

MODELACIÓN NUMÉRICA DE TERRAPLENES REFULADOS SOBRE FUNDACIONES COMPRESIBLES

Ana P. Cappadoro , Alejandro Juárez , Elisabet Lens , Maria E. Pardini y Daniel Platino

Grupo de Investigación en Métodos Numéricos en Ingeniería
Facultad Regional Santa Fe, UTN
Lavaise 610, 3000 Santa Fe
e-mail: danielplatino@hotmail.com

Palabras Clave. Terraplén refulado, Suelo compresible, Modelación numérica

Resumen. *Las modernas técnicas de modelación numérica de problemas geotécnicos, permiten comparar las lecturas de asentímetros colocados en terraplenes durante su etapa constructiva y los resultados del cálculo teórico para su extrapolación a largo plazo. Tal es el caso descrito en este artículo donde se aplicó el programa PLAXIS de elementos finitos al terraplén vial de la Interconexión Física Rosario- Victoria. Este viaducto consta de 47 Km. de terraplenes refulados sobre terrenos blandos, normalmente consolidados, altamente deformables y de escasa resistencia.*

También se empleó este software para modelar el terraplén de defensa de Concepción del Uruguay, proyectado como refulado sobre una fundación de alta compresibilidad, muy orgánica, de muy escasa resistencia, con valores de humedad natural mayores que el Límite Líquido. La construcción por etapas de este terraplén (staged construction), es necesaria debido a las condiciones geotécnicas de la zona. La finalidad de esta modalidad constructiva es permitir el drenaje de los suelos subyacentes, su consolidación y consecuente ganancia de resistencia en etapas sucesivas de carga.

El programa permitió modelar las etapas constructivas, y evaluar para cada una la generación de presiones neutras lo que posibilitó calcular el coeficiente de seguridad en cada etapa.

1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se realizó con el objeto de aplicar el programa PLAXIS, moderna herramienta de cálculo geotécnico, a casos concretos de terraplenes refulados de arena construidos sobre suelos muy compresibles; evaluar los asentamientos calculados comparándolos con los efectivamente producidos en el caso de los terraplenes del Viaducto Rosario Victoria y calcular los coeficientes de seguridad de la obra en función de las presiones neutras desarrolladas durante la etapas constructivas del terraplén de Defensa de Concepción del Uruguay.

2 INTERCONEXIÓN VIAL ROSARIO - VICTORIA

2.1 Características geotécnicas generales del área de proyecto

La sección analizada forma parte de los 47 Km. de terraplenes refulados que se ejecutaron durante la construcción de la Conexión Física Rosario-Victoria

Estos terraplenes emplazados en el Valle Aluvial del Río Paraná fueron construidos sobre suelos blandos, normalmente consolidados, altamente deformables y de escasa resistencia.

Desde la superficie y en profundidad, se extiende una tapada de suelo cohesivo, limos y arcillas de plasticidad baja a media, tipo CL, ML y CL-ML, ocasionalmente intercalados con suelos cohesivos de alta plasticidad tipo CH y MH. Son suelos muy blandos, con contenido de humedad natural a menudo por encima del límite líquido. Presentan normalmente una estructura intercalada con capas de arenas delgadas y ultra-finas, que colabora de manera importante en el proceso de consolidación de los suelos bajo carga, favoreciendo de esta manera la ganancia de resistencia.

Le subyace generalmente una capa de suelo sin plasticidad, limos no plásticos ML o arenas limosas y arcillosas, tipo SM y SC, con porcentajes variables de finos y cuya principal característica es su estado suelto. Estos suelos drenan rápidamente bajo carga, dando lugar a asentamientos prácticamente instantáneos.

A esta unidad geotécnica le subyace el manto francamente arenoso. Se trata de arenas limpias del tipo SP y SM-SP, generalmente finas a medianas. Su granulometría aumenta con la profundidad y su potencia es variable (entre 20 y 40 metros).

Debajo del manto arenoso yacen las arcillas del Mioceno que tienen una potencia de varios centenares de metros, y se extienden en forma continua debajo de las diversas formaciones y unidades geotécnicas.

2.2 Características geotécnicas particulares del emplazamiento de la sección estudiada

El perfil geotécnico está formado por 5 estratos diferentes. Así se tiene, comenzando desde la superficie, los siguientes suelos:

Suelo	Espesor Estrato [m]	γ_h [kN/m ³]	γ_d [kN/m ³]	k [m/día]	E [kN/m ²]	v	C [kN/m ²]	ϕ [°]
Arcilla 1 (CL-CH)	2,00	17,0	12,0	5×10^{-4}	800	0,34	10,0	20
Arena 3 (SM)	4,00	18,5	15,5	1	8000	0,30	1,6	20
Arcilla 2 (CL)	7,70	19,0	16,0	5×10^{-4}	1500	0,34	2,0	20
Arena (SM)	2,80	19,0	16,0	1	$1,0 \times 10^4$	0,30	1,6	24
Arena densa (SM-SP/SP)	3,50	20,0	18,0	1	$2,0 \times 10^4$	0,30	1,0	28

La granulometría del manto arenoso del Paraná garantiza un óptimo rendimiento de los equipos de dragado y refulado y una elevada calidad del producto. La capa compresible superficial se descarta totalmente, mientras que la capa de transición (arena limosa o arena arcillosa) se emplea selectivamente para la construcción de la primera capa de terraplén por refulado libre. Las capas superiores son construidas con arenas limpias tipo SP y SM-SP, que se encuentran subyaciendo la capa de transición.

Las características de la arena refulada son:

Suelo	γ_h [kN/m ³]	γ_d [kN/m ³]	k [m/día]	E [kN/m ²]	v	C [kN/m ²]	ϕ [°]
Arena	20	18	1	$3,0 \times 10^4$	0,30	1	30

2.3 Descripción de las obras

La metodología constructiva consta, en general, de una primera capa de refulado libre, desde el terreno natural hasta cota aproximada de +6.50 (un metro por encima del pelo de agua) y capas superiores de 1.50 m de espesor como máximo, de refulado contenido hasta llegar hasta la cota de coronamiento de +12.80 IGM en forma general y levemente superior a los +15.00 IGM en la zona de acceso a algunos puentes. El terraplén se construye directamente sobre el terreno natural, con un acondicionamiento que consiste en destronque y desboque. El refulado contenido se realiza por sectores en recintos longitudinales cuyos terraplenes de contención o bordos quedan fuera de los límites teóricos del perfil. Paralelamente se realiza un trabajo de maquinado sobre el suelo recién colocado, lo que

contribuye a elevar la densidad del mismo.

La altura total del terraplén es de 13 metros. El talud presenta dos pendientes diferentes: desde el pie hasta los 5,55 metros de altura 1:5~6; y a partir de los 5,55 m hasta el coronamiento, 1:3~4. El ancho de coronamiento es de 12,50 m.

La construcción de este terraplén se realiza por etapas: se refula arena hasta una determinada altura, permitiendo la consolidación de los suelos subyacentes, con la consecuente ganancia de resistencia, antes de iniciar la siguiente etapa de carga.

2.4 Aspectos generales del modelado por elementos finitos

Como primer paso se crea un modelo geométrico usando:

- puntos (para indicar principio y fin de líneas, posición de anclajes, puntos de fijaciones, para refinamiento local de malla, etc),
- líneas (para definir bordes o límites físicos de la geometría, bordes y discontinuidades geométricas del modelo), y
- clusters (áreas encerradas entre líneas reconocidas automáticamente por PLAXIS. Dentro de un cluster las propiedades del suelo son homogéneas. Cada cambio de propiedades en un cluster afecta a todos los elementos dentro del cluster).

El modelo geométrico debe incluir una división representativa del subsuelo en las distintas capas de suelo, objetos estructurales y diferentes etapas de construcción y carga. El modelo debe ser lo suficientemente ‘amplio’ de manera tal que los bordes o contornos no influyan los resultados del problema en estudio.

El modelo de material utilizado es el modelo elasto-plástico de Mohr – Coulomb. Los parámetros que lo definen son: E (módulo de Young) y ν (módulo de Poisson) relativos a la elasticidad del suelo; ϕ (ángulo de fricción) y c (cohesión) relativos a la plasticidad; y ψ (ángulo de dilatación).

Luego de la creación del modelo geométrico se genera automáticamente una malla de elementos finitos, basada en la composición de clusters y líneas del modelo geométrico. En una malla de elementos finitos se distinguen tres tipos de componentes:

- Elementos: durante la generación de la malla, los clusters son divididos en elementos triangulares. Plaxis tiene elementos triangulares de 6 y 15 nodos. Estos últimos se usan para obtener mayor precisión en el cálculo de tensiones y cargas de rotura, en particular en modelos axisimétricos. Obviamente, el tiempo de cálculo es mucho mayor para un elemento de 15 nodos respecto de uno de 6.
- Nodos: Durante el cálculo por elementos finitos, los desplazamientos numéricos se calculan en dichos nodos.
- Puntos de tensión: a diferencia de los desplazamientos, las tensiones se calculan en puntos individuales de integración de Gauss en lugar de calcularse en los nodos. Un elemento de 15 nodos tiene 12 puntos de integración y uno de 6, 3.

2.5 Modelo de elementos finitos

La malla de elementos finitos corresponde a la hipótesis de deformaciones planas utilizando elementos triangulares de 6 nodos. Esta malla es de, aproximadamente, 500 elementos (Fig. 1)

El tamaño de los elementos depende de las dimensiones generales de la geometría (x_{\min} , x_{\max} , y_{\min} , y_{\max}) y de la finura global de la malla a generar. Plaxis dispone de cinco niveles de finura global, diferenciándose cada uno de éstos por el número de elementos triangulares que se generan en cada nivel: cuanto más fina es la malla, mayor número de elementos posee.

A medida que los elementos disminuyen su tamaño, aumenta la precisión del cálculo numérico; asimismo, el tiempo requerido para realizar el cálculo se hace mayor.

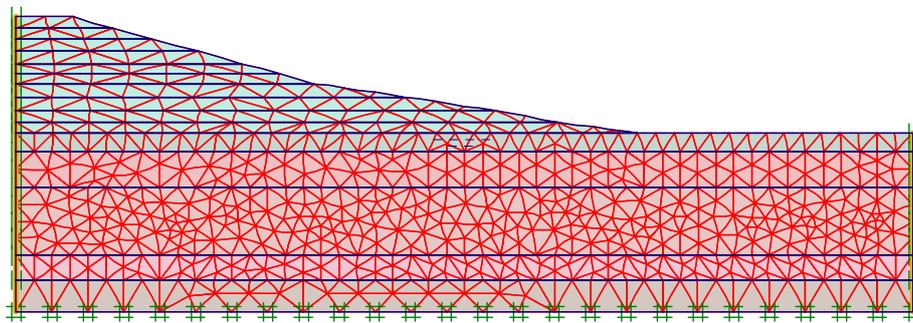


Figura 1: Rosario-Victoria. Malla de elementos finitos

Las unidades de fuerza, longitud y tiempo son kN, metros y días, respectivamente.

El nivel freático se encuentra en la base del terraplén. El peso del agua es de 10 kN/m³.

Las condiciones de contorno se establecieron de la siguiente manera:

- Desplazamientos horizontales nulos en el eje de simetría;
- Desplazamientos nulos por debajo de la capa de arena densa;
- Desplazamientos horizontales nulos en el extremo derecho del modelo. Este límite se estableció a 30,75 m del pie del talud, asumiendo que se encuentra lo suficientemente alejado de modo tal que ya no hay influencia del terraplén.

Las condiciones de contorno para el análisis de consolidación se definieron de la siguiente manera: el borde izquierdo se considera cerrado por ser eje de simetría al igual que el extremo derecho, que por encontrarse alejado, no hay flujo a través de él. Los bordes superior e inferior son bordes drenantes, es decir que el agua puede fluir libremente a través de ellos, disipándose así la presión de poros.

Antes de iniciar la simulación de la construcción por etapas se calculan las tensiones iniciales que son originadas por el peso propio del suelo.

El estado tensional de una masa de suelo, antes de la aplicación de una carga, puede caracterizarse por una tensión vertical σ_{v0} y una tensión horizontal σ_{h0} , que se relacionan mediante el coeficiente de empuje lateral de tierras en reposo, K_0 . $\sigma_{h0} = K_0 \times \sigma_{v0}$. Este

procedimiento puede ser utilizado cuando todas las superficies límites de las diferentes capas de suelo son horizontales. En caso de superficies con alguna inclinación, este procedimiento no podrá ser utilizado, debiendo calcularse las tensiones iniciales de un modo diferente.

En este problema particular, como todas las superficies iniciales son horizontales, las tensiones iniciales se calculan por el método K0.

Una vez obtenidas las tensiones iniciales comienza la etapa de cálculo en el cual se definen cada una de las etapas de construcción. Para este problema se definieron 5 etapas, donde cada una incluye el cálculo plástico y el análisis de consolidación.

2.6 Análisis de resultados

Los datos que se utilizaron para definir las distintas etapas de construcción (valores de carga y tiempos de consolidación) se obtuvieron de los registros de un asentímetro colocado en el eje del terraplén. Estos registros se representan en la (Fig. 2).

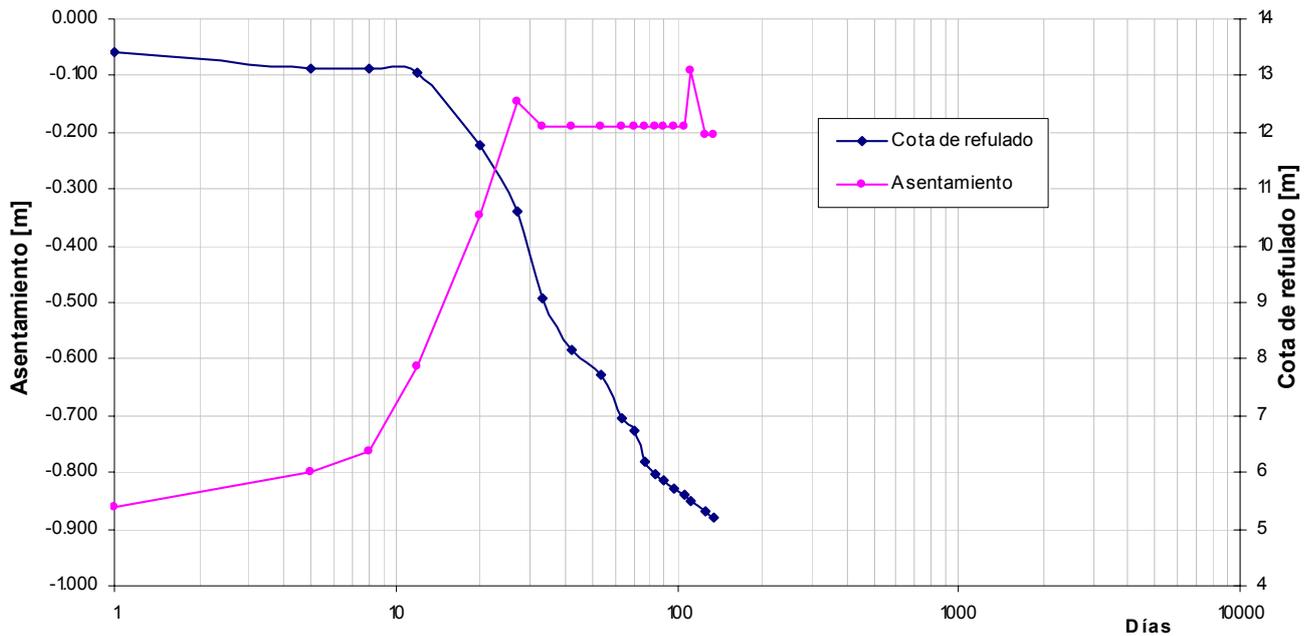


Figura 2: Rosario - Victoria: Asentamientos y cotas de refulado reales

A partir de estos valores se definieron las alturas de carga para cada etapa. En la (Figura 3) se muestran la altura real y la de cálculo, observándose que esta última está dada por una envolvente de la curva de carga real.

En la curva de Asentamientos vs. Tiempo (Fig. 4) se observa que las diferencias entre los resultados obtenidos con Plaxis y los reales vienen dadas por las discontinuidades debidas a

los asentamientos instantáneos correspondientes a cada instancia de aplicación de carga (fases de cálculo plástico del programa). A pesar de estas "deformaciones instantáneas", se observa que al cabo de un corto tiempo los valores obtenidos con Plaxis para cada escalón de carga se corresponden con los valores reales medidos.

Se observa también que el valor del asentamiento al final del tiempo de consolidación se corresponde con el valor de asentamiento calculado mediante un método tradicional. Vale aclarar que el asentímetro se retiró antes de alcanzar el valor último de asentamiento, por lo que el valor final es una estimación.

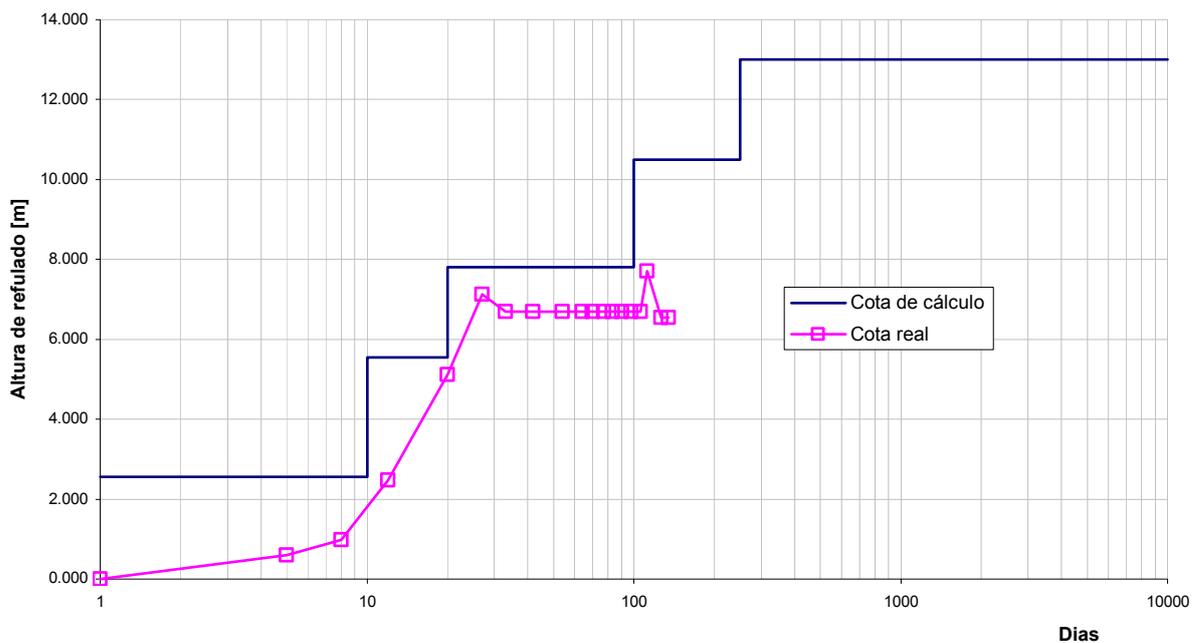


Figura 3: Rosario - Victoria: Alturas de carga



Figura 4: Rosario - Victoria: Asentamientos vs. Tiempo

3 ANÁLISIS DEL TERRAPLÉN DE DEFENSA DE CONCEPCION DEL URUGUAY

3.1 Descripción de las obras

El terraplén de defensa estará en su mayor parte conformado por arenas refuladas. Sólo en sus extremos Este y Oeste se prevén tramos de terraplén, de escasa altura, conformados mediante compactación convencional de suelos cohesivos.

Se trata de una presa homogénea y permeable, con taludes 1:3.5 y un ancho de coronamiento de 6m, que presenta una altura máxima de 8 m sobre el nivel de terreno natural.

Para el terraplén refulado se construirá una platea de suelo refulado libre desde el terreno natural hasta cota + 5.50 + 6.00, y se completará con suelo refulado en diferentes etapas hasta cotas llegar a cota definitiva (+11.30), la que será alcanzada por una capa de arenas limpias compactadas convencionalmente con agregado de agua. En la simulación geométrica, por debajo de cota +6.00 se consideraron taludes 1:10, pero en realidad se construirán de 1:20. La construcción por etapas de este terraplén (staged construction), es necesaria debido a las condiciones geotécnicas de la zona, margen derecha del Ayo Las Animas. La finalidad de esta modalidad constructiva es permitir el drenaje de los suelos subyacentes, su consolidación y consecuente ganancia de resistencia en etapas sucesivas de carga. La empresa constructora podrá optar, no obstante, por efectuar mejoras de fundación que permitan acelerar el proceso constructivo y puesta en funcionamiento de las obras.

3.2 Características geotécnicas generales del área de proyecto

Las características geotécnicas de la fundación corresponden a las zonas bajas e inundables que se extienden a partir del Arroyo Las Animas, unos 400 m hacia el Oeste. Este perfil está compuesto por una tapada de suelo cohesivo, en gran parte de su espesor es de alta compresibilidad, muy orgánico, de muy escasa resistencia, con valores de humedad natural mayores que el Límite Líquido. Estos suelos llegan hasta potencias del orden de 8 - 10 m sobre la traza de la Defensa. En algunos niveles, la elevada presencia de materia orgánica, su estructura abierta y baja densidad, le confieren características extremas de deformabilidad y baja resistencia. Constituye la zona crítica de la fundación del terraplén de defensa.

Secuencialmente, de arriba hacia abajo, y hasta la broza se detectan los suelos citados a continuación. No siempre la secuencia es completa, pudiendo faltar algunos de ellos con excepción del horizonte 1, siempre presente. Como ya se ha mencionado, la mayor proximidad a la desembocadura del Ayo Las Animas implica que las potencias de suelo cohesivo que suprayacen a la broza aumenta, se incrementa el espesor de cada uno de los horizontes detallados y resulta menos probable que la secuencia esté incompleta.

H1: PEAT 2 - Suelo cohesivo superficial de alta plasticidad con espesores comprendidos entre 1 y 2.0 m, muy orgánico, ligeramente preconsolidado por desecación. Según el SUCS, clasifican como CH o MH. En algunos casos, se transforma, directamente en un suelo orgánico OH.

H2: PEAT 1 -Suelos cohesivos blandos: en general muy orgánico, prácticamente sin resistencia en el SPT. Espesor variable entre 1,8 y 4 m. Muy compresible y de escasa capacidad portante.

H3: CLAY 2 - Entre el cohesivo blando (H2) y el superficial preconsolidado (H1) puede presentarse un suelo de características intermedias, con espesores entre 2.5 y 4 m, con menor plasticidad que el suelo superficial, de características más arenosas y de menor plasticidad.

H4: CLAY 1 -Arcilla de mediana resistencia, con N de 3 a 12, tipo CH o MH, pudiendo ser CL en función del porcentaje de arena fina que contiene.

H5: BROZA (Suelo cohesivo calcáreo, de mediana plasticidad). (Eventualmente se intercalan suelos arenosos de espesores variables entre 0,50 y 2,40 m).

Se trata, en general, de un complejo perfil geotécnico, de muy escasa capacidad portante y alta deformabilidad. Este tramo condiciona la secuencia constructiva del terraplén, ya que no es posible, debido a esas características, realizar una construcción ininterrumpida en el tiempo hasta cota de proyecto. En este caso se optó por realizar la construcción por etapas de manera de posibilitar que los suelos de la fundación ganen resistencia a medida que se consolidan bajo cargas controladas.

3.3 Modelo de elementos finitos

La malla utilizada para este problema es una malla de elementos finitos triangulares de 6 nodos. En un primer cálculo, la finura de la malla corresponde a la que por defecto propone

Plaxis, la cual posee alrededor de 100 elementos. Como existían importantes puntos de concentración de tensiones, se realiza un pequeño refinamiento para evitar elementos muy deformes que pueden llegar a arrojar resultados no válidos, quedando finalmente una malla más fina, de 250 elementos, aproximadamente. En la (Fig. 5) puede verse un detalle de la malla utilizada.

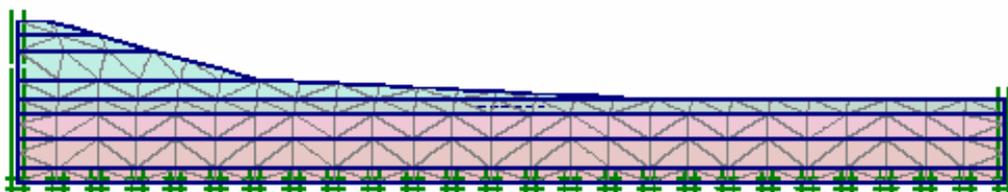


Figura 5: Concepción del Uruguay: Malla de elementos finitos

El modelo utilizado para el suelo es el modelo de Mohr – Coulomb.

Las unidades adoptadas son las estándar de longitud, fuerza y tiempo (m, kN y días).

Como condiciones de contorno asumimos:

- Las deformaciones por debajo de la capa de broza se consideran nulas.
- Por simetría, los desplazamientos horizontales en el eje de simetría son cero.
- El extremo derecho del modelo se asume lo suficientemente alejado de modo tal que las tensiones y los desplazamientos allí originados son cero.

La línea freática se considera situada en la base del terraplén y el peso del agua es de 10 kN/m³.

Las condiciones de contorno para el análisis de consolidación merecen una atención especial. Todos los bordes son drenantes, es decir que el agua puede fluir libremente a través de ellos y la presión de poros puede disiparse en todas direcciones. El borde izquierdo se considera cerrado por ser eje de simetría. El extremo derecho también se considera cerrado, ya que por hipótesis, (por estar este extremo tan alejado) en ese borde no hay flujo. El borde inferior se considera abierto y el superior también.

Se realiza un primer cálculo de tensiones iniciales, originadas por el peso propio del suelo, usando el procedimiento K0 estándar del programa, ya que la geometría y todas las capas son horizontales.

Una vez generadas las tensiones iniciales se realiza el cálculo por etapas (staged construction) de la construcción del terraplén. En este caso las etapas son 5, repitiéndose en cada paso el mismo esquema de cálculo: estado tensional del suelo debido a la carga "instantánea" (cálculo plástico), análisis de consolidación y cálculo del coeficiente de seguridad. El cálculo de este último es muy similar al cálculo de coeficientes de seguridad en análisis por círculos de falla.

A continuación se presentan los resultados obtenidos.

En la (Fig. 6) puede verse la evaluación del coeficiente de seguridad para los diferentes estados de carga (las diferentes etapas constructivas) a lo largo del proceso de construcción. Cabe destacar que los valores mínimos se obtienen para la etapa 3 de carga, en

correspondencia con los máximos valores de presiones neutras.

En la (Fig. 7) se grafican las presiones neutras de esta etapa, donde se ve claramente que los valores máximos se dan bajo el centro del terraplén.

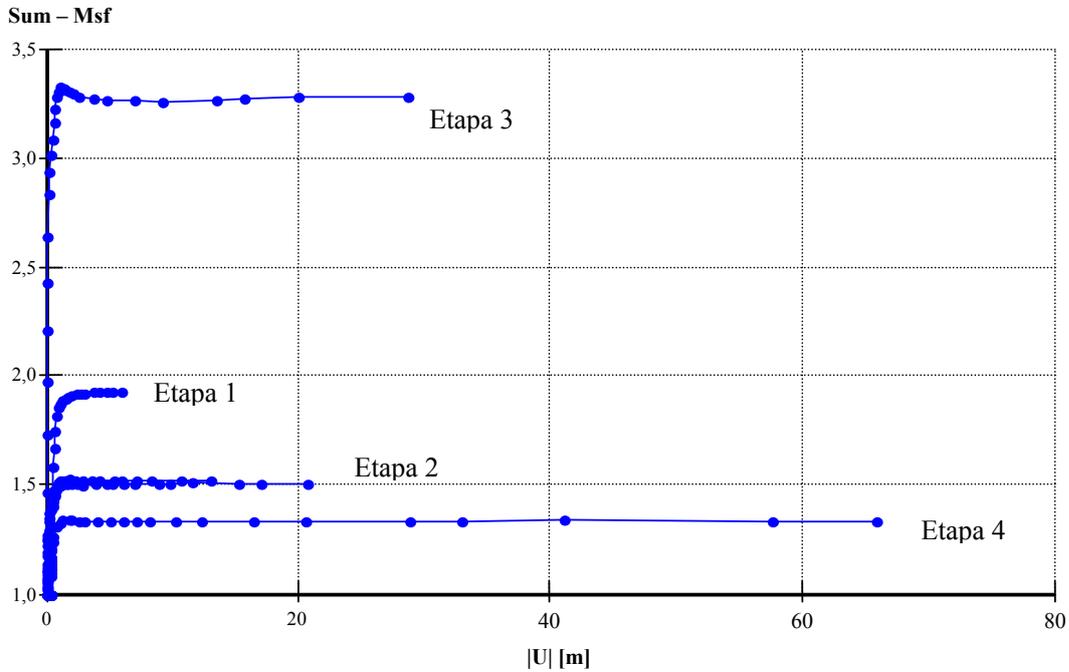


Figura 6: Concepción del Uruguay: Coeficientes de seguridad

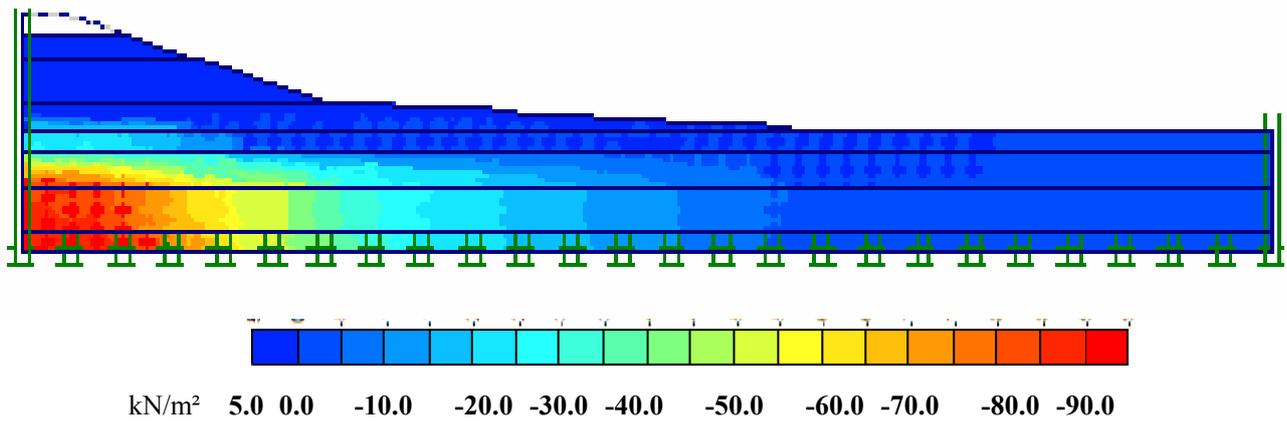


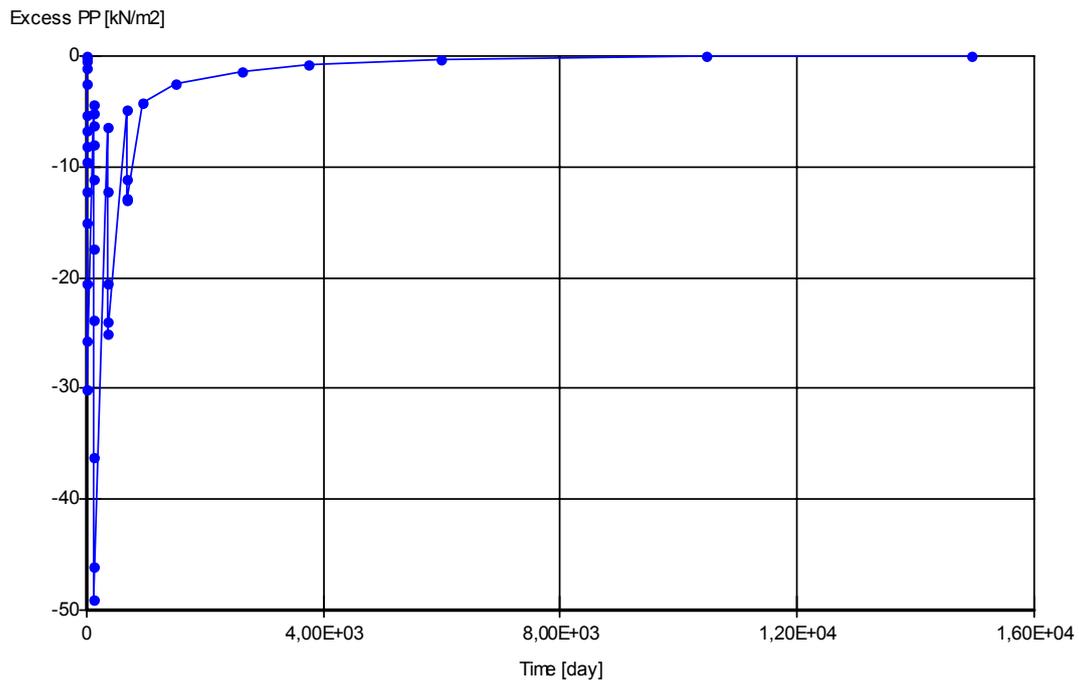
Figura 7: Concepción del Uruguay: Presiones neutras

La Figura 8 muestra la evolución temporal de las presiones neutras a lo largo de toda la construcción. Durante las fases no drenadas, las presiones neutras crecen casi

instantáneamente para luego decaer en el tiempo en las correspondientes etapas de consolidación. La figura se muestra en dos escalas diferentes para poder apreciar los incrementos instantáneos de las presiones neutras.

Por último, en la (Fig. 9) se observan desplazamientos verticales totales una vez finalizado el proceso de consolidación, que se corresponden con valores calculados con métodos tradicionales.

La (Fig. 10) muestra el estado final de tensiones efectivas de todo el conjunto.



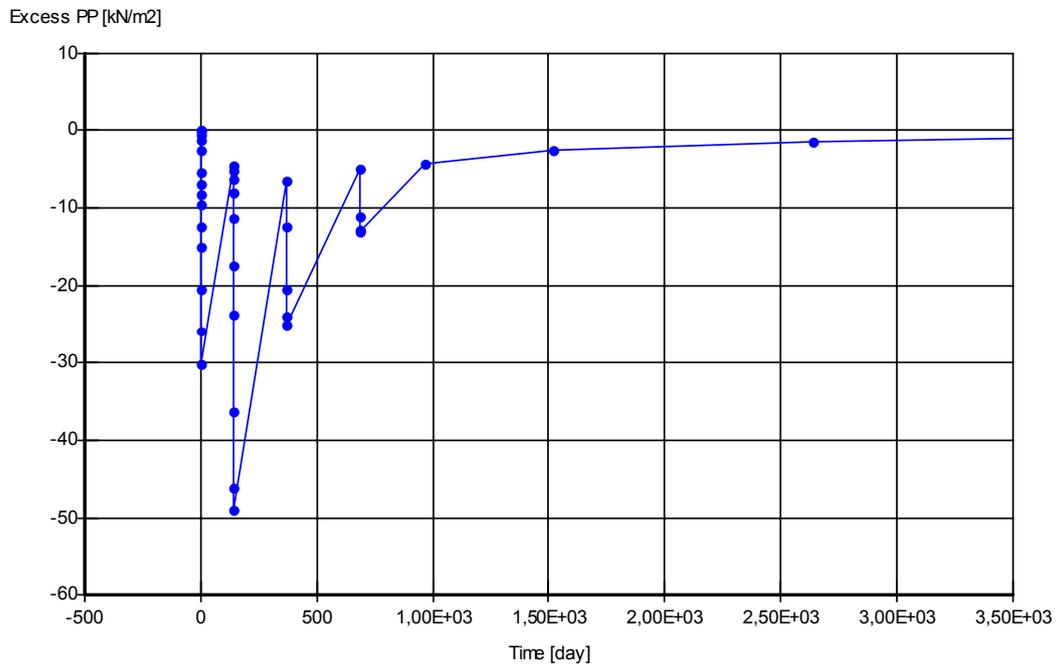


Figura 8: Concepción del Uruguay: Presiones neutras

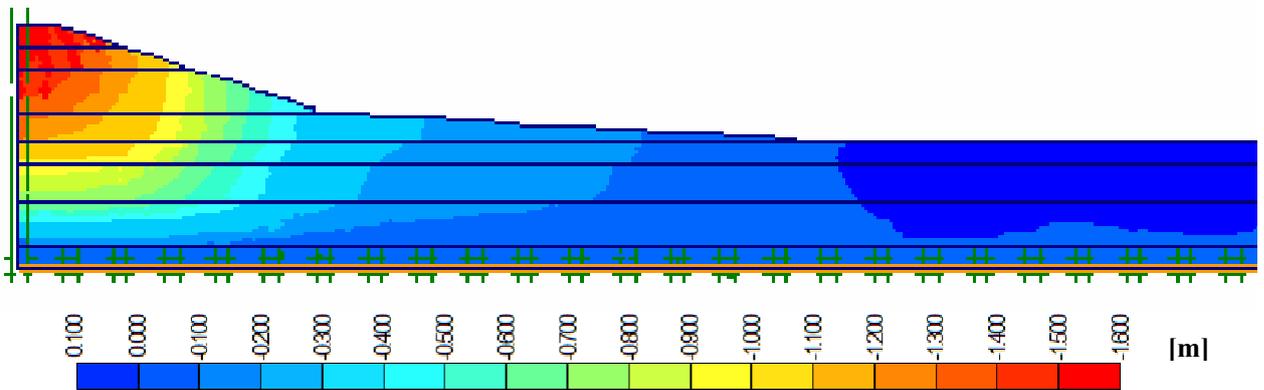


Figura 9: Concepción del Uruguay: Desplazamientos verticales totales

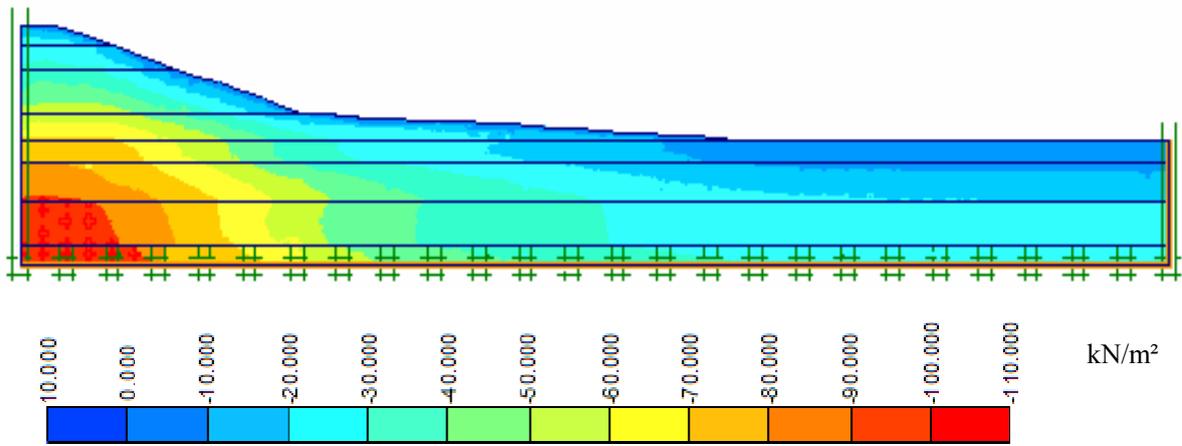


Figura 10: Concepción del Uruguay: Tensiones efectivas finales

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se utilizó el programa Plaxis para modelar numéricamente el proceso de consolidación de dos terraplenes refulados sobre suelos muy compresibles.

El modelo numérico en deformación plana se realizó con elementos triangulares de seis nodos, considerando adecuados estos elementos para el análisis efectuado.

Se empleó el análisis de construcción por etapas, el cual permite simular las distintas etapas de carga que se efectúan en la construcción real.

Se puede observar una buena concordancia entre los resultados numéricos obtenidos y los valores medidos en la obra misma o calculados por otros métodos tradicionales.

Se prevé continuar en el futuro con estos análisis utilizando el modelo para suelos llamado "Soft - Soil", que describe de manera más aproximada el comportamiento de los suelos blandos.

5 REFERENCIAS

[1] Manual de usuarios PLAXIS.

[2] Pardini, M.E, "Aspectos geotécnicos relevantes de la conexión física Rosario - Victoria", GEOBA 2000.