



Diseño y determinación de la resistencia de un adoquín de arena confinada con cartón prensado de geometría optimizada.

Amoroso Guzmán, Matías Fernando; Araujo Falcón, Carlos Andrés y Calderón Chiriboga, Johann Sebastian

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Trabajo de Integración Curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Ing. Morales Muñoz Byron Omar

25 de agosto de 2023

Reporte de verificación de similitud



MIC PAVIMENTO ARTICULADO REVISI...

Scan details

Scan time:
August 25th, 2023 at 17:1 UTC

Total Pages:
79

Total Words:
19577

Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
Identical	1%	202
Minor Changes	1.8%	361
Paraphrased	3%	593
Omitted Words	0%	0

AI Content Detection



Text coverage
● AI text
○ Human text



Ing. Morales Muñoz Byron Omar
Tutor
C.C. 1712565900



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular “**Diseño y determinación de la resistencia de un adoquín de arena confinada con cartón prensado de geometría optimizada**” fue realizado por los señores **Amoroso Guzmán, Matias Fernando, Araujo Falcón, Carlos Andrés y Calderón Chiriboga, Johann Sebastian**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 25 de agosto de 2023



Firmado electrónicamente por:
BYRON OMAR MORALES
MUNOZ

Ing. Morales Muñoz Byron Omar

C.C. 1712565900



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Amoroso Guzmán, Matias Fernando** con cédula de ciudadanía No. **1726135013**, **Araujo Falcón, Carlos Andrés** con cédula de ciudadanía No. **1725397002** y **Calderón Chiriboga, Johann Sebastian** con cédula de ciudadanía No. **1725252363**, declaramos que el contenido, ideas y criterios de trabajo de integración curricular: **"Diseño y determinación de la resistencia de un adoquín de arena confinada con cartón prensado de geometría optimizada"** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnico y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 25 de agosto de 2023

Amoroso Guzmán, Matias Fernando

C.C.: 1726135013

Araujo Falcón, Carlos Andrés

C.C.: 1725397002

Calderón Chiriboga, Johann Sebastian

C.C.: 1725252363



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Autorización de Publicación

Nosotros, **Amoroso Guzmán, Matias Fernando** con cédula de ciudadanía No. **1726135013**, **Araujo Falcon, Carlos Andrés** con cédula de ciudadanía No. **1725397002** y **Calderón Chiriboga, Johann Sebastian** con cédula de ciudadanía No. **1725252363**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular, "**Diseño y determinación de la resistencia de un adoquín de arena confinada con cartón prensado de geometría optimizada**" en Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 25 de agosto de 2023

Amoroso Guzmán, Matias Fernando

C.C.: 1726135013

Araujo Falcón, Carlos Andrés

C.C.: 1725397002

Calderón Chiriboga, Johann Sebastian

C.C.: 1725252363

Dedicatorias

Quiero dedicar este logro a mis amados padres, Fernando y Verónica, cuyo apoyo incondicional y sacrificio han sido la principal fuente de inspiración para alcanzar este objetivo. A mis hermanas y a toda mi familia, quienes sin lugar a duda han contribuido a hacer que este proceso sea más gratificante. A mis profesores, por compartir sus conocimientos y orientación a lo largo de este recorrido académico. A mis amigos, por las risas compartidas y por ser un constante recordatorio de que la vida es un equilibrio. A todos aquellos que creyeron en mí y me brindaron su aliento, su confianza en mis capacidades ha sido un impulso poderoso. Este trabajo es un homenaje a todos ustedes, quienes han sido elementos esenciales en mi trayectoria universitaria y personal.

Matías Amoroso

Quiero dedicar este logro, a las personas que han sido mis pilares y guías a lo largo de este camino. A mi amada madre Lupe, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido mi fuente de fortaleza. A mi querido hermano Juan Esteban, cuya inspiración y aliento me han impulsado a superar cada obstáculo. También dedico este logro a mis abuelitos, cuyo legado de esfuerzo y sabiduría han sido faro en mi travesía académica. Sus enseñanzas siguen guiándome y recordándome la importancia de perseguir mis sueños. A mi familia, quienes han sido mi red de apoyo inquebrantable. Sus palabras de aliento y su confianza en mí han sido la fuerza que me ha impulsado a superar los desafíos. A mis queridos compañeros, con quienes compartí risas, desafíos y aprendizajes a lo largo de esta travesía. Juntos formamos un equipo que superó desafíos y celebró triunfos, y su amistad siempre será parte esencial de esta etapa memorable. Este proyecto lleva un pedacito de cada uno de ustedes en sus páginas, y es un testimonio de cómo el apoyo, el amor y la camaradería han hecho posible este logro. Con gratitud y cariño, les dedico este hito en mi camino.

Andres Araujo

Dedicatoria...

A mis amados padres, Fernando y Ximena quienes con su amor incondicional y sabias enseñanzas guiaron cada paso de mi camino en la educación, moldeando mi carácter y forjando mis sueños.

A mis queridos hermanos, abuelitos y demás familia, por su apoyo constante y aliento inquebrantable, que iluminaron mis días de estudio con su amor y ánimo.

A mi dulce gatita Valentina, quien, con su mirada curiosa y su amor incondicional, me brinda la inspiración diaria para dar lo mejor de mí en cada paso.

A los excepcionales docentes que cruzaron mi sendero educativo, cuyos conocimientos y dedicación avivaron mi pasión por el aprendizaje, gracias por su guía invaluable en mi formación.

A las respetadas instituciones educativas, que me brindaron el espacio y los recursos para crecer intelectualmente, siendo cimientos sólidos en mi viaje hacia el conocimiento.

A mis fieles amigos, compañeros de risas, desafíos y victorias, su amistad y aliento fueron un bálsamo en cada etapa de este proceso.

Este logro no habría sido posible sin cada uno de ustedes, cada momento compartido y cada gesto de apoyo. Con gratitud infinita, dedico este logro a todos ustedes.

Johann Calderón

Agradecimiento

En este momento de culminación y gratitud, deseamos expresar nuestro profundo agradecimiento a Dios por ser la luz que nos guio a lo largo de este arduo pero gratificante viaje. Cada paso que dimos en nuestro camino hacia la finalización de esta etapa universitaria estuvo marcado por su sabiduría y fortaleza, y por eso le estamos eternamente agradecidos.

También queremos reconocer y agradecer a nuestro tutor el ingeniero Byron Morales por ser nuestro guía, mentor y apoyo constante durante este proceso. Su experiencia, dedicación y paciencia fueron fundamentales para nuestro aprendizaje y crecimiento. Cada consejo y dirección que nos brindó nos ayudó a superar los desafíos y a alcanzar nuevas alturas en nuestra investigación.

No podemos pasar por alto el invaluable aporte del analista de laboratorio de ensayo de suelos el ingeniero Juan Haro. Su conocimiento experto y su disposición para compartir sus ideas enriquecieron nuestra comprensión y contribuyeron de manera significativa a los resultados de nuestro trabajo.

Además, extendemos nuestro agradecimiento a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE por ser nuestro segundo hogar y los docentes que nos acompañaron en toda nuestra formación académica, su dedicación a impartir conocimientos, brindar orientación y fomentar nuestro pensamiento crítico ha sido esencial para nuestro crecimiento como estudiantes y como individuos.

Índice

Reporte de verificación de similitud.....	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatorias.....	6
Agradecimiento	8
Resumen	18
Abstract.....	19
Capítulo I: Introducción	20
Antecedentes	20
Planteamiento Del Problema	21
Justificación.....	22
Alcance del proyecto	23
Objetivos	23
Objetivo General.....	23
Objetivos específicos	24
Hipótesis	24
Capitulo II: Marco teórico	24
Adoquines	24
Polímero.....	36
Resina Epóxica	37

	10
Cartón Prensado	39
Arena	41
Geomalla.....	41
PLAXIS.....	46
Capitulo III: Materiales Y Métodos.....	47
Materia Prima	47
Obtención De Materia Prima	47
Agregado Fino	47
Polímero Emulsión De Estireno-Acrílico Modificado Con Silicio	48
Cartón Prensado.....	48
Caracterización Del Agregado Fino	50
Granulometría.....	50
Contenido De Humedad.....	53
Densidad, Gravedad Específica Y Absorción.....	55
Masa Unitaria y Porcentaje de Vacíos	62
Caracterización Polímero	65
Caracterización Resina	66
Geometría	67
Propuesta de geometría del adoquín	67
Geometría del Cartón	70
Propuesta de instalación de pavimento articulado.....	71

	11
Dosificación	74
Dosificación con Polímero emulsión de estireno-acrílico modificado con silicio	74
Dosificación con Resina Epóxica	78
Elaboración De Probetas.....	79
Capítulo IV: Análisis de Resultados	81
Tracción Indirecta para Probetas con Polímero	81
Tracción Indirecta para Probetas con Resina Epóxica.....	85
Comparación Polímero y Resina Epóxica.....	86
Índice de absorción de agua.....	88
Resistencia a la abrasión.....	90
Resumen de resultados de ensayos.....	92
Resistencia a la Compresión	92
Ensayo de módulo de elasticidad para las probetas	97
Resumen de módulos de elasticidad para probetas	104
PLAXIS.....	105
Presupuesto referencial.....	121
Tiempo de ejecución propuesto	128
Cálculo del Rendimiento	128
Conclusiones.....	129
Recomendaciones.....	132
Bibliografía.....	134

Apéndices 139

Índice de tablas

Tabla 1 plan de muestreo y criterios de conformidad para ensayos de tipo inicial y adicionales	32
Tabla 2 límites de gradación para el agregado fino	51
Tabla 3 ensayo granulométrico del agregado fino	52
Tabla 4 porcentaje de humedad que presenta el agregado fino de holcim	55
Tabla 5 muestra de cada grupo de áridos en condiciones óptimas de sss.....	57
Tabla 6 densidades y absorción del agregado fino - muestra grupo 1	59
Tabla 7 densidades y absorción del agregado fino - muestra grupo 2	60
Tabla 8 densidades y absorción del agregado fino - muestra grupo 3	60
Tabla 9 densidades y absorción del agregado fino - muestra grupo 4	61
Tabla 10 densidades volumétrica y porcentaje de vacíos del agregado fino.	64
Tabla 11 propiedades de polímero	65
Tabla 12 factor de corrección k.....	83
Tabla 13 dosificaciones.	84
Tabla 14 resultados de resistencia y carga de tracción indirecta para las distintas dosificaciones.	84
Tabla 15 resultados de resistencia y carga de tracción indirecta para las probetas con resina epóxica	86
Tabla 16 resultados del ensayo de resistencia a la tracción indirecta para probetas elaboradas con polímero.	86
Tabla 17 resultados del ensayo de resistencia a la tracción indirecta para probetas elaboradas con resina epóxica.	87
Tabla 18 resultados de ensayo de índices de absorción de agua para adoquines de resina ...	89
Tabla 19 resultados del ensayo de resistencia a la abrasión	91

Tabla 20	resumen de ensayos realizados.....	92
Tabla 21	resultados ensayos de compresión	94
Tabla 22	parámetros geométricos de los cilindros y esfuerzos	98
Tabla 23	coeficiente de poisson y esfuerzos para la muestra 1	98
Tabla 24	σ_1 para la deformación unitaria longitudinal $\varepsilon_1 = 0,000050$, cilindro 1.	100
Tabla 25	interpolación del coeficiente de poisson para un esfuerzo σ_2 , cilindro 1.	101
Tabla 26	coeficiente de poisson y esfuerzos para la muestra 2.	101
Tabla 27	σ_1 para la deformación unitaria longitudinal $\varepsilon_1 = 0,000050$, cilindro 2.	103
Tabla 28	interpolación del coeficiente de poisson para un esfuerzo σ_2 , cilindro 2.	104
Tabla 29	comparación módulos de elasticidad experimentales vs teóricos.....	104
Tabla 30	resumen de coeficientes de poisson.	105
Tabla 31	resultados ensayo spt.	110
Tabla 32	valores orientativos de nspt y módulo de elasticidad de suelos.....	110
Tabla 33	valores orientativos del coeficiente de poisson.	111
Tabla 34	valores del módulo de elasticidad y poisson en el suelo modelado.....	111
Tabla 35	intervalos recomendados de los valores de rigidez axial de geosintéticos	115
Tabla 36	presupuesto referencial de adoquinado de una vía de 100 metros con adoquín tradicional	124
Tabla 37	presupuesto referencial de adoquinado de una vía de 100 metros con adoquín de resina epóxica.....	125

Índice de figuras

Figura 1 Adoquín para tráfico peatonal	26
Figura 2 Adoquín para vías urbanas.	28
Figura 3 Adoquín en estación de servicios	29
Figura 4 Adoquín para pistas de bicicletas y carriles bici.....	30
Figura 5 Fabricación de adoquines por el método manual.	34
Figura 6 Fabricación de adoquines por el método semi-manual.....	35
Figura 7 Fabricación de adoquines por el método automático.....	36
Figura 8 Geomalla biaxial coextruida	42
Figura 9 Geomalla coextruida uniaxial	44
Figura 10 Geomalla coextruida biaxial.	45
Figura 11 Geomalla coextruida triaxial	45
Figura 12 Cartón prensado.....	49
Figura 13 Curvas de gradación máxima, mínima y del agregado fino de holcim	53
Figura 14 Medidas del adoquín propuesto	68
Figura 15 Disposición en un metro cuadrado del adoquín propuesto	68
Figura 16 Adoquín con geometría planteada instalado en un garaje	69
Figura 17 Bloques de adoquín colocados en pendiente basado en el sistema tri-lock.....	70
Figura 18 Geometría interna del cartón prensado	71
Figura 19 Maquina tiger-stone de la empresa holandesa vanku bv	72
Figura 20 Ilustración representativa de propuesta de colocación de adoquines	73
Figura 21 Ilustración representativa de elementos de la propuesta de colocación de pavimento articulado	74
Figura 22 Probetas de dosificación con polímero	76
Figura 23 Probetas de adoquín con polímero.....	77

Figura 24 Mezcla de resina con agregado fino	80
Figura 25 Desencofrado de probetas de adoquín con resina	81
Figura 26 Curvas de resistencias características	87
Figura 27 Resumen de ensayos para índice de absorción de agua.	89
Figura 28 Curva de la resistencia a la abrasión.....	91
Figura 29 Ensayo de resistencia a la compresión.	94
Figura 30 Ensayo de módulo de elasticidad	96
Figura 31 Configuraciones iniciales del proyecto.....	106
Figura 32 Configuraciones dimensionales del proyecto.....	106
Figura 33 Plataforma de 10 metros de longitud y dos capas de suelo.....	107
Figura 34 Colocación de la geomalla bajo el pavimento articulado.....	107
Figura 35 Confinamiento de módulo estructural de 10 metros.....	108
Figura 36 Vehículo tipo 2s2.....	108
Figura 37 Carga distribuida colocada sobre el pavimento articulado.	109
Figura 38 Carga colocada sobre el sistema.	109
Figura 39 Propiedades generales primera capa.	112
Figura 40 Parámetros mecánicos del suelo en la primera capa.	112
Figura 41 Propiedades generales segunda capa.	113
Figura 42 Parámetros mecánicos del suelo en la segunda capa.....	113
Figura 43 Propiedades generales adoquín.....	114
Figura 44 Parámetros mecánicos del adoquín.	114
Figura 45 Geotextiles tejidos.....	115
Figura 46 Geomalla uniaxial.....	116
Figura 47 Geomalla biaxial.....	116
Figura 48 Geomalla triaxial.....	117
Figura 49 Malla de discretización de elementos finitos.....	117

Figura 50 Nivel freático dado por el estudio de suelos.	118
Figura 51 Modelo pavimento articulado.....	118
Figura 52 Deformaciones totales.....	119
Figura 53 Desplazamientos totales.	119
Figura 54 Desplazamientos verticales.....	120
Figura 55 Desplazamientos horizontales.....	120
Figura 56 Deformaciones cortantes.....	121
Figura 57 Curva “s” de proyecto de adoquinado con distintos adoquines.....	127

Resumen

El objetivo de este proyecto fue desarrollar un diseño de pavimento articulado que se base en módulos especialmente diseñados para mejorar tanto la eficiencia de instalación como la capacidad de resistencia de los materiales utilizados. Este diseño estará orientado a su aplicación en áreas de estacionamiento y calles residenciales, con el propósito de crear superficies duraderas y resilientes que se adapten a las necesidades de tráfico y uso en entornos urbanos.

En el contexto actual del diseño de pavimentos articulados, la incorporación de materiales alternativos ha ganado relevancia en la búsqueda de soluciones más sostenibles y eficientes.

En este sentido, la utilización de resina epóxica se ha destacado como una propuesta promisoría en el ámbito de la pavimentación y el diseño urbano.

La inclusión de resina epóxica plantea una perspectiva novedosa para crear superficies resistentes y atractivas, con el potencial de cumplir con los requisitos de durabilidad y fortaleza, al mismo tiempo que fomenta la disminución de los materiales convencionales. Esta coyuntura proporciona el contexto adecuado para una investigación exhaustiva sobre las propiedades, beneficios y desafíos de los adoquines elaborados a partir de la combinación de estos materiales, y su viabilidad en diversos escenarios de construcción y diseño.

El presente proyecto se inserta en esta dinámica, abordando aspectos cruciales en ingeniería, avance tecnológico y ciencia de los materiales, con el objetivo de analizar el comportamiento de los adoquines resultantes de esta mezcla innovadora.

Para investigar en detalle los adoquines modificados con resina epóxica, se ha llevado a cabo una serie de ensayos cuyos detalles y resultados se encuentran detallados en el presente trabajo.

Palabras claves: pavimento articulado, resina epóxica, materiales alternativos.

Abstract

The aim of this project was to develop a design of interlocking pavement based on specially designed modules to enhance both installation efficiency and the resistance capacity of the materials used. This design will be focused on its application in parking areas and residential streets, with the purpose of creating durable and resilient surfaces that adapt to the traffic and usage demands in urban environments.

In the current context of interlocking pavement design, the integration of alternative materials has gained significance in the pursuit of more sustainable and efficient solutions. In this regard, the use of epoxy resin has emerged as a promising proposition within the field of pavement and urban design.

The inclusion of epoxy resin presents a novel perspective for creating durable and appealing surfaces, with the potential to meet durability and strength requirements while promoting the reduction of conventional materials. This situation offers the suitable context for a thorough investigation into the properties, benefits, and challenges of pavers produced through the combination of these materials, and their viability in various construction and design scenarios.

This project fits into this dynamic, addressing crucial aspects in engineering, technological advancement, and materials science, with the objective of analyzing the behavior of pavers resulting from this innovative mixture. To investigate epoxy-modified pavers in detail, a series of tests have been conducted, the details and outcomes of which are outlined in this study.

Key words: interlocking pavement, epoxy resin, alternative materials.

Capítulo I: Introducción

Antecedentes

A lo largo de numerosos años, los adoquines de concreto han demostrado su eficacia como revestimiento en vías de tránsito que cumplen distintos propósitos, desde facilitar el desplazamiento de peatones y vehículos hasta servir como pavimentos en amplias áreas industriales. Históricamente, se identifican cuatro variantes de adoquines que se empleaban en la pavimentación de estas rutas: los de piedra, madera, cerámica y hormigón. Los adoquines iniciales de piedra eran guijarros de río colocados sobre una base de arena y luego unidos con una mezcla de cal y arena en las juntas. Paralelamente, en la primera mitad del siglo XIX, surgieron los adoquines de madera como una alternativa a los de piedra, buscando reducir el ruido generado por las ruedas de acero y las herraduras de animales. (Pariguamán, 2017)

En Ecuador, al abordar el tema de los adoquines, la información sobre sus orígenes es limitada. No obstante, podemos remontarnos a las primeras calles de las ciudades del país, como la Calle Larga en Cuenca, donde se utilizaban adoquines de piedra hace más de 400 años. Estos siglos denotan un período en el que la técnica de adoquinado no ha experimentado cambios significativos, ya que no se han incorporado nuevas tecnologías ni enfoques innovadores en su implementación.

En respuesta a la creciente necesidad de soluciones sostenibles y eficientes en la construcción, se ha destacado el empleo de materiales alternativos, como los adoquines hechos de resina epóxica y arena. Estos materiales novedosos han surgido como una perspectiva innovadora en el ámbito de la pavimentación y el diseño urbano. La combinación de resina epóxica y arena ofrece durabilidad y atractivo visual, además de potencial para cumplir con estándares de resistencia y durabilidad, al mismo tiempo que fomenta la disminución de materiales convencionales. Este contexto sienta las bases para analizar con

detalle las características, beneficios y desafíos de los adoquines de resina epóxica y arena, así como su aplicación en diversas situaciones de construcción y diseño en la ciudad.

Este proyecto se enmarca en una problemática que abarca diversos elementos esenciales, vinculados con la ingeniería, el avance tecnológico y la ciencia de los materiales. El objetivo es determinar la influencia del uso del cartón prensado con arena confinada y resina epóxica en el comportamiento del adoquín.

Planteamiento Del Problema

Los adoquines de concreto presentan problemas estructurales que causan la pérdida y separación de los bloques. Además, se observa el desprendimiento y desmoronamiento de los bordes de los bloques debido al tránsito. Otro problema común es el hundimiento de los bloques, lo que provoca la formación de baches. Estos se deben al trabajo individual de los bloques de la capa de rodadura, que al enfrentar cargas intensas experimentan deformaciones permanentes y pandeo del pavimento. Por último, se registra una falla por corte debido a la baja capacidad de soporte de los adoquines. (Hernández, 2018)

El proceso de adoquinar una calle generalmente requiere un periodo de al menos 30 días para su completa ejecución. Esta información se ha obtenido del portal de contrataciones públicas en Ecuador, donde se registran los plazos y requisitos para este tipo de proyectos de infraestructura vial. Durante este período, se llevan a cabo diversas etapas que incluyen la preparación del terreno, la instalación de los adoquines, su compactación y el acabado final.

En este contexto, es fundamental reconocer la necesidad de explorar alternativas en cuanto a materiales y procesos constructivos que sean más eficaces y capaces de solucionar los problemas estructurales que afectan a los adoquines de concreto. Específicamente, se busca abordar las excesivas deformaciones que experimentan y, al mismo tiempo, reducir el

tiempo requerido para llevar a cabo el proceso de construcción. Al encontrar soluciones más eficientes, se pueden lograr importantes beneficios, como la disminución de los costos de mano de obra asociados con la instalación y el mantenimiento de los adoquines.

Justificación

El uso generalizado de cemento en la industria de la construcción ha contribuido significativamente a la contaminación ambiental. Según la Agencia Internacional de la Energía, la fabricación de cemento es responsable de aproximadamente el 8% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂), lo que lo convierte en uno de los principales sectores emisores de gases de efecto invernadero.

En la ciudad de Quito se producen 2.200 toneladas de desechos al día, de los que solo se recuperan 25,20 toneladas de material reciclable, es decir el 1% del total de la basura producida; cuando el 60% de los desechos de Quito son residuos orgánicos-alimenticios, el 30% material reciclable y el 10% son escombros y chatarra (La Hora, 2018). El cartón a pesar de ser un material de baja calidad, cuya recuperación es económicamente insignificante (Virginie, 2011b), según datos del INEC, para el año 2018 la clasificación de papel y cartón en hogares se dio en un 32%, y la clasificación de residuos (orgánicos, papel / cartón, plástico, vidrio, metal, tetrapack) para el mismo año a nivel nacional fue de 52,30% (INEC, 2018). Mientras que, en Quito, la recuperación de material reciclable para el año 2018 en promedio fueron 247,20 toneladas mensuales de un total de 65.271 toneladas (EMASEO, 2018); esto muestra la posibilidad de aprovechar los materiales en su totalidad, por su potencial reciclaje.

Con base en lo mencionado anteriormente, resulta fundamental buscar soluciones tecnológicas e innovar en técnicas de construcción con el objetivo de reducir el impacto ambiental derivado del uso de recursos en el sector de la construcción. En este contexto, el presente proyecto de investigación tiene la intención de explorar la posibilidad de emplear un árido fino como sustituto parcial o total del cemento tradicional en la fabricación de adoquines.

Esto permitiría reducir la dependencia de recursos no renovables, como el cemento, y disminuir las emisiones de dióxido de carbono asociadas a su producción. Además, se pretende evaluar el impacto de este árido fino en las propiedades mecánicas y durabilidad de los adoquines, asegurando que cumplan con los estándares de calidad requeridos. Y, se propone mejorar la geometría de los adoquines mediante la incorporación de cartón reciclado como material auxiliar. Esto tiene como objetivo optimizar la resistencia, estabilidad y eficiencia del pavimento articulado. Al implementar esta solución innovadora, se espera reducir tanto los tiempos de fabricación como los costos asociados al proceso de producción, al mismo tiempo que se promueve la reutilización de un material reciclado.

Alcance del proyecto

A través de una investigación práctica, se está buscando desarrollar adoquines viales que cumplan con los requisitos establecidos por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). Estos requisitos se refieren a pruebas de tracción indirecta, humedad y resistencia a la abrasión de los adoquines. El objetivo final es que este nuevo material pueda ser considerado como una opción viable y confiable para la construcción de calles y carreteras en el futuro. Este enfoque de investigación tiene como objetivo mejorar la calidad y durabilidad de los adoquines utilizados en infraestructuras viales, brindando soluciones más eficientes y confiables para el transporte y la movilidad de las personas.

Objetivos

Objetivo General

- Diseñar un pavimento articulado, mediante módulos que optimicen la instalación y la resiliencia de los materiales, para su funcionalidad en estacionamientos y calles residenciales.

Objetivos específicos

- Determinar las características físicas, químicas y mecánicas de los materiales.
- Determinar la geometría del módulo pavimento articulado.
- Diseño y determinación del espesor del módulo pavimento articulado.

Hipótesis

La optimización geométrica en el diseño de un pavimento articulado utilizando arena confinada en cartón prensado y la implementación de un polímero mejorará la resistencia estructural, la durabilidad y el desempeño general del pavimento, lo que resultará en una solución eficiente y sostenible para sus diferentes aplicaciones.

Capítulo II: Marco teórico

Adoquines

Desde los primeros tiempos de la construcción de vías, el adoquín ha sido un material empleado, originariamente creado a partir de piedras que eran talladas. Un adoquín es un componente elaborado a partir de rocas, ya sean naturales o manufacturadas. El propósito principal del adoquín es su utilización en la pavimentación de carreteras, aceras, zonas peatonales, parques, entre otras áreas. En la actualidad, el adoquín se produce en su mayoría a partir de concreto, lo que permite darle diversas formas para lograr un acabado superior en la superficie de rodadura. En las zonas urbanas, el adoquín sigue siendo un recurso ampliamente empleado en la pavimentación, ya que su instalación y reemplazo son sencillos en caso de daños en la infraestructura vial. (Cárdenas & Guncay, 2023)

Aplicaciones

El adoquín se presenta en una amplia variedad de aplicaciones, abarcando un amplio espectro de posibilidades. Su uso abarca numerosas construcciones que requieren pisos decorativos y resistentes al tráfico, capaces de otorgar un toque distintivo a la obra. A continuación, se enumeran diversos tipos de aplicaciones en distintas áreas:

Áreas peatonales:

Los adoquines encuentran diversas aplicaciones en áreas peatonales, entre las cuales se incluyen:

- Aceras
- Paseos
- Plazas públicas
- Jardines
- Accesos a viviendas
- Patios interiores y exteriores de edificios
- Accesos para vehículos de emergencias o servicios municipales.

La elección del adoquín cerámico para superficies exteriores es muy aconsejable debido a sus notables ventajas estéticas, mecánicas y su capacidad para prevenir el deslizamiento, incluso en condiciones climáticas adversas.

La versatilidad de los adoquines, tanto en dimensiones como en su forma de colocación, les permite adaptarse con facilidad a diferentes tipos de superficies existentes. Además, su diversidad de colores contribuye a la delimitación y caracterización de espacios en plazas, paseos y otros entornos, incluso sirviendo para marcar la ubicación de servicios municipales subterráneos, como conducciones eléctricas, alcantarillado y saneamiento.

En áreas residenciales, se valora positivamente el uso inmediato del pavimento de adoquín cerámico tras su instalación, su costo reducido de mantenimiento y la posibilidad de reutilización.

Es importante destacar que este tipo de aplicación es sumamente recomendable debido a la posibilidad de reutilización en el caso de requerir una restauración de pavimentos en el futuro. (Salguero, 2013)

Figura 1

Adoquín para tráfico peatonal



Nota. Ventajas del uso de la Decoración de Adoquines Peatonales, por Fenollar, 2020.

Áreas sometidas a tráfico permanente:

El adoquín encuentra aplicaciones en áreas con tráfico permanente, siendo comúnmente utilizado en:

- Vías urbanas
- Travesías
- Terminales de autobús
- Áreas residenciales
- Mercados
- Vías rurales, entre otros.

En vías urbanas, el adoquín se destaca como la mejor opción actualmente. Sus ventajas en comparación con otros pavimentos son notables: facilidad de colocación, bajo mantenimiento, posibilidad de reutilización y capacidad de señalización permanente para pasos de peatones. Además, presenta resistencia frente a agentes atmosféricos y cargas, y permite un amplio abanico de opciones en el diseño de superficies.

Figura 2

Adoquín para vías urbanas.



Nota. Pavimento de adoquines para tránsito vehicular, por Fenollar, 2021.

Otra aplicación ventajosa se encuentra en áreas sujetas a tráfico y tareas pesadas, como:

- Áreas industriales
- Naves industriales con tráfico pesado y baja velocidad
- Almacenes
- Áreas de carga y descarga
- Zonas portuarias
- Aeropuertos

En este tipo de áreas, las propiedades del pavimento con adoquines sobresalen, ya que puede resistir cargas concentradas o generadas por vehículos pesados, como camiones con remolque, grúas, entre otros. (Salguero, 2013)

Áreas con ambiente agresivo:

El pavimento con adoquín se presenta como una opción ideal debido a su resistencia a los ácidos, lo que lo convierte en una excelente elección para superficies fijas expuestas a ambientes agresivos, tales como:

- Fábricas químicas y áreas industriales donde se manipulan o almacenan materiales corrosivos.
- Estaciones de servicio, garajes y depósitos de vehículos.
- Áreas de carga y descarga, previniendo la contaminación por pérdida de carga y facilitando reparaciones y limpieza de vehículos.
- Industrias agrícolas donde puedan darse jugos de fermentación o filtraciones con elevada agresividad.

(Salguero, 2013)

Figura 3

Adoquín en Estación de Servicios



Nota. Creado específicamente para tráfico comercial intenso e industrial ligero, por Ecuadoquin, 2018.

Áreas especiales:

Además, el adoquín tiene aplicaciones en otras áreas especiales, como:

- Protección de taludes.
- Uso en edificios, tanto en forjados como en cubiertas planas.
- Construcción de pistas de bicicletas y carriles bici.
- Revestimiento de estructuras hidráulicas, como canales, y protección de zonas costeras.
- Embellecimiento de áreas arquitectónicas.

(Salguero, 2013)

Figura 4

Adoquín para Pistas de Bicicletas y carriles bici.



Nota. Uso de adoquines de hormigón en la pavimentación de carriles bici, por Fenollar, 2023.

Clasificación

El Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) en la Norma Técnica Ecuatoriana 1483, clasifica al adoquín en 3 tipos:

Adoquines tipo A. Adoquines con bordes en forma de dientes que se conectan en las cuatro direcciones, tienen la capacidad de ser instalados en una formación de patrón similar a una esterilla. Debido a su estructura plana, cuando se unen, tienen la propiedad de contrarrestar la expansión de las juntas de manera paralela, tanto en los ejes longitudinales como en los transversales de las unidades. (NTE INEN, 1986)

Adoquines tipo B. Adoquines con bordes en forma de dientes que solo se conectan entre sí en dos de sus lados, y que no son aptos para ser dispuestos en un patrón similar a una esterilla. Debido a su estructura plana, cuando se ensamblan, tienen la capacidad de contrarrestar la expansión de las juntas solo en los ejes longitudinales de los adoquines. La unión con las otras caras de los adoquines depende de su precisión en la colocación. (NTE INEN, 1986)

Adoquines tipo C. Adoquines de forma rectangular con un perfil simple que no presentan conexión entre sí, y cuyo efecto de entrelazado depende tanto de su exactitud en las dimensiones como de la precisión durante su colocación para crear el patrón punteado. (NTE INEN, 1986)

Requisitos de los Productos

En la normativa INEN 3040 se detallan las características y pautas de cumplimiento, las cuales están resumidas en la siguiente tabla.

Tabla 1

Plan de muestreo y criterios de conformidad para ensayos de tipo inicial y adicionales

Característica	Criterio de Conformidad
Aspectos visuales	Los adoquines deben estar exentos de cualquier exceso de material que se encuentre sobresaliendo de manera irregular en los bordes y las superficies. La superficie visible de los adoquines no debe presentar imperfecciones como grietas o desprendimientos.
Espesor de la doble capa	Debe ser igual o mayor a 4 mm. No se permite que ningún adoquín muestre desprendimiento.
Forma y dimensiones	Cada adoquín debe cumplir con los requisitos mencionados. Las dimensiones permisibles para adoquines con un grosor inferior a 100 mm serán de ± 2 mm en longitud, ± 2 mm en ancho y ± 3 mm en espesor. En el caso de adoquines con un grosor igual o mayor a 100 mm, se aceptarán tolerancias de ± 3 mm en longitud, ± 3 mm en ancho y ± 4 mm en espesor.
Resistencia y carga a la tracción indirecta	La resistencia típica a la tracción indirecta (T) debe ser igual o mayor a 3,6 MPa. Ningún valor individual puede ser menor a 2,9 MPa ni tener una carga de

Característica	Criterio de Conformidad
Resistencia al desgaste por abrasión	tracción indirecta por unidad de longitud (F) inferior a 250 N/mm.
Resistencia a deslizamiento/resbalamiento.	La exigencia para la resistencia al desgaste por abrasión consiste en que la longitud de la marca dejada por la rueda ancha sea igual o inferior a 25 mm. En situaciones particulares, el cliente puede requerir al fabricante que la marca tenga una longitud máxima de 20 mm.
Resistencia a deslizamiento/resbalamiento.	Los adoquines presentan una resistencia adecuada al deslizamiento, siempre y cuando no se haya pulido toda la superficie visible para obtener una textura extremadamente suave. Se debe proporcionar el promedio de los valores de los 5 adoquines.
Comportamiento frente al fuego	Los adoquines se categorizan como elementos no inflamables y que no contribuyen significativamente al fuego, sin requerir pruebas adicionales.
Resistencia climática por absorción	Los adoquines deben tener una tasa de absorción igual o menor al 6 %. Se debe proporcionar el promedio de los valores de absorción de los 5 adoquines.

Nota. Tabla de Plan de muestreo y criterios de conformidad para ensayos de tipo inicial y adicionales. Recuperado de (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2016)

Métodos de Fabricación del adoquín

Contamos con tres enfoques para la producción de adoquines, aunque la mayoría son confeccionados de manera manual mediante una variedad de moldes. Actualmente, se está avanzando en la mejora de los adoquines mediante el empleo de maquinaria. Estos métodos incluyen:

Método Manual

El procedimiento se ejecuta de forma manual; sin embargo, en la actualidad, este enfoque ha disminuido su empleo debido a que los resultados obtenidos no satisfacen los requerimientos esenciales del producto. Por lo tanto, este método suele aplicarse en áreas rurales apartadas de las ciudades, ya que durante la producción no se adhieren a ningún estándar de calidad. (Chaluiza, 2012)

Figura 5

Fabricación de Adoquines por el Método Manual.



Nota. Plantilla de madera para adoquines, Tomado de Vinny The Twister, 2020.

Semi- manual

En el país, es el método preponderante en las empresas dedicadas a la producción de adoquines. El proceso de manufactura se inicia con la mezcla de los componentes en una mezcladora equipada con tres hélices internas. El tiempo de mezcla oscila entre 2 y 3 minutos hasta alcanzar la textura adecuada para obtener el adoquín deseado. Después, se utiliza una máquina semiautomática para la formación de los adoquines, denominada prensadora. Esta máquina opera mediante un proceso de vibro compactación, es decir, la agitación del material se logra mediante una plataforma que incorpora una masa excéntrica. La compactación se efectúa al soltar apisonadores vibratorios sobre el material. (Pariguamán, 2017). El proceso completo tiene una duración estimada de alrededor de 15 segundos para lograr la desmoldación a través de una acción manual.

Figura 6

Fabricación de Adoquines por el Método Semi-Manual.



Nota. Adoquinera Semi-Automática AMA-600, Tomado de INDUMEI.

Automático

En el procedimiento de elaboración de adoquines, este enfoque se lleva a cabo de manera automatizada, abarcando todo el proceso desde la dosificación hasta la colocación definitiva del producto. (Cabezas, 2014). Si participan empleados, principalmente para supervisar la calidad del producto.

Figura 7

Fabricación de Adoquines por el Método Automático.



Nota. Adoquinera Automática - Hidráulica AHA-4000, Tomado de INDUMEI.

Polímero

Un polímero es una sustancia química compuesta por unidades moleculares repetitivas llamadas monómeros, que se unen entre sí mediante enlaces químicos para formar una

estructura macromolecular de gran tamaño. Estos materiales presentan propiedades únicas debido a su alta masa molecular y su capacidad para adoptar diferentes formas y configuraciones. Los polímeros se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza y se utilizan en numerosas aplicaciones industriales y cotidianas. Su versatilidad los convierte en elementos fundamentales en la fabricación de plásticos, fibras textiles, materiales de construcción, recubrimientos, adhesivos y una variedad de productos que nos rodean.

Los polímeros aglomerantes ofrecen ventajas significativas en comparación con los métodos tradicionales en nuestra vida diaria. Los polímeros desempeñan un papel crucial en la ciencia de los materiales y su estudio continuo ha permitido avances significativos en campos como la construnales de unión, como el uso de mortero o cemento. Estos adhesivos poliméricos son flexibles, lo que les permite adaptarse a diferentes superficies y compensar las tensiones y movimientos estructurales. Además, presentan una excelente resistencia a la tracción y a la fatiga, lo que garantiza una unión duradera y resistente a lo largo del tiempo.

Resina Epóxica

Las resinas epóxicas, una clase de polímeros termoestables, son conocidas por su amplia gama de aplicaciones y propiedades. Estas resinas, derivadas de compuestos de poliéter, exhiben la singularidad de poseer múltiples grupos epóxicos en su estructura molecular. Estos grupos, también llamados grupos oxirano, presentan una configuración que consiste en un átomo de oxígeno enlazado a dos átomos de carbono. La clave de su versatilidad radica en la habilidad de estos anillos epóxicos para participar en reacciones de apertura de anillo, lo que permite que las resinas epóxicas polimericen y se endurezcan. Esta capacidad de interacción con diversas sustancias confiere a las resinas epóxicas una flexibilidad excepcional en la fabricación de una amplia gama de productos, desde piezas de ingeniería, componentes electrónicos y recubrimientos protectores. En este contexto,

exploraremos más a fondo las propiedades y aplicaciones de estas resinas versátiles y duraderas. (Bhatnagar, 1996), (Dodiuk & Goodman, 2014)

La composición de una resina epóxica debe incluir un agente de curado apropiado, el cual variará según los requisitos específicos. Para lograr ciertas propiedades deseadas, se pueden emplear distintas combinaciones tanto de la resina como del tipo de agente endurecedor, junto con las condiciones de proceso de polimerización. (Bhatnagar, 1996).

La estructura tridimensional de los poliéteres derivados de la resina epóxica se forma durante el proceso de reticulación, mediante la utilización de diversos agentes endurecedores, como ácidos, anhídridos y aminas. Estas reacciones conducen a la creación de un sistema tridimensional interconectado que no es soluble en disolventes comunes. Sin embargo, estos materiales presentan características de rigidez y fragilidad. Aunque la resistencia y rigidez pueden ser beneficiosas para ciertas aplicaciones, la fragilidad o la baja resistencia a la propagación de fisuras es su principal limitación. Esto resulta en una resistencia deficiente ante impactos, debido al alto grado de endurecimiento presente en el material. (Bagheri, Marouf, & Pearson, 2009)

Las resinas epóxicas forman parte de los grupos fundamentales de polímeros termoestables, destacándose por su capacidad de interacción con distintos agentes de endurecimiento que contienen hidrógeno activo. Estos agentes, como aminas, amidas, alcoholes y mercaptanos, participan en diversas reacciones químicas, permitiendo también el control de las condiciones de endurecimiento para modular el grado de entrecruzamiento. Mediante la variación en la estructura química del agente de entrecruzamiento y las condiciones de endurecimiento, es posible obtener materiales sólidos entrelazados con propiedades que abarcan desde resistencia química hasta resistencia térmica, rigidez, flexibilidad y dureza, entre otras. Las reacciones de endurecimiento se desencadenan al abrir el anillo del grupo oxirano en la estructura de la resina epóxica a través de una reacción de adición nucleofílica. (Dodiuk & Goodman, 2014)

Cartón Prensado

El cartón corrugado es un material que se compone de capas exteriores de papel liso, conocidas como liners, que se adhieren a las crestas de un nervio central hecho de papel ondulado o flauta. Esta estructura confiere al cartón corrugado una naturaleza liviana, hueca y no maciza, ya que está compuesto principalmente por celulosa. La resistencia de este material se basa en la disposición y la interacción de sus componentes, así como en las propiedades inherentes a su geometría y materia prima. (Egas & Perez, 2016)

Propiedades Físicas Del Cartón Prensado

Resistencia a la humedad

La humedad presente en el cartón corrugado y el papel se mide en términos de porcentaje, representando la relación entre la cantidad de agua que contienen en relación a su peso total (base húmeda) o en relación a la cantidad de material completamente seco (base seca). Si la humedad en el cartón experimenta cambios significativos, esto afectará su resistencia mecánica y también provocará alteraciones en las dimensiones, así como la aparición de pliegues y arrugas en la superficie de los liners. (Egas & Perez, 2016)

Permeabilidad al aire

Esta característica se cuantifica mediante la medición del volumen de aire que puede pasar a través de 1 cm² de cartón en un segundo, bajo una presión de 1 cm de agua. Sin embargo, en la práctica, esta propiedad se evalúa midiendo el tiempo en segundos que tarda un volumen de 100 ml de aire en atravesar el material. (Egas & Perez, 2016)

Permeabilidad al agua

Para cuantificar cuán permeable al agua es el cartón corrugado se mide la masa de agua en g/m² que puede absorber el papel en 30 minutos. (Egas & Perez, 2016)

Propiedades Mecánicas del Cartón Prensado

Resistencia al Aplastamiento Plano

La capacidad del cartón corrugado para resistir fuerzas de compresión aplicadas en un área específica y perpendicular al plano en el que se encuentra dispuesto se conoce como una propiedad mecánica importante. Si el cartón no puede soportar esta presión, su estructura colapsará, lo que puede ocurrir cuando las flautas se inclinan o sufren una deformación plástica que les impide volver a su estado original. (Egas & Perez, 2016)

Esta propiedad mecánica es especialmente relevante en el diseño de estructuras que utilizan cartón corrugado, ya que puede haber elementos que estén expuestos directamente a fuerzas de aplastamiento. Para determinar los valores de esta propiedad en diferentes tipos de cartón corrugado, se utiliza la norma NTE INEN-ISO 3035:2013, que está vigente en el país. Esta norma proporciona pautas y criterios para evaluar y medir la resistencia a la compresión del cartón corrugado, garantizando así que cumpla con los estándares requeridos en cuanto a su rendimiento mecánico. (Egas & Perez, 2016)

Arena

Se conoce como arena o agregado fino al producto que proviene de la desintegración de la roca volcánica y que por su tamaño pasa el tamiz 3/8" y queda retenido en el tamiz número 200.

Características

Arena manufacturada es el producto de tres o más procesos de trituración y de granulometría de 0 – 4.75mm que satisface con calidad homogénea la producción de: mezclas asfálticas, adoquines, bloques y la fabricación de concretos y morteros.

Los agregados deben estar constituidos por partículas:

- Duras y resistentes.
- Íntegras, es decir, fuertes y estables a la acción del congelamiento y de los agentes atmosféricos.
- Limpias, es decir libres de impurezas tales como: materia orgánica, finos nocivos (p.ej. arcilla), partículas livianas o deleznable (p.ej. madera), contaminantes (p.ej. cloruros)
- Sin reacciones deletéreas con los álcalis.
- De buena forma (ni planas, ni elongadas).
- Bien gradadas en tamaño.

Geomalla

(Wavin) en su libro "Diseño de Infraestructura con Geosintéticos" señala que "las Geomallas Coextruidas son estructuras bidimensionales elaboradas a base de polímeros, conformadas por una red regular de costillas conectadas de forma integrada por extrusión, con

aberturas de suficiente tamaño para permitir la trabazón del suelo, piedra u otro material geotécnico circundante.” Y como lo señala (Miranda, 2019) “El término "coextruido" se refiere a un material formado por la combinación de diferentes compuestos con diferentes propiedades para optimizar y asegurar su rendimiento”.

Figura 8

Geomalla Biaxial Coextruida



Nota. La imagen muestra una geomalla tipo biaxial. Tomado de Wavin, s.f.

Y al hablar de propiedades las geomallas estas cumplen con una función principal y así lo define (Wavin) “La principal función de las Geomallas Coextruidas es indiscutiblemente el refuerzo; el uso del tipo de Geomalla está ligado a la dirección en que los esfuerzos se transmiten en la estructura, por ejemplo, en aplicaciones tales como muros en suelo reforzado o en terraplenes, se utilizan las Geomallas Uniaxiales (mono-orientadas) que son Geomallas con una resistencia y rigidez mayor en el sentido longitudinal que en el transversal. Mientras que, en estructuras en que la disipación de los esfuerzos se realiza de forma aleatoria y en todas las direcciones, como por ejemplo estructuras de pavimento o cimentaciones

superficiales, se utilizan Geomallas Biaxiales (bi-orientadas) las cuales no tienen una diferencia considerable frente a sus propiedades en los dos sentidos de la grilla.”

Según el autor, la función principal de la geomalla es fortalecer la estructura a la que se destina. Específicamente, en el caso de pavimentos, el autor sugiere el uso de geomallas bidireccionales debido a su capacidad para reforzar la estructura en ambos sentidos. Sin embargo, también menciona las geomallas multi-direccionales, que ofrecen una mayor rigidez a las estructuras y distribuyen las cargas en todas las direcciones, lo que las diferencia de otras geomallas disponibles en el mercado actual.

Y como la menciona la empresa (Tensar, s.f.) al respecto de geomallas y su aplicación para adoquines indica que las geomallas también pueden emplearse para reforzar y estabilizar subrasantes débiles debajo de adoquines de concreto. Independientemente de si se trata de una vía o una acera, el uso de geomallas evita el desplazamiento de los adoquines y disminuye la necesidad de mantenimiento en intervalos regulares.

Clasificación de las Geomallas

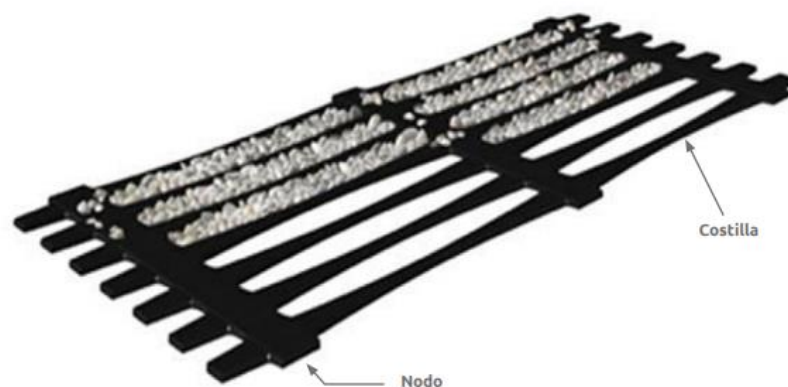
Las geomallas pueden ser clasificadas de acuerdo con diversos criterios que han sido tomados en cuenta a lo largo del tiempo. Sin embargo, en última instancia, se agrupan en tres categorías principales, las cuales se detallan a continuación:

Geomallas Uniaxiales

(Miranda, 2019) menciona que las geomallas uniaxiales están diseñadas para reforzar la estructura en una única dirección, lo que les confiere una alta resistencia a la tensión en ese sentido específico. Estas geomallas son ampliamente empleadas en suelos, especialmente los de tipo granular, ya que proporcionan un sistema de trabazón efectivo

Figura 9

Geomalla Coextruida Uniaxial



Nota. Configuración geométrica que tiene una geomalla uniaxial. Tomado de Wavin, s.f.

Geomallas Biaxiales

La empresa (PIVALTEC, s.f.) menciona que las geomallas biaxiales se caracterizan por tener un alto módulo de resistencia a la tensión y una excelente capacidad para resistir daños durante la instalación. La estructura de estas geomallas, con sus aberturas, permite una eficaz confinación y refuerzo del suelo, ya que asegura la interacción con el material granular.

Figura 10

Geomalla Coextruida Biaxial.



Nota. Configuración geométrica que tiene una geomalla biaxial. Tomado de Wavin, s.f.

Geomallas Triaxiales

Las geomallas triangulares son un tipo de geomalla cuya función principal es proporcionar a la estructura un refuerzo que le permita resistir la tensión en todas las direcciones radiales. En otras palabras, están diseñadas de manera triangular para soportar la tensión en todas las direcciones, así lo menciona (Miranda, 2019) en su tesis “Diseño de una Base Granular Reforzada con Geomalla Biaxial; para Optimizar la Calidad en la Construcción de Pavimentos Flexibles, Tramo Tayabamba – Ongon. Provincia de Patate. La Libertad”.

Figura 11

Geomalla Coextruida Triaxial



Nota. Tomado de PIVALTEC, s.f.

PLAXIS

La propuesta planteada para la elaboración de este proyecto consiste en la construcción de un modelo basado en elementos finitos, el cual tiene como objetivo simular la carga ejercida sobre el adoquín y la geomalla y analizar la propagación de las vibraciones generadas por dicha carga hasta alcanzar el suelo.

El programa de computadora PLAXIS representa un software basado en el concepto de elementos finitos, especialmente concebido para llevar a cabo análisis relacionados con la deformación y estabilidad de problemas geotécnicos. (Galvan, 2014)

Su origen remonta a la Universidad Técnica de Delft, donde surgió en 1987 bajo la iniciativa del Departamento de Trabajos Públicos y Dirección del Agua. Inicialmente, el propósito era desarrollar un programa de elementos finitos de uso accesible para el análisis de diques construidos sobre las capas de suelo blando que componen el subsuelo de Holanda. A lo largo de los años subsiguientes, PLAXIS se ha expandido para abarcar una amplia gama de áreas dentro de la ingeniería geotécnica. (Galvan, 2014)

PLAXIS opera utilizando el enfoque de elementos finitos, una metodología que implica la subdivisión de la estructura a ser diseñada en un conjunto limitado de elementos con geometría uniforme y manejable. Estos elementos retienen las propiedades inherentes a la estructura en su conjunto y, al ser considerados en conjunto, permiten prever el comportamiento global de la estructura.

Este software incluye un sistema de diseño asistido por computadora (CAD) que representa de manera simplificada la sección vertical de un modelo geométrico correspondiente al problema geotécnico. Luego, este modelo es discretizado utilizando una malla de elementos finitos, se asignan las condiciones iniciales y posteriormente se efectúan los cálculos, generando informes detallados sobre la problemática modelada. (Díaz & López, 2008)

PLAXIS es capaz de abordar situaciones de deformación plana con simetría axial. Sus aplicaciones abarcan desde la modelación de estructuras como muros de contención, pilotes y tablestacas, hasta terraplenes, taludes, túneles y geomallas, entre otras. Asimismo, es capaz de llevar a cabo análisis plásticos, de consolidación, de seguridad y análisis dinámicos. (Díaz & López, 2008)

Capítulo III: Materiales Y Métodos

Materia Prima

Para la elaboración de este pavimento articulado se tiene como materia prima el árido fino, el polímero, resina epóxica y el cartón prensado. Como punto de partida se realizó la caracterización del árido fino en el “Laboratorio de Ensayo de Suelos, Pavimentos y Hormigones” de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, de acuerdo a la Norma Técnica Ecuatoriana vigente, para el posterior cálculo de la dosificación.

Obtención De Materia Prima

Agregado Fino

El agregado fino empleado se obtuvo de la planta de agregado de Holcim, ubicada en Pifo, kilómetro 4.5 vía Pifo - Papallacta.

Este agregado fino es el producto de tres o más procesos de trituración y de granulometría de 0 – 4.75mm que satisface con calidad homogénea la producción de: mezclas asfálticas, adoquines, bloques y la fabricación de concretos y morteros. (Holcim)

Polímero Emulsión De Estireno-Acrílico Modificado Con Silicio

El polímero aglomerante se obtuvo en la empresa Soiltorock ubicada en la ciudad de Quito, la misma que importa dicho material para trabajos de estabilización de suelos.

Soiltorock es una empresa ecuatoriana que, manteniendo criterios de responsabilidad social y ambiental, un comportamiento empresarial ético y una filosofía de mejoramiento continuo; proveemos soluciones innovadoras de Ingeniería (Soiltorock, s.f.).

Cartón Prensado

Para el diseño del pavimento articulado, se utilizará un molde confeccionado a partir de cartón prensado. El propósito fundamental de esta investigación consiste en optimizar la geometría de los adoquines, aprovechando la disposición de los espacios naturales existentes en el cartón.

Para determinar la configuración geométrica del módulo del pavimento articulado, se confeccionará una pequeña caja de cartón que servirá como base para el adoquín.

- Preparación del cartón prensado:

Se debe conseguir hojas de cartón prensado de tamaño adecuado para el molde que se desee crear. Asegurándonos de que el cartón sea lo suficientemente resistente para soportar el peso de la arena.

- Diseño del molde:

Se diseña la forma y dimensiones del molde en base al tamaño y la geometría que se desee para la arena confinada. Puede ser una caja, un rectángulo u otra figura que se adapte a la geometría deseada.

- Corte y ensamblaje:

Se corta las piezas de cartón según el diseño del molde. Esto puede incluir las paredes laterales, la base y cualquier otro componente necesario para darle forma al molde.

Se ensambla las piezas de cartón de manera que formen el molde deseado. Se utiliza pegamento o cinta adhesiva resistente para asegurar las uniones y mantener la forma

Esto se logrará de manera que la disposición final coincida con la representación ilustrada en la Figura 12.

Figura 12

Cartón prensado



Nota. El cartón prensado es un material versátil y sostenible que se puede obtener a través del reciclaje. El proceso de obtención comienza con la recolección de cartón usado, como cajas de embalaje, periódicos y papel de desecho.

Caracterización Del Agregado Fino

Granulometría

Para llevar a cabo la evaluación de la granulometría de tamaños de partículas y el cálculo del módulo de finura del agregado fino, se siguió la norma NTE INEN 696 del Instituto Ecuatoriano de Normalización (2011a). En este ensayo, se consideraron los siguientes materiales y procedimientos:

Materiales

- Horno
- Balanza
- Juego de Tamices: N°4, N° 8, N° 16, N° 20, N° 30, N° 50, N° 100, N° 200
- Agitador de tamices mecánico.

Proceso

- Se secó el agregado durante 24 horas en el horno a una temperatura de 110°C
- De la muestra ya seca al horno, se tomaron 500 gramos para ensayar.
- La muestra fue colocada en el juego de tamices armado en forma descendente de aberturas.
- Se agitó el material en la tamizadora mecánica durante 1 minuto.

- Pesamos la cantidad de muestra retenida en cada uno de los tamices. El módulo de finura se calcula mediante la siguiente expresión.

$$MF = \frac{\sum \% \text{ ret. Acum malla (N}^\circ 4, \text{N}^\circ 8, \text{N}^\circ 16, \text{N}^\circ 30, \text{N}^\circ 50, \text{N}^\circ 100,}{100}$$

Donde: MF: Módulo de finura del árido fino.

Tabla 2

Límites de gradación para el agregado fino

Tamaño del tamiz (mm)	Porcentaje que pasa (%)
9,50	100 a 100
4,75	95 a 100
2,36	80 a 100
1,18	50 a 85
0,60	25 a 60
0,30	10 a 30
0,15	2 a 10

Nota. La tabla muestra los límites mínimos y máximos, expresados en porcentaje acumulado de agregado fino que pasa por los respectivos tamices. Recuperado de la norma INEN 872 (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011c).

Resultados

Tras llevar a cabo el ensayo granulométrico correspondiente, se determinó que el agregado fino proveniente de la cantera de Holcim posee un módulo de finura de 3,32. Además, se observó que la mayor proporción de partículas se retiene en el tamiz N° 8, tal como se ilustra en la Tabla 3.

Tabla 3

Ensayo granulométrico del agregado fino

Tamices	Peso retenido (g)	Retenido acumulado (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa (%)
No 9	0,00	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
No 4	1,47	1,47	0,29%	0,29%	99,71%
No 8	149,25	150,72	29,88%	30,17%	69,83%
No 16	136,38	287,1	27,30%	57,48%	42,52%
No 20	29,86	316,96	5,98%	63,45%	36,55%
No 30	39,52	356,48	7,91%	71,36%	28,64%
No 50	53,96	410,44	10,80%	82,17%	17,83%
No 100	39,98	450,42	8,00%	90,17%	9,83%
No 200	22,61	473,03	4,53%	94,70%	5,30%
Pas. No 200	26,49	499,52	5,30%	100,00%	
	499,52		100,00%		

PESO INICIAL DE LA MUESTRA

(G)

500

Módulo de finura

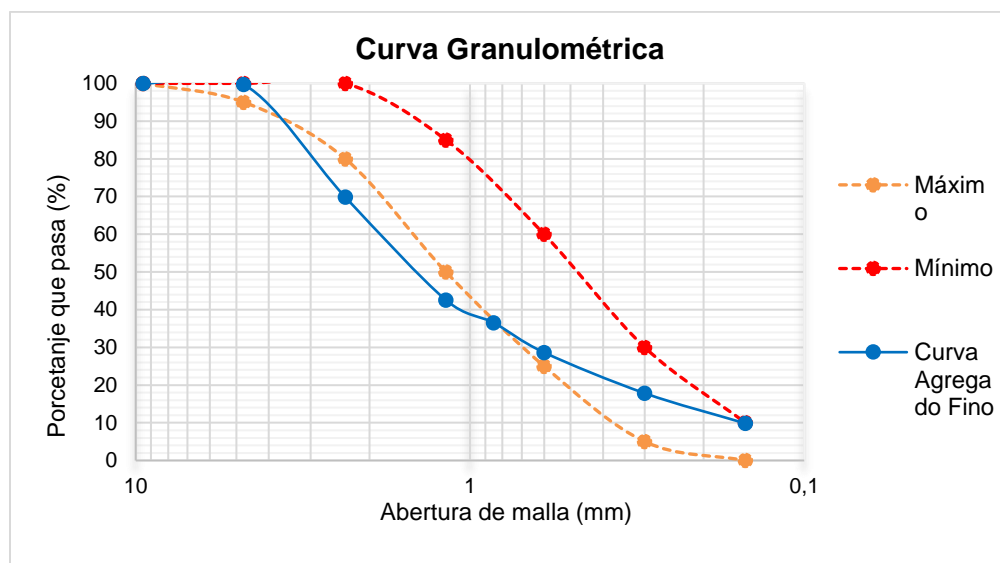
3,32

ARENA GRUESA

Nota. La tabla muestra los resultados obtenidos del ensayo granulométrico del agregado fino, así como su módulo de finura.

Figura 13

Curvas de gradación máxima, mínima y del agregado fino de Holcim



Nota. La gráfica muestra las franjas de graduación del agregado fino una vez ensayado en laboratorio.

Contenido De Humedad

El contenido de humedad es primordial para la determinación de la dosificación ya que de esta depende la cantidad de agua que se deberá colocar al momento de la elaboración del hormigón. Para la elaboración de este ensayo se tuvo en cuenta los materiales y procesos establecidos en la norma NTE INEN 862. (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011b)

Materiales

- Balanza, debe ser legible hasta 0,10 g y tener una precisión de 0,10 g o del 0,10%.
- Recipiente para tomar la muestra.
- Agitador: una cuchara o espátula de metal de tamaño conveniente.
- Horno. Un horno de tamaño adecuado, capaz de mantener una temperatura uniforme de 110 °C ±5 °C.

Proceso

1. Se pesa el recipiente vacío. Teniendo en cuenta que la cantidad de muestra no debe ser menor a 300gr se pesó el recipiente con la muestra incluida.
2. La muestra fue colocada en el horno durante 24 horas a una temperatura constante de 110°C.
3. Se tomó el peso de la muestra seca.

Con los datos de los pesos tomados tanto con la muestra humedad y seca se pudo obtener el porcentaje de humedad del agregado mediante la siguiente expresión.

$$\%P = W - D / D * 100$$

Donde:

W: peso de la muestra húmeda (g)

D: peso de la muestra seca (g)

%P: contenido de humedad (%)

Resultado

Al realizar el ensayo se determinó un contenido de humedad de 2,79% para el agregado fino de la cantera de Holcim, los resultados se encuentran detallados en la siguiente tabla:

Tabla 4

Porcentaje de humedad que presenta el agregado fino de Holcim

Muestra	Agregado fino
Recipiente	A
Peso del recipiente (g)	108,49
Peso del recipiente (g) + muestra húmeda	608,49
Peso del recipiente (g) + muestra seca	595
Peso del agua (g)	13,55
Peso seco (g)	486,45
% agua	2,79

Nota. La tabla muestra los resultados obtenidos del ensayo de contenido de humedad del agregado fino.

Densidad, Gravedad Específica Y Absorción

Para establecer la gravedad específica y la capacidad de absorción del agregado fino, se consideró el cumplimiento de la normativa NTE INEN 856 (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010a), que especifica los materiales y los procedimientos de ensayo empleados:

Materiales

- Balanza.
- Frasco volumétrico (fiola con capacidad de 500 cm³.)
- Molde cónico, metálico de $\varnothing < 4$ cm y $\varnothing > 8$ cm, con una altura de 9 cm.
- Varilla de metal con un extremo redondeado.
- Horno.
- Termómetro.
- Agua destilada.

Proceso

1. Una de las muestras fue sometida a un proceso de secado en un horno durante un periodo de 24 horas.
2. Se recolectaron cuatro muestras de agregado fino, organizadas de acuerdo a la siguiente disposición:
 - 2.1. Retenidos en los tamices #4, #8 y #16
 - 2.2. Retenidos en los tamices #20, #30 y #50
 - 2.3. Retenidos en los tamices #100 y #200
 - 2.4. Pasante del tamiz #200.
3. Las muestras fueron sometidas a un proceso de saturación con agua durante un periodo de 24 horas.
4. Llevamos a cabo el proceso de secado de las muestras en una superficie al aire libre, permitiendo que el sol y el aire actúen de manera natural. Durante este proceso, las

muestras se movieron para asegurarnos de que toda la superficie del agregado alcanzara un nivel de secado adecuado.

5. Se comprobó que el material estuviera en condiciones adecuadas de saturación superficialmente seca (SSS), para lograrlo se empleó un cono truncado en el que se colocó el agregado y se compactó de manera uniforme aplicando 25 golpes en todo el proceso. Esto continuó hasta que el cono estuviera completamente lleno, luego se niveló la superficie y posteriormente se retiró el cono con precaución, observando si el agregado se colapsaba ligeramente. Si este colapso ocurría, se consideraba que se había alcanzado el nivel óptimo de SSS. En caso contrario, si el material no colapsaba o lo hacía de forma excesiva, se repetía el procedimiento hasta conseguir el nivel adecuado de saturación superficialmente seca del agregado.
6. Después de haber asegurado que las muestras de los áridos estuvieran en un estado adecuado de saturación superficialmente seca (SSS), se procedió a seleccionar una muestra de cada conjunto de agregados.

Tabla 5

Muestra de cada grupo de áridos en condiciones óptimas de SSS.

#	Grupo de árido	Masa (g)
1	Retenidos en los tamices #4, #8 y #16	222,92
2	Retenidos en los tamices #20, #30 y #50	373,82
3	Retenidos en los tamices #100 y #200	209,98
4	Pasante del tamiz #200.	223,96

Nota. La tabla indica la masa en condiciones de SSS de las cuatro muestras de cada grupo del árido fino empleado en el ensayo.

7. El picnómetro fue cargado con agua destilada y su peso fue registrado.
8. Se eliminó el líquido del interior del picnómetro y se insertó la muestra de agregado fino en el picnómetro mediante la asistencia de un embudo.
9. Luego, se completó el picnómetro con agua destilada hasta alcanzar aproximadamente dos tercios de su capacidad, tomando precauciones para evitar que entre aire. A continuación, la muestra se sometió a un proceso de vacío durante un periodo de hasta 15 minutos.
10. Se agregó agua destilada al picnómetro hasta llegar a la marca de calibración, al mismo tiempo se registró la temperatura de la muestra en el momento del ensayo.
11. Se pesó el picnómetro. (Peso del picnómetro + Muestra + Agua destilada).
12. Se llevó a cabo la repetición del proceso a partir del paso número 7 para todos los conjuntos de áridos.

Densidad relativa

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica) (SH)} = \frac{A}{B+S-C}$$

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica) (SSS)} = \frac{S}{B+S-C}$$

$$\text{Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)} = \frac{A}{B+A-C}$$

Absorción

$$\text{Absorción \%} = \frac{S-A}{A} * 100$$

Donde:

A: masa de la muestra seca al horno, (g).

B: masa del picnómetro lleno con agua, hasta la marca de calibración, (g).

C: masa del picnómetro lleno con muestra, hasta la marca de calibración, (g).

S: masa de muestra saturada superficialmente seca utilizada en el proceso gravimétrico.

Resultado

Al realizar el ensayo se logró determinar la densidad relativa aparente, gravedad específica saturada superficialmente seca y absorción para cada una de las muestras del agregado fino. Los detalles del ensayo se encuentran especificados en las siguientes tablas.

Tabla 6

Densidades y absorción del agregado fino - Muestra grupo 1

Muestra del grupo 1: Retenidos en los tamices #4, #8 y #16			
S	Masa de la muestra saturada con superficie seca	222,92	(g)
A	Masa de la muestra seca al horno	217,74	(g)
B	Masa del picnómetro lleno con agua	655,88	(g)
C	Masa del picnómetro lleno con muestra y agua	794,09	(g/cm ³)
g	Peso específico del agua a la temperatura que se realizó el ensayo	0,99	(g/cm ³)
A / (B+S-C)	Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)	2,57	(g/cm ³)
S / (B+S-C)	Densidad relativa (gravedad específica) (SSS)	2,63	(g/cm ³)
A / (B+A-C)	Densidad relativa (gravedad específica)	2,74	(g/cm ³)
(S-A) / A * 100	Absorción de agua	2,38	(%)

Observaciones	Temperatura ensayo =	20,9	°C
----------------------	----------------------	------	----

Nota. La tabla muestra los resultados obtenidos de absorción y densidad del agregado fino muestra 1 de la cantera de Holcim que fue ensayado.

Tabla 7

Densidades y absorción del agregado fino - Muestra grupo 2

Muestra del grupo 2: Retenidos en los tamices #20, #30 y #50			
S	Masa de la muestra saturada con superficie seca	373,82	(g)
A	Masa de la muestra seca al horno	364,74	(g)
B	Masa del picnómetro lleno con agua	655,88	(g)
C	Masa del picnómetro lleno con muestra y agua	886,54	(g/cm ³)
g	Peso específico del agua a la temperatura que se realizó el ensayo	0,99	(g/cm ³)
A / (B+S-C)	Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)	2,55	(g/cm ³)
S / (B+S-C)	Densidad relativa (gravedad específica) (SSS)	2,61	(g/cm ³)
A / (B+A-C)	Densidad relativa (gravedad específica)	2,72	(g/cm ³)
(S-A) / A * 100	Absorción de agua	2,49	(%)
Observaciones	Temperatura ensayo =	20,9	°C

Nota. La tabla muestra los resultados obtenidos de absorción y densidad del agregado fino muestra 2 de la cantera de Holcim que fue ensayado.

Tabla 8

Densidades y absorción del agregado fino - Muestra grupo 3

Muestra del grupo 3: Retenidos en los tamices #100 y #200

S	Masa de la muestra saturada con superficie seca	209,98	(g)
A	Masa de la muestra seca al horno	204,72	(g)
B	Masa del picnómetro lleno con agua	655,88	(g)
C	Masa del picnómetro lleno con muestra y agua	779,76	(g/cm ³)
g	Peso específico del agua a la temperatura que se realizó el ensayo	0,99	(g/cm ³)
A / (B+S-C)	Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)	2,38	(g/cm ³)
S / (B+S-C)	Densidad relativa (gravedad específica) (SSS)	2,44	(g/cm ³)
A / (B+A-C)	Densidad relativa (gravedad específica)	2,53	(g/cm ³)
(S-A) / A * 100	Absorción de agua	2,57	(%)
Observaciones	Temperatura ensayo =	20,9	°C

Nota. La tabla muestra los resultados obtenidos de absorción y densidad del agregado fino muestra 3 de la cantera de Holcim que fue ensayado.

Tabla 9

Densidades y absorción del agregado fino - Muestra grupo 4

Muestra del grupo 4: Pasante del tamiz #200

S	Masa de la muestra saturada con superficie seca	223,96	(g)
A	Masa de la muestra seca al horno	217,72	(g)
B	Masa del picnómetro lleno con agua	655,88	(g)
C	Masa del picnómetro lleno con muestra y agua	790,56	(g/cm ³)

Muestra del grupo 4: Pasante del tamiz #200

g	Peso específico del agua a la temperatura que se realizó el ensayo	0,99	(g/cm ³)
A / (B+S-C)	Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)	2,44	(g/cm ³)
S / (B+S-C)	Densidad relativa (gravedad específica) (SSS)	2,51	(g/cm ³)
A / (B+A-C)	Densidad relativa (gravedad específica)	2,62	(g/cm ³)
(S-A)/A * 100	Absorción de agua	2,87	(%)
Observaciones	Temperatura ensayo =	20,8	°C

Nota. La tabla muestra los resultados obtenidos de absorción y densidad del agregado fino muestra 4 de la cantera de Holcim que fue ensayado.

Masa Unitaria y Porcentaje de Vacíos

La normativa NTE INEN 858 describe el procedimiento para llevar a cabo el ensayo en dos condiciones, una con el material suelto y otra con el material compactado. También se incluye la medición de los espacios vacíos (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010c). Siguiendo esta regulación, se detallan a continuación los materiales y los pasos del ensayo realizados.

Materiales: • Un horno con tamaño adecuado para mantener una temperatura constante de 110 °C. • Una balanza legible hasta 0,10 g con una precisión del 0,10%. • Un recipiente cilíndrico de metal. • Una varilla de compactación de 46 cm.

Procedimiento:

Primero, la muestra de árido fino se debe secar en el horno durante 24 horas a una temperatura constante de 110°C.

Masa Unitaria Suelta:

1. Se pesó y se tomaron las medidas de altura y diámetro del molde cilíndrico de metal para calcular el volumen posteriormente, asegurándose de cumplir con las características específicas para este tipo de agregado según la norma.
2. Se llenó completamente el molde dejando que el árido cayera libremente desde una altura aproximada de 5 cm sobre el recipiente.
3. Una vez lleno, se niveló y se registró su peso.

Masa Unitaria Compactada mediante Varillado:

1. Se pesó y midió la altura y diámetro del molde para determinar su volumen.
2. Se llenó un tercio del molde y se compactó utilizando 25 varilladas distribuidas uniformemente en su superficie.
3. Luego se llenaron los dos tercios restantes del molde, se compactaron nuevamente con 25 varilladas.
4. Finalmente, se llenó la última capa del molde, se compactó, se niveló y se registró el peso después de engrasarlo.

La masa unitaria es esencial para convertir entre pesos y volúmenes al trabajar con agregados. Por esta razón, la norma establece la siguiente expresión para obtener el peso volumétrico:

$$M = \frac{(G - T)}{V}$$

Donde:

M= masa unitaria de árido kg/m^3

G= masa del árido más el molde, kg

T= masa del molde, kg

V= volumen del molde m^3

Contenido de vacíos

$$vacios \% = \frac{[(S * M) - Da] * 100}{(S * Da)}$$

Donde:

M= masa unitaria de árido kg/m³

S= gravedad específica en condición seca, de acuerdo con la NTE INEN 857 0 856

Da= densidad del agua 998 kg/m³

Resultados

Tabla 10

Densidades Volumétrica y porcentaje de vacíos del agregado fino.

Densidad volumétrica suelta de agregado fino	
Molde N.º	1
Peso del molde (g)	2596,60
Peso molde + suelo (g)	6881,10
Peso suelo (g)	4284,50
Densidad volumétrica suelta de agregado fino	
Volumen (cm ³)	2868,12
Densidad suelta (g/cm ³)	1,49
Densidad volumétrica varillada de agregado fino	
Molde Nº	1
Peso del molde (g)	2596,60
Peso molde + suelo (g)	7542,60
Peso suelo (g)	4946

Densidad volumétrica suelta de agregado fino	
Volumen (cm ³)	2868,12
Densidad Varillada (g/cm ³)	1,724474569
Porcentaje de vacíos	
Densidad Volumétrica agregado fino (kg/m ³)	1407,00
Gravedad específica agregado fino (kg/m ³)	2451,00
Densidad del Agua (kg/m ³)	998,00
% Vacíos	1,37

Nota. La tabla muestra los resultados obtenidos de % de vacío, densidad volumétrica suelta y por varillado del árido fino de la cantera de Holcim que fue ensayado.

Caracterización Polímero

La emulsión de polímero estabilizador de suelo ESS se utiliza para el endurecimiento del suelo de los caminos. Al remover el suelo, rociar la Emulsión ESS y compactar con un rodillo, se forma un camino impermeable y con una resistencia específica para el tránsito de vehículos. Las propiedades de la emulsión ESS mejoran sustancialmente la resistencia del camino, la resistencia al agua, la resistencia al desgaste y la resistencia al envejecimiento.

Tabla 11

Propiedades de Polímero

Propiedades típicas	
Naturaleza química	Emulsión de estireno-acrílico modificado con silicio
Apariencia	Líquido blanco

Propiedades típicas	
Sólidos, por peso	50±1%
Viscosidad (Brookfield, LV #4, 60 rpm, @25°C)	1000-3000 cps
Tamaño de partícula (nm)	90 to 160
PH	6.0 to 7.0
Tg (°C)	25°C

Nota. La tabla muestra las propiedades típicas del polímero.

Caracterización Resina

La resina usada en este trabajo es Epon 828 Epoxy Resin, esta es una resina de baja viscosidad, derivada no diluida de disfuncional bisfenol A/epiclorhidrina. Cuando se endurece con los agentes de curado adecuados, se obtienen propiedades muy buenas de resistencia mecánica, adhesiva, dieléctrica y resistencia química. Debido a esta versatilidad, la Resina EPON 828 se ha convertido en una resina epoxi estándar utilizada en tecnología de formulación, fabricación y fusión. (HEXION, 2005)

Como propiedades mecánicas se tiene que Se obtienen un material de alto rendimiento y alta resistencia cuando esta resina se cura con una variedad de agentes de curado. Los sistemas no rellenos en uso común tienen valores de resistencia a la tracción superiores a 10,000 psi (69 MPa) con valores de módulo superiores a 400,000 psi (2750 MPa). Dichos sistemas normalmente son muy rígidos. Si se necesita una mayor flexibilidad, se pueden formular sistemas que proporcionen hasta un 300% de elongación. (HEXION, 2005)

Como agente endurecedor se usó cycloaliphatic, una característica destacada de las aminas cicloalifáticas es su capacidad para generar enlaces cruzados tridimensionales a través de la reacción con grupos epóxido en resinas epoxi. Esta reacción de curado con epóxidos es

exotérmica, lo que significa que libera calor a medida que ocurre la reacción química. Esto puede acelerar el proceso de curado. (HEXION, 2005)

Las resinas epóxicas se destacan como una de las resinas de ingeniería de mayor versatilidad, encontrando aplicaciones extensas en la forma de recubrimientos protectores altamente eficientes, adhesivos estructurales y como matriz en la composición de materiales compuestos. Esto se debe a sus propiedades sobresalientes de resistencia térmica, química y mecánicas. (Foix, Ramis, Ferrando, & Serra, 2012)

Geometría

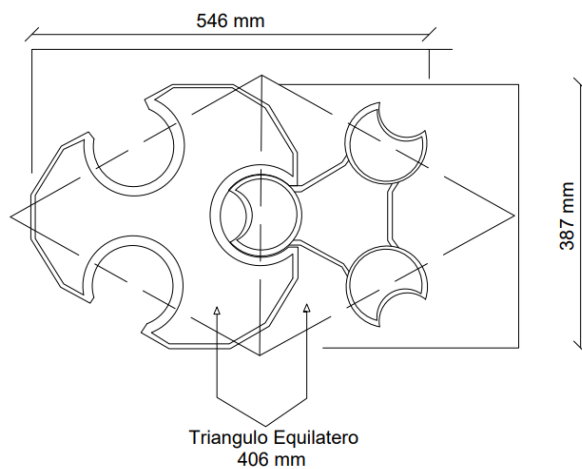
Propuesta de geometría del adoquín

Se proponen dos piezas para la conformación de los módulos de un metro cuadrado de adoquín, las piezas se dividen en macho y hembra, haciendo que se complementen entre sí para que generen un entrelazamiento entre adoquines y la capa de rodadura se comporte como un solo elemento que optimiza la distribución de las fuerzas generadas por el tránsito. Esto contribuye a la resistencia y durabilidad del pavimento, proporcionando una superficie segura y de alta calidad.

Una vez que todas las piezas están correctamente instaladas, se crea una superficie continúa compuesta por adoquines interconectados. Esta superficie se comporta como un solo elemento estructural, como resultado, se obtiene un pavimento resistente capaz de soportar el tráfico vehicular y peatonal sin sufrir daños significativos.

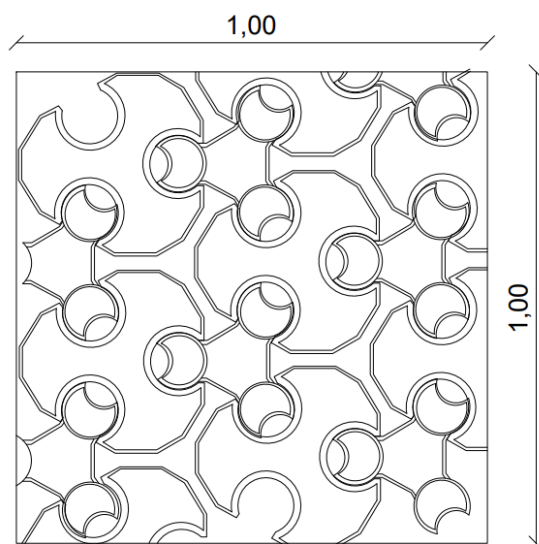
La pieza macho presenta una forma que sobresale en uno o varios lados, mientras que la pieza hembra tiene una forma que se ajusta perfectamente a la parte saliente de la pieza macho. Este diseño permite un acoplamiento seguro entre las piezas adyacentes, evitando movimientos laterales y asegurando la integridad de la capa de rodadura.

Diseño Geométrico

Figura 14*Medidas del adoquín propuesto*

Nota. El adoquín basado en el sistema tri-lock surge geoméricamente de un rombo.

Distribución de adoquines

Figura 15*Disposición en un metro cuadrado del adoquín propuesto*

Nota. El adoquín basado en el sistema tri-lock propone un entramado entre todas las piezas que lo componen.

Figura 16

Adoquín con geometría planteada instalado en un garaje

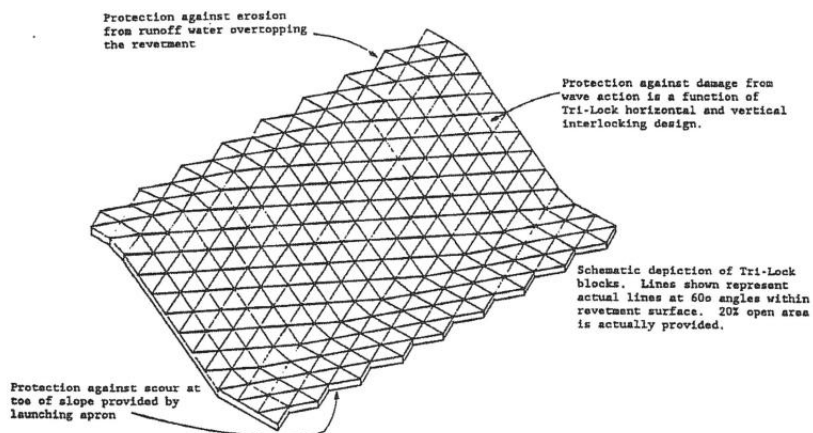


Nota. Los adoquines tri-block además de cumplir su trabajo de soportar cargas peatonales y vehiculares, logran ser complemento decorativo. Tomado de Stavoblock

La geometría del bloque fundamentalmente está diseñada como un sistema para prevenir la erosión del suelo, principalmente en taludes, ya que puede adaptarse a terrenos irregulares. Su forma recibe el nombre de "tri-lock" debido a sus tres lados hembra y tres lados macho. Una de sus ventajas más destacadas es su capacidad de drenaje efectivo.

Figura 17

Bloques de adoquín colocados en pendiente basado en el sistema tri-lock.



Nota. El sistema presenta varias protecciones frente a la erosión del suelo y por su geometría también evita la erosión por el agua de escorrentía. Tomado de Stavoblock

Geometría del Cartón

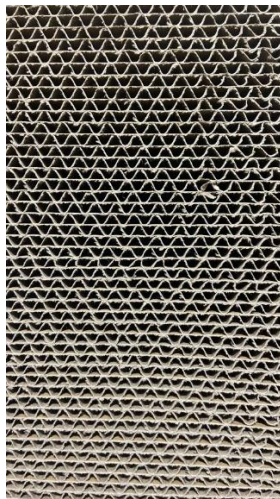
La estructura corrugada se crea mediante un proceso que implica el uso de rodillos corrugadores para formar las ondulaciones en una capa de papel. Luego, esta capa se une a otras capas exteriores más planas y rígidas con adhesivos especiales. El resultado es un material compuesto que combina la resistencia de las capas exteriores con la rigidez proporcionada por la estructura corrugada en el medio.

La geometría interna del cartón prensado, con su estructura corrugada de canaletas y crestas, permite que el material sea más resistente a la flexión y la compresión, lo que lo hace adecuado para resistir las cargas y compresión que pueden ser sometidas al adoquín.

En resumen, el cartón prensado no tiene una geometría interna con forma de parábola. En cambio, su resistencia se debe a la estructura corrugada formada por canaletas y crestas, que le proporcionan propiedades mecánicas únicas y lo convierten en un material ampliamente utilizado en la industria. (Egas & Perez, 2016)

Figura 18

Geometría interna del cartón prensado



Nota. La imagen muestra la configuración que presenta el cartón empleado en el proyecto

Propuesta de instalación de pavimento articulado

Los proyectos de adoquinado requieren varias semanas de labor, en las que se aborda una serie de fases críticas. Estas incluyen la meticulosa preparación del terreno, la creación de una base sólida y la precisa disposición de los adoquines siguiendo patrones específicos. No obstante, el componente más consumidor de tiempo en tales proyectos es la colocación de los adoquines, tarea que recae en los albañiles y se realiza uno por uno. La duración de estas obras es considerable, tomando como ejemplo la pavimentación de una vía de 100 metros de longitud con adoquines, lo cual implica un período de 30 días de trabajo.

En este proyecto actual, estamos proponiendo una innovadora idea para optimizar la gestión de recursos y el tiempo en la ejecución de proyectos de pavimentación con adoquines. Esta concepción se deriva de una técnica previamente implementada en Europa, que automatiza la disposición de adoquines en las vías, sirviendo como punto de partida para encontrar una solución más rentable y sin necesidad de adquirir maquinaria especializada.

Figura 19

Maquina Tiger-Stone de la empresa holandesa Vanku Bv



Nota. Modo de uso de maquina Tiger-Stone donde dos operarios manualmente ordenan los adoquines que luego son colocados en la calzada. Tomado de tecnocarreteras.

Aprovechando la geometría propuesta en este proyecto, la cual logra entrelazar los adoquines manteniendo su posición, se plantea la viabilidad de enviar planchas de adoquines previamente entrelazados desde la fábrica. Estas planchas reposarían sobre una geomalla y estarían listas para su colocación en unidades de medida de metros cuadrados.

La propuesta implica la utilización de maquinaria fácilmente accesible para este tipo de obras:

1. **Remolque o cama baja:** Este vehículo se emplearía para transportar los adoquines desde la fábrica hasta el sitio de colocación. Las planchas de adoquines se apilarían unas sobre otras en el remolque, y se incorporaría una rampa regulable en el vehículo para descargar los adoquines.
2. **Retroexcavadora:** Esta maquinaria, habitual en proyectos de adoquinado, se modificaría incorporándole un tubo metálico redondo de 2,50 metros de longitud y un

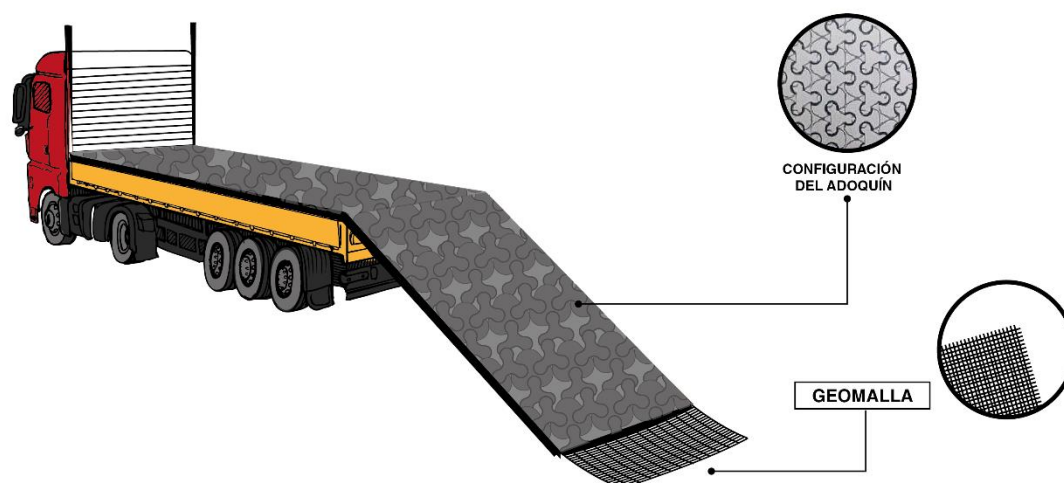
espesor mínimo de 3 mm en su pala o pluma. Este tubo serviría para arrastrar la geomalla que lleva los adoquines ya entrelazados.

Para garantizar el éxito del proceso, se prioriza la precaución al colocar los adoquines, y, por lo tanto, la longitud máxima de pavimento articulado ya entrelazado no excedería los 5 metros lineales.

Este enfoque innovador busca eficiencia, reducción de costos y una ejecución más efectiva de proyectos de pavimentación con adoquines, haciendo uso de técnicas y maquinaria fácilmente disponibles en el entorno de trabajo.

Figura 20

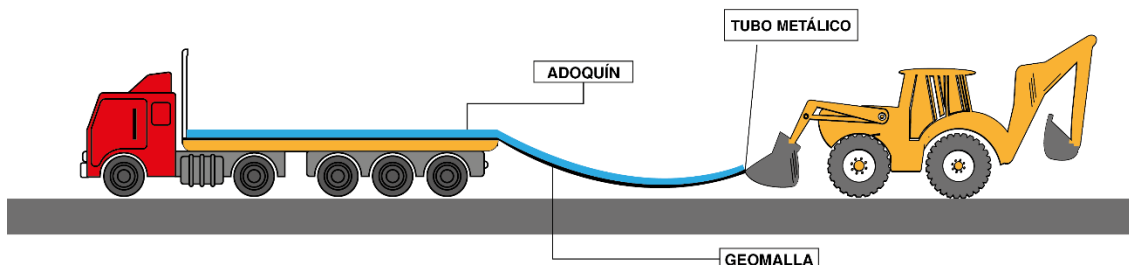
Ilustración representativa de propuesta de colocación de adoquines



Nota. La imagen muestra la manera en cómo llegaría el pavimento articulado al lugar de instalación y los elementos que la componen.

Figura 21

Ilustración representativa de elementos de la propuesta de colocación de pavimento articulado



Nota. La imagen muestra como la maquinaria colocaría el pavimento y sus elementos.

Dosificación

Dosificación con Polímero emulsión de estireno-acrílico modificado con silicio

El punto de partida para este proyecto fue la elección del polímero de emulsión de estireno-acrílico modificado con silicio, una decisión que se fundamentó en la búsqueda de una solución altamente efectiva y económica para conferir al adoquín las propiedades deseadas. En comparación con otros productos químicos, este polímero demostró poseer una combinación única de características que permiten brindar resistencia excepcional, impermeabilización y una notable dureza al producto final. Su capacidad de adherirse fuertemente a los componentes de la mezcla, sumado a sus propiedades de endurecimiento rápido, lo vuelven un gran candidato para la creación de adoquines de arena confinada. El objetivo es ofrecer una solución duradera y sostenible que cumpla con los más altos estándares de calidad, contribuyendo así al desarrollo de pavimentos confiables y resistentes que mejoren la infraestructura vial y urbana en general.

Se realizaron varias probetas para verificar el comportamiento del polímero junto con la arena. La realización de probetas para determinar la dosificación óptima de un adoquín de arena confinada es un proceso esencial en el desarrollo de pavimentos duraderos y resistentes. Estas probetas se elaboran mediante la mezcla de arena seleccionada con diferentes proporciones de aglutinantes y aditivos, siguiendo estrictos estándares y procedimientos de laboratorio. El objetivo principal es encontrar la combinación adecuada que ofrezca una óptima resistencia a la compresión, cohesión y durabilidad, garantizando así la calidad y estabilidad del producto final. A través de ensayos meticulosos y análisis exhaustivos, se obtienen datos precisos que permiten ajustar la dosificación para lograr un adoquín de arena confinada capaz de soportar las demandas del tráfico vehicular y las condiciones ambientales adversas, asegurando así su idoneidad para su implementación en proyectos de infraestructura de alto rendimiento.

Siguiendo las recomendaciones del fabricante, la empresa Soilorock de iniciar el proceso de dosificación con un porcentaje de polímero equivalente al 2% del peso del agregado fino, utilizando una relación de agua y polímero de 50/50. Sin embargo, esta mezcla demostró ser imperfecta y no alcanzó los resultados deseados en términos de resistencia y dureza del adoquín propuesto.

Para lograr una mejora en el rendimiento del producto, se llevaron a cabo diversas muestras con diferentes dosificaciones de polímero y se añadió una cantidad adicional de cemento para conseguir una sólida consolidación del material. A continuación, se presentan algunos ejemplos de estas pruebas:

1. 5% de polímero, 5% de agua y 5% de cemento.
2. 7% de polímero, 7% de agua y 10% de cemento.

3. 10% de polímero, 10% de agua y 10% de cemento.
4. 10% de polímero, 10% de agua y 7% de cemento.

Las probetas se moldearon en una forma cilíndrica de 10 cm de diámetro y 2 cm de altura. Una vez que las muestras se secaron adecuadamente, se sometieron a un examen visual y físico para evaluar sus características. Tras el análisis, se determinó que las mezclas 2, 3 y 4 presentaban las mejores cualidades para ser empleadas en la producción del adoquín dentro del cartón prensado.

Figura 22

Probetas de dosificación con polímero



Nota. Las probetas elaboradas nos ayudan a determinar cuál dosificación puede lograr a cumplir con los objetivos del proyecto.

Estos resultados permitieron identificar la dosificación óptima de polímero y cemento, junto con la cantidad adecuada de agua, para lograr un adoquín de arena confinada con las propiedades deseadas de resistencia, durabilidad e impermeabilización.

Una vez determinadas las tres dosificaciones más prometedoras, se procedió a la elaboración de las probetas del adoquín utilizando cartón prensado. Estas probetas tenían dimensiones de 10 cm x 10 cm x 4 cm de altura y servían como moldes para contener la mezcla de cada dosificación. Sin embargo, durante el proceso de llenado, surgieron algunos inconvenientes debido a que la mezcla resultaba bastante espesa y granulosa, lo que dificultaba el llenado uniforme de las celdas del cartón.

Se lograron producir 4 muestras para cada una de las dosificaciones previas. Cada muestra representaba un intento por obtener la formulación ideal que brindara al adoquín las propiedades deseables de resistencia y durabilidad.

Este paso crucial de elaboración de las probetas permitiría someter a las muestras a distintos ensayos y pruebas posteriores. Estas evaluaciones ayudarían a determinar cuál de las dosificaciones logra los mejores resultados en términos de características físicas y mecánicas del adoquín.

Figura 23

Probetas de adoquín con polímero



Nota. La figura muestra las primeras probetas empleando cartón con arena confinada y polímero como aglutinante.

Una vez obtenida la probeta, el siguiente paso es realizar una serie de ensayos, comenzando con el ensayo de tracción indirecta, tal como lo indica la normativa. Este procedimiento requiere que las muestras sean sumergidas en agua durante 24 horas. Sin embargo, en este punto el cartón, al estar en contacto con el agua, se saturó y perdió su forma original, lo que ocasionó la pérdida de todas sus propiedades mecánicas. Como resultado, no fue posible llevar a cabo los ensayos adicionales programados.

A pesar de este contratiempo, se logró realizar el ensayo de tracción indirecta en una muestra por cada dosificación, evitando su sumersión en agua. De esta manera, se pudo obtener al menos una evaluación parcial de las características mecánicas de las mezclas, aunque no se pudo completar la totalidad de los ensayos previstos debido al problema de la saturación del cartón.

Ante esta situación, se plantea la necesidad de buscar una solución que permitiera mantener la integridad de la probeta y asegurara la realización de los ensayos necesarios. Después de evaluar diferentes opciones, identificamos que una resina epóxica sería la alternativa más adecuada como aglomerante o impermeabilizante.

La incorporación de esta resina epóxica en el proceso de elaboración de las probetas se presenta como una solución prometedora para evitar la saturación y pérdida de forma del cartón al entrar en contacto con el agua. Al impermeabilizar el material, la resina epóxica brinda protección y mantiene la integridad de la probeta, permitiendo que se realicen con éxito los ensayos de tracción indirecta y otros análisis posteriores.

Dosificación con Resina Epóxica

En el proceso de dosificación del adoquín utilizando la resina epóxica y con el objetivo de optimizar su cantidad, nos encontramos con la limitación de su rendimiento y una textura muy líquida al emplearla sin mezcla. Para superar esta situación, decidimos mezclar la resina con la misma arena que se utilizó en el llenado del cartón prensado. Siguiendo las

investigaciones de (Echeverry & Bohórquez) se determinó que la mejor proporción en volumen de resina: arena es de 1:3 y 1:2. Aunque la proporción 1:3 resulta adecuada para juntas debido a su menor fluidez, para la elaboración de nuestro adoquín, resulta más conveniente utilizar la proporción 1:2. Esta mezcla ofrece una mayor manejabilidad, permitiendo llenar todos los espacios presentes en el cartón y el molde de manera más eficiente. Con esta ajustada dosificación, buscamos obtener un adoquín de arena confinada con las características mecánicas y físicas deseadas, asegurando su calidad y rendimiento en futuros proyectos.

El cartón prensado cumple una función esencial como contenedor para la arena tamizada, empezando a partir del tamiz #20, en el proceso de elaboración del adoquín de arena confinada. En este paso, resulta crucial evitar la presencia de espacios vacíos dentro del cartón, ya que estos podrían generar posibles fallas en el adoquín final. Garantizar un llenado uniforme y completo del cartón con la arena confinada es fundamental para lograr la cohesión y estabilidad necesarias en el producto terminado. Un cuidadoso proceso de llenado asegurará que cada partícula de arena quede correctamente ubicada y compactada dentro del cartón, lo que contribuirá a obtener un adoquín resistente y duradero, capaz de soportar las exigencias del tráfico vehicular y las condiciones ambientales adversas en proyectos de infraestructura vial y urbana.

Elaboración De Probetas

La elaboración de las probetas se llevó a cabo en el laboratorio de ensayo de suelos, pavimentos y hormigones de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Para este proceso, se utilizaron moldes de madera especialmente diseñados para el confinamiento de las muestras.

La resina empleada en el procedimiento está compuesta por una combinación de resina y endurecedor, los cuales se mezclaron en una proporción específica de 2:1, según los datos

proporcionados por el fabricante. Estos componentes fueron cuidadosamente mezclados en un recipiente hasta lograr una homogeneización adecuada de la sustancia.

Una vez alcanzada la homogeneidad en la resina, se procedió a incorporar el árido fino (arena tamizada) y se mezcló nuevamente con el objetivo de obtener una mezcla fluida y homogénea. Esta etapa de la preparación es de suma importancia para asegurar que la resina se distribuya de manera uniforme en la muestra y que se logren las propiedades deseadas en el adoquín de arena confinada.

Figura 24

Mezcla de resina con agregado fino



Nota. La mezcla de arena y resina debe llegar a ser uniforme donde los elementos secos se mezclen en su totalidad con el elemento líquido.

Con el uso de moldes de madera y una cuidadosa manipulación de la resina, se garantiza la obtención de probetas consistentes y representativas, permitiendo realizar ensayos confiables y obtener datos precisos sobre las propiedades mecánicas y físicas del adoquín.

Figura 25

Desenfofrado de probetas de adoquín con resina



Nota. El molde debe ser previamente engrasado para facilitar su desenfofrado apoyándose de herramientas como el martillo.

Capítulo IV: Análisis de Resultados

Tracción Indirecta para Probetas con Polímero

El ensayo de tracción indirecta se realizó siguiendo las especificaciones de la norma NTE INEN 3040, específicamente en el Anexo E. Fueron 4 adoquines ensayados, para esto se

utilizó la máquina de compresión, donde se colocó el adoquín, previamente señalada su plano transversal, entre dos soportes que permitan el giro sobre este plano, para esto se colocó una varilla de 12 mm de diámetro y 15 cm de longitud en la parte superior y una en la parte inferior del adoquín, teniendo en consideración la colocación de las piezas de compresión para después aplicar progresiva y suavemente una carga que permita el aumento de la resistencia a una velocidad de $(0,05 \pm 0,01)$ MPa/s hasta que el adoquín falle para registrar la carga de tracción indirecta P (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011d).

Se calcula la resistencia a tracción indirecta del adoquín ensayado, T, en MPa empleando la siguiente ecuación:

$$T = 0,637 \times k \times \frac{P}{S}$$

Donde

T: resistencia a la tracción indirecta en Mpa

P: carga de tracción indirecta N

k: es un factor de corrección para el espesor del adoquín calculado empleando la siguiente ecuación:

$$k = 1,3 - 30\left(0,18 - \frac{t}{1000}\right)^2 \text{ si } 140\text{mm} < t \leq 180 \text{ mm}$$

o

$$k = 1,3 \text{ si } t > 180 \text{ mm}$$

para $t \leq 140 \text{ mm}$ se determina mediante la siguiente tabla.

Tabla 12Factor de corrección k

t (mm)	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
k	0,71	0,79	0,87	0,94	1	1,06	1,11	1,15	1,19	1,23	1,25

Nota. Factor de corrección k . Recuperado de (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011d)

Después se calculó la carga de tracción indirecta por unidad de longitud (F) en newtons por milímetro mediante el empleo de la siguiente ecuación:

$$F = \frac{P}{l}$$

Posteriormente se calculó la desviación estándar para poder determinar la resistencia característica (f_k):

$$S = \sqrt{\frac{\sum (f_i - f_m)^2}{n - 1}}$$

Donde:

S : es la desviación estándar (MPa)

f_i : es la resistencia a la compresión de cada una de las muestras (MPa)

f_m : Es la media (promedio) de las resistencias a la compresión de todas las muestras (MPa).

La resistencia características representada por f_k se calcula de la siguiente manera:

$$f_k = (f_m - 1,64 S)$$

Tabla 13*Dosificaciones.*

Muestra	Dosificación
1	5% de polímero, 5% de agua y 5% de cemento.
2	7% de polímero, 7% de agua y 10% de cemento.
3	10% de polímero, 10% de agua y 10% de cemento.
4	10% de polímero, 10% de agua y 7% de cemento

Nota. La tabla muestra las distintas dosificaciones con el uso del polímero de emulsión De Estireno-Acrílico Modificado Con Silicio

Tabla 14*Resultados de resistencia y carga de tracción indirecta para las distintas dosificaciones.*

Muestra	l (mm)	t (mm)	S (mm²)	P (T)	(N)	k	T (Mpa)	F (N/mm)
1	118	40	4720	0,679	6658,72	0,71	0,638	56,430
2	120	40	4800	0,719	7050,98	0,71	0,664	58,758
3	119	40	4760	0,699	6854,85	0,71	0,651	57,604
4	118	40	4720	0,685	6717,56	0,71	0,644	56,928

Nota. La tabla muestra las distintas dosificaciones con el uso del polímero de emulsión De Estireno-Acrílico Modificado Con Silicio

Tracción Indirecta para Probetas con Resina Epóxica

La tracción indirecta en un adoquín es una propiedad mecánica importante para evaluar su resistencia a la tracción cuando está colocado en un pavimento o superficie similar. La fórmula para calcular la tracción indirecta en un adoquín se basa en el ensayo conocido como "ensayo de tracción indirecta" y se expresa de la siguiente manera:

Tracción Indirecta:

$$TI = \frac{P}{A}$$

Donde:

TI: Es la tracción indirecta en el adoquín (medida en N/mm² o MPa).

P: Es la fuerza máxima aplicada al adoquín antes de que se produzca una fractura (medida en N).

S: Es el área de la sección transversal del adoquín en la que se aplica la fuerza (medida en mm²).

El ensayo de tracción indirecta se realiza generalmente utilizando una máquina de ensayo que aplica una carga gradualmente al adoquín hasta que se produce la fractura. La fuerza máxima registrada durante el ensayo se utiliza para calcular la tracción indirecta según la fórmula mencionada anteriormente.

Es importante tener en cuenta que la tracción indirecta puede variar dependiendo de diversos factores, como la calidad del adoquín, su diseño, el tipo de material utilizado y las condiciones de instalación. Por lo tanto, es esencial seguir procedimientos de ensayo estandarizados y contar con equipos adecuados para obtener resultados precisos y comparables.

Tabla 15

Resultados de resistencia y carga de tracción indirecta para las probetas con Resina Epóxica

Muestra	l (mm)	t (mm)	A (mm²)	P (T)	P (N)	TI (Mpa)
1	100	50	5000	1,821	17857,91	3,57
2	100	50	5000	1,881	18446,31	3,69
3	100	50	5000	1,960	19221,03	3,84
4	100	50	5000	1,854	18181,53	3,64

Nota. La tabla muestra los resultados de las probetas de adoquín con resina epóxica ante el ensayo de carga de tracción indirecta.

Comparación Polímero y Resina Epóxica

Tabla 16

Resultados del ensayo de resistencia a la tracción indirecta para probetas elaboradas con polímero.

Tipo de Mezcla	Resistencia Característica (Mpa)
5% de polímero, 5% de agua y 5% de cemento.	0,638
7% de polímero, 7% de agua y 10% de cemento.	0,664
10% de polímero, 10% de agua y 10% de cemento.	0,651
10% de polímero, 10% de agua y 7% de cemento,	0,644

Nota. La tabla muestra los resultados de las probetas de adoquín con polímero ante el ensayo de carga de tracción indirecta.

Tabla 17

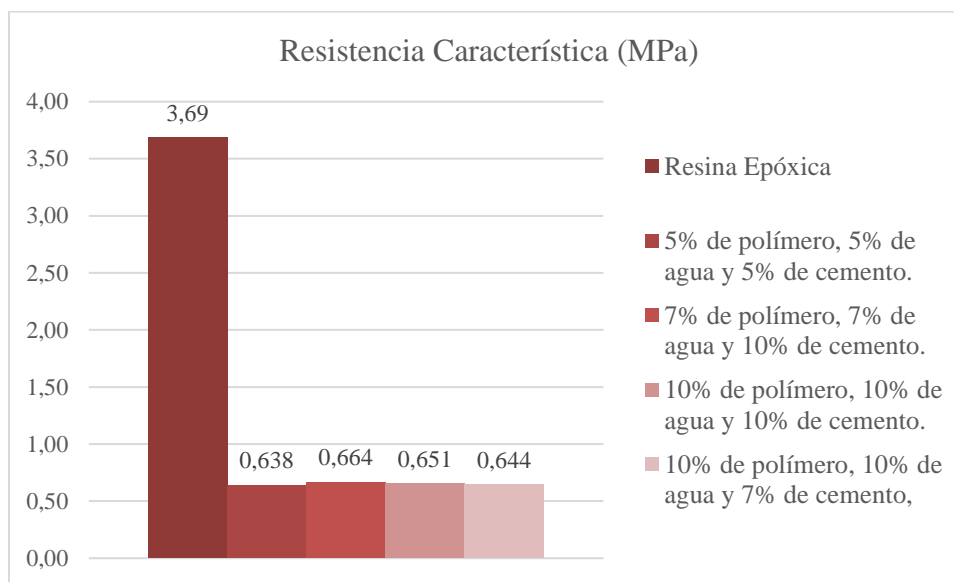
Resultados del ensayo de resistencia a la tracción indirecta para probetas elaboradas con Resina Epóxica.

Tipo de Mezcla	Resistencia Característica (Mpa)
Resina Epóxica	3,69

Nota. La tabla muestra el resultado promedio de todas las probetas de adoquín con resina epóxica sometidas al ensayo de tracción indirecta.

Figura 26

Curvas de resistencias características



Nota. La gráfica muestra la comparación de las resistencias características para las distintas mezclas.

De acuerdo con el gráfico anterior, se evidencia que al sustituir el polímero por la resina epóxica en la fabricación de las probetas, se incrementa su resistencia a la tracción indirecta. Esto se traduce en una resistencia característica de 3,69 MPa, superando el valor indicado por la norma NTE INEN 3040.

Índice de absorción de agua

Para este ensayo, el (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2016) inicialmente recomienda un peso no mayor a 5,00, se tomaron 4 muestras de adoquín y se procedió a su limpieza minuciosa, eliminando cualquier rastro de polvo o residuos mediante el uso de un cepillo de alambre. Pasado ese tiempo se los retiró del agua y se procedió a secarlos hasta que la superficie del hormigón tenga un color mate, se registró su peso e inmediatamente se los colocó dentro de un horno a una temperatura de 105 ± 5 °C en el cual reposaron de igual forma por un mínimo de 3 días como recomienda la norma. Se retiraron cada uno de los adoquines del horno para ser enfriados a temperatura ambiente y registrar el peso de cada uno y así poder calcular el índice de absorción de agua con la siguiente expresión.

Para este ensayo, de acuerdo con las directrices del Instituto Ecuatoriano de Normalización (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2016), se sugiere inicialmente que los adoquines que serán sometidos a experimentación no excedan un peso de 5,00 kg. Se seleccionó cuatro muestras de adoquín y se procedió a su limpieza, eliminando cualquier rastro de polvo o residuos mediante el uso de un cepillo de alambre. Posteriormente, los adoquines fueron sumergidos en agua a una temperatura de (20 ± 5) °C durante 3 días. Una vez transcurrido este período, se retiraron del agua y se los seco con trapos hasta alcanzar una superficie mate. Se tomó registro de su peso y acto seguido, se introdujeron en el horno del laboratorio Laboratorio de Ensayo de Suelos, Pavimentos y Hormigones” de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE con una temperatura controlada de 105 ± 5 °C, en el cual permanecieron durante 3 días, como lo establece la normativa.

Una vez culminado este proceso, los adoquines fueron extraídos del horno con el propósito de permitir que se enfriaran a temperatura ambiente. Durante esta fase, se tomó nota del peso de cada uno, lo que posibilitó el cálculo subsiguiente del índice de absorción de agua empleando la siguiente fórmula.

$$W_a = \frac{M1 - M2}{M2} \times 100\%$$

Donde:

M1 es la masa de la probeta saturada de agua (g)

M2 es la masa final de la probeta seca (g)

Tabla 18

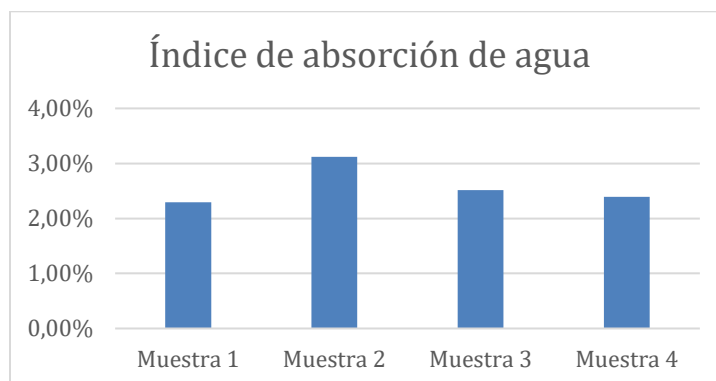
Resultados de ensayo de índices de absorción de agua para adoquines de resina

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
M1	787,12	809,16	780,07	792,33
M2	769,47	784,68	760,95	773,83
Wa%	2,29%	3,12%	2,51%	2,39%

Nota. La tabla indica los porcentajes de absorción de los adoquines ensayados.

Figura 27

Resumen de ensayos para índice de absorción de agua.



Nota. La gráfica el índice de absorción que presentaron las 4 muestras ensayadas.

La norma (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2016) indica que los adoquines ensayados deben presentar un índice de absorción inferior o igual al 6 %. Una vez analizados los resultados podemos concluir que las muestras cumplen con la normativa siendo su porcentaje de absorción menor a 6% en las cuatro muestras ensayadas.

Resistencia a la abrasión

Para llevar a cabo el mencionado ensayo, se siguió el protocolo establecido en el Anexo F de la norma NTE INEN 3040. En este proceso, se utilizaron cuatro adoquines. Antes de someter las muestras al ensayo, se procedió a secar, limpiar y levemente pulir cada una de ellas, con el propósito de evitar cualquier rugosidad en la superficie que iba a ser sometida al examen.

Una vez preparadas las muestras, se procedió a configurar la máquina de desgaste. Para ello, se colocó el material abrasivo seco (corindón) en la tolva de almacenamiento y se cerró la válvula de paso. Luego, se situó el adoquín con la cara visible dirigida hacia la rueda ancha de abrasión, asegurándose de que quedara en contacto con la misma. El adoquín se fijó en un soporte que permitía que el flujo abrasivo desgastara la superficie, una vez se abriera la válvula de control.

Este ensayo se realizó durante un período de 1 minuto, de modo que la rueda de abrasión completara 76 revoluciones, en cumplimiento con las especificaciones de la norma. (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011d).

Una vez concluido el proceso de desgaste sobre el adoquín, se procedió a determinar la longitud de la huella resultante. Para llevar a cabo esta medición, se trazaron los límites longitudinales de la huella generada por el desgaste y se efectuaron tres mediciones del ancho de la huella. Estas mediciones se tomaron en dos puntos ubicados a 10 mm de cada borde de la huella, así como en un punto central en la misma. Luego, se calculó la media aritmética de estos valores y se aplicó un ajuste de corrección mediante un factor de calibración. La base de

este factor de calibración se derivó de la diferencia aritmética entre 20 mm y el valor registrado del factor (18,09 mm), resultando en un factor de calibración de 1,91 mm. El valor resultante se aproximó al valor más cercano en incrementos de 0,5 mm. Conforme a la normativa, se establece que esta longitud de huella debe ser igual o inferior a 23 mm.

Tabla 19

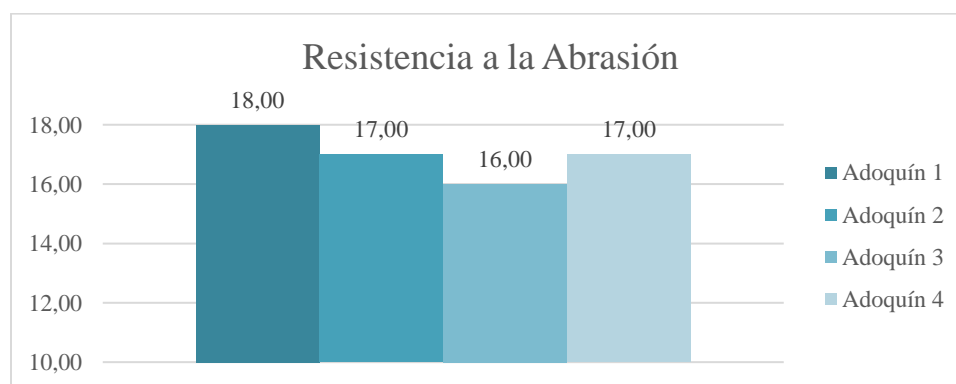
Resultados del ensayo de resistencia a la abrasión

Probetas	Adoquín	Longitud huella (mm)	Longitud huella corregida (mm)	Longitud huella redondeada(mm)	Promedio longitud huella (mm)
Adoquín con Resina	1	19,80	17,89	18,00	17,00
	2	19,22	17,31	17,00	
Epóxica	3	18,25	16,34	16,00	
	4	19,10	17,19	17,00	

Nota. En la tabla nos indica las longitudes de las huellas para los adoquines con resina epóxica.

Figura 28

Curva de la resistencia a la abrasión



Nota. La gráfica muestra la comparación de las resistencias a la abrasión entre los adoquines con resina epóxica.

A partir de los resultados adquiridos en el experimento de prueba de resistencia a la abrasión, se puede concluir que todos los adoquines cumplen con los criterios establecidos en la norma. Con un valor promedio de la longitud de la huella de 17 mm, se observa que este resultado está por debajo del límite establecido en la norma, que es de 23 mm.

Resumen de resultados de ensayos

Tabla 20

Resumen de ensayos realizados

Ensayo	Especificación	Resultado	Criterio de conformidad	Observación
Tracción Indirecta	NTE INEN 3040 Anexo E	3,69 MPa	> 3,60 MPa	Cumple
Índice de absorción de agua	NTE INEN 3040 Anexo D	2,58%	≤ 6%	Cumple
Resistencia a la abrasión	NTE INEN 3040 Anexo F	17 mm	< 23 mm	Cumple

Nota. La tabla muestra el resumen de todos los ensayos realizados requeridos por la norma NTE INEN 3040.

Resistencia a la Compresión

La metodología más frecuente para el examen de los adoquines es el ensayo de compresión, el cual nos brinda la capacidad de identificar las propiedades del adoquín.

Para llevar a cabo la prueba de compresión en los adoquines, se aplican procedimientos que buscan determinar la resistencia, pero a veces pueden generar resultados inexactos debido, principalmente, a la manera en que se analizan e interpretan los datos.

La evaluación de compresión debe adherirse a las normativas establecidas en nuestro país, en este caso la Norma INEN 1573, la cual detalla el proceso a seguir, los equipos necesarios, el desarrollo de la prueba y la obtención de los resultados, que incluyen valores como la desviación estándar, la resistencia promedio y la resistencia característica.

Tal como se mencionó previamente en secciones anteriores, las pautas técnicas también están delineadas en la norma INEN 1573.

Conforme a las regulaciones actuales en nuestro país, la evaluación de compresión de los adoquines debe ser ejecutada en ambientes húmedos, lo que implica sumergir los adoquines en agua durante veinticuatro horas. Antes de proceder con la inmersión, se requiere calcular las dimensiones y el área de la sección resistente del adoquín. Luego, las superficies superior e inferior del adoquín son niveladas. Con las muestras en estas condiciones, se colocan en la máquina de compresión de acuerdo con lo indicado en la normativa correspondiente.

La determinación de la resistencia a la compresión se lleva a cabo al dividir la carga máxima entre el área de contacto con el adoquín (Salguero, 2013).

Figura 29

Ensayo de resistencia a la compresión.



(a)

(b)

Nota. a). Muestra preparada para ser sometida a prueba entre los dispositivos de carga. b) La muestra se sometió a compresión hasta que ocurrió su fractura.

A continuación, se resume los resultados del ensayo de compresión.

Tabla 21

Resultados ensayos de compresión

Muestra	Probeta Resina Epóxica con arena
Peso (g)	8780,90
Altura (cm)	30,00
Diámetro (cm)	15,10
Área (cm²)	179,08
Volumen (cm³)	5372,36
Peso Volumétrico (g/cm³)	1,63

Muestra	Probeta Resina Epóxica con arena
Carga (kg)	17178,00
Resistencia a Compresión (kg/cm²)	95,92
Tipo de Falla	Tipo 3. Fisura vertical a través de ambos extremos.

Figura



Nota. La tabla muestra la resistencia a compresión obtenida.

Módulo de Elasticidad

El módulo estático de elasticidad es la característica mecánica que influye en la definición de la respuesta elástica del hormigón. Su determinación experimental implica la aplicación de cargas conocidas en una muestra, lo que permite evaluar las relaciones entre las deformaciones longitudinal-transversal (Coeficiente de Poisson) y esfuerzo-deformación (Módulo de Young) (Sánchez, Chilibingua, Flores, & Orosco, 2020)

Se siguió el protocolo descrito en la norma ASTM C469-94 para determinar el módulo de elasticidad de cada uno de los cilindros arena con resina epóxica. En este proceso, se

coloca la muestra a ensayar entre abrazaderas metálicas posicionadas aproximadamente en el centro del espécimen. Estas abrazaderas se conectan mediante pivotes roscables.

Luego, se ajustan los deformímetros compresores y extensores para medir las deformaciones vertical y transversal respectivamente. Durante la aplicación gradual de carga, se registra la información pertinente, incluyendo carga, deformación vertical y deformación transversal, a lo largo del ensayo. Esta recopilación de datos se realiza bajo la supervisión de tres observadores.

Figura 30

Ensayo de módulo de elasticidad



(a)



(b)

Nota. a). Posicionamiento del equipo de ensayo en el cilindro. b). Muestra dispuesta para ser ensayada entre los cabezales de carga y registro de deformaciones y carga.

Las fórmulas proporcionadas por la (American Society for Testing and Materials, 2014) para la determinación del módulo de elasticidad (1) y la relación de Poisson (2) son las siguientes:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \quad (1)$$

Donde:

σ_2 = 40% del esfuerzo máximo que resiste la probeta de hormigón.

σ_1 = esfuerzo correspondiente a una deformación unitaria de 0,000050.

ε_2 = es la deformación longitudinal que ocurre para el esfuerzo de σ_2 .

$$\mu = \frac{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}{\varepsilon_2 - 0,00005} \quad (1)$$

Donde:

μ = relación de Poisson

ε_{t2} = deformación transversal a media altura del espécimen, producida por el esfuerzo σ_2

ε_{t1} = deformación transversal a media altura del espécimen, producida por el esfuerzo σ_1

Ensayo de módulo de elasticidad para las probetas

La siguiente Tabla 22 presenta los parámetros geométricos de dos cilindros compuestos por arena y resina. Estos valores son empleados en el cálculo del módulo estático de elasticidad y el coeficiente de Poisson.

Tabla 22*Parámetros geométricos de los cilindros y esfuerzos*

	Dimensiones del cilindro		Área probeta (cm ²)	Esfuerzo		Esfuerzo al 40% (kg/cm ²)
	Altura (cm)	Diámetro (cm)		a la ruptura (kg/cm ²)	Carga (kg) 40%	
	Muestra 1	30,00		15,20	181,46	
Muestra 2	30,00	15,30	183,85	44,60	3280,00	17,84

Nota. La tabla incluye los valores de resistencia en el punto de fractura y los valores de resistencia correspondientes al 40% de los máximos niveles de resistencia.

Tabla 23*Coefficiente de Poisson y esfuerzos para la muestra 1*

Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Deformación unitaria vertical (mm/mm)	Deformación unitaria horizontal (mm/mm)	Coefficiente de Poisson
305	1,68	0,0000000	0,0000000	0,000
407	2,24	0,0000050	0,0000000	0,000
482	2,66	0,0000100	0,0000000	0,000
1526	8,41	0,0000150	0,0000000	0,000
1585	8,73	0,0000200	0,0000000	0,000
1644	9,06	0,0000250	0,0000000	0,000
2701	14,88	0,0000300	0,0000195	0,650
2769	15,26	0,0000350	0,0000195	0,557

Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Deformación unitaria	Deformación	Coeficiente de Poisson
		vertical (mm/mm)	unitaria horizontal (mm/mm)	
2832	15,61	0,0000400	0,0000195	0,488
2879	15,87	0,0000450	0,0000195	0,433
2948	16,25	0,0000500	0,0000193	0,386
3053	16,82	0,0000600	0,0000191	0,318
3183	17,54	0,0000700	0,0000190	0,271
4286	23,62	0,0000800	0,0000189	0,236
4420	24,36	0,0000900	0,0000186	0,207
6520	35,93	0,0001000	0,0000184	0,184
6830	37,64	0,0001250	0,0000175	0,140
7189	39,62	0,0001500	0,0000164	0,109
7470	41,17	0,0001750	0,0000151	0,086
7800	42,99	0,0002000	0,0000140	0,070
8097	44,62	0,0002250	0,0000140	0,062

Nota. Se presentan los resultados de esfuerzos, deformaciones y coeficiente de Poisson para la muestra 1

Tal y como se señala en la fórmula (1), la determinación del módulo de elasticidad implica el cálculo de la tensión asociada con la deformación unitaria longitudinal $\varepsilon_1 = 0,000050$.

Tabla 24

σ_1 para la deformación unitaria longitudinal $\varepsilon_1 = 0,000050$, cilindro 1.

Deformación unitaria	Esfuerzo
(mm/mm)	(kg/cm ²)
0,0000500	16,25

Nota. La tabla muestra el valor del esfuerzo del cilindro 1 ensayado en laboratorio.

$$\sigma_1 = 16,25 \text{ kg/cm}^2$$

Para el cálculo del esfuerzo $\sigma_2 = 44,37 \text{ kg/cm}^2$ correspondiente al 40% del esfuerzo máximo se obtuvo una deformación longitudinal $\varepsilon_2 = 0,0002212$ como se indica en la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_2 = 0,0002 + (44,37 - 42,99) * \frac{0,000225 - 0,00020}{44,62 - 42,99} = 0,0002212$$

Utilizando estos valores que han sido identificados, se llevó a cabo el cálculo del módulo de elasticidad para el primer cilindro, tal como se detalla en la siguiente expresión.

$$E = \frac{44,37 - 16,25}{0,0002212 - 0,00005} = 164252,34 \text{ kg/cm}^2$$

Para calcular el coeficiente de Poisson, es posible emplear la fórmula (2), la cual vincula deformaciones en dirección transversal. No obstante, se optó por llevar a cabo una interpolación utilizando los valores suministrados en la Tabla No. 25 para determinar el coeficiente de Poisson con un esfuerzo $\sigma_2 = 44,37 \text{ kg/cm}^2$, que se corresponde con el 40% de la carga máxima de rotura.

Tabla 25

Interpolación del coeficiente de Poisson para un esfuerzo σ_2 , cilindro 1.

Esfuerzo (kg/cm²)	Coeficiente de Poisson
42,99	0,070
44,37	X
44,62	0,062

Nota. Se obtuvo un coeficiente de Poisson $\mu = 0,241$ como se indica en la siguiente expresión:

$$\mu = 0,070 + (44,37 - 42,99) * \frac{0,062 - 0,070}{44,62 - 42,99} = 0,063$$

Tabla 26

Coeficiente de Poisson y esfuerzos para la muestra 2.

Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm²)	Deformación unitaria vertical (mm/mm)	Deformación unitaria horizontal (mm/mm)	Coeficiente de Poisson
384	2,09	0,0000000	0,0000000	0,000
476	2,59	0,0000050	0,0000000	0,000
1058	5,75	0,0000100	0,0000000	0,000
1542	8,39	0,0000150	0,0000000	0,000
1635	8,89	0,0000200	0,0000000	0,000
2376	12,92	0,0000250	0,0000000	0,000
2733	14,87	0,0000300	0,0000190	0,633
2815	15,31	0,0000350	0,0000193	0,551
2875	15,64	0,0000400	0,0000193	0,483

Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Deformación unitaria	Deformación	Coeficiente de Poisson
		vertical (mm/mm)	unitaria horizontal (mm/mm)	
2914	15,85	0,0000450	0,0000192	0,427
3038	16,52	0,0000500	0,0000192	0,384
3116	16,95	0,0000600	0,0000190	0,317
3853	20,96	0,0000700	0,0000189	0,270
4315	23,47	0,0000800	0,0000188	0,235
4728	25,72	0,0000900	0,0000184	0,204
6528	35,51	0,0001000	0,0000183	0,183
7059	38,39	0,0001250	0,0000170	0,136
7250	39,43	0,0001500	0,0000162	0,108
7473	40,65	0,0001750	0,0000149	0,085
7907	43,01	0,0002000	0,0000139	0,070
8754	47,61	0,0002250	0,0000125	0,056

Nota. Se presentan los resultados de esfuerzos, deformaciones y coeficiente de Poisson para la muestra 2

Tal y como se señala en la fórmula (1), la determinación del módulo de elasticidad implica el cálculo de la tensión asociada con la deformación unitaria longitudinal $\varepsilon_1 = 0,000050$.

Tabla 27

σ_1 para la deformación unitaria longitudinal $\varepsilon_1 = 0,000050$, cilindro 2.

Deformación unitaria (mm/mm)	Esfuerzo (kg/cm ²)
0,0000500	16,52

Nota. La tabla muestra el valor del esfuerzo del cilindro 2 ensayado en laboratorio.

$$\sigma_1 = 16,52 \text{ kg/cm}^2$$

De forma similar, para un esfuerzo $\sigma_2 = 46,95 \text{ kg/cm}^2$ correspondiente al 40% del esfuerzo máximo se obtuvo una deformación longitudinal $\varepsilon_2 = 0,0002214$ como se indica en la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_2 = 0,00020 + (46,95 - 43,01) * \frac{0,000225 - 0,00020}{47,61 - 43,01} = 0,0002214$$

Utilizando estos valores que han sido identificados, se llevó a cabo el cálculo del módulo de elasticidad para el segundo cilindro, tal como se detalla en la siguiente expresión.

$$E = \frac{46,95 - 16,52}{0,0002214 - 0,00005} = 177537,92 \text{ kg/cm}^2$$

Para calcular el coeficiente de Poisson, es posible emplear la fórmula (2), la cual vincula deformaciones en dirección transversal. No obstante, se optó por llevar a cabo una interpolación utilizando los valores suministrados en la Tabla No. 28 para determinar el coeficiente de Poisson con un esfuerzo $\sigma_2 = 46,95 \text{ kg/cm}^2$, que se corresponde con el 40% de la carga máxima de rotura.

Tabla 28

Interpolación del coeficiente de Poisson para un esfuerzo σ_2 , cilindro 2.

Esfuerzo (kg/cm²)	Coeficiente de Poisson
43,01	0,070
46,95	X
47,61	0,056

Nota. Se obtuvo un coeficiente de Poisson $\mu = 0,213$ como se indica en la siguiente expresión:

$$\mu = 0,070 + (46,95 - 43,01) * \frac{0,056 - 0,070}{47,61 - 43,01} = 0,058$$

Resumen de módulos de elasticidad para probetas

La Tabla No 29 resume los resultados obtenidos del ensayo experimental del módulo de elasticidad. Este procedimiento se realizó utilizando dos probetas compuestas por arena y resina epóxica, y se determinó el promedio de estos valores para poder compararlos con el módulo de elasticidad teórico. Para el cálculo teórico se empleó la expresión $4700\sqrt{f'c}$ (Mpa), conforme a lo establecido en la norma ACI 318-14 (American Concrete Institute, 2015).

Tabla 29

Comparación módulos de elasticidad experimentales vs teóricos.

Muestras	f'c (Mpa)	E. Experimental (Mpa)	E. Teórico $4700\sqrt{f'c}$ (Mpa)	Relación experimental / teórico
1	9,41	16107,59	14415,24	111,74%
2	9,41	17410,46	14415,24	120,78%

Nota. En la tabla se incluyen los porcentajes que representan la relación entre los módulos de elasticidad obtenidos experimentalmente y los calculados teóricamente.

En la Tabla No. 29 se puede observar que el módulo de elasticidad experimental es mayor que el módulo de elasticidad teórico, esto podría indicar que las muestras ensayadas poseen propiedades elásticas más rígidas o menos deformables de lo que se esperaría según el cálculo teórico. En otras palabras, la muestra podría estar mostrando una mayor resistencia a las deformaciones bajo carga en comparación con las predicciones teóricas.

Tabla 30

Resumen de coeficientes de Poisson.

Muestras	Coficiente de Poisson	Coficiente de Poisson promedio
1	0,063	0,061
2	0,058	

Nota. En la tabla previa es posible notar que los coeficientes de Poisson identificados en los diferentes cilindros sometidos a prueba varían entre 0,058 y 0,063

PLAXIS

Simulación del comportamiento del pavimento articulado

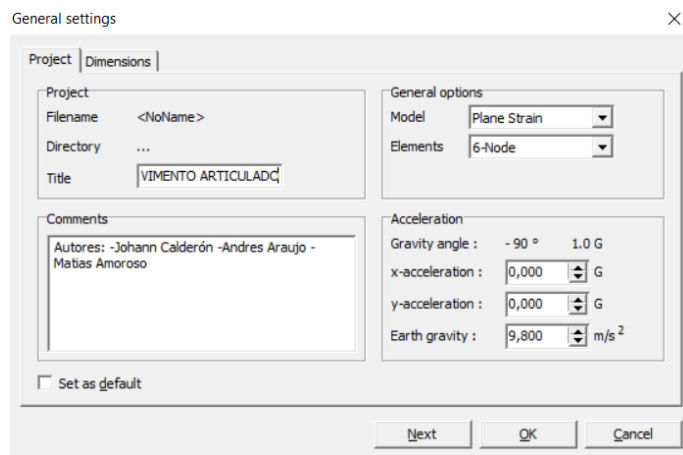
En el Método de Análisis de Elementos Finitos, se postula la homogeneidad del material en el pavimento articulado y la presencia de simetría biaxial en la carga de tráfico al ser implementado.

Configuraciones iniciales

Se uso un modelo bidimensional de 6 nodos.

Figura 31

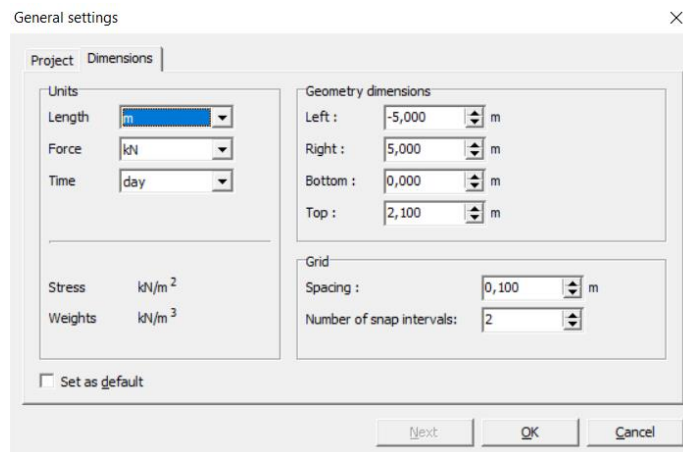
Configuraciones iniciales del proyecto.



Nota. El modelo es un plano de esfuerzos donde se empleó 6 nodos para elementos finitos.

Figura 32

Configuraciones dimensionales del proyecto.



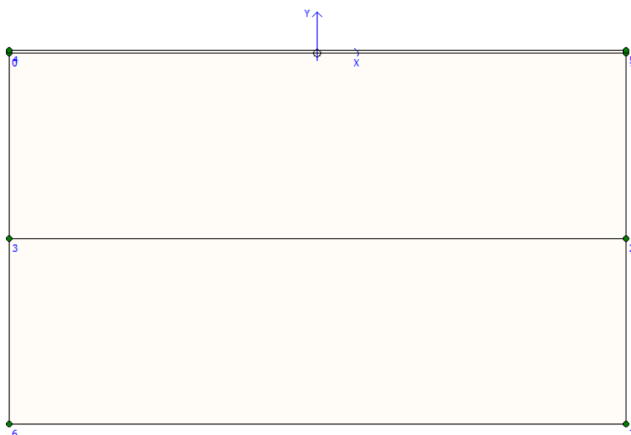
Nota. En el modelo se plantea las medidas de la plataforma que se va a simular en el software.

Para la simulación se creó una plataforma de 10 metros de longitud está dada por el tamaño máxima de una cama baja, la que podría llegar utilizarse como maquinaria de colocación del adoquín.

Se recreo un suelo con una profundidad de 6 metros para poder observar el comportamiento del suelo respecto a las cargas aplicadas.

Figura 33

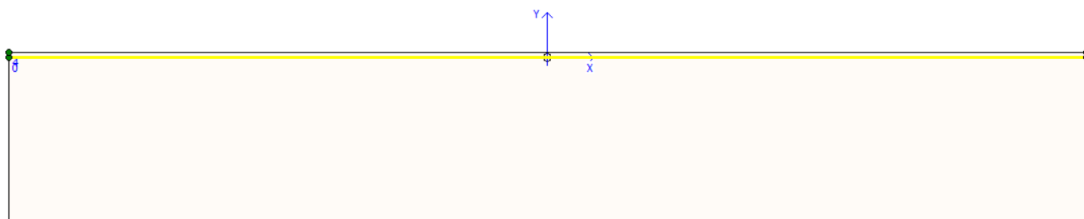
Plataforma de 10 metros de longitud y dos capas de suelo.



Nota. Capas de suelo donde el superior es tipo ML y el inferior CL-ML.

Figura 34

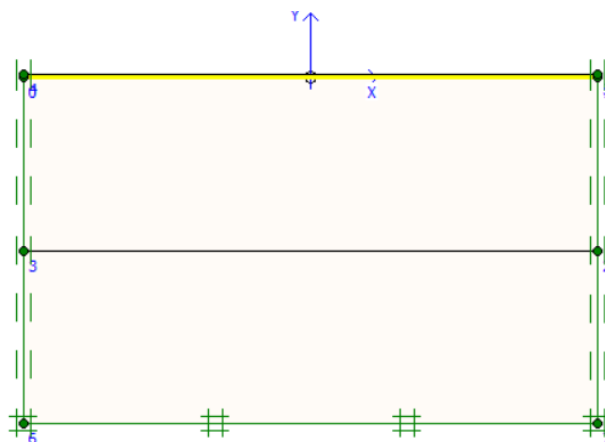
Colocación de la geomalla bajo el pavimento articulado.



Nota. La figura indica como se ingresó en el software la geomalla bajo el pavimento articulado.

Figura 35

Confinamiento de módulo estructural de 10 metros.



Nota. El confinamiento del módulo estructural implica un paso fundamental para una simulación exitosa.

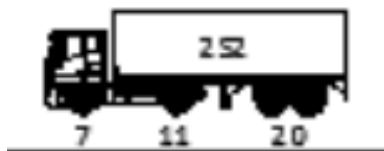
Para la definición de cargas se asumió el tránsito de un vehículo de tres ejes, tipo 2S2.

Estos datos fueron obtenidos de (MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS DEL ECUADOR, 2013).

Como carga crítica se usó el tercer eje de este vehículo teniendo una carga máxima de 20 toneladas distribuidas en un neumático, dada un área de distribución de 40 centímetros.

Figura 36

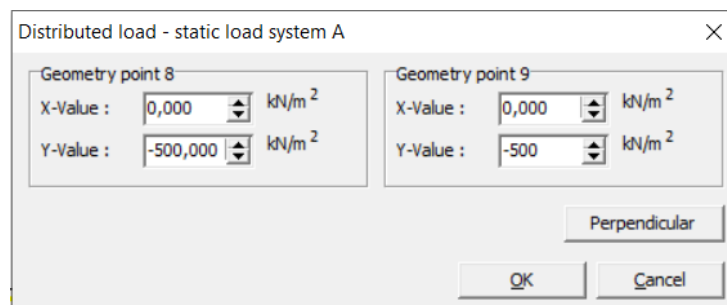
Vehículo tipo 2S2



Nota. Tracto camión de 2 ejes y semi remolque de 2 ejes, obtenido de (MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS DEL ECUADOR, 2013)

Figura 37

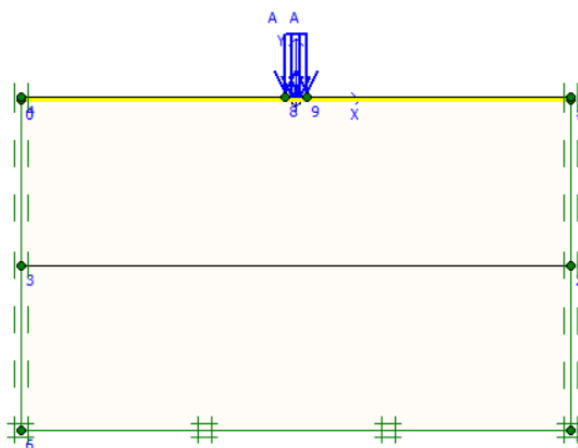
Carga distribuida colocada sobre el pavimento articulado.



Nota. Las cargas generalizadas empleadas sobre el pavimento deben ser configuradas como una carga distribuida.

Figura 38

Carga colocada sobre el sistema.



Nota. La carga sobre el sistema simula el comportamiento de la llanta de un vehículo la misma que se distribuye en 40 cm.

Para la estratigrafía usada del suelo en este modelamiento se usaron datos obtenidos en Quito, San Juan Alto realizados por (CIMENTEST, 2014)

Tabla 31*Resultados ensayo SPT.*

SONDEO S-1	
$\gamma = 1,70 \text{ t/m}^3$	Nivel freático
$\gamma_{\text{sat}} = 1,80 \text{ t/m}^3$	N= -0,50 m
Prof. (m)	N SPT
0,00	
1,00	5
2,00	9
3,00	49
4,00	30
5,00	35
6,00	47

Nota. La tabla indica la relación entre la profundidad y el ensayo SPT, por (CIMENTEST, 2014).

La estratigrafía se divide en dos partes de 3 metros, para la obtención del módulo de elasticidad del suelo y módulo de poisson se usaron las siguientes tablas:

Tabla 32*Valores orientativos de NSPT y módulo de elasticidad de suelos.*

Tipo de suelo	NSPT	E (MN/m²)
Suelos muy flojos o blandos	<10	<8
Suelos flojos o blandos	10-25	8-40

Tipo de suelo	NSPT	E (MN/m ²)
Suelos medios	25-50	40-100
Suelos compactados o duros	50-Rechazo	100-500

Nota. La tabla indica la relación entre el tipo de suelo, NSPT y módulo de elasticidad, obtenida (Ministerio de Vivienda, 2006).

Tabla 33

Valores orientativos del coeficiente de Poisson.

Tipo de suelo	Coeficiente de Poisson
Arcillas blandas normalmente consolidadas	0.40
Arcillas medias	0.30
Arcillas duras preconsolidadas	0.15
Arenas y suelos granulares	0.30

Nota. La tabla indica la relación entre el tipo de suelo y el coeficiente de poisson, obtenida del (Ministerio de Vivienda, 2006).

Tabla 34

Valores del módulo de elasticidad y poisson en el suelo modelado.

Profundidad de suelo (m)	NSPT promedio	Módulo de elasticidad (KN/m ²)	Módulo de Poisson
0-3	21	36 000	0.30
3-6	35	64 000	0.30

Nota. La tabla indica los valores el módulo de elasticidad y poisson según el ensayo SPT.

Figura 39

Propiedades generales primera capa.

Linear Elastic - SUELO ML

General | Parameters | Interfaces

Material set

Identification: SUELO ML

Material model: Linear Elastic

Material type: Drained

General properties

γ_{unsat} : 16,670 kN/m³

γ_{sat} : 17,650 kN/m³

Comments

Permeability

k_x : 1,000 m/day

k_y : 1,000 m/day

Advanced...

SoilTest Next OK Cancel

Nota. Las propiedades de la primera capa simulan el comportamiento de un suelo tipo ML

Figura 40

Parámetros mecánicos del suelo en la primera capa.

Linear Elastic - SUELO ML

General | Parameters | Interfaces

Stiffness

E_{ref} : 3,600E+04 kN/m²

ν (ν_u): 0,300

Alternatives

G_{ref} : 1,385E+04 kN/m²

E_{oed} : 4,846E+04 kN/m²

Velocities

V_s : 90,220 m/s

V_p : 168,800 m/s

Advanced...

SoilTest Next OK Cancel

Nota. Las propiedades de la primera capa simulan el comportamiento de un suelo tipo ML

Figura 41

Propiedades generales segunda capa.

Linear Elastic - SUELO ML

General Parameters Interfaces

Stiffness

E_{ref} : 3,600E+04 kN/m²

ν (nu) : 0,300

Alternatives

G_{ref} : 1,385E+04 kN/m²

E_{oed} : 4,846E+04 kN/m²

Velocities

V_s : 90,220 m/s

V_p : 168,800 m/s

Advanced...

SoilTest Next OK Cancel

Nota. Las propiedades de la primera capa simulan el comportamiento de un suelo tipo CL- ML

Figura 42

Parámetros mecánicos del suelo en la segunda capa.

Linear Elastic - SUELO ML-CL

General Parameters Interfaces

Stiffness

E_{ref} : 5,400E+04 kN/m²

ν (nu) : 0,300

Alternatives

G_{ref} : 2,462E+04 kN/m²

E_{oed} : 8,615E+04 kN/m²

Velocities

V_s : 120,300 m/s

V_p : 225,100 m/s

Advanced...

SoilTest Next OK Cancel

Nota. Las propiedades de la primera capa simulan el comportamiento de un suelo tipo CL- ML

Figura 43

Propiedades generales adoquín.

Linear Elastic - PAVIMENTO ARTICULADO

General Parameters Interfaces

Material set

Identification: PAVIMENTO ARTICULADO

Material model: Linear Elastic

Material type: Drained

General properties

γ_{unsat} : 15,150 kN/m³

γ_{sat} : 15,540 kN/m³

Comments

Permeability

k_x : 1,000 m/day

k_y : 1,000 m/day

Advanced...

SoilTest Next OK Cancel

Nota. Las propiedades de la capa de rodadura se obtuvieron de los ensayos realizados en este proyecto.

Figura 44

Parámetros mecánicos del adoquín.

Linear Elastic - PAVIMENTO ARTICULADO

General Parameters Interfaces

Stiffness

E_{ref} : 1,741E+09 kN/m²

ν (ν): 0,061

Alternatives

G_{ref} : 8,205E+08 kN/m²

E_{oed} : 1,755E+09 kN/m²

Velocities

V_s : 2,304E4 m/s

V_p : 3,369E4 m/s

Advanced...

SoilTest Next OK Cancel

Nota. Las propiedades mecánicas de la capa de rodadura se obtuvieron de los ensayos realizados en este proyecto.

Geotextiles

Tabla 35

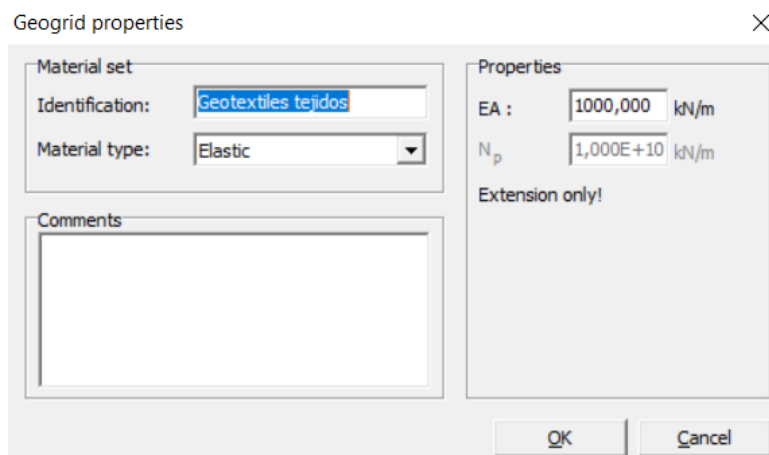
Intervalos recomendados de los valores de rigidez axial de geosintéticos

Categoría de refuerzo	Teoría rigidez axial para geotextiles (KN/m)
Geotextiles tejidos	1000
Geogrillas uni-axial	1500
Biaxial geogrids	2500
Geogrillas tri-axial	5000

Nota. La tabla indica la rigidez axial de cada geotextil, obtenido de (finesoftware, s.f.)

Figura 45

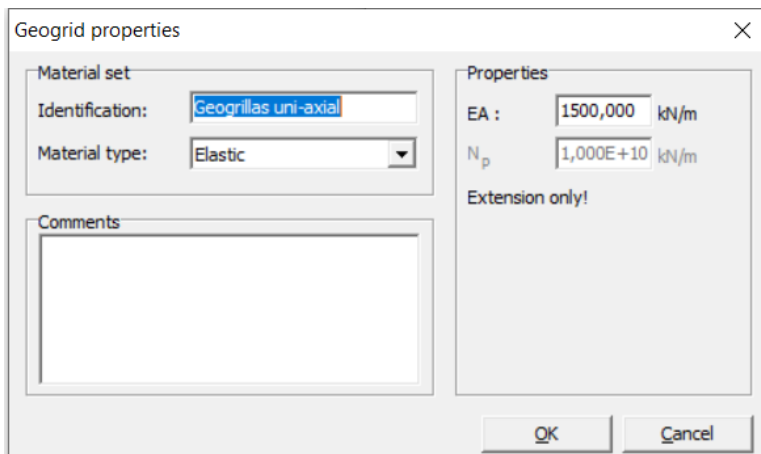
Geotextiles tejidos.



Nota. Las propiedades del geotextil a usarse en el software fueron obtenidas de (finesoftware, s.f.)

Figura 46

Geomalla Uniaxial.



The screenshot shows a dialog box titled "Geogrid properties" with a close button (X) in the top right corner. The dialog is divided into three main sections: "Material set", "Properties", and "Comments".

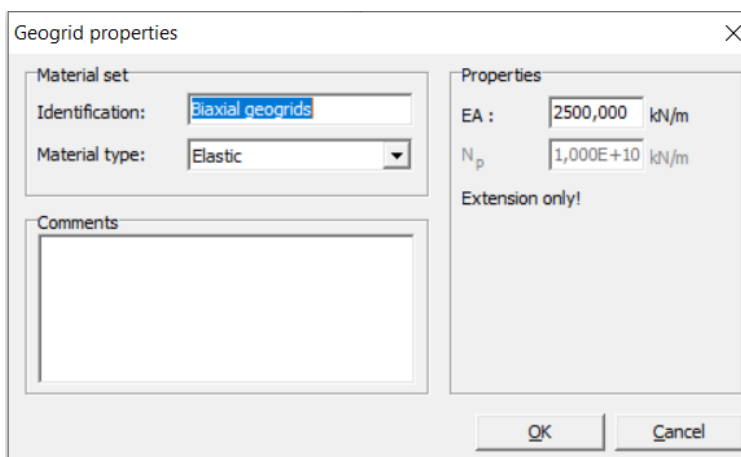
- Material set:** Contains a text field for "Identification" with the value "Geogrillas uni-axial" and a dropdown menu for "Material type" set to "Elastic".
- Properties:** Contains two text fields: "EA" with the value "1500,000" and units "kN/m", and "N_p" with the value "1,000E+10" and units "kN/m". Below these fields is the text "Extension only!".
- Comments:** A large empty text area for user input.

At the bottom of the dialog are two buttons: "OK" and "Cancel".

Nota. Las propiedades de la geomalla uniaxial a usarse en el software fueron obtenidas de (finesoftware, s.f.).

Figura 47

Geomalla Biaxial.

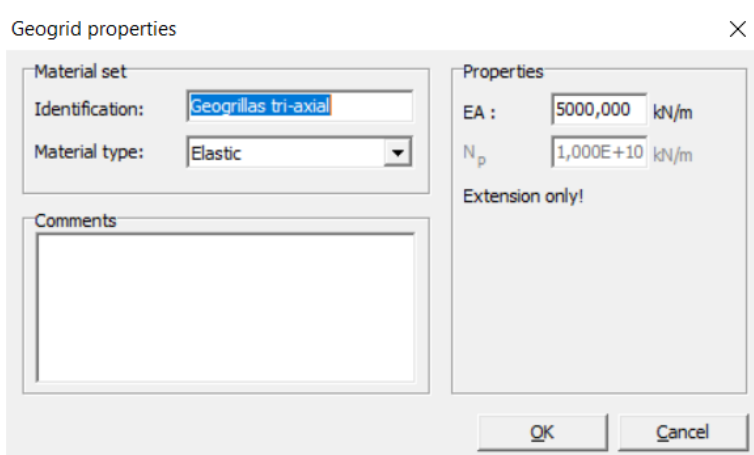


The screenshot shows a dialog box titled "Geogrid properties" with a close button (X) in the top right corner. The dialog is divided into three main sections: "Material set", "Properties", and "Comments".

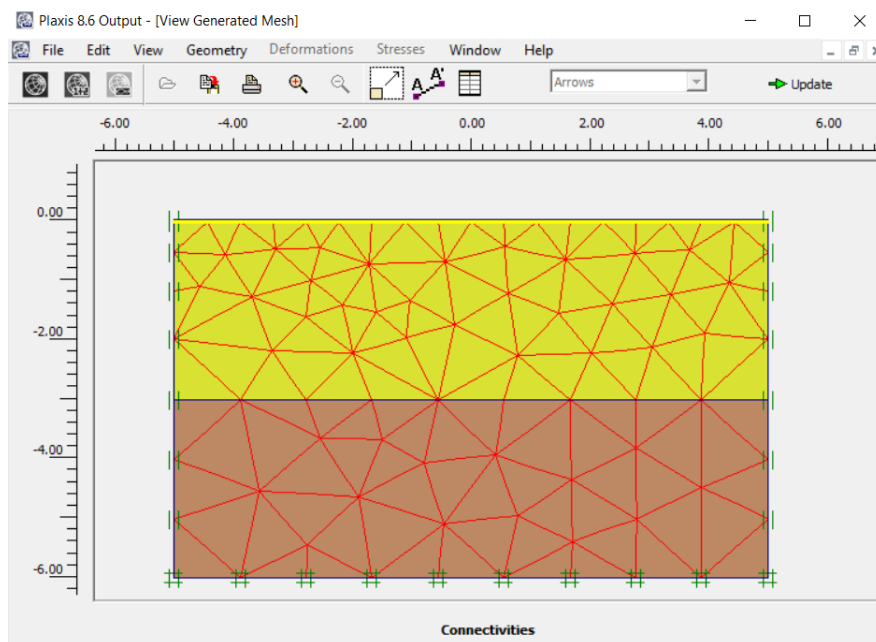
- Material set:** Contains a text field for "Identification" with the value "Biaxial geogrids" and a dropdown menu for "Material type" set to "Elastic".
- Properties:** Contains two text fields: "EA" with the value "2500,000" and units "kN/m", and "N_p" with the value "1,000E+10" and units "kN/m". Below these fields is the text "Extension only!".
- Comments:** A large empty text area for user input.

At the bottom of the dialog are two buttons: "OK" and "Cancel".

Nota. Las propiedades de la geomalla biaxial a usarse en el software fueron obtenidas de (finesoftware, s.f.).

Figura 48*Geomalla Triaxial.*

Nota. Las propiedades de la geomalla triaxial a usarse en el software fueron obtenidas de (finesoftware, s.f.).

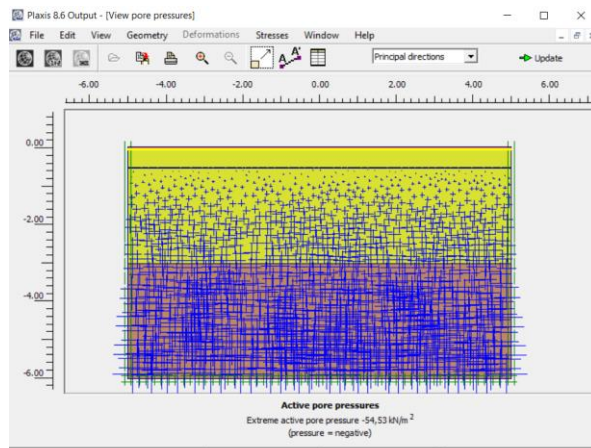
Figura 49*Malla de discretización de elementos finitos.*

Nota. La malla de discretización de elementos finitos donde se observa todas las partes que incorpora el sistema de simulación.

Nivel freático: -0.50 m

Figura 50

Nivel freático dado por el estudio de suelos.



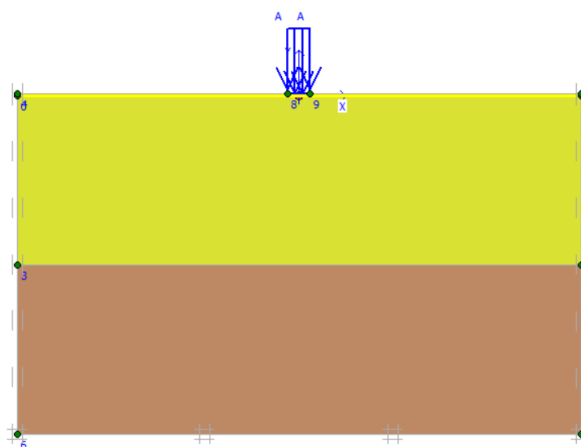
Nota. El nivel freático que se empleó en la simulación fue obtenido de un estudio de suelos.

Simulación modelamiento

Sistema completo con Pavimento Articulado

Figura 51

Modelo pavimento articulado.

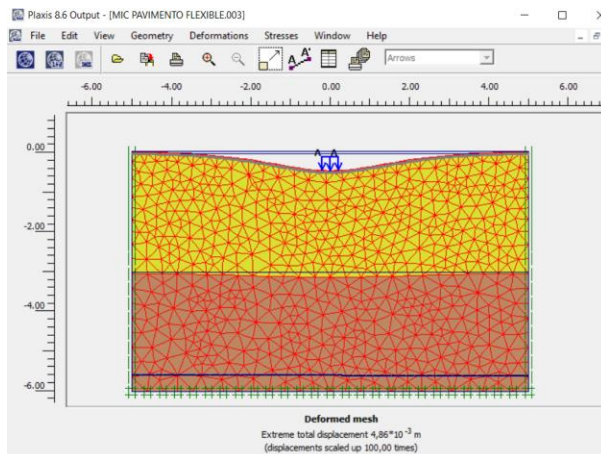


Nota. La gráfica muestra el modelo final de simulación del pavimento articulado de arena confinada y resina como aglutínate.

Desplazamientos totales

Figura 52

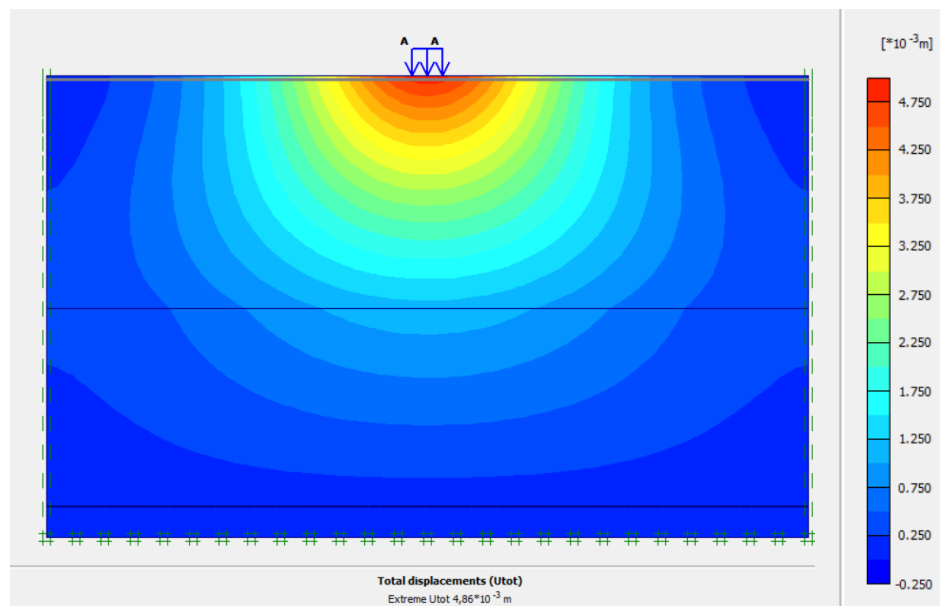
Deformaciones totales.



Nota. La gráfica muestra las deformaciones totales presentes en el modelo de simulación obteniendo una deformación de 4.86mm.

Figura 53

Desplazamientos totales.

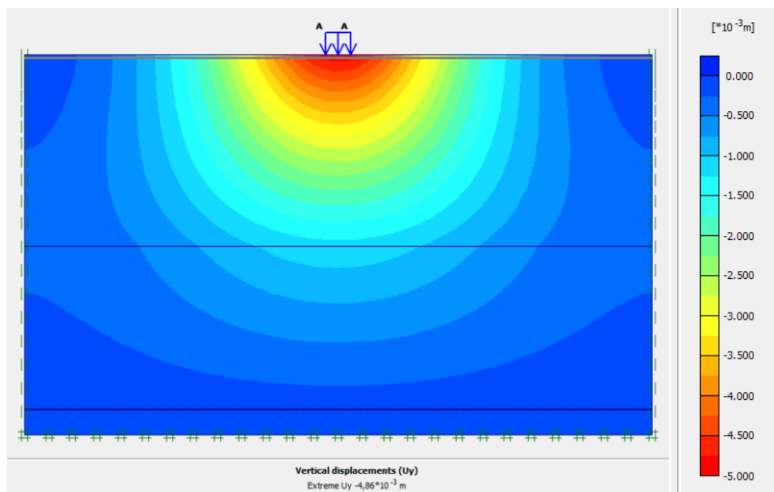


Nota. La gráfica muestra los desplazamientos totales de la simulación del sistema de pavimento articulado de arena confinada con resina como aglutinante.

Desplazamientos verticales

Figura 54

Desplazamientos verticales.

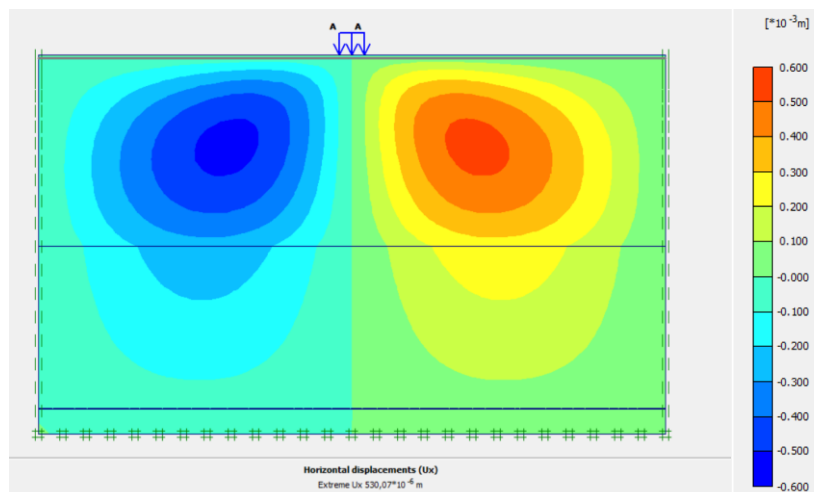


Nota. La gráfica muestra los desplazamientos verticales mediante la degradación de colores en el sistema de simulación.

Desplazamientos horizontales

Figura 55

Desplazamientos horizontales.

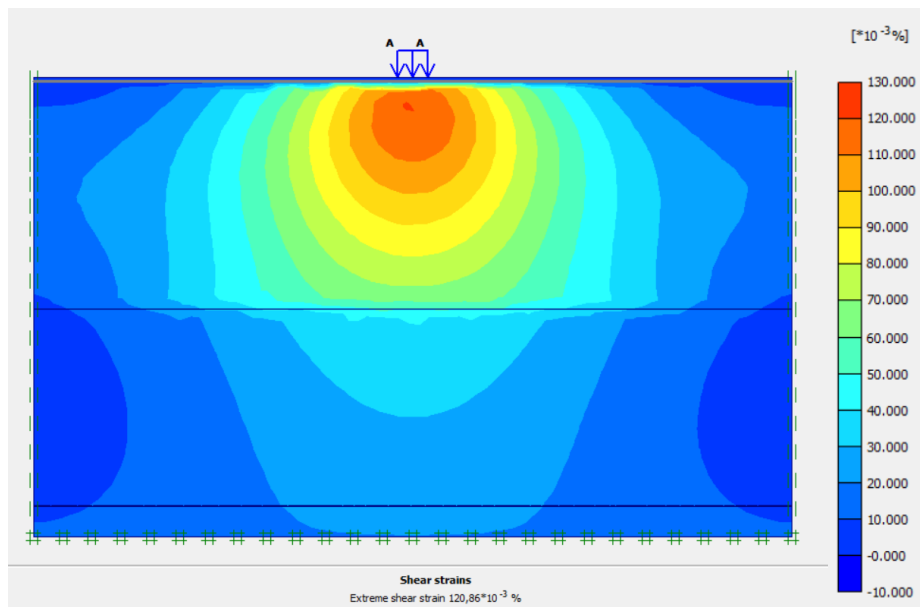


Nota. La gráfica muestra los desplazamientos horizontales del sistema de simulación donde se obtuvo un desplazamiento horizontal de 0,63 mm.

Deformaciones cortantes

Figura 56

Deformaciones cortantes.



Nota. La gráfica muestra las deformaciones por cortantes mediante la degradación de colores en el sistema de simulación.

Presupuesto referencial

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO:

ELABORACIÓN ADOQUÍN CON AGLOMERANTE DE RESINA IMP. DIRECTA

UNIDAD:

m²

A.- EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Herramienta menor (5% M.O.)	1,00	0,03	0,03	0,0800	0,00
TOTAL					0,00
B.- MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Peón en General (Estr.Oc E2)	2,00	4,05	8,10	0,0800	0,65

TOTAL					0,65
C.- MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
Arena Confinada	kg	40,00	0,02	0,64	
Arena	kg	13,33	0,02	0,21	
Resina epóxica	kg	6,67	3,00	20,00	
TOTAL					20,85
D: TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C = A x B	
TOTAL:					
TOTAL, COSTO DIRECTO					21,50
C. INDIRECTO Y UTILIDADES:					0,00%
COSTO TOTAL DEL RUBRO:					21,50
VALOR PROPUESTO					21,50

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO: COLOCACIÓN ADOQUÍN CON AGLOMERANTE DE RESINA IMP. DIRECTA
UNIDAD: m2

A.- EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Herramienta menor (5% M.O.)	1,00	0,01	0,01	0,0167	0,00
Retroexcavadora de oruga + Martillo Hidráulico	1,00	45,00	45,00	0,0167	0,75
Remolque cama baja (3 ejes)	1,00	37,50	37,50	0,0167	0,63
TOTAL					1,38
B.- MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Peón en General (Estr.Oc E2)	2,00	4,05	8,10	0,0167	0,14
Retroexcavadora (Estr. Oc. C1)	1,00	4,55	4,55	0,0167	0,08
Auto-tren cama baja (trailer)	1,00	4,55	4,55	0,0167	0,08

					TOTAL	0,29
C.- MATERIALES						
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO		
		A	B	C = A x B		
Arena para Adoquín inc. Transporte	m3	0,02	13,75	0,28		
Adoquín con Aglomerante de Resina	m2	1,00	21,50	21,50		
					TOTAL	21,78
D: TRANSPORTE						
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO		
		A	B	C = A x B		
					TOTAL:	
					TOTAL, COSTO DIRECTO	23,44
					C. INDIRECTO Y UTILIDADES:	0,00% 0,00
					COSTO TOTAL DEL RUBRO:	23,44
					VALOR PROPUESTO	23,44

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO:

COLOCACIÓN ADOQUÍN CONVENCIONAL

UNIDAD: m2

A.- EQUIPOS						
DESCRIPCIÓN	CANTIDA D	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIEN T O	COSTO	
	A	B	C = A x B	R	D = C x R	
HERRAMIENTAS MENORES (5% M/O)	1,00	0,18	0,18	0,1667	0,03	
COMPACTADOR MEDIANO MANUAL	0,30	2,50	0,75	0,1667	0,13	
CORTADORA MANUAL ELÉCTRICA	0,25	2,70	0,68	0,1667	0,11	
					TOTAL	0,27
B.- MANO DE OBRA						
DESCRIPCIÓN	CANTIDA D	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIEN T O	COSTO	
	A	B	C = A x B	R	D = C x R	
Peón en General (Estr.Oc E2)	4,00	4,05	16,20	0,1667	2,70	
Maestro mayor en ejecución de obras civiles (Estr. Oc. C1)	0,20	4,55	0,91	0,1667	0,15	
Albañil (Estr.Oc D2)	1,00	4,10	4,10	0,1667	0,68	

TOTAL					3,54
C.- MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
Adoquín a colores f'c=400 kg/cm2 E=8cm. Inc. Transporte	m2	1,02	17,31	17,66	
Arena para Adoquín inc. Transporte	m3	0,05	13,75	0,69	
Disco de Corte D=6"	u	0,02	15,00	0,26	
TOTAL					18,60
D: TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C = A x B	
TOTAL:					
TOTAL, COSTO DIRECTO				22,40	
C. INDIRECTO Y UTILIDADES:			0,00%	0,00	
COSTO TOTAL DEL RUBRO:				22,40	
VALOR PROPUESTO					22,40

Tabla 36

Presupuesto referencial de adoquinado de una vía de 100 metros con adoquín tradicional

ITEM	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	TOTAL
1	Replanteo y nivelación con instrumentos topográficos	km	0,11	\$463,22	\$50,95
2	Excavación estructura menores	m3	15,00	\$14,17	\$212,55
3	Excavación sin clasificar, especificaciones 303-2(1), mop-01-f2002, incluye conformación y compactación	m3	200,00	\$3,89	\$778,00
4	Transporte de material de excavación (incluye esponjamiento y pago en escombrera 309- 2(2))	m3 - km	3.780,00	\$0,42	\$1.587,60
5		m3	126,00	\$12,35	\$1.556,10

ITEM	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	TOTAL
	Subbase clase 3, 403-1. especific. mop-001-f2002, tendido, conformado y compactado sin transporte				
6	Transporte de subbase clase 3 (de la mina a la obra incluye el esponjamiento 309-4(2))	m3 - km	3.020,00	\$0,30	\$906,00
7	Adoquín hormigón f'c=350kg/cm2 401-4(1) especificaciones mop-001-f20002, capa de arena e=6cm. berma de h.s. f'c=210 kg/mc2.	m2	640,00	\$22,40	\$14.336,00
9	h=30cm. b=15cm., encofrado 610-(1) b. especificaciones mop-001-f2002.	m	15,00	\$14,29	\$214,35
10	Alzada o bajada de pozos	u	2,00	\$55,74	\$111,48
11	Sumideros: rejilla de hierro, taza, tubería 15cm. especificación mpo-001-f2002- incluye excavación	u	4,00	\$306,54	\$1.226,16
12	Pintura de tráfico para señalización bordillos	m	210,00	\$2,57	\$539,70
TOTAL=					\$21.518,89

Nota. La tabla muestra el costo referencial de una obra de adoquinado donde se implementa adoquín de hormigón.

Tabla 37

Presupuesto referencial de adoquinado de una vía de 100 metros con adoquín de resina epóxica.

Ítem	Rubro	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
REPLANTEO Y NIVELACIÓN CON					
1	INSTRUMENTOS TOPOGRÁFICOS	km	0,11	\$463,22	\$50,95
2	EXCAVACIÓN ESTRUCTURA MENORES	m3	15,00	\$14,17	\$212,55

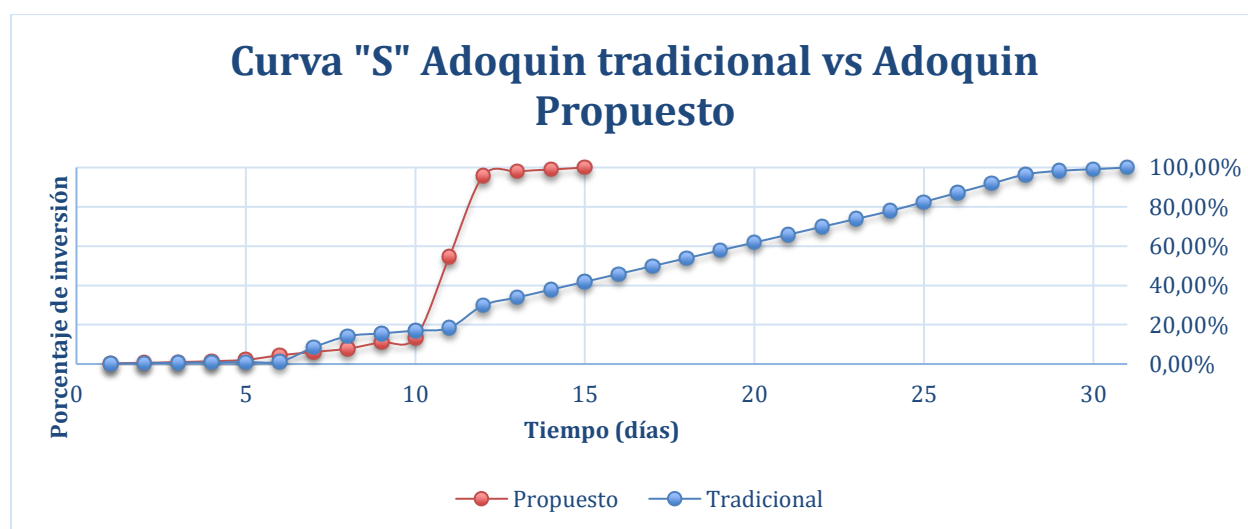
Ítem	Rubro	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
TRANSPORTE DE MATERIAL DE					
3	EXCAVACION (Incluye esponjamiento y pago en escombrera 309- 2(2))	m3 - km	300,00	\$0,42	\$126,00
4	RELLENO CON GRAVA	m3	20,00	\$28,77	\$575,40
TRANSPORTE DE RELLENO CON					
5	GRAVA	m3 - km	400,00	\$0,30	\$120,00
A LA OBRA					
COLOCACIÓN ADOQUÍN CON					
6	AGLOMERANTE DE RESINA	m2	640,00	\$23,44	\$15.001,60
IMPORTACION DIRECTA					
8	COLOCACIÓN GEOMALLA	m2	640,00	\$3,00	\$1.920,00
BERMA DE H.S. f'c=210 kg/mc2.					
9	h=30cm. b=15cm., ENCOFRADO 610-(1) B.	m	15,00	\$14,29	\$214,35
ESPECIFICACIONES MOP-001-F2002.					
10	ALZADA O BAJADA DE POZOS	u	2,00	\$55,74	\$111,48
SUMIDEROS: REJILLA DE HIERRO,					
TAZA, TUBERÍA 15CM.					
11	ESPECIFICACIÓN MPO-001F 2002- INCLUYE EXCAVACIÓN	u	4,00	\$306,54	\$1.226,16

Ítem	Rubro	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
PINTURA DE TRAFICO PARA					
12	SEÑALIZACION BORDILLOS	m	210,00	\$2,57	\$539,70
TOTAL=					\$20.098,19

Nota. La tabla muestra el costo referencial de una obra de adoquinado donde se implementa adoquín de cartón prensado con arena confinada y resina como aglutinante.

Figura 57

Curva "S" de proyecto de adoquinado con distintos adoquines.



Nota. La grafica muestra la comparación entre dos proyectos iguales donde cambiamos el tipo de adoquín empleado.

A partir de los datos presentados en las tablas relacionadas con los presupuestos estimativos dentro de un proyecto de pavimentación con adoquines, es posible identificar la curva de eficiencia para ambas situaciones. Al considerar la técnica convencional de instalación de adoquines en una vía de 100 metros, se logra finalizar el proyecto en un lapso de 31 días. En contraste, al optar por el enfoque propuesto en este estudio, la ejecución de la obra se completa en tan solo 15 días. Esta diferencia de tiempo indica un ahorro sustancial en términos temporales al emplear la metodología alternativa.

Tiempo de ejecución propuesto

La implementación del método de instalación de adoquines de arena confinada con mortero epoxi ofrece una solución que permite optimizar considerablemente el proceso de colocación de pavimento articulado. Este enfoque aprovecha la inherente capacidad de los adoquines para interconectarse y formar una sólida plancha, lo que agiliza el tiempo requerido para completar la instalación.

Una vez que la cama baja que transporta las planchas de adoquines está en posición, el procedimiento implica el uso de una retroexcavadora modificada para arrastrar las planchas de adoquines al área designada. Este proceso, debido a su eficiencia, se espera que se realice en un plazo de no más de 10 minutos. Para visualizar su impacto en la práctica, consideremos que las planchas de adoquines tienen un ancho de 2 metros y una longitud conservadora de 5 metros. Por lo tanto, si tomamos como ejemplo la instalación de una calle de 100 metros de longitud con un ancho de 6 metros, esto equivale a un área de 600 metros cuadrados. Mediante el método propuesto, la instalación de esta área se lograría en tan solo 10 horas. Este proceso optimizado no solo acelera la ejecución del proyecto, sino que también conlleva una reducción significativa en los costos de mano de obra. Esto contrasta notablemente con el enfoque convencional, donde la instalación de una calle adoquinada de dimensiones similares puede llevar hasta un mes.

En resumen, la aplicación del método de instalación de adoquines de arena confinada con mortero epoxi ofrece una manera eficaz y eficiente de llevar a cabo pavimentos articulados. Esta innovadora técnica demuestra su capacidad para transformar la dinámica de instalación, ahorrando tiempo con los métodos tradicionales, y resulta especialmente valiosa en proyectos donde la rapidez y son prioritarias.

Cálculo del Rendimiento

Unidad = m^2

Grupo de trabajo:

2 Albañiles + 1 Operario (Retroexcavadora) + 1 Chofer (Auto-tren cama baja)

Jornada = 8 horas

Trabajo por jornada: 480 m²

Rendimiento $\left(\frac{\text{unidad}}{\text{hora}}\right) = \frac{\text{Trabajo por jornada}}{\text{Jornada}}$

$$R = \frac{480 \text{ m}^2}{8 \text{ horas}}$$

$$R = 60 \frac{\text{m}^2}{\text{horas}}$$

$$k = \left(\frac{\text{hora}}{\text{unidad}}\right)$$

$$k = \frac{1}{60 \frac{\text{m}^2}{\text{horas}}}$$

$$k = 0,01667 \frac{\text{hora}}{\text{m}^2}$$

Conclusiones

- En conclusión, el proceso de creación del nuevo adoquín se lo realizó mediante la variación de las dosificaciones de polímero, arena y cemento que resultó en un conjunto de resultados insatisfactorios. A pesar de los esfuerzos realizados para optimizar la composición, ninguno de los cuatro ensayos de tracción indirecta logró alcanzar el valor mínimo esperado de resistencia de 3.6 MPA. El rendimiento más alto registrado, con una resistencia de apenas 0.664 MPA, señala la necesidad de una revisión profunda en la formulación y el proceso de fabricación para cumplir con los estándares requeridos. Por lo que se tomó la decisión de usar un mortero epóxico para la realización de los adoquines.

- La selección de la granulometría para el adoquín de arena confinada fue cuidadosamente considerada al optar por un tamaño de partícula equivalente a un tercio del tamaño de la abertura de la estructura interna del cartón. Esta elección sugiere una planificación precisa para maximizar la cantidad de arena confinada dentro del cartón. Al adoptar esta relación específica entre el tamaño de partícula y la abertura del cartón, se busca lograr una cohesión óptima y una distribución uniforme de la arena dentro de la matriz, lo que produce la densificación de la arena dentro de la misma.
- La proporción de 1:2 en la dosificación de resina epóxica junto con agregado fino se ha demostrado como un equilibrio óptimo, ya que mantiene una consistencia fácilmente manejable durante el proceso de vertido en los moldes. Esta relación logra evitar la excesiva sequedad que podría resultar en la presencia de huecos no deseados en el molde, así como también previene una fluidez excesiva que podría llevar a la separación de los componentes. Además de su efecto en la trabajabilidad, esta proporción ofrece el beneficio adicional de optimizar el uso de la resina epóxica, lo que resulta en un uso más eficiente de este material.
- La implementación de una geomalla como base para la creación de una plancha de adoquines ofrece una solución ingeniosa y efectiva para lograr un pavimento articulado uniforme y resistente. La colocación de la geomalla bajo los adoquines garantiza la conformación de un medio continuo estructural del elemento, que aporta notables ventajas mecánicas. Los beneficios de incorporar una geomalla en un pavimento articulado son múltiples. En primer lugar, la geomalla actúa como un refuerzo que distribuye las cargas de tránsito de manera más uniforme sobre el suelo, reduciendo así la concentración de esfuerzos en puntos específicos y minimizando el riesgo de deformaciones y hundimientos. Además, la geomalla refuerza la capacidad de interbloqueo entre los adoquines, contribuyendo a mantener la integridad de la

superficie y previniendo el movimiento y desplazamiento individual de las unidades en respuesta a las fuerzas de tracción y compresión generadas por el tráfico vehicular.

- Como conclusión acerca de los resultados de los ensayos realizados se tiene que el adoquín de arena confinada con recubrimiento de resina epoxi ha demostrado un rendimiento excepcional en varias pruebas clave. En cuanto a la resistencia a la tracción indirecta, el adoquín alcanzó y superó la resistencia mínima esperada de 3.6 MPA, logrando una marca de 3.69 MPA. Este resultado subraya su capacidad para soportar cargas y tensiones de manera efectiva. En términos de absorción de agua, el adoquín también exhibe un buen rendimiento, con un promedio de absorción del 2.58%, muy por debajo del límite máximo del 6% establecido por la norma NTE INEN 3040. Esto indica su habilidad para resistir la penetración de humedad y preservar su integridad con el tiempo. Finalmente, en el ensayo de abrasión, el adoquín demuestra una alta resistencia al desgaste al registrar un promedio de huella de 17mm, por debajo del límite máximo de 23mm establecido por la norma. Esta característica asegura su durabilidad en condiciones de tráfico y desgaste continuo.
- En conclusión, los ensayos realizados en el adoquín revelaron un módulo de elasticidad de 177537,92 Kg/cm² y un coeficiente de Poisson de 0.061. Estos valores son indicativos de importantes propiedades mecánicas del material. El módulo de elasticidad refleja la rigidez y la capacidad del adoquín para resistir deformaciones bajo carga. Un valor más alto sugiere una mayor resistencia a la deformación, lo que significa que el adoquín tiende a mantener su forma original incluso bajo cargas significativas. Esto es fundamental para la durabilidad y la estabilidad de las estructuras pavimentadas, ya que contribuye a minimizar hundimientos y deformaciones permanentes. Por otro lado, el coeficiente de Poisson se relaciona con la capacidad del material para cambiar su forma en respuesta a una carga aplicada. Un valor bajo, como en este caso (0.061), indica que el adoquín tiene una baja tendencia a expandirse lateralmente cuando se somete a

una carga axial. En otras palabras, el material experimenta una mayor contracción en la dirección perpendicular a la carga, lo que también contribuye a su capacidad para mantener la forma y resistir deformaciones no deseadas. En resumen, los valores de módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson obtenidos en los ensayos sugieren que el adoquín posee una sólida resistencia a la deformación y una capacidad eficiente para mantener su forma y estructura bajo condiciones de carga.

- En resumen, la utilización del software PLAXIS para simular el comportamiento del adoquín bajo cargas reveló información valiosa sobre su respuesta estructural. Los resultados indican que la capa de rodadura experimenta una deformación vertical de 4.86 mm, lo que sugiere una cierta capacidad de absorción y adaptación a las cargas aplicadas. Además, se observó una deformación horizontal de 0.63 mm, lo que resalta la resistencia del adoquín a desplazamientos laterales bajo carga. Estos datos de deformación proporcionan una visión más clara de cómo el adoquín se comporta en condiciones de carga y cómo distribuye y responde a las fuerzas aplicadas. Estos hallazgos son esenciales para garantizar que el adoquín sea capaz de resistir y adaptarse a las tensiones del tráfico vehicular, lo que a su vez contribuye a la durabilidad y funcionalidad del pavimento en el tiempo.

Recomendaciones

- Se recomienda realizar una exploración exhaustiva de las diversas posibilidades de materiales alternativos, con el propósito de realzar las propiedades del producto final. Mediante la investigación y la experimentación con resinas novedosas o aditivos innovadores, se abre una ventana de oportunidad para superar los resultados obtenidos hasta el momento con la resina epoxi utilizada (Epon 828 Epoxy Resin + cycloaliphatic), lo que podría generar notables mejoras en términos de rendimiento y eficiencia de costos.

- El empleo de materiales como el agregado grueso proveniente de la explotación de canteras plantea preocupaciones significativas desde la perspectiva ambiental. El proceso de obtención de permisos para la explotación de minas se ha vuelto cada vez más complejo debido a los efectos negativos que esta actividad causa en el entorno ambiental. En vista de estas consideraciones, es altamente recomendable que se busquen y se adopten materiales alternativos en el ámbito de la construcción, como lo ejemplifica en este trabajo de investigación.
- Dado que el mortero epóxico puede poseer propiedades que reduzcan la necesidad de mantenimiento, esto conlleva a una menor generación de residuos ocasionados por la erosión. Asimismo, al requerir un menor mantenimiento, se disminuye la fabricación de nuevos adoquines destinados a reemplazar los deteriorados. Considerando estos beneficios ambientales, sería altamente recomendable llevar a cabo un análisis para determinar la magnitud de la reducción del impacto ambiental de estos adoquines a lo largo de su ciclo de vida. Este análisis permitiría cuantificar y evaluar con mayor precisión la contribución positiva de los adoquines con mortero epóxico en la reducción de desperdicios, energía y recursos, fomentando así decisiones más sostenibles en la planificación de proyectos de pavimentación.
- Para una elección efectiva de geomallas en la colocación de adoquines, se recomienda adaptar la selección de geomalla (uniaxial, biaxial o triaxial) según la estabilidad del suelo y la dirección del tráfico. Utilizar geomallas uniaxiales en suelos estables y carriles unidireccionales, geomallas biaxiales en suelos menos estables y carriles bidireccionales, y reservar las geomallas triaxiales para situaciones con suelos muy arcillosos, cargas complejas o variables, como intersecciones viales. Esta consideración estratégica optimizará el rendimiento y la durabilidad del pavimento.

- Además de las pruebas realizadas en este estudio, se podría considerar una evaluación a largo plazo de la resistencia y durabilidad del adoquín bajo condiciones reales de tráfico y clima. Esta investigación prolongada podría proporcionar una comprensión más sólida de cómo el adoquín de arena confinada se comporta en el tiempo y cómo mantiene sus propiedades mecánicas a medida que se enfrenta a factores externos.
- Se sugiere llevar a cabo investigaciones adicionales que exploren como el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson del adoquín pueden influir en el rendimiento a largo plazo de los pavimentos y estructuras construidas con adoquines.

En este sentido, podrías considerar realizar análisis comparativos entre el adoquín desarrollado y otros materiales de pavimentación convencionales en términos de su capacidad para resistir deformaciones y mantener la integridad estructural.

- Considerando los resultados obtenidos de las deformaciones provocadas en el adoquín mediante la simulación en el software PLAXIS se sugiere llevar a cabo un ensayo experimental para corroborar y validar las predicciones de la simulación. Para lograr esto, se podría planificar un ensayo de carga con placa que permita aplicar cargas controladas sobre el adoquín y medir directamente los desplazamientos y deformaciones resultantes. Este ensayo experimental no solo proporcionaría una oportunidad para comparar los resultados obtenidos de la simulación con datos empíricos, sino que también permitiría evaluar la precisión y confiabilidad de la simulación en la representación del comportamiento del adoquín bajo cargas reales.

Bibliografía

American Concrete Institute. (2015). *ACI 318-14*. Farmington Hills.

Bagheri, R., Marouf, B., & Pearson, R. (2009). *Rubber-Toughened Epoxies: A Critical Review*.

Bhatnagar, S. (1996). *EPO ESINS "Overview"*.

- Cabezas, M. (2014). *ELABORACIÓN DE UN MANUAL DE PROCESOS CONSTRUCTIVOS DEL ADOQUINADO*. Quito.
- Cárdenas, J., & Guncay, A. (2023). *ANÁLISIS DE PARÁMETROS MECÁNICOS Y DISEÑO DE ADOQUINES FABRICADOS A PARTIR DE RESIDUOS TRITURADOS DE CAUCHO OBTENIDO DE NEUMÁTICOS RECICLADOS*. Cuenca.
- Carlos, H., & Pacheco, Ó. (2010). *PATOLOGÍA DE PAVIMENTOS ARTICULADOS*. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*.
- Chaluiza, Á. (2012). *RELACIONES DE COMPRESIÓN Y TENSIÓN EN ADOQUINES RELACIONES DE COMPRESIÓN Y TENSIÓN EN ADOQUINES DE PESILLO, UBICADA EN EL CANTÓN CAYAMBE, PROVINCIA DE PICHINCHA*. Quito.
- CIMENTEST. (2014). *ESTUDIO DE MECÁNICA DE SUELOS EDIFICIO HIKARI*. Quito.
- Díaz, Y., & López, E. (2008). *PLAXIS COMO HERRAMIENTA DE MODELACIÓN PARA LA SOLUCIÓN DE ALGUNOS PROBLEMAS GEOTÉCNICOS REALES EN LA CIUDAD DE PUNTA ARENAS*. Punta Arenas.
- Dodiuk, H., & Goodman, S. (2014). *Handbook of Thermoset Plastics*.
- Echeverry, C., & Bohórquez, U. (s.f.). *MORTEROS EPOXICOS*.
- Egas, R., & Perez, C. (2016). *DISEÑO Y ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA MODULAR PARA CONFORMACIÓN DE MUEBLES DE OFICINA A BASE DE CARTÓN CORRUGADO*. Sangolquí.
- EMASEO. (2018). *ÍNDICES DE GESTIÓN - Diciembre 2018*.
- finesoftware. (s.f.). *Rigidez axial de los geosintéticos*. Obtenido de <https://www.finesoftware.es/ayuda-en-linea/geo5/es/rigidez-axial-de-los-geosinteticos-01/>
- Foix, D., Ramis, X., Ferrando, F., & Serra, A. (2012). *Improvement of epoxy thermosets using a thiol-ene based polyester hyperbranched polymer as modifier*.

- Galvan, M. (2014). *ANÁLISIS DE LA TRANSMISIÓN DE VIBRACIONES ORIGINADAS EN TÚNELES UTILIZANDO EL PROGRAMA PLAXIS*.
- Guijarro, P. (2020). *EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL USO DE PAPEL Y CARTÓN RECICLABLE DE HOGARES DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO COMO MÉTODO DE INSONORIZACIÓN DE RUIDO AMBIENTAL A TRAVÉS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES*. Quito.
- Hernández, Y. (2018). *PAVIMENTOS DE ADOQUINES DE CONCRETO UNA SOLUCION AMBIENTAL EN LA CONSTRUCCIÓN DE INFRAESTRUCTURA VIAL COLOMBIANA*. Bogotá.
- HEXION. (2005). *Technical Data Bulletin EPON™ Resin 828*.
- Holcim. (s.f.). *FICHA TECNICA AGREGADO FINOS*. Guayaquil.
- INEC. (2018). *Boletín técnico N°-01-2019-ESPND*.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. ((2011a). *Norma Técnica Ecuatoriana, NTE INEN 696, Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso*.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010a). *Norma Técnica Ecuatoriana, NTE INEN 856, Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino*.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010c). *Norma Técnica Ecuatoriana, NTE INEN 858, Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos*.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011b). *Norma Técnica Ecuatoriana, NTE INEN 862, Áridos para hormigón. Determinación del contenido de humedad*.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011c). *Norma Técnica Ecuatoriana, NTE INEN 872 Áridos para hormigón. Requisitos*.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011d). *Norma Técnica Ecuatoriana, NTE INEN 3040, Adoquines de hormigón. Requisitos y métodos de ensayo*.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2016). *ADOQUINES DE HORMIGÓN. REQUISITOS Y METODOS DE ENSAYO.*

La Hora. (2018). *Quito recicla el 1% del 100% de basura que se genera cada día.* Obtenido de <https://www.lahora.com.ec/noticias/quito-recicla-el-1-del-100-de-basura-que-se-genera-cada-dia/#:~:text=Esto%20quiere%20decir%20que%20si,del%20total%20de%20basura%20p>roducida.

MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS DEL ECUADOR. (2013). *LIBRO A NORMA PARA ESTUDIOS Y DISEÑOS VIALES.*

Ministerio de Vivienda. (2006). *Código Técnico de la Edificación.*

Miranda, E. (2019). *DISEÑO DE UNA BASE GRANULAR REFORZADA CON GEOMALLA BIAXIAL; PARA OPTIMIZAR LA CALIDAD EN LA CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS FLEXIBLES, LA LIBERTAD.* Trujillo.

Montiel, J. (2017). *USO DE AGREGADOS RECICLADOS PARA LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES QUE SE PUEDAN UTILIZAR EN LA PAVIMENTACIÓN DE CALLES, AVENIDAS Y PASOS PEATONALES.* Ciudad de México.

NTE INEN. (1986). *ADOQUINES, TERMINOLOGÍA Y CLASIFICACIÓN. Normativa Ecuatoriana.*

NTE INEN. (2016). *ADOQUINES DE HORMIGÓN. REQUISITOS Y MÉTODOS DE ENSAYO. NORMA TÉCNICA ECUATORIANA.*

Pariguamán, A. (2017). *CORRELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ADOQUINES ECOLÓGICOS FABRICADOS CON AGREGADOS RECICLADOS Y ADOQUINES CONVENCIONALES.* Quito.

PIVALTEC. (s.f.). *GEOMALLAS.* Obtenido de <https://www.geosinteticos.com/geomallas/>

Redondo, D. (2020). *PROPUESTA METODOLÓGICA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS DE ADOQUÍN CONVENCIONAL.* San José.

Salguero, V. (2013). *ADOQUINES MODIFICADOS CON FIBRA DE POLIPROPILENO PARA EL USO EN VIAS DE LA CIUDAD DE QUITO*. Quito.

Sánchez, D., Chiliquina, J., Flores, E., & Orosco, M. (2020). *Módulo Estático de Elasticidad del Hormigón Fabricado con Agregados de la Mina de San Roque, Imbabura, Ecuador*.

Soiltorock. (s.f.). *Soiltorock*. Obtenido de <http://soiltorock.com/>

Stavoblock. (2016). *DLAŽBA PRO PARKOVACÍ A ODSTAVNÉ PLOCHY*. Obtenido de <https://www.stavoblock.cz/dlazba-pro-parkovaci-a-odstavne-plochy>

tecnocarreteras. (2012). *Una máquina para adoquinar automáticamente las calles*. Obtenido de <https://www.tecnocarreteras.es/2012/11/18/una-maquina-para-adoquinar-automaticamente-las-calles/>

Tensar. (s.f.). *Carreteras, Pavimentos & Superficies*. Obtenido de <https://www.tensarcorp.com/es-mx/aplicaciones/carreteras-pavimentos-superficies>

Wavin. (s.f.). *Diseño de Infraestructura con Geosintéticos*.

Apéndices