



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



**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

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

**Tutor:** Ing. Byron Morales Muñoz, Msc

**Autores:** Amoroso Guzmán Matías Fernando  
Araujo Falcón Carlos Andres  
Calderón Chiriboga Johann Sebastian

Sangolquí, 29 de agosto de 2023



# Tabla de Contenido

---

Introducción

Objetivos

Marco Teórico

Materiales y Métodos

Análisis de Resultados

Conclusiones y Recomendaciones





## ANTECEDENTES



Piedra

Madera



Arcilla

Hormigón





## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Fallas



Tiempo



Optimización

Innovación



Equilibrio con el  
Medio Ambiente



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA





## JUSTIFICACIÓN

### Contaminación cemento



### Mejorar geometría



### Reciclaje de cartón



### Mejorar costos





## ALCANCE DEL PROYECTO

A través de una investigación práctica, se está buscando desarrollar adoquines viales que cumplan con los requisitos establecidos por el INEN. 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 busca 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.

## 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.





## OBJETIVOS DEL PROYECTO

### 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

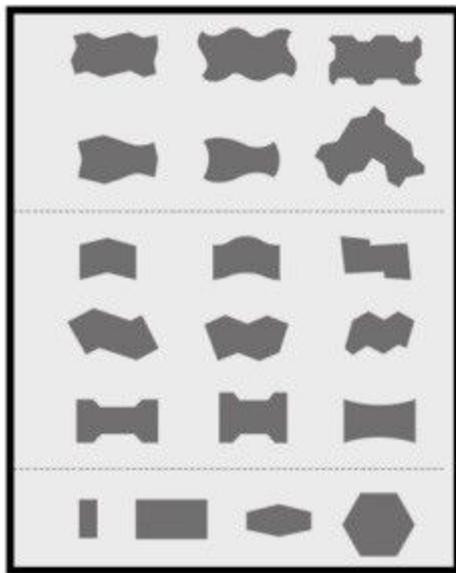
- Determinar las características físicas, químicas y mecánicas de los materiales.
- Determinar la geometría del módulo pavimento articulado.
- Diseño y determinación del espesor del módulo pavimento articulado.





## ADOQUINES

ADOQUINES  
TIPO A



ADOQUINES  
TIPO B



ADOQUINES  
TIPO C



NTE INEN 3040 ADOQUINES DE HORMIGÓN.  
REQUISITOS Y MÉTODOS DE ENSAYO

NTE INEN 1483 TERMINOLOGÍA Y  
CLASIFICACIÓN



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA





## AGLUTINANTE - CARTÓN

### POLÍMERO



EMULSIÓN DE ESTIRENO-ACRÍLICO  
MODIFICADO CON SILICIO

### RESINA





## OBTENCIÓN MATERIA

### Polímero



### HEXION



EPÓXICA + CYCLOALIPHATIC

### Cartón reciclado



**Planta de  
agregados de  
Holcim**



## CARACTERIZACIÓN ARENA

<b>Granulometría</b>	NTE INEN 696	3,32 Arena Gruesa
<b>Contenido De Humedad</b>	NTE INEN 862	2,79%
<b>Densidad Relativa Aparente (gravedad específica aparente)</b>	NTE INEN 856	2,49 g/cm <sup>3</sup>
<b>Densidad Relativa (gravedad específica) (SSS)</b>		2,55 g/cm <sup>3</sup>
<b>Densidad Relativa (gravedad específica)</b>		2,65 g/cm <sup>3</sup>
<b>Absorción</b>		2,58 %
<b>Densidad suelta (g/cm<sup>3</sup>)</b>	NTE INEN 858	1,49 g/cm <sup>3</sup>
<b>Densidad Varillada (g/cm<sup>3</sup>)</b>		1,72 g/cm <sup>3</sup>
<b>Porcentaje de Vacíos</b>		1,37 %

Esfericidad ↓	Muy angular	Angular	Subangular	Redondeada	Redonda	
0,9						Muy esférica
0,7						Esférica
0,5						Semiesférica
0,3						Poco esférica
Redondez →	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	

Aptos para fundición



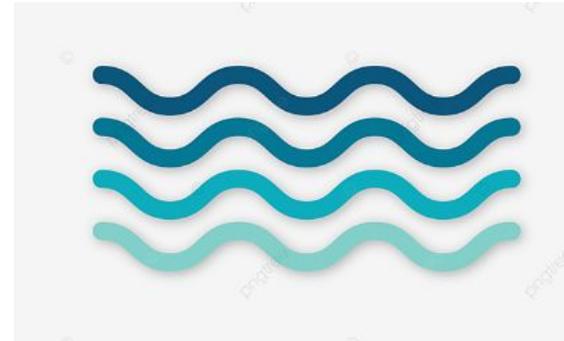


## GEOMETRÍA DEL CARTÓN



Con su estructura corrugada de canaletas y crestas, permite que el material sea más resistente a la flexión y la compresión

### Forma de parábola





## DOSIFICACIÓN

### Dosificación con Polímero emulsión de estireno-acrílico modificado con silicio

5% de polímero  
5% de agua  
5% de cemento

7% de polímero  
7% de agua  
10% de cemento

10% de polímero  
10% de agua  
10% de cemento

10% de polímero  
10% de agua  
7% de cemento





## ELABORACIÓN

### Elaboración de Probetas con Polímero emulsión de estireno-acrílico modificado con silicio



Probetas utilizando cartón prensado

**Dimensiones:** 10 cm x 10 cm x 4 cm

En la elaboración de las probetas surgieron dificultades al momento del llenado uniforme de las celdas del cartón ya que mezcla resultaba bastante espesa y granulosa.



## DOSIFICACIÓN

### Dosificación con Resina Epóxica

Con el objetivo de optimizar su cantidad decidimos mezclar la resina con la misma arena que se utilizó en el llenado del cartón prensado.

Se determinó que la mejor proporción en volumen de resina: arena es 1:3 y 1:2.

- 1:3 → Adecuada para juntas debido a su menor fluidez
- 1:2 → Mayor manejabilidad a la hora de elaborar las probetas.

(Echeverry & Bohórquez)

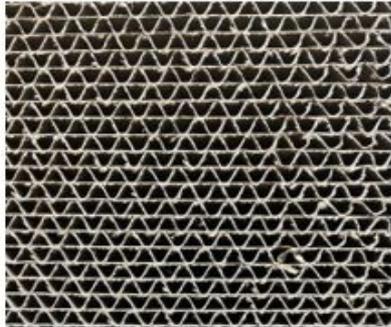




## ELABORACIÓN

### Elaboración de Probetas con Resina Epóxica

El cartón prensado cumple una función esencial como contenedor para la arena tamizada, empezando a partir del tamiz #16,



Combinación de resina y endurecedor 2:1

Se incorporan el árido fino hasta obtener una mezcla fluida y homogénea.



Desenfofrado de probetas de adoquín con resina



Adoquines desmoldados



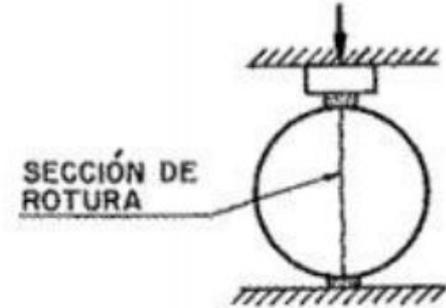


## ENSAYOS

### Tracción Indirecta -NTE INEN 3040. Anexo E

#### Tracción Indirecta para Probetas 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



#### Tracción Indirecta para Probetas con Resina Epóxica

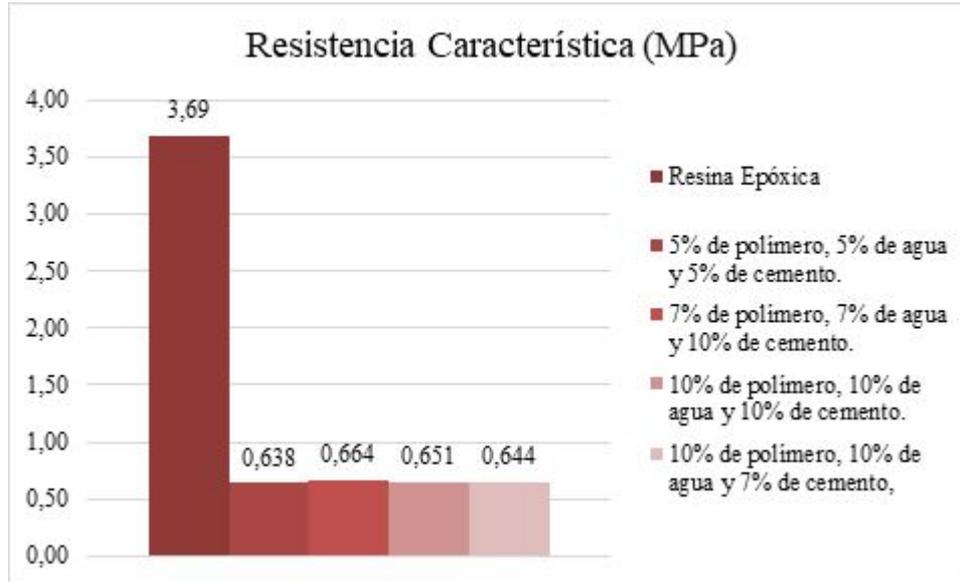
Tipo de Mezcla	Resistencia Característica (Mpa)
Resina Epóxica	3,69





## ENSAYOS

### Tracción Indirecta -NTE INEN 3040. Anexo E



Se evidencia que al sustituir el polímero por la resina epóxica en la fabricación de las probetas, se incrementa.

Esto indica que la resistencia característica es de 3,69 MPa, superando el valor indicado por la norma de 3,60 MPa.





## ENSAYOS

### Índice de Absorción del Agua -NTE INEN 3040 Anexo D

1. Se tomo 4 muestras de adoquín.
2. Limpieza minuciosa.
3. Posteriormente se sumerge en agua durante un mínimo de 3 días.
4. Luego, se los retiró del agua y se procedió a secarlos y se registró su peso.
5. Se colocó en el horno a  $105 \pm 5$  °C por un mínimo de 3 días.
6. Se retiran del horno y se registra su peso.

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

#### Resultados de índice de absorción de agua para adoquines con resina

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





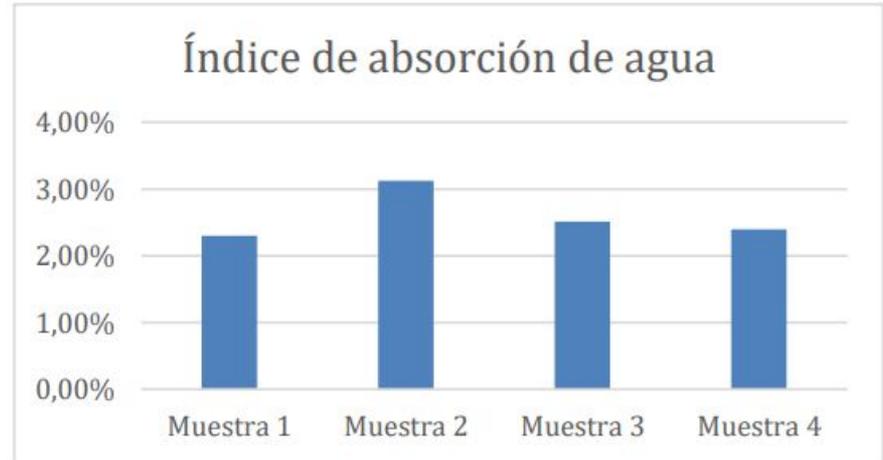
## ENSAYOS

### Índice de Absorción del Agua -NTE INEN 3040 Anexo D

Los adoquines ensayados deben presentar un índice de absorción inferior o igual al 6 %.

En este caso las muestras cumplen con la normativa siendo su porcentaje de absorción menor a 6% en las cuatro muestras ensayadas

**Índice de absorción que presentaron las 4 muestras ensayadas.**




**ENSAYOS**
**Resistencia a la abrasión -NTE INEN 3040 Anexo F**

**Resultados del ensayo de resistencia a la abrasión**

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



## ENSAYOS

**Resistencia a la abrasión -NTE INEN 3040 Anexo F**

**Resistencia a la Abrasión que presentaron las 4 muestras ensayadas.**

Todas las muestras de adoquín 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.



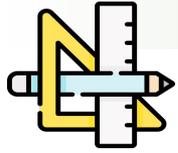


## ENSAYOS

### Resumen de resultados de ensayos

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

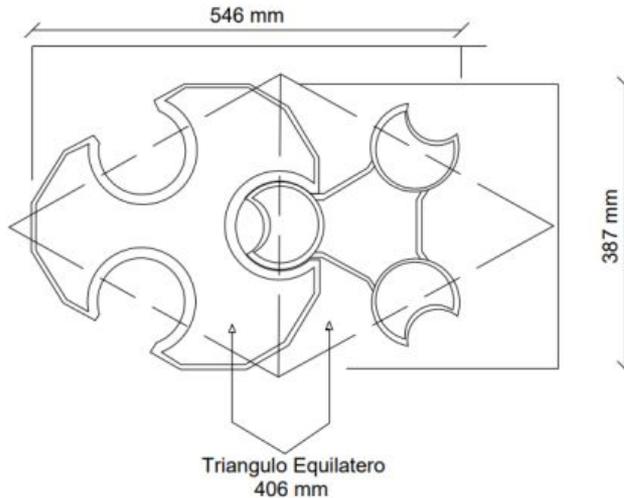




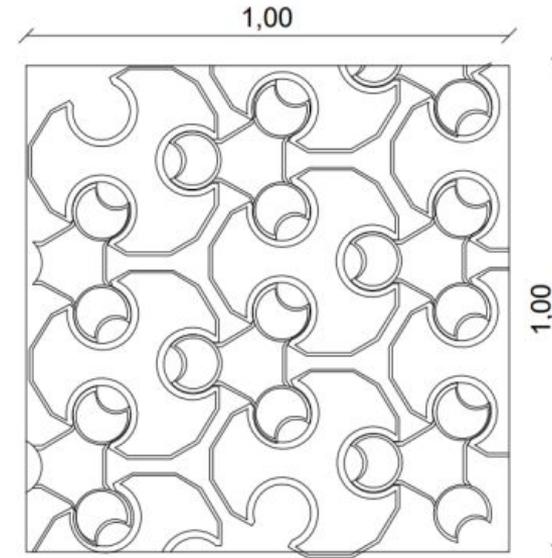
## GEOMETRÍA

### Propuesta de geometría del adoquín

Adoquín basado en el sistema tri-lock surge geoméricamente de un rombo.



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





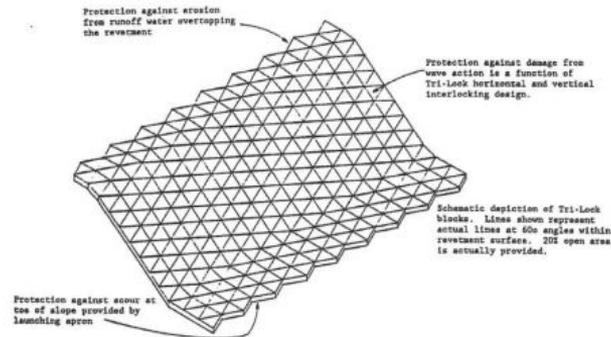
## GEOMETRÍA

### Propuesta de geometría del adoquín

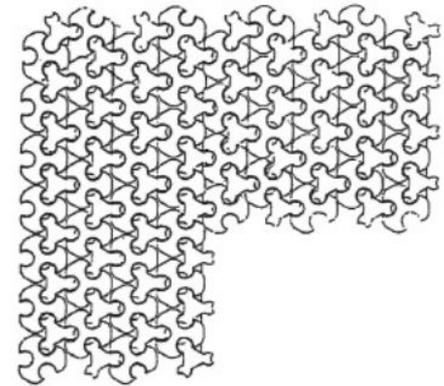
Además de cumplir su trabajo de soportar cargas, logran ser complemento decorativo.



Este sistema puede adaptarse a terrenos irregulares. Su forma recibe el nombre de "tri-lock" debido a sus tres lados hembra y tres lados macho.

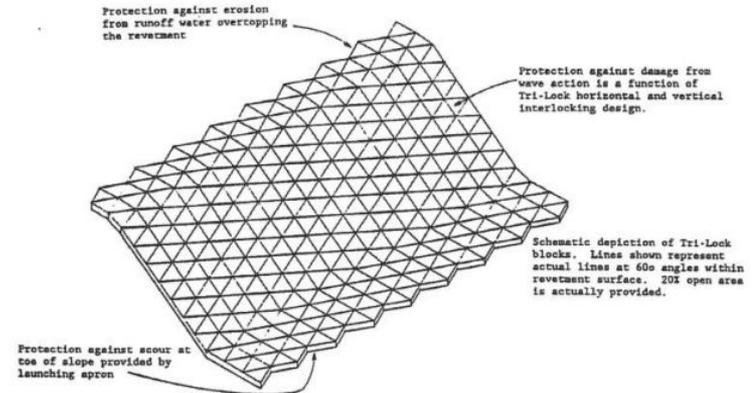


Este diseño permite un acoplamiento seguro entre las piezas adyacentes, evitando movimientos laterales y asegurando la integridad de la capa de rodadura.



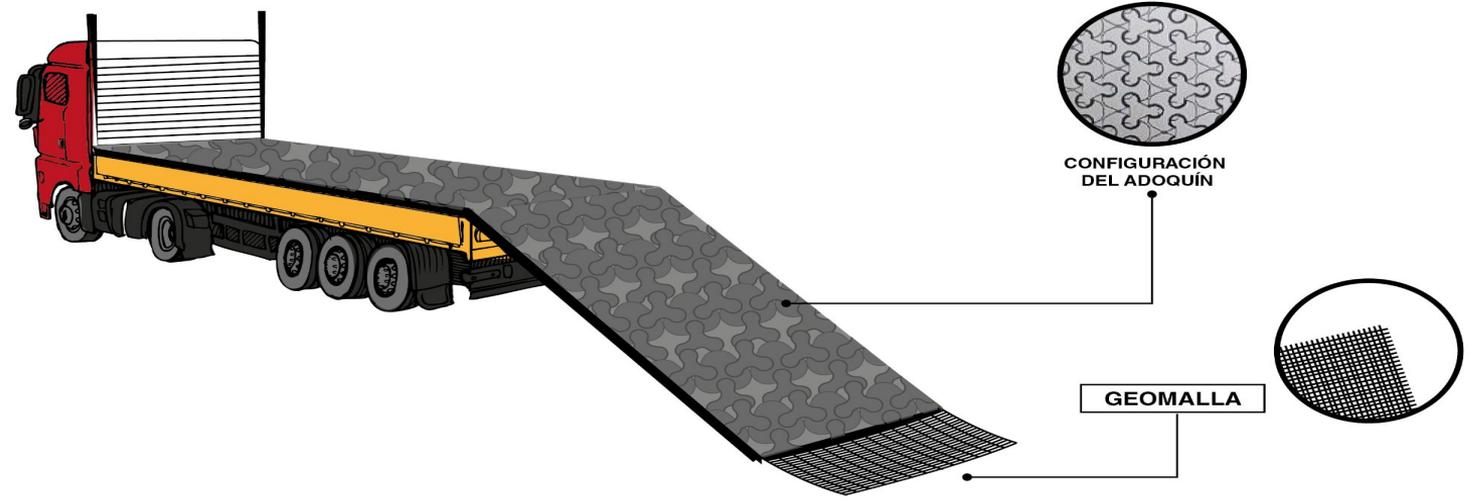


## PROPUESTA DE INSTALACIÓN



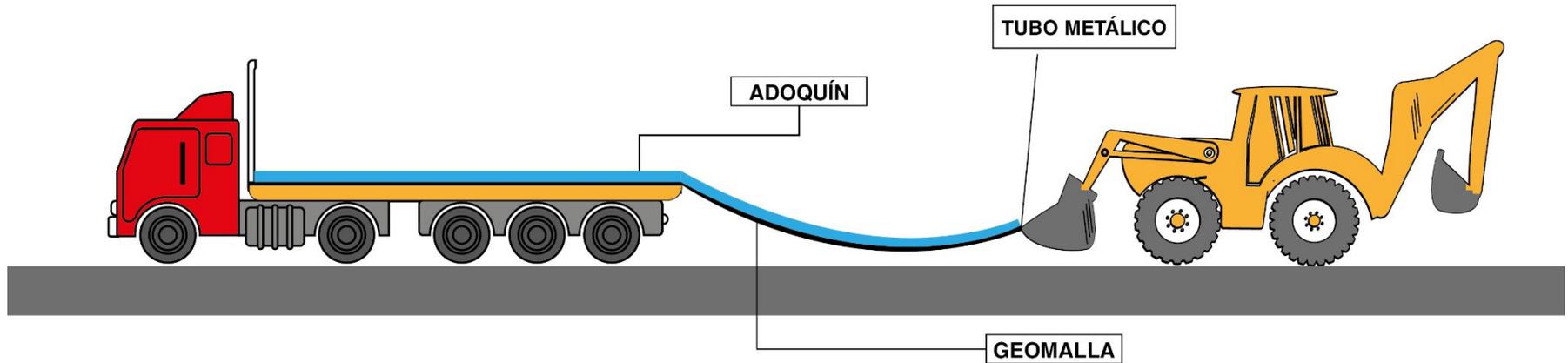


# PROPUESTA DE INSTALACIÓN



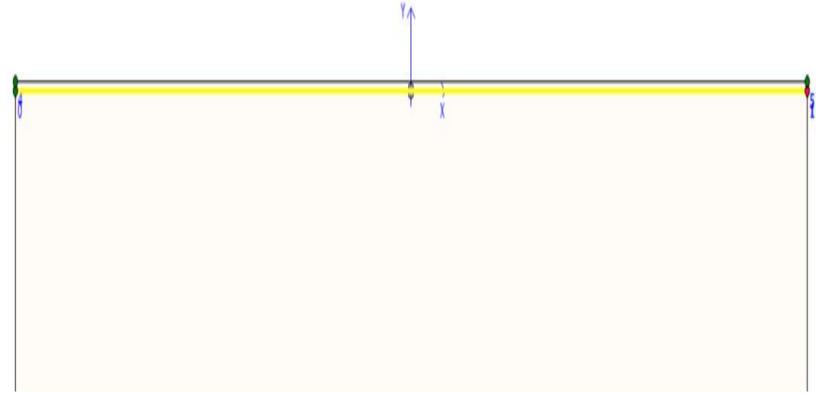
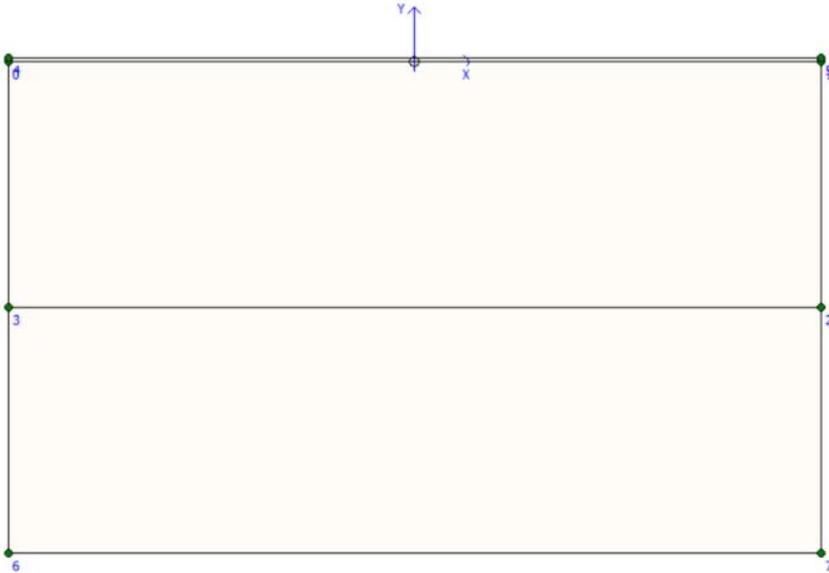


## PROPUESTA DE INSTALACIÓN





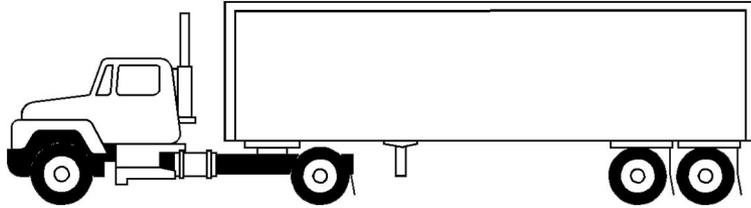
## Plataforma de análisis





PLAXIS

Vehículo tipo 2S2



Propiedades mecánicas del adoquín

Linear Elastic - PAVIMENTO ARTICULADO

General		Parameters		Interfaces	
<b>Stiffness</b>					
$E_{ref}$ :	1,741E+09	kN/m <sup>2</sup>			
$\nu$ (nu) :	0,061				
<b>Alternatives</b>					
$G_{ref}$ :	8,205E+08	kN/m <sup>2</sup>			
$E_{oed}$ :	1,755E+09	kN/m <sup>2</sup>			
<b>Velocities</b>					
$V_s$ :	2,30E4	m/s			
$V_p$ :	3,369E4	m/s			
Advanced...					
		SoilTest		Next OK Cancel	



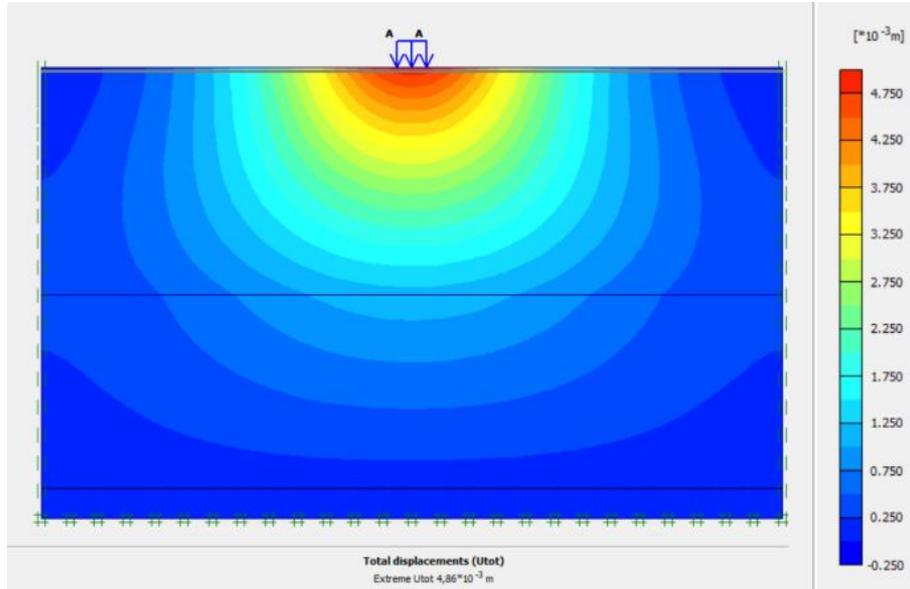
**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



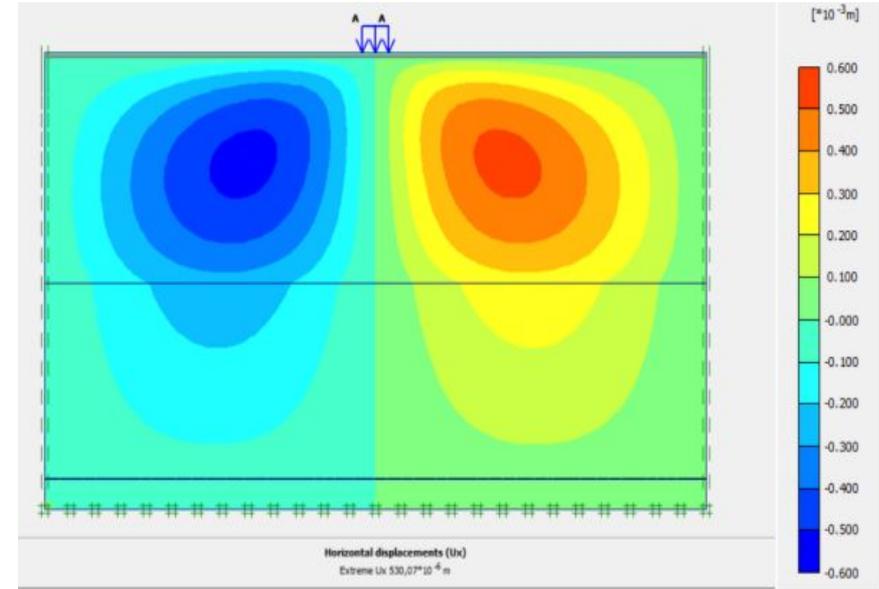


PLAXIS

## Deformaciones totales



## Deformaciones horizontales





RUBRO: ELABORACIÓN ADOQUÍN CON AGLOMERANTE DE RESINA IMPORTACIÓN 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
<b>TOTAL</b>					<b>0,00</b>

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
<b>TOTAL</b>					<b>0,65</b>

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
<b>TOTAL</b>				<b>20,85</b>

D: TRANSPORTE				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO
		A	B	C = A x B
<b>TOTAL:</b>				
<b>TOTAL COSTO DIRECTO</b>				<b>21,50</b>

RUBRO: COLOCACIÓN ADOQUÍN CON AGLOMERANTE DE RESINA IMPORTACION 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
<b>TOTAL</b>					<b>1,38</b>

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
<b>TOTAL</b>					<b>0,29</b>

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
<b>TOTAL</b>				<b>21,78</b>

D: TRANSPORTE				
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO
		A	B	C = A x B
<b>TOTAL:</b>				
<b>TOTAL COSTO DIRECTO</b>				<b>23,44</b>





## PRESUPUESTO REFERENCIAL

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	Subbase clase 3, 403-1. especific. mop-001-f2002, tendido, conformado y compactado sin transporte	m3	126,00	\$12,35	\$1.556,10
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 <sub>c</sub> =350kg/cm <sup>2</sup> 401-4(1) especificaciones mop-001-f20002, capa de arena e=6cm.	m2	640,00	\$22,40	\$14.336,00
9	berma de h.s. f <sub>c</sub> =210 kg/mc <sup>2</sup> . 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
<b>TOTAL=</b>				<b>\$21.518,89</b>	

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	TRANSPORTE DE MATERIAL DE 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
5	TRANSPORTE DE RELLENO CON GRAVA A LA OBRA	m3 - km	400,00	\$0,30	\$120,00
6	COLOCACIÓN ADOQUÍN CON AGLOMERANTE DE RESINA IMPORTACION DIRECTA	m2	640,00	\$23,44	\$15.001,60
8	COLOCACIÓN GEOMALLA	m2	640,00	\$3,00	\$1.920,00
9	BERMA DE H.S. f <sub>c</sub> =210 kg/mc <sup>2</sup> . 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-001F 2002- INCLUYE EXCAVACIÓN	u	4,00	\$306,54	\$1.226,16
12	PINTURA DE TRAFICO PARA SEÑALIZACION BORDILLOS	m	210,00	\$2,57	\$539,70
<b>TOTAL=</b>				<b>\$20.098,19</b>	





## CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES



- La granulometría de la arena 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
- 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
- Implementación de la geomalla



- Ensayos Tracción indirecta - Abrasión - Absorción

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

- Los ensayos realizados en el adoquín revelaron un módulo de elasticidad de 177537,92 Kg/cm<sup>2</sup> y un coeficiente de Poisson de 0,061.
- Simulación software PLAXIS 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



Exploración de nuevos materiales



Impacto ambiental



Polímeros Plásticos



Investigación a futuro