



Re análisis numérico de terraplén en suelo blando mediante modelo de suelo elasto-visco-plástico MIT-SR

M. Sottile y A.J. Whittle

msottile@mit.edu; ajwhittl@mit.edu

Massachusetts Institute of Technology

RESUMEN: En el año 1965 se inició la construcción de un terraplén, correspondiente a la autopista I-95 de Estados Unidos de Norteamérica, de 3.9 kilómetros de extensión y 11 metros de altura ubicado al norte de la ciudad de Boston. Una porción del terraplén (MIT-MDPW) fue instrumentada con piezómetros, inclinómetros y asentímetros para la medición del comportamiento del depósito subyacente de arcilla (Boston Blue Clay) de 40 metros de espesor. En 1994 se llevaron a cabo análisis de elementos finitos que incorporaron consolidación acoplada con dos modelos de suelo de tensiones efectivas: Cam Clay Modificado (MCC) y MIT-E3. La predicción fue aceptable en términos generales. Sin embargo, los asentamientos en los 15 metros cercanos a la superficie fueron subestimados. El objetivo de la presente publicación es re-analizar el presente caso mediante un modelo de suelo elasto-visco-plástico (MIT-SR) recientemente desarrollado en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) con el propósito de explicar la discrepancia entre magnitudes medidas in situ y aquellas obtenidas mediante modelos elasto-plásticos convencionales. Las comparaciones con respecto a las mediciones y predicciones anteriores permiten concluir que MIT-SR: i) contribuye a una notable mejoría en la predicción de asentamientos, específicamente en los estratos superiores de BBC, ii) presenta una pequeña mejoría en las predicciones de excesos de presiones de poros y iii) demuestra que la fluencia lenta de la arcilla cumple un rol secundario en las deformaciones laterales.

Palabras clave: BOSTON BLUE CLAY – MODELACION NUMERICA – ELEMENTOS FINITOS – AUTOPISTA I-95

ABSTRACT: In the 1960's a section of the I-95 highway embankment was built. It has a length of 3,9 km and a height of 11 m and is located at the North of Boston, USA. A section of the embankment (MIT-MDPW) was thoroughly instrumented with piezometers, settlement rods and inclinometers to measure the behavior of the underlying 40 m thick deposit of Boston Blue Clay (BBC). In 1994, Ladd [7] performed finite element analyses that incorporated coupled consolidation with two generalized effective stress soil models, Modified Cam Clay (MCC) and MIT-E3. Generally speaking, the predictions were reasonable. However, the settlements of the upper 15m of the BBC layer were considerable underestimated. Thus, the aim of this paper is to re-analyze this case using an elasto-visco-plastic soil model recently developed at the Massachusetts Institute of Technology (MIT), with the purpose of explaining the differences between measurements and predictions from conventional elasto-plastic soil models. The comparison of the results with respect to prior models and measurements allow to conclude that MIT-SR: i) considerable improves the prediction of settlements, especially of the upper BBC layers, ii) slightly improves the predictions of excess pore water pressures and iii) demonstrates that creep has a secondary role when explaining measured lateral deformations.

Key words: BOSTON BLUE CLAY – NUMERICAL MODELING – FINITE ELEMENTS – I-95 HIGHWAY



1. INTRODUCCIÓN

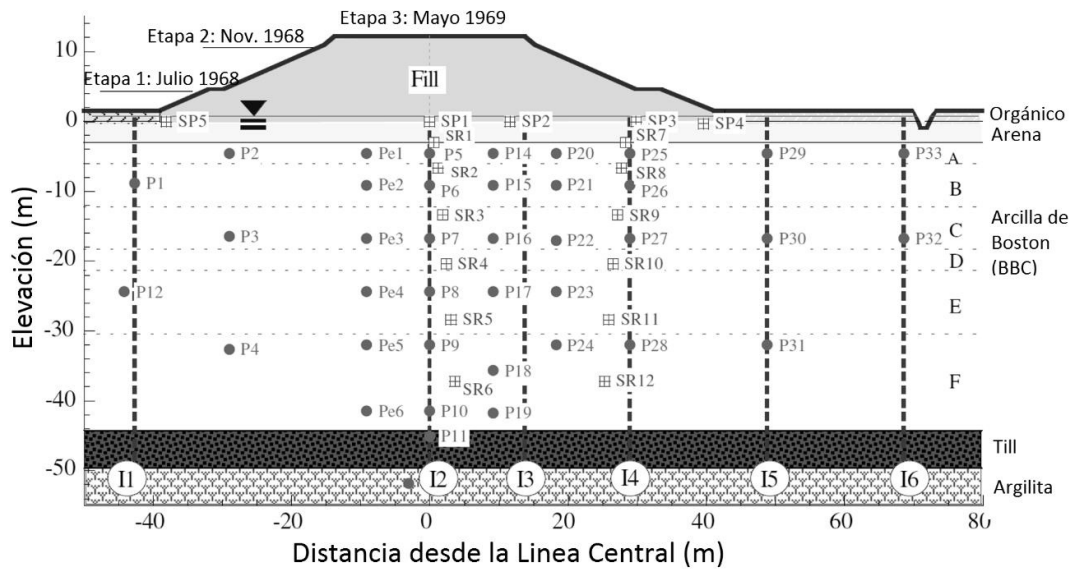
La interestatal 95 (I-95) es actualmente la autopista más utilizada de la costa este de los Estados Unidos de América. En la década de 1960, se construyó una sección del terraplén de la autopista de 3,9 km de longitud, la cual atravesó la reserva Rumney Marsh localizada en Saugus, Massachusetts (8 km al norte de Boston). Esta sección de la autopista nunca fue finalizada, pero fue extensamente monitoreada como parte de un proyecto de investigación conducido en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT-MDPW terraplén de prueba [1]). La instrumentación incluyó piezómetros, inclinómetros y asentímetros para la medición del comportamiento del depósito subyacente de la arcilla de Boston (BBC) de 40 metros de espesor, durante la construcción por etapas del terraplén de 11 m de altura y la subsecuente consolidación [2]. Asimismo, se condujo un extenso programa de ensayos de laboratorio para estudiar las propiedades de la arcilla en cuestión [3, 4, 5, 6].

En 1994, se re-interpretaron las propiedades ingenieriles en el sitio [7] y se llevaron a cabo análisis de elementos finitos, que incorporaron consolidación acoplada con dos modelos de suelo de tensiones efectivas: Cam Clay Modificado (MCC) [8] y MIT-E3 [9]. Se ha reportado buena concordancia con las mediciones de asentamientos y presiones de poro, utilizando ambos modelos, MCC y MIT-E3 [7]. Sin embargo, ambos modelos tienden a subestimar asentamientos de los 15m de suelo por debajo del nivel de terreno, y a sobreestimar los excesos de presiones de poro de agua en las capas superiores de la arcilla. Los análisis muestran que las deformaciones laterales durante la consolidación pueden ser predichas razonablemente por el modelo anisotrópico MIT-E3, mientras que el modelo isotrópico MCC otorga una representación insuficiente del comportamiento medido. Mientras Ladd [7] resalta la importancia de la fluencia anisotrópica para predecir correctamente las deformaciones laterales, otros autores [10] afirman que este comportamiento es principalmente debido a la fluencia lenta de la arcilla. Con el desarrollo del modelo MIT-SR [11] es posible reevaluar el comportamiento medido, utilizando un modelo de suelo que representa ambas propiedades de la arcilla de Boston (BBC): anisotropía y tensión-deformación tiempo-dependiente.

2. EL PROYECTO DE INVESTIGACION

El proyecto de investigación original de la Autopista Interestatal I-95 comenzó en Septiembre de 1965 con actividades de pre-construcción a lo largo de una extensión de 3,9 km, ubicada al norte de Boston. El alineamiento empezó en Cutler Circle, Revere y terminó hacia el norte en Saugus River, Saugus. El sitio consiste en una zona pantanosa cubierta de suelo orgánico subyacente por un depósito grueso de BBC, till glacio-marina y roca. Las operaciones de construcción empezaron en agosto de 1967 con el reemplazo del suelo superficial de tipo orgánico por arena. La construcción del terraplén de 11 m finalizó en Julio de 1969.

La sección de ensayo MIT-MDPW está localizada en la Estación 246 (Sta. 246), aproximadamente 400m al norte de Pine River. La Figura 1 presenta una sección vertical de la estación con la correspondiente ubicación de la instrumentación. La construcción del terraplén se hizo en tres etapas durante un periodo de un año y medio, con un posterior monitoreo del proceso de consolidación durante cuatro años adicionales. Los extensos programas de ensayo de este sitio en particular, además de los innumerables ensayos en arcilla de Boston re-sedimentada (RBBC) conducidos en MIT, proveen información apropiada para la calibración de modelos de suelos complejos, como MIT-E3 y MIT-SR.



I - Inclínómetros, P/Pe - Piezómetros, SR - Varillas de Asentamiento, SP - Plataformas de Asentamiento
Figura 1. Terraplén de ensayo MIT-MDPW. Sección vertical e instrumentación en Est. 246 [7])

2.1. Estratificación del suelo en la sección de ensayo

Las condiciones del subsuelo (Fig. 2) fueron obtenidas por medio de perforaciones, ensayos de laboratorio y ensayos de campo. El nivel de terreno está ubicado a una elevación El. +1,5 m y la tabla de agua en El. +0,76 m. Existe una pequeña presión artesisiana de 1,52 m en la parte inferior del estrato de grava. Las capas subyacentes de suelo consisten en:

- Suelo orgánico: desde El. 0 m hasta El. +1,5 m
- Arena marina pobremente graduada: desde El. -3 m hasta El. 0 m
- Arcilla marina iliítica posglacial (BBC): desde El. -42,6 m hasta El. -3 m
- Till glaciario denso: desde El. -50 m hasta -42,6 m
- Lecho de roca de argilita gris.

2.2. Secuencia de construcción

Tal como se presenta en la Figura 1, la sección de ensayo MIT-MDPW fue construida en tres etapas principales. La primera etapa consistió en el reemplazo del suelo orgánico existente por arena hasta una elevación El. +2,75 m, seguida por aproximadamente 6 meses de consolidación. La segunda etapa es la fase principal de la construcción, donde el relleno de arena fue construido hasta El. +11 m, seguido por aproximadamente 4,5 meses de consolidación. En la tercera etapa, el relleno de arena alcanza El. +12,2 m y la consolidación es monitoreada durante un periodo aproximado de 4 años. La Tabla 1 proporciona una explicación detallada de cada etapa de construcción.

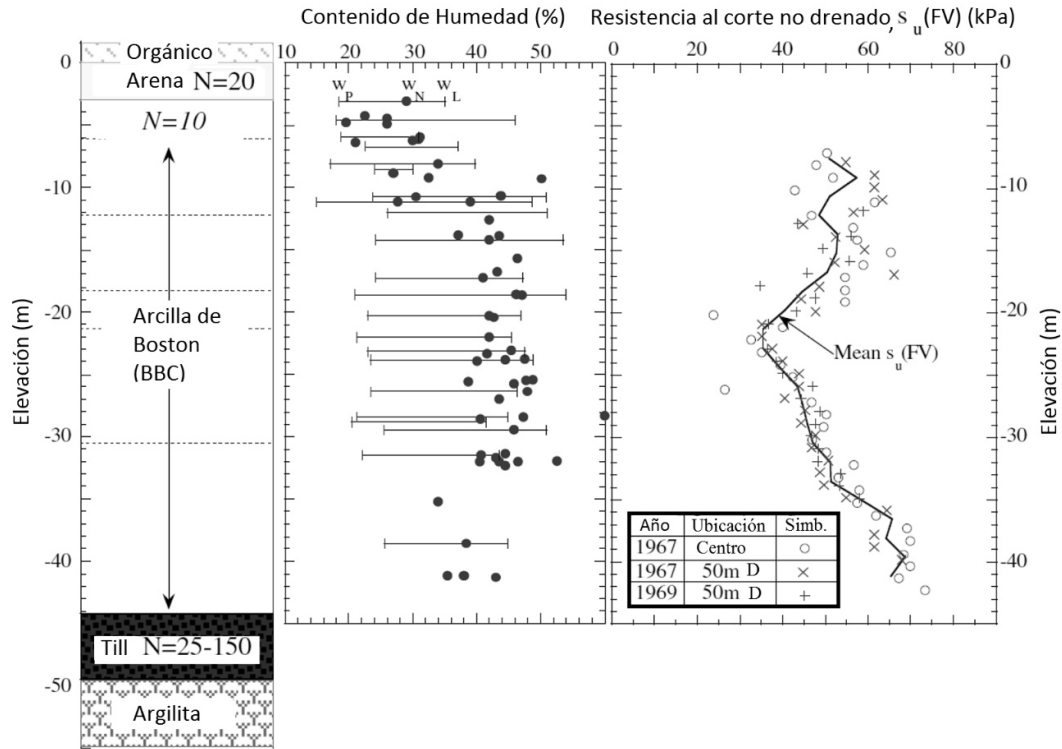


Figura 2. Perfil de suelo, propiedades índices y resistencia al corte no drenada [7]

Tabla 1. Proceso de construcción en etapas del terraplén.

Etapa	Día de Construcción (CD)		Descripción
	Desde	Hasta	
1	0	92	Remoción de la capa de suelo orgánico y reemplazo con arena SW hasta elevación El. +1,50m ($\gamma_{sand} = 15,7 \text{ kN/m}^3$)
	92	123	Construcción de terraplén hasta El. +2,75 m ($\gamma_{sand} = 18,7 \text{ kN/m}^3$)
	123	298	Consolidación
2	298	461	Construcción de terraplén hasta El. +11,0 m ($\gamma_{sand} = 18,7 \text{ kN/m}^3$)
	461	598	Consolidación
3	598	620	Construcción de terraplén hasta El. +12,2 m ($\gamma_{sand} = 18,7 \text{ kN/m}^3$)
	620	2000	Consolidación



3. PROPIEDADES DE LA ARCILLA DE BOSTON (BBC)

3.1. Límites de Atterberg, Contenido de humedad y Ensayo de Veleta (VST).

La Figura 2 presenta la distribución de los límites de Atterberg, del contenido natural de humedad y de resistencia al corte no drenada (obtenidas a partir del ensayo de veleta, VST) en toda su profundidad. Se presentan dos áreas bien definidas con diferentes contenidos de humedad natural (w_N). Desde El. -3 m hasta -12 m, el contenido de humedad varía entre, $w_N = 20\%$ hasta 35% , lo cual implica valores bajos de relación de vacíos, típico de suelos sobreconsolidados. Desde El. -12 m hasta -42,6 m, el contenido natural de humedad incrementa y varía entre, $w_N = 40\%$ hasta 50% . De acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS), este depósito corresponde a una arcilla de baja plasticidad (CL), con valores promedios de límite líquido, $w_L = 45\%$, e índice plástico, $I_p = 23\%$. Ensayos de veleta (Geonor) fueron llevados a cabo antes y después de la construcción del terraplén en la línea central de la estructura y a una distancia de 50 m de la misma (Figura 2). La resistencia promedio al corte no drenado presenta un valor máximo, $s_u = 60$ kPa en El. -10 m, decreciendo a un mínimo, $s_u = 35$ kPa en El. -22 m, incrementando luego linealmente con la profundidad.

3.2. Historia de tensiones

Las tensiones verticales de preconsolidación (σ'_p) fueron obtenidas a partir de tres extensos programas de ensayos de laboratorio: El primero consistió en ensayos de edómetro con escalones de carga incremental (IL) en muestras obtenidas en la línea central del terraplén [3]; el segundo comprendió ensayos de edómetros y de velocidades de deformación constante (CRS) en muestras obtenidas a 60 m a la derecha de la línea central del terraplén [4]; y el tercero abarcó ensayos de edómetro, CRS y de conductividad hidráulica [5].

Ladd [7] realizó la interpretación de los datos, definiendo dos perfiles diferentes de tensiones verticales de preconsolidación. El Perfil 1 representa el límite superior de σ'_p , y fue obtenido basado en ensayos realizados en 1966 and 1977; mientras que el Perfil 2 representa el límite inferior de σ'_p , y fue basado en los ensayos de 1980 (Figura 3). Los valores de preconsolidación fueron obtenidos mayoritariamente a partir del método de Casagrande [12], excepto para las arcillas cercanas a la superficie donde se utilizó el método de Becker [13]. La distribución inicial de tensiones verticales efectivas fue calculada a partir de condiciones hidrostáticas, considerando una disminución lineal de la presión artesiana hacia la superficie.

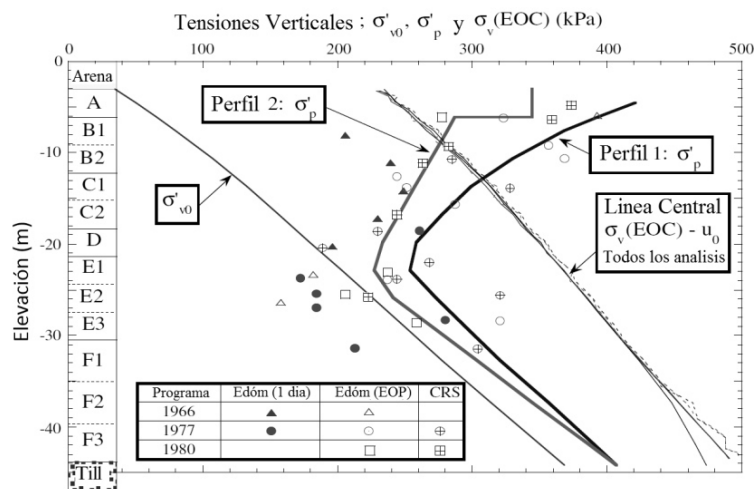


Figura 3. Estratos de arcilla y datos de historia de tensiones (Est. 246) [7]



3.3. Propiedades de consolidación

La Figura 4 presenta la distribución del índice de máxima compresión virgen, CR_{max} , y del coeficiente de consolidación virgen, $c_v(NC)$, interpretados por Ladd [7]. Los autores afirman que los ensayos en los estratos superiores de BBC generalmente conllevan líneas de consolidación vírgenes (VCLs) e índices de compresión que incrementan con la profundidad desde $CR = 0,10$ hasta $0,30$. Sin embargo, para los estratos inferiores de BBC (por debajo de El. -20 m), se midieron curvas de consolidación con forma de "S" (S-shaped, en inglés) en el espacio e -log σ'_v , lo cual implica que CR es dependiente del nivel de tensiones (Fig. 5). Los índices de máxima compresibilidad para estos estratos inferiores de BBC fueron elegidos basándose en el rango de tensiones σ'_v (EOC)/ $\sigma'_p = 1,0$ hasta $1,5$ (Fig. 3, donde EOC indica el fin de la construcción).

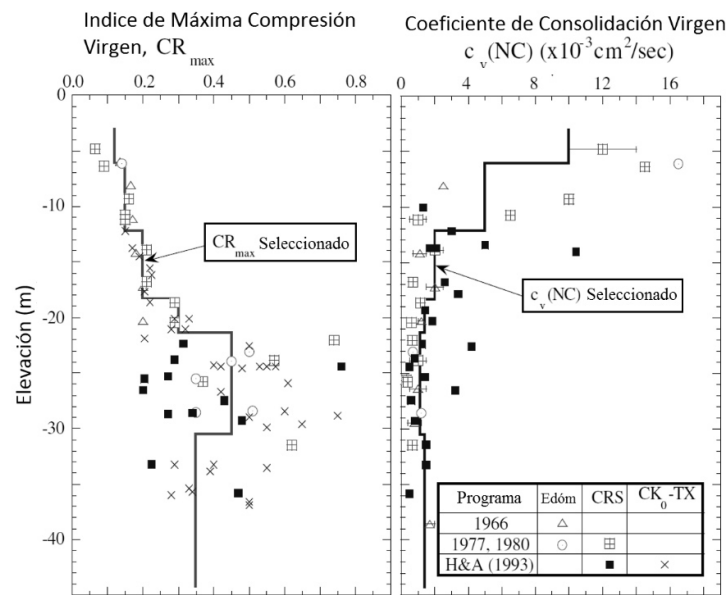


Figura 4. Compresibilidad y Coeficiente de consolidación [7]

Los programas de ensayo descriptos anteriormente tenían pocos datos para los estratos de BBC por debajo de El. -30 m. Consecuentemente, Ladd [7] incluye ensayos de CRS y CK₀-TC realizados por Haley & Aldrich, Inc [14] como parte de un programa especial de ensayos para el proyecto de Central Artery (CA/T) en Boston. Los datos muestran una muy buena concordancia con aquellos obtenidos en los programas de la I-95 para elevaciones entre El. -20 m y -30 m, por lo tanto, fueron utilizados para describir CR_{max} de los estratos más profundos.

Los valores seleccionados de los coeficientes de consolidación de la arcilla normalmente consolidada $c_v(NC)$ están basados en valores promedio entre los ensayos de la I-95 y CA/T.

Las conductividades hidráulicas fueron calibradas por Ladd [7] utilizando datos presentados en la Figura 4 y considerando los límites superiores de OCR (Perfil 1), con $C_r = (1+e_o).RR$, donde $RR = 0,015$. Los valores concuerdan con mediciones de ensayos de permeabilidad de carga constante y CRS, presentados por otros autores [15]. Los cocientes entre la conductividad hidráulica horizontal y vertical fueron obtenidos a partir de ensayos similares. La Tabla 2 presenta un resumen de la estratificación, historia de tensiones y propiedades de consolidación de la BBC elegidas por Ladd [7].

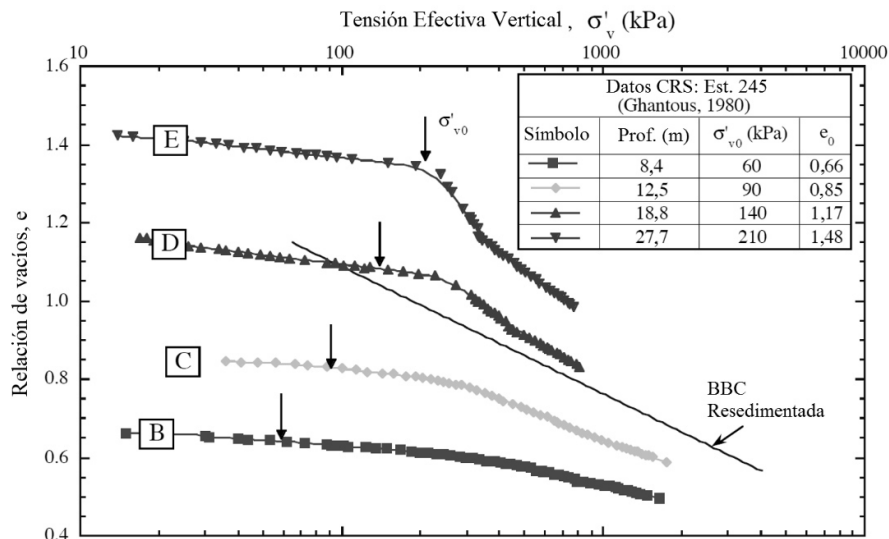


Figura 5. Comportamiento de consolidación de BBC en Est. 245 (Whittle et al., 2001)

Tabla 2. Estratificación, historia de tensiones y propiedades de consolidación de BBC

Sub capa	Sup.	Inf.	Centro	σ'_{v0} (kPa)	Perfil 1		Perfil 2		e_0	C_c (=C _k)	ρ_c	k_{v0} 10 ⁻⁵ (m/día)	k_{h0} / k_{v0}
	El. (m)				OCR	K_0	OCR	K_0					
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
A	-3,00	-6,20	-4,60	50	8,34	1,32	6,82	1,14	0,615	0,195	0,138	13,65	2,0
B1	-6,20	-9,00	-7,60	80	4,60	0,89	3,52	0,77	0,88	0,28	0,138	8,99	2,0
B2	-9,00	-12,40	-10,70	108	3,07	0,72	2,50	0,66					
C1	-12,40	-15,00	-13,70	133	2,25	0,64	1,95	0,61	1,17	0,435	0,162	5,44	1,5
C2	-15,00	-18,60	-16,80	157	1,77	0,59	1,57	0,57					
D	-18,60	-21,00	-19,80	180	1,44	0,55	1,30	0,54	1,17	0,65	0,241	6,13	1,5
E1	-21,00	-24,80	-22,90	203	1,25	0,53	1,12	0,51	1,255	1,015	0,351	6,74	1,5
E2	-24,80	-27,00	-25,90	226	1,21	0,52	1,12	0,51					
E3	-27,00	-31,00	-29,00	249	1,18	0,52	1,08	0,51					
F1	-31,00	-34,60	-32,80	278	1,16	0,52	1,09	0,51	1,115	0,74	0,288	5,10	1,5
F2	-34,60	-40,00	-37,30	314	1,14	0,52	1,10	0,51					
F3	-40,00	-43,80	-41,90	350	1,11	0,51	1,10	0,51					

3.4. Validación de las propiedades de BBC con subsecuentes ensayos de laboratorio

Tres años después de la interpretación hecha por Ladd [7], Varney [6] presentó los resultados de un extenso programa de investigación de laboratorio de muestras obtenidas en la Estación 246 (Sta. 246). Consistió, principalmente, en ensayos de CRS en 23 muestras de alta calidad obtenidas durante la campaña de campo para estudiar el desempeño de piezoconos y piezosondas [16].

Según Ladd [7], las principales incertidumbres en la determinación de propiedades de los suelos residieron en la historia de tensiones y las propiedades de consolidación de los estratos superiores de



BBC. Es por ello que los índices de compresión, C_c , la razón de sobreconsolidación, OCR, y la conducción hidráulica vertical, k_v , fueron comparados con los resultados reportados por Varney [6]. La comparación (Fig. 6) demuestra que los parámetros elegidos por Ladd [7] son razonables y que el Perfil 2 podría representar más precisamente el OCR medido en los estratos superiores de BBC, mientras que el Perfil 1 describe mejor los OCR medidos en los estratos inferiores de BBC.

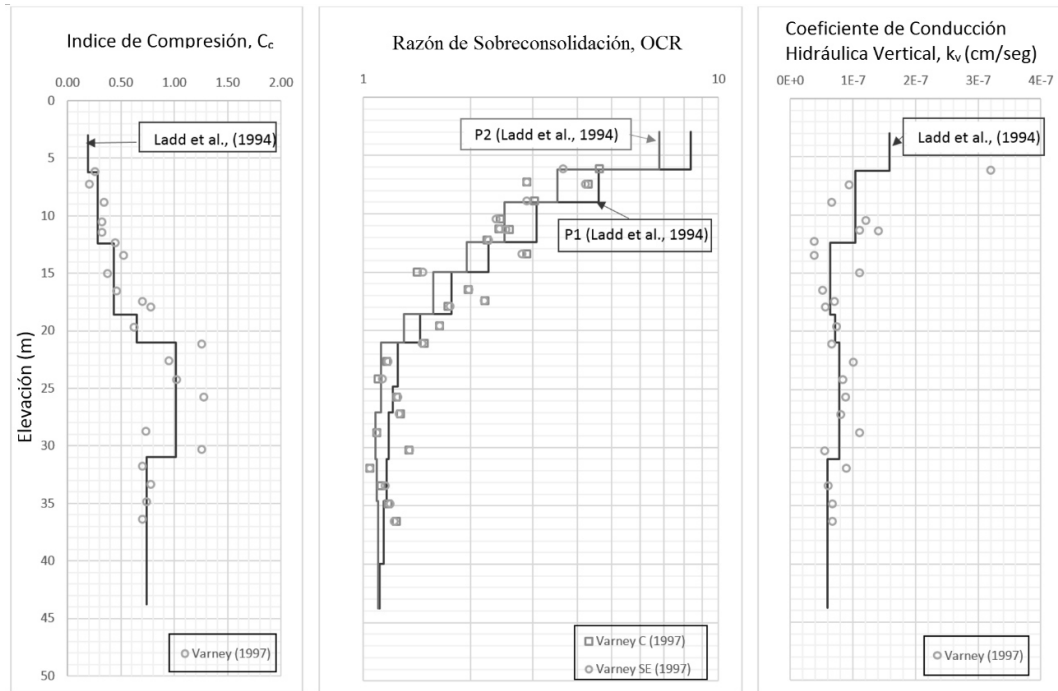


Figura 6. Comparación de las propiedades de BBC entre Ladd [7] y Varney [6]

4. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

La sección de ensayo MIT-MDPW fue modelada utilizando el programa de elementos finitos ABAQUS. El modelo elasto-visco-plástico de suelos MIT-SR fue incorporado en el programa como un Material Definido por Usuario [17].

El ancho del modelo de elementos finitos es de 200 m y la altura de 50 m, lo cual representa una media sección simétrica de la Estación 246. La malla consiste en aproximadamente 2000 elementos de tipo CPE8P (elementos cuadriláteros de 8 nodos, de estado plano de deformaciones, con interpolación bi-cuadrática de desplazamientos y bi-lineal de poro presiones). Los elementos situados en las capas de suelo tienen aproximadamente la misma altura, pero el ancho varía de acuerdo a la ubicación con respecto a la línea central (los elementos más pequeños son aquellos más cercanos a la línea central; Figura 7.a).

El suelo orgánico, el relleno, la arena, la arcilla BBC y el till glaciar son considerados en el análisis. El estrato de suelo orgánico es modelado como un material lineal elástico con $G = 8 \text{ kPa}$ y un peso específico total de $\gamma_{peat} = 11.8 \text{ kN/m}^3$. La arena y el till glaciar son modelados como materiales lineal elástico-perfectamente plástico (Mohr-Coulomb), con $G/\sigma'_{v0} = 170$ [7]. El relleno es dividido en tres capas, de acuerdo con la construcción en etapas del terraplén, con rigideces definidas por $G/\gamma_t z = 170$,



donde z es la profundidad por debajo de la altura final del terraplén, El. +12.2 m (Figura 7.b). Las propiedades están resumidas en la Tabla 3.

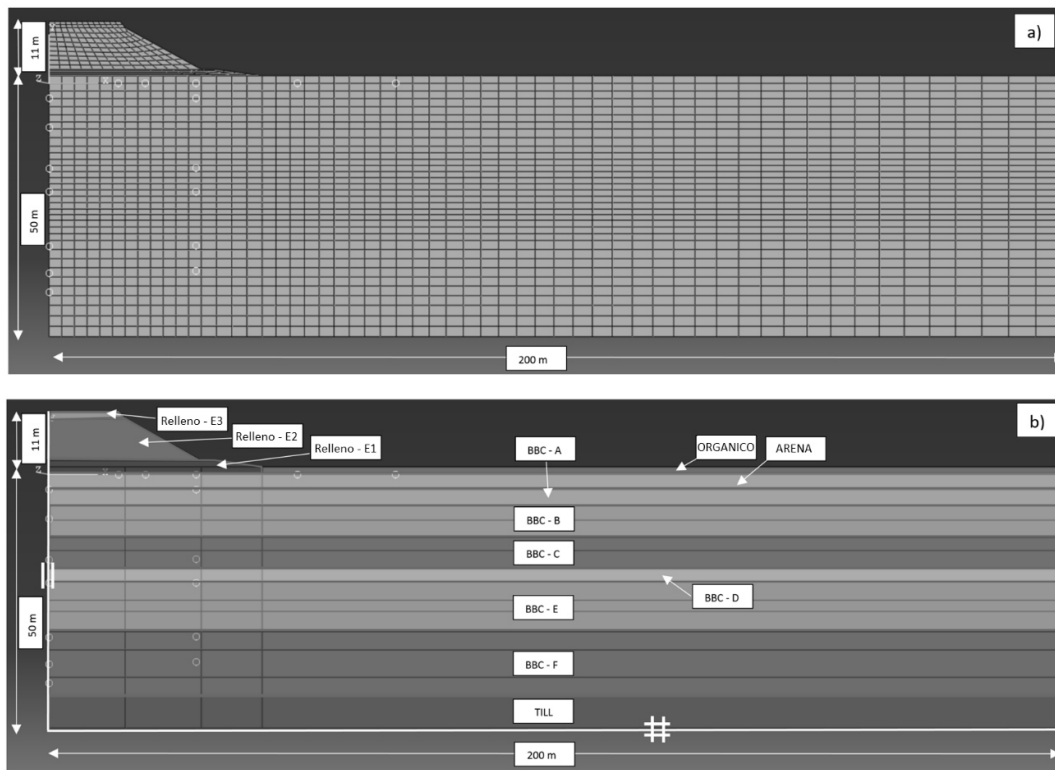


Figura 7. Modelo de elementos finitos del terraplén MIT-MDPW, Est. 246; a) Malla EF; b) Estratificación de suelo

Tabla 3. Parámetros y propiedades del suelo orgánico, de la arena, del till glaciar y del relleno de terraplén

Capa	EI, Superior	EI, Inferior	Módulo de Young (E')	Coeficiente de Poisson (ν')	Angulo de Fricción (ϕ')	Cohesión (c)	Conductividad Hidráulica (k)
	(m)	(m)	(kPa)	-	-	(kPa)	(m/day)
Relleno – Etapa 3	+12,2	+11,00	5,340	0,40	-	-	1,00
Relleno – Etapa 2	+11,00	+2,75	42,058	0,40	-	-	1,00
Relleno – Etapa 1	+2,75	0,00	95,242	0,40	-	-	1,00
Suelo orgánico	+1,50	0,00	20,80	0,30	-	-	1,00
Arena	0,00	-3,00	25,000	0,40	37	1	1,00
Till glaciar	-43,80	-50,00	108,680	0,30	43	1	0,10

Tal como lo demuestra la Tabla 2, el estrato de BBC fue dividido en 12 sub-capas basándose en la similitud de valores iniciales de relación de vacíos y características de compresibilidad. Los parámetros del modelo MIT-SR están basados en la calibración para RBBC presentada por Yuan [11], con excepción



de ρ_c , el cual define la pendiente de la Curva Límite de Compresión (LCC) en el espacio $\log e - \log \sigma'_v$, y varía considerablemente entre las sub-capas de BBC.

Considerando que el modelo MIT-SR es tiempo-dependiente, las velocidades de deformación específica son funciones de variables de estado que dependen de la historia de deformaciones específicas. Es entonces crítica la forma en la cual se determinan dichos valores iniciales. Para ello, para cada sub-capa de BBC, se sigue el procedimiento recomendado por Yuan [11], el cual puede resumirse en: i) carga unidimensional drenada de un espécimen hipotético con OCR = 4,0 hasta ingresar al régimen normalmente consolidado; ii) se permiten 24 horas de consolidación; iii) descarga unidimensional drenada hasta el OCR especificado. Considerando que la tensión efectiva hidrostática (σ') varía con la profundidad, es necesario introducir valores normalizados del tamaño de la superficie de fluencia (α) y de la tensión de resistencia interna que controla la histéresis volumétrica (σ^h), con el propósito de representar un OCR constante para cada sub-capa. La variable de estado η_1^h representa la histéresis deviatorica y b_1 la orientación de la superficie de referencia anisotrópica. La Tabla 4 presenta los valores iniciales de las variables de estado para ambos perfiles.

Tabla 4. Variables de estado iniciales de MIT-SR para las subcapas de BBC.

Subcapa	Perfil 1				Perfil 2			
	$\frac{\alpha}{\sigma'}$	$\frac{\sigma^h}{\sigma'}$	η_1^h	b_1	$\frac{\alpha}{\sigma'}$	$\frac{\sigma^h}{\sigma'}$	η_1^h	b_1
A	3,930	1,146	-0,168	0,611	3,558	1,155	-0,058	0,613
B1	2,897	1,169	0,141	0,615	2,507	1,175	0,260	0,615
B2	2,312	1,176	0,314	0,615	2,036	1,174	0,389	0,615
C1	1,901	1,171	0,423	0,615	1,729	1,163	0,469	0,615
C2	1,617	1,153	0,500	0,615	1,485	1,133	0,538	0,615
D	1,397	1,111	0,565	0,615	1,293	1,068	0,594	0,615
E1	1,256	1,045	0,601	0,615	1,151	0,958	0,611	0,615
E2	1,224	1,023	0,606	0,615	1,151	0,958	0,611	0,615
E3	1,200	1,003	0,608	0,615	1,118	0,929	0,612	0,615
F1	1,183	0,988	0,609	0,615	1,125	0,935	0,611	0,615
F2	1,166	0,972	0,610	0,615	1,132	0,942	0,611	0,615
F3	1,141	0,950	0,610	0,615	1,132	0,942	0,611	0,615

Nota: Se asume $R_a = 0$; donde R_a representa la tasa de deformación interna activada por deformaciones históricas.

5. RESULTADOS

Esta sección compara los resultados computados para el Perfil 1 y 2 de historia de tensiones, utilizando el modelo MIT-SR, con los datos medidos y resultados de análisis previos utilizando el modelo MIT-E3 reportados por Ladd [7].

5.1. Presión de poros

Las Figuras 8 y 9 presentan un resumen de las predicciones y mediciones de excesos de altura piezométrica, h_e , en la finalización de la construcción (CD 620) y en el final del periodo de monitoreo (CD 2000), respectivamente;

$$h_e = \frac{u - u_0}{\gamma_w} + h_i \quad (1)$$

donde u es la presión total de poros, u_0 es la presión hidrostática de poros y h_i es la altura piezométrica de la presión artesisiana, la cual es linealmente distribuida en la profundidad de la BBC.



SANTA FE - ARGENTINA - 2016

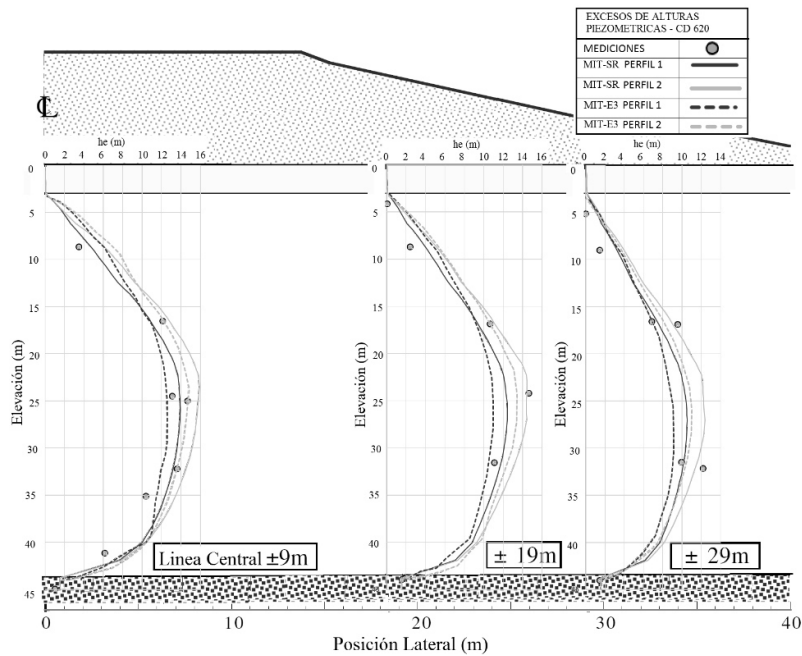


Figura 8. Comparación de predicciones y mediciones de excesos de altura piezométrica al final de la construcción (CD 620)

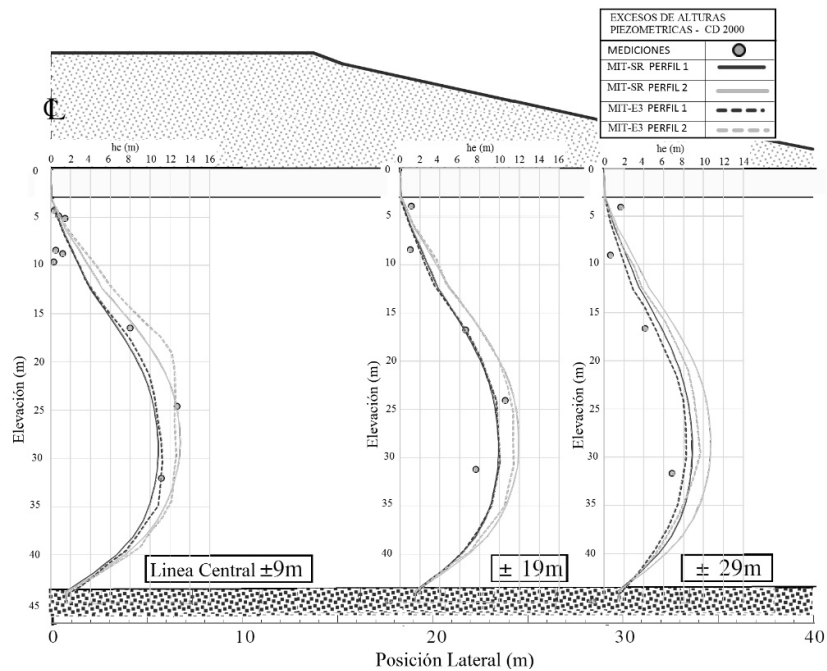


Figura 9. Comparación de predicciones y mediciones de excesos de altura piezométrica al final del periodo de monitoreo (CD 2000)



Las figuras combinan datos de algunos piezómetros ubicados por debajo de la línea central del terraplén (P5-P11, Fig. 1) y otros desplazados $\pm 9\text{ m}$ (Pe1-Pe6 y P14-P19) y $\pm 29\text{ m}$ (P14-P19 y P25-P28) con respecto a la línea central. Según Ladd [7], las mediciones presentan las siguientes características:

- Al final de la construcción (CD 620), el máximo valor de exceso de altura piezométrica ($h_e \approx 15\text{ m}$) fue medida en el medio del estrato de BBC (sub-capas E); mientras que en la parte superior del estrato de arena y en la parte inferior del estrato de till glacial se mantuvieron reducidas ($h_e \leq 4\text{ m}$) (Fig. 8). Por lo tanto, esto es consistente con la teoría de consolidación uni-dimensional con doble drenaje, en la parte superior e inferior del estrato.
- Al final del periodo de monitoreo (CD 2000), el exceso de altura piezométrica en los estratos de arena y till glacial son despreciables; mientras que en la sub-capas E solo ocurrió una pequeña reducción del máximo valor de exceso de altura piezométrica ($h_e \approx 13\text{ m}$), lo cual demuestra que el periodo de monitoreo es solo una reducida fracción del tiempo requerido para finalizar la consolidación del estrato de BBC (Fig. 9).

Cuando se comparan las predicciones de exceso de alturas piezométricas obtenidas de los modelos MIT-E3 y MIT-SR, pueden hacerse las siguientes observaciones:

- Existe una buena concordancia entre los dos modelos para ambos perfiles. Al final de la construcción (CD 620), MIT-SR predice valores de exceso de poro presiones ligeramente más altos en el perfil de suelo (Fig. 8). Esta diferencia podría ser explicada por las predicciones de presiones de poros inducidas por corte en ambos modelos. Es interesante observar que las diferencias entre ambos modelos son pequeñas al final del periodo de monitoreo (CD 2000) (Fig. 9).
- Ambos modelos presentan una concordancia notable con respecto a las mediciones. En términos generales, el Perfil 1 y el Perfil 2 proporcionan límites inferiores y superiores de mediciones de exceso de alturas piezométricas, respectivamente. Las predicciones de MIT-SR para el Perfil 1 (estimación más alta de σ'_p) presentan la mejor concordancia con las mediciones, mientras el Perfil 2 tiende a sobrestimar los excesos de alturas piezométricas.

Para los estratos superiores de BBC, el modelo MIT-SR mejora las predicciones del modelo previo MIT-E3, mientras que la diferencia es mínima para la parte central e inferior del estrato de BBC.

La Figura 10 compara el desarrollo del exceso de alturas piezométricas durante la construcción (hasta CD 690) a partir de mediciones de piezómetros específicos ubicados en la línea central (P6, P7, P9 y P10) y a $\pm 29\text{ m}$ de la misma (P27 y P28). Ambos modelos presentan predicciones razonables para los piezómetros ubicados en el centro del estrato de BBC (P7, P9, P27 y P28), con una pequeña sobrepredicción de MIT-SR sobre MIT-E3. Sin embargo, para los piezómetros superior e inferior (P6 y P10, respectivamente), el exceso de alturas piezométricas es sobreestimado por ambos modelos. Para los estratos superiores, este resultado puede ser explicado por la presencia de finas capas de arena, las cuales no son representadas en las pequeñas muestras de laboratorio, y por lo tanto, los análisis tienden a subestimar la conductividad hidráulica (y el coeficiente de consolidación) de dichos estratos.

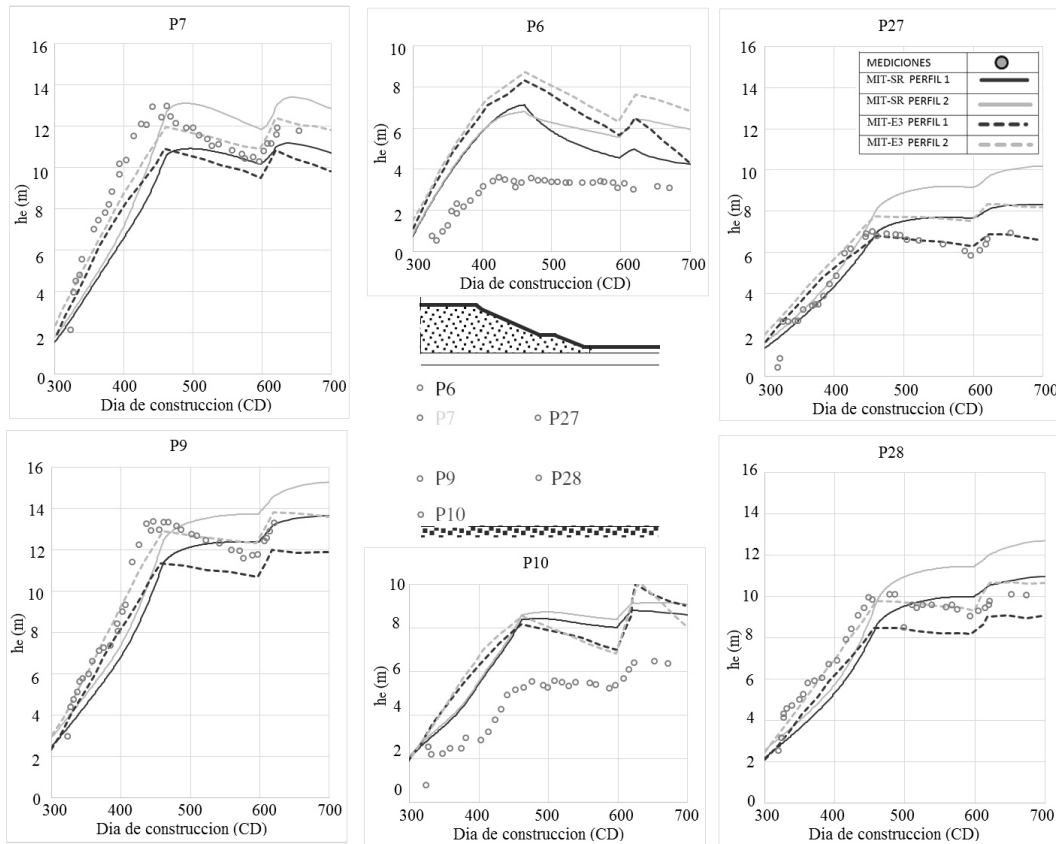


Figura 10. Comparación de excesos de altura piezométrica computados y medidos en ubicaciones particulares de piezómetros.

5.2. Asentamientos

La Figura 11 compara las predicciones de asentamientos de los modelos (MIT-SR y MIT-E3) con mediciones en tres diferentes elevaciones (El. -3,0 m, -21,35 m y -37,5 m) y dos ubicaciones laterales (línea central y ± 29 m). Pueden hacerse las siguientes observaciones:

- MIT-SR mejora considerablemente las predicciones en relación a MIT-E3 para los estratos centrales e inferiores de BBC (SR4, SR7, SR10 y SR12). Los resultados de MIT-SR para el Perfil 1 (estimación más alta de σ'_p) proporcionan la mejor concordancia con las mediciones. Esto es predecible considerando que el OCR del Perfil 1 representa un buen promedio de historia de tensiones en la Estación 246 (considerando las más recientes mediciones de Varney [6]), mientras que el Perfil 2 representa el límite inferior del OCR (Fig. 6).

- MIT-SR subestima ligeramente los asentamientos de los estratos superiores de BBC, medidos en la línea central (SR1). Sin embargo, se puede observar que la forma de la curva asentamiento-tiempo predicha por MIT-SR concuerda bien con la tasa de asentamientos medidos, pero existe un desfase constante. Esta diferencia es la consecuencia de la subestimación de los asentamientos durante la segunda etapa de construcción, y puede ser explicada por la subestimación de la compresibilidad o conductividad hidráulica de las capas superiores de suelo.

- MIT-SR mejora considerablemente la predicción de asentamientos de los estratos superiores de BBC, medidos a ± 29 m de la línea central, donde la diferencia está claramente determinada por la subestimación durante la segunda etapa de construcción.

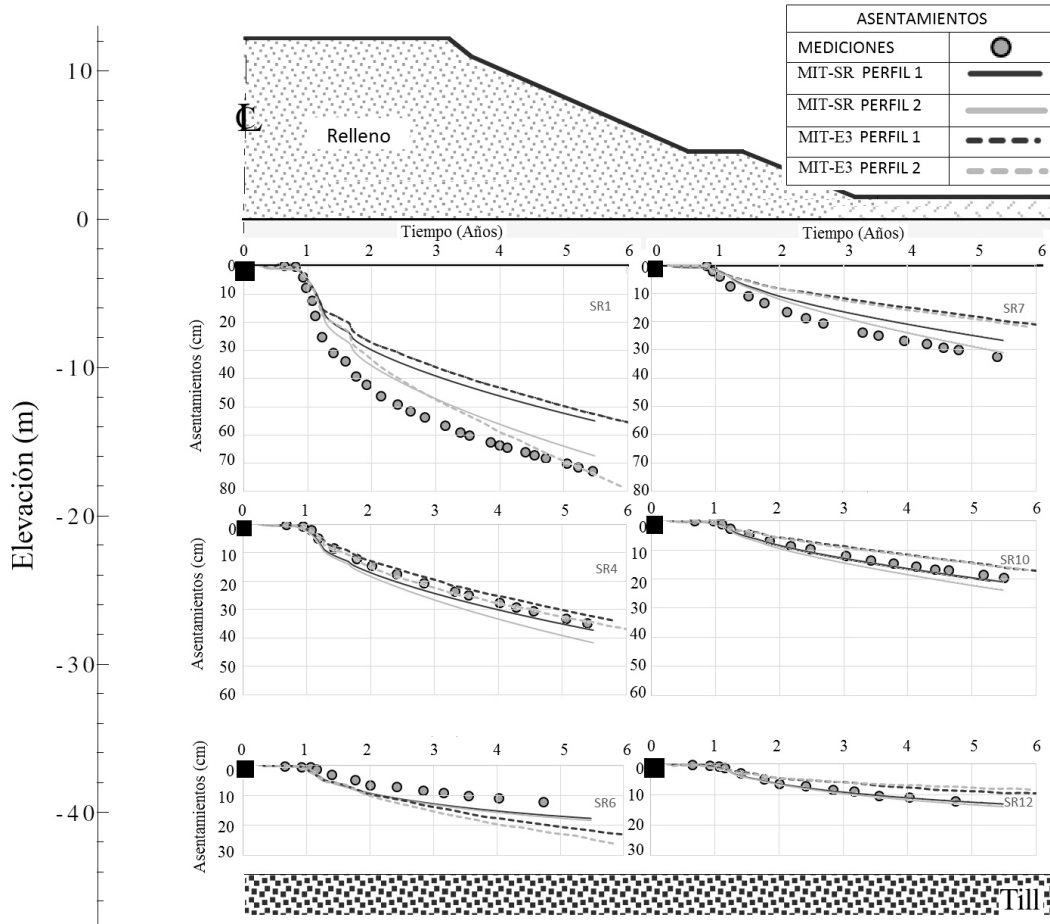


Figura 11. Comparación de asentamientos computados y medidos en ubicaciones específicas (Est. 246)

5.3. Deformaciones laterales

Las Figuras 12 y 13 comparan predicciones y mediciones de deformaciones laterales medidas en los inclinómetros I3, I4 e I5 al final de la construcción (CD 620) y al final del periodo de monitoreo (CD 2000), respectivamente. Pueden hacerse las siguientes observaciones:

- Al final de la construcción (CD 620; Fig. 12), ambos modelos predicen magnitudes similares de máximos desplazamientos horizontales, pero estos ocurren en diferentes elevaciones. MIT-SR predice la máxima deflexión horizontal en El. -20 m (Sub-capas D), mientras que MIT-E3 predice el máximo movimiento lateral en la parte superior del estrato de arcilla (Sub-capas A; El. -3 m). La concordancia con las mediciones es razonable, pero existe una considerable subestimación en los estratos superiores (sub-capas A y B).

• Al final del periodo de monitoreo (CD 2000), ambos modelos predicen comportamientos similares para el Perfil 2. Sin embargo, existe una diferencia al comparar el Perfil 1, considerando que MIT-SR predice más desplazamientos que MIT-E3. En comparación a las mediciones, especialmente de I3 e I4, los resultados de MIT-SR Perfil 2 concuerdan con las mismas en términos de máxima magnitud, pero ubica el máximo en la parte central del estrato de BBC, mientras que la medición del máximo desplazamiento se encuentra en las capas superiores de BBC. Además, MIT-SR predice mayores desplazamientos para las capas centrales y superiores de BBC, probablemente debido a componentes adicionales de fluencia.

Las deformaciones laterales durante la consolidación se han atribuido a las propiedades de fluencia lenta de la BBC [18]. Los resultados presentados en esta investigación demuestran que dichas propiedades no presentan un rol protagónico en la explicación del comportamiento del terraplén MIT-MDPW. A pesar de que existen diferencias entre el modelo independiente de las velocidades de deformación, MIT-E3, y el dependiente de velocidades de deformación, MIT-SR, éstas aparecen como factores secundarios en comparación al comportamiento medido.

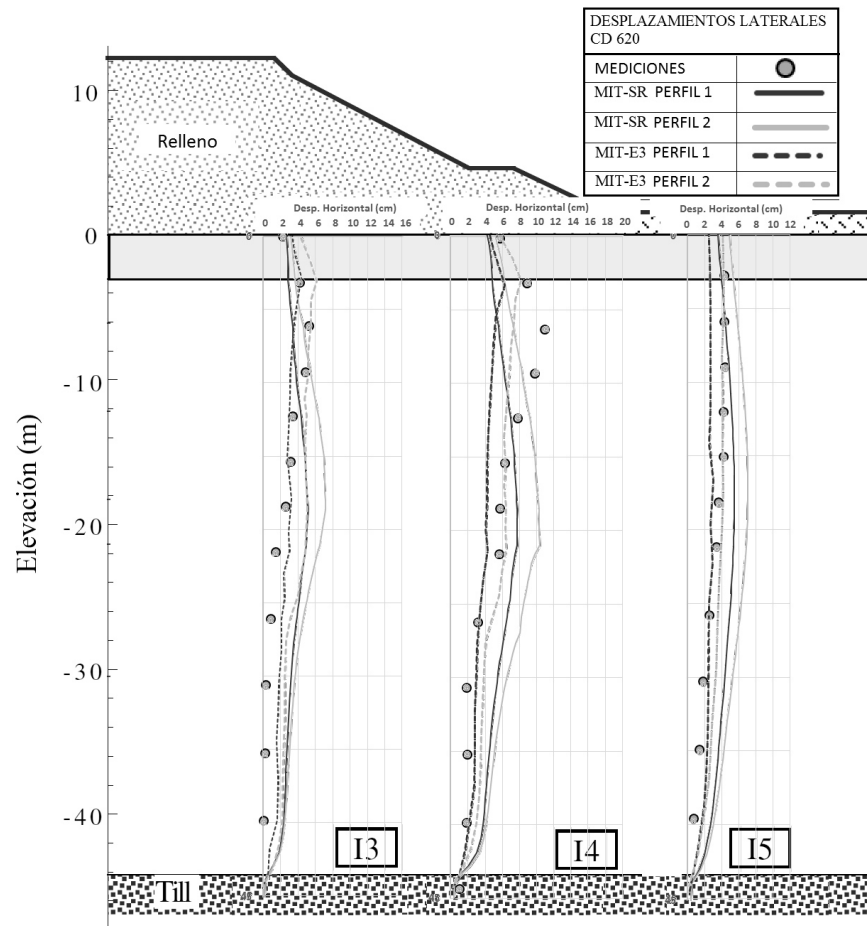


Figura 12. Comparación de predicciones y mediciones de deformaciones laterales al final de la construcción (CD620)

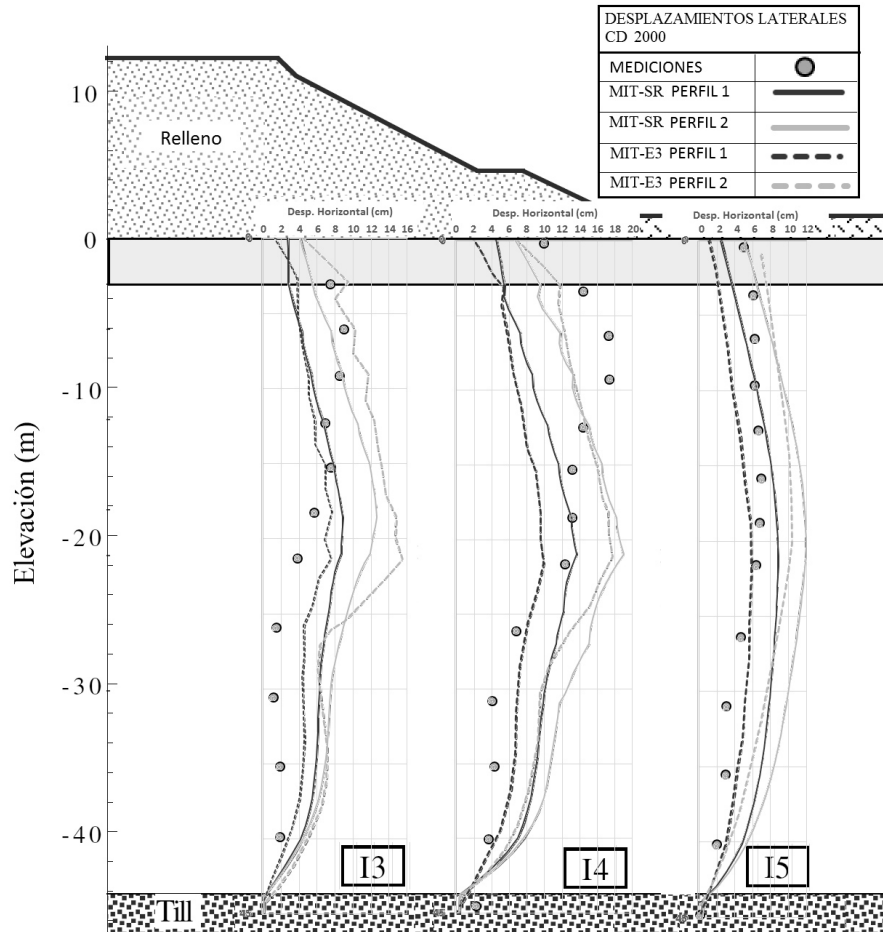


Figura 13. Comparación de predicciones y mediciones de deformaciones laterales al final del periodo de monitoreo (CD 2000)

6. CONCLUSIONES

Un modelo constitutivo de suelos, dependiente de velocidades de deformación y recientemente desarrollado, fue calibrado para la arcilla de Boston (BBC) con el fin de re-evaluar el comportamiento de un terraplén MIT-MDPW perteneciente a la Autopista Interestatal I-95. Los resultados fueron comparados con resultados obtenidos de análisis numéricos previos utilizando el modelo MIT-E3, presentado por Ladd [7]). En términos generales, MIT-SR contribuye a una considerable mejoría en términos de asentamientos, mientras que no mejoró substancialmente las predicciones de deformaciones laterales. Los resultados generales sugieren que las propiedades dependientes de la fluencia solo tienen un rol secundario en el comportamiento de este terraplén de ensayo.



7. REFERENCIAS

- [1] Wolfskill Anthony y Soydemir Cetin, Soil instrumentation for the I-95 MIT-MDPW test embankment, *J. Boston Soc. Civil Engrs*, 1971, 58(4), pp: 193-229.
- [2] Whittle Joseph Francis, Consolidation behavior of an embankment on Boston Blue Clay, MSc. Thesis, Dept. of Civil and Environmental Eng., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1974.
- [3] Guertin Joe, Stability and settlement analyses on an embankment on clay, *S.M. Thesis*, Dept. of Civil and Environmental Eng., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1967.
- [4] Ladd Charles Chusing, Germaine John, Baligh Mohsen Mohamed y Lacasse Suzanne, Evaluation of self-boring pressuremeter tests in Boston Blue Clay, *Research Report R79-4*, Dept. of Civil Engrg, MIT, Cambridge, Massachusetts, 1980.
- [5] Ghantous Imad Botros, Prediction of in situ consolidation parameters of Boston Blue Clay, *CE. Thesis*, Dept. of Civil and Environmental Eng., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1982.
- [6] Varney Amy Jeanne, A performance comparison between a novel tapered piezoprobe and the piezocone in Boston Blue Clay, Ph.D. thesis, Dept. of Civil and Environmental Eng., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1997.
- [7] Ladd Charles Chusing, Whittle Andrew John y Legaspi Dante, Stress-Deformation behaviour of an embankment on Boston Blue Clay, *Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments*, ASCE Geotechnical Special Publication, 1994, 40(2), pp: 1730-1759.
- [8] Roscoe Kenneth Harry y Burland John Boscawen, On the generalised stress-strain behavior of 'wet' clay, *Engineering Plasticity*, Cambridge, 1968, pp:535-609.
- [9] Whittle Andrew John y Kavvadas Michael, Formulation of MIT-E3 Constitutive Model for Overconsolidated Clays, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120(1), pp:173-198.
- [10] Kavazanjian Edward Jr., Borja Ronaldo y Jong H-L, Time-dependent deformations in clay soils, *Proc. 11th Intl. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, San Francisco, 1985, 2, pp: 535-538.
- [11] Yuan Yixing, A new elasto-viscoplastic model for rate-dependent behaviour of clays, Ph.D. thesis, Dept. of Civil and Environmental Eng., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 2016.
- [12] Casagrande Arthur, The determination of the pre-consolidation load and its practical significance, *Proc. 1st Intl. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, Cambridge, Massachusetts, 1936, 3, pp: 60-64.
- [13] Becker Dennis, Crooks J.H.A., Been Ken y Jefferies Mike, Work as a criterion for determining in situ and yield stresses in clays, *Canadian Geotech J.*, 1987, 24(4), pp: 549-564.
- [14] Haley & Aldrich, Inc, Special laboratory and in situ testing program for Central Artery (I-93)/Tunnel (I-90) project, Boston, *Final report submitted to Massachusetts Highway Department*, 1993.
- [15] Baligh Mohsen Mohamed y Levadoux Jacques-Noel, Consolidation after undrained piezocone penetration, II. Interpretation, *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 1986, 112(7), pp: 727-745.
- [16] Whittle Andrew John, Sutabutr Twarath, Germaine John y Varney Amy, Prediction and interpretation of pore pressure dissipation for a tapered piezoprobe. *Geotechnique*, 2001, 51(7), pp: 601-617.
- [17] Sottile Mauro Giuliano, Implementation and evaluation of a recently developed rate-dependent effective stress soil model 'MIT-SR', M.Sc. thesis, Dept. of Civil and Environmental Eng., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 2016.
- [18] Borja Ronaldo, Hsieh H.S. y Kavazanjian Edward Jr, Double-yield-surface model implementation and verification, *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 1990, 116(9), pp: 1402-1421.