



# “INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS ESPECIALES RELACIONADOS CON ASPECTOS GEOTÉCNICOS DEL NUEVO AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO (NAICM) EN EL VASO DEL Ex-Lago DE TEXCOCO, ZONA FEDERAL”

Convenio de Colaboración No. GACM/DCI/SJ/CI/013-2015

## NOTA TÉCNICA No. GEO-10 TERRAPLÉN DE PRUEBA CON PRECARGA Y DRENES VERTICALES (TPDV) Procedimiento para el retiro de la precarga y construcción de la estructura del pavimento

Elaborada para:  
Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México (GACM)

Por:  
Instituto de Ingeniería, UNAM  
Geotecnia

Ciudad Universitaria, D.F.  
Septiembre 4, 2015



## **TERRAPLÉN DE PRUEBA CON PRECARGA Y DRENES VERTICALES (TPDV) Procedimiento para el retiro de la precarga y construcción de la estructura del pavimento**

### **Introducción**

En relación con la continuación de la prueba de precarga con drenes que se está realizando en el ex Lago de Texcoco para su posible aplicación en las obras del nuevo aeropuerto internacional de la ciudad de México (NAICM), se presenta en esta nota el Procedimiento para el retiro del material de la sobrecarga y construcción de la estructura del pavimento.

Esta nota responde a la solicitud del Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México (Oficio GACM/DG/SCO/0226/15 del 24 de agosto de 2015).

Esta nota técnica amplía el inciso No. iv de las observaciones realizadas por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM) en el plano PRE-02-B emitido por la empresa Ingenieros Civiles Asociados S.A. (ICA), referente al procedimiento constructivo del TPDV, en la página No. 505 del documento “*Revisión y evaluación en geotecnia y estructuras para resolver la problemática del transporte aéreo en el centro del país. Informe final*”, en el apartado “5. Avance de los estudios específicos”, y en la sección “5.k.4.3 *Mejoramiento del suelo por precarga con drenes de arena o drenes artificiales*”.

Se subraya la gran importancia que tiene esta segunda etapa de la prueba sin la cual sería imposible confirmar la aplicabilidad de la técnica de precarga y se perdería la oportunidad de proporcionar datos valiosos a los diseñadores.

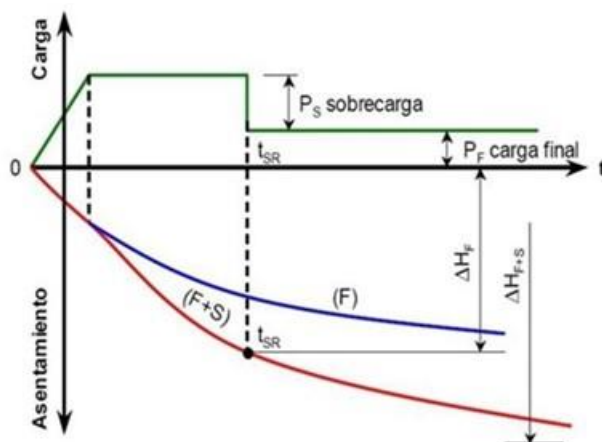
### **Sistema de precarga**

Para las pistas, rodajes y plataformas del NAICM será necesario construir terraplenes para salvar algunas depresiones (zonas bajas, canales, drenes) o elevar la rasante por lo menos en algunos tramos para evitar inundaciones y facilitar el drenaje. El peso de los terraplenes requeridos conducirá a asentamientos no uniformes y de magnitud inaceptable. En estos casos, la solución consistente en precargar el terreno es aplicable. Esta técnica de mejoramiento del subsuelo ha sido considerada como la más atractiva por ARUP (2013) y TASANA (2015).

La precarga simple consiste en colocar sobre el terreno con cierta antelación a la construcción una carga igual a la carga definitiva, logrando lo siguiente:

- Acelerar el desarrollo de los asentamientos de consolidación primaria.
- Acelerar la aparición y el desarrollo de asentamientos de consolidación secundaria.
- Aumentar la resistencia al corte no drenado del terreno.

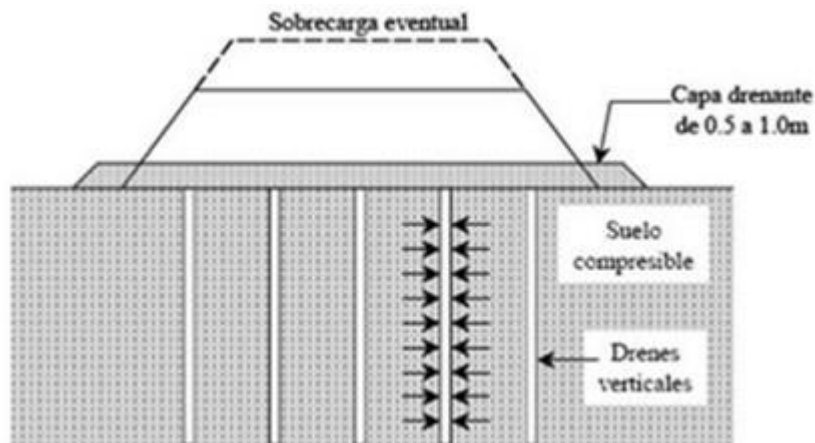
También es posible colocar sobre el terreno una precarga igual a la carga definitiva, aumentada con una sobrecarga. La sobrecarga disminuye el tiempo de consolidación requerido para alcanzar determinado grado de consolidación bajo la precarga. Una vez que se presentan los asentamientos esperados, la sobrecarga se retira (Fig. 1). En este caso, los dos primeros efectos son dominantes: la sobrecarga se remueve cuando los asentamientos inducidos garantizan el buen comportamiento de la obra futura. El último efecto se logra generalmente mediante una construcción por etapas y resulta útil cuando la resistencia inicial del suelo es insuficiente para soportar la estructura definitiva sin que se presente la falla. Cada etapa conduce a un mejoramiento del suelo que permite la realización de la etapa siguiente.



**Figura 1.** Proceso de precarga y descarga en el tiempo.

El aumento del grado de consolidación del suelo se logra incrementando el esfuerzo efectivo dentro del mismo, lo cual puede obtenerse aumentando el esfuerzo total o disminuyendo la presión intersticial. El mejoramiento de los suelos finos consiste por tanto en actuar sobre alguno de estos factores o sobre los dos simultáneamente.

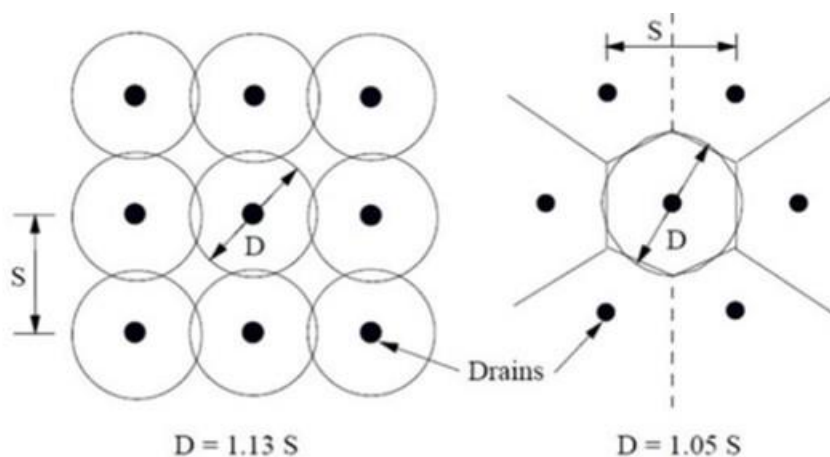
Para acelerar el proceso de precarga es posible recurrir a drenes verticales (Barron, 1948; PEMEX, 1974; LCPC, 1985; SMIG, Auvinet, 1979). Los drenes verticales (Fig. 2) permiten acelerar el proceso de consolidación durante el proceso de precarga.



**Figura 2.** Precarga y drenes verticales

El sistema, inicialmente inerte, se vuelve activo cuando se carga el suelo. Los drenes verticales, generalmente colocados en tresbolillo, pueden ser de arena o prefabricados (cartón o plástico). Los drenes de arena son más costosos que los drenes prefabricados pero presentan la ventaja de que contribuyen en cierta medida a reforzar el suelo y a uniformar su compresibilidad.

Para el diseño de drenes verticales es necesario elegir el diámetro y la separación entre los drenes de acuerdo con el espesor de la capa compresible y su permeabilidad horizontal y vertical para obtener el grado de consolidación deseada. Los drenes verticales pueden ser de arena o prefabricados y dispuestos en una malla cuadrada o en tresbolillo (Fig. 3). Para los drenes de arena, se debe usar arena uniforme con bajo contenido de finos. Es indispensable que se realicen pruebas de laboratorio y de campo para verificar la permeabilidad de los materiales disponibles.



**Figura 3.** Distribución en planta de drenes verticales (Indraratna y Bamunawita, 2005)



Una condición para que los drenes cumplan eficientemente con su función es que el procedimiento constructivo de los mismos evite en todo lo posible el remoldeo del suelo circundante (Casagrande y Poulos, 1969). En efecto, el remoldeo tiende a reducir la permeabilidad y a aumentar la compresibilidad del suelo. Se considera que los métodos que inducen pocos desplazamientos en los suelos son los que causan menores perturbaciones. Tomando en cuenta lo anterior, el procedimiento que consiste en recurrir a barrenos helicoidales huecos (“Continuous Flight Augers”) es preferible al hincado previo de tubos para la colocación de la arena. Los barrenos helicoidales permiten además cruzar los lentes resistentes con mayor facilidad.

Los suelos tratados con drenes se recubren siempre con una capa drenante con un espesor de por lo menos 0.5 a 1 m y, en todo caso, superior al asentamiento esperado. Debe preverse el drenaje de esta capa hacia cárcamos de bombeo laterales mediante trincheras transversales que pueden estar espaciadas de varias decenas de metros. Es conveniente que el material de la capa drenante sea ligero tomando en cuenta que una parte importante del mismo permanecerá en el sitio después de remover la sobrecarga. Esta capa se coloca generalmente antes de construir los drenes para facilitar el tránsito de los equipos de perforación y de servicio. Para evitar la incrustación de la capa drenante en el suelo blando, es necesario apoyarla sobre un lecho de geotextil o una combinación de geotextil y geomalla.

### Ubicación del TPDV en el polígono de tramos de prueba

El polígono de tramos de pruebas se ubica al sur de la zona del NAICM (Fig. 4), muy cerca de la cabecera sur de la pista 36R (Fig. 5).

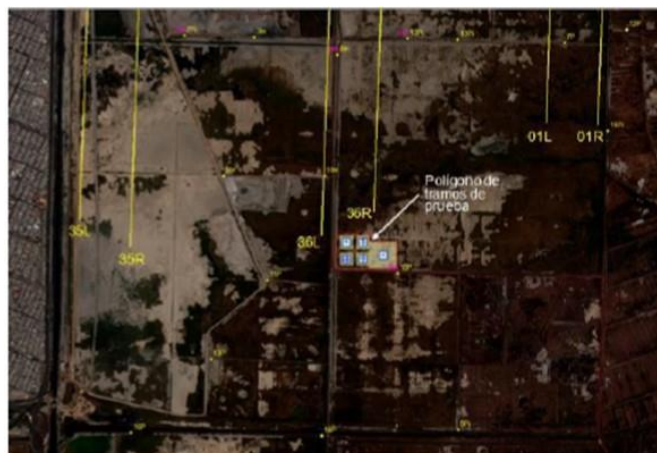


**Figura 4.** Ubicación del polígono de tramos de prueba (zona de terraplenes de prueba)





El polígono tiene acceso desde la autopista Peñón-Texcoco a través de un camino casi paralelo a la pista 36L/18R (2.6 km). El acceso al área experimental es por un camino transversal al mencionado, dejando éste hacia el oriente (Fig. 5).



**Figura 5.** Ubicación del polígono de tramos de prueba al sur de la pista 36R

En la figura 6 se muestra la ubicación del TPDV dentro del polígono de terraplenes de prueba.



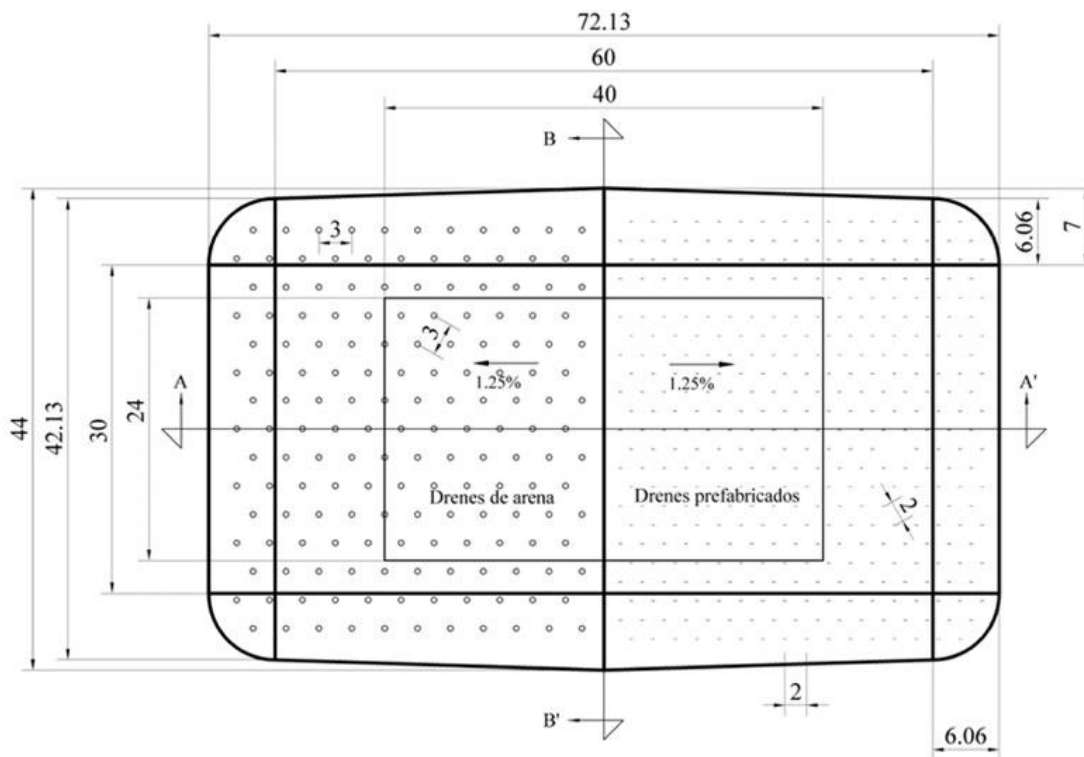
**Figura 6.** Ubicación del terraplén con precarga y drenes verticales

### Geometría del terraplén

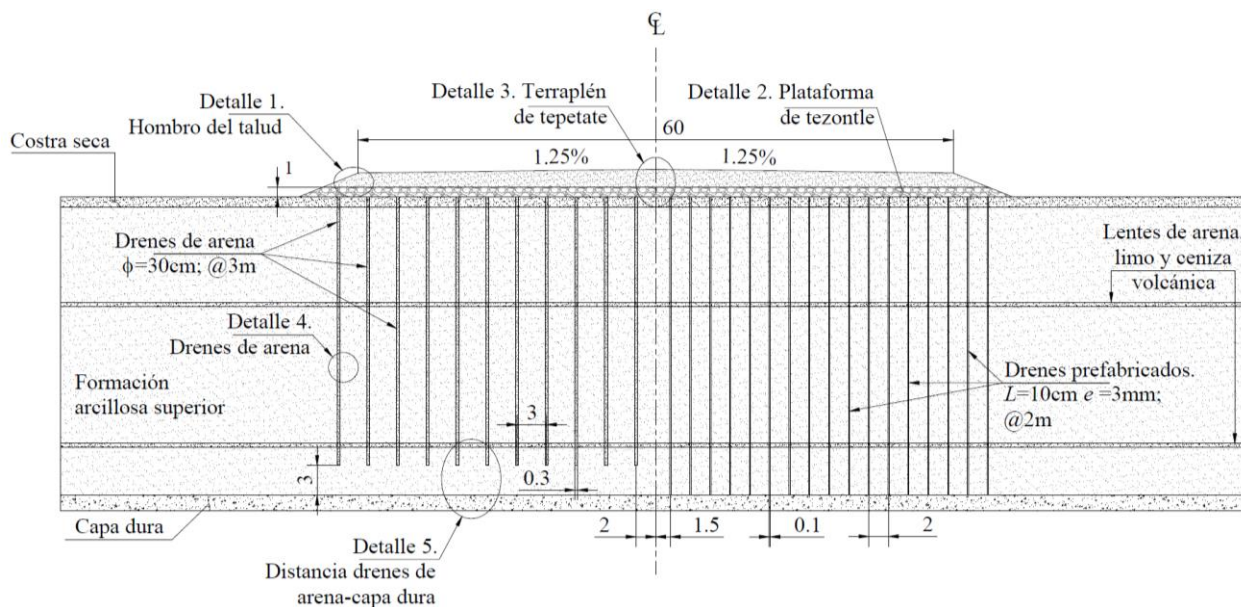
En las figuras 7 y 8 se muestran la geometría en planta y la sección transversal (al centro del terraplén) del TPDV. El terraplén está dividido en dos partes: del lado



izquierdo se instalaron drenes de arena y del lado derecho drenes prefabricados (Fig. 7). La figura 9 muestra los detalles indicados en la figura 8.



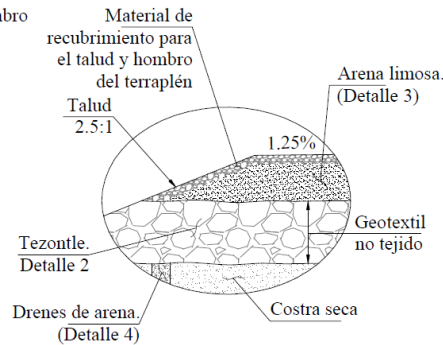
**Figura 7. Vista en planta**



**Figura 8. Sección transversal A-A'**

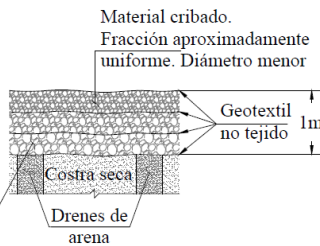


Detalle 1. Talud y hombro del terraplén.



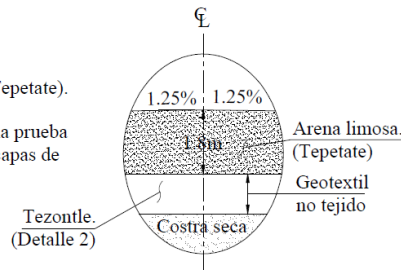
Detalle 2. El tezontle de material cribado se colocará en fracciones más o menos uniformes y en 3 capas separadas con geotextil no tejido.

Material cribado. Fracción aproximadamente uniforme. Diámetro mayor

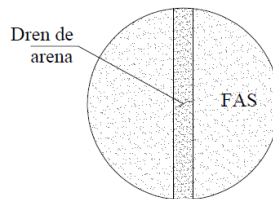


Detalle 3. Arena limosa (Tepetate).

Se compactará al 90% de la prueba Proctor Modificada, en 6 capas de 30cm.

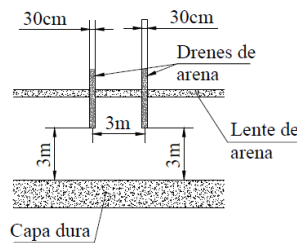


Detalle 4. Material para drenes. Arena limpia para concreto (ASTM-C33)



Detalle 5. Distancia del desplante de drenes de arena respecto a la capa dura.

Se debe evitar que la punta de los drenes de arena se desplante sobre algún lente de arena o capa dura



**Figura 9.** Detalles indicados en la figura 5



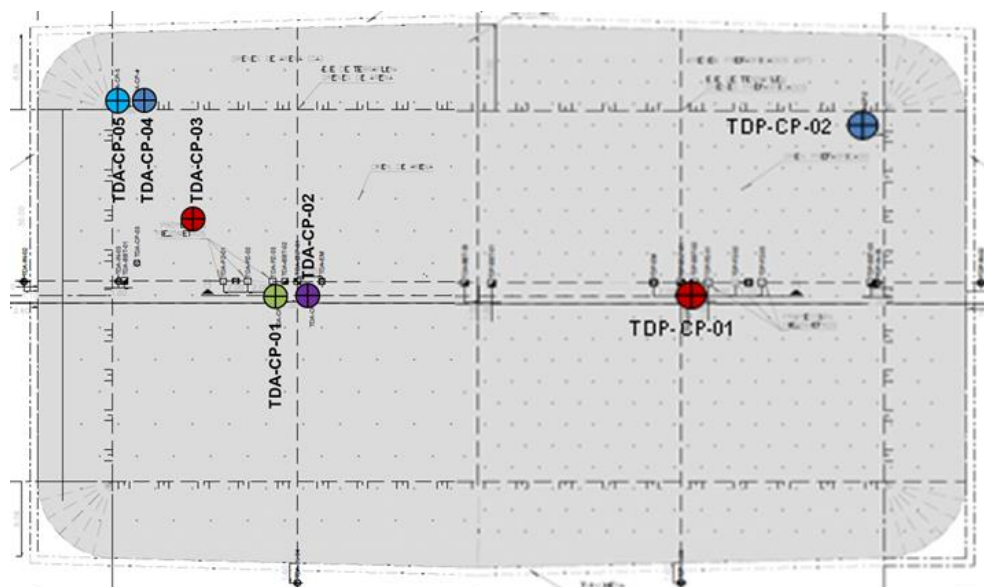


## Instrumentación

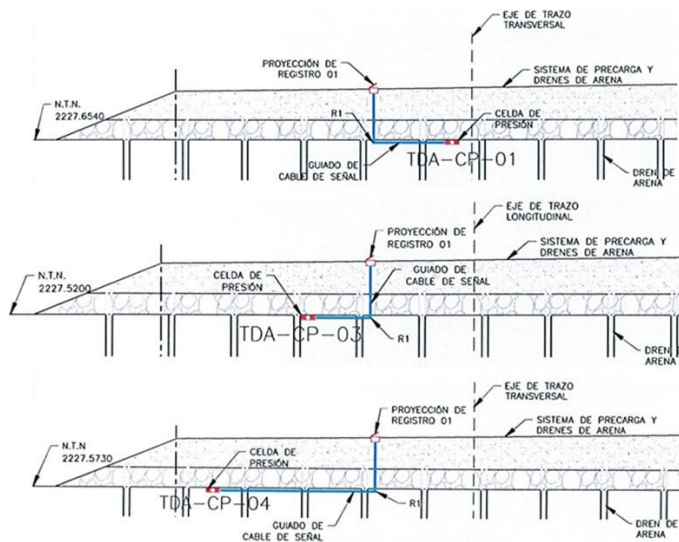
El TPDV cuenta con instrumentación geotécnica; para el retiro de la precarga se debe considerar la ubicación de dicha instrumentación. A continuación se mencionan los instrumentos ahí instalados y su ubicación aproximada.

### Celdas de presión en los contactos terreno-tezontle, dren de arena-tezontle y tezontle-tepetate

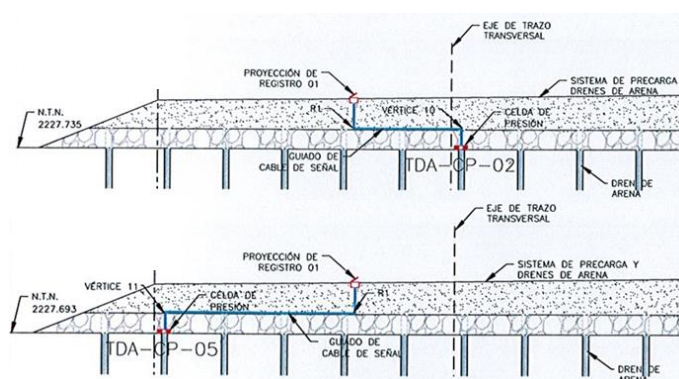
La Fig. 10 muestra la ubicación en planta de las celdas de presión (CP) instaladas en el TPDV. En el TPDA las celdas TDA CP 01, TDA CP 03 y TDA CP 04 fueron instaladas en el contacto terreno-tezontle; y las celdas TDA CP 02 y TDA CP 05 se colocaron en el contacto drenes de arena tezontle (Fig 12). En el TPDP las celdas TDP CP 01 y TDP CP 02 se instalaron en los contactos terreno-tezontle y tezontle-tepetate, respectivamente (Fig. 13). La celda TDA CP 02 podría quedar expuesta durante el retiro de la precarga, por lo que se solicita particular atención en la remoción del material de precarga, a fin de recuperarla.



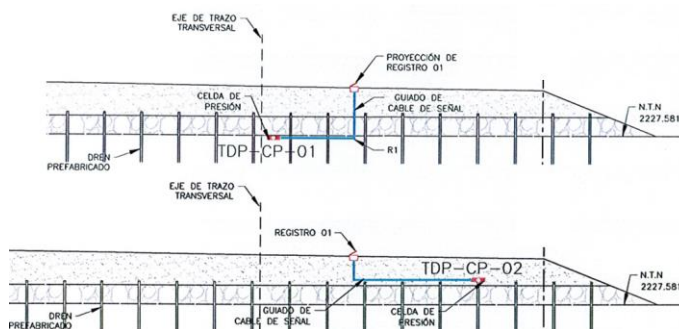
**Figura 10.** Ubicación en planta de las CP en el TPDV



**Figura 11.** Ubicación de las CP en el contacto terreno-tezontle (TDA-CP-01, 03 y 04)



**Figura 12.** Ubicación de las CP en el contacto dren de arena-tezontle (TDA-CP-02 y 05)

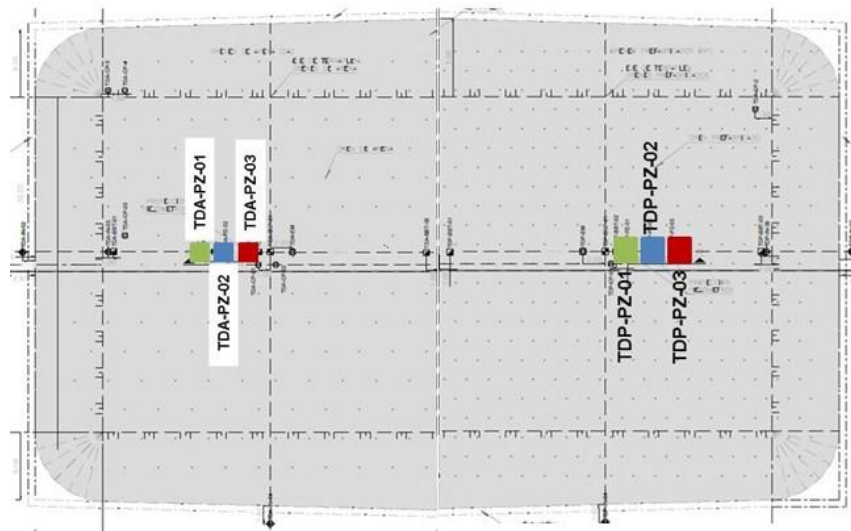


**Figura 13.** Ubicación de las CP en los contactos terreno-tezontle y tezontle-tepetate (TDP-CP-01 y TDP-CP-02, respectivamente)



## Estación piezométrica

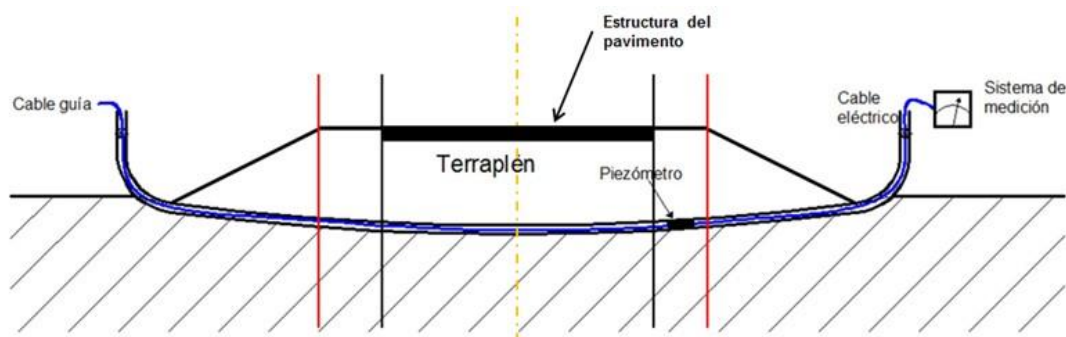
La figura 14 muestra la ubicación en planta de las dos estaciones piezométricas instaladas en el TPDV, una al centro del TPDA y otra al centro del TPDV.



**Figura 14.** Estaciones piezométricas en el TPDV

## Manguera horizontal transversal por debajo del tezontle

En la figura 15 se muestra un esquema de la manguera horizontal flexible que pasa por la base del terraplén en su sección transversal.

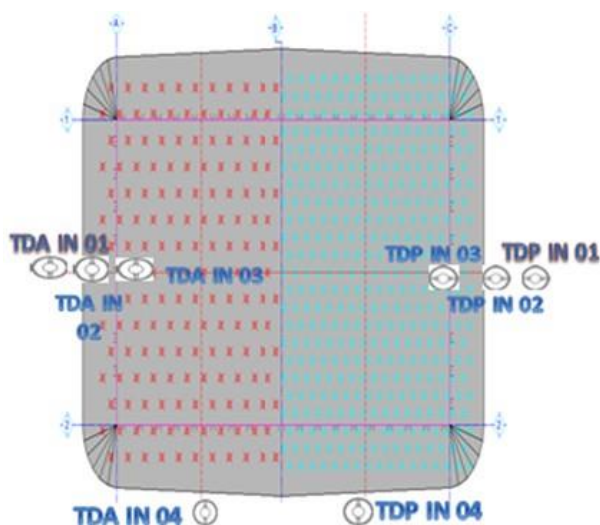


**Figura 15.** Esquema de manguera transversal por debajo de un terraplén



## Inclinómetros

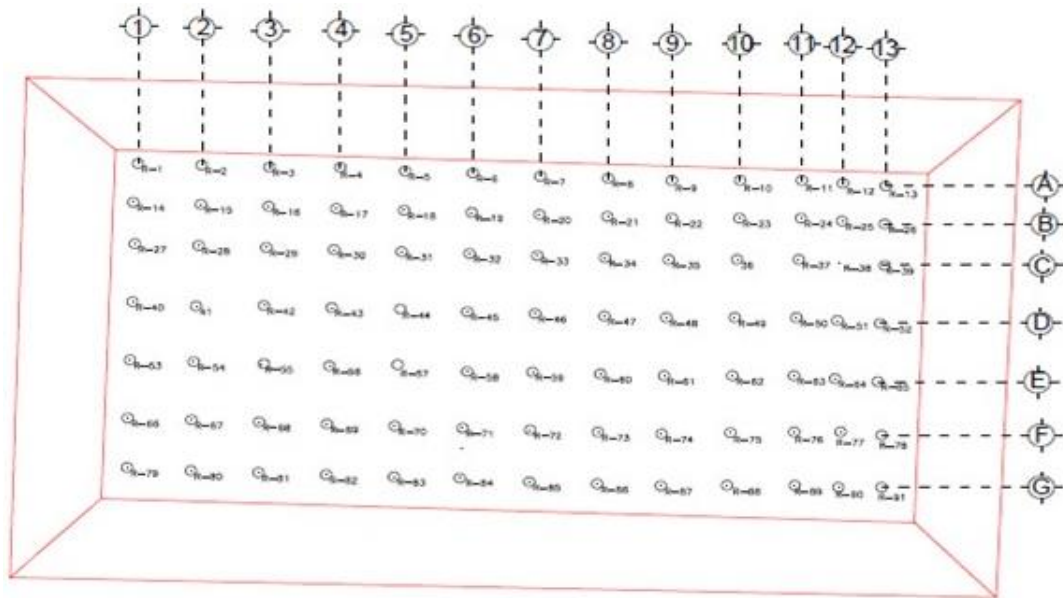
Se instalaron ocho tubos para inclinómetro a 31m de profundidad, cuatro para el TPDA y cuatro para el TPDP. La distribución en cada sub-tramo es la siguiente: en la sección transversal central, se instaló un inclinómetro en el hombro del terraplén, uno al pie del talud y uno más a 5 m de distancia del pie del talud. El cuarto inclinómetro se instaló en una sección ortogonal, al pie del talud. En la figura 16 se muestra la disposición en planta de los inclinómetros en el TPDV.



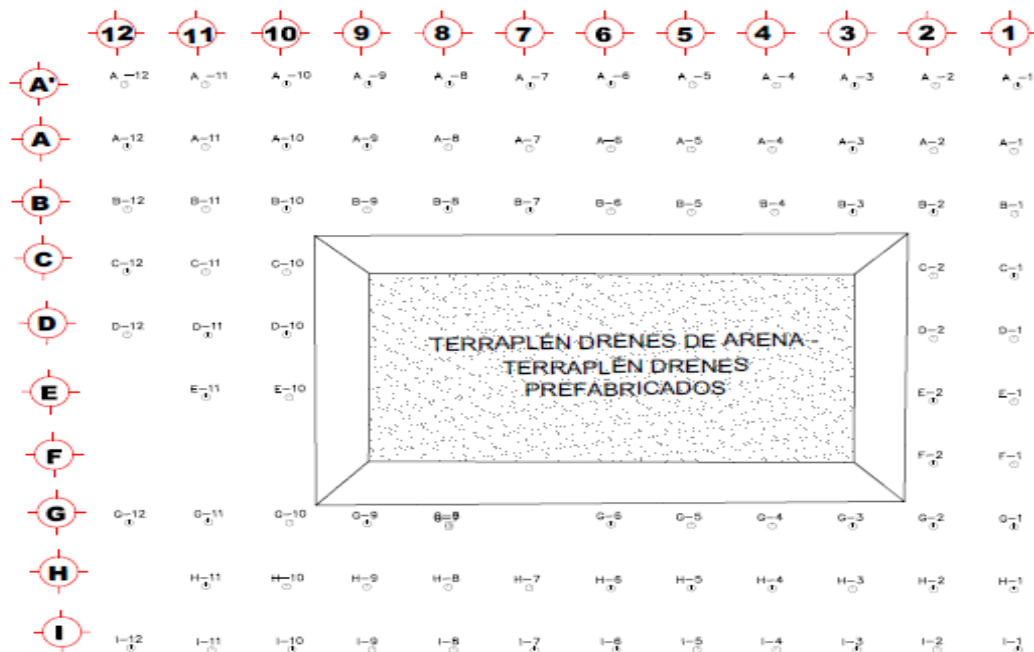
**Figura 16.** Disposición en planta de los inclinómetros en el TPDV

## Referencias superficiales en el terraplén y superficie del terreno

Se instalaron directamente sobre el pavimento clavos con cabeza roma, que sirven como referencias superficiales para el monitoreo topográfico de los asentamientos. Los clavos se instalaron según una retícula cuadrada de 5m por lado, cubriendo toda el área del terraplén. Los movimientos del terreno que son monitoreados topográficamente a partir de referencias superficiales consistentes en un tubo galvanizado de una pulgada de diámetro y de 50cm de longitud, que se hincaron sobre el terreno a cada 10m, sobresaliendo 5cm. En las figuras 17 y 18 se muestran los esquemas de ubicación en planta de las referencias superficiales colocadas en la superficie y el terreno alrededor del TPDV.



**Figura 17.** Ubicación en planta de referencias superficiales en el TPDV



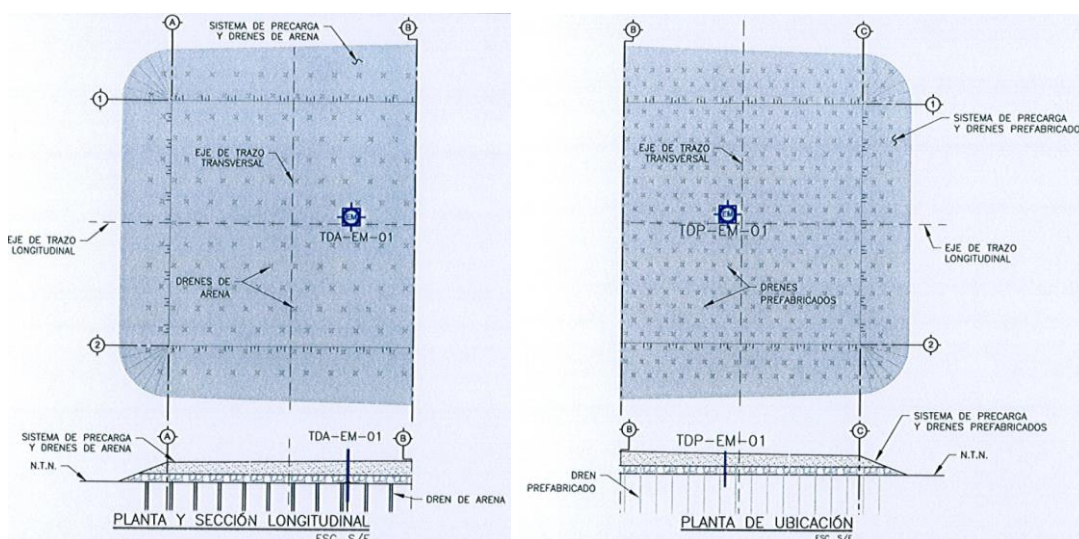
**Figura 18.** Ubicación en planta de referencias superficiales en el terreno alrededor del TPDV





### Extensómetros magnéticos

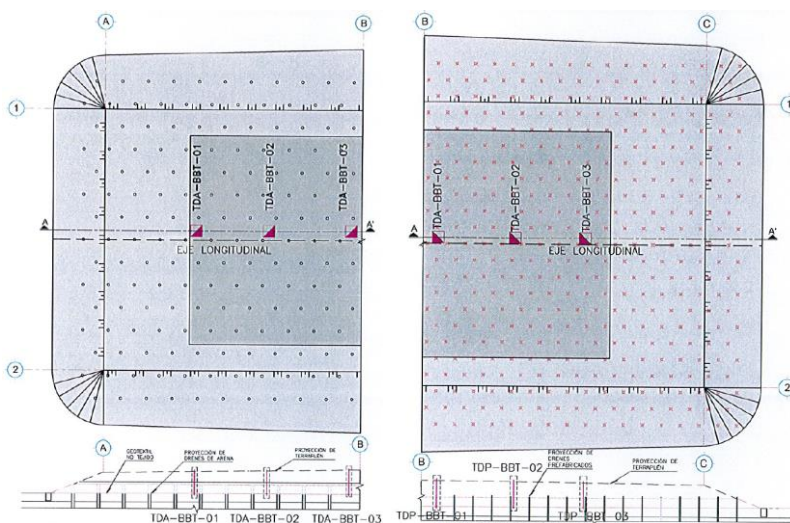
En la figura 19 se muestra la ubicación en planta de las dos tuberías instaladas para la auscultación de los extensómetros magnéticos instalados en el TPDV, uno al centro del TPDA y otro al centro del TPDV.



**Figura 19.** Ubicación en planta de las tuberías instaladas para la auscultación de los extensómetros magnéticos instalados en el TPDV

### Bancos bajo terraplén

Se instalaron tres bancos de este tipo en la sección central transversal al eje del trazo, un banco al centro y dos más en los extremos del área pavimentada (Fig. 20).



**Figura 20.** Ubicación en planta de las tuberías instaladas para la auscultación de los bancos bajo terraplén instalados en el TPDV



## Retiro de la precarga

A continuación se describe esquemáticamente el retiro de la precarga.

La altura total  $H_T$  del terraplén con sobrecarga (Fig. 21) se define como:

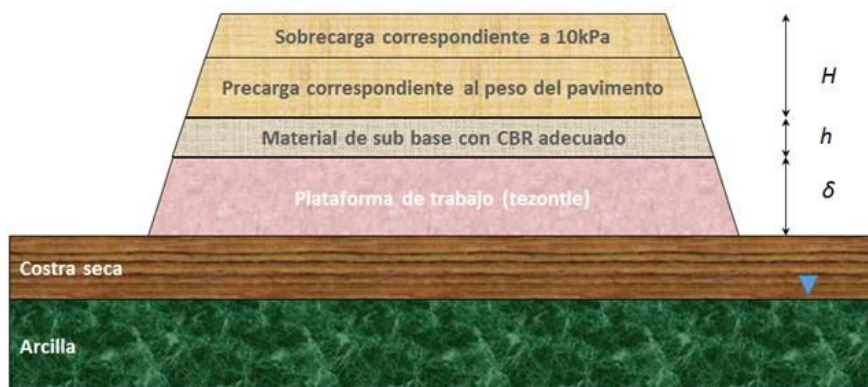
$$H_T = \delta + h + H \tag{1}$$

donde:

$\delta$  es la altura del tezontle

$h$  es la altura del material con CBR adecuado (tepetate)

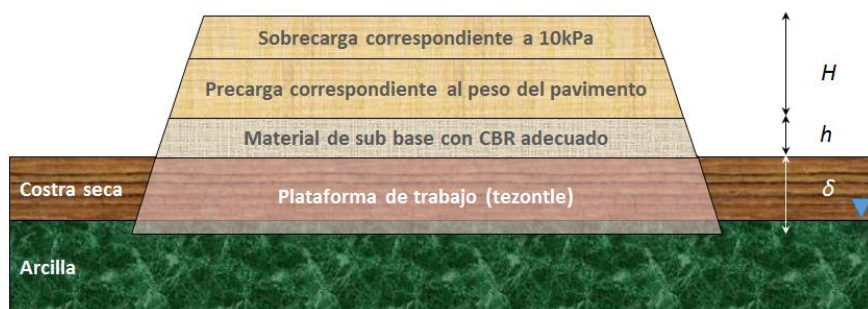
$H$  es la altura equivalente al pavimento más la sobrecarga



**Figura 21.** Materiales y alturas iniciales del terraplén

La altura del terraplén al final del tiempo de precarga  $H_F$  (Fig. 22), es:

$$H_F = h + H \tag{2}$$

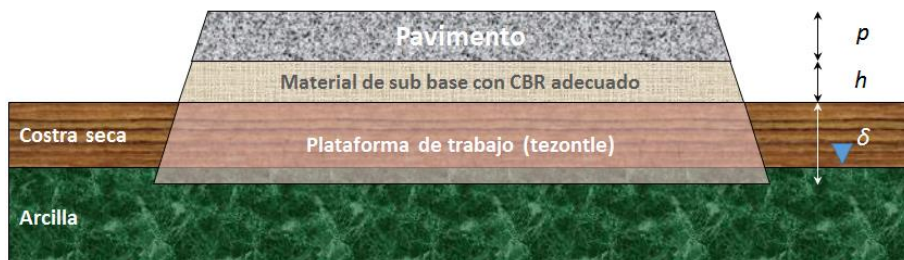


**Figura 22.** Altura del terraplén al final del tiempo de observación  $H_F = h + H$

Lo que debe retirarse es la altura de precarga equivalente al pavimento más la sobrecarga,  $H$  (Fig. 22). La altura de proyecto (Fig. 23) será entonces:

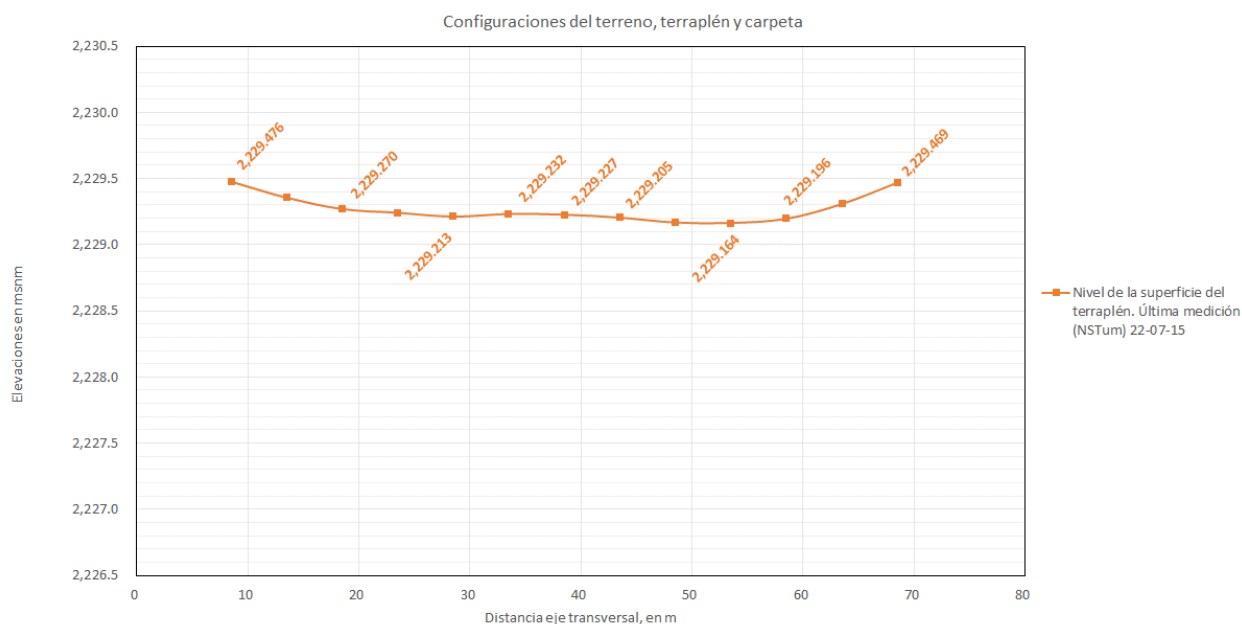


$$H_p = h + p \tag{3}$$



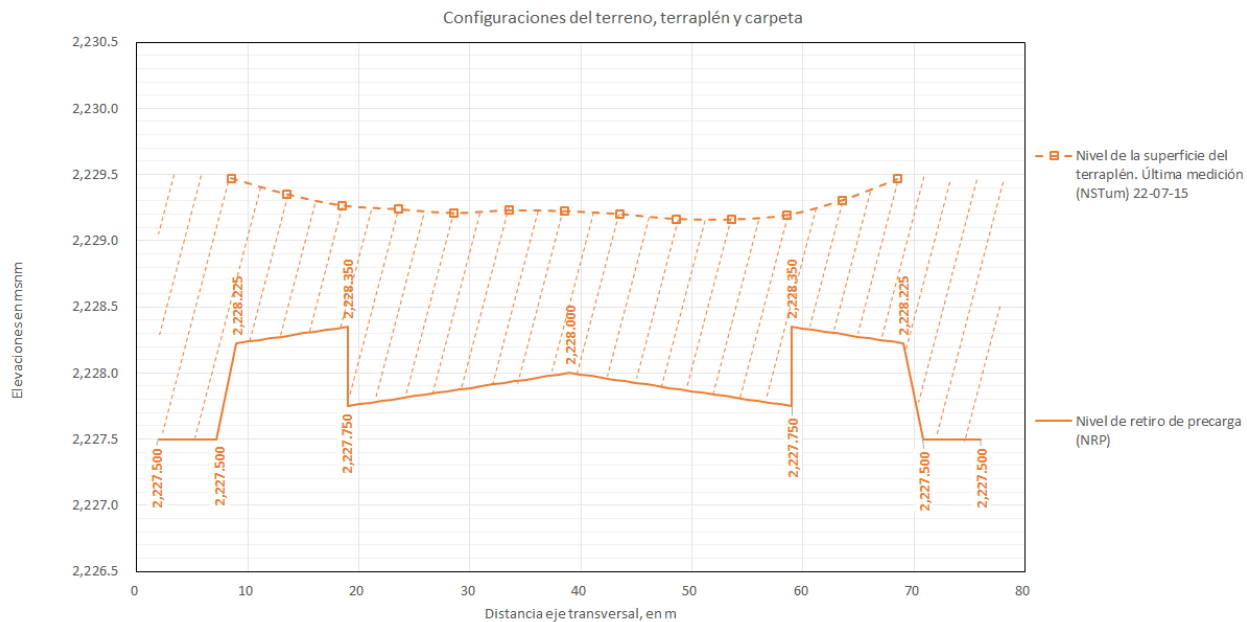
**Figura 23.** Altura de proyecto  $H_p=h+p$

Para el retiro de la precarga se deberá realizar el levantamiento topográfico de la superficie del terraplén. En la figura 24 se muestra la configuración de la superficie del terraplén sobre el eje transversal correspondiente a la última medición (22-07-15).



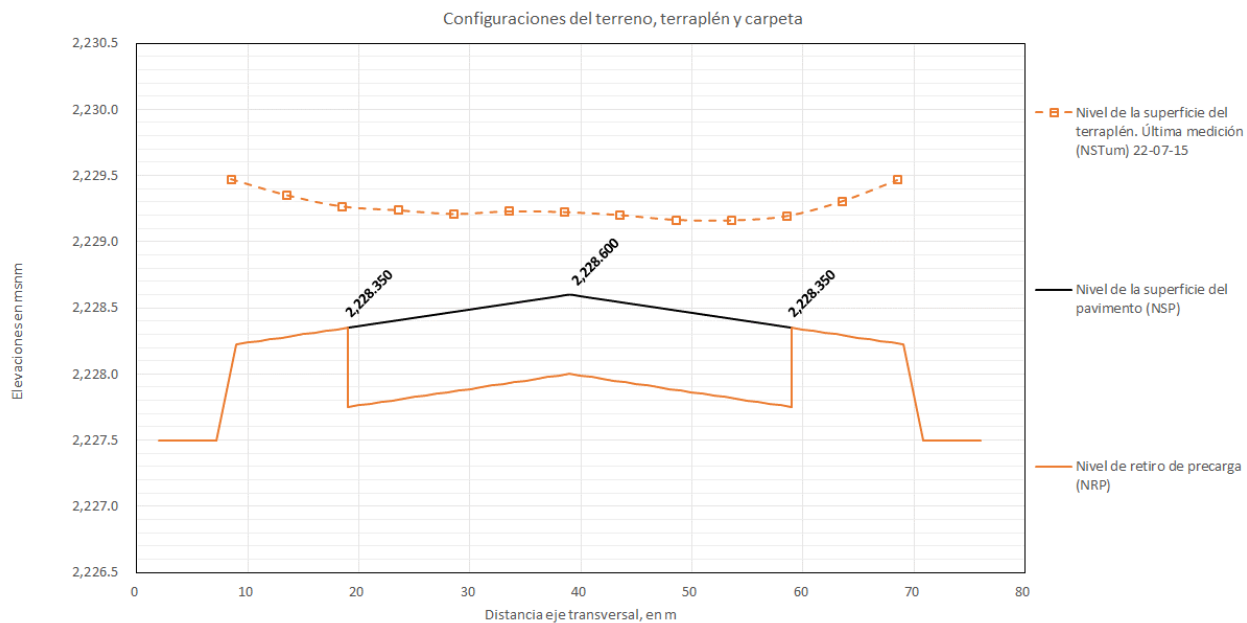
**Figura 24.** Configuración de la superficie del terraplén sobre el eje transversal. Última medición (22-07-15)

Se debe ubicar el eje longitudinal del terraplén en superficie y a partir de él, comenzar con el retiro de la precarga hasta los niveles indicados en la figura 25.

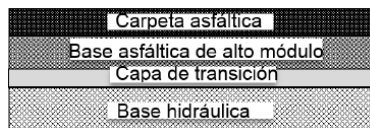


**Figura 25.** Configuración de la sub base del pavimento

Por último se construye la estructura del pavimento como se indica en la figura 26 y con las características y propiedades que se establecen en la figura 27.



**Figura 26.** Configuración final de la estructura del pavimento



Capa	Identificación programa FAARFIELD	CBR (%)	Módulo de rigidez (Mpa)	Módulo de Poisson
Carpeta asfáltica	P-401/P403 HMA Surface	-	3000*	0.35
Base asfáltica Tipo 1	P-401/P403 st (flexible)	-	10000*	0.35
Base asfáltica Tipo 2 (Capa de transición)	P-401/P403 st (flexible)	-	4000	0.35
Base hidráulica	P-209 Cr Ag	-	428	0.35

\* Por restricciones del programa FAARFIELD se asume un valor de 1379 MPa para la carpeta asfáltica y 2758 Mpa para las base asfálticas Tipo 1 y 2

**Figura 27.** Estructura del pavimento y propiedades de los materiales

### Instrumentación

Se deberán restablecer todos los instrumentos que se encuentran en operación actualmente. Al final de la construcción del pavimento se deberán colocar directamente sobre el pavimento clavos con cabeza roma, que servirán como referencias superficiales para el monitoreo topográfico de los asentamientos. Los clavos se instalarán en una retícula cuadrada de 5 m por lado, cubriendo toda el área del terraplén.