



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**Mejoramiento de suelos de NAICM usando Óxido de Calcio**

**T E S I N A**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**ESPECIALISTA EN GEOTECNIA**

PRESENTA:

**ING. JOSÉ LUIS QUINTANA LÓPEZ**

DIRECTOR DE TESINA: M. EN I. AGUSTÍN DEMENEGHI COLINA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX

MAYO 2017

Ciudad de México, mayo de 2017

# FACULTAD DE INGENIERÍA

## UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Tesina sobre

# Mejoramiento de suelos del NAICM usando óxido de calcio

para obtener el grado de Ingeniero Especialista en Geotecnia



Elabora:

Ing. José Luis Quintana López

Dirigen

Dr. Enrique Santoyo Villa

M. en I. Agustín Demeneghi Colina



A la ejemplar memoria de los Ingenieros

**Enrique Santoyo Villa †**

**José Antonio Segovia Pacheco †**

En agradecimiento por sus enseñanzas y apoyo.



## Índice

<b>1. Resumen General</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivo</b>	<b>1</b>
<b>3. Antecedentes</b>	<b>1</b>
3.1. <i>Proyecto del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México</i>	1
3.2. <i>Naturaleza de los Suelos del NAICM</i>	2
<b>4. Problemática de los suelos del NAICM</b>	<b>3</b>
<b>5. Marco Teórico</b>	<b>4</b>
5.1. <i>Pavimentos flexibles</i>	4
5.2. <i>Mecanismo de los mejoramientos con Cal</i>	6
<b>6. Descripción del mejoramiento realizado</b>	<b>9</b>
6.1. <i>Procedimiento constructivo implementado</i>	9
6.2. <i>Resultados obtenidos</i>	13
6.2.1. Resultados de laboratorio	13
6.2.2. Resultados de campo	21
6.2.3. Observaciones empíricas	26
<b>7. Análisis de resultados</b>	<b>29</b>
7.1. <i>Análisis referencial de los parámetros geomecánicos</i>	29
7.2. <i>Análisis de los procedimientos constructivos implementados</i>	33
7.3. <i>Análisis conjunto</i>	36
<b>8. Conclusiones del análisis</b>	<b>38</b>
<b>9. Recomendaciones</b>	<b>40</b>
9.1. <i>Recomendaciones técnicas</i>	40
9.2. <i>Recomendaciones constructivas</i>	41
9.2.1. Procedimiento constructivo recomendado	42
9.2.2. Protocolo de supervisión recomendado	43
<b>10. Referencias</b>	<b>44</b>
<b>Anexo 1</b>	
<b>Anexo 2</b>	



**Jurado Asignado:**

M. en I. Hugo Sergio Haaz Mora

M. en I. Agustín Demeneghi Colina

Ing. Roberto Sosa Garrido

M. en I. Aurelio Salazar Rodríguez

M. en I. Héctor Sanginés García



## **1. Resumen General.**

Con base en resultados de campo y laboratorio obtenidos en plataformas de pruebas donde se realizaron mejoramientos con de suelo con óxido de calcio (cal viva, CaO) se realiza un análisis para proponer algunas alternativas constructivas para caminos provisionales.

## **2. Objetivo**

El objetivo de este documento es proponer una alternativa constructiva de caminos de acceso temporales para la etapa de construcción del NAICM haciendo uso de un mejoramiento con óxido de calcio, y finalmente no sólo proponer un procedimiento constructivo más eficiente, sino también lograr sentar las bases para la ejecución de una supervisión que garantice la correcta ejecución de dicho procedimiento constructivo.

## **3. Antecedentes**

### ***3.1. Proyecto del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México***

El predio donde se pretende construir el NAICM se encuentra en la zona del Ex-lago de Texcoco, a 5 Km en línea recta del actual AICM (Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México), en dirección noroeste; tiene una superficie aproximada de 4,600 hectáreas y la tenencia de la tierra es federal. En la imagen 1 se muestra la ubicación del NAICM respecto al aeropuerto actual.

De acuerdo a lo referido por el Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México (GACM) en su página de internet, se proyecta que el NAICM inicie dando servicio a 68 millones de pasajeros al año (168 mil diarios) con una terminal de 743,000 m<sup>2</sup> de superficie, la cual contará con 68 posiciones y 95 puertas fijas para dar abasto a las 3 pistas (2 de uso civil y la otra para uso del gobierno federal).

Actualmente es el segundo aeropuerto más grande del mundo en etapa de construcción, durante la cual se estima un movimiento de 63 millones de metros cúbicos de tierra, lo cual equivale a más del doble de las plantas hidroeléctricas de Agua Milpa, La Yesca y El Cajón (las más grandes del país). Y a su conclusión será el primer aeropuerto con operaciones triple simultánea fuera de EEUU.

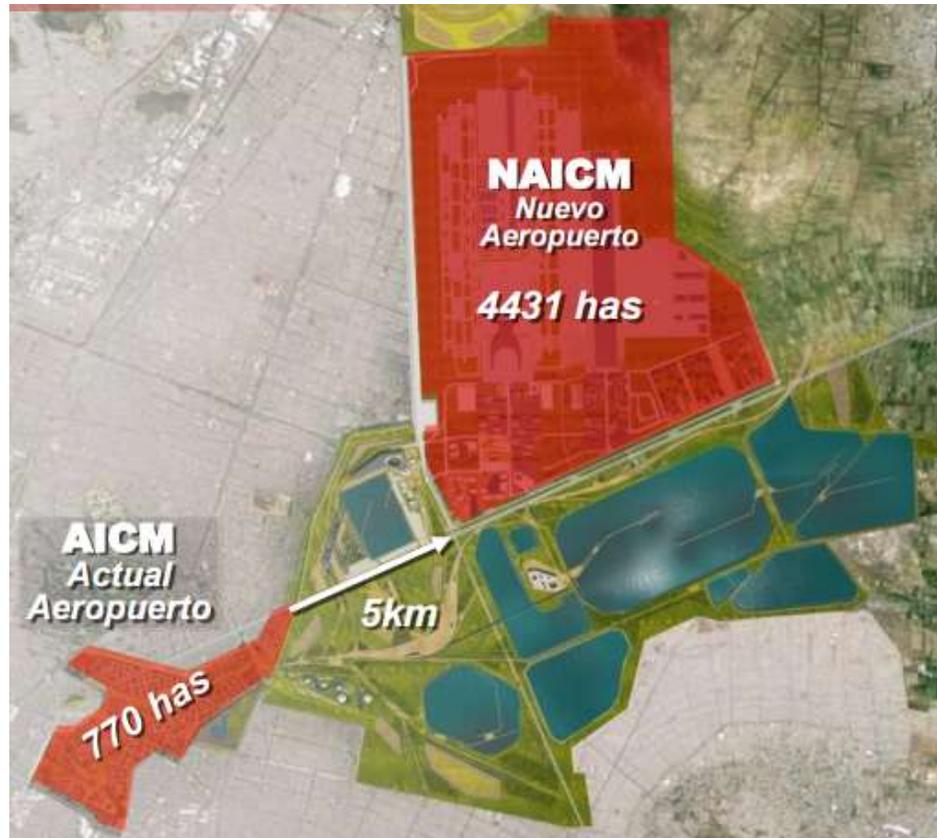


Imagen 1. Ubicación del NAICM (GACM, 2017).

Aparte de lo anterior, la construcción de este aeropuerto detonará más mega proyectos de infraestructura en la Ciudad de México, tales como la modernización de las áreas urbanas aledañas al NAICM, la transformación del actual Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México y el proyecto de interconexión entre el aeropuerto y la Ciudad de México.

### **3.2. Naturaleza de los suelos del Ex-lago de Texcoco**

La superficie que actualmente se define como el Ex-lago de Texcoco es la última porción virgen de lo que fue el Lago de Texcoco. Éste era el cuerpo hidrológico principal de la Cuenca del Valle de México, la cual está rodeada por un complejo sistema montañoso de origen volcánico, como lo describen Santoyo et al (2005).

Los eventos piroclásticos y la red de ríos que desembocaba en este antiguo lago fueron generando durante millones de años un subsuelo formado principalmente por arcillas con algunos lentes de arena y cenizas volcánicas, como menciona en la misma referencia (Santoyo et al, 2005).

Un análisis químico realizado a suelo del NAICM indica que tiene cloruros en disolución, que alcanzan las 42,200 ppm, así como sulfatos que

llegan a las 2,700 ppm. La composición química total obtenida se muestra en la tabla 1 a manera de porcentajes, respecto al total de óxidos.

Tabla 1. Contenido de Óxidos

Óxidos	%
SiO <sub>2</sub>	51.60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.08
Na <sub>2</sub> O	6.09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.38
MgO	5.28
Cl	3.00
<i>K<sub>2</sub>O</i>	<i>3.00</i>
CaO	1.97
TiO <sub>2</sub>	0.68
SO <sub>3</sub>	0.36

Dado que este tipo de suelos arcillosos son principalmente montmoriloníticos, lo cual implica una mayor superficie específica (superficie de contacto) de las partículas y que aparte, los minerales que los componen tienen cargas iónicas inferiores a la del ion de Calcio, es fácil suponer que estos suelos son candidatos para el mejoramiento con cal. En este caso Óxido de Calcio (CaO).

#### 4. Problemática de los Suelos de NAICM

La problemática de estos suelos estriba principalmente en la existencia de altas cantidades de agua dentro de la estructura de los suelos arcillosos y que la mineralogía de las arcillas hace que sus partículas sean muy pequeñas y consiguientemente tenga baja permeabilidad. La conjunción de estas dos condiciones deriva en que existan grandes deformaciones ante cargas relativamente bajas, tanto a corto como a largo plazo, ya que estos suelos nunca han experimentado cargas constantes.

A la par, la consistencia que se genera en las arcillas del Ex-lago de Texcoco implica condiciones de trabajo extremadamente difíciles para el

tránsito y uso de maquinaria de construcción, generándose condiciones como la mostrada en la imagen 2.



Imagen 2. Atasco de vehículo en el predio del NAICM.

Es común que las condiciones de trabajabilidad empeoren al remodelar la costra superficial –la cual tiene un espesor de hasta 70 cm– y los suelos blandos que subyacen a, ya que a partir de los 65 cm de profundidad se encuentra el Nivel de Aguas Freáticas (NAF), empeorando las condiciones geomecánicas de estos suelos.

## **5. Marco Teórico**

A continuación, se exponen los conceptos necesarios para la concepción de la solución planteada en este documento, describiendo un poco el mecanismo de los pavimentos flexibles y con mayor profundidad el efecto de la cal en las arcillas.

### ***5.1. Mecanismo de los pavimentos flexibles***

Los pavimentos flexibles (Imagen 3) utilizan la carpeta asfáltica para nivelar, impermeabilizar y generar la superficie de rodamiento, procurando que su rugosidad permita una buena conducción, mientras que la base y la sub-base son los elementos deben cumplir con la resistencia necesaria para soportar a las acciones que ejerce el rodamiento de los vehículos. Finalmente, la subrasante actúa como el soporte de la estructura de pavimento.

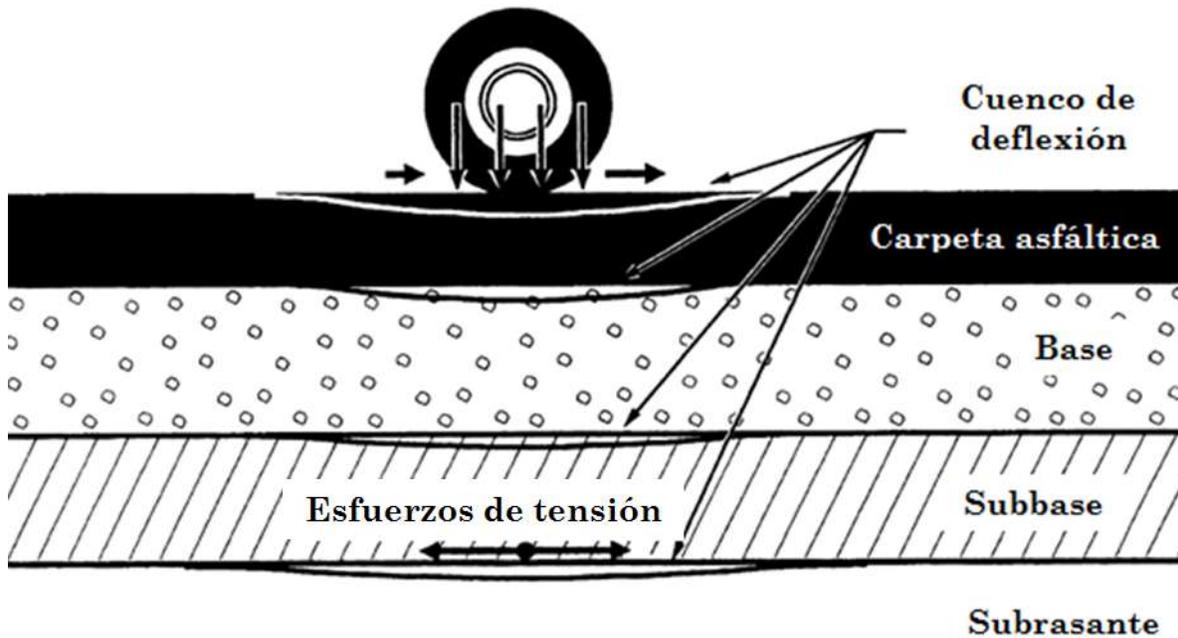


Imagen 3. Mecanismo típico de los pavimentos flexibles (Little, 1995).

De esta forma se entiende que el mejoramiento de la sub-base, y base en el caso de pavimentos flexibles, asegura un mejor desempeño a la estructura del pavimento y previene la falla por fatiga, debiendo ser el esfuerzo de tensión resistente al menos el doble del actuante.

Los criterios de diseño de pavimentos a los que se hace referencia en este documento son el del Instituto de Ingeniería de la UNAM y el criterio de la *American Association of State Highway and Transportation Official* (AASHTO).

El primero se basa en los informes 325 y 444 de dicho instituto y considera principalmente las propiedades geomecánicas de resistencia. Principalmente considera el Valor Relativo de Soporte (VRS). Los resultados obtenidos para este parámetro se muestran en la sección 6.2.1 de este documento.

El VRS puede se define como una relación entre el esfuerzo aplicado en un material al ser penetrado una pulgada con un vástago de dos pulgadas de diámetro con respecto a un esfuerzo de referencia igual a 70 Kg/cm<sup>2</sup>.

Adicionalmente, esta metodología considera extremadamente relevante la proximidad del NAF, que para este caso (arcillas activas) el agua freática se vuelve un factor decisivo de influencia cuando se encuentra a menos de 7 m de la superficie de rodamiento. En el caso del NAICM el NAF se encuentra a 0.65 cm.

Por otro lado, la metodología AASHTO en su versión de 1993 se basa principalmente en obtener el Número de Estructural (SN, por sus siglas en inglés) que permita el correcto funcionamiento del pavimento. Esto depende principalmente del módulo resiliente (también conocido como módulo de resiliencia,  $E_r$ ) y en segunda instancia del número requerido de ejes equivalentes a 18 kip ( $W_{18}$ ), así como de datos sobre las capas de la estructura del pavimento, tales como el coeficiente de cada capa de pavimento, los coeficientes de drenaje de las capas de base y subbase y también del espesor de cada capa que compone la estructura de pavimento.

Sin embargo en el capítulo 2 de la sección del mismo manual (AASHTO, 1993) también considera el módulo de reacción ( $k$ ) y el módulo de ruptura del concreto de las losas de pavimento para diseños de pavimentos rígidos.

Varios de los parámetros considerados por la AASHTO son retomados y evaluados en la sección 6.2 de este documento; incluyendo el SN.

## **5.2. *Mejoramiento de suelos con cal***

A diferencia de muchos otros métodos para mejoramiento de suelos, el mejoramiento de suelos con cal ( $\text{CaO}$ , en este caso) es un mejoramiento a nivel químico que da paso a mejoramientos físicos de larga duración, lo que hace esencial el entendimiento de la química implicada en este proceso. De lo contrario, es casi inevitable caer en su aplicación indiscriminada y/o inadecuada que generalmente conlleva a resultados desfavorables técnica o económicamente.

Little (1995) menciona que el mejoramiento de suelos con cal es recomendado para suelos con índice plástico (IP) mayor a 10% y un contenido de finos (%F) mayor a 25%. Y no es recomendable cuando existan altos contenidos de carbón orgánico (materia orgánica) y/o sulfatos. Adicionalmente, las Fuerzas Aereas de Estados Unidos recomiendan que en el caso de tener %F mayor a 25% y un IP mayor a 30% se haga uso de la cal para llegar a un IP por debajo del 30% y posteriormente, estabilizar con cemento Portland.

La reacción química que existe entre el óxido de calcio y las arcillas actúa de dos formas:

Primero por generando un intercambio de cationes y una acción de floculación-aglomeración. Esto sucede en todos los suelos finos, disminuyendo el contenido de agua y aumentando la resistencia, resultando una textura que permite mayor trabajabilidad y reduciendo los cambios volumétricos, como se muestra en la imagen 4. (A) Ilustra una arcilla de baja resistencia con iones de sodio ( $\text{Na}^+$ ) saturados donde las partículas se separan por grandes cantidades de agua. (B) Ilustra las partículas con adición de calcio (contenido en  $\text{CaO}$  o

CaOH) donde los iones de este elemento ( $\text{Ca}^+$ ) disipa el agua adsorvida permitiendo la floculación.

Posteriormente se genera una reacción puzolánica, como la que ocurre en el concreto, la cual es a largo plazo. Ésta depende de la mineralogía de las arcillas, llegando a cuadruplicar la resistencia de los suelos en algunos de los casos (Seed et al, 1962). En otras palabras: La puzolana por definición es un mineral fino de sílice o aluminio que, en presencia de calcio y agua permite cementación.

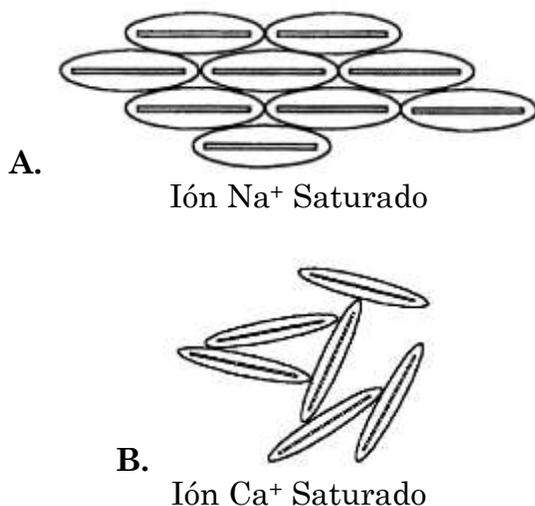


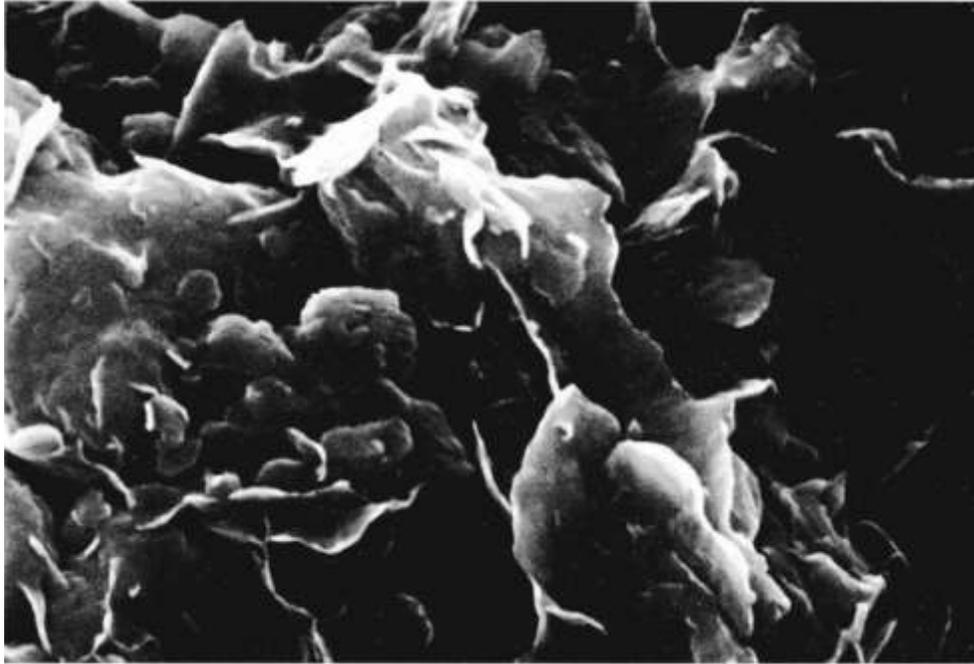
Imagen 4. Resultado del intercambio de cationes seguido de la floculación-aglomeración, (Little, 1995).

Conforme a lo anterior el proceso de endurecimiento y cementación de la puzolana a largo plazo permite que las fisuras del suelo *sanen*, eliminando así potenciales superficies de falla. Dicho proceso continuará mientras exista calcio libre suficiente para generar la reacción, es decir, mientras que el pH permita la reacción.

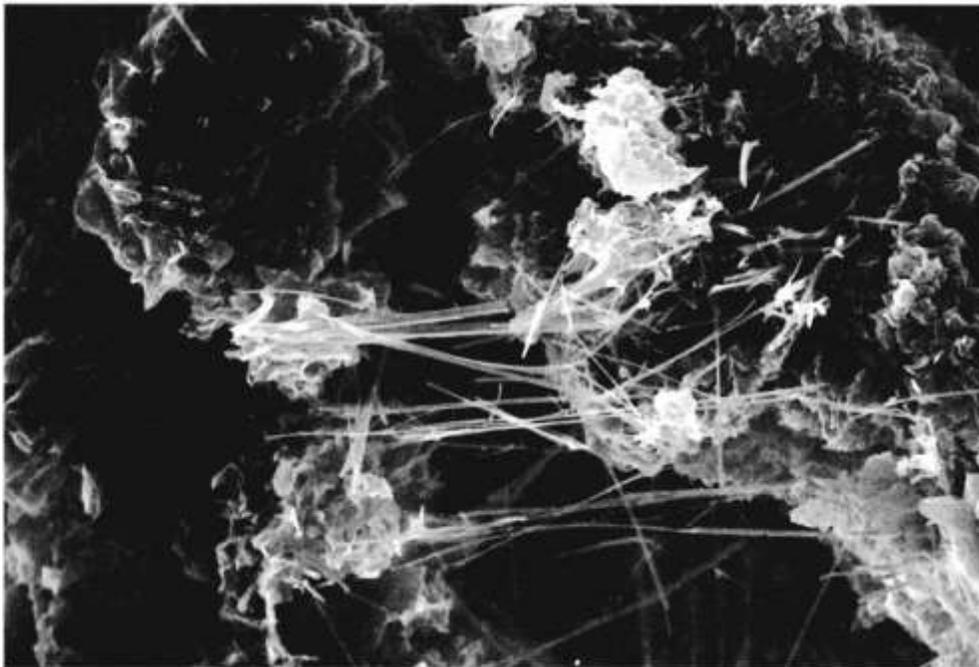
Las arcillas lacustres que se tratan en este documento tienen una mineralogía propicia para facilitar las reacciones puzolánicas al tener un pH favorable y están constituidas por minerales formados por iones que facilitan la reacción de acuerdo a la serie Liotrópica,



donde los cationes de la derecha sustituyen a los de la izquierda, haciendo enlaces iónicos más fuertes. Como puede verse, en concentraciones iguales, los iones de calcio pueden sustituir la mayoría de los iones presentes en las arcillas. La imagen 5 se muestra el efecto de la reacción puzolánica.



A.



B.

Imagen 5. Micrografía con Escaneo de Electrones realizado en una arcillas sin cal (A) y otra después de la reacción puzolánica (B) derivada de la estabilización con cal (Little, 1995).

Como resultado se adelgaza la película de agua adsorbida, lo que permite la generación de estructuras con ligas iónicas más resistentes entre las partículas de suelo.

Aparte de las consecuencias ya mencionadas, se puede considerar que la reacción puzolánica existe cuando se detecta existencia de contenidos de hidratos de silicato de calcio (CSH) e hidratos de aluminato de calcio (CAH).

## 6. Descripción de los Mejoramientos Realizados

### 6.1. Procedimiento constructivo implementado

La Asociación Mexicana de Fabricantes de Cal realizó un mejoramiento en un polígono rectangular de 10 m x 50 m ubicado dentro del predio del NAICM, utilizando óxido de calcio con las características químicas mostradas en la tabla 2.

Tabla 2. Características químicas del CaO utilizado.

Compuesto	Porcentaje
CaO	90 % mín.
CaCO <sub>3</sub>	10 % máx.
MgO	1 % máx.
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 % máx.
SiO <sub>2</sub>	2 % máx.
Humedad	2 % máx.

El procedimiento constructivo de este mejoramiento fue ejecutado como se describe a continuación:

#### Etapa 1.- Dosificación y homogenización de óxido de calcio-suelo

- a) Se dosificó el óxido de calcio (pulverizado) en un área determinada añadiendo un 10% de cal respecto al peso seco del material del sitio, equivalente a 50 kg/m<sup>2</sup> (Ver imagen 6).



Imagen 6. Dosificación de CaO con saco.

- b) Posteriormente se realizó la homogenización de la mezcla óxido de calcio – suelo, como se muestra en la imagen 7.



Imagen 7. Mezclado de suelo con CaO.

- c) En seguida se dejó reposando para permitir la reaccionando el óxido de calcio durante un lapso de 15 a 30 minutos.
- d) Finalmente se realizó el cerrado con el rodillo vibratorio estático (imagen 8) para aglutinar el material de la plataforma.

### Etapa 2.- Curado

- a) Se aplicaron riegos de agua por tres días para evitar erosión.



Imagen 8. Cerrado de la capa de mejoramiento con rodillo estático.

### Etapa 3.- Nivelación y compactación

- a) Se realizó conformación y compactación de la plataforma mediante el uso de motoconformadora y rodillo para conformar y para dar pendientes y cunetas, como se muestra en la imagen 9.



Imagen 9. Nivelación de plataforma con motoconformadora.

- b) Finalmente, quedaron listas las superficies de rodamiento para el ingreso de camiones y vehículos de trabajo.

Posteriormente, se realizaron más plataformas de prueba en otros puntos del Ex-lago de Texcoco que se encuentran dentro del predio destinado al aeropuerto para considerar el posible cambio del suelo en distintos puntos del predio, así como para evaluar el uso de equipos dosificadores. De tal forma que los tramos de suelo mejorado quedaron clasificados en seis distintas plataformas, mismas que se describen tabla 3:

Tabla 3. Plataformas de prueba construidas.

Número	Sobrenombre asignado	Descripción
1	Camino de prueba	Plataforma de 60 cm de suelo mejorado con óxido de calcio
3	TGC	Plataforma de 60 cm de suelo mejorado con óxido de calcio
4	Inclusiones TGC	Plataforma de 50 cm de suelo mejorado con óxido de calcio y con inclusiones de 3.0 m de longitud y 4" de diámetro a cada 1.5 m hechas con óxido de calcio.
5	Texcocreto	Losa de 20 cm de espesor hecha a base de Texcocreto®, soportada en inclusiones de 3.5 m de longitud y 4" de diámetro a cada 1.5 m hechas a base de óxido de calcio.
7	CFE	Plataforma de 60 cm de suelo mejorado con óxido de calcio.
8	Bomag	Plataforma de 50 cm de suelo mejorado con óxido de calcio, aplicado con equipo especializado (Bomag MPH-122)

Se aclara que la Plataforma 2 corresponde a suelo en estado natural y la Plataforma 6 a un tramo de camino de acceso construido con tezontle estabilizado con geotextil (geoceldas).

## **6.2. Resultados obtenidos**

En esta sección se pretenden resumir de una manera sencilla los resultados de las pruebas más significativas para la determinación de los parámetros índice y mecánicos que rigen el desempeño de los suelos al servir como pavimentos.

### *6.2.1. Resultados de laboratorio*

Se tomaron muestras de suelo alteradas por medio de la prueba de penetración estándar (SPT) y muestreo con pala en suelo somero, tanto en suelo natural como en suelo mejorado. Estas muestras fueron llevadas a laboratorio para realizar las siguientes pruebas.

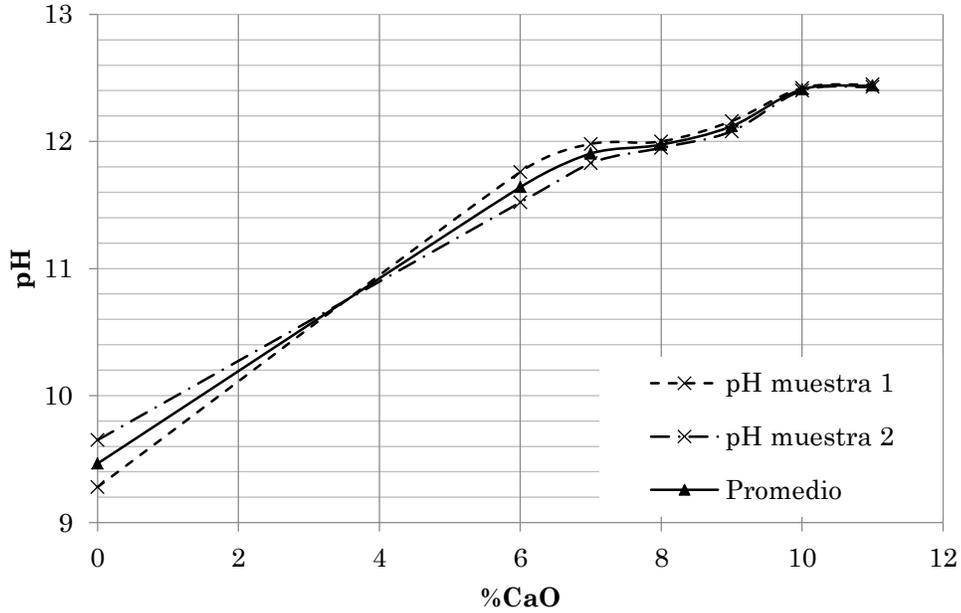
#### 6.2.1.1. Pruebas de potencial de hidrógeno (pH)

El objetivo de estas pruebas es el de determinar la dosis óptima de CaO para el suelo en cuestión. Esto se entiende al considerar lo descrito en el inciso 5.2 de este documento, en el que uno de los puntos esenciales básicamente refiere que al existir una reacción química al agregar CaO al suelo del Ex-lago de Texcoco hay un cambio en el pH de la mezcla obtenida.

De acuerdo con el apéndice de la norma ASTM C-977 que se refiere a la estabilización de suelos con Cal, se considera que la dosis óptima es la mínima que logre un pH mayor a 12.40.

Debido a lo anterior, estas pruebas fueron realizadas en dos muestras de suelo natural antes de la ejecución del procedimiento descrito en el apartado 6.1 de este documento.

Los resultados de pH con respecto a la dosificación se muestran en la gráfica 1.



Gráfica 1. Dosificación de CaO (en % de peso seco) contra potencial de hidrógeno (pH).

#### 6.2.1.2. Pruebas índice

Se realizaron pruebas de contenido de agua ( $\omega\%$ ), límite líquido (LL), límite plástico (LP), índice plástico (IP), contracción lineal (CL), peso volumétrico húmedo ( $\gamma_h$ ), peso volumétrico seco ( $\gamma_d$ ), expansión (EX) y clasificación SUCS en muestras de suelo en estado natural y en muestras de suelo mejorado con óxido de calcio. En la imagen 10 se muestra la extracción de una muestra cúbica inalterada de suelo estabilizado con óxido de calcio.



Imagen 10. Extracción de muestra de suelo inalterado.

En primera instancia estos resultados servirán para entender el efecto del óxido de calcio en el comportamiento de las arcillas del NAICM y en segundo término para determinar, si es necesario replantear la dosificación de CaO o incluso optar por agregar otros componentes.

La primera serie de pruebas se realizó a muestras de suelo natural que fue mejorado en laboratorio para obtener una referencia antes de la ejecución del mejoramiento en campo.

La segunda serie de pruebas fueron realizadas en muestras de suelo inalterado (MI) superficialmente (0.00 a 0.60 m de profundidad) en puntos aleatorios donde se realizó el mejoramiento descrito en la parte 5 de este documento.

Todos los resultados obtenidos en estas pruebas se resumen la tabla 4, misma que se muestra a continuación.

Tabla 4. Resultados de pruebas índice.

	Primera serie		Segunda serie		
Fecha			23/07/2015	29/07/2015	29/07/2015
Sondeo	Suelo natural en laboratorio	Mejoramiento de laboratorio	Suelo natural	SE 1	SE-2
Profundidad (m)			0.30	0.30	0.30
w% (%)	143.9		117.10	56.60	54.40
%F (%)	69	63		80.00	80.00
LL (%)	144.6	132.3	165.70	92.60	95.00
LP (%)	73.7	82.8	51.50	53.60	54.00
IP (%)	70.9	49.5	114.20	39.00	41.00
CL (%)	25.87	18.21	21.20	7.00	7.70
EX (%)	8.54	3.8	3.39	0.76	0.76
SUCS	CH	MH	CH	MH	MH
$\gamma_h$ (t/m <sup>3</sup> )	1.05			1.56	1.58
$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )				0.99	1.00

Tabla 4 (Continuación). Resultados de pruebas índice.

	<b>Segunda serie</b>			
<b>Fecha</b>	<b>05/08/2015</b>	<b>13/08/2015</b>	<b>21/08/2015</b>	<b>21/08/2015</b>
<b>Sondeo</b>	<b>SE-3</b>	<b>SE-4</b>	<b>SE-5</b>	<b>SE-6</b>
Profundidad m	0.30	0.30	0.30	0.30
w% %	42.40	50.80	56.90	52.30
%F %	61.00	70.00	73.00	67.00
LL %	77.90	88.90	98.60	87.80
LP %	44.90	54.50	59.60	56.30
IP %	33.00	34.40	39.00	31.50
CL %	6.70	6.70	9.00	6.30
EV %	0.76	0.76	0.76	0.76
SUCS -	CH	MH	MH	MH
$\gamma_h$ t/m <sup>3</sup>	1.54	1.49	1.46	1.48
$\gamma_d$ t/m <sup>3</sup>	1.08	0.99	0.93	0.97

#### 6.2.1.3. Pruebas geomecánicas

Se realizaron pruebas de Valor Relativo de Soporte (VRS) tanto en muestras inalteradas de suelo natural como mejorado. Todas ellas extraídas a 0.30 m de profundidad. Los resultados de estas pruebas se muestran en la tabla 5.

Adicionalmente, se realizaron pruebas triaxiales cíclicas para obtener el Módulo de Resiliencia, ya que este parámetro es esencial para el criterio de diseño y evaluación de pavimentos que dicta la AASHTO. El procedimiento para la ejecución de estas pruebas fue el AASHTO T 307 para sub-rasantes, como se muestra en la tabla 6.

Tabla 5. Resultados de la prueba de Valor Relativo de Soporte al 90% del PVSM.

Tipo de suelo	Sondeo	Muestra	VRS (%)
Suelo del NAICM en estado natural (antes de los trabajos de mejoramiento)	PCA 1	1	1.6
		2	1.7
	PCA 3	1	1.5
		2	1.6
	PCA 4	1	2.3
		2	1.7
	PCA 6	1	2.1
		2	1.5
Natural (después de los trabajos de mejoramiento)	Cala 1	1	3.2
Suelo mejorado	Cala 2	1	29.4

Tabla 6. Cargas para realización de prueba de Módulo de Resiliencia en subrasantes, AASHTO T 307.

No. de secuencia	Esfuerzo de confinamiento ( $\sigma_3$ ) kPa	Esfuerzo desviador máx. ( $\sigma_{max}$ ) kPa	Esfuerzo Cíclico ( $\sigma_{cic}$ ) kPa	Esfuerzo constante ( $\sigma_{const}$ ) kPa	Número de aplicaciones de carga
0	41.4	27.6	24.8	2.8	500 – 1000
1	41.4	13.8	12.4	1.4	100
2	41.4	27.6	24.8	2.8	100
3	41.4	41.4	37.3	4.1	100
4	41.4	55.2	49.7	5.5	100
5	41.4	68.9	62.0	6.9	100

Tabla 6 (Continuación). Cargas para realización de prueba de Módulo de Resiliencia en sub-rasantes, AASHTO T 307.

No. de secuencia	Esfuerzo de confinamiento ( $\sigma_3$ ) kPa	Esfuerzo desviador máx. ( $\sigma_{max}$ ) kPa	Esfuerzo Cíclico ( $\sigma_{cic}$ ) kPa	Esfuerzo constante ( $\sigma_{const}$ ) kPa	Número de aplicaciones de carga
6	27.6	13.8	12.4	1.4	100
7	27.6	27.6	24.8	2.8	100
8	27.6	41.4	37.3	4.1	100
9	27.6	55.2	49.7	5.5	100
10	27.6	68.9	62.0	6.9	100
11	13.8	13.8	12.4	1.4	100
12	13.8	27.6	24.8	2.8	100
13	13.8	41.4	37.3	4.1	100
14	13.8	55.2	49.7	5.5	100
15	13.8	68.9	62.0	6.9	100

En las imágenes 11 y 12 se muestran los trabajos realizados para la ejecución de estas pruebas, mientras que los resultados se ilustran en las gráficas 2 y 3.

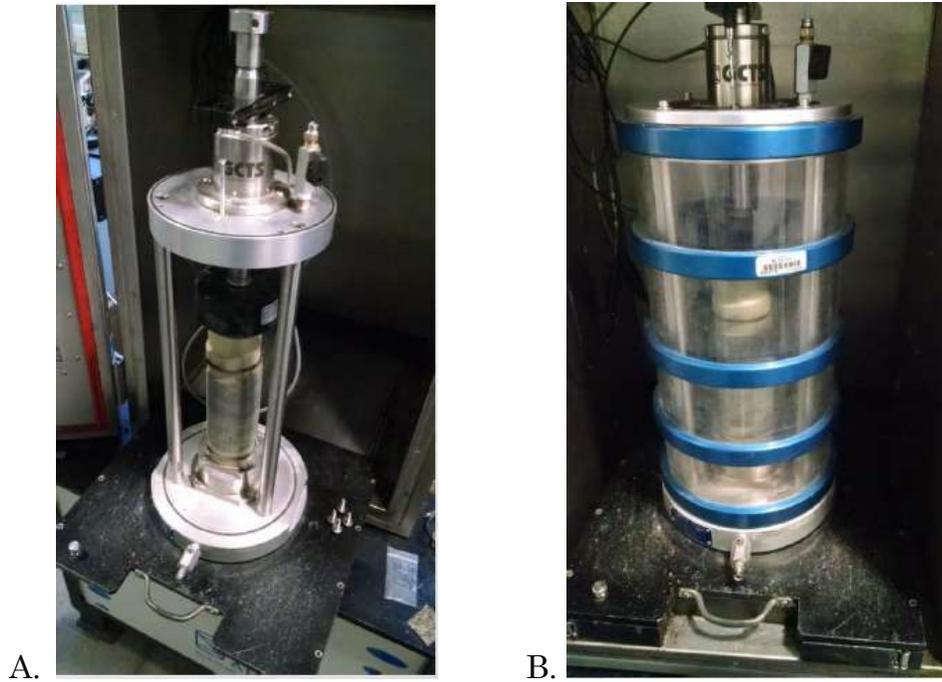


Imagen 11. Probeta de suelo natural (A.) montada y (B.) durante la ejecución de la prueba de módulo de resiliencia.

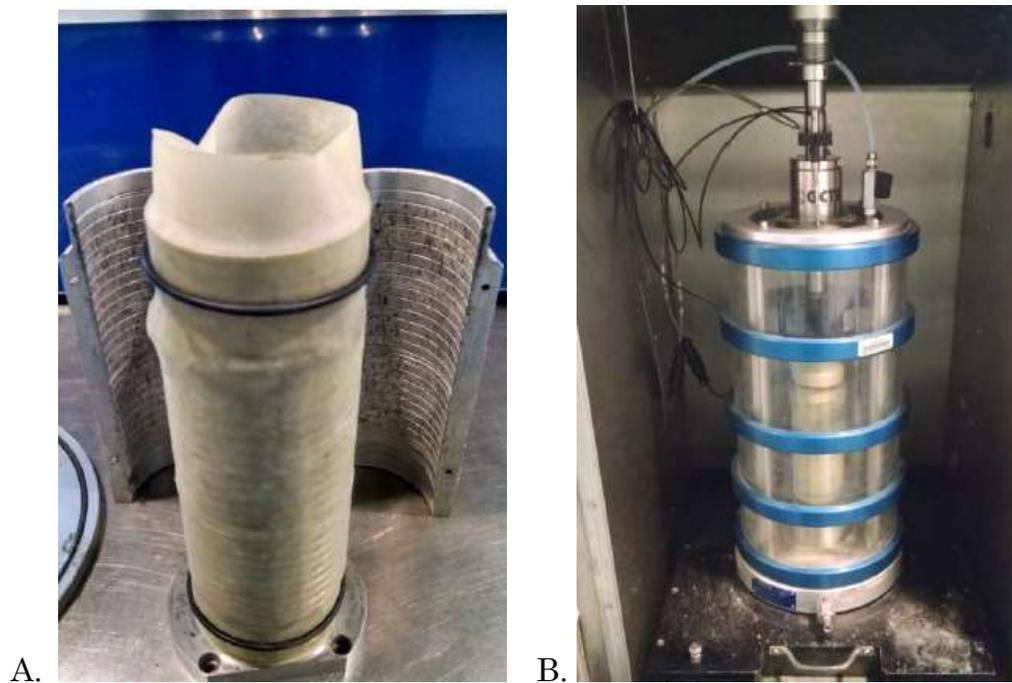
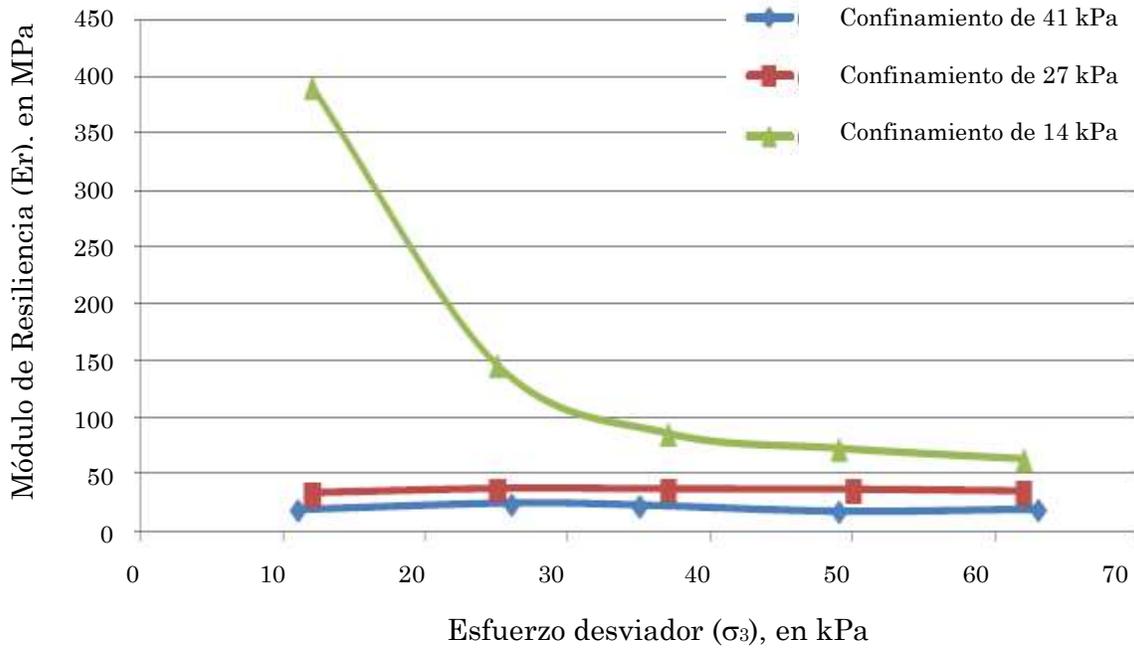
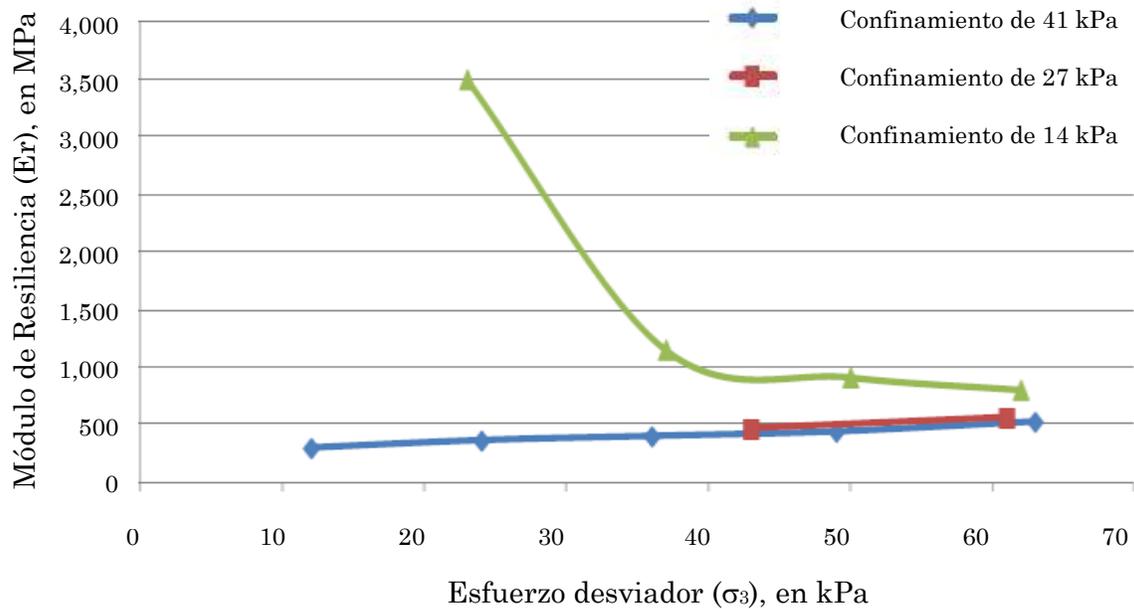


Imagen 12. Probeta de suelo mejorado con cal (A.) montada y (B.) durante la ejecución de la prueba de módulo de resiliencia.



Gráfica 2. Resultados de pruebas triaxiales cíclicas ejecutadas en suelo natural.



Gráfica 3. Resultados de pruebas triaxiales cíclicas ejecutadas en suelo mejorado con  $CaO$ .

La tabla 7 muestra el promedio de los valores de  $E_r$  obtenidos en las pruebas triaxiales cíclicas para suelo natural y para suelo mejorado con óxido de calcio.

Tabla 7. Valores promedio del Er.

Er en suelo natural (MPa)	Er en suelo mejorado con CaO (MPa)
28.8	346.5

### 6.2.2. Resultados de campo

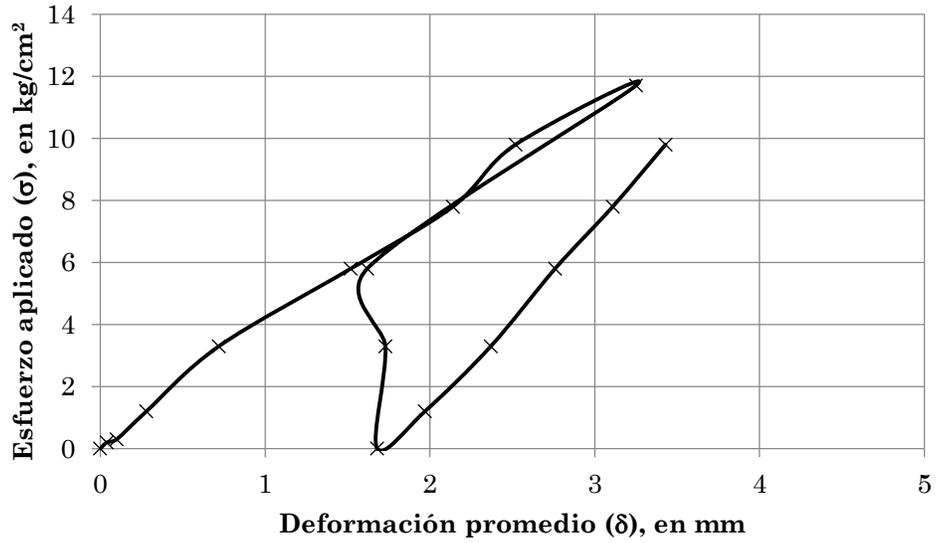
Con el propósito de obtener parámetros in situ, se realizaron varias series de pruebas en campo para determinar las propiedades geomecánicas de módulo de reacción, módulo de rigidez y Número de Estabilidad en varios puntos, tanto en suelo natural como en suelo mejorado.

#### 6.2.2.1. Pruebas de placa

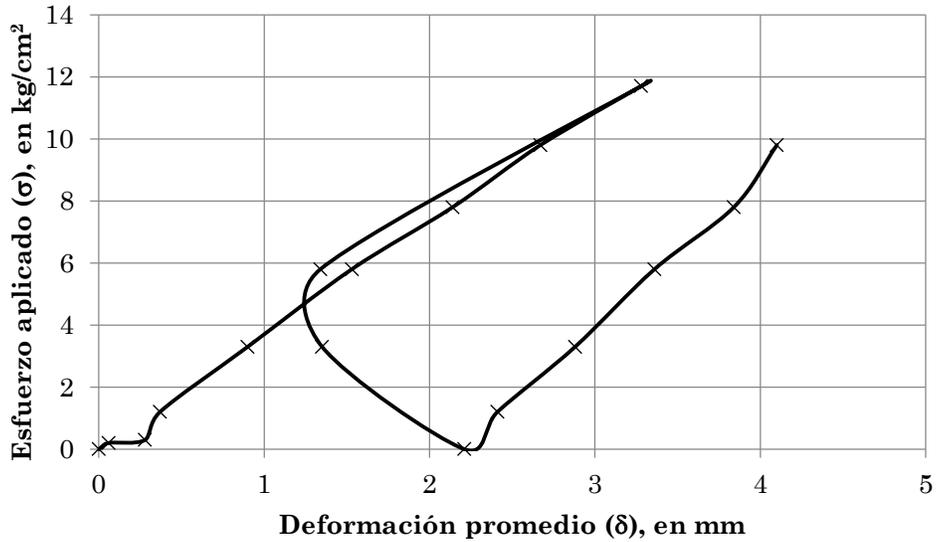
Las pruebas de placa fueron aplicadas directamente sobre el terreno mejorado usando un gato hidráulico que aplicó una carga máxima de 8.5 ton en la placa metálica de 30.5 cm de diámetro haciendo reacción con maquinaria de construcción y las lecturas de las deformaciones fueron tomadas con un sistema de micrómetros colocados en un arreglo triangular. En la imagen 11 se puede observar el sistema implementado para la aplicación de las pruebas de carga, mientras que las gráficas 4 y 5 muestran las curvas esfuerzo-deformación de estas pruebas.



Imagen 11. Sistema implementado para la ejecución de las pruebas de placa.



Gráfica 4. Prueba de placa 1.



Gráfica 5. Prueba de placa 2.

A partir de las gráficas 4 y 5 se determinaron los parámetros geomecánicos de capacidad de carga, módulo de reacción y módulo de rigidez de los suelos mejorados con CaO despreciando el primer ciclo de carga. Por lo que los parámetros que se muestran en la tabla 8 corresponden a la segunda carga.

Tabla 8. Resultados de la pruebas de placas (segundos ciclos de carga).

	<b>Esfuerzo máximo aplicado (<math>q_{m\acute{a}x}</math>) (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Capacidad de carga (<math>q_{adm}</math>) (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Módulo de rigidez (E) (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Módulo de reacción (k) (kg/cm<sup>3</sup>)</b>
Prueba de placa 1	9.80	3.26	629	56
Prueba de placa 2	9.80	3.26	583	52

#### 6.2.2.2. Pruebas de Deflectómetro de impacto

La ejecución de las pruebas de deflectómetro de impacto tipo FWD (por sus siglas en inglés) brinda parámetros importantes para comprender el comportamiento de los materiales térreos como parte de una estructura de pavimento. Principalmente, por que a partir de sus resultados se pueden estimar parámetros importantes para el diseño o evaluación de pavimentos como lo son el SN y los módulos de rigidez de los suelos considerados como subrasante y pavimento.

Estas pruebas fueron aplicadas en el terreno natural, en los caminos de acceso existentes y en las seis plataformas de prueba que se enlistan en la sección 6 de este documento. Los resultados de las pruebas de FWD se muestran en los anexos 1 y 2. Se aclara que en estos documentos la primera capa de suelo detectada es clasificada como pavimento y por ello su módulo de resiliencia se refiere con las literales  $E_p$ , mientras que el  $E_r$  de la capa subyacente (suelo natural) se expresa como  $E_{SG}$ .

Asimismo, en las tablas 8 a 15 se muestran los resultados del módulo de resiliencia en la capa impactada para cada una de las plataformas analizadas.

Tabla 8. Módulos de resiliencia obtenidos en la Plataforma 1 por medio de FWD.

<b>Cadenamiento</b>	<b>Ep (MPa)</b>
0+000	260.10
0+010	276.34
0+020	293.25
0+031	127.02
0+041	255.88
0+050	259.24
0+060	528.51
0+070	454.33

Tabla 9. Módulos de resiliencia obtenidos en la Plataforma 2 por medio de FWD.

<b>Cadenamiento</b>	<b>Ep (MPa)</b>
0+000	38.11
0+005	17.52

Tabla 10. Módulos de resiliencia obtenidos en la Plataforma 3 por medio de FWD.

<b>Cadenamiento</b>	<b>Lado izquierdo Ep (MPa)</b>	<b>Lado derecho Ep (MPa)</b>
0+000	326.31	371.42
0+010	308.95	276.36
0+020	422.10	841.37
0+030	1,213.08	881.04
0+036	348.21	266.75

Tabla 11. Módulos de resiliencia obtenidos en la Plataforma 4 por medio de FWD.

<b>Cadenamiento</b>	<b>Ep (MPa)</b>
0+000	266.80
0+010	351.86
0+020	419.89
0+030	414.60
0+037	588.83

Tabla 12. Módulos de resiliencia obtenidos en la Plataforma 5 por medio de FWD.

<b>Cadenamiento</b>	<b>Ep (MPa)</b>
0+000	18,137
0+010	18,137
0+020	18,137
0+030	18,137
0+032	18,137

Tabla 13. Módulos de resiliencia obtenidos en la Plataforma 6 por medio de FWD.

<b>Cadenamiento</b>	<b>Ep (MPa)</b>
0+000	301.27
0+012	281.91
0+058	310.91

Tabla 14. Módulos de resiliencia obtenidos en la Plataforma 7 por medio de FWD.

<b>Cadenamiento</b>	<b>Lado izquierdo Ep (MPa)</b>	<b>Lado derecho Ep (MPa)</b>
0+000	313.55	361.23
0+010	454.69	658.21
0+021	286.99	759.36
0+031	249.27	525.37
0+041	434.42	400.28
0+052	244.98	482.58
0+063	347.84	502.15
0+070	327.90	381.05
0+080	414.70	400.53
0+090	300.48	601.90
0+100	128.00	326.09

Tabla 15. Módulos de resiliencia obtenidos en la Plataforma 8 por medio de FWD.

<b>Cadenamiento</b>	<b>Ep (MPa)</b>
0+000	190.62
0+010	260.88
0+020	181.27

### 6.2.3. Observaciones empíricas

Posterior a la construcción de las plataformas mejoradas con óxido de calcio, se realizó una prueba pasando un automóvil sin detectar indicio alguno de fallas en el pavimento.

Posteriormente, se hizo pasar un rodillo dinámico dejándolo en un solo punto por un lapso de un minuto, para tener una sensibilidad empírica de las condiciones del mejoramiento y sólo se observó la vibración de la superficie de

rodamiento y unas micro fisuras de espesor menor al de un cabello, mimas que fueron selladas después de haber tenido contacto con agua.

Finalmente, se observó que vehículos de carga pasaban por los mejoramientos realizados con CaO cuando llegaron a suceder fallas en los caminos provisionales construidos con tezontle estabilizado con geosintéticos.

En la imagen 12 se muestra una comparativa entre (A) el suelo en condiciones naturales y (B) el suelo estabilizado con óxido de calcio.



A.



B.

Imagen 12. Comparativa de estado de suelo (A) en estado natural y (B) mejorado con CaO.

Igualmente, durante las pruebas de realizadas con FWD se observaron claramente las deformaciones plásticas que infringía el impacto en el suelo, aun cuando el deflectómetro realizó impactos de mayor magnitud en el suelo mejorado. La imagen 13 muestra una comparativa entre (A) la huella de la placa del deflectómetro impresa en el suelo natural y (B) la impresa en el suelo mejorado.



Imagen 13. Impresión de placa del FWD en (A) suelo natural y (B) en suelo mejorado con CaO.

## 7. Análisis de Resultados

### 7.1. Comparativa referencial de los parámetros geomecánicos

#### 7.1.1. Valor Relativo de Soporte (VRS)

Esa comparativa se realiza considerando los valores comunes que tienen los parámetros geomecánicos en los suelos que se emplean para la construcción de estructuras de pavimento.

Inicialmente, en la tabla 16 se hace referencia a las clasificaciones que se hace en las normas mexicanas (NMX y SCT), indicando en cursiva el rango en el que se encuentra el suelo mejorado del NAICM.

Tabla 16. Valores del VRS para diferentes tipos de suelo en estructuras de pavimento, según las Normas Mexicanas (NMX) y las Normas de la SCT.

VRS (%)	Clasificación NMX C-416	Clasificación Normas SCT
0 – 5	Sub-rasante muy mala	Material de desperdicio
6 – 10	Sub-rasante mala a dudosa	Material de terraplén
11 – 20	Sub-rasante regular a buena	Material para sub-yacente
<i>21 – 30</i>	<i>Sub-rasante muy buena</i>	<i>Material para sub-rasante</i>
31 – 50	Sub-base de buena calidad	
51 – 80	Base de regular calidad	Material para Sub-base
81 – 100	Base de buena calidad	Material para base

Comparando esto los resultados obtenidos en el suelo del NAICM una vez que se ha mejorado con óxido de calcio se encuentra que el suelo en estado natural se puede clasificar como material de desperdicio, ya que su VRS no excede el 3.2%, mientras que una vez que se ha mejorado alcanza la calidad suficiente para ser clasificado como suelo apto para material de sub-rasante,

que incluso en la NMX C-416 se categoriza como de muy buena calidad al tener un VRS de 29%. Este incremento de VRS es equivalente a más de ocho veces el valor obtenido en estado natural.

En concreto, el suelo del NAICM pasa de ser suelo inútil para la construcción de estructuras de pavimento a ser suelo apto al menos para ocuparse como sub-rasante.

### 7.1.2. Módulo de Resiliencia (*Er*)

El IMT (2001) menciona que para el caso de suelos finos han sido clasificados en cuatro categorías, según su consistencia, especificando valores paramétricos máximos y mínimos para el *Er* cuando el esfuerzo desviador es de 13.8 kPa. Estos valores se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Módulos de resiliencia en suelos finos de acuerdo a la consistencia (Thompson y Elliot, 1985).

Consistencia	Er mínimo (MPa)	Er máximo (kPa)
Muy blanda	39.00	69.00
Blanda	53.00	126.00
Media	85.00	325.00
Rígida	117.00	525.00

El *Er* promedio para un esfuerzo desviador de 13.8 kPa resultó de 28.8 MPa en el suelo natural, mientras que en el caso del suelo mejorado con óxido de calcio llegó hasta 346.5 MPa. Y para el caso de los *Er* obtenidos de las pruebas de FWD, se considera un valor promedio de 401.80 MPa. Dado lo anterior, el suelo para de una consistencia incluso inferior a lo que se establece como muy blanda a un material de consistencia rígida.

Adicionalmente, la tabla 18 proporciona valores típicos de módulo de resiliencia y otras características para diferentes tipos de suelos finos susceptibles de usarse en la construcción de terracerías y capas granulares de pavimentos (IMT, 2001).

Tabla 18. Valores de módulo de resiliencia y otras características de suelos finos para pavimentación (IMT, 2001).

Tipo de suelo AASHTO	Descripción	SUCS	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	VRS (%)	Er (MPa)
A-4	Limo	ML, OL	14.1 a 16.5	6.79 a 44.79	14.07 a 42.22
	Grava-arena-limo		15.7 a 19.6	10.86 a 59.72	28.14 a 56.29
4-5	Limo de alta compresibilidad	MH	12.6 a 15.7	6.79 a 51.68	14.07 a 42.22
A-6	Arcilla plástica	CL	15.7 a 19.6	6.79 a 69.22	14.07 a 70.32
A-7-5	Arcilla de baja compresibilidad	CL, OL	14.1 a 19.6	6.79 a 58.36	14.07 a 70.37
A-7-6	Arcilla de alta compresibilidad	CH, OH	12.6 a 17.3	10.86 a 59.73	28.14 a 70.37

Se análisis estadístico (distribución normal) con los datos obtenidos en la pruebas FWD, obteniéndose que un SN de 1.61 es superado por al menos el 90% de los datos obtenidos, e igualmente, se obtuvo que un Er de 142 MPa (20,500 lb/plg<sup>2</sup>).

Dado lo anterior, se decidió que para este caso, el SN<sub>req</sub> fuera igual a 1.68, ya que este valor es el recomendado por el *Florida Department of Transportation* (2016) para un Er de 124 MPa (18,000 lb/plg<sup>2</sup>) y 100,000 ejes equivalentes, considerando un 90% de confiabilidad.

Para fines de sensibilidad, tabla 19 muestra el número de ejes equiparables a 100,000 ejes de 18,000 lb/plg<sup>2</sup>.

Tabla 19. Ejes equiparables a 10,000 Ejes equivalentes (W<sub>18</sub>).

	Carga axial (lb/plg <sup>2</sup> )	Equivalencia (W <sub>18</sub> )	Equivalencia a 100,000 W <sub>18</sub>
Eje sencillo	14,000	0.36	277,800
	18,000	1.00	100,000
	22,000	2.18	45,900
Eje Tándem	30,000	0.66	151,500
	34,000	1.09	91,700
	38,000	1.70	58,800
	44,000	3.00	33,300

Una vez definidos estos parámetros, se procedió a realizar el análisis de los resultados obtenidos por el FWD en cada una de las plataformas de suelo

mejorado que fueron estudiadas a través de la evaluación estructural por medio del Índice de Capacidad Estructural (ICE), el cual es un valor que relaciona el número de estructural obtenido ( $SN_{ef}$ ) entre el requerido ( $SN_{req}$ ). La tabla 20 muestra la evidencia del análisis estadístico realizado para el  $E_r$  y  $Se_r$ , así como los resultados del análisis de ICE.

Tabla 20. Análisis estadístico de parámetros de comportamiento ante el rodamiento ( $E_r$  y  $Se_r$ ) e Índice de Calidad Estructural.

Cadenamiento		$E_r$ (MPa)	$SN_{ef}$	$SN_{req}$	ICE (%)	
<i>Promedio</i>		401.80	2.88			
<i>Desviación estándar</i>		202.44	0.99			
<i>X<sub>90%</sub></i>		142.37	1.61			
Plataforma 1	0+000	260.10	1.64	1.68	97.80	
	0+010	276.34	1.73	1.68	103.21	
	0+020	293.25	2.24	1.68	133.33	
	0+031	127.02	1.16	1.68	69.29	
	0+041	255.88	1.80	1.68	107.38	
	0+050	259.24	1.75	1.68	103.99	
	0+060	528.51	2.82	1.68	167.92	
	0+070	454.33	2.63	1.68	156.61	
Plataforma 3	Lado derecho	0+000	371.42	3.26	1.68	193.75
		0+010	276.36	2.97	1.68	176.90
		0+020	841.37	5.32	1.68	316.90
		0+030	881.04	5.16	1.68	307.26
		0+036	266.75	2.89	1.68	172.20
	Lado izquierdo	0+000	326.31	1.99	1.68	118.51
		0+010	308.95	2.20	1.68	130.65
		0+020	422.10	3.04	1.68	181.07
		0+030	1,213.08	3.97	1.68	236.13
		0+036	348.21	2.76	1.68	164.35
Plataforma 4	0+000	266.80	2.43	1.68	144.70	
	0+010	351.86	2.83	1.68	168.21	
	0+020	419.89	3.69	1.68	219.46	
	0+030	414.60	3.45	1.68	205.06	
	0+037	588.83	4.26	1.68	253.81	

Tabla 20 (Continuación). Análisis estadístico de parámetros de comportamiento ante el rodamiento ( $E_r$  y  $S_{e_r}$ ) e Índice de Calidad Estructural.

Cadenamiento		$E_r$ (MPa)	$SN_{ef}$	$SN_{req}$	ICE (%)	
Plataforma 7	Lado derecho	0+000	361.23	1.97	1.68	117.08
		0+010	658.21	4.51	1.68	268.69
		0+020	759.36	4.87	1.68	289.64
		0+031	525.37	4.04	1.68	240.18
		0+043	400.28	3.00	1.68	178.75
		0+050	482.58	3.10	1.68	184.46
		0+060	502.15	3.71	1.68	220.83
		0+070	381.05	2.07	1.68	123.10
		0+081	400.53	2.18	1.68	129.76
		0+091	601.90	4.21	1.68	250.54
		0+100	326.09	2.70	1.68	160.83
	Lado izquierdo	0+000	313.55	1.88	1.68	111.96
		0+010	454.69	3.89	1.68	231.55
		0+020	286.99	3.00	1.68	178.69
		0+031	249.27	2.38	1.68	141.79
		0+043	434.42	2.66	1.68	158.21
		0+050	244.98	1.76	1.68	104.76
		0+060	347.84	3.32	1.68	197.32
		0+070	327.90	2.23	1.68	132.50
		0+081	414.70	2.46	1.68	146.55
		0+091	300.48	2.15	1.68	127.98
		0+100	128.00	1.27	1.68	75.30
Plataforma 8		0+000	190.62	2.84	1.68	169.11
		0+010	260.88	3.17	1.68	188.81
		0+020	181.27	2.65	1.68	157.92

## 7.2. Análisis respecto a los procedimientos constructivos implementados

A partir de lo mencionado en los puntos 6.1 y 6.2.3 de este documento, así como de las gráficas de deformaciones obtenidas a través del FWD, se puede observar que las plataformas con mayor variación fueron las Plataformas 1 y 7, las cuales fueron dosificadas y homogenizadas exactamente como se muestra en las imágenes 6 y 7.

Igualmente, a partir de un análisis estadístico de deflexiones considerando que la uniformidad de los cuencos de deformación es representativa de la uniformidad de la plataforma. En las tablas 21 a 25 se puede observar que las plataformas pueden ser ordenadas de la más uniforme a la menos uniforme de la siguiente manera: 8, 1, 4, 3 y 7.

Tabla 21. Análisis estadístico de uniformidad de cuencos de deflexiones en Plataforma 1.

<b>Cad.</b>	<b>Área normalizada (mm)</b>
0+000	419.30
0+010	432.63
0+020	510.89
0+031	410.39
0+041	468.11
0+050	449.58
0+060	508.01
0+070	501.74
<b><i>Desv. Estd.</i></b>	<b><i>40.75</i></b>

Tabla 22. Análisis estadístico de uniformidad de cuencos de deflexiones en Plataforma 3.

<b>Cad.</b>	<b>Área normalizada (mm)</b>
0+000	576.80
0+010	591.53
0+020	698.88
0+030	666.88
0+036	583.36
0+000	466.42
0+010	486.17
0+020	565.98
0+030	522.00
0+039	547.71
<b><i>Desv. Estd.</i></b>	<b><i>72.46</i></b>

Tabla 23. Análisis estadístico de uniformidad de cuencos de deflexiones en Plataforma 4.

<b>Cad.</b>	<b>Área normalizada (mm)</b>
0+000	529.78
0+010	563.75
0+020	626.63
0+030	586.07
0+037	638.77
<b><i>Desv. Estd.</i></b>	<b>44.85</b>

Tabla 24. Análisis estadístico de uniformidad de cuencos de deflexiones en Plataforma 7 (lado izquierdo).

<b>Cad.</b>	<b>Área normalizada (mm)</b>
0+000	438.89
0+010	649.06
0+020	663.85
0+031	630.47
0+043	572.86
0+050	537.45
0+060	586.91
0+070	452.84
0+081	469.36
0+091	624.86
0+100	551.27
0+000	446.26
0+010	641.96
0+021	588.62
0+031	535.32
0+041	518.78
0+052	465.14
0+063	604.42
0+070	480.07
0+080	483.51
0+090	480.82
0+100	445.87
<b><i>Desv. Estd.</i></b>	<b>75.52</b>

Tabla 25. Análisis estadístico de uniformidad de cuencos de deflexiones en Plataforma 8.

Cad.	Área normalizada (mm)
0+000	654.21
0+010	646.80
0+020	624.00
<b>Desv. Estd.</b>	<b>15.74</b>

La plataforma 6, la cual fue descartada por ser construida con geotextiles y la plataforma 5 por haber sido construida con losas elaboradas a base de una mezcla cal-cemento.

### 7.3. Análisis conjunto

En este análisis conjunto se analizan las condiciones mencionadas en los puntos 7.1 y 7.2 con el propósito de tomar en consideración conjunta las condiciones técnicas y constructivas que se obtuvieron.

A partir de los datos mostrados en la tablas 19, así como las gráficas y tablas de deformación mostradas en los anexos 1 y 2, se procedió detectar los cadenamientos donde no cumple con los criterios de valores mínimos para el  $E_r$  y  $SN$ . Estos cadenamientos se muestran en la tabla 26.

Tabla 26. Cadenamientos que incumplen los criterios de confiabilidad.

Cadenamiento		$E_r$ (MPa)	$SN_{ef}$	ICE (%)
Plataforma 1	0+000	260.10	1.64	97.80
	0+031	127.02	1.16	69.29
Plataforma 7 (Lado izquierdo)	0+100	128.00	1.27	75.30

Estos fenómenos pueden ser entendidos se toman en cuenta las condiciones de sitio y constructivas. En primera instancia, Las anomalías de los cadenamientos 0+000 de la Plataforma 1 y 0+100 de la Plataforma 7 pudieron haber sido desfavorables debido a que estos cadenamientos son el inicio y el fin de las plataformas mejoradas, por lo que sus condiciones de frontera se vieron afectadas por el mal estado en el que están los suelos naturales con los que colindan.

Por otro lado, respecto al cadenamiento 0+031 de la Plataforma 1, esto se pudo haber debido a anomalías de mezclado dentro del procedimiento constructivo.

Adicionalmente, comparando el número de ejes equivalentes ( $W_{18}$ ), las deformaciones máximas y el  $E_r$ , las plataformas pueden ser ordenadas de menor a mayor como se muestra en la tabla 27.

Tabla 27. Propiedades de las plataformas, en orden descendente.

Plataforma	Condición de suelo	$\delta_{\text{máx.}}$ (mm)	$E_r$ prom (MPa)	SN prom	$W_{18}$ prom
2	Suelo Natural	15.0	28	0.53	2
8	Mejoramiento de 50 cm con estabilizador	3.6	211	2.89	24,083
1	Mejoramiento con cal en uso	1.7	245	1.72	47,042
6	Mejoramiento con geotextil y tezontle	1.5	298	1.89	106,918
3	Mejoramiento de 60 cm (TGC)	1.8	323	2.77	298,955
7	Mejoramiento de 60 cm (CFE)	1.9	394	2.35	400,900
4	Mejoramiento de 50 cm con estacones de 3 m @ 1m	1.7	405	3.33	851,553
5	20 cm de losa de Texcocreto con estacones de 3.5 m @ 1m	1.1	18.317	NA	4,954,502

Se aclara que las plataformas 2, 5 y 6, sólo se consideraron como referencia para sensibilizar sobre otras condiciones de suelo, a parte del mejoramiento con CaO, ya que representan los resultados del terreno natural,

de una losa de mezcla concreto-cal apoyada sobre inclusiones y la solución actual a base de tezontle estabilizado con geotextiles, respectivamente.

Asimismo, se aclara que la Plataforma 8 fue construida al menos un par de meses después que las demás, por lo que el proceso las reacciones suelo-CaO estaban menor desarrolladas en ésta.

Finalmente, en la tabla 28 se comparan las plataformas estabilizadas con óxido de calcio, colocándolas en orden de homogeneidad y de comportamiento ante el rodamiento. De tal forma que es más sencillo observar la viabilidad para su construcción.

Tabla 28. Comparación de plataformas en orden de acurdo a su homogeneidad y comportamiento ante el rodamiento.

Orden de homogeneidad	Orden de comportamiento ante el rodamiento
Plataforma 8	Plataforma 4
Plataforma 1	Plataforma 7
Plataforma 4	Plataforma 3
Plataforma 3	Plataforma 1
Plataforma 7	Plataforma 8

## 8. Conclusiones del Análisis

- Considerando la mineralogía de las arcillas del NAICM así como su contenido de finos y su índice plástico, estas son ideales para el mejoramiento con cal (CaO), aunque de acuerdo con las Fuerzas Armadas de EEUU, también es factible añadir cemento Portland después de la estabilización con cal.
- El mejoramiento de las arcillas del NAICM al agregarle óxido de calcio en un 10% (respecto al peso seco) es notable, ya que reduce la reactividad al contacto con el agua e incrementa significativamente los parámetros geomecánicos, permitiendo que pase de ser un material deleznable a ser un material apto para la conformación de pavimentos.

Dentro de los beneficios más importantes se mencionan los siguientes:

- a. Disminuye del límite líquido de la arcilla y disminuye el contenido de agua del suelo, logrando que sea un material factible para construcción.

- b. Prácticamente mantiene el mismo peso volumétrico del material natural, por lo que no se producen sobrecargas.
  - c. Aumenta el valor relativo de soporte de 4% a 24%, en muestras compactadas al 90% del PVSM.
  - d. De acuerdo a los resultados de las pruebas de placa, la capacidad de carga del suelo se incrementa de ser prácticamente nula hasta  $3.26 \text{ kg/cm}^2$ . Asimismo, la rigidez del suelo mejorado llega a  $583 \text{ kg/cm}^2$  y el módulo de reacción a  $52 \text{ kg/cm}^3$ .
- La función impermeabilizante de la mezcla suelo-cal permite que la influencia del NAF ya no sea un factor relevante, debido a que no permite que el agua freática tenga contacto con la estructura del pavimento.
  - De acuerdo a las clasificaciones de SCT y la NMX C-416, el VRS obtenido en las muestras de suelo mejorado con CaO (VRS=29%) hace que este material sea apto para la construcción de sub-rasantes. Asimismo, los parámetros obtenidos en los suelos mejorados cumplen con los parámetros establecidos por el IMT (2001) para suelos finos susceptibles para construcción de pavimentos.
  - Los análisis estadísticos demuestran que al menos el 90% de los suelos del NAICM mejorados con óxido de calcio tienen parámetros de  $E_r$  y  $S_e$  cercanos a los recomendados por el *Florida Department of Transportation* para lograr soportar 100,000 ejes equivalentes a  $18,000 \text{ lb/plg}^2$ .
  - Las deformaciones que se obtuvieron en los caminos de acceso existentes, realizados con tezontle estabilizado con geotextiles son del orden de las deformaciones que se obtuvieron en las plataformas estabilizadas con óxido de calcio.
  - Se puede resumir que, de acuerdo a los resultados obtenidos, el uso de óxido de calcio para el mejoramiento de las arcillas del NAICM hace que estas sean factibles para la construcción de caminos temporales.
  - El uso de inclusiones como las empleadas en la Plataforma 4 homogeniza y reduce las deformaciones, lo que se traduce en un mejor desempeño del pavimento.

- Las plataformas donde se utilizó equipo especializado para la mezcla de suelo con CaO (plataformas 3 y 8) fueron las que obtuvieron una mejor uniformidad en las deformaciones producidas en las pruebas de FWD.
- Conjuntando los análisis técnicos y constructivos, se puede concluir que el uso de equipos estabilizadores es favorable dentro del procedimiento constructivo para el mejoramiento con óxido de calcio.
- A partir de los resultados obtenidos es posible asegurar que el mejoramiento de suelos con óxido de calcio abre las puertas a usos más allá de su uso para caminos. Ya que podría ser útil para la construcción de plataformas y como desplante de estructuras.

## **9. Recomendaciones**

### **9.1. Recomendaciones técnicas**

- De acuerdo a las conclusiones, es factible evaluar el uso de cemento Portland como segundo agente estabilizador para ganar una mejora sustancial que permita el uso del suelo del NAICM como materiales aptos para la construcción de caminos más demandantes.
- Debido a que las propiedades de las arcillas del NAICM varían dependiendo la zona del Ex-lago de Texcoco de donde se obtengan, por lo que sería valioso realizar una zonificación local de éste conforme a sus parámetros, tomando en cuenta algunos trabajos previos que fueron realizados por la Universidad de Chapingo a mediados del siglo pasado.
- Es necesario considerar seriamente los parámetros de permeabilidad en los suelos mejorados con CaO. Estos estudios ya se encuentran en ejecución por parte del Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- Igualmente, es ineludible tomar en cuenta los estudios de laboratorio que está realizando el Instituto de Ingeniería de la UNAM, para definir de una manera más profunda y detallada las propiedades mecánicas de los suelos mejorados con óxido de calcio.
- Es digno de estudiar el efecto en el cambio del arreglo de las inclusiones realizadas a partir de CaO, tanto de manera teórica como experimental, ya que el arreglo implementado en la Plataforma 4 fue propuesto de

forma empírica, sin que se llegue a abundar en su funcionamiento para este caso en particular.

- Es importante considerar la investigación profunda del suelo mejorado con óxido de calcio para diversos usos.

## 9.2. *Recomendaciones constructivas*

- Se recomienda evaluar el uso de un rodillo compactador dentado para comparar su eficiencia respecto al rodillo liso implementado en el procedimiento constructivo explicado en el punto 6.1 de este documento.
- Es importante considerar el cambio en la dosificación de óxido de calcio sólo en caso de que se tengan resultados locales de pruebas de pH, índice y geomecánicas; ya que de lo contrario una disminución puede provocar decrementos importantes en las reacciones químicas y un incremento en su dosificación incrementaría mucho el costo con respecto a los beneficios obtenidos por dicho incremento en el contenido de CaO.
- De demostrarse la estanqueidad de los suelos mejorados con óxido de calcio, un probable uso en la construcción de caminos definitivos sería como el esquematizado en la imagen 14, ya que impide el contacto del agua con la base y la sub-base al tiempo que mejora las condiciones de apoyo.

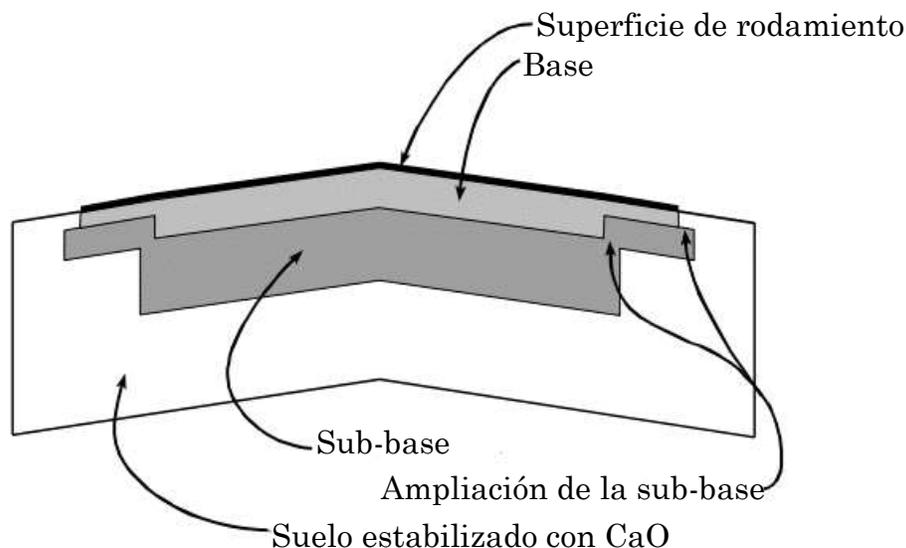


Imagen 14. Representación esquemática constructiva para la construcción de los caminos.

- Se recomienda el uso de equipo estabilizador, ya que éste permite mayor rendimiento y una mejor dosificación del óxido de calcio.

#### *9.2.1. Procedimiento constructivo recomendado*

A partir de los datos analizados, es posible definir que procedimiento constructivo adecuado para la construcción de caminos provisionales es el que se describe a continuación:

#### Etapa 1 (propuesta).- Perforación y colado de inclusiones a base de óxido de calcio

- a) Se procede a perforar barrenos de 3 m de profundidad con un diámetro de 4", conformando una retícula de 1.5 m x 1.5 m, estabilizando la perforación con lodo.
- b) Se coloca una membrana para evitar el fracturamiento hidráulico de la arcilla durante el vertido de la mezcla que conformará las inclusiones.
- c) Se vierte la mezcla de suelo-cal hasta llenar por completo las perforaciones

#### Etapa 1 (alternativa).- Construcción de inclusiones a base de CaO por medio de licuación

- a) Se procede a licuar los suelos con óxido de calcio al 10% de su peso seco, realizando inclusiones de 3 m de profundidad con un diámetro de 4", conformando una retícula de 1.5 m x 1.5 m.
- b) Debido a la perturbación y al remoldeo de las arcillas se deberá dejar reposar el suelo por al menos 5 días, para asegurar la reacción con el CaO.

#### Etapa 2.- Dosificación y homogenización de óxido de calcio-suelo

- a) Dos días después de la construcción de las inclusiones se dosifica y mezcla el óxido de calcio (pulverizado) con los primeros 50 cm de suelos, haciendo uso de un equipo estabilizador que añada un 10% de cal respecto al peso seco del material del sitio.
- b) En seguida se deja reposar para permitir la reacción el óxido de calcio durante un lapso de 15 a 30 minutos.
- c) Finalmente se realiza el cerrado con el rodillo estático para aglutinar el material de la plataforma.

#### Etapa 3.- Curado

- a) Se aplican riegos de agua por tres días para evitar erosión.

#### Etapa 4.- Nivelación y compactación

- a) Se realiza la conformación y compactación de la plataforma mediante el uso de motoconformadora y rodillo para conformar y para dar pendientes y cunetas.
- b) Finalmente, quedan listas las superficies de rodamiento para el ingreso de camiones y vehículos de trabajo.

### *9.2.2. Protocolo de supervisión recomendado*

Una vez presentada toda la información anterior, se propone un método para la supervisión de mejoramientos enfocado en la calidad de dicho mejoramiento.

#### 1) Verificación y ajuste de la dosificación de óxido de calcio.

Inicialmente, es importante considerar a diferencia de muchos otros mejoramientos de suelo, éste ocurre a partir de reacciones químicas y por tanto es necesario asegurarse que se la dosificación de óxido de calcio sea la correcta, de lo contrario se deberá ajustar.

La manera más sencilla de verificar la dosificación es por medio de pruebas de pH realizadas en muestras de 100 g de suelo natural tomadas al azar, debiendo tomar al menos una lectura de pH por cada tramo de 100 m a lo largo del trazo del camino.

#### 2) Verificación de la homogeneidad de la mezcla

En seguida, es importante asegurarse que se la mezcla de suelo-CaO sea homogénea; sin embargo, el uso de equipo estabilizador permite lograr este propósito.

Por lo tanto, para los casos en los que se ocupe equipo de estabilización, la inspección de la homogeneidad de la mezcla puede ser verificada visualmente.

Pero en caso de no utilizarse equipo estabilizador, será necesario tomar al menos una muestra de mezcla de suelo-CaO a cada 20 m, ya que este factor (homogeneidad de la mezcla) es fundamental en este tipo de mejoramiento.

#### 3) Verificación del curado

Para cerciorarse de que el proceso de curado ha iniciado se deberán realizar pruebas para verificar que los parámetros de plasticidad (LL, LP e IP) han cambiado por los del suelo mejorado.

La toma de muestras para este puede seguir el mismo criterio que el mencionado en el inciso anterior de este protocolo.

#### 4) Supervisión durante la nivelación y compactación

Se deberá verificar que el equipo de compactación realice las pasadas indicadas para que la capa de suelo estabilizado con CaO llegue al índice de compactación requerido (90% PVSM) conforme a la prueba Proctor estándar (Método A).

5) Verificación del grado de compactación

Posteriormente, se deberán hacer pruebas de compactación *in situ* como la ASTM D1556 para verificar que se haya obtenido el grado de compactación del 90%.

6) Verificación de la compactación con penetrómetro

Posteriormente, se recomienda realizar al menos cinco pruebas con penetrómetro dinámico ligero (DCP) para verificar la calidad del suelo mejorado.

7) Verificación de la continuidad en la reacción de suelo con óxido de calcio

Finalmente, en casos específicos donde se tenga duda sobre la existencia de la reacción puzolánica, se podrá verificar la existencia de ésta realizando pruebas de rayos-x que comprueben la existencia de hidratos de silicato de calcio (CSH) e hidratos de aluminato de calcio (CAH).

## 10. Referencias:

Asociación Mexicana de Fabricantes de Cal. (2015). *Secado y estabilización de arcilla saturada con óxido de calcio (cal viva); para conformación de losas de trabajo y superficies de rodamiento a nivel de sub-rasante en el predio del NAICM*. Zapopan, Jalisco: Asociación Mexicana de Fabricantes de Cal.

Florida Department of Transportation. (2016). *Flexible Pavement Design Manual*. Tallahassee: FDOT.

Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México. (s.f.). *Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México*. Recuperado el 01 de Febrero de 2016, de <http://www.aeropuerto.gob.mx/>

Instituto Mexicano del Transporte. (2000). *Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares*. Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.

Little, D. N. (1995). *Handbook of Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime*. Texas: Lime Association of Texas.

National Lime Association. (2004). *Lime-Treated Soil Construction Manual*. National Lime Association.

- Olguín, E. (s.f.). Análisis de resultados. En R. Zúñiga, & E. Olguín, *Prueba de placa* (págs. 4 - 6). Ciudad de México: TGC Geotecnia.
- Santoyo Villa, E., Ovando Shelley, E., Mooser Hawtree, F., & León Plata, E. (2005). *Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México*. México: TGC Geotecnia.
- Servicios de Ingeniería y Control de Calidad. (2015). *Prueba de Placa Plataforma 1, Prueba 1*. Cuautlancingo, Puebla.
- Servicios de Ingeniería y Control de Calidad. (2015). *Prueba de Placa Plataforma 2, Prueba 3*. Cuautlancingo, Puebla.
- Servicios de Ingeniería y Control de Calidad. (2015). *Prueba de Placa Plataforma 4, Prueba 2*. Cuautlancingo, Puebla.
- Viatest. (2015). *Análisis estructural en plataformas de los caminos de acceso en el NAICM*. Zapopan, Jalisco.
- Viatest. (2016). *Análisis estructural: Nuevo Aeropuerto de la Ciudad de México*. Zapopan.
- Villegas Arizmendi, J. A., & Villegas Arizmendi, J. S. (2015). *Curvas de compresibilidad PCA-3 y PCA-7*. Ciudad de México.
- Villegas Arizmendi, J. A., & Villegas Arizmendi, J. S. (2015). *Pruebas índice PCA-3 y PCA-7*. Ciudad de México.
- Villegas Arizmendi, J. A., & Villegas Arizmendi, J. S. (2015). *Reporte de pruebas índice a sondeo SE-3*. Ciudad de México.
- Villegas Arizmendi, J. A., & Villegas Arizmendi, J. S. (2015). *Reporte de pruebas índice a sondeos SE-1 y SE-2*. Ciudad de México.
- Villegas Arizmendi, J. A., & Villegas Arizmendi, J. S. (2015). *Reporte de pruebas índice a sondeos SE-4*. Ciudad de México.
- Villegas Arizmendi, J. A., & Villegas Arizmendi, J. S. (2015). *Reporte de pruebas índice a sondeos SE-5 y SE-6*. Ciudad de México.
- Villegas Arizmendi, J. A., & Villegas Arizmendi, J. S. (2015). *Resumen de límites de sondeos SE-1 a SE-6*. Ciudad de México.

ANEXO 1

Análisis estructural en las plataformas de prueba para los caminos de acceso en el NAICM mediante el uso de FWD.

–Diciembre de 2015 –

# **Análisis estructural en las plataformas de prueba para los caminos de acceso en el NAICM mediante el uso de FWD.**



Diciembre de 2015

# Deflexiones en el NAICM

**Tramos donde se realizaron las pruebas FWD:**

- Prueba en suelo existente
- Tramo 1      Camino de prueba
- Tramo 2      TGC
- Tramo 3      CFE

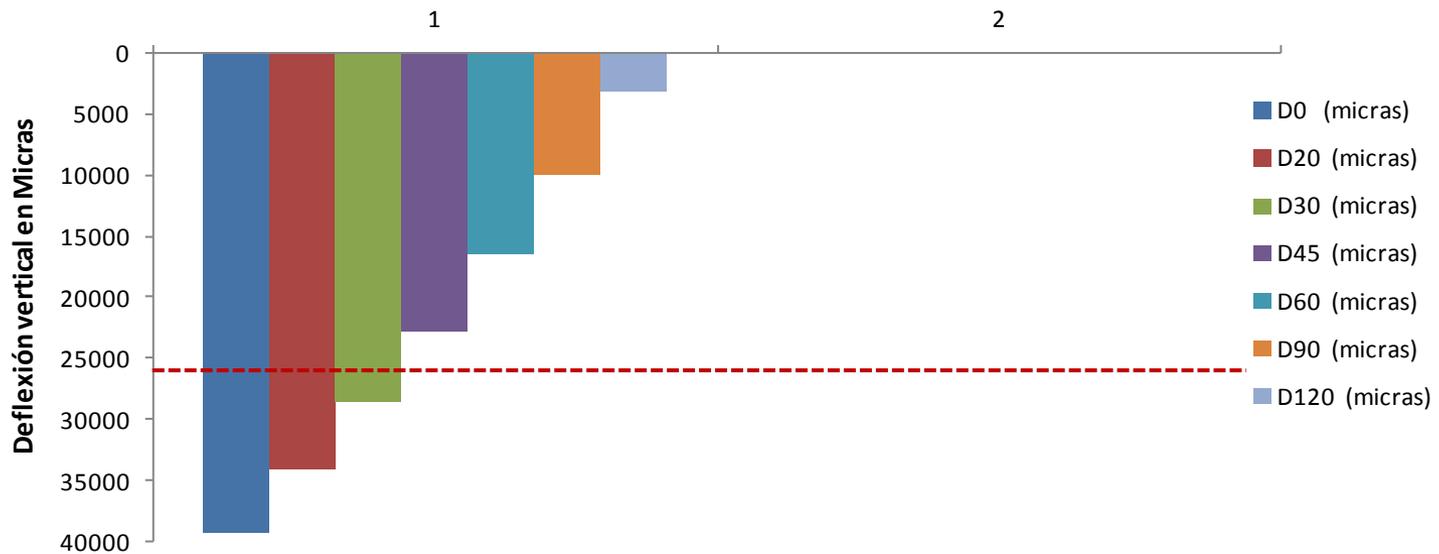
# Deflexiones en el NAICM

Prueba en camino existente



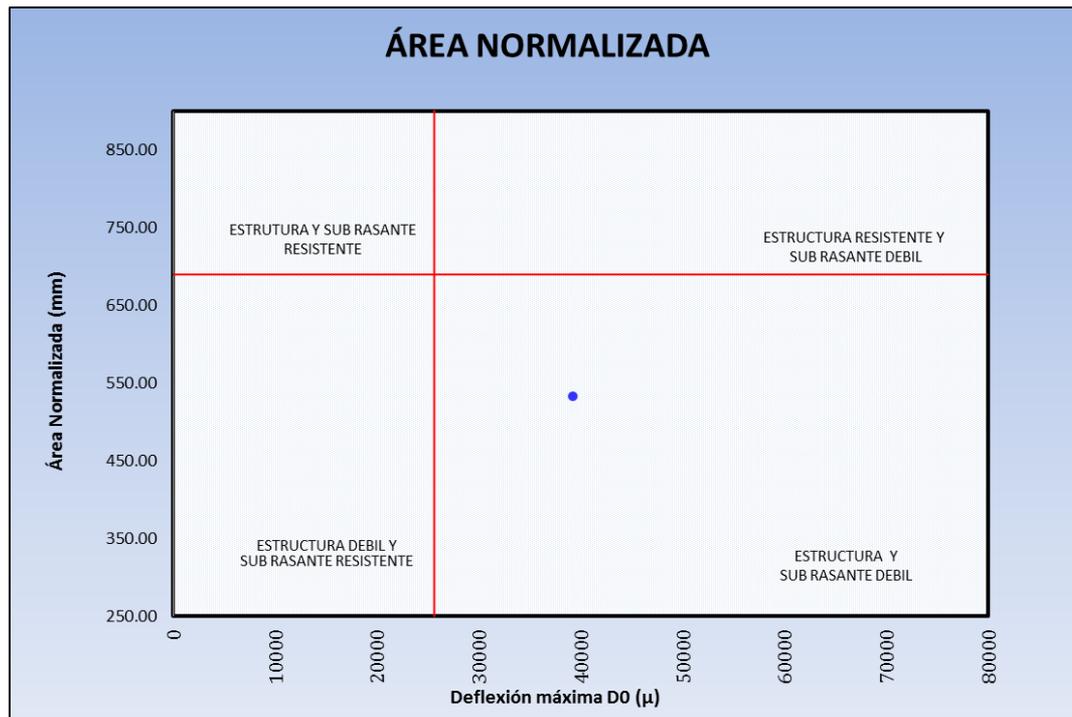
# Deflexiones en el NAICM

## Prueba en camino existente



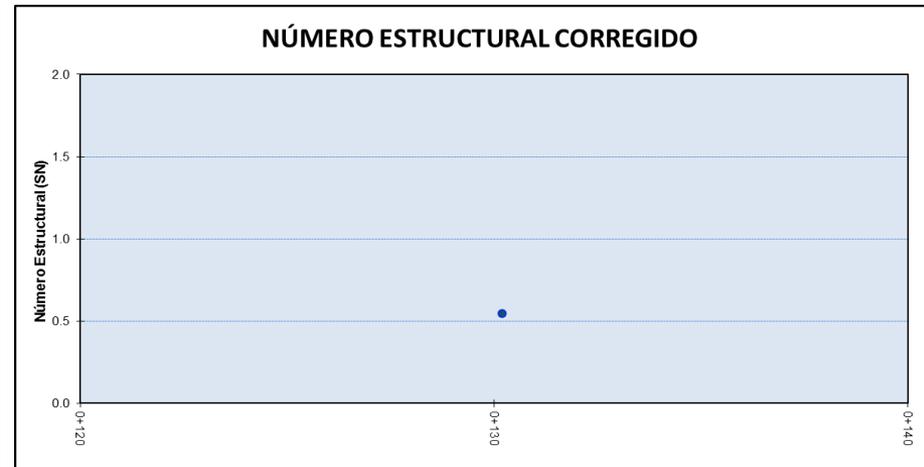
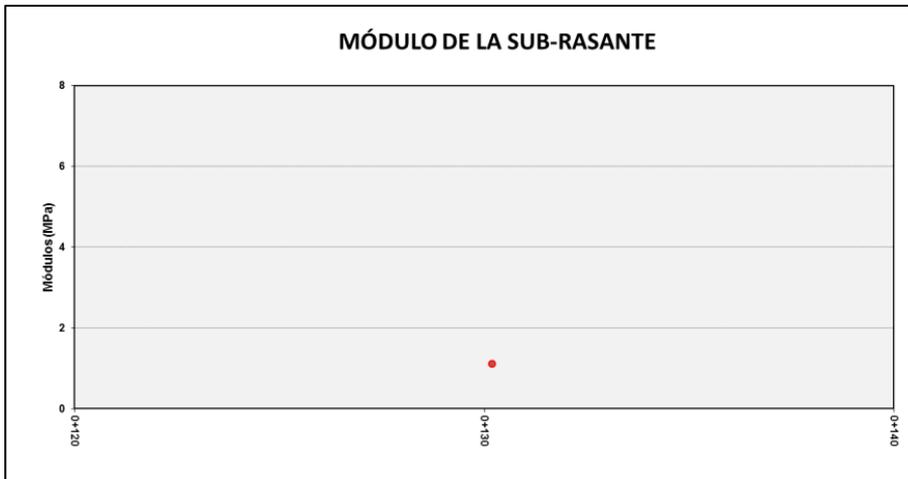
# Deflexiones en el NAICM

## Prueba en camino existente



# Deflexiones en el NAICM

## Prueba en camino existente



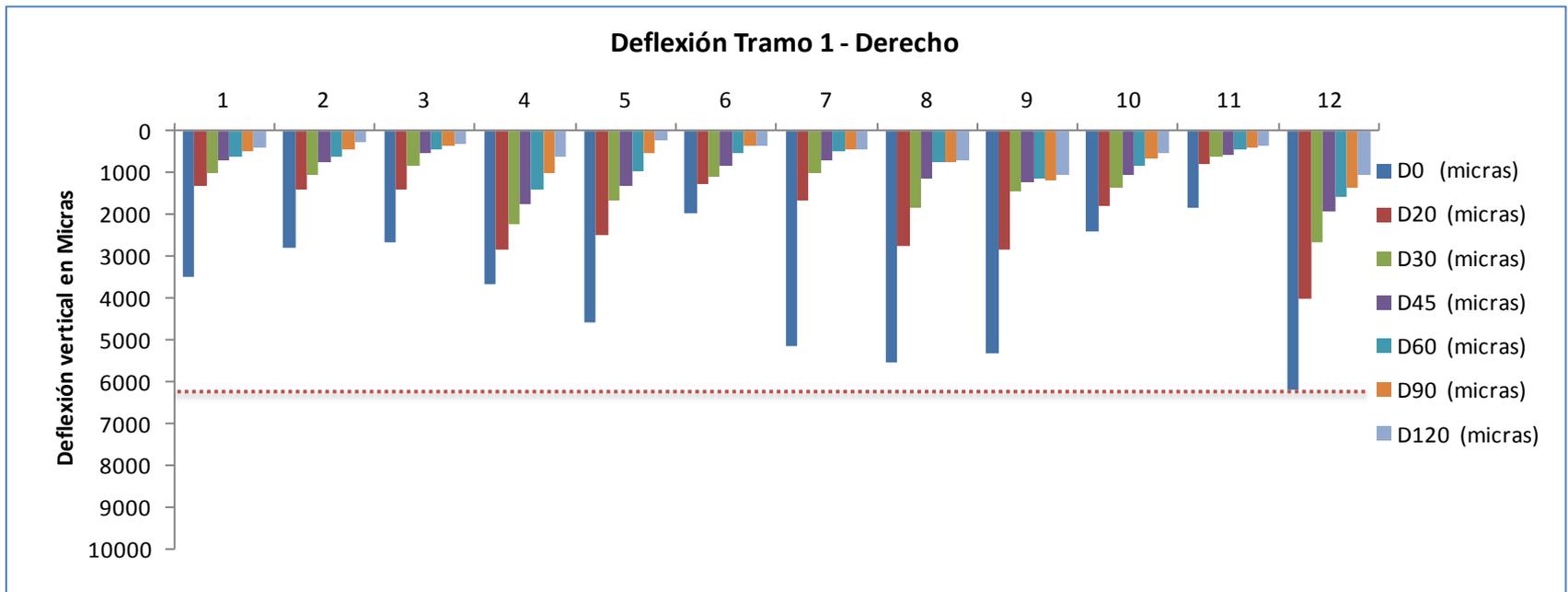
# Deflexiones en el NAICM

**Tramo 1**      **Camino de prueba**



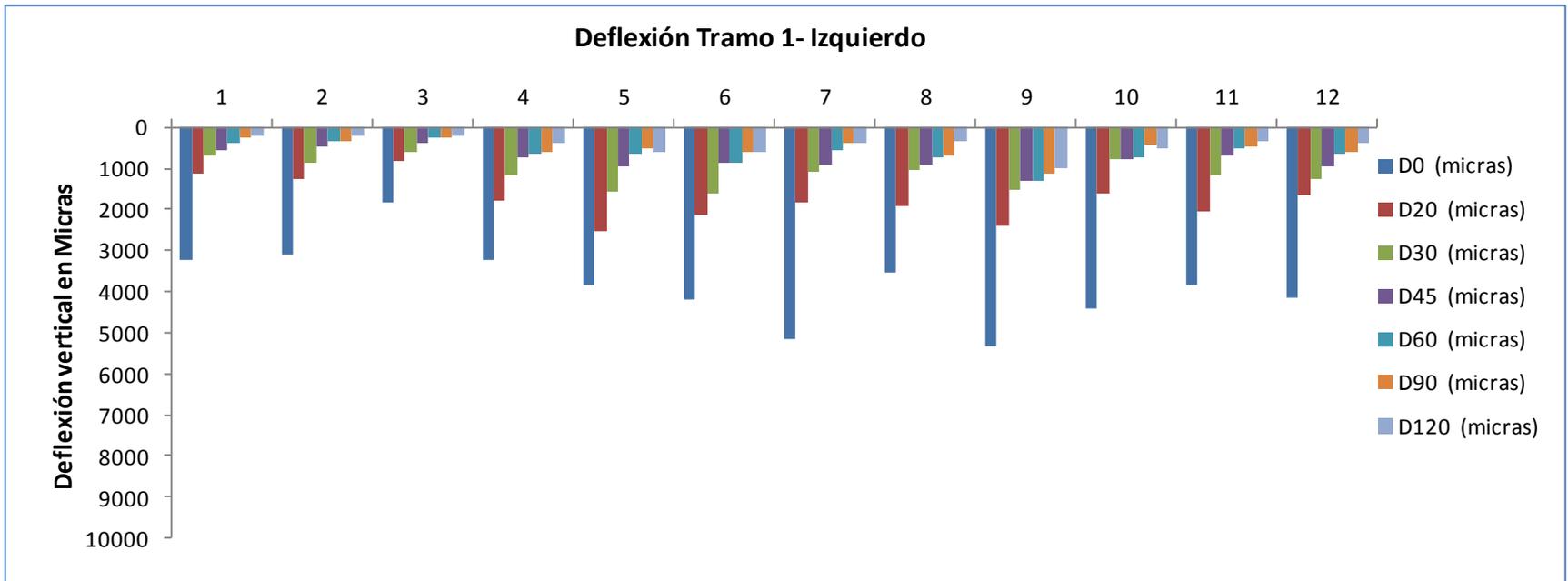
# Deflexiones en el NAICM

## Tramo 1 Camino de prueba



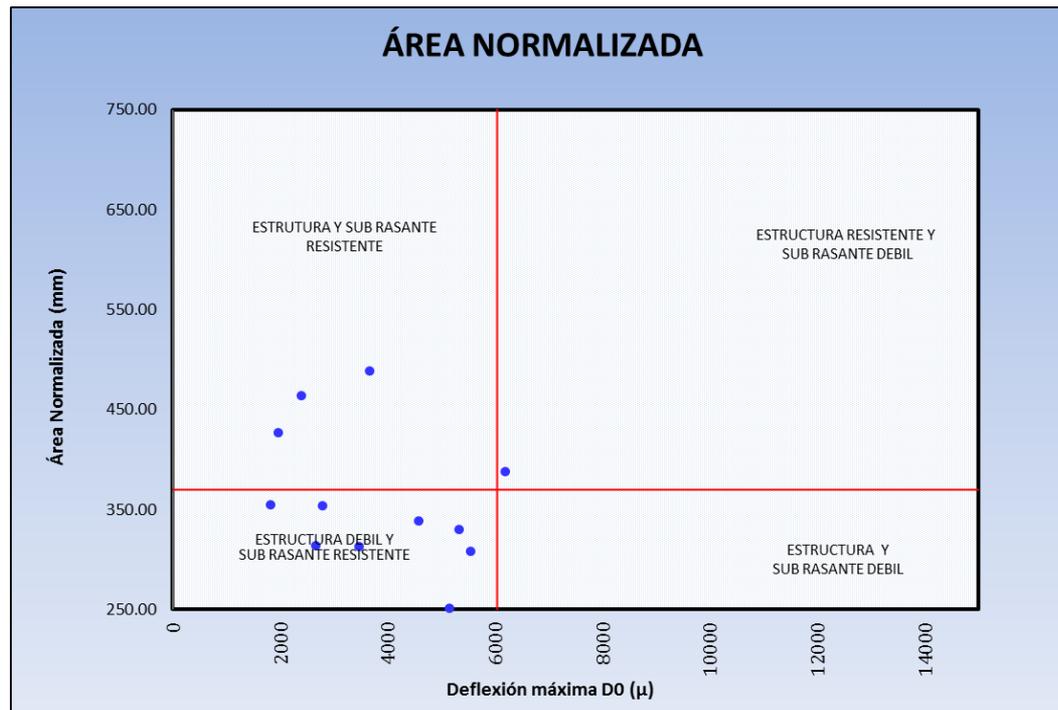
# Deflexiones en el NAICM

## Tramo 1 Camino de prueba



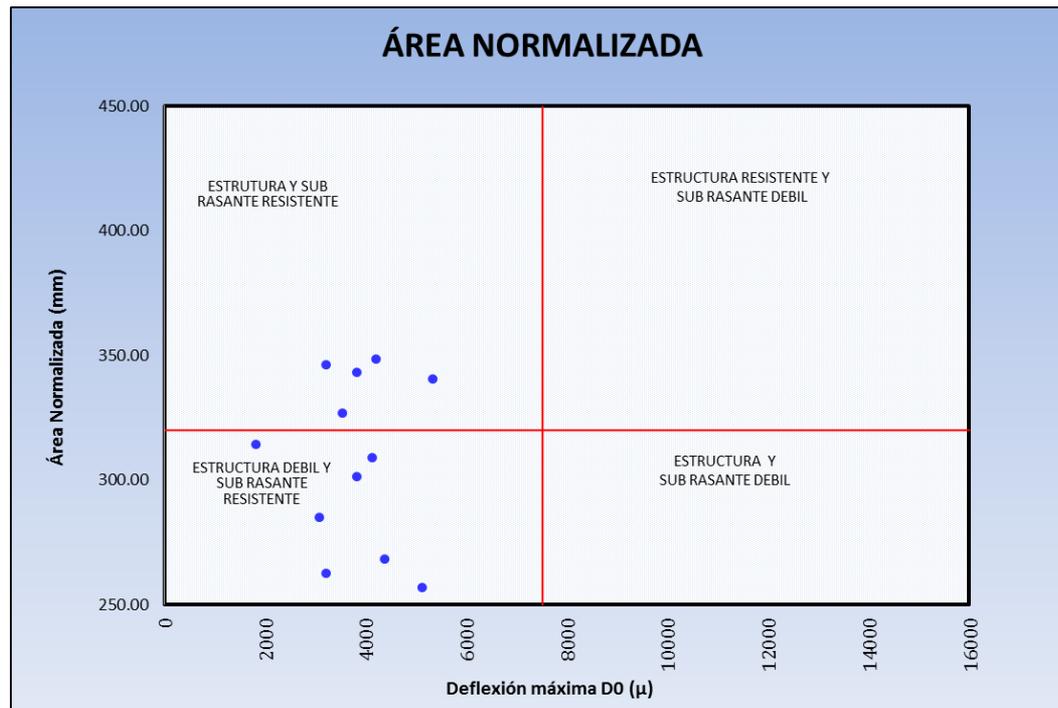
# Deflexiones en el NAICM

Tramo 1 der Camino de prueba



# Deflexiones en el NAICM

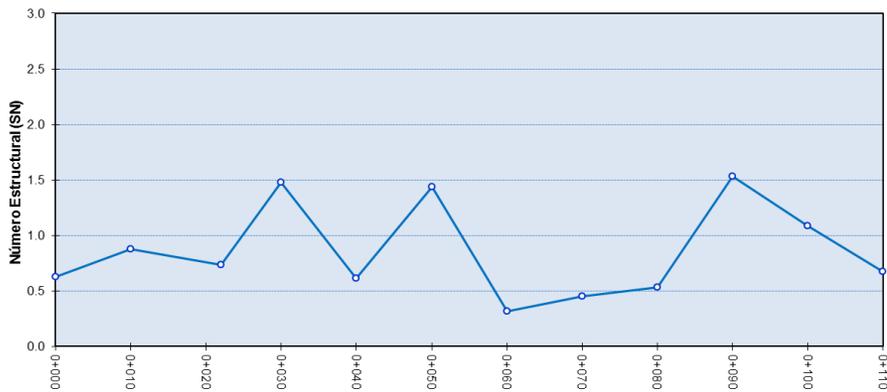
Tramo 1 izq Camino de prueba



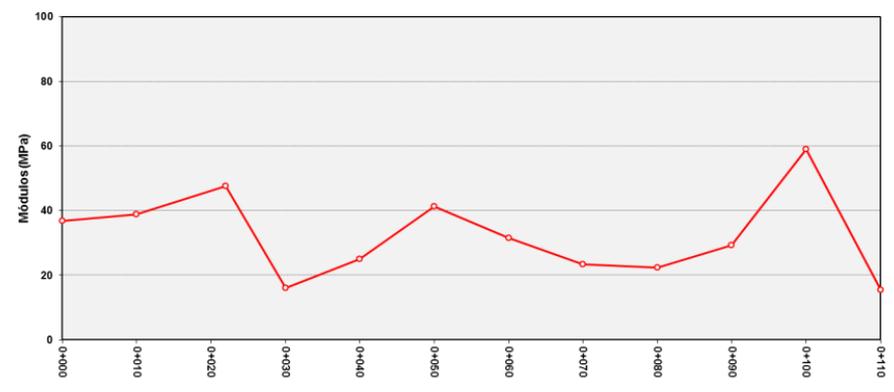
# Deflexiones en el NAICM

## Tramo 1 der Camino de prueba

NÚMERO ESTRUCTURAL CORREGIDO



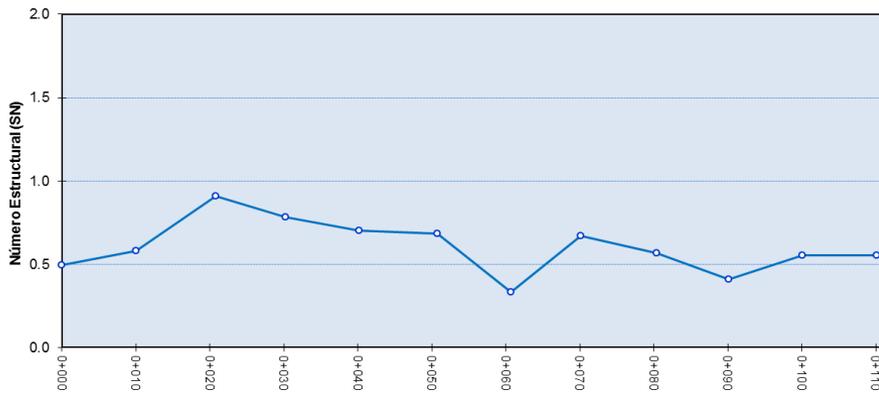
MÓDULO DE LA SUB-RASANTE



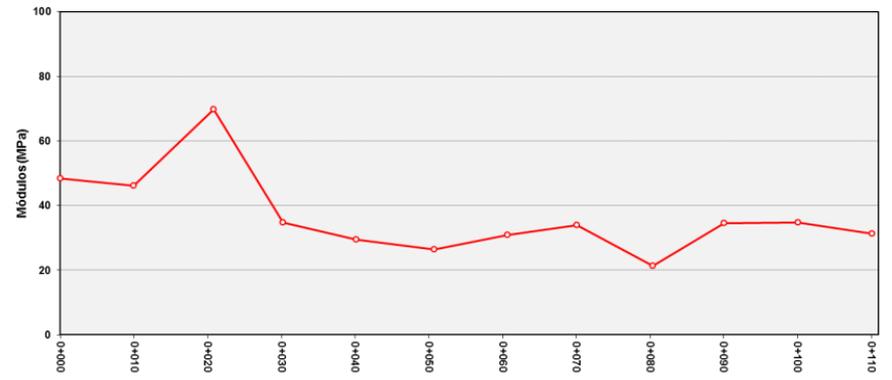
# Deflexiones en el NAICM

Tramo 1 izq Camino de prueba

NÚMERO ESTRUCTURAL CORREGIDO



MÓDULO DE LA SUB-RASANTE



# Deflexiones en el NAICM

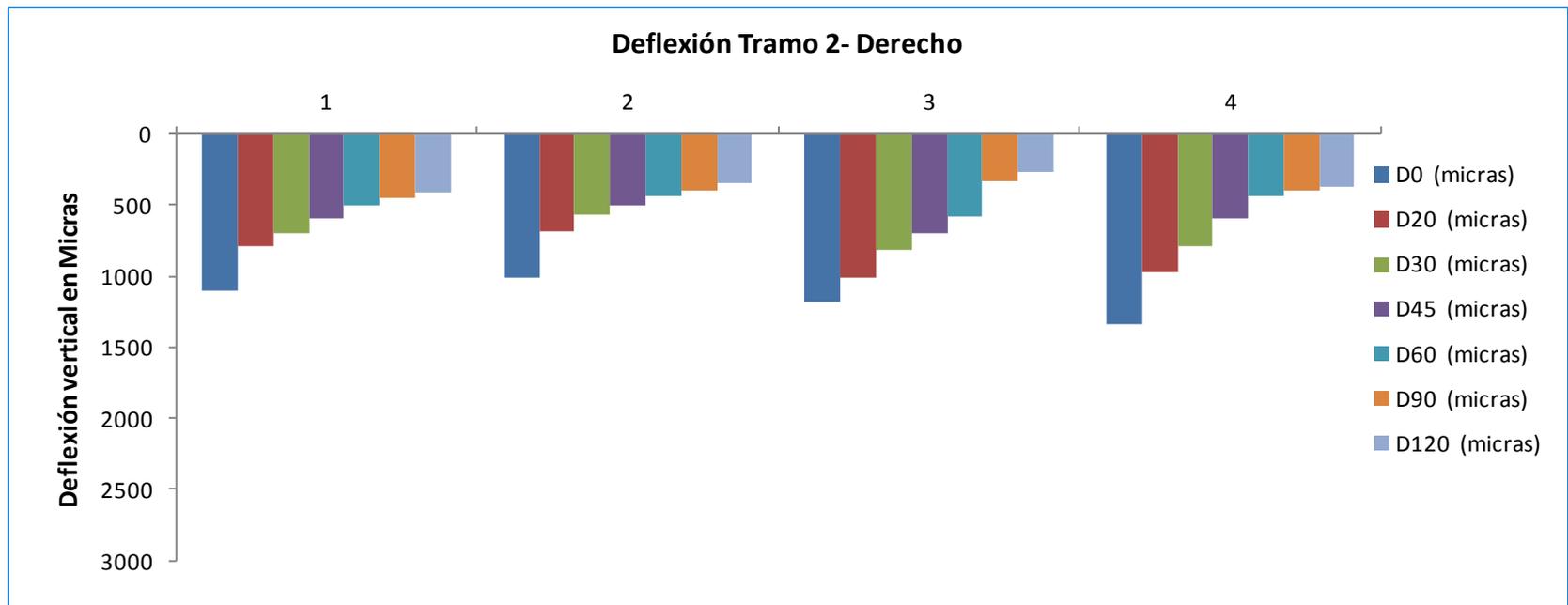
Tramo 2

TGC



# Deflexiones en el NAICM

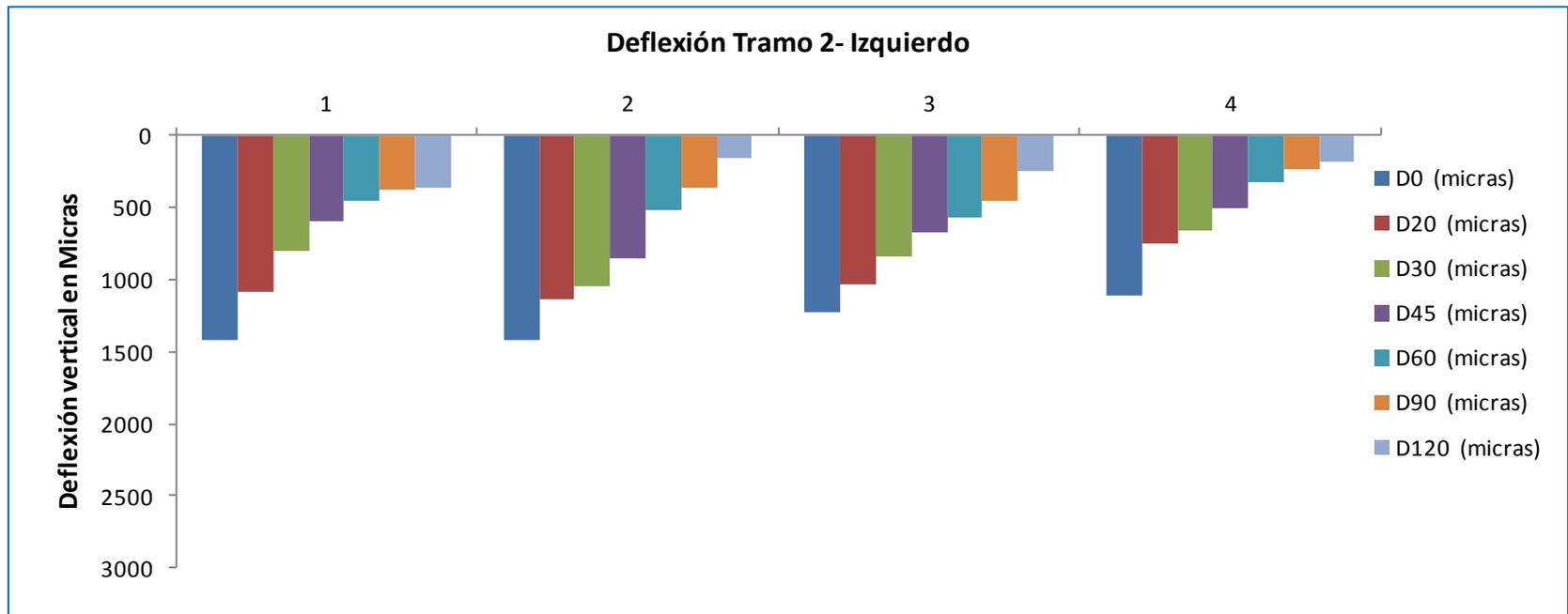
Tramo 2 TGC



# Deflexiones en el NAICM

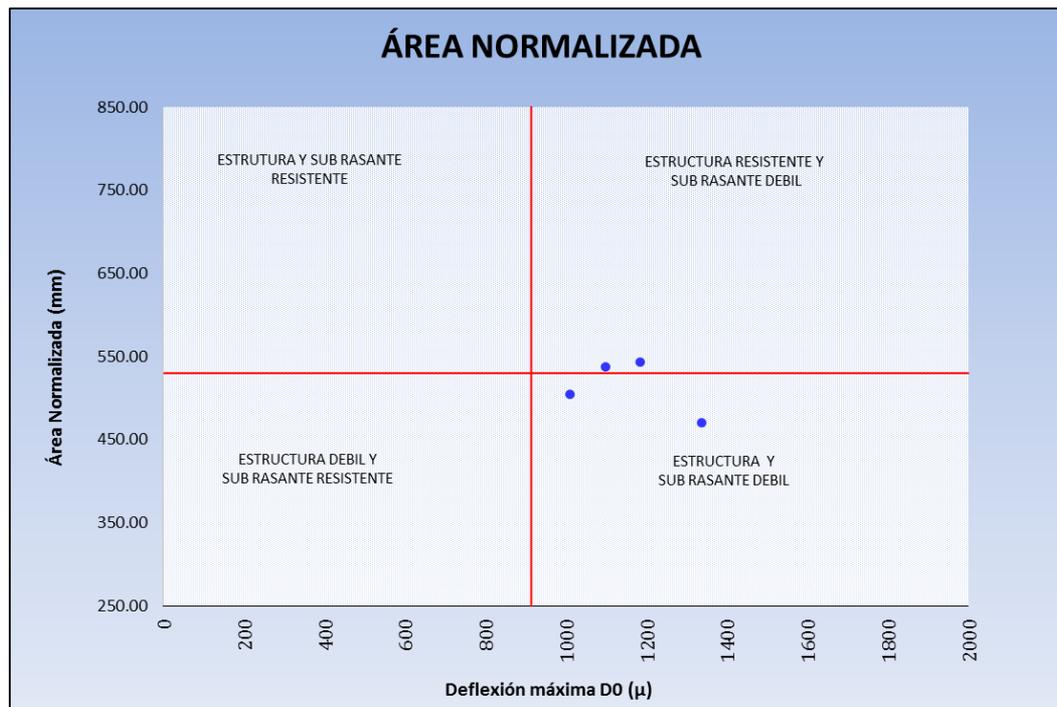
Tramo 2

TGC



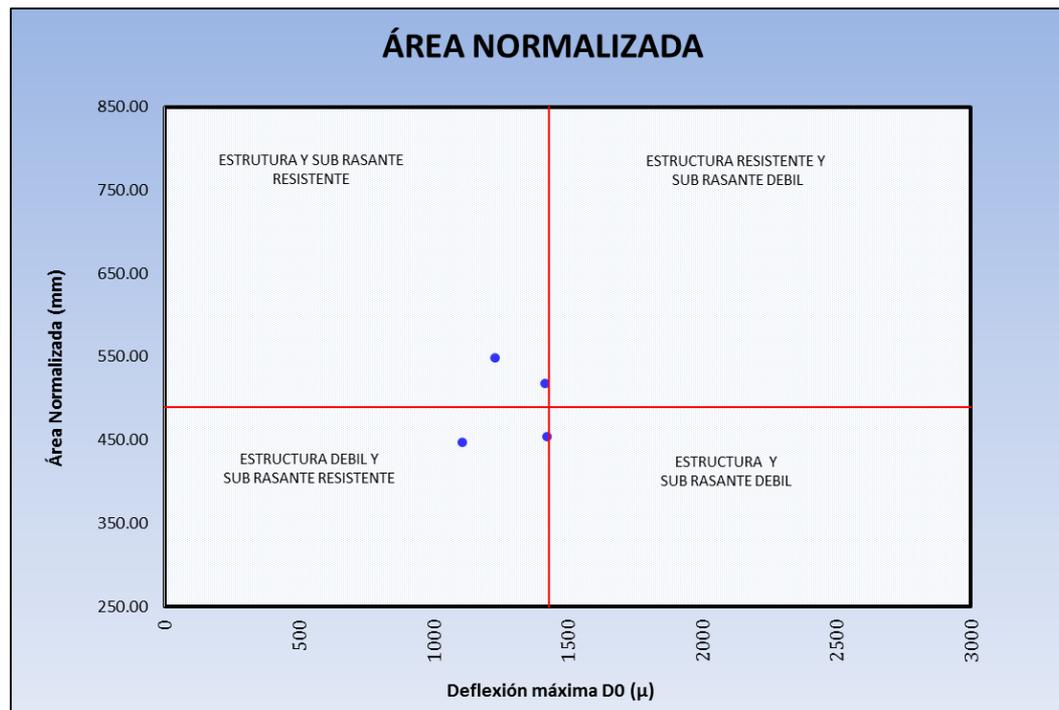
# Deflexiones en el NAICM

Tramo 2 der TGC



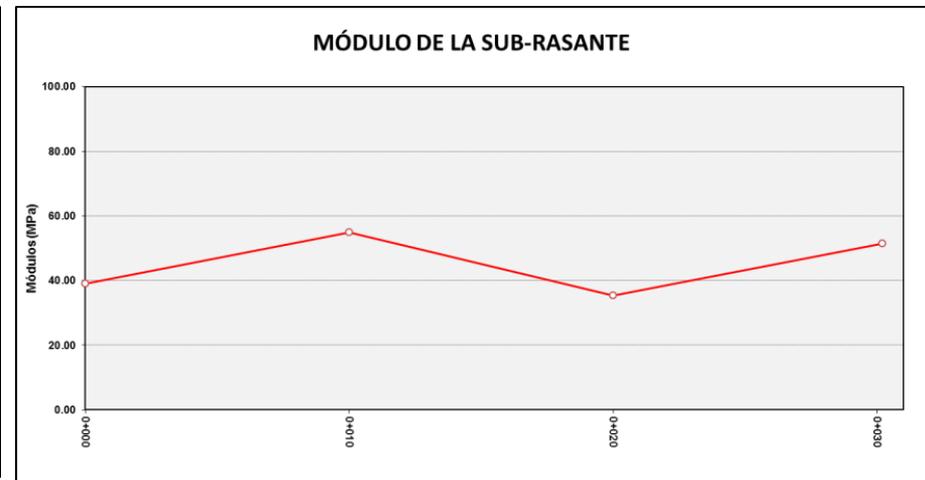
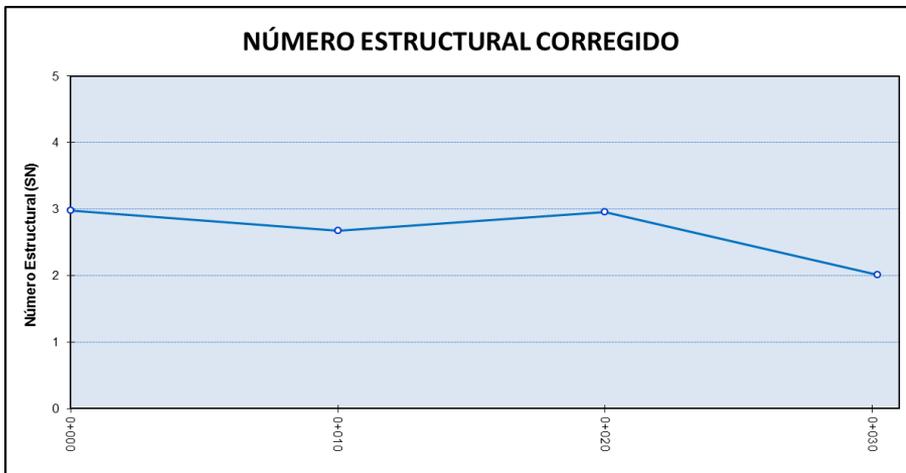
# Deflexiones en el NAICM

Tramo 2 izq TGC



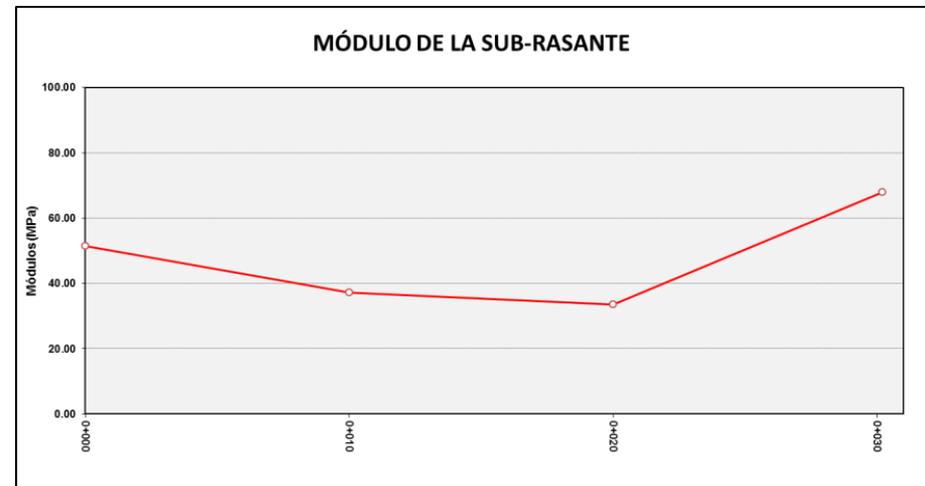
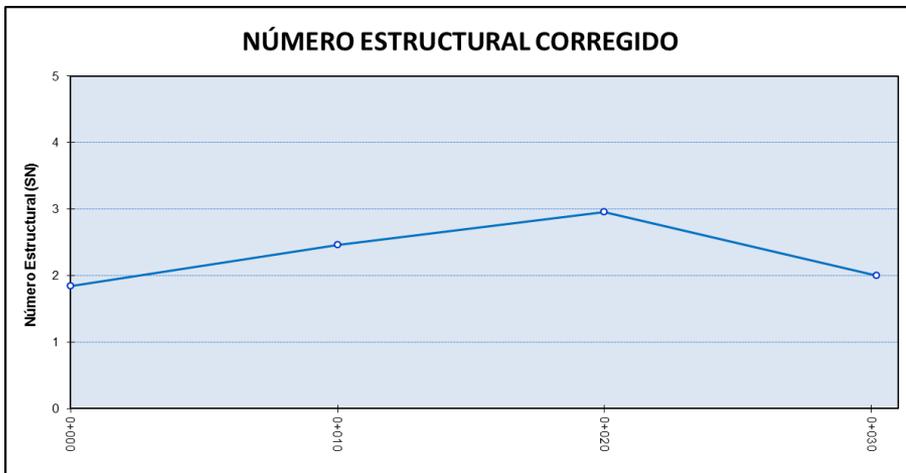
# Deflexiones en el NAICM

## Tramo 2 der TGC



# Deflexiones en el NAICM

Tramo 2 izq TGC



# Deflexiones en el NAICM

Tramo 3

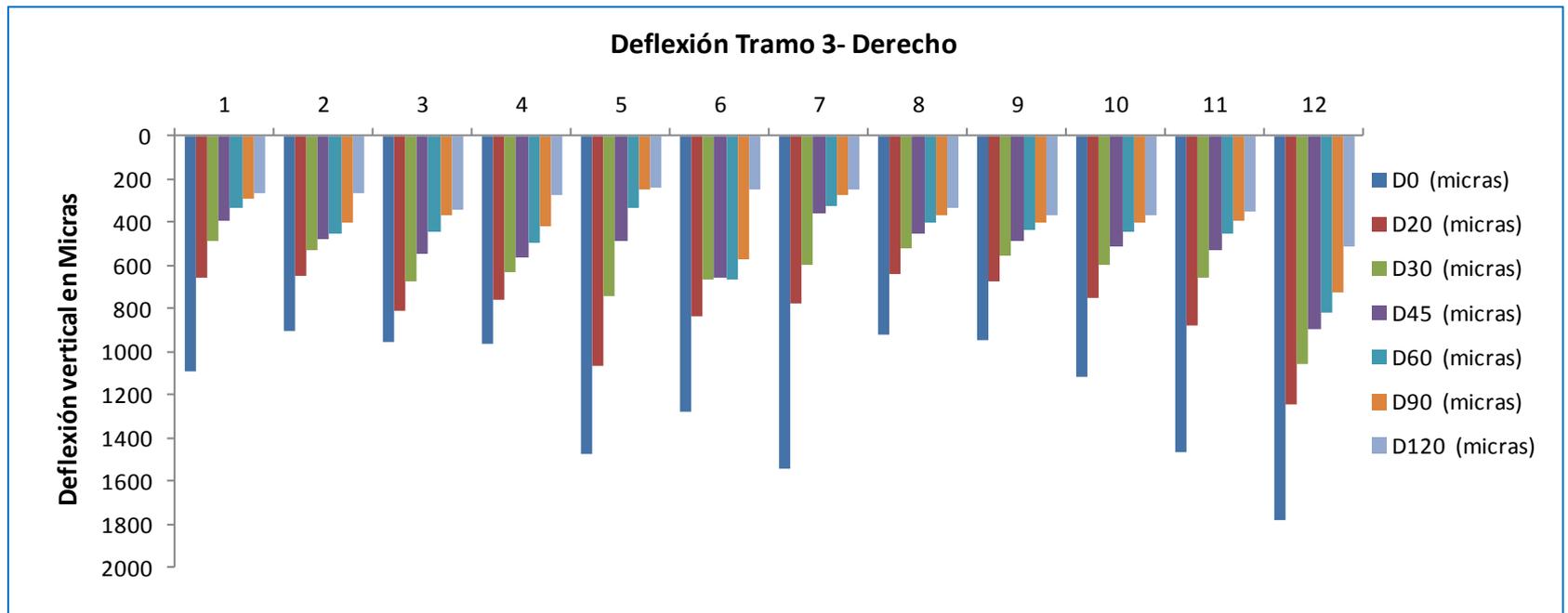
CFE



# Deflexiones en el NAICM

Tramo 3

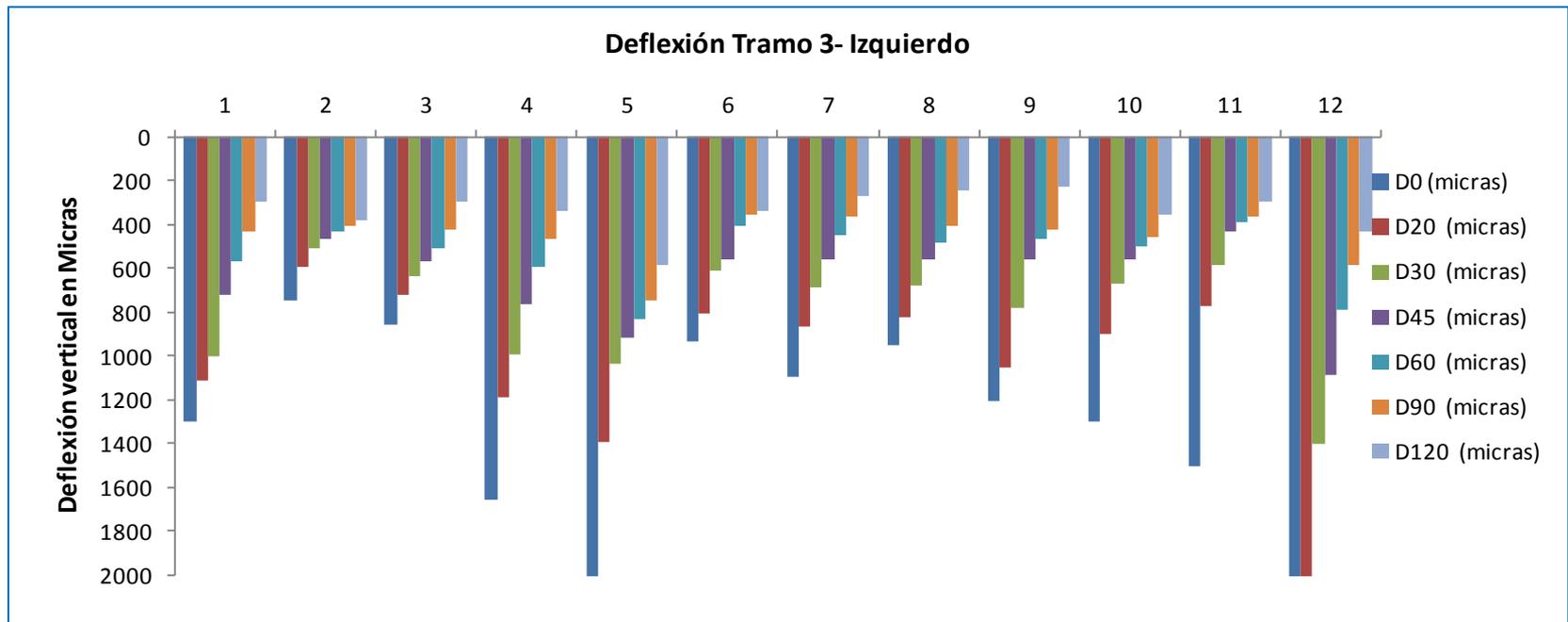
CFE



# Deflexiones en el NAICM

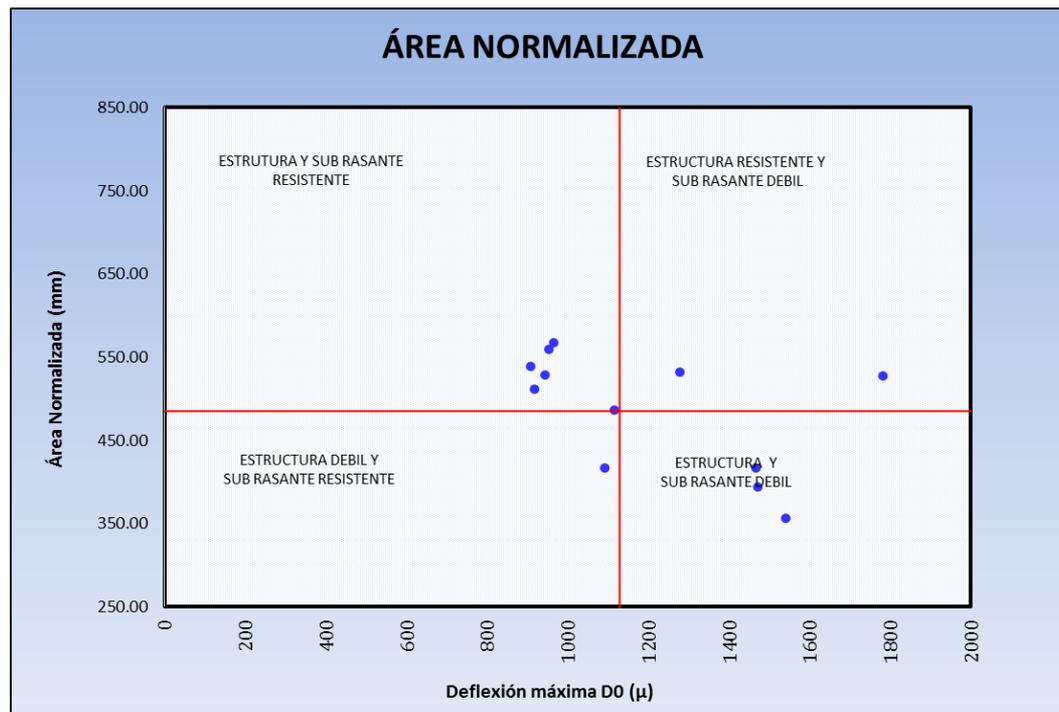
Tramo 3

CFE



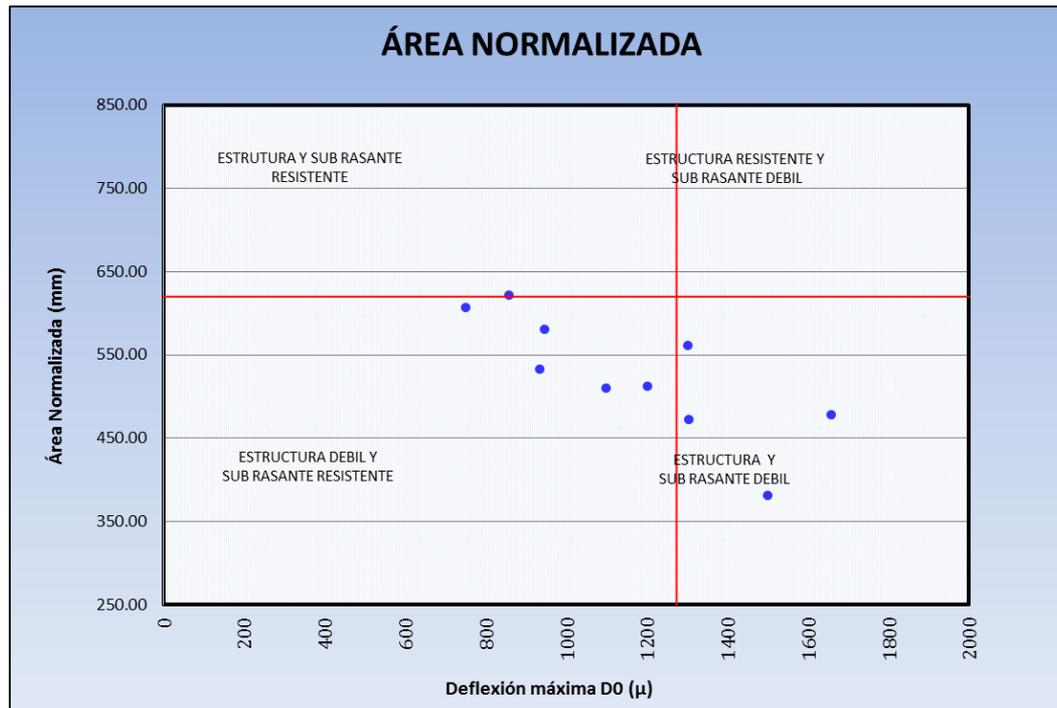
# Deflexiones en el NAICM

Tramo 3 der CFE



# Deflexiones en el NAICM

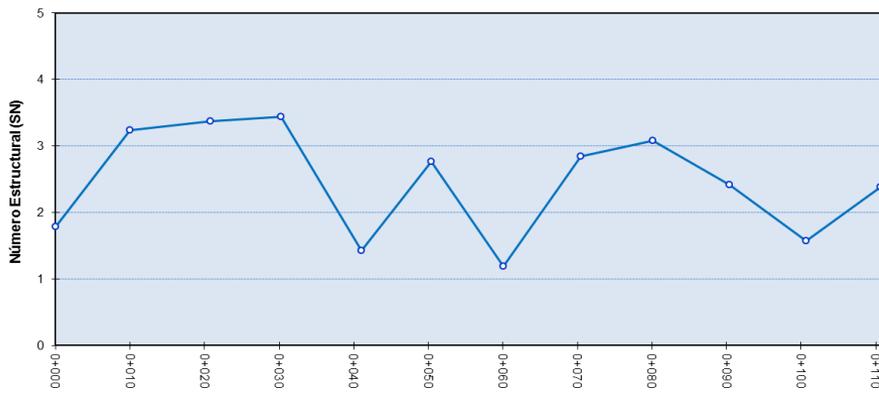
Tramo 3 izq CFE



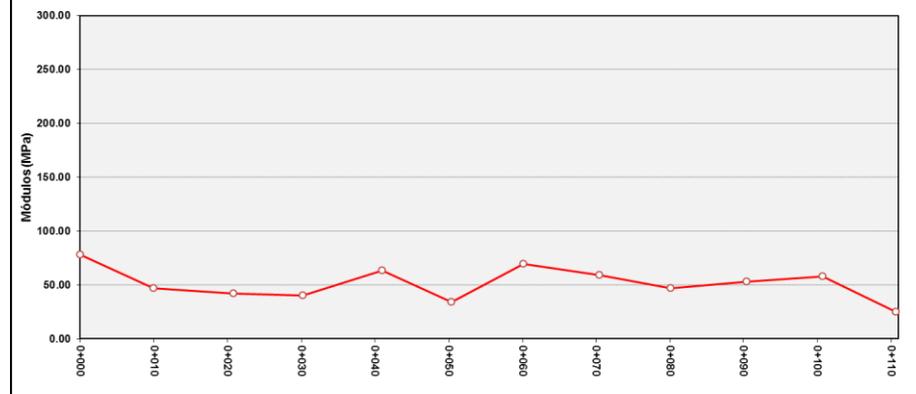
# Deflexiones en el NAICM

## Tramo 3 der CFE

NÚMERO ESTRUCTURAL CORREGIDO



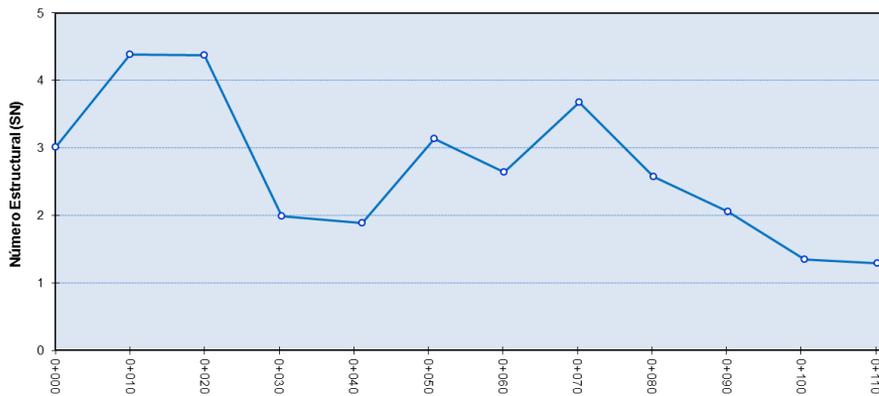
MÓDULO DE LA SUB-RASANTE



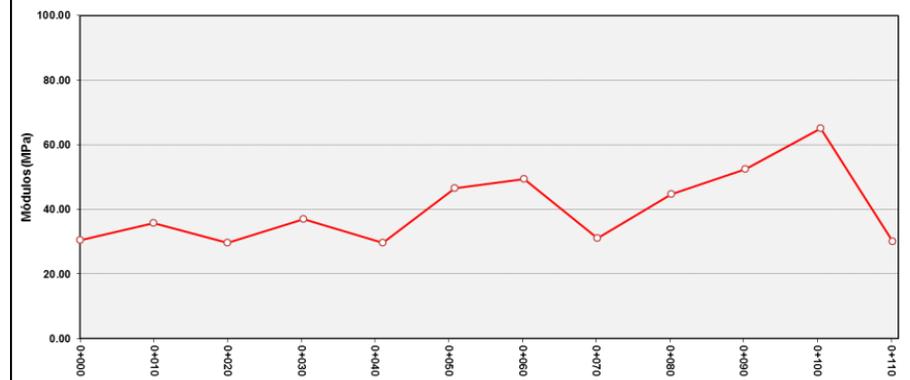
# Deflexiones en el NAICM

Tramo 3 izq CFE

NÚMERO ESTRUCTURAL CORREGIDO



MÓDULO DE LA SUB-RASANTE



# Resultados de FWD en NAICM

## Resumen de los resultados analizados

- Módulos de la subrasante ( $E_{sg}$ )
- Módulo de la estructura del pavimento ( $E_p$ )

# Resultados de FWD en NAICM

## Módulo de la subrasante $E_{SG}$

TRAMO 1			TRAMO 2			TRAMO 3		
IZQUIERDO	DERECHO	PROMEDIO	IZQUIERDO	DERECHO	PROMEDIO	IZQUIERDO	DERECHO	PROMEDIO
48.30	36.69	42.50	51.47	38.95	45.21	30.39	77.74	54.07
46.16	38.91	42.53	37.19	54.84	46.02	35.75	46.91	41.33
69.71	47.47	58.59	33.50	35.39	34.45	29.63	41.84	35.74
34.72	16.00	25.36	67.95	51.51	59.73	36.89	40.21	38.55
29.50	25.08	27.29				29.67	63.08	46.37
26.36	41.27	33.82				46.55	34.15	40.35
30.93	31.51	31.22				49.42	69.75	59.58
34.00	23.35	28.68				31.05	58.87	44.96
21.40	22.36	21.88				44.80	46.78	45.79
34.60	29.29	31.94				52.41	53.21	52.81
34.80	59.05	46.93				64.99	57.89	61.44
31.28	15.33	23.31				30.13	24.89	27.51

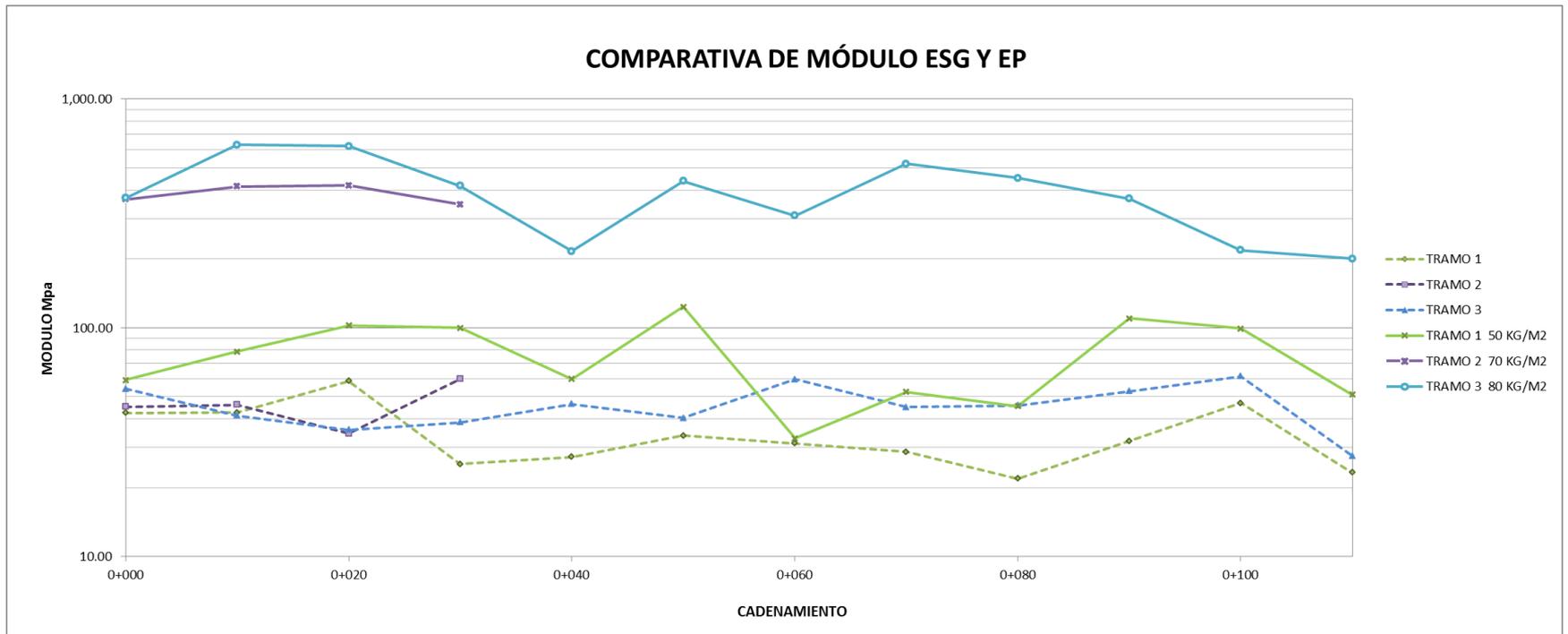
# Resultados de FWD en NAICM

## Módulo de la estructura $E_p$

TRAMO 1 50 KG/M <sup>2</sup>			TRAMO 2 70 KG/M <sup>2</sup>			TRAMO 3 80 KG/M <sup>2</sup>		
IZQUIERDO	DERECHO	PROMEDIO	IZQUIERDO	DERECHO	PROMEDIO	IZQUIERDO	DERECHO	PROMEDIO
54.70	63.33	59.02	289.68	439.30	364.49	418.11	319.61	368.86
63.16	94.37	78.76	358.33	470.16	414.24	723.37	538.07	630.72
121.88	82.78	102.33	415.95	420.58	418.27	679.21	565.91	622.56
79.29	120.46	99.87	360.89	331.10	346.00	253.70	581.66	417.68
65.64	53.85	59.74				217.50	214.20	215.85
61.25	185.60	123.43				506.14	368.71	437.42
33.37	32.30	32.83				445.24	173.40	309.32
66.04	38.80	52.42				505.33	535.13	520.23
46.57	44.35	45.46				411.04	490.53	450.78
41.05	179.13	110.09				342.74	391.33	367.04
54.49	144.36	99.42				198.86	238.01	218.43
52.29	49.69	50.99				143.32	257.83	200.58

# Resultados de FWD en NAICM

## Comparativa de módulos $E_{SG}$ y $E_p$



# Resultados de FWD en NAICM

## Comparativa de módulos $E_{SG}$ y $E_p$

TRAMO 1 50 KG/M <sup>2</sup>			TRAMO 2 70 KG/M <sup>2</sup>			TRAMO 3 80 KG/M <sup>2</sup>		
<i>Esg (Mpa)</i>	<i>Ep (Mpa)</i>	%	<i>Esg (Mpa)</i>	<i>Ep (Mpa)</i>	%	<i>Esg (Mpa)</i>	<i>Ep (Mpa)</i>	%
42.50	59.02	39%	45.21	364.49	706%	54.07	368.86	582%
42.53	78.76	85%	46.02	414.24	800%	41.33	630.72	1426%
58.59	102.33	75%	34.45	418.27	1114%	35.74	622.56	1642%
25.36	99.87	294%	59.73	346.00	479%	38.55	417.68	984%
27.29	59.74	119%				46.37	215.85	365%
33.82	123.43	265%				40.35	437.42	984%
31.22	32.83	5%				59.58	309.32	419%
28.68	52.42	83%				44.96	520.23	1057%
21.88	45.46	108%				45.79	450.78	885%
31.94	110.09	245%				52.81	367.04	595%
46.93	99.42	112%				61.44	218.43	255%
23.31	50.99	119%				27.51	200.58	629%

# Resumen de resultados en NAICM

## Módulos mediante FWD

	W18	Esg prom. (Mpa)	Ep prom. (Mpa)
Sin Cal	1	1.11	12.03
Tramo 1 - Derecho	430	32.19	90.75
Tramo 1 - Izquierdo	172	36.82	61.65
Tramo 2 - Derecho	1,191,533	45.17	415.29
Tramo 2 - Izquierdo	228,797	47.53	356.21
Tramo 3 - Derecho	493,642	51.28	389.53
Tramo 3 - Izquierdo	332,903	40.14	403.71

ANEXO 2

Análisis estructural complementario en las plataformas de prueba para los caminos de acceso en el NAICM mediante el uso de FWD.

–Abril de 2016 –

**Análisis estructural complementario en  
las plataformas de prueba para los  
caminos de acceso en el NAICM mediante  
el uso de FWD.**



Abril de 2016

## Introducción

En el presente estudio se analizaron seis plataformas estabilizadas con cal, un camino de tezontle y el terreno natural. Los tramos analizados son los siguientes:

**Plataforma 1.** Camino de prueba.

**Plataforma 2.** Terreno natural.

**Plataforma 3.** TGC 60 cm Estabilización.

**Plataforma 4.** TGC Inclusiones de 3.0 m + 50 cm Estabilización.

**Plataforma 5.** TGC inclusiones de 3.5 m + Losa de Texcocreto.

**Plataforma 6.** Camino de Tezontle.

**Plataforma 7.** CFE.

**Plataforma 8.** BOMAG.

## Resultados obtenidos

### Deflectometría

Se analizó la información del deflectómetro de impacto FWD registrada en los tramos PLATAFORMA 1 A 8, de tal manera que se obtuvo la respuesta que tiene el pavimento en cada uno de los golpes realizados.

#### Deflexiones.

A lo largo del tramo se registraron las siguientes deflexiones.

#### Deflexiones Plataforma I.

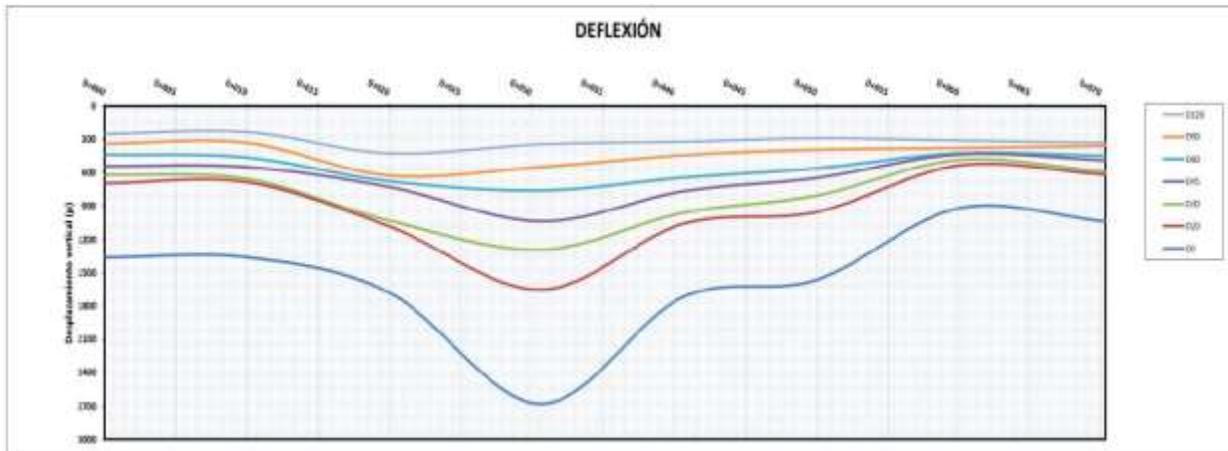


Gráfico 1. Deflexiones obtenidas en el pavimento Plataforma I-Única.

#### Deflexiones Plataforma II.

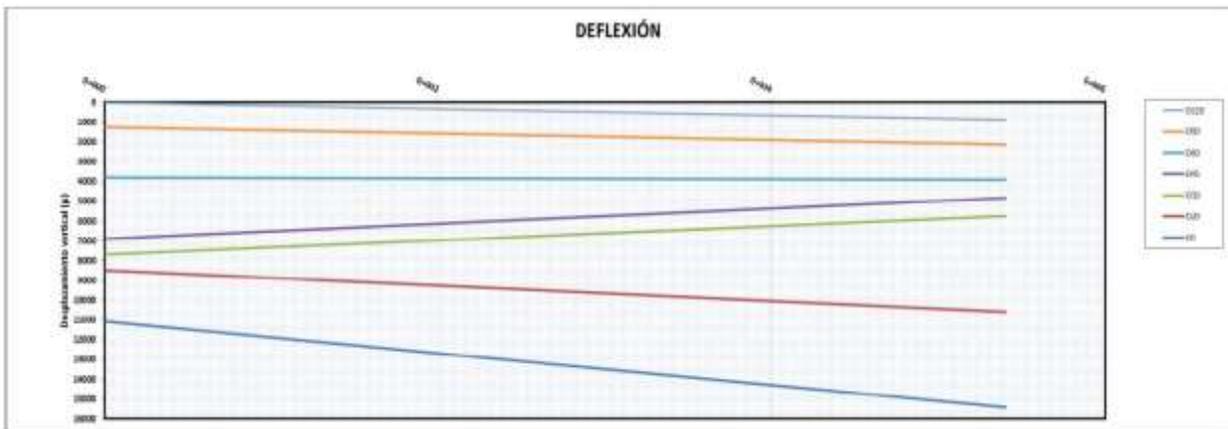


Gráfico 2. Deflexiones obtenidas en el pavimento Plataforma II-Única.

### Deflexiones Plataforma III.

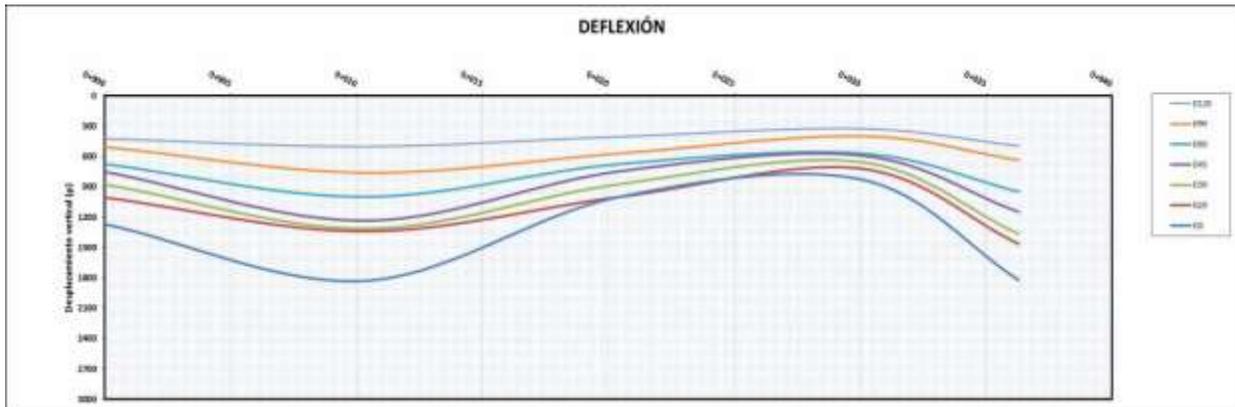


Gráfico 3. Deflexiones obtenidas en el pavimento Plataforma III-Derecho.

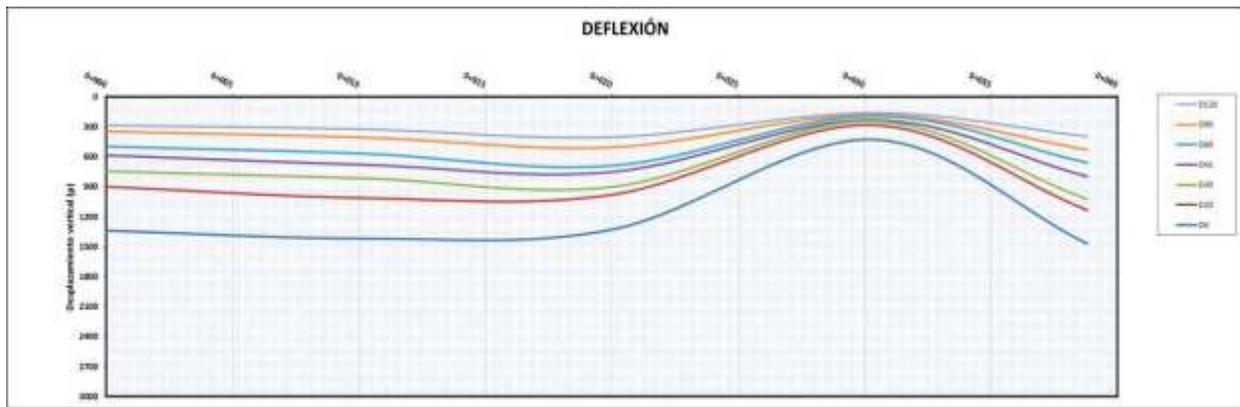


Gráfico 4. Deflexiones obtenidas en el pavimento Plataforma III-Izquierdo.

### Deflexiones Plataforma IV.

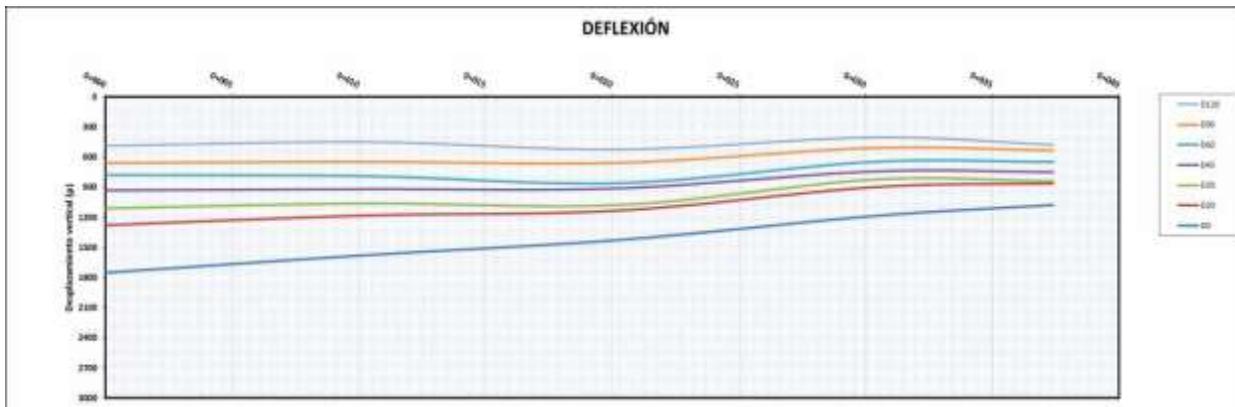


Gráfico 5. Deflexiones obtenidas en el pavimento Plataforma IV-única.

### Deflexiones Plataforma V.

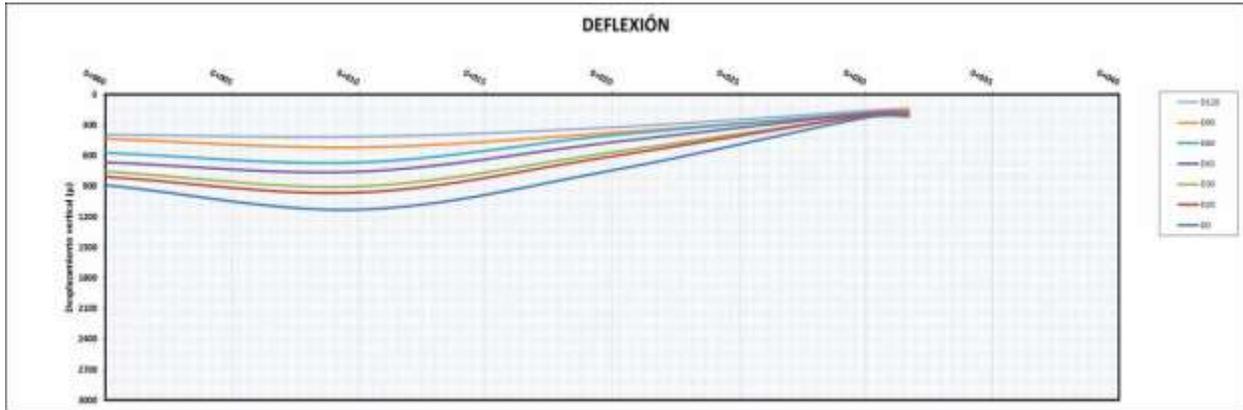


Gráfico 6. Deflexiones obtenidas en el pavimento Plataforma V-única.

### Deflexiones Plataforma VI.

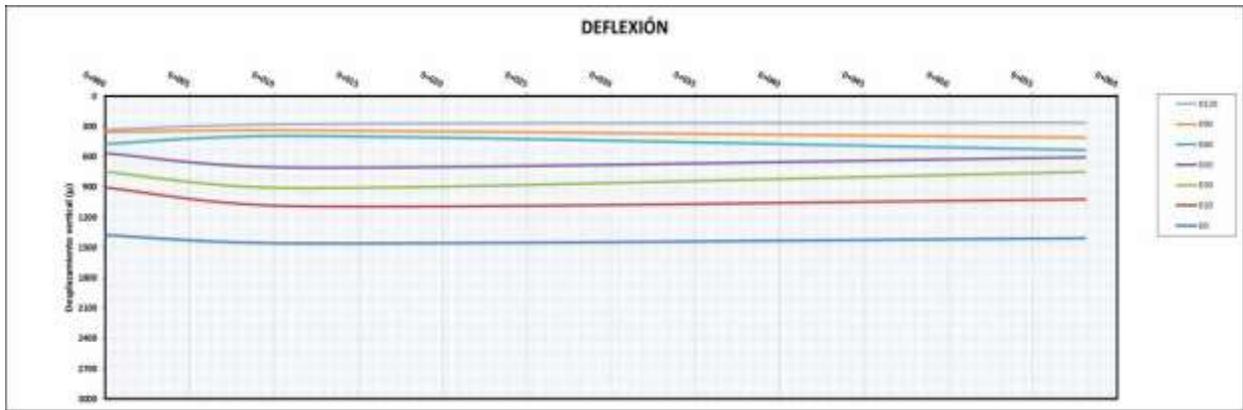


Gráfico 7. Deflexiones obtenidas en el pavimento Plataforma VI-única.

### Deflexiones Plataforma VII.

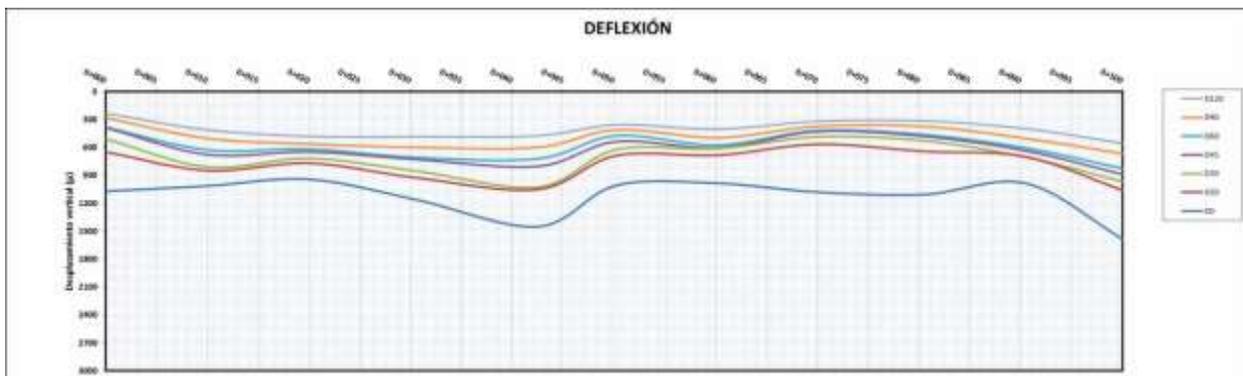


Gráfico 8. Deflexiones obtenidas en el pavimento Plataforma VII-Derecho.

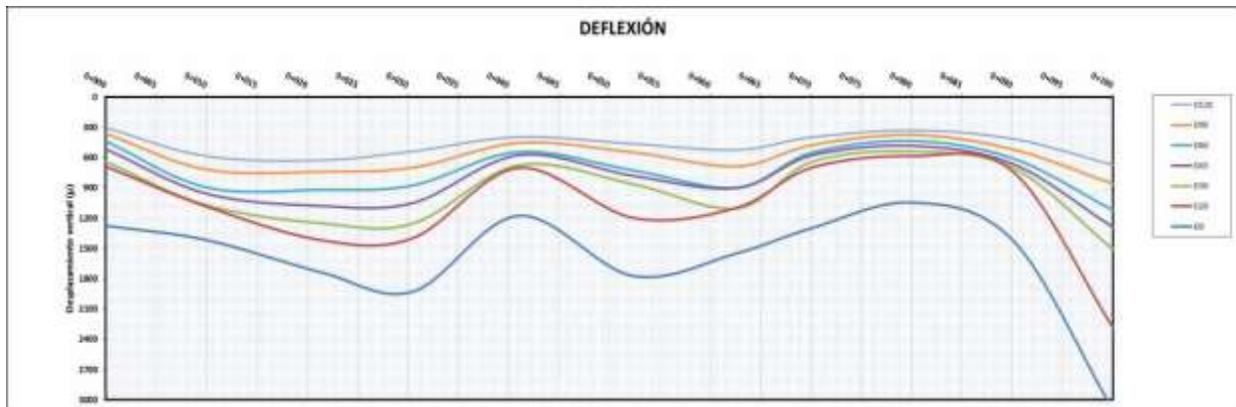


Gráfico 9. Deflexiones obtenidas en el pavimento Plataforma VII-Izquierdo.

**Deflexiones Plataforma VIII.**

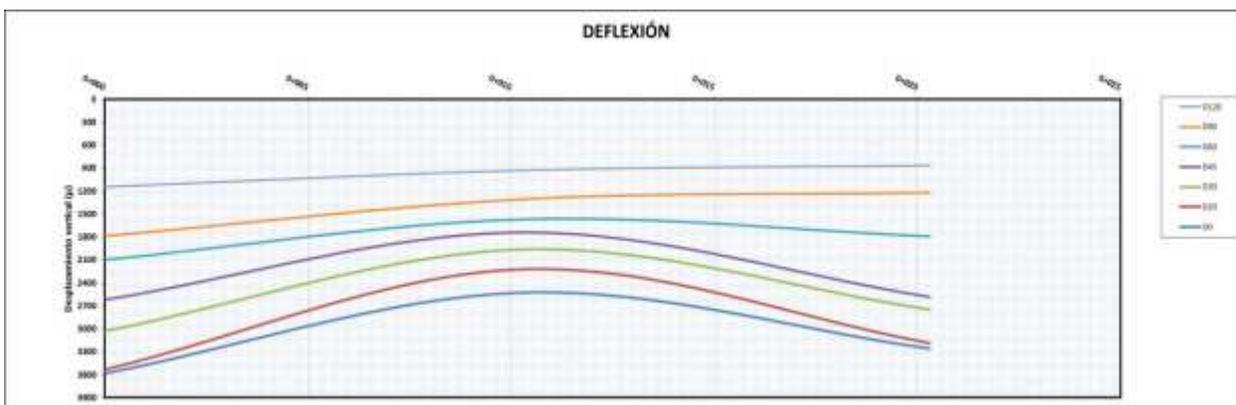


Gráfico 10. Deflexiones obtenidas en el pavimento Plataforma VIII-Único.

**Área normalizada.**

Las deformaciones registradas se analizaron para obtener el área normalizada, la cual nos dará un análisis más a detalle si la estructura y/o la cimentación se encuentran resistentes o débiles.

A continuación se muestran tablas con el **área normalizada** y gráficas de la relación de la deflexión máxima con el área normalizada.

### Área normalizada Plataforma I.

Cadenamiento	PRESIÓN 570 (kPa)	D0 (micras)	D20 (micras)	D30 (micras)	D45 (micras)	D60 (micras)	D90 (micras)	D120 (micras)	Área normalizada pulgadas	Área normalizada mm
0+000	570.00	1361.26	693.80	616.36	538.92	436.19	338.84	250.65	16.77	419.30
0+010	570.00	1359.64	684.00	653.39	546.99	461.92	331.20	234.76	17.31	432.63
0+020	570.00	1676.85	1080.94	1029.86	726.61	675.31	624.02	424.41	20.44	510.89
0+031	570.00	2678.84	1651.56	1292.56	1035.41	758.75	547.74	343.54	16.42	410.39
0+041	570.00	1720.05	1060.02	960.85	766.63	642.14	441.79	322.13	18.72	468.11
0+050	570.00	1563.16	952.67	805.12	645.70	559.85	392.01	290.43	17.98	449.58
0+060	570.00	917.97	532.74	483.49	434.23	423.78	376.38	311.01	20.32	508.01
0+070	570.00	1037.03	616.29	590.29	486.71	446.44	358.35	332.05	20.07	501.74

Tabla 1. Área normalizada Plataforma I – Única

### Área normalizada Plataforma II.

Cadenamiento	PRESIÓN 570 (kPa)	D0 (micras)	D20 (micras)	D30 (micras)	D45 (micras)	D60 (micras)	D90 (micras)	D120 (micras)	Área normalizada pulgadas	Área normalizada mm
0+000	570.00	11078.51	8485.93	7691.27	6896.60	3806.42	1252.91	3.73	19.13	478.31
0+005	570.00	15419.16	10582.73	5746.29	4829.60	3912.90	2124.32	865.71	14.34	358.60

Tabla 2. Área normalizada Plataforma II

### Área normalizada Plataforma III.

Cadenamiento	PRESIÓN 570 (kPa)	D0 (micras)	D20 (micras)	D30 (micras)	D45 (micras)	D60 (micras)	D90 (micras)	D120 (micras)	Área normalizada pulgadas	Área normalizada mm
0+000	570.00	1267.15	1004.77	875.35	750.47	674.68	505.44	424.32	23.07	576.80
0+010	570.00	1827.96	1339.21	1312.24	1233.53	998.05	760.04	500.80	23.66	591.53
0+020	570.00	1006.03	1004.09	877.48	750.87	677.30	571.74	405.27	27.96	698.88
0+030	570.00	823.74	718.07	653.09	588.75	567.23	397.86	324.15	26.68	666.88
0+036	570.00	1820.81	1464.12	1365.23	1147.13	947.55	634.82	494.32	23.33	583.36

Tabla 3. Área normalizada Plataforma III –Derecho

Cadenamiento	PRESIÓN 570 (kPa)	D0 (micras)	D20 (micras)	D30 (micras)	D45 (micras)	D60 (micras)	D90 (micras)	D120 (micras)	Área normalizada pulgadas	Área normalizada mm
0+000	570.00	1338.68	898.49	743.87	584.91	495.38	345.38	284.81	18.66	466.42
0+010	570.00	1417.84	1013.20	816.08	679.90	569.07	407.22	324.64	19.45	486.17
0+020	570.00	1328.55	979.35	900.90	751.58	688.79	504.99	403.08	22.64	565.98
0+030	570.00	426.98	282.93	246.99	230.01	191.69	181.54	160.42	20.88	522.00
0+039	570.00	1468.47	1133.12	1024.55	797.15	658.64	527.13	395.14	21.91	547.71

Tabla 4. Área normalizada Plataforma III – Izquierdo

### Área normalizada Plataforma IV.

Cadenamiento	PRESIÓN 570 (kPa)	D0 (micras)	D20 (micras)	D30 (micras)	D45 (micras)	D60 (micras)	D90 (micras)	D120 (micras)	Área normalizada a	Área normalizada a mm
0+000	570.00	1750.66	1277.98	1110.52	930.35	776.80	657.79	487.15	21.19	529.78
0+010	570.00	1575.88	1180.54	1061.08	917.98	789.02	646.65	449.81	22.55	563.75
0+020	570.00	1424.24	1131.68	1076.11	909.81	858.90	655.48	522.85	25.07	626.63
0+030	570.00	1186.88	899.48	823.90	742.55	646.75	509.09	404.30	23.44	586.07
0+037	570.00	1076.68	861.95	840.30	748.99	647.21	533.26	477.18	25.55	638.77

Tabla 5. Área normalizada Plataforma IV

### Área normalizada Plataforma V.

Cadenamiento	PRESIÓN 570 (kPa)	D0 (micras)	D20 (micras)	D30 (micras)	D45 (micras)	D60 (micras)	D90 (micras)	D120 (micras)	Área normalizada pulgadas	Área normalizada mm
0+000	570.00	888.35	806.39	754.95	665.36	571.53	434.97	392.57	26.86	671.40
0+010	570.00	1129.29	961.23	900.45	756.54	665.73	517.83	413.49	25.39	634.84
0+020	570.00	743.48	605.17	566.09	467.68	398.78	375.03	321.66	24.60	615.00
0+030	570.00	226.40	205.65	206.63	187.82	186.56	180.71	159.67	31.63	790.73
0+032	570.00	213.60	189.55	176.31	167.40	174.64	144.48	135.35	29.77	744.37

Tabla 6. Área normalizada Plataforma V

### Área normalizada Plataforma VI.

Cadenamiento	PRESIÓN 570 (kPa)	D0 (micras)	D20 (micras)	D30 (micras)	D45 (micras)	D60 (micras)	D90 (micras)	D120 (micras)	Área normalizada pulgadas	Área normalizada mm
0+000	570.00	1376.04	903.68	748.70	564.87	471.44	354.75	331.94	18.19	454.68
0+012	570.00	1458.30	1090.39	909.12	707.13	393.63	338.45	274.64	18.11	452.81
0+058	570.00	1406.90	1021.13	749.06	605.21	531.50	409.54	261.52	18.67	466.73

Tabla 7. Área normalizada Plataforma VI

### Área normalizada Plataforma VII.

Cadenamiento	PRESIÓN 570 (kPa)	D0 (micras)	D20 (micras)	D30 (micras)	D45 (micras)	D60 (micras)	D90 (micras)	D120 (micras)	Área normalizada pulgadas	Área normalizada mm
0+000	570.00	1069.59	647.77	507.16	387.15	382.10	281.43	232.46	17.56	438.89
0+010	570.00	1012.05	847.09	807.71	675.24	624.99	501.78	410.63	25.96	649.06
0+020	570.00	941.88	767.81	716.60	645.58	615.93	561.50	479.91	26.55	663.85
0+031	570.00	1159.56	924.56	851.64	727.43	706.73	597.53	482.75	25.22	630.47
0+043	570.00	1450.45	1049.87	1025.71	800.85	720.32	596.84	473.37	22.91	572.86
0+050	570.00	1006.07	686.26	621.65	536.02	472.56	410.25	354.73	21.50	537.45
0+060	570.00	983.93	681.95	612.33	603.56	573.59	494.11	401.98	23.48	586.91
0+070	570.00	1079.01	564.31	484.20	427.62	418.60	372.81	318.49	18.11	452.84
0+081	570.00	1104.98	640.47	527.35	480.00	462.11	373.64	314.07	18.77	469.36
0+091	570.00	985.17	699.30	703.09	635.35	605.06	502.48	397.74	24.99	624.86
0+100	570.00	1596.51	1066.31	971.19	894.01	830.35	667.76	557.65	22.05	551.27

Tabla 8. Área normalizada Plataforma VII -Derecho

Cadenamiento	PRESIÓN 570 (kPa)	D0 (micras)	D20 (micras)	D30 (micras)	D45 (micras)	D60 (micras)	D90 (micras)	D120 (micras)	Área normalizada pulgadas	Área normalizada mm
0+000	570.00	1273.43	687.87	640.70	514.66	436.28	361.19	302.75	17.85	446.26
0+010	570.00	1415.91	1084.29	1069.60	956.48	893.69	717.26	585.33	25.68	641.96
0+021	570.00	1735.80	1417.34	1249.76	1078.27	918.40	739.42	624.82	23.54	588.62
0+031	570.00	1926.98	1395.85	1252.27	1048.17	873.68	698.18	535.77	21.41	535.32
0+041	570.00	1174.52	701.67	674.52	574.94	542.56	453.46	395.00	20.75	518.78
0+052	570.00	1772.91	1197.46	862.85	779.88	725.91	547.21	463.04	18.61	465.14
0+063	570.00	1545.19	1094.32	1101.88	899.95	895.95	685.47	522.77	24.18	604.42
0+070	570.00	1298.36	698.21	640.54	577.95	550.11	475.70	397.51	19.20	480.07
0+080	570.00	1043.22	584.43	537.60	482.20	434.87	374.52	329.71	19.34	483.51
0+090	570.00	1421.85	739.37	700.97	662.57	607.75	518.44	413.69	19.23	480.82
0+100	570.00	3113.98	2296.21	1514.95	1295.36	1125.20	861.93	673.57	17.83	445.87

Tabla 9. Área normalizada Plataforma VII – Izquierdo

Área normalizada Plataforma VIII.

Cadenamiento	PRESIÓN 570 (kPa)	D0 (micras)	D20 (micras)	D30 (micras)	D45 (micras)	D60 (micras)	D90 (micras)	D120 (micras)	Área normalizada pulgadas	Área normalizada mm
0+000	570.00	3582.34	3532.56	3029.18	2620.68	2097.82	1787.80	1144.45	26.17	654.21
0+010	570.00	2525.84	2219.82	1962.01	1739.13	1568.13	1305.31	927.24	25.87	646.80
0+020	570.00	3257.74	3185.92	2747.06	2583.13	1790.95	1218.34	863.86	24.96	624.00

Tabla 10. Área normalizada Plataforma VIII

Número Estructural y resistencia de la subrasante

Así mismo, se realizó un análisis en la deflexión obteniendo los siguientes resultados de la capacidad estructural en el pavimento representado en el **Número Estructural (SN)** y la resistencia de la **subrasante** expresado en módulos (MPa).

Plataforma I.

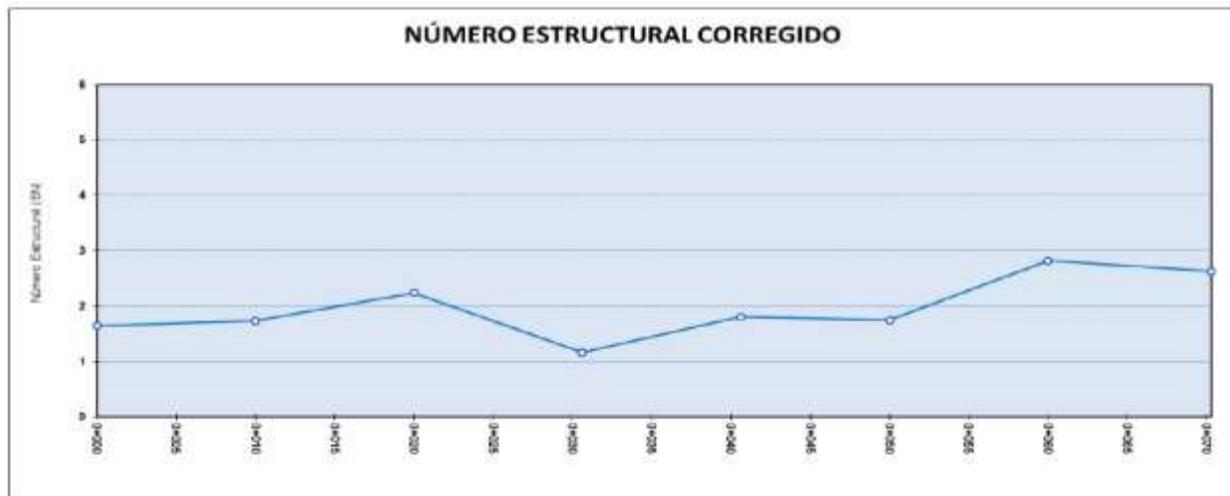


Gráfico 11. Número estructural (SN) del pavimento en la Plataforma I

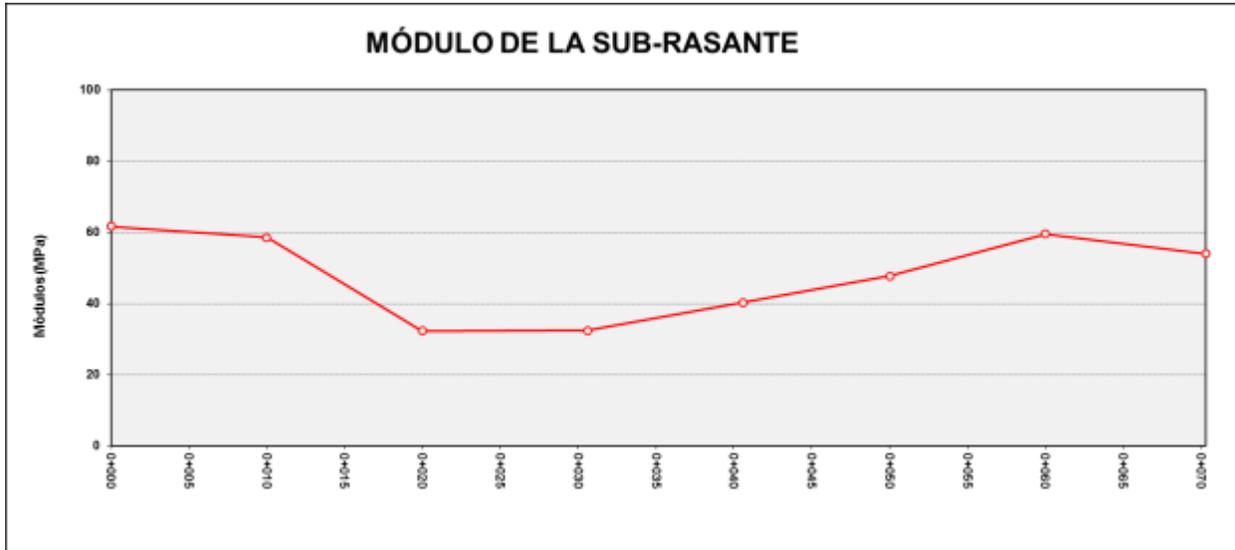


Gráfico 12. Módulo de la subrasante en la Plataforma I

## Plataforma II.

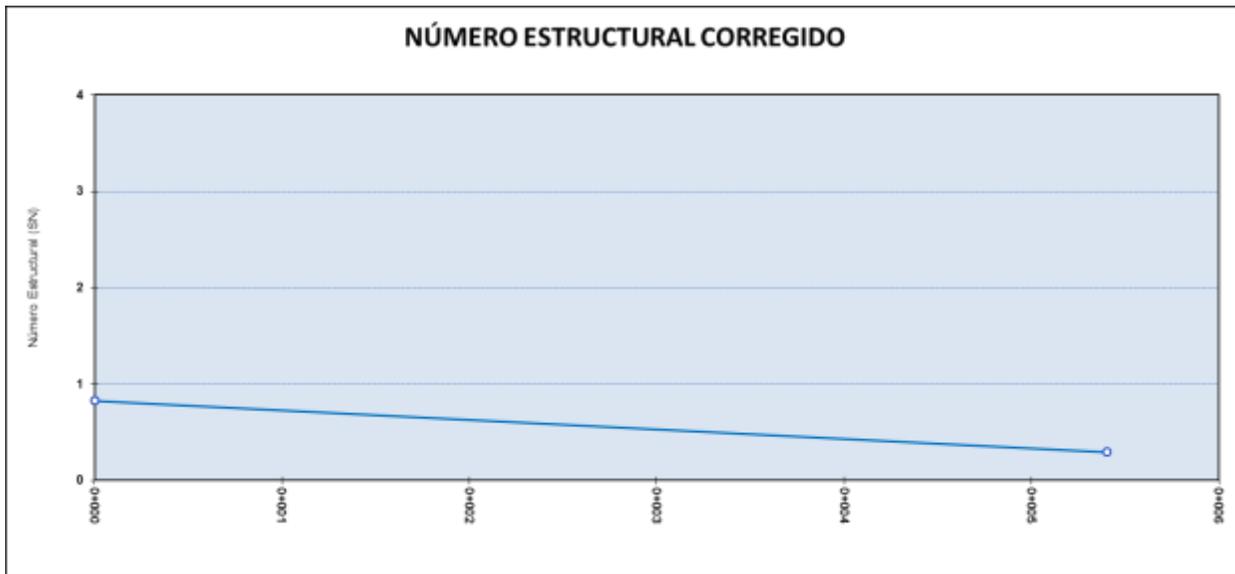


Gráfico 13. Número estructural (SN) del pavimento en la Plataforma II

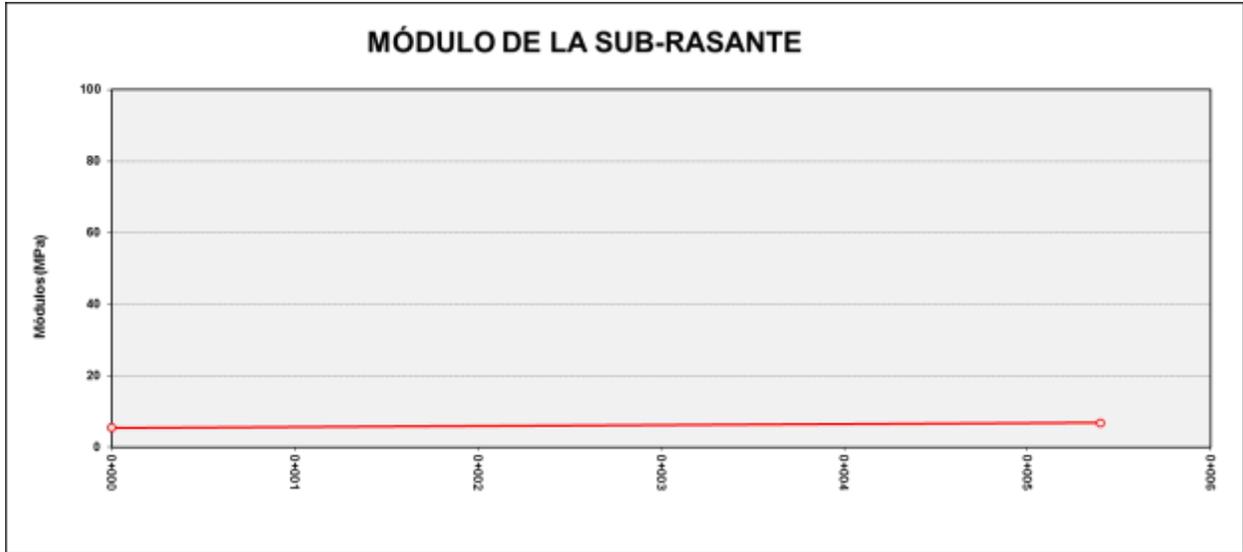


Gráfico 14. Módulo de la subrasante en la Plataforma II

### Plataforma III.



Gráfico 15. Número estructural (SN) del pavimento en la Plataforma III - Derecho.

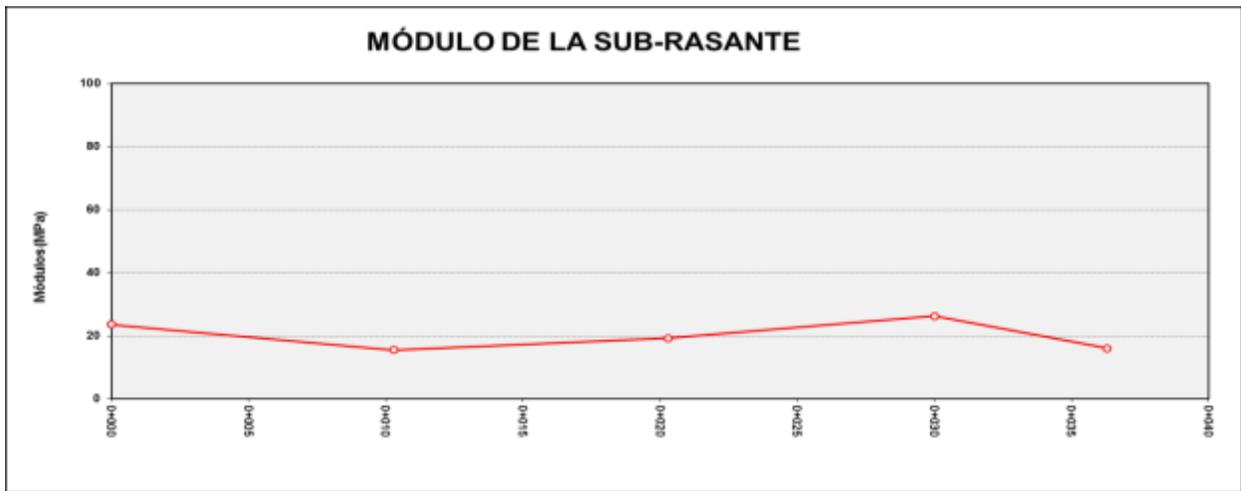


Gráfico 16. Módulo de la subrasante en la Plataforma III – Derecho.

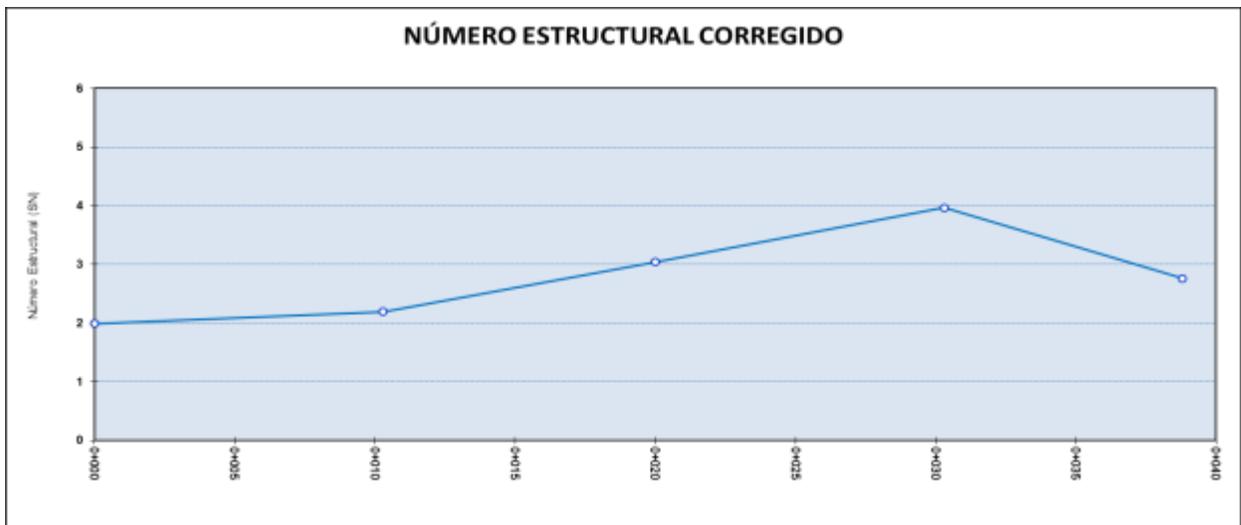


Gráfico 17. Número estructural (SN) del pavimento en la Plataforma III - Izquierdo.

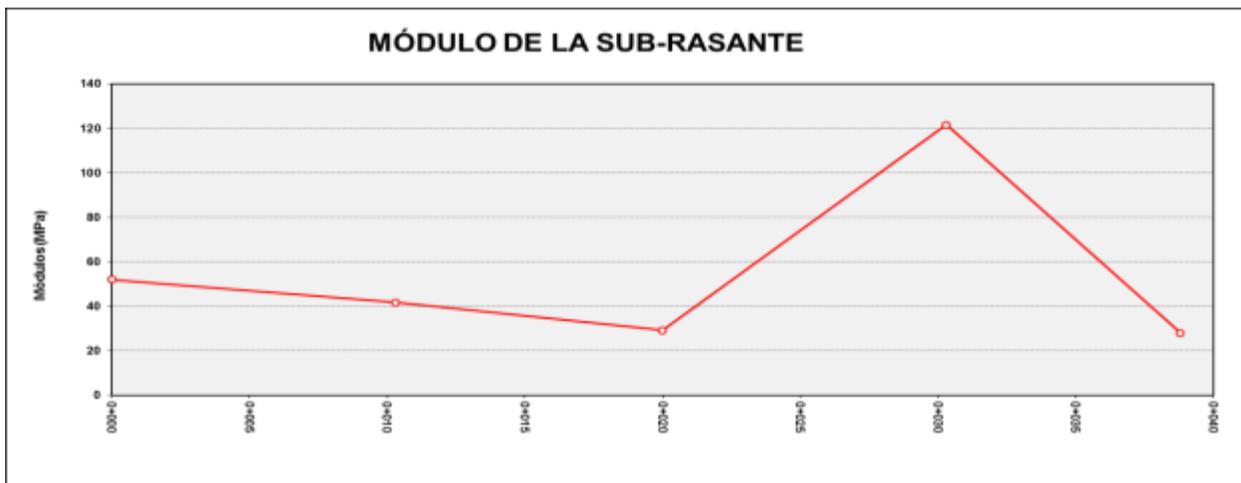


Gráfico 18. Módulo de la subrasante en la Plataforma III – Izquierdo.

### Plataforma IV.

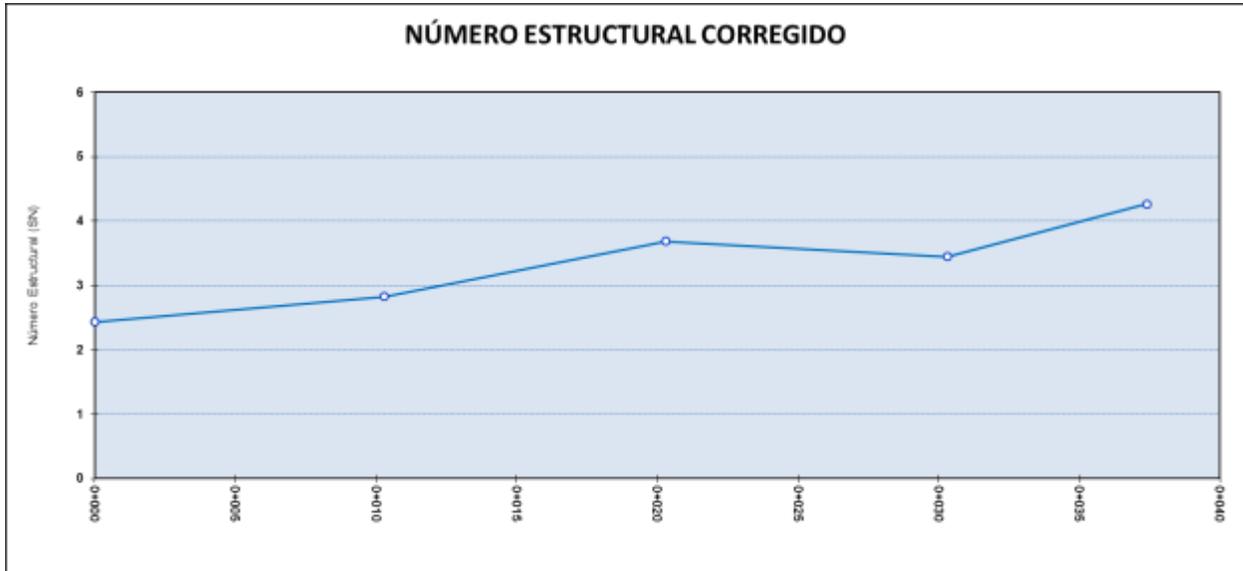


Gráfico 19. Número estructural (SN) del pavimento en la Plataforma IV

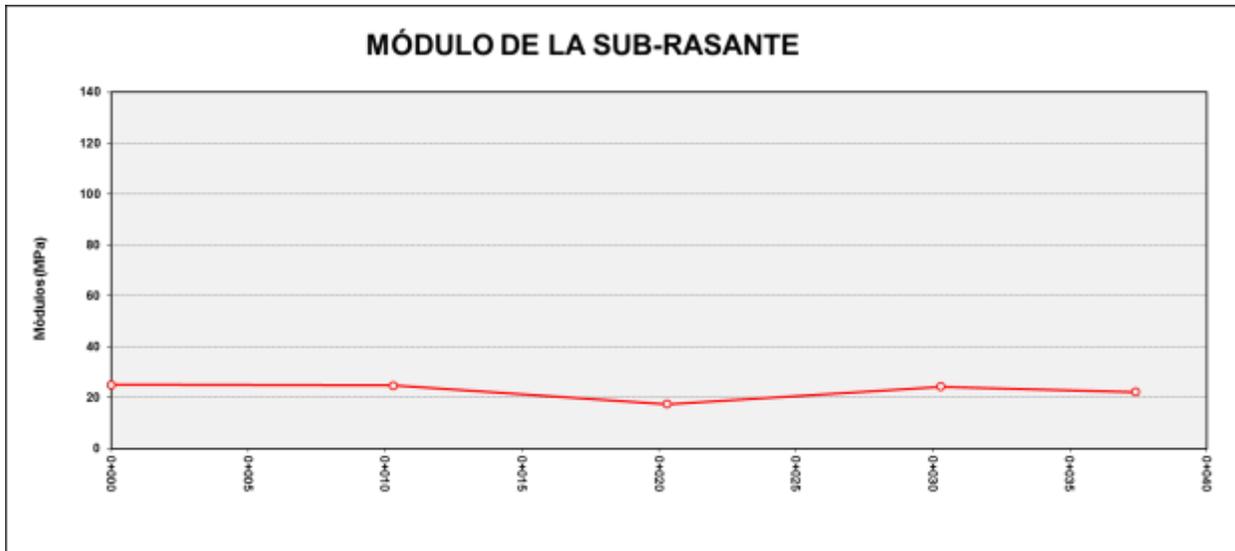


Gráfico 10. Módulo de la subrasante en la Plataforma IV

### Plataforma V.

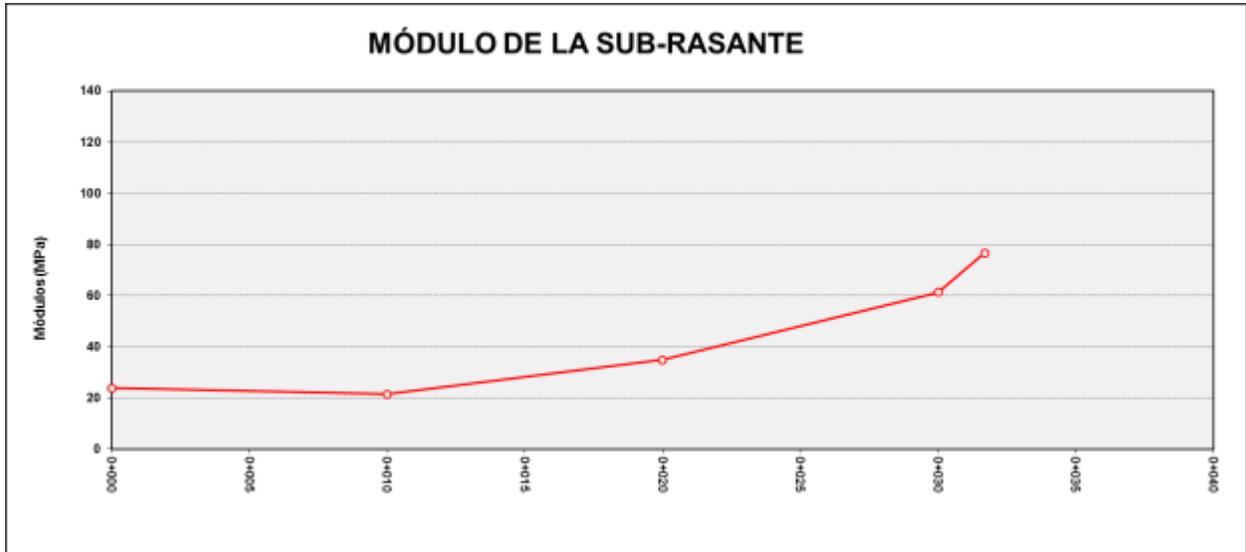


Gráfico 21. Módulo de la subrasante en la Plataforma V

### Plataforma VI.



Gráfico 22. Número estructural (SN) del pavimento en la Plataforma VI

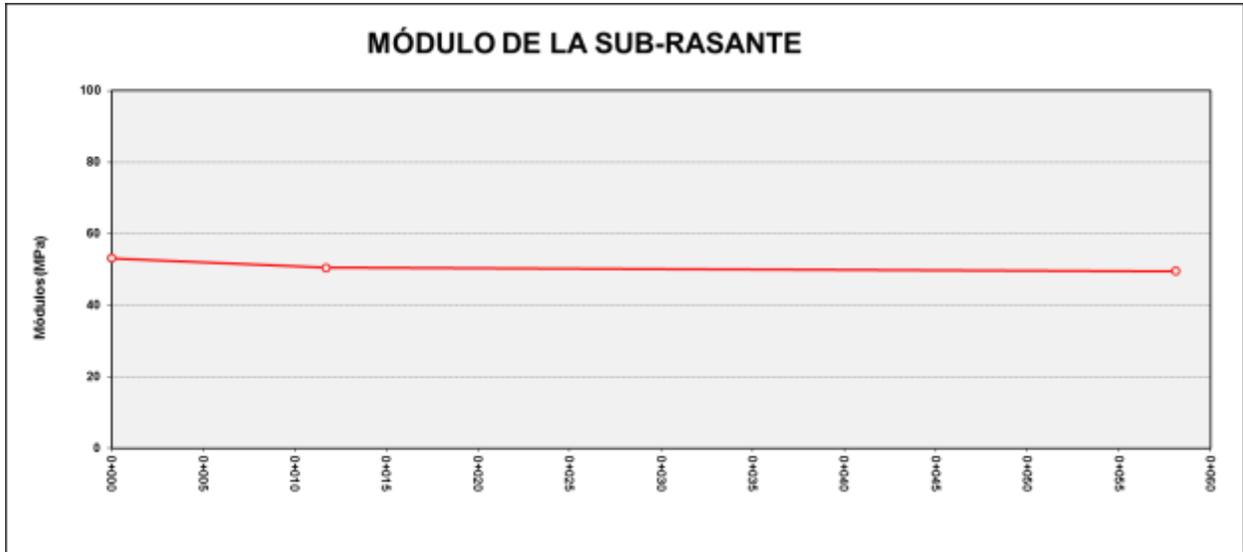


Gráfico 23. Módulo de la subrasante en la Plataforma VI

**Plataforma VII.**



Gráfico 24. Número estructural (SN) del pavimento en la Plataforma VII - Derecho.

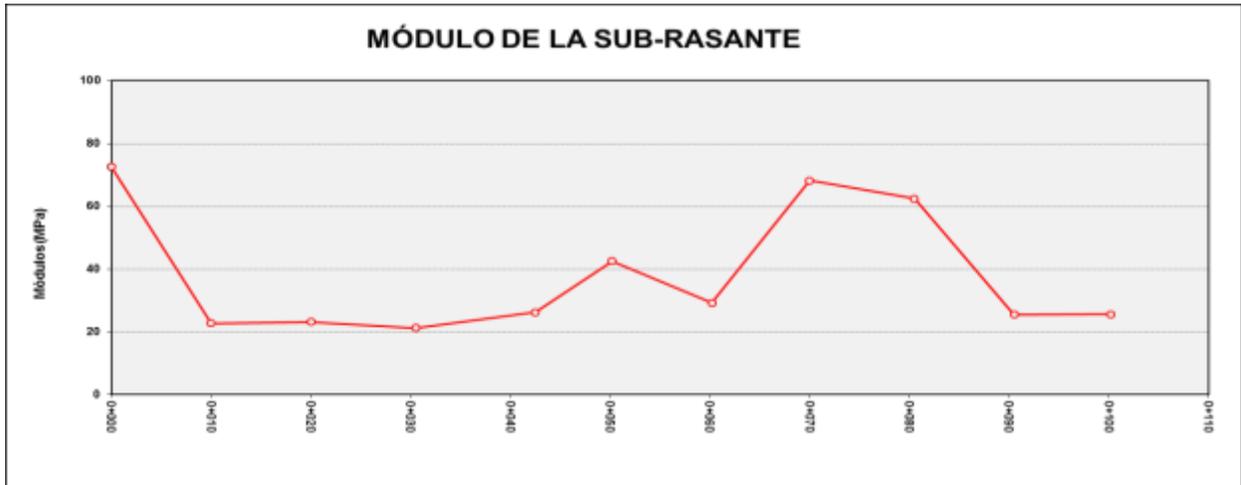


Gráfico 25. Módulo de la subrasante en la Plataforma VII - Derecho.



Gráfico 26. Número estructural (SN) del pavimento en la Plataforma VII - Izquierdo.

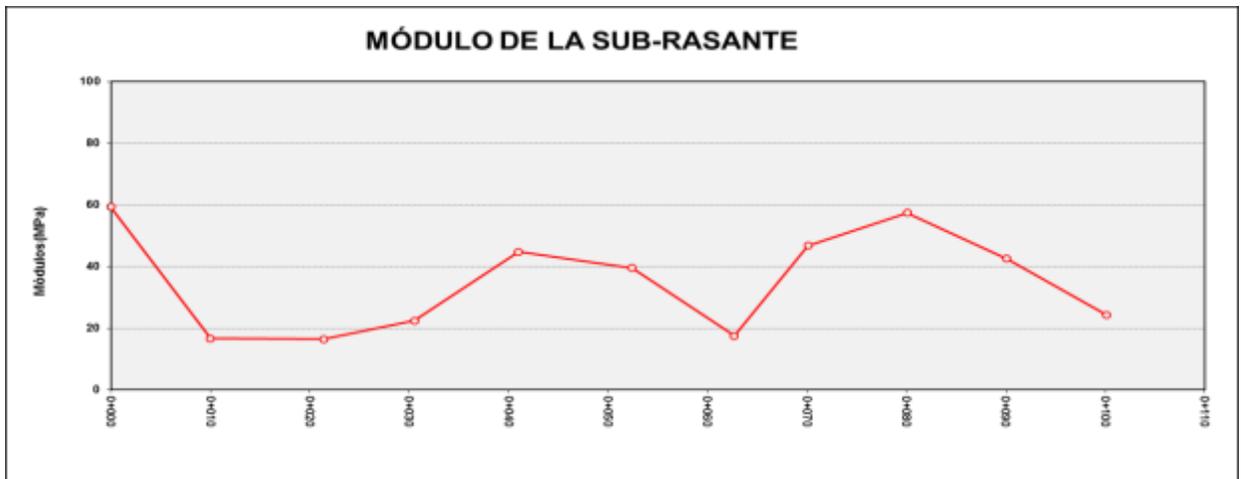


Gráfico 27. Módulo de la subrasante en la Plataforma VII - Izquierdo.

### Plataforma VIII.

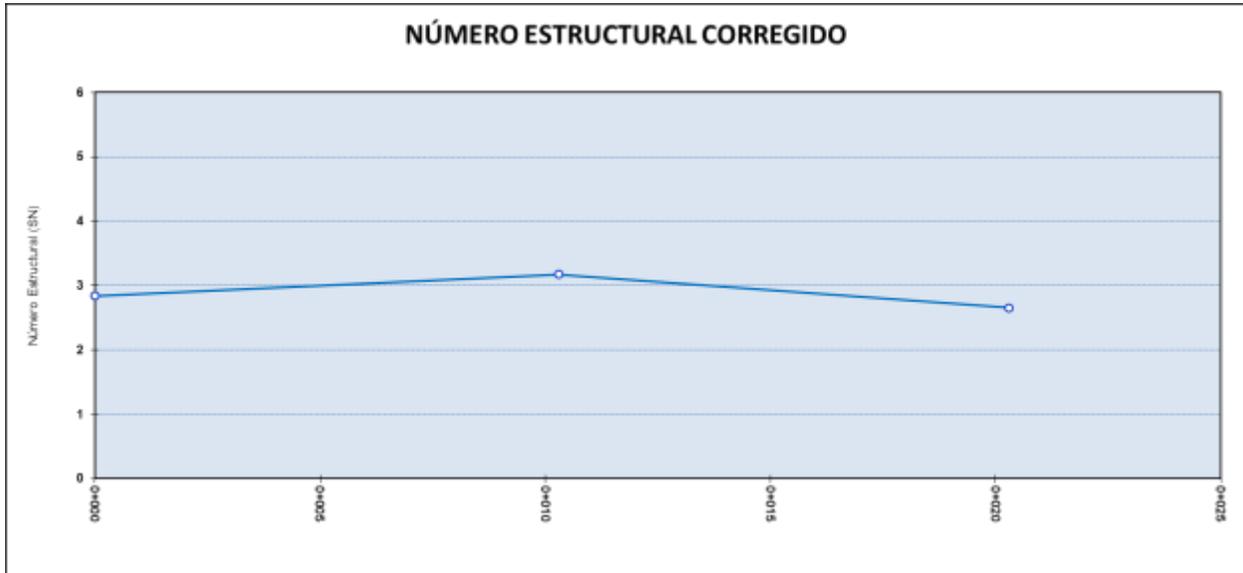


Gráfico 28. Número estructural (SN) del pavimento en la Plataforma VIII - Izquierdo.

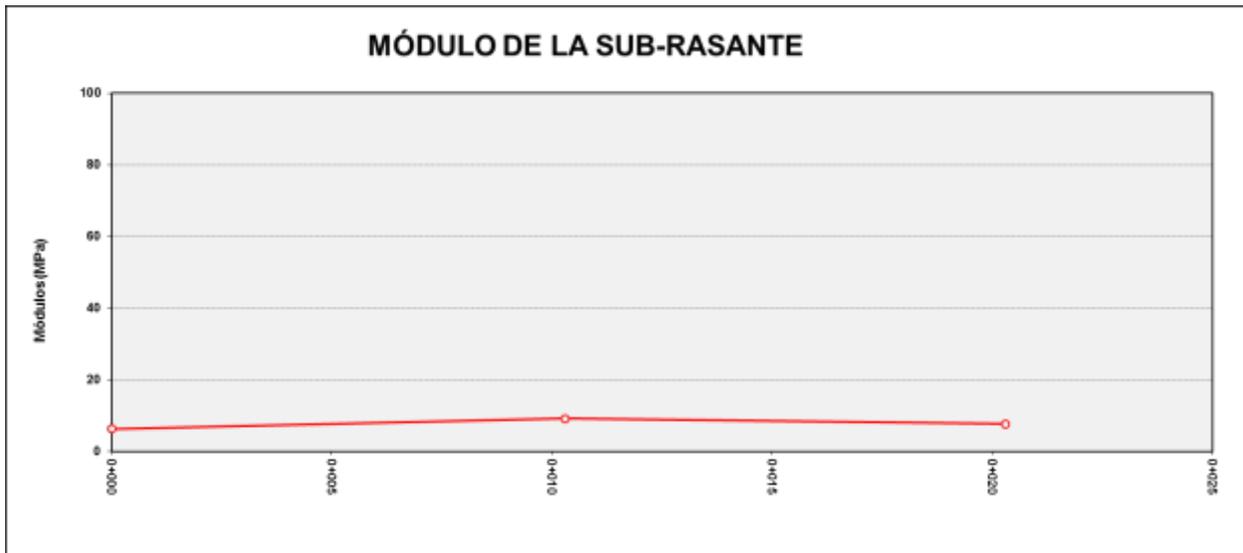


Gráfico 29. Módulo de la subrasante en la Plataforma VIII - Izquierdo.

A continuación se muestran las gráficas comparativas de las plataformas 3, 4,5 y 6, de deflexión, módulo de la Subrasante y módulo de la estructura estabilizada.

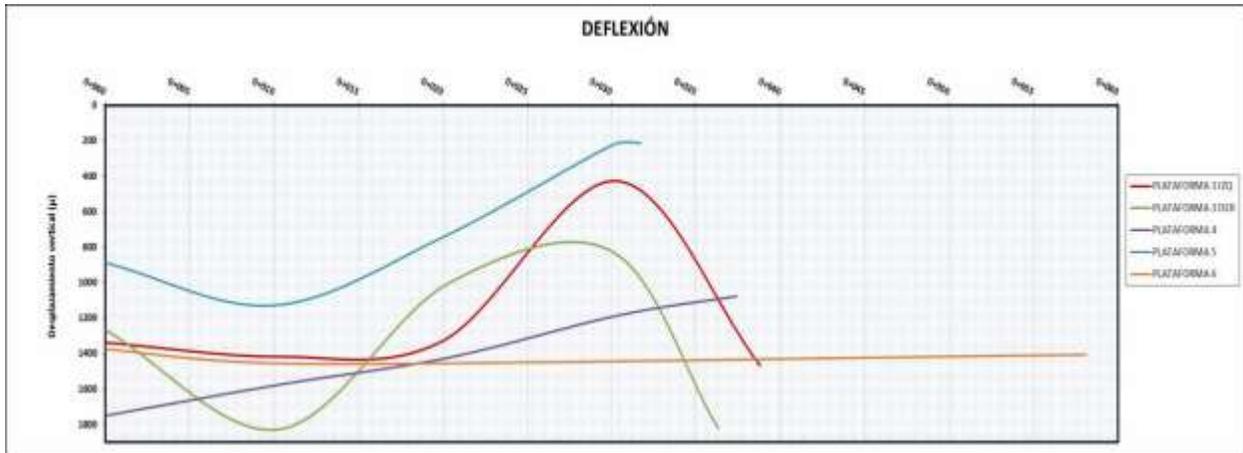


Gráfico 30. Gráfico comparativo de Deflexión.

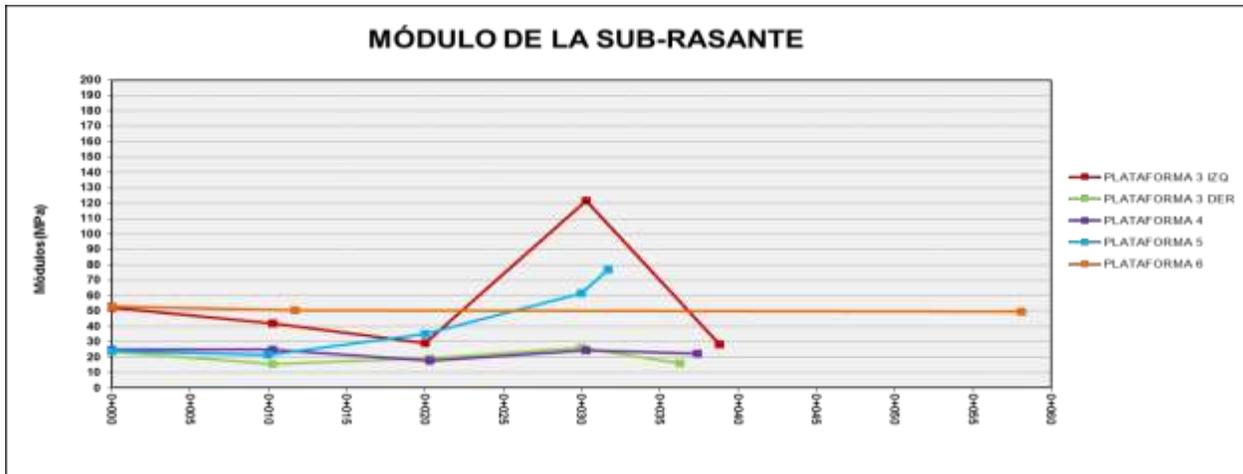


Gráfico 31. Gráfico comparativo de Módulos de subrasante.

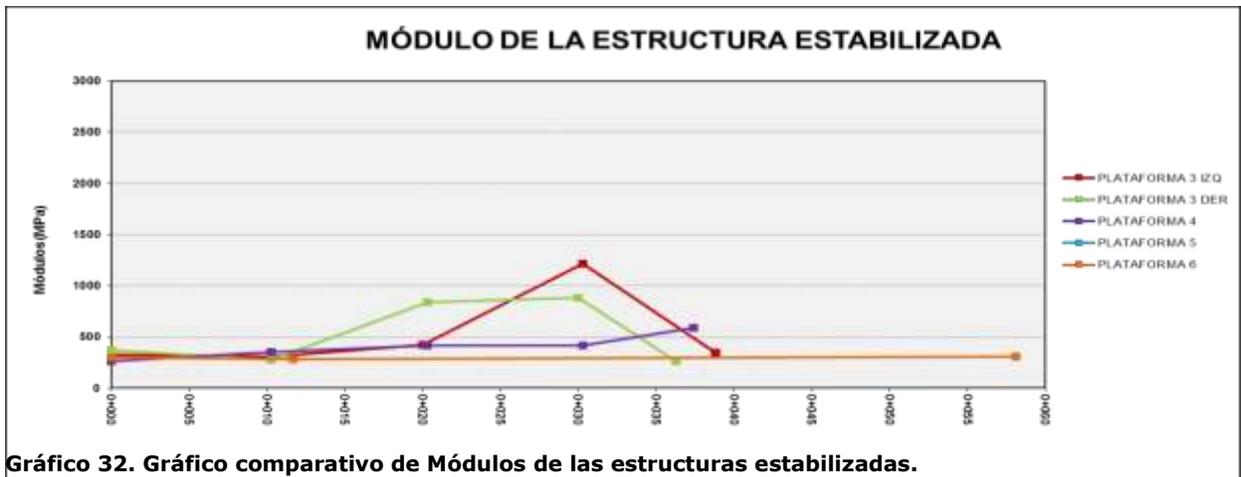
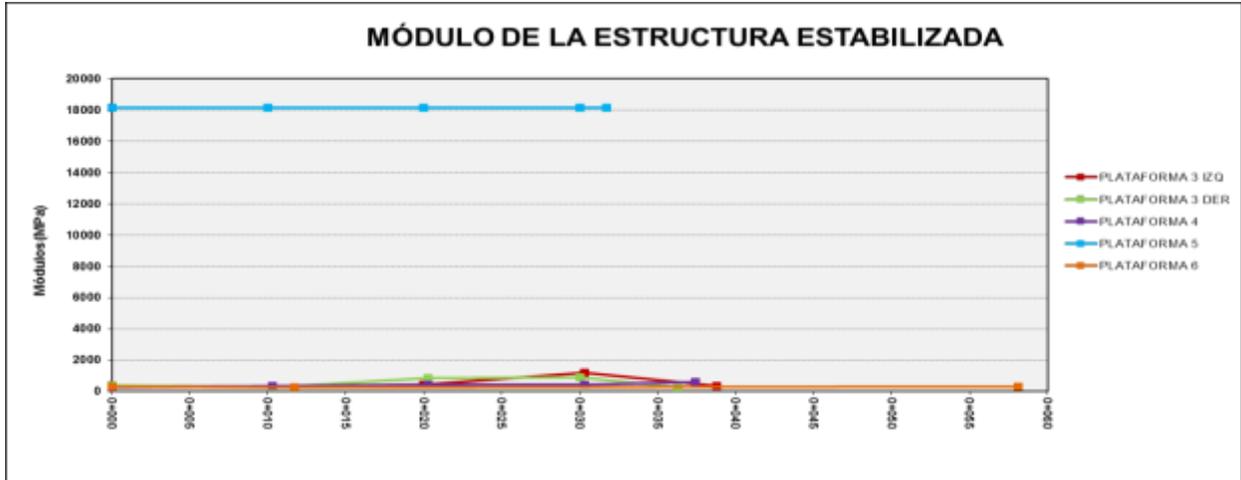


Gráfico 32. Gráfico comparativo de Módulos de las estructuras estabilizadas.

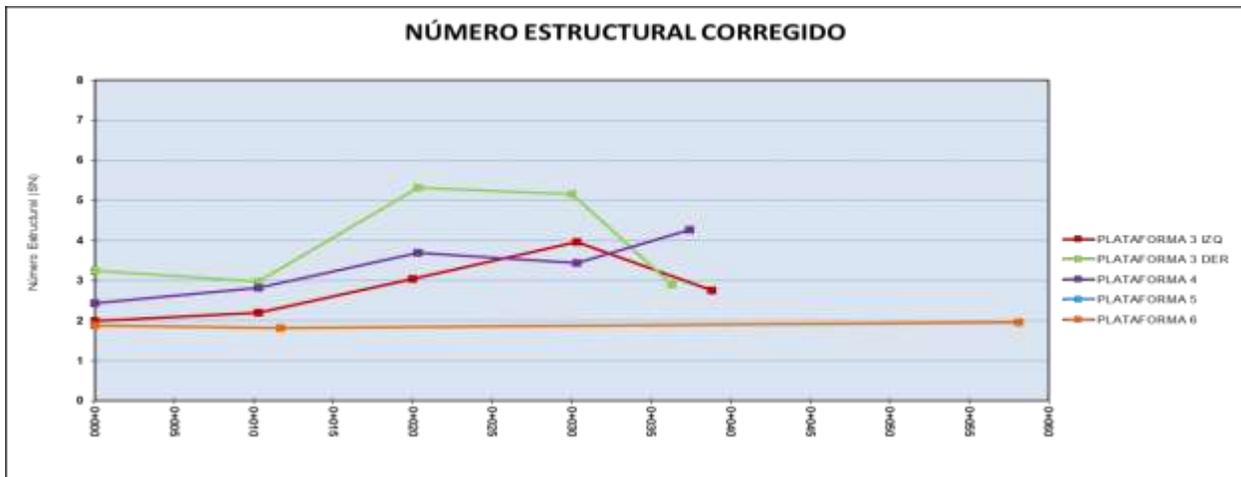


Gráfico 33. Gráfico comparativo de Número estructural.

A continuación se muestran las gráficas comparativas de las plataformas 1, 3, 7 y 8, de deflexión, módulo de la Subrasante y módulo de la estructura estabilizada.



Gráfico 34. Gráfico comparativo de Deflexión.

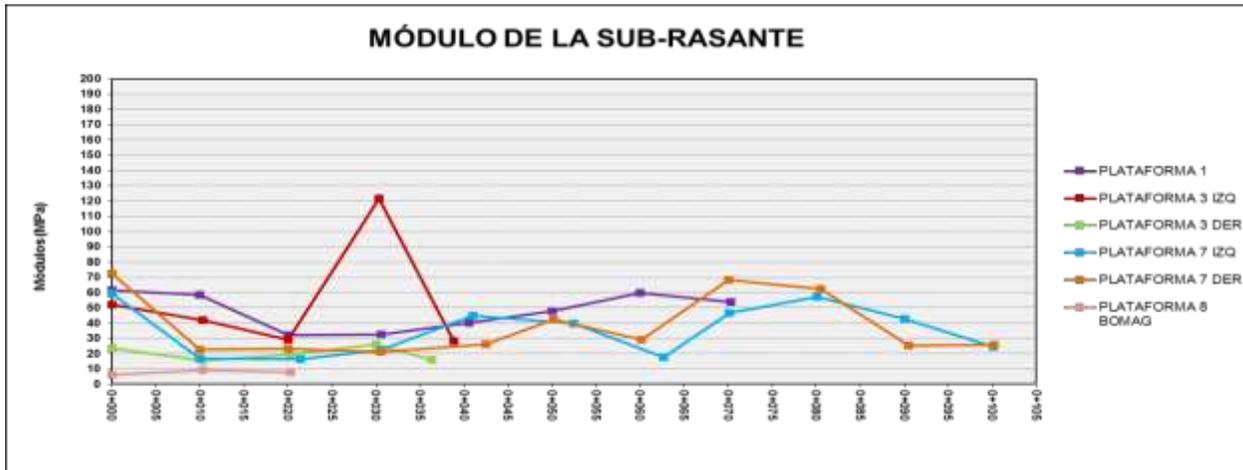


Gráfico 35. Gráfico comparativo de Módulos de subrasante.



Gráfico 36. Gráfico comparativo de Módulos de las estructuras estabilizadas.



Gráfico 37. Gráfico comparativo de Número estructural.

