción de 3.8 Grados y una cohesión de 55 KPa

Estos valores indican que la resistencia al corte del material está controlada principalmente por la cohesión y no por la fricción, lo que corresponde a un suelo de tipo fino en este caso tipo limos y arcillas, con comportamiento cohesivo, blando y con baja capacidad de soporte. se evidenció una fracción significativa de finos con plasticidad baja a moderada. En consecuencia, la naturaleza cohesiva del suelo justifica la necesidad de procesos de estabilización que permitan mejorar su resistencia y durabilidad para aplicaciones en infraestructura vial.

4.1.1.5 Ensayo de peso específico relativo de sólidos en suelos

El ensayo de peso específico relativo de los sólidos (gravedad específica) aplicado al suelo de Soracá, según los resultados reportado por (Zea, 2025), se extraen los siguientes resultados:

Gs (gravedad específica) sometida a 20 °C: 2.61, 2.57, 2.79 y 2.72. El rango va de 2.57 a 2.79 y el promedio es aproximadamente de 2.67. Estos valores están dentro del rango típico de suelos inorgánicos minerales (2.60–2.80), lo que sugiere bajo contenido orgánico, la confirmación de este comportamiento respalda la clasificación del suelo como inorgánico, coherente con los resultados de los demás ensayos de caracterización.

Estos valores de gravedad específicos se podrían tener en cuenta para cálculos posteriores como el contenido de vacíos, estimación de humedad óptima de compactación, y para interpretar el comportamiento mecánico del suelo.

4.1.1.6 Resumen

Tabla 3 Resultados de ensayos de caracterización del suelo de Soracá (Zea, 2025).

Ensayo	Resultados principales	Clasificación / Parámetros	Interpretación geotécnica
Granulometría	Suelo clasificado como GM (grava limosa) y GC (grava arcillosa)	Mezcla heterogénea: grava + limos + arcillas	La fracción gruesa aporta soporte, pero los finos disminuyen permeabilidad y aumentan compresibilidad.
Límites de Atterberg	CH (arcillas inorgánicas de alta plasticidad): LL = 56.43 %, LP = 27.27 %, IP = 29.16 %, Ic = 0.68.	CH: Alta plasticidad y expansividad.	El suelo combina fracciones expansivas (arcillas CH) con fracciones estables
Límite de contracción	LC = 67.31 %, R = 0.26, CV = 1.24 %, CL = 0.41 %	Alta retención de agua, baja contracción efectiva	Aunque el suelo pierde mucha agua antes de estabilizarse, no presenta gran reducción volumétrica ni fisuras significativas al secar.
Resistencia al corte directo (CD)	Tres muestras: $\tau_{\text{máx}} = 56, 58.25 \text{ y } 60 \text{ KPa}$ $\sigma_n = 18.99, 38.00, 79.99 \text{ KPa}$ $\phi = 3.9^\circ, 2.8^\circ \text{ y } 4.7^\circ$ (bajo), $c = 55, 56, \text{ y } 57 \text{ KPa}$, (alto)	Material cohesivo, resistencia dominada por cohesión	Se trata de un suelo blando, con bajo ángulo de fricción, que requiere estabilización para mejorar capacidad de soporte.
Peso específico relativo de sólidos (Gs)	2.61, 2.57, 2.79, 2.72 Promedio = 2.67	Dentro del rango típico de suelos minerales inorgánicos (2.60–2.80)	Confirma bajo contenido orgánico y coherencia con los demás ensayos.

4.1.2 Suelo control

Para el diseño de mezcla de suelo-cemento se adoptó en este estudio una dosificación de 1.5% de cemento como referencia para las mezclas con Terrasil a partir de dos valoraciones principales. En primer lugar, la empresa suministradora del Terrasil (Industries, 2009) señala que el aditivo puede combinarse con cemento en un rango de 1 a 3 %, garantizando la compatibilidad entre ambos materiales. En segundo lugar, un estudio experimental previo reportó resultados favorables al emplear precisamente 1.5 % de cemento en suelos arcillosos mezclados con Terrasil, mostrando mejoras en propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y la capacidad de soporte (Meeravali et al., 2020).

Desde esta perspectiva, la mezcla suelo-cemento en la presente investigación adopta el 1.5 % de cemento como dosificación de referencia para las mezclas suelo–cemento–Terrasil, lo que permite establecer comparaciones consistentes entre diferentes variaciones de dosificación de Terrasil y evaluar su efecto sin que la cantidad de cemento introduzca sesgos en los resultados.

4.1.3 Dosificaciones Suelo-cemento-terrasil

A partir de la revisión de las investigaciones con respecto al uso de terrasil en mezclas de suelos, se evidenció que las dosificaciones moderadas de Terrasil (0,03 %–0,5 %) son las más eficientes para mejorar las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo, evitando tanto el desperdicio de producto como los problemas asociados a sobredosificaciones. Por ello, en el presente estudio se seleccionaron cuatro porcentajes de análisis (0,03 %, 0,15 %, 0,3 % y 0,5 %), que permiten cubrir el rango de comportamiento reportado en la literatura y evaluar comparativamente su desempeño en condiciones locales, mezclas que se realizaron partiendo de lo que se estableció como suelo control.

4.2. Ensayos de laboratorio

4.2.1 Relaciones humedad–densidad de mezclas de suelo cemento

Se realizaron cinco ensayos de relación humedad–densidad de mezcla suelo-cemento (Proctor), correspondientes a cada uno de los porcentajes establecidos de Terrasil, más un ensayo de referencia con suelo-cemento sin aditivo.

En cada ensayo Proctor se registraron tres puntos correspondientes a diferentes contenidos de humedad, a partir de estos datos experimentales se construyó la curva de compactación, la cual fue ajustada mediante una ecuación polinómica de segundo grado que representa la relación entre la densidad seca y el contenido de humedad. Posteriormente, al derivar y despejar dicha ecuación se determinaron de manera precisa los valores de humedad óptima de compactación y la densidad seca máxima, parámetros fundamentales para evaluar el comportamiento del suelo frente a los procesos de compactación.

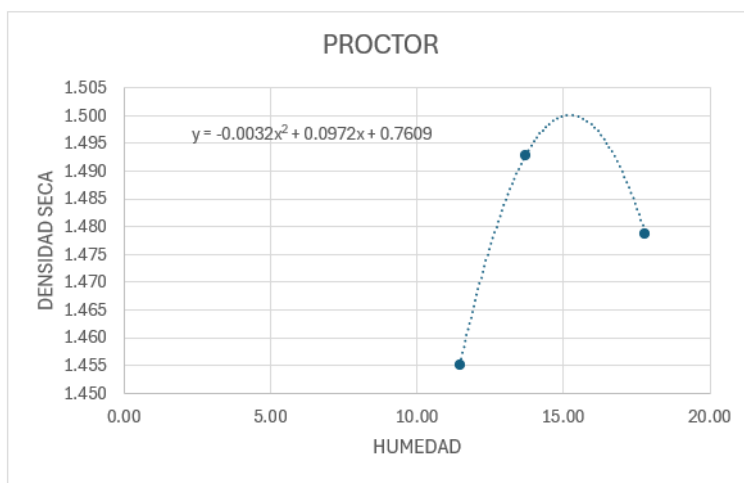
De igual manera todos los ensayos de Proctor se realizaron con el método A con el fin de que sean comparables, se usó el material pasa en su totalidad el tamiz malla n° 4 o de 4.75mm de abertura, el material estaba completamente seco, el cemento estaba en óptimas condiciones y el terrasil fue disuelto en agua y agregado a forma de spray.

- Suelo con 1.5% de cemento sin terrasil

Se presenta la curva de compactación para esta mezcla suelo-cemento.

Figura 1 Curva de compactación de suelo-cemento.

HUMEDAD CORREGUIDA	DENSIDAD SECA
11.46	1.455
13.70	1.493
17.80	1.479



Fuente: (Autoría propia)

El análisis de esta curva dada por la ecuación $(y) = -0.0032x^2 + 0.0972x + 0.7609$ permite evidenciar que, a humedades superiores al 17 %, la densidad seca disminuye, lo que genera la caída de la curva. Esta tendencia hace posible identificar de manera precisa el punto máximo, correspondiente a la densidad seca máxima y a la humedad óptima de la mezcla. Para este caso, el valor de densidad seca máxima obtenido fue de 1,499 g/cm³ y la humedad óptima fue de 15,2 %.

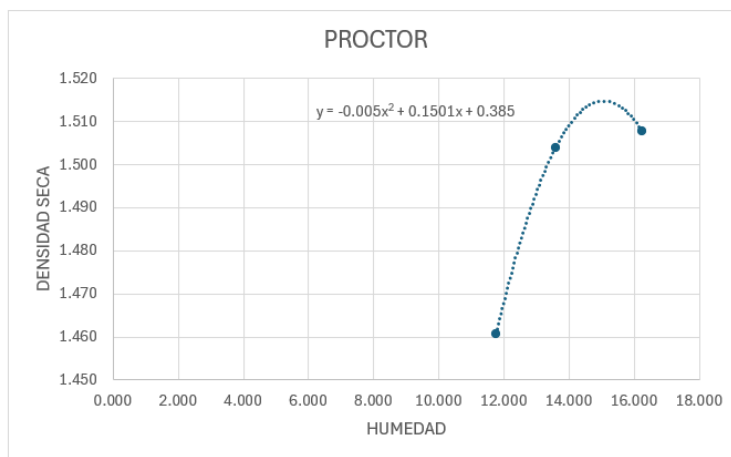
Estos valores resultan relevantes porque permiten establecer las condiciones de compactación más eficientes para la mezcla, lo que incide directamente en la calidad del material y en la viabilidad de su uso en la fabricación de probetas y adoquines. Una adecuada relación humedad–densidad garantiza una mayor resistencia mecánica y una mejor durabilidad frente a las condiciones de servicio. Este análisis se extiende igualmente a los cinco ensayos Proctor realizados, puesto que en todos ellos se evaluaron las mismas variables, lo que asegura la coherencia y comparabilidad de los resultados obtenidos.

- Suelo con 1.5% de cemento y 0.03% de terrasil

Se presenta la curva de compactación para esta mezcla suelo-cemento-aditivo.

Figura 2 Curva de compactación de suelo-cemento+0.03% de terrasil.

HUMEDAD CORREGUIDA (%)	DENSIDAD SECA (g/cm ³)
11.765	1.461
13.577	1.504
16.247	1.508



Fuente: (Autoría propia)

El análisis de la curva dada por la ecuación $(y) = -0.005x^2 + 0.1501x + 0.385$ no da a conocer que a humedades superiores al 16 %, la densidad seca disminuye, lo que genera la caída de la curva. Esta tendencia hace posible identificar de manera precisa el punto máximo, correspondiente a la densidad seca máxima y a la humedad óptima de la mezcla. Para este caso, el valor de densidad seca máxima obtenido fue de 1,5115 g/cm³ y la humedad óptima fue de 15 %.

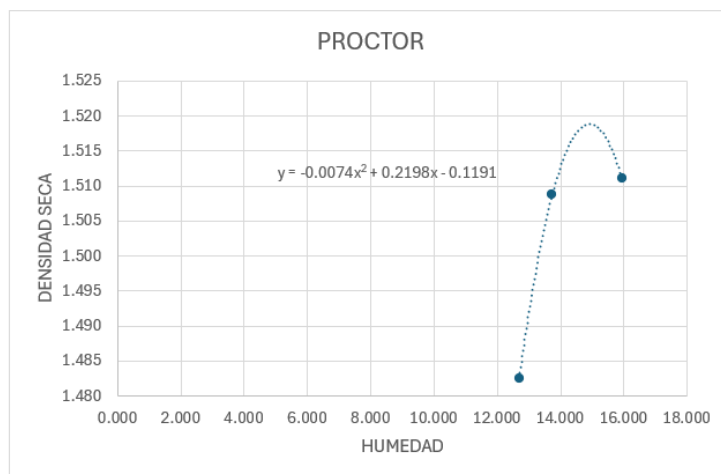
Valores que de igual forma que en la mezcla suelo-cemento son relevantes porque establecer las condiciones de compactación más eficientes para la mezcla, lo que incide directamente en la calidad del material y en la viabilidad de su uso en la fabricación de probetas y adoquines.

- Suelo con 1.5% de cemento y 0.15% de terrasil

Se presenta la curva de compactación para esta mezcla suelo-cemento-aditivo.

Figura 3 Curva de compactación de suelo-cemento+0.15% de terrasil.

HUMEDAD CORREGUIDA (%)	DENSIDAD SECA (g/cm ³)
12.684	1.482
13.740	1.509
15.933	1.511



Fuente: (Autoría propia)

El análisis de esta curva dada por la ecuación $(y) = -0.0074x^2 + 0.2198x - 0.1191$ evidencia que, a humedades cercanas al 16 %, la densidad seca disminuye, lo que genera la caída de la curva. Esta tendencia hace posible identificar de manera precisa el punto máximo, correspondiente a la densidad seca máxima y a la humedad óptima de la mezcla. Para este caso, el valor de densidad seca máxima obtenido fue de 1,5130 g/cm³ y la humedad óptima fue de 14,8 %.

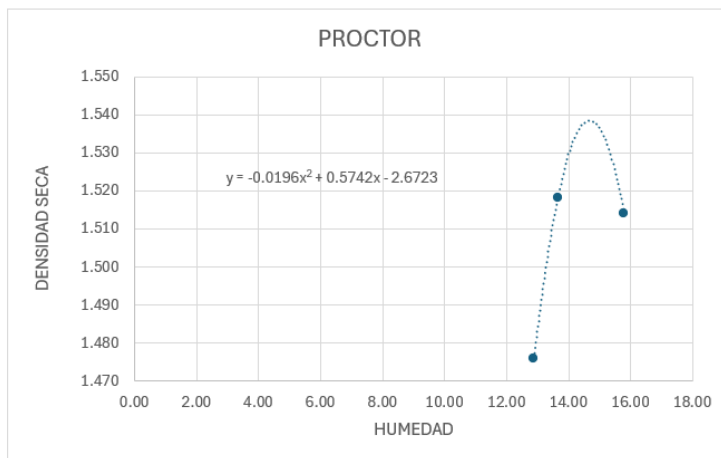
Valores que igual que en la mezcla anterior, resultan relevantes porque permiten establecer las condiciones de compactación más eficientes para la mezcla, lo que incide directamente en la calidad del material y en la viabilidad de su uso en la fabricación de probetas y adoquines.

- Suelo con 1.5% de cemento y 0.3% de terrasil

Se presenta la curva de compactación para esta mezcla suelo-cemento-aditivo.

Figura 4 Curva de compactación de suelo-cemento+0.3% de terrasil.

HUMEDAD CORREGUIDA (%)	DENSIDAD SECA (g/cm ³)
12.88	1.476
13.65	1.518
15.78	1.514



Fuente: (Autoría propia)

El análisis de esta curva dada por la ecuación $(y) = -0.0196x^2 + 0.5742x - 2.6723$ da a entender, a humedades cercanas al 16 %, la densidad seca disminuye, lo que genera la caída de la curva. Esta tendencia hace posible identificar de manera precisa el punto máximo, correspondiente a la densidad seca máxima y a la humedad óptima de la mezcla. Para este caso, el valor de densidad seca máxima obtenido fue de 1,5330 g/cm³ y la humedad óptima fue de 14,6 %.

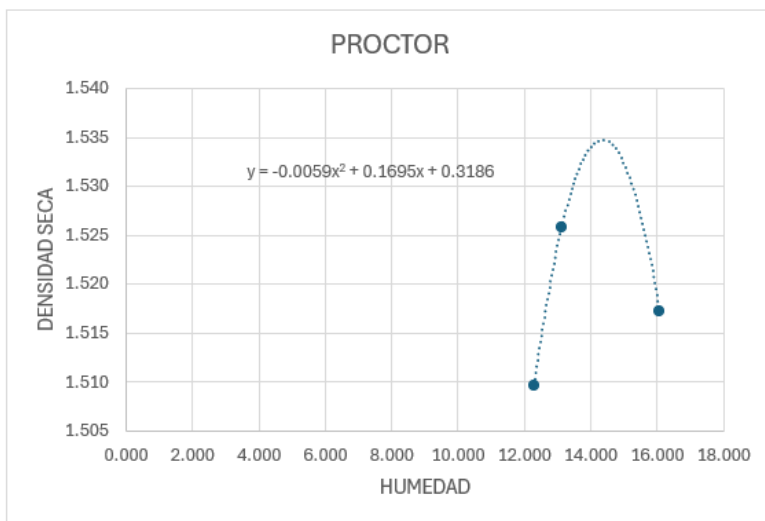
Valores que igual que en la mezcla anterior, resultan relevantes porque permiten establecer las condiciones de compactación más eficientes para la mezcla, lo que incide directamente en la calidad del material y en la viabilidad de su uso en la fabricación de probetas y adoquines.

- Suelo con 1.5% de cemento y 0.5% de terrasil

Se presenta la curva de compactación para esta mezcla suelo-cemento-aditivo.

Figura 5 Curva de compactación de suelo-cemento+0.5% de terrasil.

HUMEDAD CORREGUIDA (%)	DENSIDAD SECA (g/cm3)
12.291	1.510
13.117	1.526
16.077	1.517



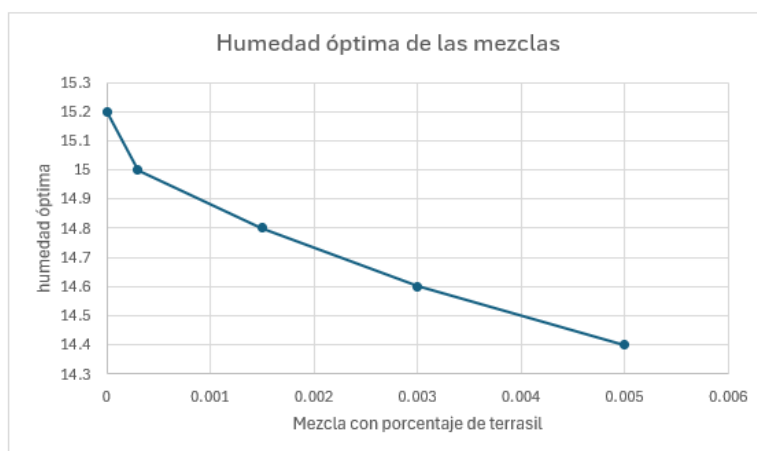
Fuente: (Autoría propia)

El análisis de esta curva dada por la ecuación $(y) = -0.0059x^2 + 0.1695x + 0.3186$, a humedades cercanas al 16 %, la densidad seca disminuye, lo que genera la caída de la curva. Esta tendencia hace posible identificar de manera precisa el punto máximo, correspondiente a la densidad seca máxima y a la humedad óptima de la mezcla. Para este caso, el valor de densidad seca máxima obtenido fue de 1,5360 g/cm³ y la humedad óptima fue de 14,4 %.

Valores que igual que todas las mezclas, resultan relevantes porque permiten establecer las condiciones de compactación más eficientes para la mezcla, lo que incide directamente en la calidad del material y en la viabilidad de su uso en la fabricación de probetas y adoquines. Después de consolidar los resultados dados de los 5 ensayos que se hicieron de relación humedad-densidad de mezclas suelo-cemento se obtuvieron las siguientes gráficas.

Figura 6 Gráficas de contenido óptimo de humedad con respecto a las distintas dosificaciones de terrasil.

Cantidad de terrasil	Humedad óptima
0	15.2
0.03%	15
0.15%	14.8
0.30%	14.6
0.50%	14.4

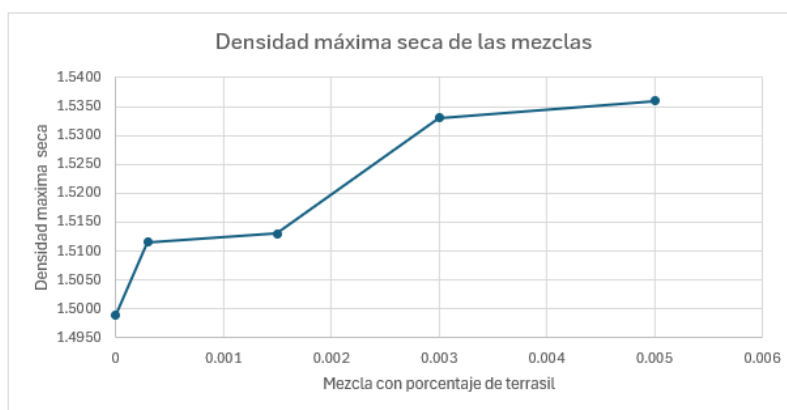


Fuente: (Autoría propia)

El análisis de la gráfica (figura 6) evidencia que la incorporación de Terrasil en las mezclas genera una disminución progresiva de la humedad óptima de compactación. Este comportamiento sigue una relación inversamente proporcional, a mayor cantidad de aditivo, menor es el contenido de humedad requerido para alcanzar la máxima compactación. En conclusión, el Terrasil reduce la afinidad del suelo por el agua, optimizando el proceso de compactación y mejorando la eficiencia del material.

Figura 7 Gráficas de densidad seca máxima con respecto a las distintas dosificaciones de terrasil.

Cantidad de terrasil	Densidad maxima seca
0	1.4990
0.03%	1.5115
0.15%	1.5130
0.30%	1.5331
0.50%	1.5360



Fuente: (Autoría propia)

El uso de Terrasil produce un incremento progresivo en la densidad máxima seca de las mezclas como se evidencia en la (figura 7), lo cual repercute directamente en una mayor resistencia y estabilidad del material, este comportamiento se explica que a medida que se incorpora el aditivo, la mezcla adquiere una estructura más compacta. Además, partiendo de que el Terrasil es un líquido viscoso con una densidad ligeramente superior a la del agua, su incorporación favorece la reducción de vacíos y contribuye a que el suelo tratado se vuelva más denso.

Se deduce que un aporte clave de Terrasil es su capacidad de lubricar las partículas del suelo durante el proceso de compactación, esta acción reduce la fricción interna, mejora la distribución de partículas y facilita alcanzar densidades de campo incluso superiores, aun con humedades ligeramente diferentes al óptimo. De manera similar, (Industries, 2009) reportó resultados equivalentes mediante ensayos de control de densidades aplicando el método del cono de arena, donde se evidenció que la presencia del aditivo favorece la compactación al permitir mayores valores de densidad seca respecto a la mezcla sin tratamiento. Este tipo de resultados respalda la efectividad de Terrasil como un aliado para garantizar la calidad y uniformidad de la compactación en obra.

4.2.2 Preparación y curado de probetas de suelo–cemento para pruebas de compresión y flexión en el laboratorio

El suelo en su estado inicial se recibió en forma de bloques, para su preparación se sometió a un proceso de secado, trituración y posterior tamizado, empleándose únicamente el material que logró pasar en su totalidad por el tamiz N° 4. Con este material se elaboraron las probetas de suelo–cemento y suelo-cemento-aditivo destinadas a las pruebas de compresión.

En total se prepararon cinco tipos de probetas, y para cada condición de preparación y curado se fabricaron tres especímenes, siguiendo lo estipulado por la normatividad vigente. La humedad de diseño utilizada correspondió a la humedad óptima determinada en el ensayo Proctor, considerando cinco variaciones diferentes. De igual manera, la densidad seca máxima de diseño empleada en la elaboración de las probetas se tomó de los valores obtenidos en dicho ensayo. Finalmente, el contenido de cemento se mantuvo constante en todas las mezclas, estableciéndose en un 1.5% conforme al suelo control.

Tabla 4 Datos utilizados para la elaboración de las probetas.

Parámetros para utilizar	Suelo-cemento	0.03%	0.15%	0.3%	0.5%
Densidad máxima seca (g/cm³)	1.4990	1.5115	1.5130	1.5331	1.5360
Humedad óptima (%)	15.2	15	14.8	14.6	14.4
Densidad húmeda (g/cm³)	1.7269	1.7382	1.74642	1.7569	1.7572
Cantidad de cemento (g)	17.45	17.48	17.508	17.54	17.67
Cantidad de suelo (g)	1145.74	1147.39	1147.98	1148.23	1148.9
Cantidad de agua(ml)	176.8	174.78	172.75	170.71	168.67
Cantidad de terrasil (g)	0	0.3496	1.7508	3.51	5.8556
Número de golpes por capa	20	20	20	20	20
Capas	3	3	3	3	3

La tabla 2 presenta los parámetros utilizados en la elaboración de probetas de suelo–cemento y suelo-cemento-aditivo con diferentes dosificaciones de Terrasil (0.03%, 0.15%, 0.3% y 0.5%).

Como datos de entrada se tuvieron en cuenta la humedad optima de compactación y la densidad seca máxima, con estos datos se calcularon las cantidades de materiales secos y materiales húmedos para realizar la mezcla, en cuanto a los materiales utilizados, la cantidad de cemento y la cantidad de suelo se mantienen prácticamente constantes, mientras que la cantidad de agua disminuye gradualmente conforme aumenta la dosificación del aditivo, coherente con la reducción de la humedad óptima. La columna de cantidad de Terrasil refleja la dosificación correspondiente en gramos, desde 0 g en la mezcla base hasta 5.8556 g en la dosificación más alta.

Finalmente, se presentan los parámetros de ejecución empleados en la elaboración de las probetas, los cuales aseguran la comparabilidad de los resultados al mantener constante la fuerza de compactación definida en el ensayo Proctor. Tanto el número de golpes por capa (20) como el número de capas (3) se conservaron iguales en todas las mezclas, lo que garantiza uniformidad en la metodología aplicada y confiabilidad en la evaluación de los resultados.

A continuación, en la tabla 3 se presenta las cinco clases de probetas correspondientes a las diferentes dosificaciones de Terrasil (0%, 0.03%, 0.15%, 0.3% y 0.5%). Para cada tipo de probeta se prepararon tres especímenes, los cuales fueron identificados con las nomenclaturas M1, M2 y M3, manteniendo este esquema en todas las dosificaciones con el fin de organizar los resultados y facilitar su análisis comparativo.

Tabla 5 Datos extraídos de las probetas solicitados por la INV E-613-13.

Propiedades de las probetas	M1 0%	M2 0%	M3 0%	M1 0.03%	M2 0.03%	M3 0.03%
Masa de suelo usado en la mezcla	1145.7	1145.7	1145.7	1147.39	1147.39	1147.39
Masa de la probeta húmeda, g	1247	1252	1249.5	1261.9	1266.3	1264.1
Densidad húmeda, g/cm3	1.721	1.719	1.720	1.735	1.74	1.737
Masa de la probeta seca	1082.9	1087	1084.5	1097	1101.4	1105.9
Masa de cemento usado en la mezcla, g	17.4	17.4	17.4	17.5	17.5	17.5
Volumen de la probeta, cm3	724.697	728.352	726.543	727.343	727.717	727.611
Humedad real, %	15.2	15.2	15.2	15	15	15.7
Peso unitario seco, g/cm3	1.494	1.492	1.493	1.508	1.514	1.515
Fracción de cemento	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
Cantidad de cemento por probeta, g	16.2	16.261	16.223	16.480	16.546	16.558
%Cemento (sobre suelo)	1.519	1.519	1.519	1.525	1.525	1.525
%Cemento (sobre total)	1.496	1.496	1.496	1.502	1.502	1.502

Propiedades de las probetas	M1 0.15%	M2 0.15%	M3 0.15%	M1 0.3%	M2 0.3%	M3 0.3%
Masa de suelo usado en la mezcla	1147.98	1147.980	1147.980	1148.237	1148.237	1148.237
Masa de la probeta húmeda, g	1268.4	1258.6	1260.5	1279.8	1281.2	1274.4
Densidad húmeda, g/cm3	1.736	1.733	1.735	1.756	1.754	1.753
Masa de la probeta seca	1105.9	1097.1	1098.2	1116.3	1118.5	1112.1
Masa de cemento usado en la mezcla, g	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5
Volumen de la probeta, cm3	730.456	726.384	726.475	728.840	727.716	726.920
Humedad real, %	14.7	14.7	14.8	14.6	14.5	14.6
Peso unitario seco, g/cm3	1.514	1.510	1.512	1.532	1.532	1.530
Fracción de cemento	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
Cantidad de cemento por probeta, g	16.605	16.473	16.490	16.758	16.791	16.695
%Cemento (sobre suelo)	1.524	1.524	1.524	1.524	1.524	1.524
%Cemento (sobre total)	1.502	1.502	1.502	1.501	1.501	1.501

Propiedades de las probetas	M1 0.5%	M2 0.5%	M3 0.5%
Masa de suelo usado en la mezcla	1147.902	1147.902	1147.902
Masa de la probeta húmeda, g	1272.5	1258.8	1254.8
Densidad húmeda, g/cm3	1.757	1.754	1.749
Masa de la probeta seca	1113.5	1100.7	1097.8
Masa de cemento usado en la mezcla, g	17.6	17.6	17.6
Volumen de la probeta, cm3	724.303	717.564	717.353
Humedad real, %	14.3	14.4	14.3
Peso unitario seco, g/cm3	1.537	1.534	1.530
Fracción de cemento	0.015	0.015	0.015
Cantidad de cemento por probeta, g	16.815	16.621	16.578
%Cemento (sobre suelo)	1.533	1.533	1.533
%Cemento (sobre total)	1.510	1.510	1.510

En estas propiedades calculadas se logró identificar el comportamiento real de las distintas probetas elaboradas, considerando la humedad efectiva, la cantidad exacta de cemento y la densidad tanto seca como húmeda, determinadas a partir del ensayo Proctor. De esta manera, se

comprobó que los procedimientos de mezcla, compactación y curado fueron adecuados, lo que permitió obtener resultados más precisos y comparables entre sí, aumentando la confiabilidad en el establecimiento de relaciones entre las variables. Cabe resaltar que el sustento teórico de este análisis radica en la metodología planteada, así como en las fórmulas utilizadas para el cálculo de dichas cantidades y parámetros, las cuales respaldan la validez de los resultados obtenidos.

4.2.3 Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento

Al igual que en ensayo anterior se tuvieron las mismas cinco clases de probetas correspondientes a las diferentes dosificaciones de Terrasil (0%, 0.03%, 0.15%, 0.3% y 0.5%). Para cada tipo de probeta se prepararon tres especímenes, los cuales fueron identificados con las nomenclaturas M1, M2 y M3, manteniendo este esquema en todas las dosificaciones con el fin de organizar los resultados y facilitar su análisis comparativo.

En cuanto a las dimensiones geométricas, todas las probetas presentaron un diámetro cercano a 78 mm y una altura promedio de 152 mm, generando un volumen aproximado de 726.000 mm³ y un área transversal de 4770 mm², aunque para tener datos más exactos en los cálculos se tomaron las medidas exactas de cada probeta.

La edad de todos los especímenes fue de 8 días, las probetas fueron sometidas a un curado húmedo, el primer día se curó en el mismo molde donde se hizo la compactación, luego se sacó y terminó el curado húmedo 7 días después, manteniendo la humedad entre 20°C ± 5°C y una humedad relativa de entre 75% y 95%.

- Suelo con 1.5% de cemento

En este mismo orden de ideas, las probetas correspondientes al 0% representan las mezclas de suelo sin adición de Terrasil, es decir, aquellas que actúan como control para contrastar el efecto del aditivo frente a las demás dosificaciones identificadas como M1 0%, M2 0% Y M3 0%.

Tabla 6 Datos extraídos de las probetas de 0% solicitados por la INV E-614-13.

Propiedades de las probetas	M1 0%	M2 0%	M3 0%
Carga máxima, N	1482	1389	1425
Carga aproximada a los 40N más cercanos	1480	1400	1440
Factor de conversión, 1.1	1628	1540	1584
Promedio, N		1584	
Diámetro, mm	77.880	78.030	77.910
Altura, mm	152.130	152.310	152.4
Volumen, mm³	724697.282	728352.329	726542.890
Área trasversal, mm²	4763.671	4782.039	4767.342
Resistencia unitaria a la compresión, KN/mm²	0.342	0.322	0.332
Resistencia unitaria a la compresión, Kpa	342.753	322.038	332.261
Resistencia aproximada a los 35Kpa más cercanos	350	315	315
Promedio, Kpa		326.666	

La tabla 4 presenta las propiedades mecánicas y la geometría de las tres probetas de suelo–cemento sin adición de Terrasil (M1 0%, M2 0% y M30%). La carga máxima registrada en los ensayos de compresión osciló entre 1389 N y 1482 N, con un promedio ajustado mediante el factor de conversión de 1.1 de 1584 N. Este factor se aplica según lo estipulado en la normativa, debido a las condiciones particulares de elaboración de las probetas con el fin de corregir los resultados y obtener una representación más precisa de la resistencia real del material.

En cuanto a las dimensiones geométricas, se tomó el área transversal de cada una de las probetas, valores que permitieron calcular la resistencia unitaria a la compresión, valor que estuvo en un rango de 322 KPa a 342 KPa, valores aproximados a los 35 N más cercanos estandarizado por la norma se tuvo un promedio de 326.66 KPa.

- Suelo con 1.5% de cemento y 0.03% de terrasil

Las probetas de este ensayo se identificaron como M1 0,03%, M2 0.03% Y M3 0.03%, el 0.03% hace referencia al porcentaje de terrasil utilizado en la mezcla.

Tabla 7 Datos extraídos de las probetas de 0.03% solicitados por la INV E-614-13.

Propiedades de las probetas	M1 0.03%	M2 0.03%	M3 0.03%
Carga máxima, N	1187	1269	1228
Carga aproximada a los 40N más cercanos	1200	1280	1240
Factor de conversión, 1.1	1320	1408	1364
Promedio, N		1364	
Diámetro, mm	77.807	77.873	77.9
Altura, mm	152.973	152.790	152.663
Volumen, mm ³	727342.947	727716.701	727861.313
Área transversal, mm ²	4754.704	4762.856	4766.118
Resistencia unitaria a la compresión, KN/mm ²	0.278	0.296	0.286
Resistencia unitaria a la compresión, Kpa	277.620	295.621	286.187
Resistencia aproximada a los 35Kpa más cercanos	280	280	280
Promedio, Kpa		280	

La tabla 5 presenta las propiedades mecánicas y la geometría de las tres probetas de suelo–cemento–terrasil con un porcentaje de 0.03% (M1 0.03%, M2 0.03% y M3 0.03%). La carga máxima registrada en los ensayos de compresión osciló entre 1187 N y 1269 N, con un promedio ajustado mediante el factor de conversión de 1.1 de 1364 N.

En cuanto a la resistencia unitaria a la compresión, valor que estuvo en un rango de 277 KPa a 295 KPa, valores aproximados a los 35 N más cercanos estandarizado por la norma se tuvo un promedio de 280 KPa.

Valores de resistencia son menores en comparación a las probetas suelo-cemento que tomamos como referencia, se puede establecer que el porcentaje de 0.03% de terrasil en mezcla es muy bajo y no tiene una buena adaptabilidad y sinergia con el suelo-cemento en este caso.

- Suelo con 1.5% de cemento y 0.15% de terrasil

Las probetas de este ensayo se identificaron como M1 0,15%, M2 0.15% Y M3 0.15%, el 0.15% hace referencia al porcentaje de terrasil utilizado en la mezcla.

Tabla 8 Datos extraídos de las probetas de 0.15% solicitados por la INV E-614-13.

Propiedades de las probetas	M1 0.15%	M2 0.15%	M3 0.15%
Carga máxima, N	1487	1572	1535
Carga aproximada a los 40N más cercanos	1480	1560	1520
Factor de conversión, 1.1	1628	1716	1672
Promedio, N		1672	
Diámetro, mm	78.070	77.830	77.840
Altura, mm	152.593	152.680	152.660
Volumen, mm ³	730455.562	726383.329	726545.201
Área trasversal, mm ²	4786.943	4757.556	4758.779
Resistencia unitaria a la compresión, KN/mm ²	0.340	0.361	0.351
Resistencia unitaria a la compresión, Kpa	340.092	360.689	351.351
Resistencia aproximada a los 35Kpa más cercanos	350	350	350
Promedio, Kpa		350	

La tabla 6 presenta las propiedades mecánicas y la geometría de las tres probetas de suelo–cemento-terrasil con un porcentaje de 0.15% (M1 0.15%, M2 0.15% y M3 0.15%). La carga máxima registrada en los ensayos de compresión osciló entre 1487 N y 1572 N, con un promedio ajustado mediante el factor de conversión de 1.1 de 1672 N.

En cuanto a la resistencia unitaria a la compresión, valor que estuvo en un rango de 340 KPa a 360 KPa, valores aproximados a los 35N más cercanos estandarizado por la norma se tuvo un promedio de 350 KPa.

Los valores de resistencia son los mayores en comparación a las probetas suelo-cemento y suelo-cemento-aditivo que se realizaron, se puede establecer que el porcentaje de 0.15% de terrasil en mezcla es el más óptimo teniendo en cuenta el suelo-cemento.

- Suelo con 1.5% de cemento y 0.30% de terrasil

Las probetas de este ensayo se identificaron como M1 0,30%, M2 0.30% Y M3 0.30%, el 0.30% hace referencia al porcentaje de terrasil utilizado en la mezcla.

Tabla 9 Datos extraídos de las probetas de 0.3% solicitados por la INV E-614-13.

Propiedades de las probetas	M1 0.3%	M2 0.3%	M3 0.3%
Carga máxima, N	1542	1353	1397
Carga aproximada a los 40N más cercanos	1560	1360	1400
Factor de conversión, 1.1	1716	1496	1540
Promedio, N		1584	
Diámetro, mm	77.970	77.863	77.790
Altura, mm	152.647	153.360	152.950
Volumen, mm ³	728840.127	730243.946	726920.482
Área trasversal, mm ²	4774.687	4761.632	4752.667
Resistencia unitaria a la compresión, KN/mm ²	0.359	0.314	0.324
Resistencia unitaria a la compresión, Kpa	359.395	314.178	324.029
Resistencia aproximada a los 35Kpa más cercanos	350	315	315
Promedio, Kpa		326.666	

La tabla 7 presenta las propiedades mecánicas y la geometría de las tres probetas de suelo–cemento–terrasil con un porcentaje de 0.15% (M1 0.15%, M2 0.15% y M3 0.15%). La carga máxima registrada en los ensayos de compresión osciló entre 1353 N y 1542 N, con un promedio ajustado mediante el factor de conversión de 1.1 de 1584 N.

En cuanto a la resistencia unitaria a la compresión, valor que estuvo en un rango de 314 KPa a 359 KPa, valores aproximados a los 40N más cercanos estandarizado por la norma se tuvo un promedio de 326.666 KPa.

Los valores de resistencia a la compresión unitaria teóricamente son iguales en comparación a las probetas suelo-cemento debido a las aproximaciones que establece la norma, pero si se comparan los valores reales que dio el ensayo, el porcentaje de 0.3% de terrasil ayuda en una proporción muy baja a la resistencia a la compresión de la mezcla.

- Suelo con 1.5% de cemento y 0.5% de terrasil

Las probetas de este ensayo se identificaron como M1 0,5%, M2 0.5% Y M3 0.5%, el 0.5% hace referencia al porcentaje de terrasil utilizado en la mezcla.

Tabla 10 Datos extraídos de las probetas de 0.5% solicitados por la INV E-614-13.

Propiedades de las probetas	M1 0.5%	M2 0.5%	M3 0.5%
Carga máxima, N	997	979	988
Carga aproximada a los 40N más cercanos	1000	960	1000
Factor de conversión, 1.1	1100	1056	1100
Promedio, N		1085.333	
Diámetro, mm	77.873	77.263	77.370
Altura, mm	152.073	153.047	152.580
Volumen, mm3	724303.321	717563.993	717352.615
Área transversal, mm2	4762.856	4688.531	4701.485
Resistencia unitaria a la compresión, KN/mm2	0.231	0.225	0.234
Resistencia unitaria a la compresión, Kpa	230.954	225.230	233.969
Resistencia aproximada a los 35Kpa más cercanos	245	210	245
Promedio, Kpa		233.333	

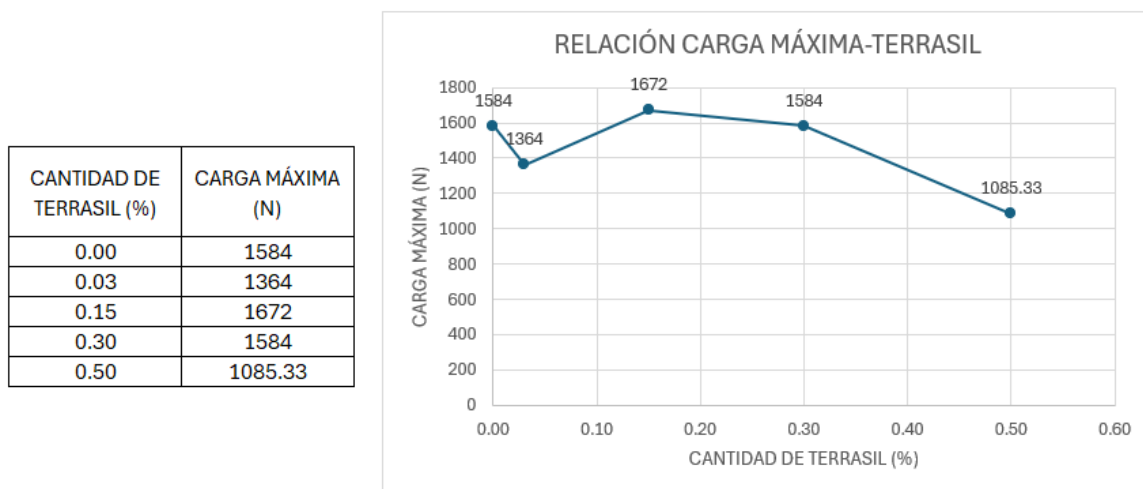
La tabla 8 presenta las propiedades mecánicas y la geometría de las tres probetas de suelo–cemento-terrasil con un porcentaje de 0.15% (M1 0.15%, M2 0.15% y M3 0.15%). La carga máxima registrada en los ensayos de compresión osciló entre 979 N y 997 N, con un promedio ajustado mediante el factor de conversión de 1.1 de 1056 N.

En cuanto a la resistencia unitaria a la compresión, valor que estuvo en un rango de 225 KPa a 233 KPa, valores aproximados a los 40N más cercanos estandarizado por la norma se tuvo un promedio de 233.333 KPa.

Los valores de resistencia son los menores en comparación a las probetas suelo-cemento y suelo-cemento-aditivo que se realizaron, se puede establecer que el porcentaje de 0.5% de terrasil en mezcla es una sobredosificación y es contraproducente en el uso de esta mezcla

La finalidad de este ensayo de laboratorio es determinar la carga máxima y con ella la resistencia unitaria a la compresión de cada probeta, con estas variables se determinó el contenido óptimo de terrasil en las mezclas suelo-cemento, se muestra la compilación de los resultados en las siguientes gráficas.

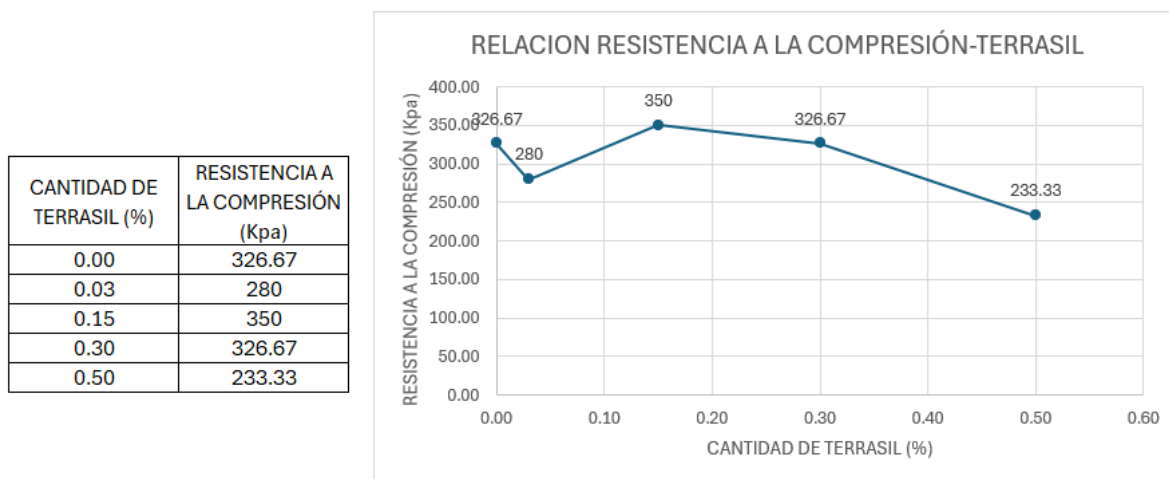
Figura 8 Gráficas de densidad seca máxima con respecto a las distintas dosificaciones de terrasil.



Fuente: (Autoría propia)

Hablando de carga máxima resistida por cada trio de probetas, el valor inicial sin aditivo (0%) fue de 1584 N, mientras que con una dosificación mínima de 0.03% de terrasil se observó una disminución a 1364 N, lo que se puede entender que un aporte reducido de aditivo no favorece la compactación del material, por otro lado al incrementar la dosificación a 0.15%, se alcanzó el mejor desempeño con 1672 N, lo que representa un aumento de aproximadamente 5.5% respecto al suelo control, continuando para dosificaciones superiores, los resultados muestran una tendencia decreciente con el 0.30% de terrasil en mezcla los valores regresan a un nivel similar al control (1584 N), y por ultimo con la dosificación máxima establecida de 0.50% de terrasil se produce una caída significativa hasta 1085.33 N, indicando una pérdida importante de capacidad de soporte.

Figura 9 Gráfica de resistencia a la compresión unitaria con respecto a las distintas dosificaciones de terrasil.



Fuente: (Autoría propia)

La resistencia a la compresión unitaria sigue la misma tendencia, el valor inicial fue de 326.67 KPa para el suelo sin aditivo luego con primer porcentaje de terrasil de 0.03%, la resistencia descendió a 280 KPa, mientras que al 0.15% se alcanzó el valor más alto con 350 KPa, lo que significa una mejora del orden del 7% respecto al suelo control. A partir de esa dosificación, el comportamiento volvió a decrecer con 0.30% de aditivo registrando nuevamente 326.67 KPa, y a la dosificación de 0.50% de terrasil la resistencia se redujo hasta 233.33 KPa, confirmando que un exceso de aditivo afecta negativamente el desempeño mecánico del material.

Es importante resaltar que, de acuerdo con la norma, ciertos valores deben aproximarse al momento de calcular la resistencia a la compresión unitaria. Por ello, algunos resultados aparecen más cercanos entre sí, lo que no impide evidenciar la tendencia más general.

4.2.4 Resistencia a la compresión de adoquines de concreto

En el ensayo de resistencia a la compresión en adoquines se seleccionaron dos tipos de mezclas para la elaboración de adoquines, una mezcla de suelo–cemento conocida como suelo control y la mezcla de suelo–cemento-aditivo con un porcentaje de Terrasil de 0.15%. La elección de esta última se fundamentó en los resultados obtenidos en los ensayos previos de ensayo a compresión de probetas cilíndricas, donde esta dosificación del 0.15% alcanzó la mayor resistencia a la compresión en comparación a las demás mezclas realizadas, posicionándose como la mezcla más eficiente entre las evaluadas.

La decisión metodológica de trabajar únicamente con estas dos mezclas obedece a criterios de control experimental y optimización de recursos. La mezcla de suelo–cimento sin aditivo se consideró como la referencia, indispensable para establecer comparaciones válidas y medir de forma objetiva el efecto del Terrasil. En contraste, la mezcla con 0.15% de aditivo se incorporó como la dosificación óptima, con el fin de evaluar si el comportamiento superior observado en probetas se reproduce también en la fabricación de adoquines. Este enfoque permitió concentrar el análisis en el contraste más relevante, garantizando resultados representativos y confiables sin dispersar esfuerzos en dosificaciones menos significativas.

La edad de todos los especímenes fue de 7 días, los adoquines al igual que las probetas fueron sometidas a un curado húmedo de 7 días después, manteniendo la humedad entre $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa de entre 75% y 95% así asegurando que no se perdiera la humedad de las muestras.

Tabla 11 Datos utilizados para la elaboración de adoquines.

Parámetros para utilizar	Suelo control	0.15%
Densidad máxima seca (g/cm ³)	1.4990	1.5130
Humedad óptima (%)	15.2	14.8
Densidad húmeda (g/cm ³)	1.7269	1.74642
Cantidad de cemento (g)	36.45	36.58
Cantidad de suelo (g)	2394.09	2398.78
Cantidad de agua(ml)	369.4	360.97
Cantidad de terrasil (g)	0	3.65

- Adoquines de suelo con 1.5% de cemento

Para cada una de las mezclas seleccionadas se elaboraron tres especímenes de adoquines idénticos, siguiendo la misma metodología de moldeo y curado. Esta decisión se adoptó con el fin de mejorar la confiabilidad de los resultados, ya que contar con tres unidades por mezcla permitió reducir el margen de error experimental, obtener valores promedio más representativos y facilitar la comparación entre los diferentes tipos de adoquines evaluados.

Tabla 12 Datos extraídos de los adoquines suelo control solicitados por la INV E-626-13.

Propiedades de las probetas	Suelo control#1	Suelo control#2	Suelo control#3
Ancho (W), mm	101.38	100.26	102.22
Espesor (T), mm	83.62	82.39	82.12
Longitud (L), mm	200.12	200	200.43
Área neta aproximada a los 50 mm ² mas cercanos	20300	20050	20300
Carga máxima aproximada a los 5N más cercanos	3825	3980	4020
Relación de aspecto (Ra)	0.825	0.822	0.811
Factor de relación de aspecto (Fa)	1.158	1.156	1.150
Resistencia a la compresión, Kpa	218.113	229.447	227.736
Promedio, Kpa		225.098	

Las dimensiones de los adoquines suelo control se mantuvieron dentro de los parámetros establecidos por la normativa, con anchos entre 100.26 y 102.22 mm, espesores entre 82.12 y 83.62 mm y longitudes cercanas a 200 mm. Esto garantizó que las unidades tuvieran una geometría adecuada para la aplicación de carga y para que los adoquines entre si fueran comparables.

El área neta de compresión, redondeada a los 50 mm² más cercanos según lo estipulado por la norma, presentó valores homogéneos entre 20 050 y 20 300 mm², lo cual refleja uniformidad en la preparación de los especímenes. De igual forma, la carga máxima aplicada, aproximada a múltiplos de 5 N, estuvo con valores entre 3825 y 4020 N, mostrando una dispersión reducida en el comportamiento mecánico.

La relación de aspecto (Ra) fue cercana a 0.82 en los tres adoquines, al aplicar el factor de corrección (Fa), cuyos valores oscilaron entre 1.150 y 1.158, se obtuvo una coincidencia con el valor normativo de 1.15, establecido para un espesor estándar de 80 mm, esto permitió ajustar los cálculos de la resistencia unitaria conforme a la metodología definida en la norma, garantizando resultados consistentes.

En cuanto a la resistencia a la compresión, se obtuvieron valores de 218.11 kPa, 229.45 kPa y 227.74 kPa, con un promedio de 225.10 kPa. La baja variación entre los resultados (< 5%) evidencia un comportamiento consistente del suelo control, lo cual otorga confiabilidad al valor promedio como representativo de este material base.

- Adoquines de suelo con 1.5% de cemento y 0.15% de terrasil

Al igual que los adoquines anteriores, se elaboraron tres especímenes de adoquines idénticos, siguiendo la misma metodología de moldeo y curado, tres unidades por mezcla permitieron reducir el margen de error experimental.

Tabla 13 Datos extraídos de los adoquines con 0.15% de terrasil solicitados por la INV E-626-13.

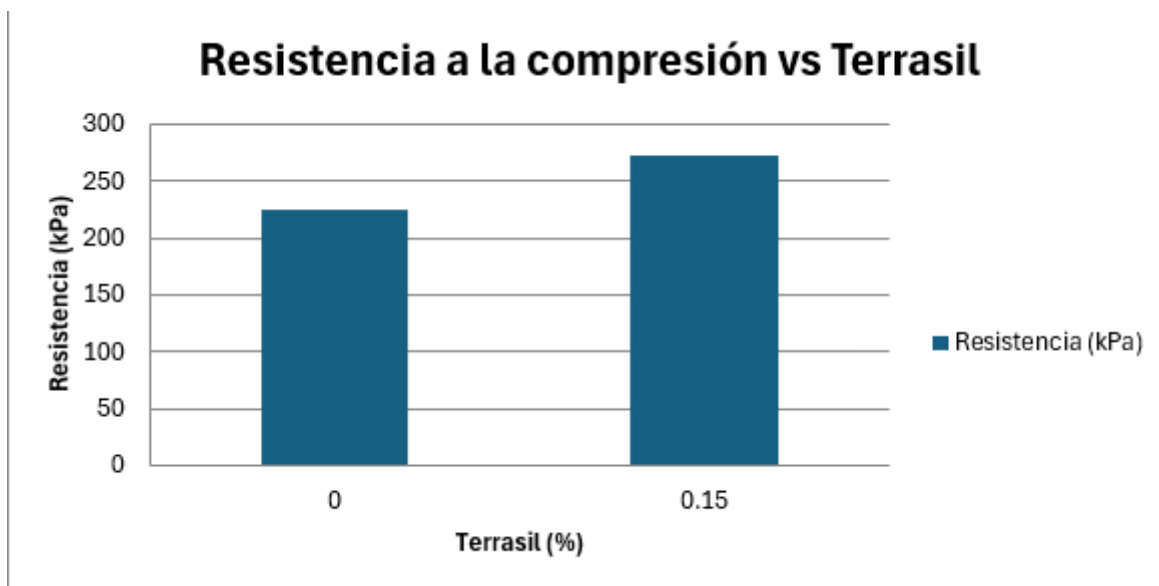
Propiedades de las probetas	0.15% #1	0.15% #2	0.15% #3
Ancho (W), mm	101.62	101.9	102.45
Espesor (T), mm	81.25	80.72	80.82
Longitud (L), mm	200.43	200.75	200.89
Área neta aproximada a los 50 mm ² más cercanos	20350	20450	20200
Carga máxima aproximada a los 5N más cercanos	4920	4625	5020
Relación de aspecto (Ra)	0.8	0.792	0.805
Factor de relación de aspecto (Fa)	1.143	1.139	1.146
Resistencia a la compresión, Kpa	276.399	257.568	284.838
Promedio, Kpa		272.934	

Las dimensiones de los adoquines con 0.15% de terrasil se mantuvieron dentro de los parámetros establecidos por la normativa, con anchos entre 101.62 y 102.45 mm, espesores entre 80.72 y 81.25 mm y longitudes cercanas a 200 mm. El área neta de compresión, redondeada a los 50 mm² más cercanos según lo estipulado por la norma, presentó valores homogéneos entre 20200 y 20450 mm², lo cual refleja uniformidad en la preparación de los especímenes, por otro lado, la carga máxima aplicada, aproximada a múltiplos de 5 N, estuvo con valores entre 4625 y 5020 N, mostrando una dispersión reducida en el comportamiento mecánico.

La relación de aspecto (Ra) fue cercana a 0.80 en los tres adoquines un poco menor que la relación de aspecto del suelo control esto se debe a que los adoquines de 0.15% de terrasil estuvieron más compactos por las propiedades de terrasil, al aplicar el factor de corrección (Fa), cuyos valores oscilaron entre 1.139 y 1.146, se obtuvo una coincidencia con el valor normativo de 1.15, establecido para un espesor estándar de 80 mm.

En cuanto a la resistencia a la compresión, se obtuvieron valores de 276.39 kPa, 257.57 kPa y 284.83 kPa, con un promedio de 272.93 kPa. La baja variación entre los resultados evidencia un comportamiento consistente de los adoquines con 0.15% de terrasil, lo cual otorga confiabilidad al valor promedio como representativo de este material base.

Figura 10 Gráfica de resistencia a la compresión vs contenido de terrasil.



Fuente: (Autoría propia)

Los resultados comparativos muestran una diferencia clara en el desempeño de los adoquines, por un lado, el adoquín de suelo–cimento sin Terrasil (0%) alcanzó una resistencia promedio de 225.09 kPa, mientras que el adoquín con 0.15% de Terrasil obtuvo un promedio de 272.93 kPa.

Este aumento equivale a una mejora del 21% en la resistencia a la compresión, lo que confirma que la incorporación del aditivo favorece de manera directa la capacidad soporte del material, el incremento puede atribuirse a la acción de Terrasil sobre la compactación y la redistribución de partículas, lo que facilita alcanzar una mayor densidad y, en consecuencia, un mejor desempeño mecánico.

4.2.5 Absorción de agua por los adoquines de concreto

Para el ensayo de absorción de agua por los adoquines de concreto al igual que en el ensayo de resistencia a la compresión en adoquines se seleccionaron dos tipos de adoquines, una mezcla de suelo–cimento conocida como suelo control y la mezcla de suelo–cimento-aditivo con un porcentaje de Terrasil de 0.15%. La elección de esta se fundamentó en que la mezcla que ha dado resultados favorables con respecto a los demás porcentajes de terrasil fue la de 0.15% de terrasil colocándose como la mezcla más eficiente para ser evaluadas, ambos tipos de adoquines fueron sometidos a inmersión de agua por 12 horas como lo establece la norma,

Los resultados mostraron un comportamiento de los adoquines desfavorables, en primer lugar el adoquín suelo control no logró resistir la inmersión por más de 1 hora, presentando deterioro temprano debido a la disgregación de las partículas del suelo, condicionado principalmente por el comportamiento de la arcilla presente en la mezcla y no por la acción del cemento, esto se explica porque al estar en contacto con el agua, el material no tratado presenta una alta susceptibilidad a la absorción de agua y con ello la arcilla usada en estos adoquines tuvo un comportamiento de reblandecimiento, lo que comprometió su estabilidad estructural actuando.

Figura 11 Adoquín suelo control después de una hora de inmersión.



Fuente: (Autoría propia)

En la (figura11) se evidencia como se disgregó todo el adoquín, a simple vista no se podía ver con claridad entonces se procedió a sacar el agua para ver como quedó en material tras el tiempo de inmersión.

Por otro lado, los adoquines elaborados con suelo-cemento-aditivo con 0.15% de Terrasil lograron soportar hasta 4 horas de inmersión, mostrando un mejor desempeño frente absorción de agua. Este resultado se justifica en las propiedades del aditivo, el cual reduce la absorción capilar, actúa como agente hidrofóbico y mejora la redistribución de partículas durante la compactación.

Figura 12 Adoquín suelo-cemento-aditivo en diferentes horas de inmersión.



Fuente: (Autoría propia)

En la figura 12 se observa el comportamiento del adoquín durante el ensayo de inmersión. Tras la primera hora, la pieza mantuvo su integridad estructural, evidenciándose únicamente la liberación de burbujas en la superficie del agua, asociadas a la expulsión de aire de los poros al saturarse. Sin embargo, al cumplirse dos horas comenzó un proceso de disgregación localizado en las aristas y en las zonas de mayor compactación, lo cual marcó el inicio del desmoronamiento. Posteriormente, a las tres horas, la pérdida de cohesión se intensificó y se extendió a toda la superficie del adoquín, hasta que, al llegar a las cuatro horas de inmersión, la pieza se disgregó completamente.

En conclusión, aunque ninguno de los dos tipos de adoquines alcanzó las 12 horas exigidas por la norma, la adición de Terrasil representó una mejora significativa en la durabilidad frente al agua, confirmando su efecto positivo en el desempeño del material al reducir la vulnerabilidad a la absorción y disgregación.

5. CAPÍTULO V: RECOMENDACIONES

5.1. Recomendaciones para futuras investigaciones

5.1.1 *Optimización de dosificaciones de Terrasil y cemento*

Se recomienda evaluar nuevos rangos de dosificación de Terrasil y cemento, incluyendo porcentajes menores y mayores a los utilizados en este estudio. Esto permitiría identificar mezclas que maximicen la resistencia mecánica, la durabilidad y la impermeabilidad, sin comprometer la economía del diseño ni la trabajabilidad del material.

5.1.2 *Ampliación de tipos de suelo*

Es pertinente aplicar la misma metodología en suelos con variaciones granulométricas y mineralógicas, como limos de baja plasticidad, arcillas expansivas, suelos arenosos finos o materiales residuales. Esta comparación permitirá validar la eficacia del Terrasil en contextos geotécnicos diversos y ampliar sus posibles aplicaciones.

5.1.3 *Evaluación de propiedades hidráulicas y térmicas:*

Futuras investigaciones deberían profundizar en el análisis de permeabilidad, absorción de agua, comportamiento en ciclos de humedad–secado y desempeño térmico. Este tipo de caracterización complementa la resistencia mecánica y permite determinar el comportamiento del material en escenarios reales de servicio.

5.1.4 *Investigación ambiental y sostenible:*

Se recomienda estudiar el impacto ambiental asociado al uso de Terrasil, incluyendo huella de carbono, consumo energético, efectos a largo plazo en el suelo y comparación con otras técnicas de estabilización. Esto contribuirá a definir su viabilidad como alternativa sostenible para infraestructura vial

5.2. Recomendaciones para mejorar el proceso de fabricación de probetas y adoquines

5.2.1 *Control estricto de dosificaciones y humedad*

Es indispensable mantener precisión en la medición de suelo, cemento, Terrasil y agua, garantizando que la mezcla se elabore con la humedad óptima obtenida en el ensayo Proctor. Un control inadecuado afecta directamente la densidad seca y la resistencia final del material.

5.2.2 *Homogeneidad de la mezcla*

Se sugiere emplear procesos de mezclado que aseguren una distribución uniforme de todos los componentes. Mezclas heterogéneas pueden producir zonas débiles o segregación, lo cual reduce la confiabilidad de los resultados.

5.2.3 Optimización de compactación

Debe verificarse que la energía de compactación aplicada a las probetas sea equivalente a la del ensayo Proctor, ajustando el número de golpes por capa y asegurando uniformidad. Una compactación insuficiente o excesiva altera la densidad y la resistencia mecánica.

5.2.4 Curado controlado

Mantener un ambiente de curado adecuado (temperatura, humedad y tiempo) es fundamental para garantizar la reacción correcta del cemento y la fijación química del Terrasil. Condiciones inestables pueden disminuir la resistencia o generar variabilidad entre especímenes.

5.2.5 Registro detallado de datos

Se recomienda documentar para cada probeta: masa húmeda, masa seca, densidad real, humedad real, fracción de cemento y Terrasil efectivamente incorporada. Esto permite detectar desviaciones, validar cálculos y mejorar la repetitividad del proceso.

5.2.6 Validación continua

Antes de fabricar adoquines a escala completa, es conveniente realizar pruebas piloto con pequeñas cantidades de mezcla. Esto ayuda a ajustar dosificaciones, corregir errores operativos y garantizar coherencia entre los resultados obtenidos en probetas y en unidades de obra.

6. CONCLUSIONES

La evaluación integral de las propiedades físico-mecánicas de los adoquines elaborados a partir de mezclas de suelo-cemento modificadas con Terrasil permitió evidenciar mejoras significativas en la resistencia a la compresión, la impermeabilidad y la durabilidad de las unidades frente a condiciones ambientales exigentes. Sin embargo, los resultados obtenidos no alcanzaron los valores mínimos establecidos para su aplicación en estructuras de pavimentación. En consecuencia, se concluye que su utilización resulta viable en obras de estabilización y contención, pero no en pavimentos que demanden un mayor desempeño estructural.

La determinación de las dosificaciones evidenció que la mezcla con un contenido intermedio de 0,15 % de Terrasil resulta óptima, al mejorar la compactación y la resistencia del material, mientras que porcentajes superiores no aportan beneficios adicionales y pueden incluso afectar negativamente su trabajabilidad. Estos resultados aportan información valiosa sobre las limitaciones actuales de este tipo de material y sientan una base para investigaciones futuras orientadas a optimizar las dosificaciones, explorar combinaciones con otros aditivos o modificar los procedimientos de mezcla, con el fin de alcanzar un desempeño que permita su aplicación práctica en la construcción sostenible.

La fabricación de adoquines artesanales bajo los parámetros establecidos y en cumplimiento de la NTC 2017 evidenció que es posible obtener piezas con características parcialmente semejantes a las de los adoquines comerciales, siempre que se apliquen controles adecuados en las etapas de diseño, moldeo y curado.

Los ensayos físico-mecánicos evidenciaron que la incorporación de organosilanos generó mejoras en parámetros clave como la densidad seca máxima, la resistencia a la compresión y la reducción de la permeabilidad en comparación con la mezcla de control, lo que valida la eficacia del aditivo en el mejoramiento del desempeño estructural, a pesar de estos avances, los resultados no alcanzaron los valores mínimos exigidos por la normativa para adoquines destinados a pavimentos, lo que limita su aplicación en este tipo de estructuras. No obstante, su desempeño permite considerar su uso en otros contextos menos exigentes, tales como pasos peatonales, parapetos, jardinería y aplicaciones ornamentales, donde las exigencias mecánicas son menores pero el beneficio en durabilidad e impermeabilidad sigue siendo significativo.

Bibliografía

- AASHTO (1993). Standard method of classification of soils for highway construction purposes. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Aditivos, T. A., Aditivos, T. B., Aditivos, T. C., Aditivos, T. D., Aditivos, T. E., Aditivos, T. F., & Aditivos, T. G. (n.d.). Ntc 1299. 5–6.
- Andrade, L. (2004). Suelos de la Sabana de Bogotá: Caracterización y manejo. Universidad Nacional de Colombia.
- Buurman, P., et al. (2006). Soil fertility in Andean regions. Springer.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). The nature and properties of soils (15th ed.). Pearson Education.
- Casagrande, A. (1948). Classification and identification of soils. American Society of Civil Engineers.
- Compresi, L. A., & Concreto, D. E. A. D. E. (s/f). E - 426. 60(Bhn 620), 2–9.
- Compresi, L. A., & Suelo, D. E. C. M. D. E. (s/f). E - 614.
- CORPOBOYACÁ. (2010). Estudio de suelos del departamento de Boyacá. Corporación Autónoma Regional de Boyacá.
- Das, B. M. (2015). Principles of geotechnical engineering. Cengage Learning.
- Echaveguren, R., Vargas, T., Civil, D. D. I., Larenas, E., Vargas-tejeda, S., & Bío, B. (2013). Hormigón Assessment of pavement concrete blocks design methods. 12(3), 17–26.

- FAO. (2005). Soil management for sustainable agriculture. Food and Agriculture Organization.
- Hillel, D. (2008). Soil in the environment: Crucible of terrestrial life. Academic Press.
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). An introduction to geotechnical engineering. Prentice-Hall.
- Humedad, R., Mezclas, D. D. E., & Cemento, D. E. S. (s/f). E - 611. 3, 1–12.
- IDEAM. (2015). Atlas de suelos de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IGAC. (2013). Estudio general de suelos y zonificación de tierras de Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- INGEOMINAS. (2000). Estudios geológicos de Boyacá. Instituto Colombiano de Geología y Minería.
- Industries, Z. (2009). Acerca de optimasoil.
- Jenny, H. (1941). Factors of soil formation: A system of quantitative pedology. McGraw-Hill.
- Kazanova, L. V., Bessonov, I. V., & Tarasenko, O. I. (2019). Effects of organosilane additives on soil stabilization. Construction and Building Materials, 215, 120–130.
- La, I. D. E., Mezcla, S., & Sociedad, Y. D. E. L. A. (2016). Dr. Moulik Ranka (+91) 7567622211 2. 2008, 1–10.
- Meeravali, K., Ruben, N., & Rangaswamy, K. (2020). Stabilization of soft-clay using nanomaterial: Terrasil. Materials Today: Proceedings, 27, 1030–1037.

NTC 2017. (2018). Norma técnica Colombiana NTC 2017 adoquines de concreto para pavimento - Metroblock. 30.

Pérez Machado, L., Meireles Tamayo, B., Fuentes Alpizar, D. de la C., Peña Mijenes, C., & Alonso Aenle, A. (2022). Empleo de adoquines de concreto en la construcción de pavimentos. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 16(2), 1–12.

Piers-rubinsztajn, L. A. R. D. E., Chavira, F., Vanessa, D., Zamudio, M., Ángel, M., Jauregui, C., Contreras, G., & Antonio, J. (n.d.). Obtención de organosilanos funcionales a través de la reacción de piers-rubinsztajn. 1.

Por, D. E. A., & Concreto, L. O. S. A. D. E. (s/f). E - 427. 1–5.

Resistant, S. W., & Bases, F. S. (s/f). Strong Water Resistant TerraSil.

SB Sosa, R. I.-M. , A. E. M. A. M. A. (2010). Educación superior y cultura ambiental en el sureste de México.

Shankar Ghosh, A., Roy, A., & Kumar Roy, T. (2023). Performance evaluation of nano-material stabilized pond ash as subbase layer material for roadway pavement. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.710>

studysmarter. (21 de 09 de 2025). studysmarter. Obtenido de <https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieria-agricola/caracterizacion-del-suelo/>

Suelo, C. D. E. P. D. E., Para, C., Compresi, P. D. E., & Laboratorio, E. N. E. L. (s/f). E - 613. 6, 1–14.

Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.

Thomas, A., Tripathi, R. K., Yadu, L. K., & Roy, S. (2016). Soil stabilisation using Terrasil. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 9(3), 1049–1052.

Title: Development of technologies for paving in local. (2019).

Transport Research Board. (2004). ASHTO soil classification system. National Cooperative Highway Research Program.

Zea, C. E. (22 de 09 de 2025). Caracterización geomecánica de materiales térreos para fabricación de adoquines artesanales en Sora, Boyacá. Tunja.

Zydex, I., & Road, G. S. (2014). Producto y empresa Documento generado electrónicamente: no se requiere firma. 1–2.

Anexos

Anexo 1: registro fotográfico.

Anexo 2: informes de laboratorio.

Anexo 3: memoria de cálculo.