



Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.



Comportamiento y simulación de terraplén carretero construido con arcillas expansivas

“Tesis que como Requisito para obtener el Grado de Doctor en Ciencia de Materiales presenta”

M.I. René Álvarez Lima

Director de tesis

Dr. Alberto Díaz Díaz

Chihuahua, Chih. Febrero/2012

RESUMEN: Esta investigación nace de la observación física de tramos carreteros con asentamientos y deformaciones donde se intuyó una relación entre el agua o humedad prevaleciente en el sitio y las deformaciones de los terraplenes, lo cual motivó a su investigación y análisis. En las regiones del país en donde existen depósitos de arcillas expansivas del tipo vertisol con alto contenido de montmorillonita se presentan deformaciones, agrietamientos y fracturas en las estructuras de terraplenes carreteros construidos con este material cuando interactúan con el agua, a pesar de estar correctamente compactados. Estos fenómenos ocasionan costos importantes en reparaciones y mantenimiento implicando peligro e incomodidad a los usuarios. El objetivo principal de este documento radica en entender y analizar cual es el comportamiento de esos terraplenes potencialmente expansivos cuando son sometidos a condiciones de campo estableciendo una solución a la problemática que se presenta de manera que sea factible y de bajo costo.

Metodología: Se seleccionó un tramo carretero representativo, haciendo una extensa revisión bibliográfica de las últimas teorías de análisis para este tipo de materiales, adoptándose el modelo SFG como el indicado para los análisis, en este modelo se transita de un material insaturado a uno saturado. Se programaron 4 campañas de exploración geotécnica en distintos años y épocas recuperándose muestras para pruebas de laboratorio. Con todos los elementos básicos para alimentar el modelo se analizó el problema mediante simulación computacional considerando elasticidad pura y elasto-plasticidad, acoplado para cualquiera de los casos un modelo hidráulico y uno mecánico, así como su variación en el tiempo cuando transita del estado insaturado al saturado.

Resultados obtenidos: Mediante simulación, se constató que el agua impacta fuertemente en el comportamiento mecánico del terraplén de arcilla expansiva al ingresar al material del terraplén que está en condición insaturada. Se determinó que los valores de succión del terraplén son mayores que los del terreno natural, por lo que el terraplén se encuentra ávido de absorber agua. Mediante simulación se observa que el agua asciende y reduce el valor de succión del cuerpo del terraplén violándose rápidamente el criterio de resistencia antes de llegar a valores de saturación de 1, el criterio de rotura se rebasa cuando la succión es la de saturación (S_{sa}). Simultáneamente, la arcilla se expande desplazando material hacia el talud ya que ahí no se encuentra confinado. En la simulación transiente, el suelo presenta un “frente de rotura” del material y conforme avanza la saturación, queda atrás el material que ha violado el criterio de resistencia, esta región que presenta succión de saturación (S_{sa}) cuenta todavía con un porcentaje de aire en sus vacíos y esta presentando cortantes que rebasan el criterio de falla, de manera simultánea se presenta un esfuerzo normal ocasionado por el peso del terraplén que reduce todavía más el aire en los vacíos hasta que no queda aire en ellos e inicia un proceso de consolidación, en ese momento la arcilla está 100% saturada ($S=1$). Se determina que los planos de falla de cortante con la sobrecarga producen una compactación y no un deslizamiento de una masa de suelo rígido. Aunque un terraplén de arcilla expansiva este bien compacto, es suficiente el ingreso del agua hacia al terraplén para modificar los valores de succión a valores que rompen el material internamente. Una vez que el agua ingresa al terraplén “no la suelta” fácilmente y con ingresos regulares de humedad el terraplén se satura paulatinamente de manera irreversible. La simulación de la arcilla expansiva de estado saturado a insaturado es un problema complejo y el modelado de la interface terreno natural-terraplén requiere especial cuidado. La solución a la problemática es el aislamiento de la arcilla y en este documento se propone un encapsulado de terraplén y una pantalla interceptora del flujo de agua.

ABSTRACT:

This research stems from the physical observation of stretches of road with settlements and deformations which sensed a connection between water and humidity prevailing at the site and the deformation of the embankments, which motivated his research and analysis. In regions of the country where there are deposits of the type vertisol clays high in montmorillonite are deformations, cracks and fractures in the structures of highway embankments constructed with this material when they interact with water, despite being properly compacted. These phenomena cause significant costs on repairs and maintenance involving danger and inconvenience to users. The main objective of this paper is to understand and analyze what is the behavior of these embankments potentially expansive when subjected to field conditions by establishing a solution to the problem that is presented in a feasible and inexpensive. Methods: We selected a representative section of the highway, making an extensive literature review of recent theories of analysis for these materials, adopting the SFG model as indicated for analysis in this model is moving from an unsaturated material saturated. 4 campaigns were planned geotechnical exploration in different years and seasons to recover samples for laboratory tests. With all the basics to feed the model analyzed the problem by computer simulation considering pure elastic and elasto-plasticity, coupling for any of the cases a hydraulic and a mechanical model and its variation in time when the state transits to unsaturated saturated. Results: Through simulation, it was found that water strongly influence the mechanical behavior of expansive clay embankment material entering the landfill that is in unsaturated condition. It was determined that the values of suction of the embankment are greater than the natural ground, so that the embankment is eager to absorb water. By simulation indicate that the water rises and lowers the value of suction embankment body quickly violated the criterion of resistance before reaching saturation values of 1, the failure criterion is exceeded when the suction is the saturation (SSA). Simultaneously displacing the clay material expands towards the slope because there is not confined. In the transient simulation, the soil has a "broken front" of the material and with advancing saturation, are behind the material that has violated the standard of resistance, this region with the saturation suction (SSA) has still a percentage of air gaps and is presenting its cutting that exceed the failure criteria, simultaneously presents a normal stress caused by the weight of the embankment which further reduces the air in the gaps until there is no air in them and starts a process consolidation, then the clay is 100% saturated ($S = 1$). It is determined that the fault planes with overload shear produce compaction and not a slip of a rigid soil mass. Although an expansive clay embankment is well compact enough water ingress into the embankment to modify the values of suction values that break the material internally. Once the water enters the bank "does not let go" easily and regular income of moisture saturates the embankment gradually irreversibly. The simulation of the expansive clay saturated unsaturated state is a complex problem and the modeling of natural land-fill interface requires special care. The solution to the problem is the isolation of the clay and in this paper proposes a package of embankment and a screen intercepting the flow of water.

INTRODUCCION.

1.- Generalidades.

En muchos de los tramos carreteros de la zona norte del estado de Veracruz, se presentan asentamientos y agrietamientos en los pavimentos que van de medianos a severos. La inversión en conservación en estas zonas es continua e importante para el estado (tabla 1).

Tabla 1: Inversión de conservación durante de los años 2005 al 2011.							
(Fuente: Centro SCT Veracruz.- México).							
Concepto	2005 ejercido M.D.P.	2006 ejercido MDP	2007 ejercido MDP	2008 ejercido MDP	2009 ejercido MDP	2010 ejercido MDP	2011 ejercido MDP
Periódica	297.78	301.5	432.21	304.37	159.31	158.20	25.99
Rutinaria	87.72	98.54	92.72	116.73	164.12	167.45	111.32
Totales	385.5	400.04	524.93	421.10	323.43	325.65	137.31

El lugar en donde se seleccionó un tramo representativo pertenece a la planicie costera del golfo de México, es característico de la zona que existan lomeríos bajos con pendiente hacia el este, la red hidrográfica pertenece a la vertiente del golfo de México y es típicamente de patrón dendrítico, se trata de una planicie costera compleja, geomorfológicamente el área puede considerarse en etapa de madurez y la secuencia geológica expuesta en el sitio es arcillo-arenosa con acumulación de depósitos cuaternarios no consolidados. Los depósitos arcillosos en el sitio pertenecen a un gran monoclinial que buza ligeramente hacia el este de periodo terciario y época oligoceno. Localmente, los materiales pertenecen a la formación Alazán que se correlaciona con los estratos superiores de la formación Palma Real, se tratan de lutitas arenosas con cementante calcáreo en estratos medianos y gruesos es típico el color gris con intemperismo en color amarillo ocre (carta geológica Tamiahua F14-9 INEGI México 2011). Geológicamente, la región es de unidades de lutitas y areniscas que fueron formadas a partir de depósitos terrígenos en ambientes de aguas someras, estos materiales forman un perfil de meteorización vertical y superficialmente se presentan las mayores alteraciones en el material por estar en contacto con el medio ambiente. Los suelos arcillosos de tipo vertisol con alto contenido de montmorillonita se encuentran ampliamente distribuidos en el país (Zepeda y Castañeda 1987) Fig. 1, en esta figura se observa que el estado de Veracruz por razones de formación geológica tiene abundancia de este material y la práctica profesional indica que no hay problemas de expansión al sur de este estado siendo congruente con el hecho de que la forma en que se formaron los depósitos terrígenos en la región sur es muy diferente al los

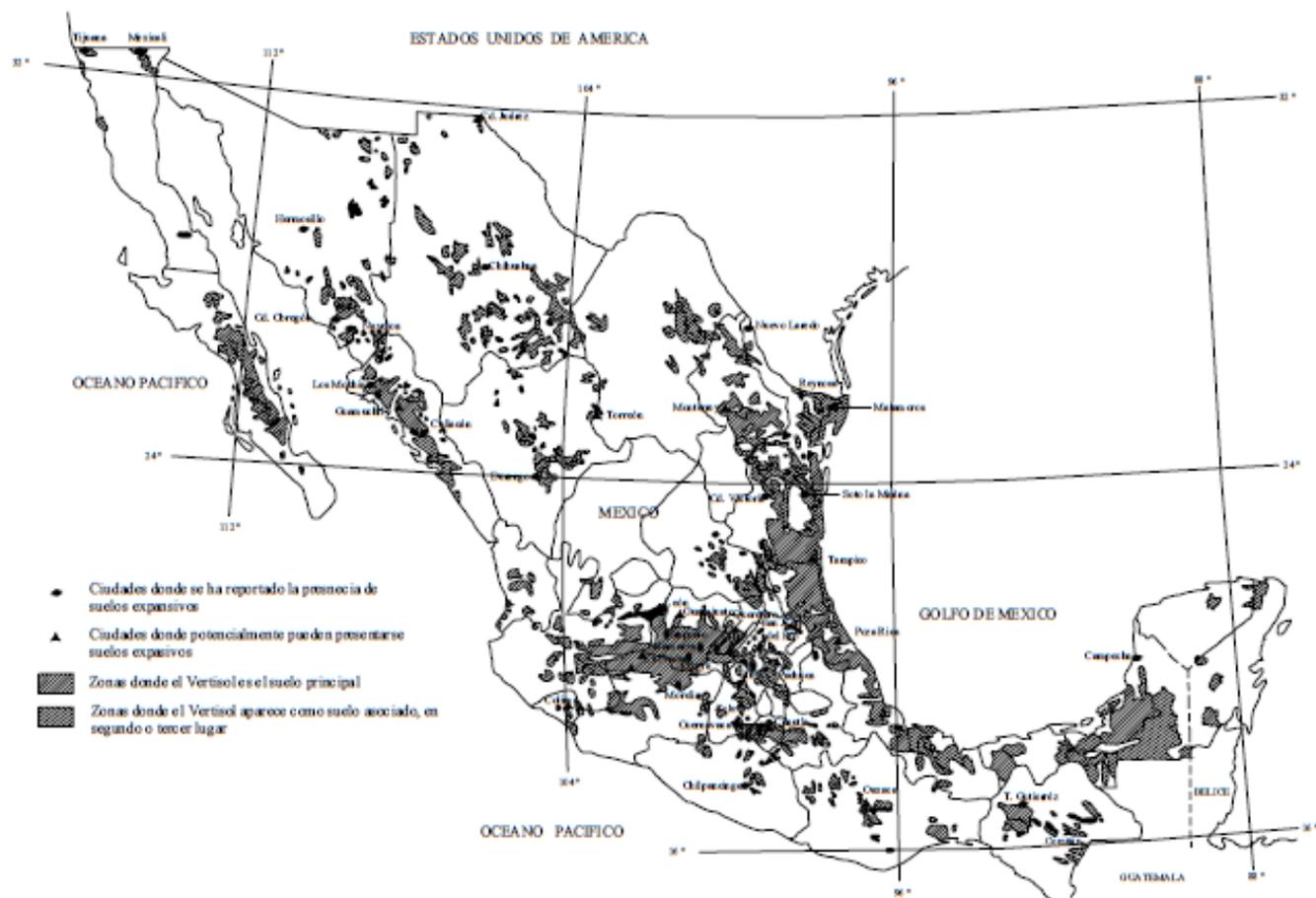


Fig.1 Zonas potenciales de suelos expansivos en la Republica Mexicana (Zepeda y Castañeda, 1987)

materiales de la zona norte de este estado. Hacia la zona norte del estado si se presentan problemas de expansión en la unidad de lutita-arcilla de época terciaria oligoceno. Por otro lado, hacia la zona sur del país existe abundancia de agua y los suelos son principalmente saturados o muy cercanos a la saturación, y a la inversa hacia la zona norte del país, los suelos son principalmente insaturados, la variación de insaturado a saturado puede ser estacional y entonces de manera natural estos materiales transitan de un estado parcialmente saturado a uno saturado y es en ese tránsito en donde las teorías han tenido que evolucionar para expresar correctamente los cambios de comportamiento mecánico e hidráulico del material de un estado a otro. El ámbito de análisis compete a la ciencia de materiales y a la geotecnia, actualmente apoyadas con herramientas computacionales y para esta investigación de acuerdo al siguiente:

Objetivo: Analizar el comportamiento con respecto al tiempo de un terraplén tipo carretero en un material de suelo arcilloso y expansivo, simulándolo y estableciendo una solución aterrizada a la problemática que se presenta.

Y los Objetivos particulares...

- 1.- Caracterizar los materiales de suelo con orientación a la solución..
- 2.- Analizar el comportamiento mecánico e hidráulico con respecto al tiempo para fines de diseño y proyección.
- 3.- Modelar y simular el efecto de la solución propuesta en el comportamiento del flujo de agua bajo un terraplén.
- 4.- Establecer una metodología de diseño del conjunto.

2.- Marco Teórico.

En los inicios de la Geotecnia, Karl Vonn Terzaghi (1936) desarrolló el concepto de esfuerzo efectivo para suelos saturados en donde la variable de esfuerzo efectivo es:

$$\bar{\sigma} = \sigma - u_w \quad (1)$$

En ella, $\bar{\sigma}$ es el esfuerzo efectivo, σ es el esfuerzo total y u_w es la presión del agua de poro, este concepto hasta la fecha ha sido utilizado ampliamente en la mecánica de suelos saturada, su contemporáneo Biot (1941) se percató que los esfuerzos principales para un suelo insaturado no quedaban completamente explicados con este concepto y fue el primero en sugerir el uso de dos variables de esfuerzo independientes cuando formulaba la teoría de consolidación para un suelo parcialmente saturado. Desde el punto de vista de la mecánica del medio continuo, se puede observar que el estado de esfuerzos en un punto para un suelo insaturado (Fig. 2), puede definirse con dos tensores de esfuerzo independientes, los tensores de esfuerzo serían:

$$\begin{bmatrix} (\sigma_x - u_a) & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & (\tau_y - u_a) & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & (\tau_z - u_a) \end{bmatrix} \quad y \quad \begin{bmatrix} (u_a - u_w) & 0 & 0 \\ 0 & (u_a - u_w) & 0 \\ 0 & 0 & (u_a - u_w) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde x, y e z son los esfuerzos totales en las direcciones x, y e z, respectivamente, u_w = presión de agua y u_a la presión de aire de poro.

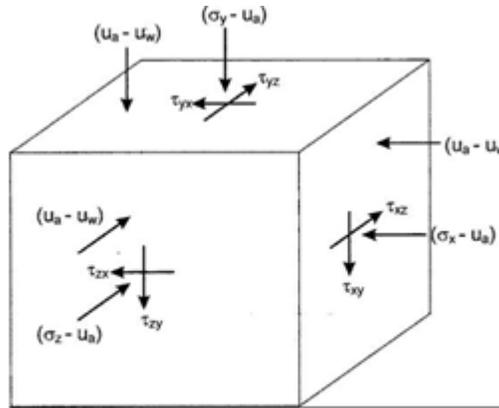


Fig.2.- Cubo de esfuerzos para suelos parcialmente saturado.

En términos prácticos puede decirse que el esfuerzo normal neto, refleja la actividad humana cuando se aplican cargas o descargas o la carga propia del material, la succión mátrica representa el impacto del clima en el material.

Casi dos décadas después, se demostró que era posible separar la medida de las presiones de agua de poro y del aire de poro mediante el uso de discos de cerámica de alto valor de entrada de aire (Bishop et. al. 1960), entonces Bishop trató de identificar un esfuerzo efectivo simple e intentó representarlo a partir de un equilibrio de fuerzas con la ecuación:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - u_a \delta_{ij} + \chi(u_a - u_w) \delta_{ij} = \bar{\sigma}_{ij} + \chi^s \delta_{ij} \quad (3)$$

En donde aparecen por separado la presión del aire y la del agua pero incluyendo un factor “ χ ”. Una de las dificultades en el uso de la ecuación (3) es precisamente este factor empírico “ χ ” que fue incluido con la finalidad de que la succión estuviera dentro del estado de esfuerzos. Estudios experimentales posteriores mostraron que la ecuación presentaba limitaciones en algunos casos, también había dificultad de obtener este parámetro “ χ ” porque este parámetro depende del estado del material (por ejemplo, el grado de saturación o la succión) e incluso de su trayectoria de esfuerzo. Posteriormente, Jennings & Burland (1962) reportó la dificultad al modelar el comportamiento general mecánico de suelos no saturados al explicar el cambio de volumen por colapso durante su humedecimiento.

Cabe en este momento definir la succión para dar agilidad a la comprensión de los párrafos siguientes. Para fines de este documento, la succión (S) del suelo se refiere a la succión mátrica, la cual consiste en el potencial de capilaridad y de absorción. Cuando el agua de poro

existe como agua capilar en relativamente altos grados de saturación, el potencial de capilaridad (Y_c) domina sobre la succión mátrica y se tendrá que: $S=Y_c=U_a-U_w$.(Fig.3). Cuando el agua de poro existe como una película de agua adsorbida en el suelo el potencial de absorción (Y_a) llega a ser dominante sobre la succión mátrica. Considerando la presión de agua de poro (U_w), la succión mátrica puede ser expresada como $S=U_a-U_w$ y puede ser usada continuamente para un rango de saturación amplio, desde completamente saturado a estado muy seco.

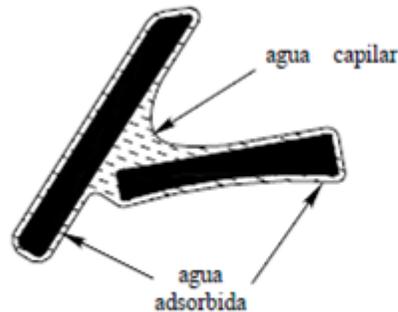


Fig.3.- Agua en un suelo parcialmente saturado sujeto a capilaridad y absorción que en combinación producen la succión mátrica.

En este caso la presión de agua verdadera no está bien definida puesto que no es un único punto en el material y es dependiente en la proximidad de las superficies de las partículas y se habla entonces de una presión de agua aparente, esta presión de agua aparente puede ser introducida para cuantificar el potencial de absorción como: $U_w=U_a-Y_a$, es decir la presión de agua aparente representa el potencial de absorción negativo medido en exceso de la presión de aire.

Cuando la presión del aire es la atmosférica (cero), la presión de agua aparente es el potencial de absorción negativo.

En los años 60's a los 70's se dieron cuenta que era posible utilizar dos conjuntos independientes de variables del esfuerzo para modelar el comportamiento del suelo no saturado en vez de combinarlo en un único esfuerzo efectivo.

Por ejemplo Coleman sugirió el uso de los esfuerzos radiales y axiales netos y la presión de agua de poro neta para representar los estados de esfuerzo triaxiales.

Fredlund y Morgenstern proporcionaron una base teórica y la justificación para el uso de dos variables de estado de esfuerzo independientes superponiendo campos de esfuerzo en equilibrio en el contexto de la mecánica del medio continuo.

Fredlund et al. (1978), propusieron una ecuación para la resistencia al corte que se trata de una extensión del criterio de Mohr-Coulomb para suelos saturados y que es representada por:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (4)$$

Finalmente Sheng et al, plantea un modelo llamado SFG (2008) en donde las variables de esfuerzo pueden conducir a una descripción continua del comportamiento del suelo ya que suponen que las variables de deformación de trabajo conjugado no son independientes, además es simulable.

Las variables de esfuerzos ahora son:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{ij} - u_a \delta_{ij} + S_r (u_a - u_w) \delta_{ij} \\ (u_a - u_w) \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \varepsilon_{ij} \\ S_r \end{pmatrix} \quad (5)$$

En esta ecuación S_r es el grado de saturación y se puede observar que la ecuación $\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij} + S_r (u_a - u_w) \delta_{ij}$ se convierte en $(\sigma_{ij} - u_w) \delta_{ij}$ cuando el material está saturado y se garantiza la transición de insaturado a saturado.

Con respecto a la simulación sin duda, el trabajo de Sheng, Sloan, Gens y Fredlund (2010) y las correcciones realizadas en por ellos mismos (2011) Se encuentran estrechamente ligadas a este último modelo

Todos estos modelos requieren la curva de retención de humedad (WRC) y aunque existen varios métodos de laboratorio, son laboriosos y costosos y presentan una dispersión que la hace hasta la actualidad aproximada, una manera práctica de obtenerla es utilizando las propiedades índice de los materiales que son fácil de obtener en los laboratorios de geotecnia (Zapata et al,2000 ; Aubertin et al, 2003), la curva así obtenida es suficiente para la mayoría de los casos (Fredlund 2006), en la realización de esta investigación se utilizó la metodología de Aubertin et al.(2003).

En el tránsito de contenido de agua de un suelo parcialmente saturado o viceversa el coeficiente de permeabilidad es relativo y está en función del contenido volumétrico de agua y de la carga hidráulica (Maulem 1976), este contenido de agua se utiliza de manera volumétrica y no gravimétrica como es común en la mecánica de suelos saturada en México. Varios investigadores han obtenido ecuaciones para modelar la curva característica, tales como, Gardner (1958), Brooks y Corey (1964), Farrel y Larson (1972), Van Genuchten (1980), Williams et al (1983), McKee y Bumb (1987), Fredlund y Xing(1994) y Fredlund (1999) en donde ya incorpora la histéresis en el comportamiento de la curva característica, todos ellos buscaron el mejor ajuste posible de acuerdo a los tipos de materiales ensayados. De ellos, la ecuación de Van Genuchten y el ajuste de Aubertin et al, resulta de fácil manejo y suficiente por valuar sus parámetros de ajuste en el punto medio siempre y cuando se conozca la succión residual y la de saturación que en este caso se obtienen con la metodología de Aubertin et.al.(2003), Aubertin reúne un grupo de ecuaciones para predecir la relación entre el contenido volumétrico del agua o su correspondiente grado de saturación y la succión. En este modelo (MK) se asume que la retención del agua es producida por efecto de la capilaridad y las fuerzas de adhesión. Este modelo plantea una manera práctica de estimar la curva de retención de agua (WRC) y de la succión residual, así, a partir del límite líquido, limite plástico, el porcentaje de material fino pasando por la malla 200 (0.075mm), la relación de vacíos, densidad de sólidos y la humedad volumétrica, se resuelve el modelo utilizando las constantes σ_w (tensión superficial del agua igual a 0.074 N/m a 20°C), γ_w (Peso volumétrico del agua igual a 9.8 kN/m³ a 20°C), $\lambda = 0.2$ m²/gr (constante válida para suelos con superficie específica S_m entre 22 y 433 m²/gr y limite liquido entre 18 y 127%)(Mbonimpa et al 2002), para el ajuste de la curva característica a las observaciones experimentales también se fija el extremo al que tienden todas la curvas, las constantes de este ajuste son, $\psi_0 = 10000000$ cm, $\psi_n = 1$ cm, $a_c = 0.007$ y $m = 0.0003$, a partir de ahí se operan las ecuaciones del modelo hasta

obtener un tabular del cambio de la humedad volumétrica y su correspondiente valor de succión, de este modelo es importante anotar que la succión residual que vale.

$$\psi_r = 0.86 \left(\frac{\xi}{e} \right)^{1.2} w_L^{1.74} \quad (6)$$

En donde e es la relación de vacíos, w_L el límite líquido y ξ es el 15% de la densidad de sólidos.

El efecto de la succión modifica al coeficiente de permeabilidad. La determinación del coeficiente de permeabilidad relativo, se puede valuar mediante la ecuación de Richards que en conjunto con la ecuación de Van Genuchten proporcionan una base para procesar en la simulación el comportamiento hidráulico del material. Una vez sentadas las bases teóricas para el comportamiento de los suelos parcialmente saturados Alonso fue el primero en elaborar un marco teórico elasto-plástico mediante el modelo básico de Barcelona (BBM) en donde el esfuerzo neto y la succión son variables de esfuerzo (Fig.4).

Posteriormente, Gens et al.(2005), extendieron el modelo BBM para suelos altamente expansivos considerando la interacción entre las macro y micro estructuras de los suelos y generalizaron a la teoría de la plasticidad. Más recientemente, Sun DA et al consideraron la incorporación de la histéresis hidráulica de la curva característica al modelo BBM. Finalmente, se reúnen Daichao Sheng, Antonio Gens, Delwyn G. Fredlund y Scott W. Sloan creando el modelo SFG (2010 y 2011) que incluye el comportamiento volumétrico, el de esfuerzo y el hidráulico asociado con la saturación o cambios de succión. Para este modelo los esfuerzos medios netos y los límites de cedencia asociados a la succión se muestran en la figura 5, para un suelo que fue consolidado a 300kPa a cero Succión.

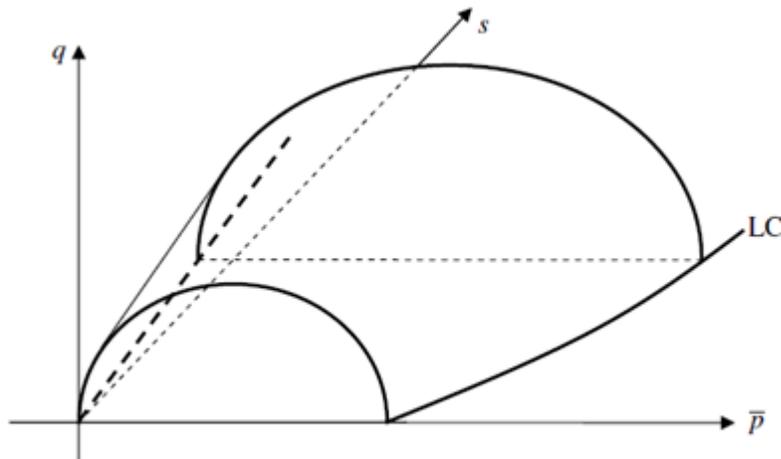


Fig.4.- Superficie de cedencia tridimensional del Modelo Básico de Barcelona (BBM)

Cada curva de la figura 5 está asociada a las ecuaciones de comportamiento para \bar{p}_0 , \bar{p}_c y \bar{p}_{cn} para un suelo insaturado que es comprimido o compactado en una succión cercana a la succión de saturación

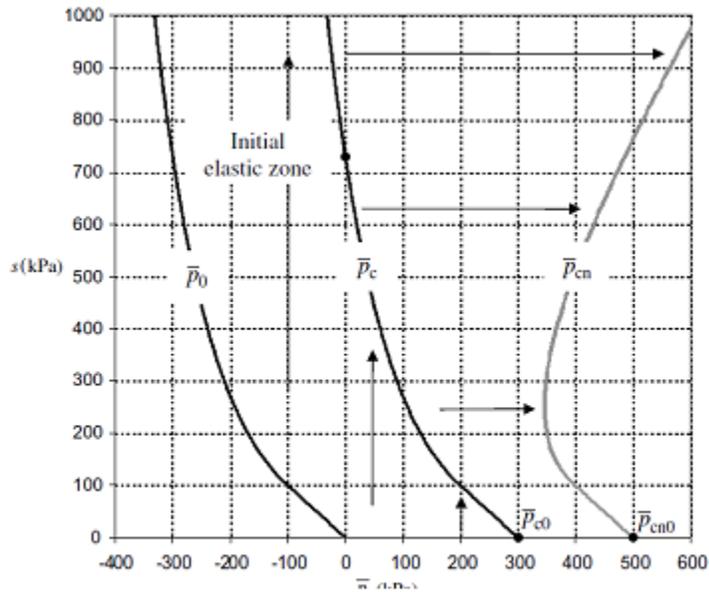


Fig. 5.- Superficie de cedencia inicial para un suelo que fue consolidado a 300 kPa en cero succión y su evolución cuando es comprimido a diferentes niveles de succión ($S_{sa}=100$ kPa).

La superficie de cedencia (Sheng et al 2010) es:

$$\bar{p}_{cn} = \begin{cases} \bar{p}_{cn0} - s & S < S_{sa} \\ \frac{\bar{p}_{cn0}}{\bar{p}_{c0}} \left(\bar{p}_{c0} + S - S_{sa} - (S_{sa} + 1) \ln \frac{S + 1}{S_{sa} + 1} \right) - S & S \geq S_{sa} \end{cases} \quad (7)$$

En donde \bar{p}_{c0} es la presión de preconsolidación inicial en cero succión y \bar{p}_{cn0} es la nueva presión de consolidación en cero succión. Para un suelo consolidado desde un estado de lodo, la superficie de cedencia decrece con el incremento de la succión y tiene la ecuación siguiente:

$$\bar{p}_c = \begin{cases} \bar{p}_{c0} - S & S \leq S_{sa} \\ \bar{p}_{c0} - S_{sa} - (S_{sa} + 1) \ln \frac{S+1}{S_{sa}+1} & S > S_{sa} \end{cases} \quad (8)$$

También, para un suelo en estado de lodo que nunca fue consolidado la presión de consolidación inicial \bar{p}_{c0} es cero y la superficie de cedencia toma la forma:

$$\bar{p}_0 = \begin{cases} -S & S < S_{sa} \\ -S_{sa} - (S_{sa} + 1) \ln \left(\frac{S+1}{S_{sa}+1} \right) & S \geq S_{sa} \end{cases} \quad (9)$$

Donde \bar{p}_0 define el esfuerzo de tensión aparente del suelo como una función de la succión.

En esta grafica y analizándola, se puede apuntar que la transición entre el estado saturado e insaturado es continuo y suave a lo largo de los tres esfuerzos de cedencia, que las superficies de cedencia \bar{p}_c y \bar{p}_{cn} no son convexas en el espacio \bar{p} -s y que los caminos que siguen las superficies de cedencia son diferentes para los diferentes esfuerzos.

Si el modelo Cam Clay Modificado (MCC) se usa como base para el modelo de suelos saturados, la superficie de cedencia es elíptica y puede ser extendida al eje de succión de acuerdo a las direcciones x,y,z.

$$f = q^2 - M^2 (\bar{p} - \bar{p}_0)(\bar{p}_c - \bar{p}) = 0 \quad (10)$$

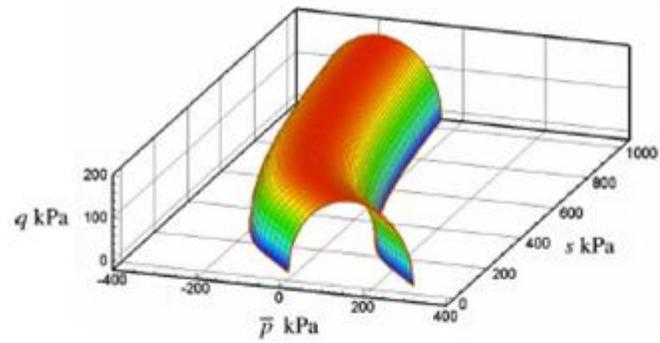
En donde f es la superficie de cedencia, q es el desviador de esfuerzos y M es el parámetro de esfuerzo cortante que está definido por la pendiente de la línea del estado crítico en el espacio q-p.

Un ejemplo de superficies de cedencia para dos tipos de suelos insaturados se muestran en la Fig. 6.

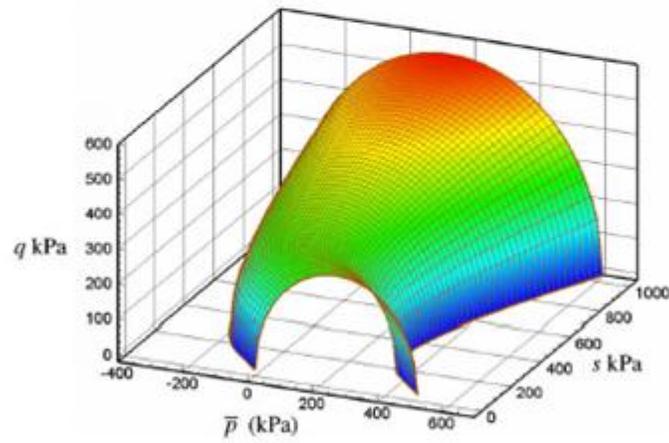
Así mismo, el esfuerzo cortante del suelo insaturado se puede expresar también con la siguiente función en donde se separa el efecto de la succión de la cohesión efectiva (Fredlund et.al.1978).

$$\tau = [c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi'] + [(u_a - u_w) \tan \phi^b] = \bar{c} + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' \quad (11)$$

Donde τ es el esfuerzo cortante, c' es la cohesión efectiva y normalmente vale cero a menos que el suelo este cementado, σ_n es el esfuerzo normal en el plano de falla, ϕ' es el ángulo de fricción interna efectivo del suelo, ϕ^b es el ángulo de fricción debido a la succión y \bar{c} la cohesión aparente que incluye la fricción debida a la succión.



(a) Yield surface for air-dried soil from slurry.



(b) Yield surface for compacted soil.

Fig. 7. Modified Cam Clay yield surfaces extended to suction axis ($s_u = 100$ kPa).

Fig.6.- Superficies de cedencia del modelo Cam Clay Modificado y extendido con un eje de succión ($S_{sa}=100$ kPa). a). Superficies de cedencia para un suelo secado al aire desde su condición de lodo. b). Superficies de cedencia para un suelo compactado.

La cohesión aparente debido a la succión (SFG 2010 y 2011) es

$$\bar{c} = -\bar{p}_0 \tan \phi' = \begin{cases} S \tan \phi' & S < S_{sa}, c' = 0 \\ \tan \phi' (S_{sa} + (S_{sa} + 1) \ln \frac{S+1}{S_{sa}+1}) & S \geq S_{sa}, c' = 0 \end{cases} \quad (12)$$

.Por lo tanto el ángulo de fricción ϕ^b esta dado por:

$$\tan \phi^b = \begin{cases} \tan \phi' & S < S_{sa} \\ \tan \phi' \left(\frac{S_{sa}}{S} + \frac{S_{sa}+1}{S} \ln \frac{S+1}{S_{sa}+1} \right) & S \geq S_{sa} \end{cases} \quad (13)$$

En donde ϕ^b está en función de la succión de saturación y de la succión.

3.- Inspección de campo.

Objetivo: Observar las características físicas superficiales del sitio de análisis que sean de importancia a la investigación.



Fig. 7.- Ubicación general del sitio de análisis.

El sitio se seleccionó por ser representativo de la región en donde se presentan problemas de deformaciones (Fig.7) y por tener un tamaño manejable en términos económicos, se obtuvo la topografía necesaria para configurar el terraplén carretero y ubicar los blancos de barrenación de la geotecnia. De los caminamientos en el sitio se observa la

existencia de una alcantarilla de tubos de concreto de 90cm de diámetro que va de lado a lado del terraplén y en el interior de los tubos despostillamientos en algunas uniones, se observan también deformaciones y desplazamientos en la superficie de rodamiento. Los desplazamientos verticales son del orden de 10cm y en los terraplenes cercanos de mayor altura los desplazamientos verticales llegan a ser de hasta 40cm, el comportamiento es similar en todos los terraplenes del área, existen grietas longitudinales y transversales aún en donde no hay terraplenes, también es notorio que ha pesar de tener por lo menos tres meses sin lluvia el día de la inspección solo en la zona baja del cauce del arroyo del sitio existía vegetación diferente al resto del área (Fig.8). En los taludes del terraplén se aprecian micro-relieves tipo gilgai típicos de los suelos expansivos. Se fijaron dos blancos de barrenación.



a) Aberturas en pavimentos



b) Grietas longitudinales



c) Desplazamientos verticales en tubos.



d) Vegetación diferenciada en cauce

Fig.8.- Aspecto de las condiciones encontradas en la inspección inicial de campo en el tramo de análisis, km 38+000 de la carretera federal Tuxpan-Tampico.

4.- Exploración geotécnica.

Primera campaña de exploración.

Con base a la inspección de campo y de acuerdo a los requerimientos para analizar el sitio, se programó un primer sondeo a cielo abierto para observar las características de superficie justo a la entrada de la alcantarilla, toda vez que, como se mencionó, había vegetación diferente en el lecho del arroyo a pesar de ser temporada de sequía y no haber escurrimientos de agua, además de que se necesitaba inspeccionar la forma de depósito del material arcilloso. Este primer sondeo se hizo hasta 2.50m de profundidad, recuperando una muestra cubica inalterada y varias muestras de mano. (Fig. 9.) Se puede apreciar claramente la existencia de un perfil de meteorización vertical y que la arcilla es fisurada, en la inspección del sondeo se pudo constatar que hay fisuras totalmente abiertas y otras rellenas con calcita.



Fig.9.- Ubicación de sondeo 1 (izquierda), perfil de meteorización en el sitio

La muestra cubica fue obtenida en el cambio de tipo de material encontrado a los 80cm de profundidad. Se realizaron ensayos triaxiales rápidos, triaxiales lentas, de expansión, consolidación, humedades y limites de consistencia, un par de imágenes del material con relleno de calcita se presenta en la Fig.10.



Fig.10.- Muestra de campo y laboratorio con cristales de calcita (zonas blancas)

Segunda campaña de exploración. Al observar que el terreno en el sondeo 1 se encontraba firme, se decidió realizar exploración profunda a fin de averiguar si existía algún depósito de material blando que ocasionara los desplazamientos y deformaciones en el terraplén construido, también, se considero necesario averiguar las condiciones de construcción del terraplén, de esta manera se planeo una campaña de exploración profunda realizando dos sondeos de penetración estándar ubicados uno aguas arriba del terraplén y otro aguas abajo, así como un sondeo a cielo abierto en el hombro de la carretera. Recuperando muestras con muestreador tipo shelby y de penetrómetro estándar para los sondeos profundos y muestras de mano y una cubica para el sondeo a cielo abierto. .



Fig. 11.- Sondeo a cielo abierto en el hombro del camino (izquierda) y muestreo de penetrómetro estándar.

De los muestreos realizados se realizaron ensayos triaxiales rápidas, triaxial lenta, de consolidación unidimensional, consolidación isótropa, expansión, límites de consistencia, humedad, proctor SCT, permeabilidad de laboratorio.

En un hecho fortuito, durante la perforación hubo una precipitación notando que el agua que venía del pequeño arroyo se infiltraba por debajo de los tubos de alcantarilla a través de las fisuras del material y salía aguas abajo de la alcantarilla, una vez saturado el terreno el agua ascendía y solo entonces entraba a la tubería de concreto, dada lo imprevisto de la precipitación, se habilitó un botellón de agua para cuantificar el volumen de agua infiltrada en ese momento y se calibró rápidamente una cubeta de plástico mediante una probeta de capacidad de un litro, tomando el tiempo para el llenado de la cubeta de plástico, el agua

atravesó la zona de cimentación del terraplén sin ningún impedimento como si se tratara mas o menos de una grava. En esta misma campaña de exploración se observaron manchas de humedad dentro de los tubos de concreto que no correspondían a los escurrimientos pluviales determinándose que era necesario investigarlos.

Tercera campaña de exploración

Para averiguar que ocasionaba esas marcas de humedad (Fig.12 izquierda), y para definir las condiciones de humedad justo bajo el terraplén y bajo la tubería así como para verificar las condiciones de construcción del terraplén por encima de su desplante se programó otra campaña de exploración. Se realizaron dos sondeos de penetración estándar en los hombros del camino, justo en la orilla de la carpeta y también se inspeccionaron por dentro los tubos de concreto de alcantarilla, observando que había separación entre alguno de ellos así como desplazamientos verticales relativos entre si, también una ligera fisura en el cabezote del lado aguas abajo, procediendo a medirlos con la intención de entender y de correlacionarlos posteriormente con los análisis y la simulación (Tabla 2). De los sondeos de penetración estándar se recuperaron también muestras con muestreador tipo shelby de la región más blanda encontrada, con las muestras obtenidas se realizaron ensayos de consolidación unidimensional, triaxial rápida y lenta, limites de consistencia, granulometrías.

Para obtener las muestras bajo el terraplén y bajo la alcantarilla se procedió a extraer núcleos de concreto del piso de la tubería mediante un dispositivo elaborado para ello, constituido por un taladro y broca de diamante movido verticalmente por un tornillo de tal manera que cupiera dentro del tubo de 1.20m de diámetro. Una vez realizadas las perforaciones se utilizo una posteadora para tomar muestras del material continuamente hasta donde fuera posible de acuerdo a la firmeza del terreno, de la muestras obtenidas en laboratorio se realizaron los ensayos para limites de consistencia y humedad, con estos datos, se elaboró un perfil de curvas de iso-humedad y un perfil de desplazamientos de los tubos, ya que incluso se encontró que existía un espacio entre el piso exterior de algunos tubos con el terreno natural (Tabla 2 y Fig 12)..



Fig.12.- Marcas de humedad en estriaje (izquierda), separación piso-terreno natural (central) y recuperación de muestras con posteadora (derecha).

TABLA 2. Registro secuencial de desplazamientos verticales y horizontales entre tubos de alcantarilla

TABLA 2. Registro secuencial de desplazamientos verticales y horizontales entre tubos de alcantarilla											
Año 2006				Año 2008				Año 2011			
TUBO	δ_{vert}	Abertura entre tubos	Separación tubo-T.Nat	TUBO	δ_{vert}	Abertura entre tubos	Separación tubo-T. Nat	TUBO	δ_{vert}	Abertura entre tubos	Separación tubo-T.Nat
1-2	2	0	0	1-2	1.6	0.1	0	1-2	2.5	0.9	s/dato
2-3	1	0	0	2-3	0.6	0.2	1	2-3	0.35	1.4	s/dato
3-4	0	1	0	3-4	0.1	1	0	3-4	0.3	1.2	s/dato
4-5	0	0.5	0	4-5	0.3	0.6	0	4-5	0.65	1.8	s/dato
5-6	0.2	0.2	0	5-6	0.5	0.24	0	5-6	0.3	0.6	s/dato
6-7	0.1	0.3	4.7	6-7	0.2	0.35	3.1	6-7	0.1	0.65	s/dato
7-8	0.4	0	7	7-8	0.8	0	8.7	7-8	0.9	0.11	s/dato

Medidas en centímetros

Con las muestras de materiales obtenidos a distintas profundidades y de acuerdo a la topografía, a los trabajos de laboratorio así como a la investigación de campo y la geología local, se elaboró un perfil longitudinal de los materiales encontrados (Fig. 14). En él se puede observar que la estratificación de materiales es vertical y que el depósito es uniforme en cuanto a su naturaleza y forma de alterar. A los 8m de profundidad se encuentra el contacto con una roca suave de tipo lutita-arenisca de color gris que se observa muy compacta de tal manera que forma una frontera muy impermeable ya que justo en el contacto el material que sobreyace a este material se encuentra oxidado y con un color amarillo ocre. De estos datos básicos se observa también la distribución de humedad bajo el terraplén mediante curvas de iso-humedad (Fig.15), en ella se puede observar que la humedad es mayor al centro del terraplén con un ligero sesgo hacia aguas abajo del arroyo y que la humedad se incrementa a escasos 2m de profundidad para volver a decrecer a profundidad.

De los resultados de ensayos de compactación de campo y laboratorio se comprobó que el terraplén se encuentra correctamente construido de acuerdo a las normas y procedimientos típicos para caminos federales de dos carriles. También se observa que la humedad óptima de compactación proctor SCT es de 21.8% que es inferior a la humedad que se encuentra en la base del terraplén, el peso volumétrico seco máximo de esta prueba de control es de 1.7t/m³.

5.- Clima, Precipitación y Evaporación.

Por las características del material arcilla y su relación directa con el medio ambiente es necesario tener claro el comportamiento del clima, la precipitación y la evaporación, ya que en la simulación del comportamiento del terraplén cuando existen periodos de lluvia y de secas se necesita tomar en cuenta su efecto. La clasificación utilizada en este documento corresponde a la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (1973).

Clima: Pertenece al grupo de climas cálidos A, de acuerdo a su temperatura media anual y al subgrupo de climas cálidos A, con temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. Es del tipo Cálido Sub-húmedo con lluvias en verano, la precipitación del mes más seco es menor de 60mm y el porcentaje de lluvia invernal oscila entre el 5 y 10.2%. La nomenclatura que le corresponde es AW₂ (INEGI 2012) y el registro histórico de temperaturas indica que las estaciones climáticas se presentan bien marcadas, así como su evaporación (Fig. 13b). Con respecto a la precipitación, se recurrió a los datos anuales, mensuales e históricos de las estaciones climatológicas del país, siendo la más cercana la que corresponde a la estación climatológica No. 006 Álamo Temapache ubicada a los 97°38' longitud oeste y 21.05 de latitud norte con 38 años de registros en cuanto a precipitación y temperatura y 21 años de evaporación (Fig. 13a y 13b INIFAP 2006).

Una vez analizado el subsuelo, su entorno y las teorías aplicables, se está en condiciones de analizar mediante simulación el comportamiento del terraplén.

La problemática se centra en buscar la causa de agrietamientos, fracturas y deformaciones que ocasiona elevados costos de conservación, peligro e incomodidad en los caminos analizando el comportamiento mecánico e hidráulico del terraplén construido con materiales expansivos y su relación con el terreno natural y su contenido de humedad, aterrizando la investigación en una propuesta de solución eficiente y económica.

Es claro que el material suelo parcialmente saturado con potencial de expansión, anisotrópico, multifásico, prácticamente inelástico, que exhibe perfil vertical de meteorización y que geológicamente presenta depósitos naturales variables en sentido x,y z, representa un problema difícil de analizar ya que adicionalmente su respuesta mecánica resulta una función de la succión. La experiencia en el terreno de la geotecnia y en la simulación juega un papel importante en la discretización de factores por tomar en cuenta en la porción que se analiza y también para el acople del funcionamiento hidráulico y el mecánico, por esta razón, el enfoque de este documento es dejar establecido una metodología para el caso de terraplenes construidos con materiales expansivos y que estén expuestos al agua, de tal manera que permita que el ingeniero especializado pueda aplicar una secuencia de análisis, sin menoscabo de modificación, de acuerdo a las necesidades propias del material que en su momento requiera entender.

En el manejo global de la información para resolver la problemática se requiere el conocimiento geológico que proporcione los indicativos de la forma y espesores de depósitos de materiales potencialmente expansivos, la exploración geotécnica, que proporciona las muestras a las profundidades requeridas así como la estratigrafía del terreno, los análisis de laboratorio para la obtención de los parámetros de diseño y las características físicas y mecánicas del material natural y del terraplén carretero construido artificialmente, así como la habilidad para realizar la simulación del conjunto, bajo el modelo SFG.

7. Estadísticas climatológicas normales de la estación Álamo, Temapache.

ales

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
atura máxima media (°C)	26.6	27.5	30.1	32.4	34.4	34.1	33.6	33.8	32.6	31.5	29.4	28.8	31.1
atura máxima <i>maximorum</i> (°C)	41.2	43.6	41.8	46.0	46.0	44.0	43.0	42.0	41.8	40.3	40.5	42.0	46.0
atura mínima media (°C)	15.2	15.9	17.8	19.9	21.4	22.1	21.8	21.8	21.5	19.9	18.3	15.9	19.3
atura mínima <i>minimorum</i> (°C)	3.4	4.8	6.5	7.5	11.0	15.0	15.0	15.0	12.0	9.0	8.7	0.0	0.0
atura media (°C)	20.9	21.7	23.9	26.2	27.9	28.1	27.7	27.8	27.1	25.7	23.9	21.3	25.2
atura diurna media (°C)	24.1	24.9	27.2	29.3	31.1	31.0	30.6	30.8	29.9	28.8	27.0	24.5	28.3
atura nocturna media (°C)	17.6	18.5	20.7	23.0	24.7	25.2	24.8	24.8	24.2	22.6	20.7	18.2	22.1
ón térmica (°C)	11.4	11.5	12.3	12.5	13.0	12.0	11.9	12.0	11.2	11.6	11.1	11.0	11.8
ación pluvial (mm)	34.5	33.3	31.8	37.7	65.7	168.9	141.0	168.9	223.7	116.5	54.6	27.8	1104.4
ación pluvial máxima en 24 horas (mm)	117.5	85.0	93.2	107.3	121.0	247.5	161.6	130.2	188.4	160.0	73.4	85.3	247.5
de días con lluvia	6.0	5.2	4.5	4.2	5.1	9.6	10.4	10.6	11.9	7.9	6.9	4.8	87.1
ación (mm)	68.7	68.2	84.6	97.5	106.5	107.0	105.9	93.7	87.1	88.8	77.9	71.0	1057.0
odo (h)	10.9	11.3	11.9	12.5	13.0	13.3	13.2	12.8	12.2	11.6	11.0	10.7	12.0

ales

Variable	Ene			Feb			Mar			Abr			May			Jun			Jul			Ago			Sep			Oct			Nov			Dic		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
atura media (°C)	20.9	21.4	21.7	21.7	21.8	22.0	23.0	23.3	23.5	24.1	24.6	24.8	24.4	24.1	23.8	23.7	23.6	23.6	24.0	24.0	23.5	23.1	22.7	22.1	22.1	21.7	20.9	20.3	20.6	20.5	21.6	21.7				
atura máxima <i>maximorum</i> (°C)	36.8	41.2	36.7	42.8	38.6	36.9	37.5	43.0	41.8	42.2	46.0	45.0	45.0	45.0	44.0	41.0	41.0	40.5	41.0	43.0	42.0	39.5	38.5	38.8	41.8	40.6	39.5	36.0	40.2	40.5	37.4	36.9				
atura mínima media (°C)	15.0	15.1	15.4	15.6	15.6	16.4	16.9	17.8	18.9	19.4	19.9	20.5	20.8	21.4	22.0	22.3	22.1	22.0	21.7	21.7	21.9	21.7	22.0	21.7	21.8	21.6	21.0	20.8	20.0	19.2	19.0	18.2				
atura mínima <i>minimorum</i> (°C)	3.4	3.8	4.7	5.0	4.8	4.9	6.5	6.7	8.5	7.5	12.0	10.0	11.0	16.5	14.0	16.6	16.0	15.0	15.0	16.0	17.0	17.0	16.0	15.0	14.0	16.0	12.0	10.0	11.0	9.0	10.5	10.0				
edia (°C)	20.5	20.8	21.3	21.3	21.4	22.4	22.7	24.0	25.1	25.6	26.1	26.9	27.5	28.0	28.3	28.4	28.1	27.9	27.7	27.6	27.8	27.9	28.0	27.6	27.5	27.1	26.8	26.2	25.8	25.0	24.6	23.9				
atura media (°C)	23.6	24.0	24.7	24.4	24.7	25.7	25.9	27.2	28.3	28.7	29.3	30.0	30.7	31.2	31.3	31.3	31.9	30.8	30.6	30.5	30.9	30.9	31.0	30.8	30.3	30.0	29.4	29.4	29.0	28.2	27.8	27.0				
atura media (°C)	17.3	17.8	17.8	18.2	18.2	18.1	18.4	20.7	21.8	22.4	23.0	23.7	24.2	24.8	25.2	25.4	25.2	25.1	24.8	24.7	24.9	24.8	25.0	24.7	24.8	24.2	23.7	23.2	22.7	21.8	21.5					
ta (°C)	10.9	11.2	11.9	11.0	11.7	12.1	12.1	12.4	12.4	12.4	12.4	12.7	13.3	13.1	12.8	12.1	12.0	11.8	11.9	11.8	11.8	12.3	12.1	11.7	11.3	11.2	11.0	11.5	11.7	11.2	11.2					
lual (mm)	7.8	14.4	12.2	12.8	11.6	8.2	8.9	7.0	15.9	13.7	11.8	12.4	14.8	21.0	35.1	38.9	50.8	67.2	54.6	43.8	42.4	52.4	46.0	33.5	35.2	79.9	36.8	60.2	24.9	21.4						
ación máxima en 24 horas (mm)	23.7	80.1	117.5	20.2	85.4	84.8	26.4	92.2	107.3	75.8	89.7	54.3	121.0	63.5	179.2	247.5	127.2	161.6	96.5	140.7	130.2	120.0	121.2	187.8	166.4	143.2	190.0	113.9	86.0							
o con lluvia	1.6	2.4	2.0	2.2	1.7	1.2	1.5	1.2	1.8	1.4	1.4	1.2	1.5	1.7	1.9	1.7	2.8	4.2	4.1	3.0	3.3	3.2	3.1	4.2	3.8	4.3	4.1	3.2	2.6	2.0						
no	21.8	21.7	25.2	22.2	24.6	21.4	25.2	26.7	32.7	21.6	21.8	24.4	22.8	24.8	27.8	26.8	26.7	26.5	22.1	26.0	26.7	20.5	21.7	21.8	20.0	20.0	20.1	20.8	20.4	20.0						
do (h)	10.8	10.9	11.0	11.2	11.3	11.5	11.7	11.9	12.1	12.2	12.6	12.7	12.9	13.0	13.1	13.2	13.2	13.2	13.1	12.9	12.8	12.8	12.8	12.8	12.4	12.2	12.0	11.8	11.6	11.4						

Fig. 13. a.- Estadísticas Climatológicas normales de la estación Álamo, Temapache, México. (INIFAP 2006)

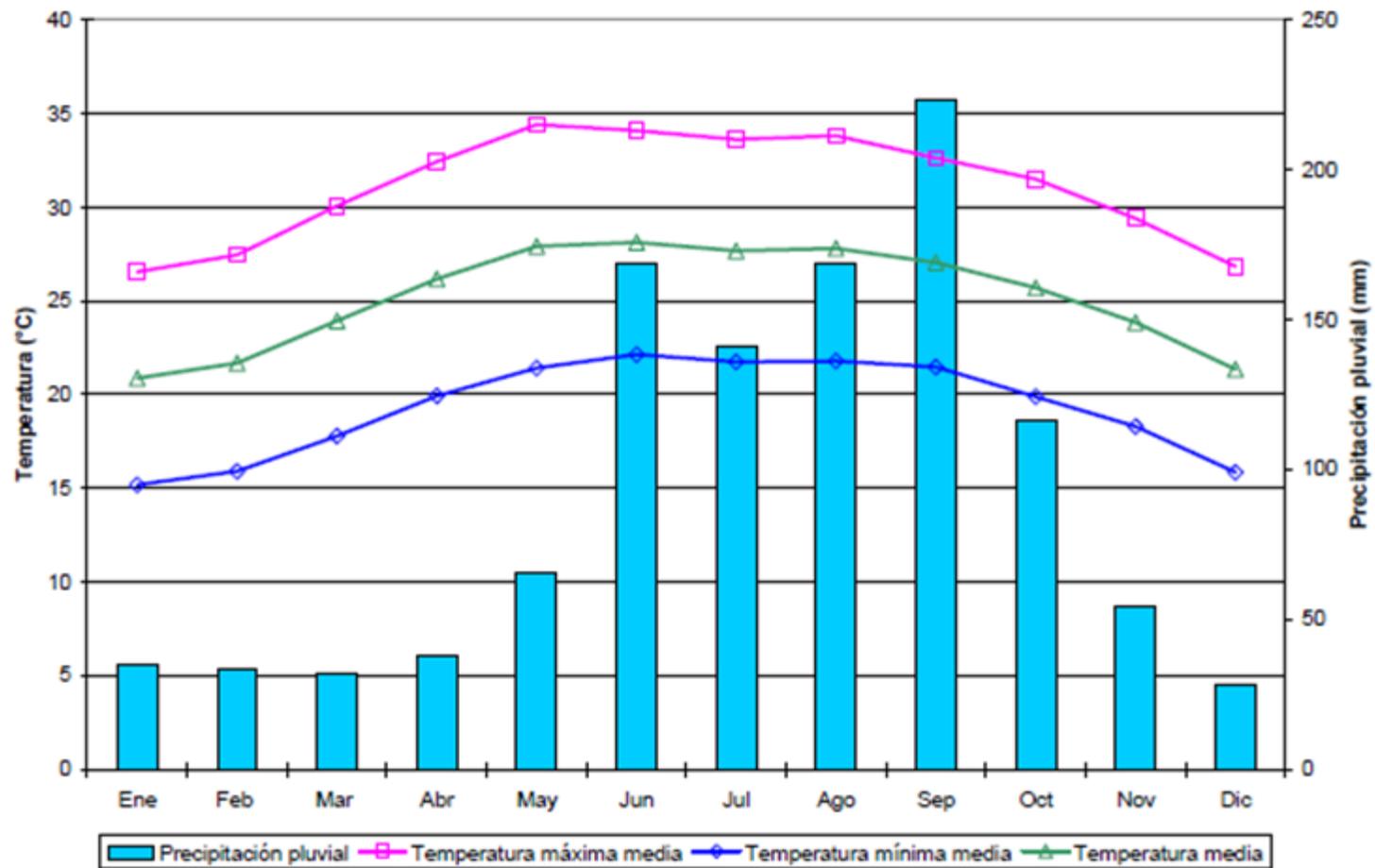


Fig. 13.b.- Grafica de comportamiento histórico de temperaturas y precipitaciones medias mensuales (38 años de registro).

Derivado de lo anterior, la solución a la problemática debe de responder a los siguientes cuestionamientos:

- 1.-¿Realmente el agua será la causante de las deformaciones en el pavimento en suelos arcillosos o los terraplenes se encuentran mal contruidos?.
- 2.- ¿Cuál será el comportamiento del movimiento del agua en el suelo con respecto al tiempo?
- 3.-¿Cuál será el comportamiento mecánico del material suelo con respecto al tiempo?
- 4.- ¿Es posible controlar los efectos nocivos de deformación ocasionados por la saturación de arcillas mediante el uso de pantallas impermeables?
- 5.-¿Seria una solución viable, económicamente hablando?
- 6.-¿Podrá implementarse una metodología de solución estándar al conjunto?

Los esfuerzos por analizar los fenómenos que convergen en el terraplén se justifican porque:

- 1.- Es de beneficio directo a la población, y la solución implica una reducción de riesgos y costos.
- 2.- Es una búsqueda de solución a una problemática importante en caminos, de gran impacto en costos de conservación.
- 3.- Se analizarán suelos arcillosos parcialmente saturados de una región que no se han analizado.
- 4.- La solución probablemente sea suficientemente versátil para ser usada con otros objetivos.

Siguiendo el método científico se está en posibilidades de plantear dos hipótesis

Hipótesis 1.

Un escurrimiento de agua que pueda entrar en contacto con la base de un terraplén de arcillas predominantemente expansivas es causante de los cambios volumétricos de todo el terraplén.

Hipótesis 2.

Un sistema diseñado en 2D a través de elemento finito, a base de pantallas flexo-impermeables y dispositivos complementarios, puede controlar el flujo de agua hacia suelos sensibles al humedecimiento.

Dichas Hipótesis están sujetas a su aceptación o rechazo de acuerdo a los resultados que se obtengan de la investigación que aquí se desarrolla.

I.- Materiales y métodos (metodología experimental).

Para los ensayos triaxiales de los materiales recolectados en la exploración de campo, se utilizó un equipo Triax 50 con marco de 50 kN de capacidad marca Controls, con rango de velocidad entre 0.00001 y 9.99999 mm/hr, equipada con transductores lineales de desplazamiento vertical con precisión y repetitividad de 0.002mm y software Geoloab, así como células triaxiales de 1700 kPa de presión de trabajo máximo, con bloques de desaireación y sistema de adquisición de datos de 16 canales que colecta datos de desplazamiento y presión de manera simultánea, sistema de control y presión aire-agua tipo bladder de 1000 kPa de capacidad y aparato automático de cambio de volumen con precisión



de 0.1ml. Fig.14

Fig. 14. Equipo triaxial, consolidómetros de carga frontal, elevadores de presión e indicadores de cambio de volumen utilizados.

Se realizaron ensayos de tipo UU, CU así como compresiones simples de acuerdo a las metodologías AASTHO estándar de laboratorio. Para todos estos ensayos se consideró la presión que de manera natural presentan los materiales en el sitio así como la presión proporcionada por el terraplén, por lo que las presiones de cámara fueron de 0 para la compresión simple, 25, 50 y 75 kPa.

Para el ensaye consolidado no drenado (CU) se realizo la consolidación a 5kPa saturando y dejando dicha presión durante una hora hasta equilibrar presiones, en este ensaye se midió adicionalmente la presión de poro y el cambio de volumen. También se realizaron ensayes de consolidación unidimensional, de expansión libre y de expansión a partir de una carga inicial de 1 kPa, mediante un consolidómetro frontal equipado con transductor lineal de desplazamiento con precisión y repetitividad de 0.002mm, y pesas en secuencia de 0, 12.26, 24.52, 49.04, 98.069, 196.13, 392.27 kPa, así como su descarga, el equipo cuenta con colector de datos de precisión y a la computadora.

Se realizaron los ensayes de límites de consistencia, mediante la copa de Casagrande y el cristal de limite plástico, granulometrías mediante el uso de mallas de abertura cuadrada estándar, densidades mediante matraces calibrados e identificación de suelos. Con respecto a la hidráulica de suelos, se realizo un ensaye de permeabilidad de laboratorio mediante un permeámetro de carga variable a fin de confirmar que los datos indirectos de coeficientes de permeabilidad obtenidos del ensaye de consolidación. Se determinaron los ensayes de compactación dinámica tipo ASSTHO STD para cuerpo de terraplén, se determinaron los pesos volumétricos del lugar mediante el equipo tipo trompa de elefante y arena de Ottawa.

Resultados de los materiales y métodos.

Con la finalidad de conocer mas al material se tomaron microfotografías de la arcilla de las cuales se muestran dos en este espacio fig. 15 y el resto se muestran en el anexo único.

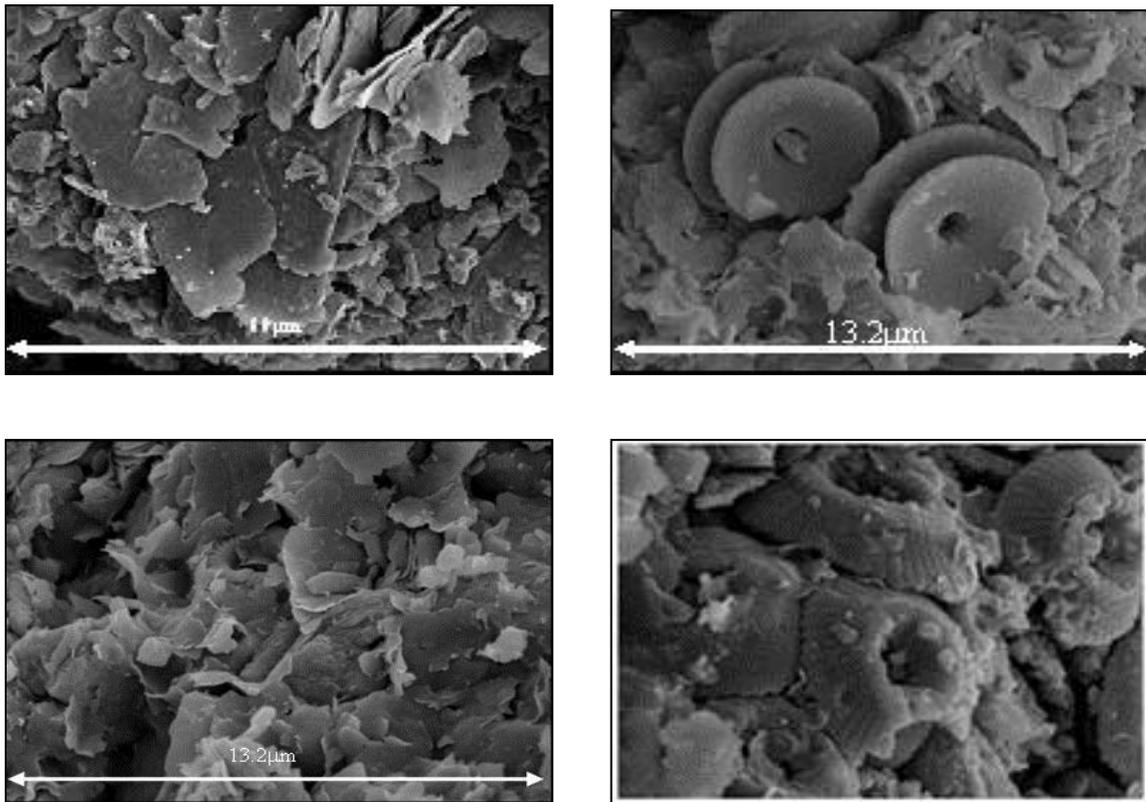


Fig. 15. Microfotografías de los materiales encontrado en el sitio.

En ellas se puede observar laminas de arcilla montmorillonita y organismos fósiles foraminíferos que de acuerdo a la geología del sitio vivieron en ambientes de aguas someras.

Los resultados de las propiedades físicas de los materiales se muestran en la tabla 3 y los que intervienen en los cálculos mecánicos e hidráulicos en la figura 16. De acuerdo a los resultados obtenidos y visibles en la tabla 3, el material del terraplén construido artificialmente se encuentra con densidad de sólidos de 2.63, con peso volumétrico de 2.01t/m³ y relación de vacíos de 0.54, así como porosidad de 0.35 y grado de saturación de 86.85% con una clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) de (CH), este material se encuentra descansando sobre un material natural también clasificado como (CH) pero que presenta densidad de sólidos de 2.64 con peso volumétrico también de 2.12 1t/m³ y relación de vacíos de 0.47, así como porosidad de 0.32 y grados de saturación de 101.2%, es decir, en condición saturada pero ligeramente mas compacto que el superior, subyaciendo a este material saturado se encuentra otro material natural, el cual tiene un espesor de 7m hasta el contacto con una arcilla gris oscuro, este material también corresponde a un CH, con densidad de sólidos de 2.64, peso volumétrico de 1.99t/m³, relación de vacíos de 0.60, porosidad de 0.37 y grado de saturación de 90.93%, es decir, de acuerdo con los datos de saturación, el material intermedio bajo el terraplén artificial y el natural de mayor espesor, se encuentra saturado, además de acuerdo a un ensayo proctor, el terraplén artificial esta compacto de acuerdo a normas mexicanas de caminos vigentes.

Con la información de la tabla 3, se formularon las curvas características de los materiales del subsuelo y del material del cuerpo de terraplén, definiendo la succión residual y de saturación de cada uno, de acuerdo al modelo propuesto por Aubertin et al, en la figura 17 se muestra una de ellas y en el anexo único todas las demás calculadas.

Los resultados de las propiedades físicas a diferentes profundidades de los materiales encontrados se muestran igualmente en la tabla 3 y el perfil estratigráfico longitudinal se muestra en la figura 18, en este último se observan los materiales presentes en el área acompañados de una grafica vertical de numero de golpes de penetración estándar que son indicativo de la firmeza o dureza del material y de una grafica de consistencia, en esta última se puede observar que la humedad natural siempre se encuentra más cercana al límite plástico, por lo que es susceptible de admitir agua en su rango de comportamiento plástico y presentar cambios volumétricos. Por otro lado, de acuerdo a las exploraciones realizadas a profundidad y otras a cielo abierto y otras mas mediante posteadora, se formuló la figura 19 que muestra las curvas de iso-humedad bajo el terraplén y aun dentro del el, observándose que en el centro del terraplén se conserva mayor humedad que en el resto de la sección, esto resulta consistente al pensar que probablemente en el centro del terraplén la acción de sol tiene menos influencia que en los extremos. La tendencia de la humedad es hacia la derecha de la sección dibujada debido a la gravedad.

Los resultados de ensayos de triaxial y de consolidación se incluyen en el perfil geotécnico longitudinal y ahí se puede observar que el material intermedio entre el terraplén artificialmente construido y el terreno natural firme tiene menos resistencia y con relaciones de vacíos menores, lo que hace pensar en un efecto de consolidación del material a pesar de que en el ensayo de expansión presento esta expansión con cambios relativamente bajos de humedad.

TABLA 3. Propiedades físicas de los materiales a diferentes profundidades															
Prueba	De	Pro beta	Z (m)	Ss	Vol cm3)	γ _{nat} (t/m3)	γ _d (t/m3)	e _i	n (%)	W _w (gr)	w%	G _w %	V _w (cm3)	S	γ _d +V _w (t/m3)
TRIAXIAL	TERRAPLEN	1	1.0	2.63	97.63	2.00	1.69	0.55	0.36	31.12	18.79	88.92	0.32	0.56	2.01
TRIAXIAL	TERRAPLEN	2	1.0	2.63	98.71	2.01	1.72	0.53	0.35	28.95	17.05	84.77	0.29	0.88	2.01
		PROMEDIOS				2.01	1.71	0.54	0.35	30.04	17.92	86.85	0.30	0.69	2.01
TRIAXIAL,	T.N. AGUAS ARRIBA	1	0.8	2.64	78.48	2.13	1.80	0.46	0.32	25.63	18.07	103.44	0.33	0.46	2.13
TRIAXIAL	T.N. AGUAS ARRIBA	2	0.8	2.64	77.61	2.11	1.78	0.48	0.32	25.04	18.07	99.56	0.32	0.49	2.11
TRIAXIAL	T.N. AGUAS ARRIBA	3	0.8	2.64	80.4	2.11	1.79	0.48	0.32	26.08	18.14	100.53	0.32	0.47	2.11
		PROMEDIOS				2.12	1.79	0.47	0.32	25.58	18.09	101.18	0.32	0.48	2.12
TRIAXIAL	T.N. AGUAS ABAJO	1	1.6	2.64	98.56	1.99	1.65	0.60	0.37	33.86	20.88	91.18	0.34	0.51	1.99
TRIAXIAL	T.N. AGUAS ABAJO	2	1.6	2.64	102.79	1.99	1.65	0.60	0.37	34.94	20.58	90.79	0.34	0.54	1.99
TRIAXIAL	T.N. AGUAS ABAJO	3	1.6	2.64	94.77	1.99	1.65	0.60	0.37	32.32	20.68	90.83	0.34	0.53	1.99
		PROMEDIOS				1.99	1.65	0.60	0.37	33.71	20.71	90.93	0.34	0.53	1.99
CONSOLIDACION	T.N. AGUAS ARRIBA	1	0.8	2.64	40	2.01	1.50	0.64	0.39	20.36	33.95	117.87	0.51	0.0009	2.01
CONSOLIDACION	T.N. AGUAS ABAJO	1	1.6	2.64	40	2.04	1.63	0.62	0.38	16.75	25.77	108.91	0.41	0.0009	2.04
CONSOLIDACION	TERRAPLEN	1	1.0	2.63	40	1.87	1.64	0.60	0.38	9.33	14.21	61.85	0.23	3.21	1.87
TRIAXIAL	T.N. AGUAS ARRIBA	1	1.2	2.65	98.02	1.92	1.55	0.71	0.41	35.69	23.45	87.93	0.36	0.32	1.92
TRIAXIAL	T.N. AGUAS ARRIBA	1	1.2	2.65	98.86	1.90	1.54	0.72	0.42	35.39	23.25	85.46	0.36	0.32	1.90
		PROMEDIOS				1.91	1.55	0.71	0.42	35.54	23.35	86.70	0.36	0.32	1.91

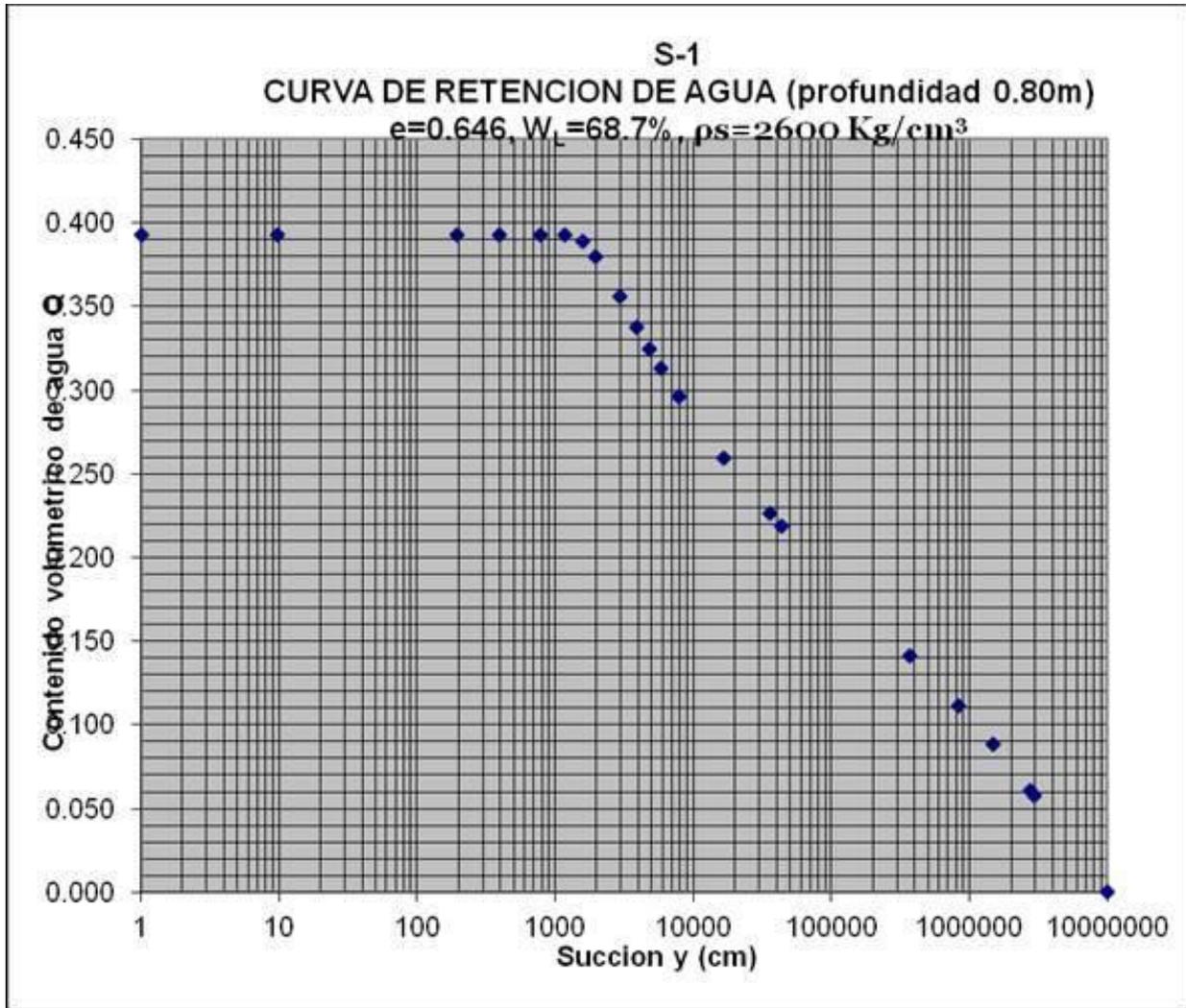


Fig.17 Curva característica calculada a partir de propiedades índice de los materiales del sitio.

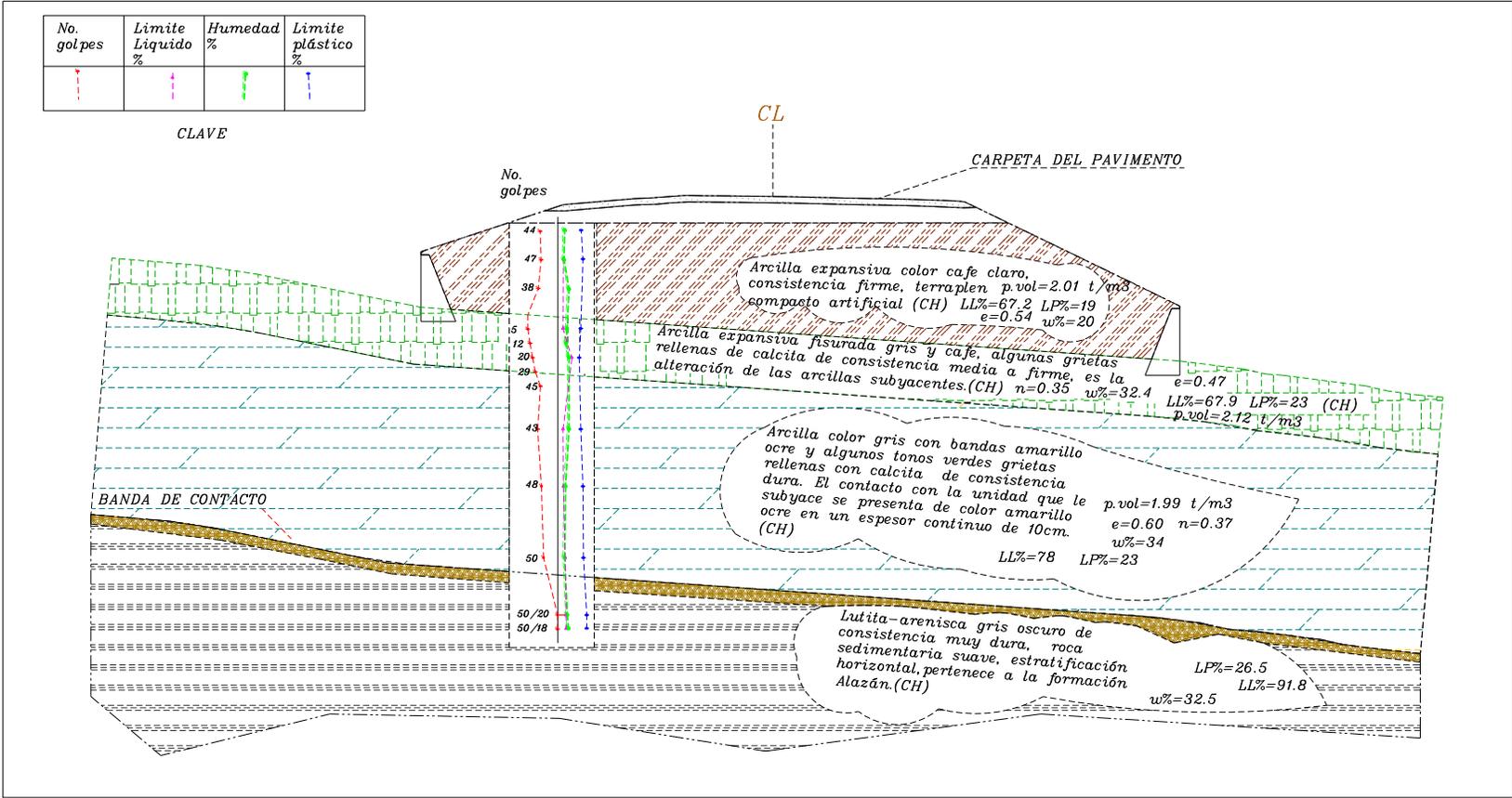


Fig.18 Perfil geotécnico transversal a la carretera..

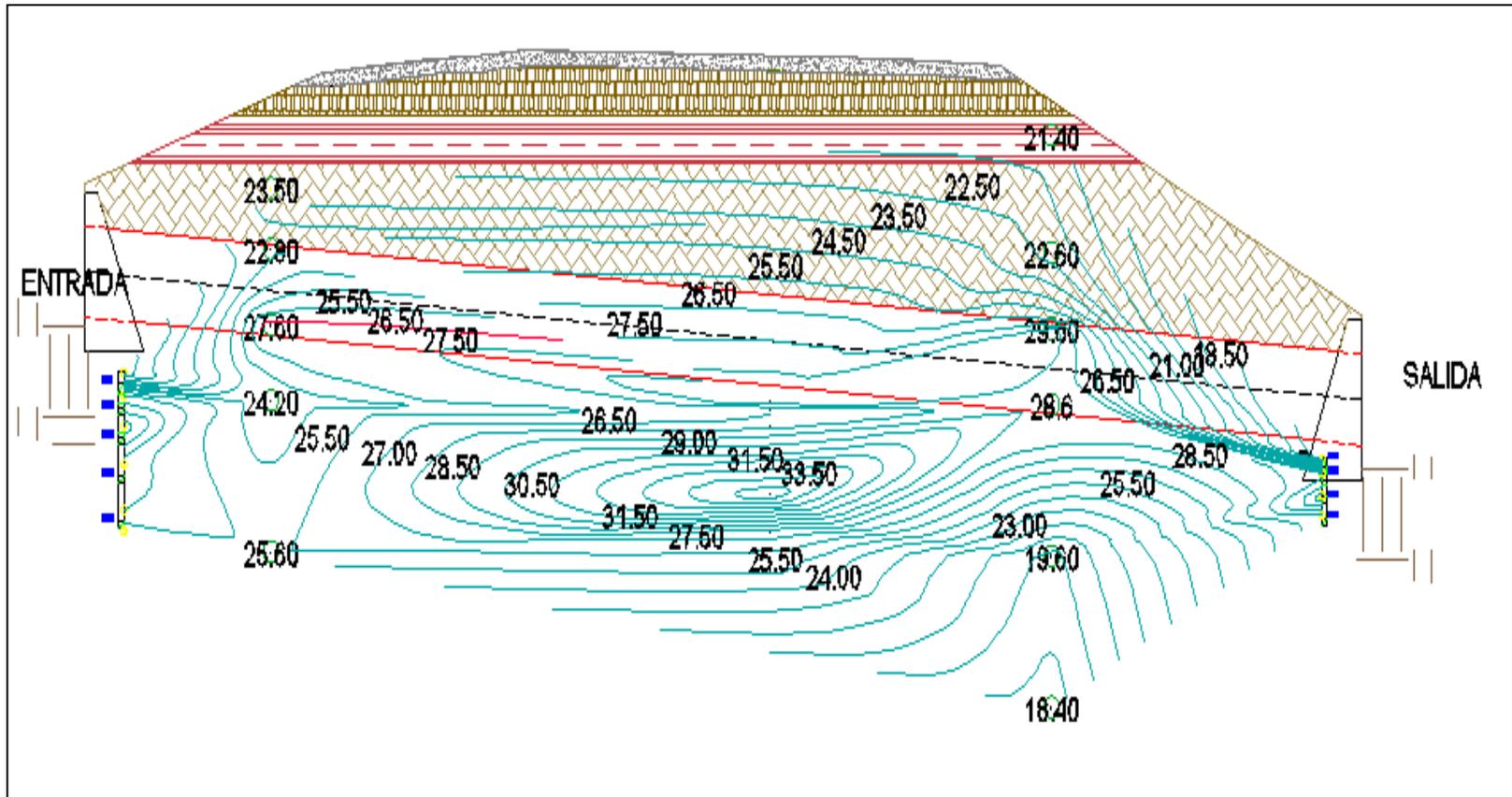


Fig.19 Curvas de Iso-humedad bajo el terraplén..

Con los resultados de materiales y métodos así como con la investigación de subsuelo y la geología del sitio, se puede resumir la situación física actual que se observa en el sitio de la siguiente manera: Se trata de un terraplén carretero construido correctamente de acuerdo a la normatividad del sector carretero del país con arcillas expansivas del sitio, la compactación del cuerpo del terraplén se realizó con por lo menos el 95% de su peso volumétrico seco máximo de laboratorio atendiendo al ensaye proctor SCT que regía en el país. Este terraplén se encuentra sobre un material que permanece saturado con humedades mayores hacia el centro del terraplén, estas humedades decrecen hacia arriba (hacia el cuerpo de terraplén) y hacia abajo (hacia el estrato inferior natural), por lo que forma una región inestable justo bajo la carretera. La humedad es alimentada en temporada de lluvias y debido a sus características arcillosas y a que bajo el terraplén el sol limita su acción la humedad permanece por largo tiempo recargándose cada vez. La resistencia de los materiales por arriba y por debajo a la región saturada es mayor que la de esta región, siendo mucho mayor conforme se incrementa la profundidad, lo que permite discretizar los estratos para fines de análisis matemático.

II.-Calculo.

Desde el punto de vista de cálculo, los materiales naturales del sitio son aniso trópicos, elastoplásticos, heterogéneos, parcialmente saturados unos y otros saturados o muy cercanos a ello, y sometidos a flujo de agua en suelos ya que se presenta circulación de agua por sus fisuras y posteriormente a través de su medio poroso. Todas estas consideraciones hacen que se requiera acoplar los comportamientos en análisis computacional mediante elemento finito. De acuerdo con esta forma de abordar el problema, a partir de la información obtenida y procesada se establecieron los subdominios lógicos y en concordancia con los materiales encontrados en cada estrato tal y como se muestran en la Fig. 20. En él se puede observar que solo se utilizan dos subdominios ya que el estrato que está en contacto constante con el terraplén y que permanece húmedo es solo el superior del terreno natural.

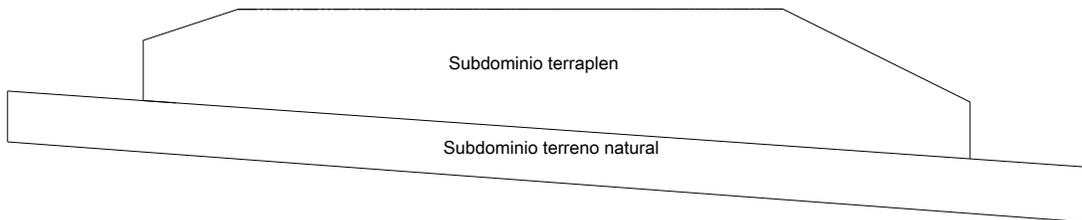


Fig.20 Subdominios establecidos para fines de simulación en el terraplén de análisis.

Se establecieron las ecuaciones de equilibrio para un modelo elastoplástico parcialmente saturado como se muestran en la tabla 5.

En ella se incluyen las ecuaciones típicas del comportamiento elastoplástico como las del modelo SFG mencionado en el cuerpo de este documento, también, las ecuaciones de Van Genuchten y de Richards en el caso de las curvas características obtenidas mediante el modelo de Aubertin et al reunidas siempre en concordancia, el modelo exige entonces realizar simulaciones de comportamiento mecánico e hidráulico en un material de suelo elastoplástico parcialmente saturado que transita a uno saturado en algún periodo de tiempo.

Una vez establecidos los requerimientos, se procedió a realizar las simulaciones mediante el software Comsol Multiphysics 3.5 y para fines de explicación se muestran las pantallas en secuencia lógica de acuerdo a la metodología de cálculo establecida.

Tabla 5. Balanceo de ecuaciones del comportamiento elástoplastico analizado.

No	Ecuación	Ecuaciones	Incógnitas	Nombre
1	$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} + u_a \delta_{ij} - Sr(u_a - u_w) \delta_{ij}$	6	15	Definición de esfuerzos efectivos
2	$u_a = 0$	1	0	Presión de aire
3	$\frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial x_j} + \rho_0 f_{v_s} = 0$	3	0	Ecuación de equilibrio
4	$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \xi_j}{\partial x_i} \right)$	6	9	Definición de deformaciones
5	$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 + \lambda(\varepsilon_{kk} - \varepsilon_{kk}^p) \delta_{ij} + 2\mu(\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^p) - S_r(u^w - u_0^w) \delta_{ij}$	6	6	Ecuación de comportamiento elástico
6	$u^w = u_0^w + M \left\{ (\theta - \theta_0) - b(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \right\}$	1	0	Ecuación de conservación de masa fluida
7	$S_r = \frac{\theta}{\theta_s}$	1	1	Grado de saturación
8	$\theta = \theta_r + Se(\theta_s - \theta_r)$	1	2	Contenido volumétrico de agua en función de saturación efectiva
9	$\theta_r = \theta_s(S_c^r + S_a^r(1 - S_c^r))$	1	0	Contenido volumétrico de agua residual
10	$\frac{\partial \theta}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 u^w}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u^w}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 u^w}{\partial x_3^2} \right)$	1	0	Ley de Darcy y Richards
SUMA		27	33	

Tabla 5. (Continuación) Balanceo de ecuaciones del comportamiento elastoplastico analizado.

No	Ecuación	Ecuaciones	Incógnitas	Nombre
11	$f = q^2 - M^2(\bar{p} - \bar{p}_0)(\bar{p}_e - \bar{p}) = 0$ <p>Donde q es el esfuerzo desviador</p> <p>\bar{p} es el esfuerzo neto promedio</p>	1	2	Criterio de plasticidad
12	$\frac{d\varepsilon_{ij}^p}{dt} = \frac{d\omega}{dt} \times \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}$	6	1	Ley de flujo
13	$\bar{p}_e = \begin{cases} \bar{p}_{eo} - s \dots \dots \dots s \leq s_{sa} \\ \bar{p}_{eo} - s_{sa} - (s_{sa} + 1) \ln \frac{s+1}{s_{sa}+1} \dots s > s_{sa} \end{cases}$ <p>donde $s = u_a - u_w$</p>	1	1	Esfuerzo de cedencia en la succion S
14	$\bar{p}_0 = \begin{cases} -s \dots \dots \dots s < s_{sa} \\ -s_{sa} - (s_{sa} + 1) \ln \frac{s+1}{s_{sa}+1} \dots s \geq s_{sa} \end{cases}$	1	0	Esfuerzo de cedencia aparente
15	$\bar{p}_{cr} = \begin{cases} \bar{p}_{cra} - s \dots \dots \dots s < s_{sv} \\ \frac{\bar{p}_{cra}}{p_{cr}} (\bar{p}_{cra} + s - s_{sv} - (s_{sv} + 1) \ln \frac{s+1}{s_{sv}+1} - s \dots \dots \dots s \geq s_{sv} \end{cases}$	1	0	Esfuerzo de cedencia para suelo compactado
SUMA		10	4	
TOTAL		37	37	OK

De tabla la tabla anterior se puede anotar que:

La ecuación 5 de comportamiento elástico permite la transición suave del estado saturado al parcialmente saturado, en esa tabla S_r es el grado de saturación y la succión se expresa como la diferencia entre la presión del aire y la presión de agua, es decir, una presión negativa, las ecuaciones 1,7 y 8 quedan relacionadas por esa misma succión, la ecuación 7 limita el grado de saturación cuando todos los vacíos quedan llenos de agua, el contenido volumétrico de agua residual y de saturación se obtiene con la metodología de Aubertin et al (2003).

La ecuación 2 corresponde al supuesto de que la presión del aire en todo momento será cero, que para fines prácticos es aceptable, la ecuación 1 es la ecuación de equilibrio de esfuerzos.

La ecuación 10 es la ecuación de Darcy asociada al cambio de deformaciones desde la configuración de referencia.

Simulación.

Para realizar la simulación se admitió el criterio de Sheng et al con el criterio de rotura que obedece a la ecuación

$$\tau = \bar{c} + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' \quad (11)$$

pero en donde σ_n es el esfuerzo normal y la tangente del ángulo de fricción ϕ es:

$$\tan \phi^b = \begin{cases} \tan \phi' & S < S_{sa} \\ \tan \phi' \left(\frac{S_{sa}}{S} + \frac{S_{sa} + 1}{S} \ln \frac{S + 1}{S_{sa} + 1} \right) & S \geq S_{sa} \end{cases} \quad (13)$$

$$y \quad \bar{c} = -p_o \tan \phi' \quad (12)$$

De los dos dominios definidos (fig 20), uno que se denominara superior y que corresponde al cuerpo de terraplén y otro denominado inferior y que corresponde al terreno natural en el desplante del terraplén , para el subdominio superior, se considero como parcialmente saturado ya que las humedades volumétricas iniciales son de 25.9% y la succión es de 1.63MPa inferiores a las de saturación, el subdominio inferior, se encuentra con humedades cercanas a la saturación o saturado. Las condiciones de frontera hidráulicas son de impermeabilidad en todo el perímetro, las condiciones de frontera mecánicas se establecieron de tal manera que en la interface se considera que no se generan momentos en sentido transversal, pero si existe continuidad de esfuerzos y deformaciones, los datos para calcular su comportamiento son los de la figura 16 y tabla 3. El resultado para condiciones iniciales se muestra en la fig. 21.

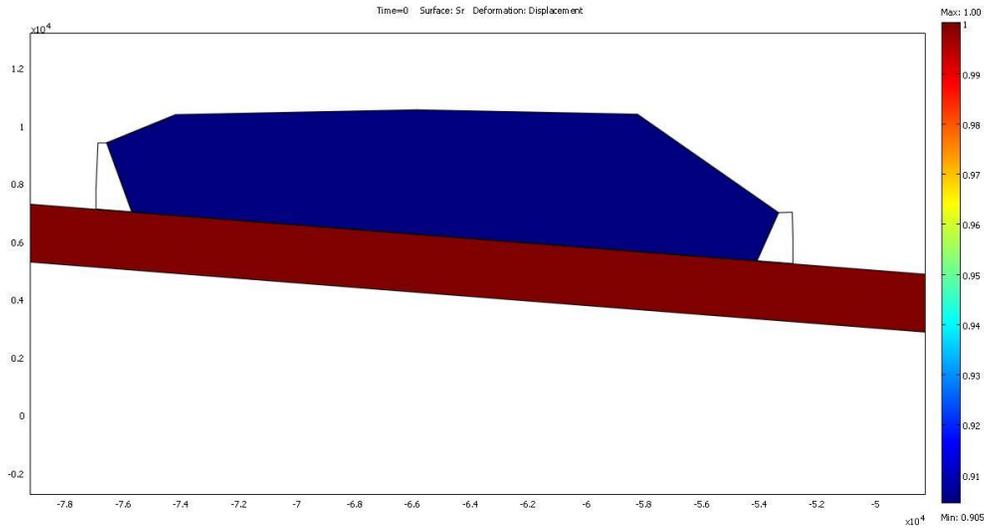


Fig. 21. Condiciones iniciales en la simulación, dominio superior parcialmente saturado

Dadas las condiciones de frontera, se procedió a realizar el análisis elástico transiente con un tiempo de 5 años considerando los cabezotes que sujetan a la tubería (fig 22).

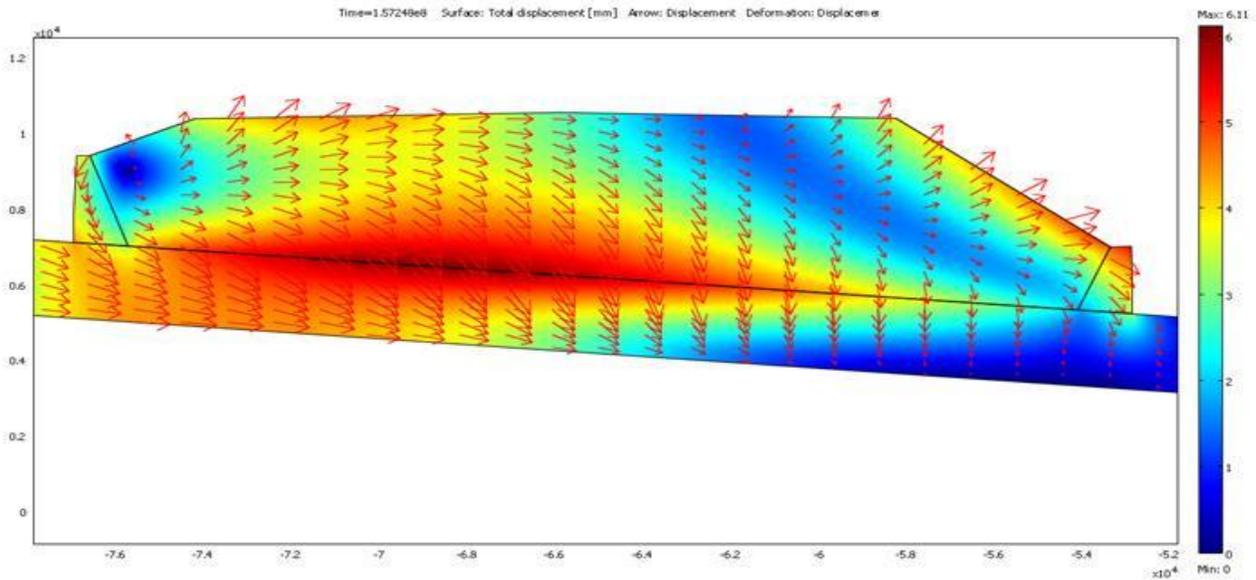


Fig. 22. Simulación transiente elástica y presencia de cabezotes extremos

En esta figura las flechas indican la dirección y magnitud de los cortantes generados y que hay violado el criterio de resistencia (ecuación 10), se observa que existe tendencia hacia aguas abajo del terraplén (a la derecha) y se puede observar además que se forma una región de mayor deformación en la interface de los dos materiales además que los cabezotes actúan como elementos de retención impidiendo mayor desplazamiento, se observa que la saturación por capilaridad en este tipo de material afecta notablemente a la resistencia al esfuerzo cortante. A la luz de los resultados anteriores, se procedió a simular el terraplén sin cabezotes en dos etapas, la primera etapa en la que

el subdominio inferior se satura, y la segunda en donde la solución de la primera etapa es el inicio de la segunda, en esta última se permitió el desplazamiento en la interface, también en las condiciones de frontera se considero secado en el terreno natural, el resultado del mallado con refinamiento en el contacto suelo-terraplen se muestra en la Fig.23 y la primera etapa de simulación se presenta en la Fig.24.

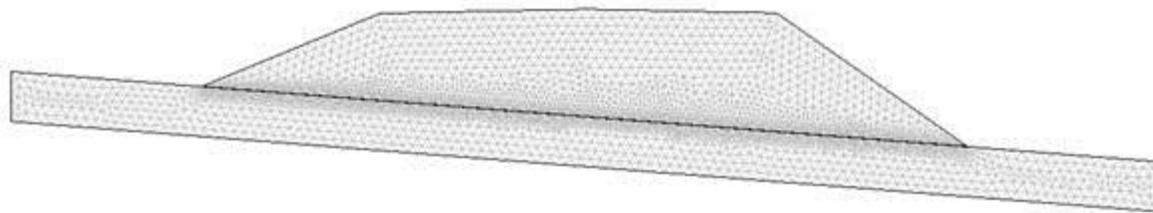


Fig. 23 Mallado de sección del camino con énfasis en el contacto suelo-terraplen

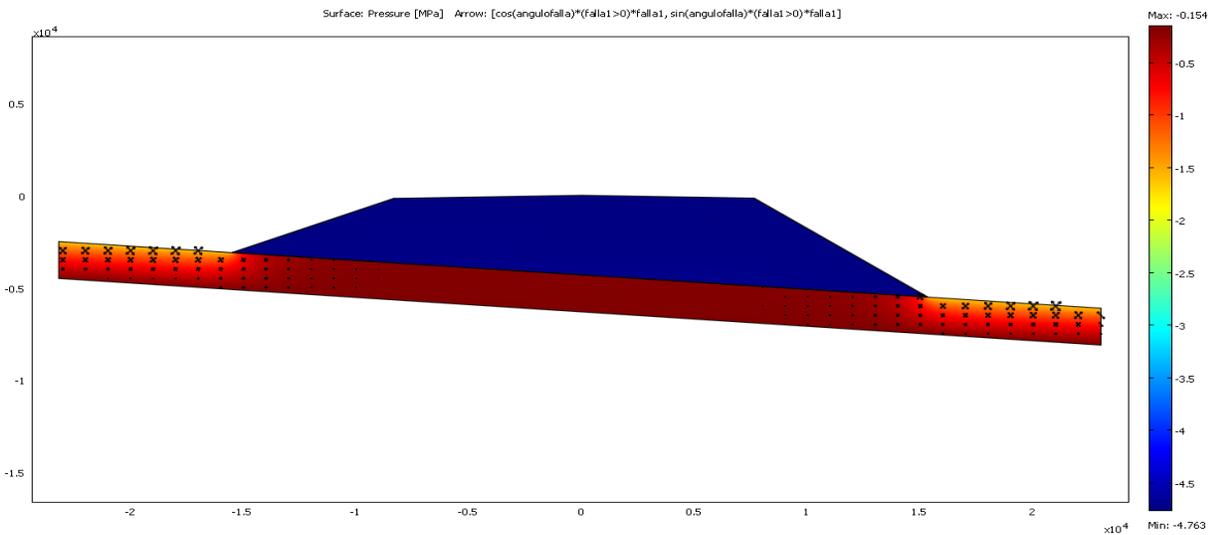


Fig.23. Simulación de primera etapa, las cruces son vectores violando criterio

En esta figura 24 se observa que el secado fuera del desplante del terraplén crea la rotura del suelo al tender hacia \bar{p}_o (ecuación 9) y que el subdominio inferior continua saturado. Para la segunda etapa se resolvió de manera transiente para observar el flujo de agua, detectándose que el agua ingresa al terraplén por la base y por los taludes en cada ciclo, pero no sale de igual manera debido al bajo coeficiente de permeabilidad de los materiales, saturándose el terraplén cada vez más, al mismo tiempo se va rebasando el criterio de falla de la ecuación 10 observándose rotura del material de manera interna y generación de desplazamientos preferenciales hacia aguas abajo. (fig. 24).

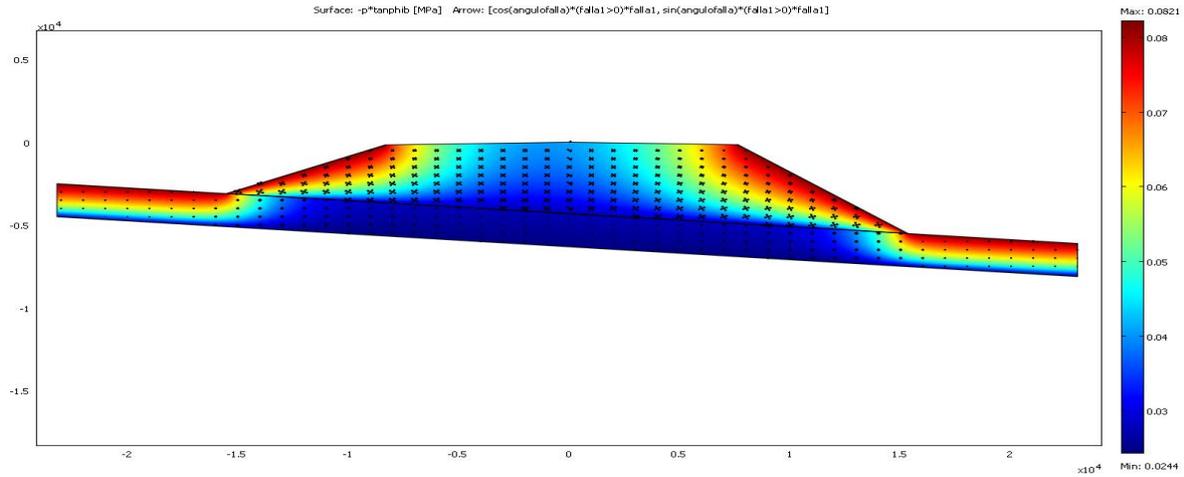


Fig. 24.- Ocurrancia de falla generalizada del cuerpo de terraplén

También se observa que el hinchamiento del material provoca un desplazamiento vertical de acuerdo a la fig. 25. Se observo que debido a la inclinacin de 5° con que cuenta la base del terraplen, para realizar la simulacion y al saturarse, el terraplen tiende a deslizar por su base, resultando inadecuado fijarlo ya que las deformaciones plasticas que se crean provocan distension y no es posible hacer converger la simulacion, por esta razon se decidio colocar el terraplen en una superficie horizontal y con un empotramiento imperfecto, restringiendo solo el desplazamiento vertical y se dibujo el terraplén de manera horizontal y simétrico. Se justifica entonces el análisis elasto-plástico, aunque al parecer el mecanismo de falla es por cortante antes que por deformación plástica.

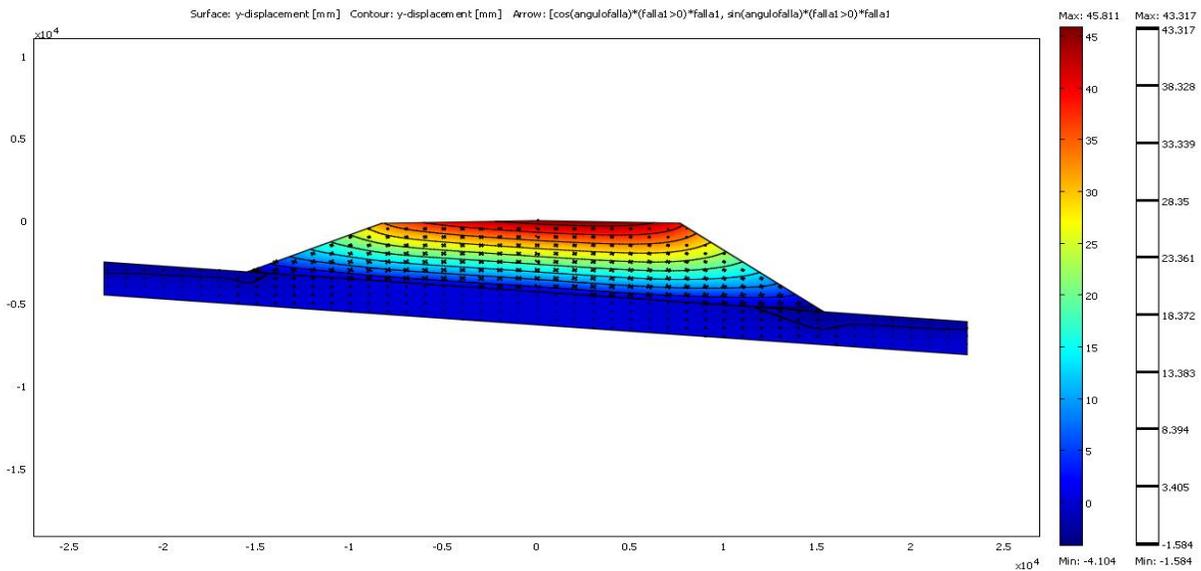


Fig. 25. Desplazamientos verticales debidos a la expansion. iso-valores.

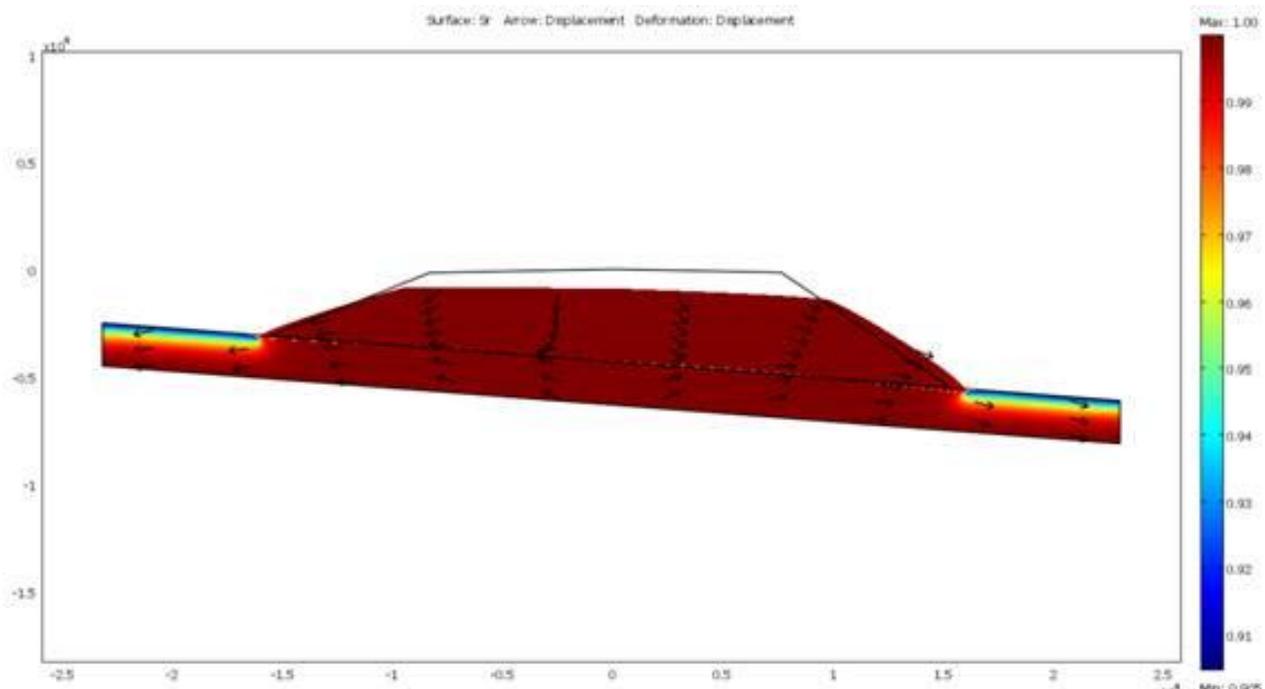


Fig. 26 Desplazamiento de material en el análisis elastoplástico.

Continuando con el análisis de comportamiento se simuló ahora para la condición elastoplástica observando que el peso del material incrementado por el ascenso capilar y una vez que el límite de cedencia es rebasado, se produce un desplazamiento lateral, bajando el nivel de la corona del camino, lo que explica las deformaciones mayores en superficie. Como se observa en la grafica existe una tendencia hacia la zona mas baja por acción de la gravedad sin que se este generando una falla de estabilidad de taludes circular típica de suelos arcillosos.

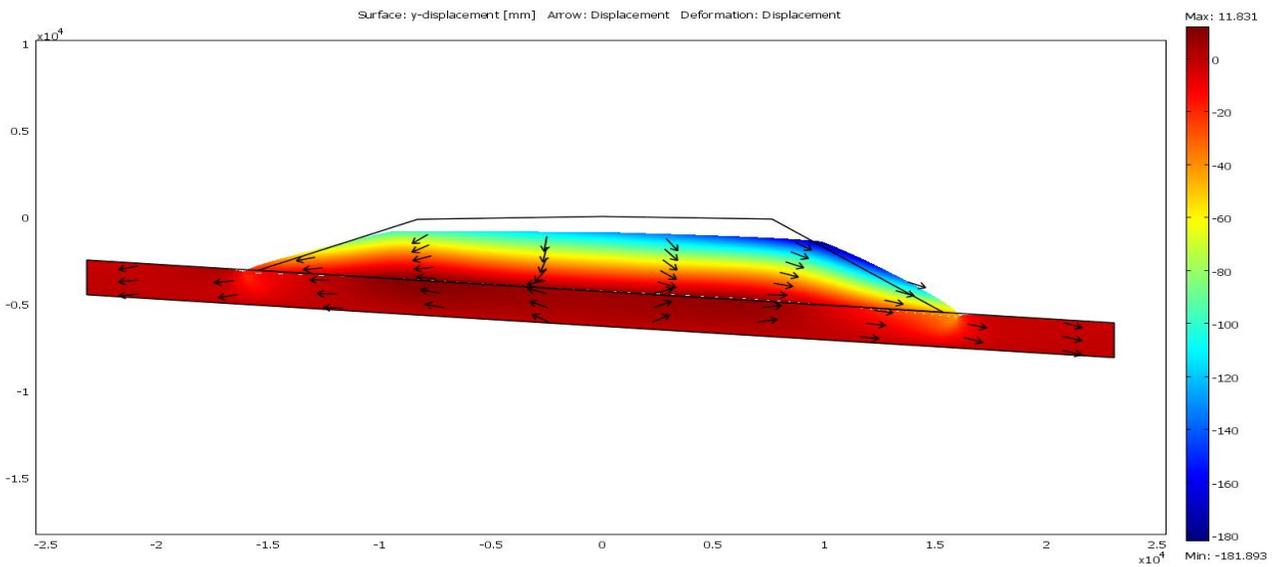


Fig. 27. Evolucion de desplazamientos en el analisis elastoplástico transiente.

En la evolución del análisis se observa también que una vez que tiende al equilibrio se reducen los desplazamiento en la corona porque ya fueron realizados casi en su totalidad.

Finalmente, se detalla el contacto suelo –terraplén en cuanto a cortantes se refiere en la Fig. 28.

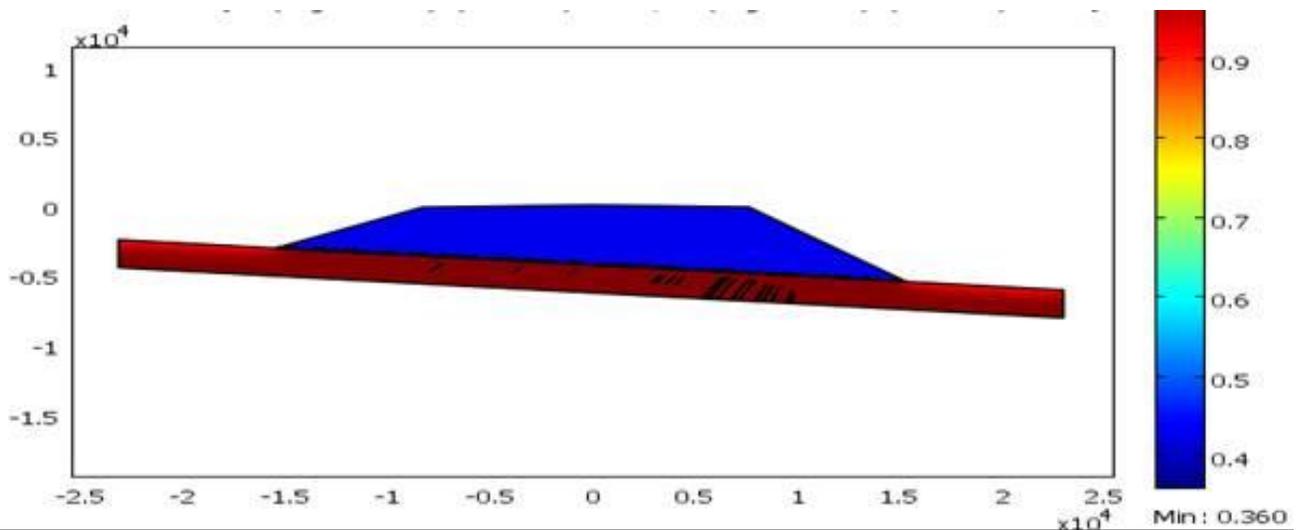


Fig. 28. Detalle de cortantes en el contacto suelo-terraplen en el analisis transiente.

6. PROPUESTA DE SOLUCION

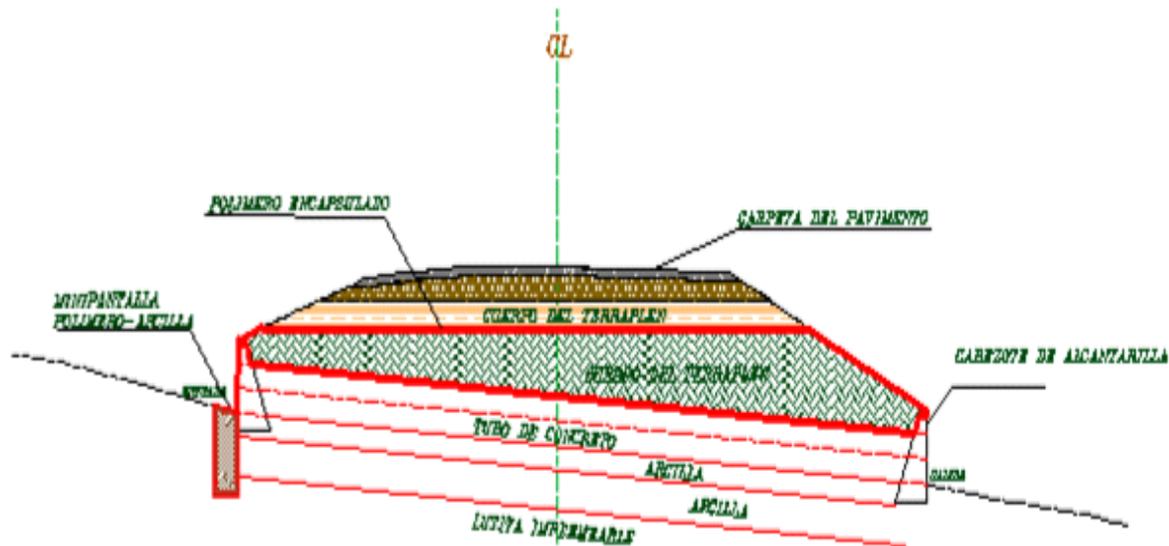


Fig. 29. Solución Propuesta, encapsulamiento de terraplén con polímero y mini pantalla de control de flujo a la entrada de tubos de alcantarilla.

La solución propuesta se basa en el comportamiento analizado hasta la fecha, en la que el factor principal para desencadenar toda la problemática es la absorción de agua hacia el terraplén, bien sea por su base o incluso por sus taludes y por otro lado, la erosión que produce el agua cuando atraviesa por la base de los tubos de alcantarilla. Es decir, que si se controla esta absorción de agua hacia el cuerpo del terraplén, se tendrá controlada la expansión y las deformaciones por consolidación y si se evita que el agua circule por debajo de los tubos de alcantarilla, se tendrá controlada la erosión.

Bajo estos principios, la propuesta se torna sencilla y de bajo costo si se usa un polímero, que puede ser plástico comercial con tal de que resista el proceso de compactación del terraplén, pudiéndose colocar este plástico por encima de los tubos de alcantarilla y en toda la base del terraplén, de tal manera que cuando se construya éste con maquinaria pesada, a medida que la altura sea mayor, se arrope con este plástico encapsulando el suelo arcilloso por debajo, por los lados y por arriba, justo abajo del nivel de sub rasante, es decir, aislar el terraplén por todos lados (fig.29). El material del terraplén se deberá de compactar con una humedad mayor al óptimo de compactación.

Con respecto a los escurrimientos de superficie y que causan erosión bajo los tubos, se propone la colocación de una pequeña pantalla también a base de polímero (fig.29, lado izquierdo de la imagen), para lograrla la excavación deberá de rebasar en cada caso la zona de alteración o zona activa de la arcilla expansiva a aproximadamente tres metros para este caso en particular, la excavación puede realizarse mediante retroexcavadora en un ancho típico de 80cm, posteriormente se colocará el plástico o membrana de polímero cubriendo todas sus caras relleno el espacio con el mismo producto de la excavación, pero retirando cualquier tipo de roca o contaminación que pudiera existir, el relleno de la mini pantalla se podrá hacer a mano y compactándola con bailarina o pisón dinámico de pierna, finalmente la membrana se ahogara formando una "Z" en el concreto del cabezote. De esta manera el agua de superficie se elevara y pasara inmediatamente dentro de los tubos y el agua que se infiltre más abajo de los tres metros buscará caminos diferentes para continuar.

La combinación de encapsulado y pantalla garantizan la estanqueidad del terraplén y podrán garantizar la estabilidad de largo plazo a bajo costo.

DEBATE.

De acuerdo a los resultados de la simulación, el estrato inferior suministra el agua necesaria para saturar el terraplén aumentando progresivamente la humedad en el, de abajo hacia arriba, es decir por capilaridad, el terraplén se encuentra compacto y con una humedad inferior a la de saturación, con un valor de resistencia al cortante más cercano a la curva de su límite falla correspondiente al esfuerzo medio neto aparente \bar{P}_0 que a su límite de cedencia en el que plastifica, ya que la formación del terraplén se hace con altas energías de compactación. Al ingresar el agua al material del terraplén que está en condición parcialmente saturado, el valor de succión comienza a decrecer reduciéndose el valor del cortante a valores que hacen que se rebase el límite de rotura o resistencia al esfuerzo cortante, rompiéndose el material, generándose direcciones de cortantes preferenciales y una curva que es más baja en el centro del terraplén debido a que la humedad ingresa más rápidamente por el pie del terraplén antes que por el centro

Los planos de debilitamiento o deslizamiento se comienzan a generalizar hacia la parte superior del terraplen de manera simultanea al hinchamiento. En general el terraplen rebasa su resistencia al esfuerzo cortante de manera progresiva por efecto de la reduccion de la succion empezando por los pies del terraplen es decir, dicha resistencia al esfuerzo cortante es aparente y solo permanecera intacta si no ingresa agua al terraplen. De acuerdo con lo anterior, el terraplen no rebasa su limite elastico (no plastifica), si no que se hincha, fractura o rompe de manera interna, siguiendo planos de debilitamiento, el material, una vez que se rompe no puede regresar a su condicion inicial. El caso mas critico ocurre cuando la cohesion aparente desaparece en la base del terraplen y el material se desplaza lateralmente aun antes de llegar a la succion de saturacion S_{sa} , en las simulaciones se logro observar que la rotura del material inicia desde el extremo del talud hacia adentro del terraplen. El mecanismo completo de falla del terraplen se puede enumerar como sigue:

1.- En el instante cero, a partir de un terreno cercano a la saturacion en la base del terraplen y un terraplen compactado a altas energias de compactacion, con valores de succion mayores que las del terreno natural, el terraplen se encuentra en posibilidades de absorber agua.

2.- El suelo del terreno de desplante se encuentra con baja resistencia al estar saturado, con cohesion (c) muy cercana a cero. El agua por diferencia de presion y fuerzas de tension comienza a ascender y reduce el valor de succion del cuerpo del terraplen violandose rapidamente el criterio de resistencia de la ecuacion 20 antes de llegar a valores de saturacion de 1, es decir, el criterio de rotura se rebasa

cuando la succión es S_{sa} . Los cortantes generados son horizontales y se propagan del talud hacia adentro del terraplén.

3.- Simultáneamente a lo ocurrido en el párrafo anterior, la arcilla se expande, levantando el terraplén y desplazando material hacia el talud ya que ahí no se encuentra confinado.

4.- El suelo presenta un frente de ascenso capilar, en donde la región que presenta succión de saturación cuenta todavía con un porcentaje de aire en sus vacíos y está presentando cortantes que rebasan el criterio de falla, de manera simultánea se presenta un esfuerzo normal ocasionado por el peso del terraplén que reduce todavía más el aire en los vacíos.

4.- Con la resistencia al cortante ya rebasada, el ascenso capilar incrementa el esfuerzo vertical al incrementarse el peso del terraplén, reduciendo más el aire en los poros del material, hasta que no queda aire en ellos e inicia un proceso de consolidación, en ese momento la arcilla está 100% saturada.

5.- La secuencia se repite en otra fracción horizontal del cuerpo del terraplén y así sucesivamente hasta el momento en que la carga debida a la saturación del terraplén no puede crear consolidación a pesar de que se encuentre rebasado el criterio de rotura.

6.- Los planos de falla de cortante con la sobrecarga producen una compactación y no un deslizamiento de una masa de suelo rígido.

Para el caso de carreteras, la carga recibida en la carpeta puede producir el esfuerzo vertical que ya no tiene por incremento de agua de manera cíclica siempre y cuando el nivel de esfuerzos llegue al punto de equilibrio necesario para consolidar.

7.- Del ensayo de consolidación unidimensional a 1.20m de profundidad en la humedad natural y que corresponde a una arcilla parcialmente saturada se obtuvo el coeficiente de permeabilidad de manera indirecta para este estado, resultando de 2.38×10^{-11} m/s, en ella se observa que la arcilla expansiva impermeable como medio poroso, y de acuerdo a la inspección física, está alterada hasta aproximadamente 3.0m de profundidad, en donde se presentan grietas o fisuras y depósitos de aragonito en algunas de ellas.

8.- En la inspección del cuerpo de terraplén se pudo constatar que el peso volumétrico del material corresponde al 95% del peso volumétrico seco máximo de laboratorio para el material arcilloso, es decir, el terraplén se encuentra correctamente construido. El peso volumétrico seco máximo de laboratorio de acuerdo a normas mexicanas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes es de 1600 kg/m^3 con una humedad óptima de 21.8%, esto implica un peso volumétrico húmedo de 2070 kg/m^3

9.- Del ensayo de expansión libre que se realizó en el cuerpo de terraplén, se determinó que la variación de volumen llega a ser de 5.26% cuando se parte de una humedad de 18% ya que dependiendo de la humedad inicial será la expansión generada cuando tiende a saturar, en la fig. 8 se muestra el desplazamiento (1.09mm) que ocurre en una probeta de 20mm de espesor con área de 20 cm^2 en un consolidómetro de anillo fijo. La presión de expansión de equilibrio para este material es de 49 kPa.

III.- Conclusiones

Conclusiones.

Como resultado de las observaciones de campo y los ensayos de laboratorio se considera que existe suficiente evidencia para asegurar que los materiales de la zona en estudio son arcillas expansivas de alta compresibilidad que presentan un perfil de meteorización vertical el cual presenta intenso fisuramiento en los primeros 1.50m en donde algunas de sus fisuras están rellenas con cristales de aragonito, también esta zona de fisuramiento hace que cuando se presenta una precipitación o flujo de agua en superficie, la arcilla se comporte permeable en este espesor, hasta que por razones de hidratación se expande, debajo de esta profundidad la arcilla se presenta dura y compacta, aunque siempre con familias de micro fisuras hasta los 2.5m, a partir de los 3.0m la arcilla se observa saturada.

Más abajo hasta aproximadamente 8m de profundidad se encuentra el contacto de la arcilla expansiva color café claro que intemperiza a amarillo ocre con una arcilla gris que muestra contenido de arena fina, pero muy compacta e impermeable, por lo que las infiltraciones de largo plazo que ocurren a través de la arcilla expansiva café tienen su límite en este contacto.

De acuerdo a los registros de humedad y una vez elaborados las curvas de iso-humedad se observa que la mayor humedad se encuentra al centro del terraplén con un ligero sesgo hacia el cabezote aguas abajo del terraplén (fig. 5), esto es consistente con el hecho de que es la zona más protegida de la evaporación del terraplén, así mismo, se observa que las humedades en la base del terraplén están cercanas a la saturación y la variación de humedad mayor es hacia el cuerpo del terraplén que se encuentra 4.5m arriba del desplante del mismo. De esta manera se puede establecer que bajo el terraplén siempre existe humedad que puede nutrir por capilaridad a las arcillas que están más secas.

Los efectos de esta absorción de agua por capilaridad hacia el terraplén provocan la expansión de la arcilla creando grietas que se ven reflejadas longitudinalmente a nivel de carpeta, al mismo tiempo que se expande por absorción de agua, su peso volumétrico aumenta, por lo que el terraplén se hace más pesado y debido a que las arcillas en condición de saturación reducen su resistencia, el terraplén comienza a deformarse de manera simultánea a su expansión, transmitiendo esfuerzos a los tubos que tienden a romperse en sus uniones y agrietando los cabezotes, desde luego el fenómeno de consolidación también se hace presente en la base del terraplén.

Por otro lado la infiltración que ocurre en la zona de alteración en la arcilla y que queda por debajo de los tubos de alcantarilla erosiona el terreno y forma un espacio entre el contacto suelo-tubo, que hace inestable a los tubos que van cediendo poco a poco con el incremento del peso del terraplén y provoca la aparición de grietas transversales algunas justo encima de la ubicación de la línea de tubos. Esta erosión llega a fracturar los lavaderos de salida aguas debajo de los tubos de alcantarilla ya que el agua en un inicio circula libremente entre el contacto tubos- terreno por debajo de los lavaderos. En resumen, la combinación de reducción de resistencia en el desplante del terreno,

la expansión de la arcilla y su correspondiente incremento de peso y la erosión producida por los escurrimientos en temporada de lluvias, hacen que el terraplén se torne inestable y todos estos efectos se manifiesten en la superficie de rodamiento como agrietamientos longitudinales y transversales y asentamientos.

Se puede decir que:

Un terraplén formado de arcilla expansiva, será inestable siempre que ingrese agua por cualquiera de sus fronteras en cualquier momento de su vida útil, en la práctica Mexicana estos terraplenes se encuentran expuestos a los cambios climáticos y a los periodos de lluvia y secado normales de todos los años y no se cuenta hasta la fecha con una evaluación completa del impacto económico que esto representa.

Cuando se construye un terraplén de arcilla expansiva mediante las técnicas actuales de compactación, se logra comunicar energías de compactación que garantizan que los esfuerzos enviados por el tránsito vehicular no destruyan el terraplén, sin embargo, es suficiente el ingreso por capilaridad del agua hacia al terraplén para modificar los valores de succión a valores que impactan fuertemente la resistencia al cortante del suelo, e incluso tornarlo inestable. El ingreso de agua también provoca cambios volumétricos y desplazamientos que se reflejan en la superficie de rodamiento así como la generación de planos de rotura horizontales de acuerdo a la dirección de los esfuerzos cortantes. La simulación de la arcilla expansiva que transita hidráulica y mecánicamente del estado parcialmente saturado al saturado es un problema complejo y presenta especial cuidado en la interface que une al terraplén con el terreno natural, así mismo en esa misma interface cuando el material es saturado a valores en los que la cohesión aparente es muy cercana a cero, el material trata de deslizarse de acuerdo a la pendiente en que se encuentre, por lo que la simulación es preferible hacerla con subdominios horizontales imponiendo un empotramiento imperfecto con esfuerzos verticales negativos restringidos.

La simulación realizada permite visualizar claramente que una vez que el agua ingresa al terraplén “no la suelta” fácilmente y con ingresos regulares de humedad el terraplén se satura paulatinamente rebasando de manera simultánea su resistencia al cortante y generando desplazamientos horizontales internos en el terraplén.

Un terraplén así expuesto, no necesita incluso, las precipitaciones pluviales para saturarse, basta que el terreno natural donde esta desplantado tenga suficiente humedad el suficiente tiempo como por ejemplo un año para que el agua suba por capilaridad al cuerpo del terraplén que por encontrarse compacto con menores humedades tiende a “alimentarse” de agua, llegando a largo plazo a saturarse, una vez saturado no hay proceso natural que ocurra y que elimine el agua así atrapada en el terraplén.

Se simula de manera práctica el comportamiento de un terraplén de arcilla expansiva mediante el modelo propuesto por Sheng et al. y queda como futura línea de investigación el establecimiento de un modelo completo en donde se simule todo el mecanismo hasta el proceso de consolidación.

De los resultados de laboratorio, se confirma que en la zona entre Potrero del Llano y Temapache existen arcillas expansivas que generan empujes de 49kPa, este material pertenece a la formación “Alazán”(INEGI, 2005) que está constituida por gruesos depósitos de arcillas y que abarca desde el centro de la costa de Veracruz hasta los límites con el estado de Florida en Estados Unidos (Padilla

R, 2007), por lo que de manera general es posible afirmar que en esta región existen la probabilidad de que existan arcillas expansivas principalmente en regiones con épocas de sequía intensa.

La arcilla expansiva encontrada presenta abundantes foraminíferos del tipo calcáreo reticulofenestra reticulata que data de hace 40.4 +- 0.2 millones de años (Home page), se intemperiza a color amarillo ocre y forma un perfil de meteorización que permite la circulación de agua libre a través de sus fisuras de manera rápida antes de que se sature e hinche por ingreso de agua a los pedos de arcilla que se constituyen en el medio poroso. La zona activa de esta arcilla es de 2.5m.

De acuerdo a los registros de campo, la humedad permanece bajo el terraplén sin gran fluctuación, es decir, la humedad no cambia significativamente en el transcurso del año bajo el terraplén, pero si permanece el agua alimentándolo.

Las grietas en superficie corresponden a la expansión del terraplén al absorber agua por su base de manera permanente y por los taludes cuando hay precipitación, el terraplén así alimentado absorbe el agua por capilaridad ya que la construcción de las terracerías del camino se hace con humedades inferiores a las de saturación. Este fenómeno es el que hace ascender el agua al terraplén por capilaridad e incrementa el peso volumétrico del material incrementando el peso sobre los tubos y sobre su base, su análisis corresponde a los suelos parcialmente saturados (Barrera B, 2002), (Chapuis, 2006) y (Fredlung, 1994).

El flujo de agua se establece de dos maneras, la primera como se mencionó, a través del medio poroso y su ascenso capilar y la otra a través de la familia de fisuras en la arcilla, este último flujo causa erosión en el contacto tubo-suelo, dejando hueco bajo estos tubos que a la vez reciben la sobrecarga del terraplén y terminan fallando.

En cuanto a la resistencia de la arcilla en estado natural y saturado, los resultados indican una reducción importante en su resistencia mecánica, siendo la saturada del orden del 30% de la natural.

La propuesta de encapsular el terraplén y de manera simultánea colocar una mini pantalla en la entrada de la alcantarilla resulta económica y segura, ya que garantiza el no ingreso de humedad al terraplén y soluciona el problema de erosión bajo los tubos, el proceso de instalación es fácil y sencillo y el costo del polímero por usar es muy inferior a cualquier costo de mantenimiento en esos tramos.

IV.- Bibliografía.

1. Aubertin, M., Mbonimpa, M., Baussière, B, y Chapuis, R.P., (2003). A Model to Predict the Water Retention Curve from Basic Geotechnical Properties. Canadian Geotechnical Journal.
2. Álvarez, M., Barrera, B., Flores F., Garnica A., Gonzales S., Horta R., Hurtado M., Lopez L., Perez G., Perez R., Rojas G., Trejo M., y Zepeda G., (2004). Mecánica de Suelos No Saturados. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos A.C
3. Barrera B., y Garnica P. Introducción a la Mecánica de Suelos No Saturados en Vías Terrestres.(2002) Publicación Técnica No. 198 IMT., Sanfandila, Querétaro, México.
4. De'an Sun, Daichao Sheng , Scott W. Sloan., M. Aubertin, M. Mbonimpa, B. Bussièrre, and R.P. Chapuis. (2006) Elastoplastic modelling of hydraulic and stress-strain behavior of unsaturated soils. Mechanics of Materials 39 (2007) 212–221. Elsevier, Science direct Journal.

5. D.G. Fredlung y A. Xing. Equations for soil- water characteristics curve (1994). Canadian Geotechnical Journal,31(3):521-532,
6. Home Page
:<http://www.telefonica.net/web2/paleontologiaernesto/LaHistoria/ErasGeologicas/Eoceno.html>
7. Padilla R., (2007) Evolución Geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. Boletín de la sociedad geológica mexicana Tomo LIX, Núm. 1, p 19-42. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, División en Ciencias de la Tierra. Cd. Universitaria, México D.F. 04510
8. Varios INEGI 2005, carta geológica F149 (Tamiagua, Veracruz).
9. Fredlund DG. Unsaturated soil mechanics in engineering practice. Canad Geotech J 2006;132:3(286).
10. Van Genuchten MT. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci Am J 1980;44:892–898
11. Sheng D, Gens A, Fredlund DG, Sloan SW. Unsaturated soils: from constitutive modelling to numerical algorithms.Computers and geotechnics 2008.08.011
12. Alonso EE, Gens A, Josa A. A constitutive model for partially saturated soils. Géotechnique 1990;40(3):405–30.
13. Alonso EE, Vaunat J, Gens A. Modelling the mechanical behaviour of expansiveclays. Eng Geol 1999;54:173–83.
14. Fredlund DG, Morgenstern NR. Constitutive relations for volume change in unsaturated soils. Canad Geotech J 1976;13(3):261–76.
15. Fredlund DG, Morgenstern NR. Stress state variables for unsaturated soils. J Geotech Eng Division, ASCE 1977;103(GT5):447–66.
16. Fredlund DG, Morgenstern NR, Widger RA. The shear strength of unsaturated soils. Canad Geotech J 1978;15(3):313–21.
17. Fredlund DG, Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils. New York: John Wiley & Sons; 1993.
18. Fredlund DG, Xing A. Equations for the soil–water characteristic curve. Canada Geotech J 1994;31(3):521–32.
19. Fredlund DG, Xing A, Fredlund MD, Barbour SL. Relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil–water characteristic curve. Canad Geotech J 1996;33(3):440–8.
20. Chiu CF, Ng CWW. A state-dependent elasto-plastic model for saturated and unsaturated soils. Géotechnique 2003;53(9):809–29.
21. Gens A. Constitutive modelling: application to compacted soils. In: Alonso EE, Delage P, editors. Unsaturated soils, vol. 3. Rotterdam: Balkema; 1996. p. 1179–200.
22. Gens A, Alonso EE. A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. Canad Geotech J 1992;29:1013–32.
23. Gens A, Alonso EE, Josa A. Elastoplastic modelling of partially saturated soils, In: Pietruszczak S, Pande GN, editors. Proceedings of third international symposium on numerical models in geomechanics (NUMOG), Balkema, Rotterdam; 1989. p. 163–70.
24. Pedroso DM, Sheng D, Sloan SW. Stress update algorithm for Elastoplastic models with non-convex yield surfaces. Int J Numer Meth Eng; 2008. (Published online with doi:10.1002/nme.2407).
25. Pedroso DM, Sheng D, Zhao JD. The concept of reference curves for constitutive modelling in soil mechanics. Comput Geotech; 2008. (Published online with doi:10.1016/j.compgeo.2008.01.009).
26. Sheng D, Fredlund DG, Gens A. A new modelling approach for unsaturated soils using independent stress variables. Canad Geotech J 2008;45(4):511–34.
27. Sheng D, Pedroso DM, Abbo AJ. Stress path dependency and non-convexity of unsaturated soil models. Comput Mech. 2008b;42(5):685-695.

28. Sheng D, Sloan SW. Time stepping schemes for coupled displacement and pore pressure analysis. *Comput Mech* 2003;31:122–34.
29. Sheng D, Sloan SW, Gens A. A constitutive model for unsaturated soils: thermomechanical and computational aspects. *Comput Mech* 2004;33(6):453–65.
30. Sheng D, Sloan SW, Gens A, Smith DW. Finite element formulation and algorithms for unsaturated soils. Part I: Theory. *Int J Numer Anal Meth Geomech* 2003;27(9):745–65.
31. Sheng D, Sloan SW, Yu HS. Aspects of finite element implementation of critical state models. *Comput Mech* 2000;26:185–96.