

# La aplicación de métodos observacionales para el análisis de asientos y parámetros de consolidación de las marismas costeras de Huelva

## *The application of observational methods for settlement and consolidation analysis of the coastal marshes of Huelva*

Juan Nicolás Zabrodiec García<sup>1\*</sup>

### Palabras clave

asientos;  
consolidación;  
métodos observacionales;  
método de Asaoka;  
método hiperbólico;

### Resumen

Los métodos observacionales se han convertido en una herramienta muy importante para resolver casos complejos en la práctica profesional de la ingeniería geotécnica. Una de las aplicaciones más frecuentes de estos métodos es en la predicción de asientos y obtención de parámetros de suelos blandos sujetos a procesos de consolidación.

Este artículo presenta la metodología de aplicación de los métodos observacionales para analizar asientos y parámetros de consolidación. Se han analizado datos presentados de la obra del Paseo Marítimo de Huelva, construida en una zona de marismas costeras caracterizadas por su complejidad geotécnica. Para analizar este caso se han utilizado los métodos observacionales de Asaoka e hiperbólico.

### Keywords

settlement;  
consolidation;  
observational methods;  
Asaoka's method;  
hyperbolic method;

### Abstract

*The observational methods have become an important tool to solve complex cases in geotechnical engineering professional practice. One of the most frequent applications of these methods is when predicting consolidation settlements on soft soils.*

*This article presents the application methodology of observational methods to analyze settlement and consolidation parameters. As a practical case, data from the Paseo Marítimo de Huelva project was analyzed. This project was built in a complex geotechnical environment, characterized by the presence of coastal marshes. To analyze the case presented, the Asaoka and hyperbolic methods were used.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Un problema muy común en el campo de la geotecnia es la estimación de asientos en obras que se ejecutan sobre suelos susceptibles a procesos de consolidación. La estimación de las magnitudes de asientos y el tiempo en que estos tardarán en producirse está ligada a la determinación de parámetros, los cuales son difíciles de determinar de manera representativa en una obra.

Esta situación se presenta en la costa de la ciudad de Huelva, caracterizada por la presencia de marismas costeras. Estos suelos están formados por depósitos de granulometrías muy finas, con presencia de materia orgánica e intercalaciones arenosas. Los mismos fueron originados por la sedimentación de partículas finas o por floculación de la materia en suspensión, dando lugar a terrenos fangosos. En consecuencia, se encuentra gran cantidad de sedimentos en pleno proceso de consolidación, dando lugar a la presencia de suelos arcillosos y limosos muy blandos de espesores importantes. La complejidad geotécnica que estos presentan dificulta la estimación teórica de asientos por métodos clásicos, mediante modelos del terreno basados en ensayos de laboratorio. Ante

esta problemática, el empleo de métodos observacionales surge como una alternativa válida para analizar procesos de consolidación de manera más precisa.

## 2. LOS MÉTODOS OBSERVACIONALES EN LA GEOTECNIA

En 1969, el ingeniero norteamericano Ralph Peck, discípulo y colaborador de Terzaghi, presentó en la afamada Rankine Lecture en Londres el ensayo llamado "Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics". En esta presentación hizo referencia a muchas experiencias de Terzaghi e introdujo formalmente la utilización de los métodos observacionales en la geotecnia.

Los métodos observacionales en la ingeniería geotécnica se basan en hacer un seguimiento continuo a la ejecución de una obra, con el fin de que el diseño original pueda ir modificándose según exista necesidad o para lograr mayor economía, siempre considerando la seguridad ante todo.

Se han desarrollado a lo largo de los años numerosos métodos observacionales para identificar parámetros y predecir el comportamiento del suelo. Una de las aplicaciones más utilizadas de estos métodos en el campo de la geotecnia es para la predicción de asientos y el análisis de parámetros de consolidación. Entre estos métodos observacionales, posiblemente los

\* Autor de contacto: [jnzabrog@hotmail.com](mailto:jnzabrog@hotmail.com)

<sup>1</sup> Consultora Geotécnica Carlos Bellasai, Asunción, Paraguay.

más difundidos, tanto en el ámbito académico como profesional, son el método de Asaoka y el método hiperbólico.

### 2.1. El Método de Asaoka

En el año 1978, se publicó el artículo “Observational Procedure of Settlement Prediction”, de Akira Asaoka. En el mismo, el profesor Asaoka plantea dos métodos para predecir asientos basados en observaciones de campo. El primer método, conocido como método gráfico, se basa establecer correlaciones y ecuaciones a partir de gráficos formulados con instrumentación de asientos en el campo. El segundo método, que tiene como fundamento la aplicación de la estadística, está basado en la inferencia bayesiana de un proceso no estacionario estocástico, el cual puede determinar una distribución probabilística del asiento a producirse.

Por su simplicidad y relativa precisión, el método gráfico ha tenido una gran difusión en el mundo de la geotecnia. Resumido de una manera sencilla, el método consiste en interpretar y utilizar los datos de asientos de campo medidos después de que la carga ha sido aplicada. De manera analítica, el método se basa en el hecho que asientos por consolidación unidimensional ( $S_0, S_1, S_2, \dots, S_i$ ) medidos a intervalos de tiempo  $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, i\Delta t$ , pueden ser expresados por una aproximación de primer orden tal que:

$$S_n = \beta_0 + \beta_1 S_{n-1} \quad [1]$$

Esta ecuación representa una línea recta en un gráfico de  $S_{n-1}$  vs  $S_n$ , donde  $\beta_0$  es la intersección con el eje-y y  $\beta_1$  es la pendiente de la recta. Una vez que el asiento primario final ha sido alcanzado,  $S_n$  tiende a ser igual a  $S_{n-1}$ , que a su vez es igual a  $S_{ult}$ . Entonces, se puede estimar  $S_{ult}$  mediante la siguiente ecuación:

$$S_{ult} = \frac{\beta_0}{1 - \beta_1} \quad [2]$$

La justificación teórica de este método parte de la siguiente expresión para una función  $s(t)$ , dada por:

$$s(t) = a(1 - be^{-ct}) \quad [3]$$

Donde los valores de  $a, b$  y  $c$  son constantes, y  $c$  es mayor a 0. Entonces, los valores de  $s(t)$  para intervalos iguales de  $\Delta t$  pueden ser caracterizados por la ecuación 4, donde:

$$\beta_1 = e^{-ct} \quad [4]$$

Si se observa la solución de la teoría de la consolidación unidimensional de Terzaghi, para valores de  $T_v$  superiores a 0,20, la magnitud de asientos puede ser determinada por la ecuación:

$$s(t) = S_{ult} \left(1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 c_v t}{4H^2}}\right) \quad [5]$$

Entonces, se puede decir que  $\beta_1$  es equivalente a la siguiente expresión:

$$\beta_1 = e^{-\frac{\pi^2 c_v t}{4H^2}} \quad [6]$$

Volviendo a la aplicación práctica de este método, los pasos para la utilización del método de Asaoka son los siguientes:

1. Dibujar la curva de Asientos (S) vs. Tiempo (t).
2. Dividir la curva en segmentos de intervalos de tiempo  $\Delta t$  igualmente espaciados.
3. Determinar las magnitudes de los asientos  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_i$ , para los respectivos  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_i$ .
4. Dibujar una curva  $S_n$  vs.  $S_{n-1}$ , con los valores determinados en el paso anterior.
5. Ajustar una recta a través de los puntos graficados en el paso anterior. Determinar el valor de la pendiente  $\beta_1$  de la recta y  $\beta_0$  de la intersección con el eje de ordenadas.
6. Trazar una recta a 45°, tal que  $S_n = S_{n-1}$ . El punto donde se intersectan las rectas determina el valor del asiento máximo  $S_{ult}$ .

Este método también tiene aplicación para el caso en que se ejecute una construcción por etapas. La figura 1 ilustra una curva típica resultante de un proceso de dos etapas de carga. En la misma se observa que pueden hallar valores de  $\beta_0$  y  $\beta_1$

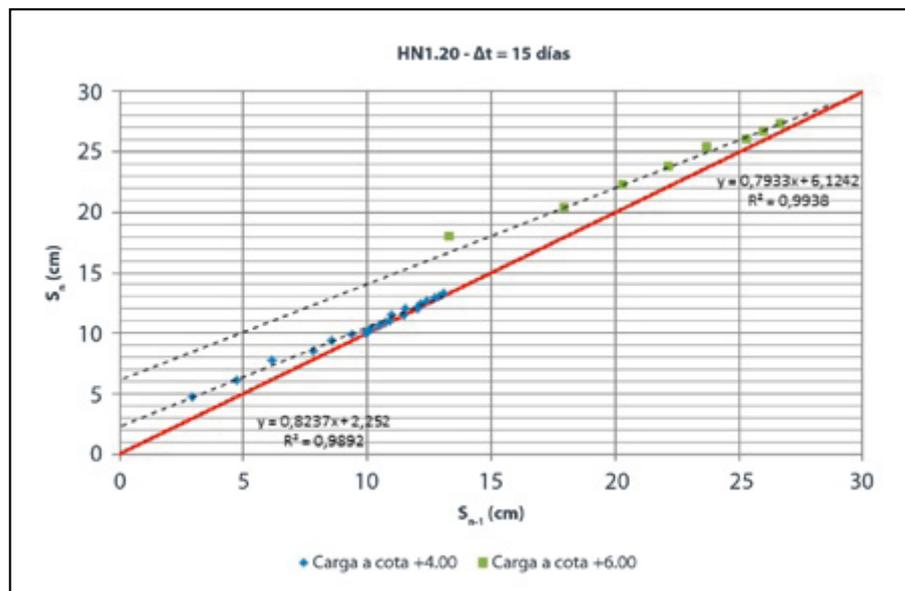


Figura 1. Aplicación del método de Asaoka – Caso con dos etapas de carga.

para cada etapa de carga, si se quiere estudiar el comportamiento del suelo en cada etapa por separado. Las rectas de generadas para cada escalón de carga tienden a ser paralelas.

La utilización de este método requiere conocimiento y cierto tipo de experiencia para reconocer los comportamientos esperados en suelos reales, los cuales difieren de las curvas teóricas y de los resultados de ensayos hechos en laboratorio.

Es importante mencionar que para obtener resultados precisos utilizando este método, se necesita analizar datos de asientos correspondientes a una etapa de más del 60% de la consolidación. Tan y Chew (1996) demostraron que los resultados obtenidos utilizando datos iniciales de la consolidación, por ejemplo en el periodo de 0 a 30%, puede dar estimaciones muy bajas de  $S_{ult}$  y posiblemente sobreestimar el  $c_v$ .

Extendiendo la aplicación de este método, Magnan y Deroj (1980) también estudiaron casos en los que se instalaron drenes verticales en el campo y propusieron ecuaciones para estimar el coeficiente de consolidación vertical ( $c_v$ ) y horizontal ( $c_h$ ).

### 2.2. El Método Hiperbólico

Otro método observacional para predecir asientos en suelos, conocido como método hiperbólico, fue desarrollado por Thiam-Soom Tan, Toshiyuki Inoue y Seng-Lip Lee en 1991 y más tarde expandido por Siew-Ann Tan entre los años 1995 y 1996. De manera similar, el método propuesto por Tan se basa en estimar los asientos por consolidación primaria en una curva hiperbólica de tiempo/asientos vs tiempo graficada utilizando los registros de asientos de campo.

Como base, se utiliza la teoría de consolidación de Terzaghi. Esta teoría provee una relación única el grado medio de consolidación ( $U_v$ ) y el factor tiempo ( $T_v$ ). Si se grafica una curva  $T_v/U_v$  vs  $T_v$  con valores teóricos para un caso específico (condiciones de drenaje y coeficiente de consolidación vertical dados), se tendría una curva similar a la mostrada en la figura 2.

Se puede observar que la curva inicialmente es cóncava, y se vuelve prácticamente lineal entre valores de  $T_v$  de 0,250 y 0,848, los cuales corresponden a valores de consolidación grados de consolidación  $U_{60}$  y  $U_{90}$ . Una segunda porción lineal de la curva existe para valores de  $T_v$  mayores que 1,0, en donde se aproxima a una pendiente de 1,0. Considerando esta relación, la primera porción lineal de la curva puede ser representada mediante la ecuación:

$$\frac{T_v}{U} = \alpha T_v + \beta \quad [7]$$

Donde  $\alpha$  es la pendiente de la recta y  $\beta$  es la intersección de la recta con el eje de valores  $T_v/U_v$ .

La pendiente  $\alpha$  del primer segmento lineal de la curva teórica puede ser determinado con una regresión. Este valor  $\alpha_1$  es de 0,821, un valor único aplicable solo cuando se utiliza la teoría de Terzaghi.

Cuando se monitorean asientos en obra, se registran curvas de asiento ( $\delta$ ) vs tiempo ( $t$ ). Si es que se grafican estos registros en la forma de  $t/\delta$  vs  $t$ , se observan características similares a la curva teórica  $T_v/U_v$  vs  $T_v$  de Terzaghi. Se puede observar un segmento cóncavo inicial, seguido de una recta entre valores de 60% y 90% de consolidación. La figura 3 presenta una curva típica  $t/\delta$  vs  $t$ .

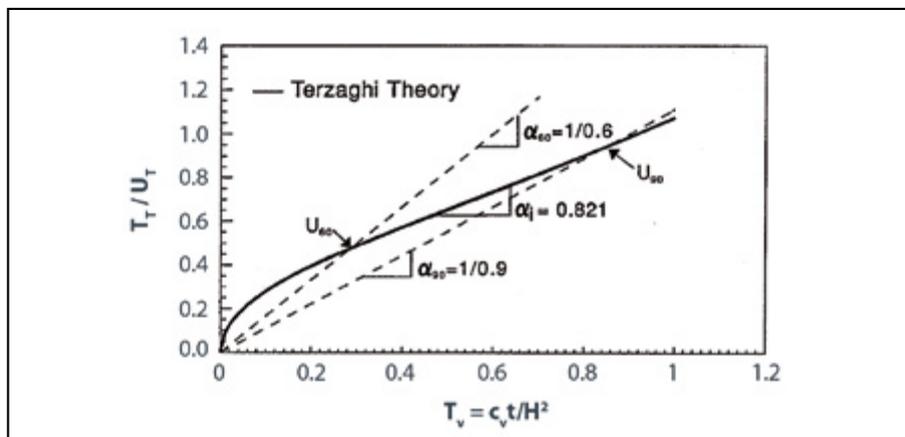


Figura 2. Curva hiperbólica de Terzaghi (Tan & Chew, 1996).

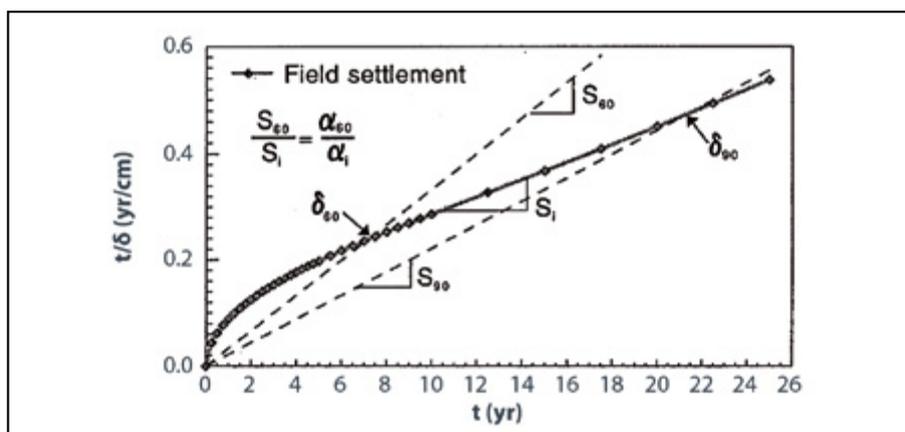


Figura 3. Curva típica para  $t/\delta$  vs  $t$  (Tan & Chew, 1996).

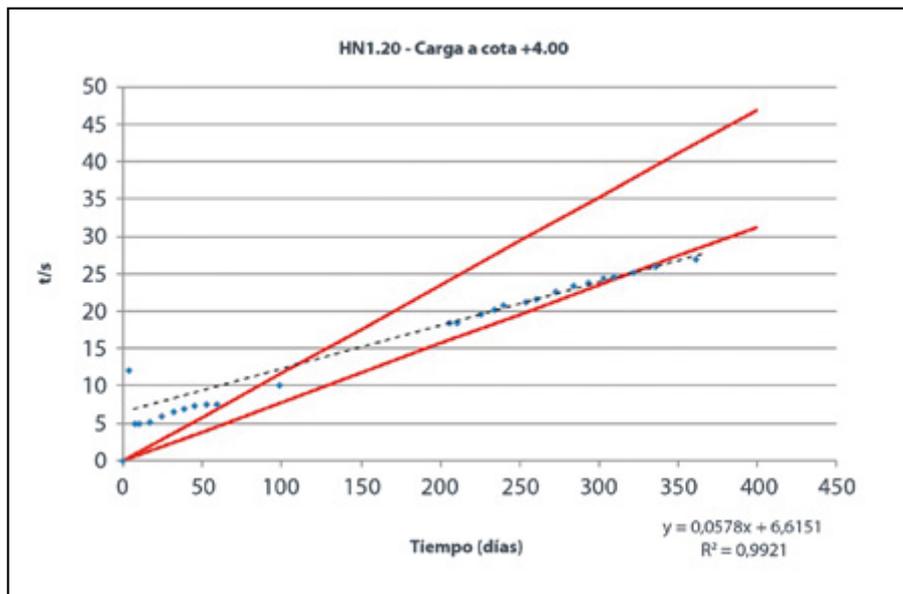


Figura 4. Aplicación del método hiperbólico.

En este caso, las variables  $S$  representan las pendientes de las rectas mostradas en la figura. Entonces, se pueden hallar los valores de  $S_{60}$  y  $S_{90}$  mediante las siguientes ecuaciones:

$$S_{60} = S_i \frac{\alpha_{60}}{\alpha_i} = (1/0,60) \frac{S_i}{\alpha_i} \quad [8]$$

$$S_{90} = S_i \frac{\alpha_{90}}{\alpha_i} = (1/0,90) \frac{S_i}{\alpha_i} \quad [9]$$

Donde  $S_i$  es la pendiente del segmento lineal inicial de la curva de  $t/\delta$  vs  $t$ , y  $\alpha_i$  es la pendiente de la curva teórica de  $T_v/U_v$  vs.  $T_v$  de Terzaghi.

Conociendo los valores de las pendientes citadas anteriormente, se pueden predecir los valores de asiento  $\delta_{60}$  y  $\delta_{90}$ , así como el valor de asiento máximo  $\delta_{ult}$  mediante las siguientes ecuaciones:

$$\frac{t}{\delta_{60}} = \frac{1}{0,60} \frac{S_i}{\alpha_i} t \quad [10]$$

$$\frac{t}{\delta_{90}} = \frac{1}{0,90} \frac{S_i}{\alpha_i} t \quad [11]$$

$$\delta_{ult} = \frac{\alpha_i}{S_i} \quad [12]$$

Entonces, se puede predecir el valor del asiento máximo mediante cualquiera de las siguientes tres relaciones:

$$\delta_{ult} = \frac{\alpha_i}{S_i} = \frac{\delta_{60}}{0,60} = \frac{\delta_{90}}{0,90} \quad [13]$$

Extendiendo la aplicación de este método, Tan aplicó la teoría de consolidación radial de Barron y el teorema de Carrillo para flujo combinado para generar relaciones que pueden ser aplicadas cuando se utilizan drenes verticales.

Con los conceptos presentados anteriormente se puede resumir de manera sencilla los pasos para la utilización del método hiperbólico. Para utilizar el método hiperbólico en

caso en que no se utilicen drenes verticales, los pasos son los siguientes:

1. Dibujar la curva hiperbólica  $t/\delta$  vs  $t$ , con los registros de asientos de campo.
2. En la curva  $t/\delta$  vs  $t$ , identificar el primer segmento lineal y hallar su pendiente ( $S_i$ ).
3. Se pueden hallar las pendientes  $S_{60}$  y  $S_{90}$  utilizando las ecuaciones 7 y 8.
4. Se puede hallar el valor del asiento final  $\delta_{ult}$ , utilizando la ecuación 12.
5. Se pueden hallar los valores de  $\delta_{60}$  y  $\delta_{90}$  utilizando las ecuaciones 9 y 10 en caso que fuese necesario

Para hallar el valor del coeficiente de consolidación vertical ( $c_v$ ), se puede recurrir directamente a la definición del factor tiempo, propuesta por Terzaghi, una vez hallado el valor  $U\%$  de grado medio de consolidación y su respectivo  $T_v$ .

Así como ocurre en el método de Asaoka, la utilización de este método también está recomendada a partir de grados de consolidación del 60%, y también puede aplicarse en casos de cargas por etapas.

Finalmente, vale la pena mencionar que existen formulaciones para casos en los que se utilicen drenes verticales. Una limitación en el empleo del método hiperbólico para casos con mechas drenantes es la determinación de la relación  $c_h/c_v$ , la cual muchas veces es desconocida con exactitud y puede inducir a errores en el cálculo.

### 3. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS OBSERVACIONALES: EL PASEO MARÍTIMO DE HUELVA

#### 3.1. Descripción de la obra

La Autoridad Portuaria de la ciudad de Huelva decidió ejecutar un Paseo Marítimo en la margen izquierda de la ría del Odiel, entre el Muelle de Río Tinto y el Muelle de Pertrechos. La obra se trata de un paseo marítimo de unos 1000 m de longitud en una franja de 80 m ganados a la ría.

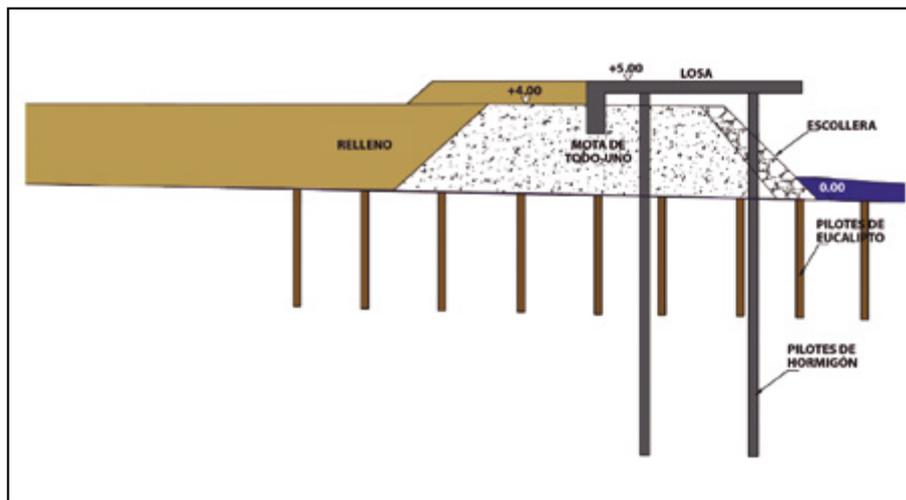


Figura 5. Sección tipo de la obra.

Debido a las características geotécnicas de la zona, se optó por una solución estructural que consiste en construir el Paseo Marítimo sobre una losa pilotada. Previo a la ejecución de los pilotes y la losa, se realizó la construcción de una mota de todo-uno, y en el trasdós de la mota se ejecutó un relleno hidráulico (cargado por etapas) con material procedente del dragado de la ría. Además, se realizó una hinca de pilotes de madera de eucalipto de 5m de longitud en la zona donde se ejecutó la mota, antes de la ejecución de la misma.

### 3.2. Caracterización geotécnica

A efectos constructivos, la obra se dividió en dos partes: zona Sur y zona Norte. Cada una de las zonas cuenta con aproximadamente 500 metros de longitud. A fin de simplificar el análisis realizado, se decidió también dividir los datos estudiados en dos grupos, correspondientes a la zona Sur y a la zona Norte. En función a distintos informes geotécnicos y campañas de investigación realizadas, el perfil estratigráfico contempla la presencia de los siguientes niveles:

- Nivel I: Depósitos areno-limo-arcillosos (SM-SC-CL), blandos o muy poco compactos.
- Nivel II: Arcilla gris (CL-CH): material de plasticidad media-alta. Se ha encontrado un estrato relativamente homogéneo.

- Nivel III: Arenas con gravas: nivel inferior encontrado, formado por depósitos de arena compacta con abundantes gravas.

En las campañas de investigación realizadas, se pudo apreciar que en la zona Norte el nivel inicial de depósitos areno-limo-arcillosos se encuentra un tanto indefinido, razón por la cual se asumió que el nivel de arcillas grises (Nivel II) aparece desde la superficie.

### 3.3. Datos analizados

Desde el inicio de la obra, el terraplén se instrumentó debidamente, con placas de asiento, líneas continuas, piezómetros, inclinómetros y lecturas de hitos de nivelación.

En ambas zonas (Sur y Norte) se determinaron tres secciones de control, en las que se realizaron lecturas periódicas de la instrumentación colocada. Para el análisis efectuado en este trabajo se consideraron solamente los registros de asientos obtenidos de las lecturas de los hitos de nivelación.

Para la zona Sur, se analizaron los datos correspondientes al periodo desde 19/05/2009 hasta el 20/10/2010, totalizando así 519 días. En cada una de las secciones de control establecidas (Secciones 1, 2 y 3) se instalaron cinco hitos de nivelación y se registraron movimientos a intervalos periódicos. Dos hitos se encontraban sobre la

Tabla 1. Parámetros geotécnicos adoptados para el análisis de la zona Sur

Nivel	Espesor (m)	Módulo edométrico ( $E_m$ - kg/cm <sup>2</sup> )	$e_0$	$c_c$	Coefficiente de consolidación ( $c_v$ - cm <sup>2</sup> /s)
Limos arenosos	1,50	40	0,90	0,12	ND
Limos arcillosos / Arcillas limosas	5,50	15	1,25	0,45	0,05 cm <sup>2</sup> /s
Arcillas grises	13,00	30	1,20	0,60	0,001 cm <sup>2</sup> /s
Arenas y gravas	Indefinido	No compresible	No determinado	No determinado	No determinado

Tabla 2. Parámetros geotécnicos adoptados para el análisis de la zona Norte

Nivel	Espesor (m)	Módulo edométrico ( $E_m$ - kg/cm <sup>2</sup> )	$e_0$	$c_c$	Coefficiente de consolidación ( $c_v$ - cm <sup>2</sup> /s)
Arcillas grises	22,00	30	1,20	0,60	0,001 cm <sup>2</sup> /s
Arenas y gravas	Indefinido	No compresible	No determinado	No determinado	No determinado

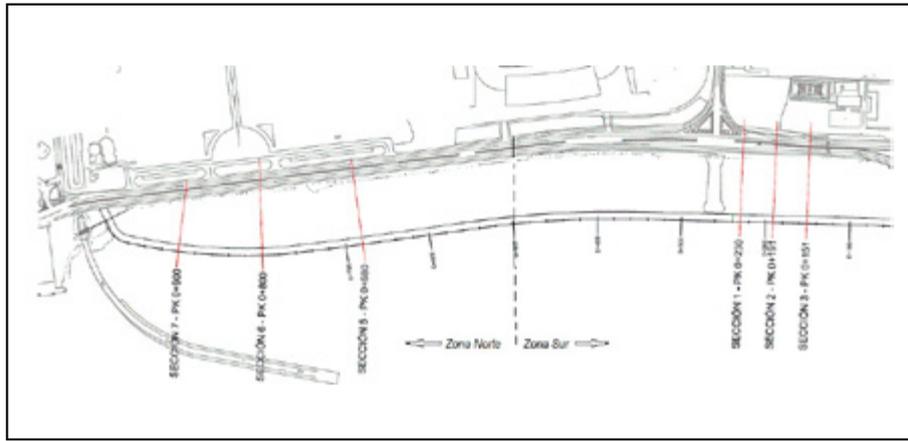


Figura 6. Vista de la obra con secciones de control.

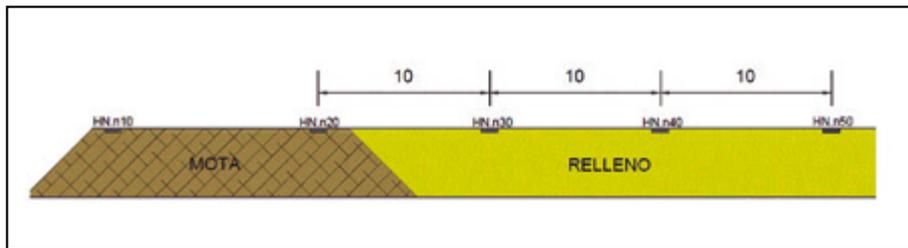


Figura 7. Ubicación de hitos de nivelación en una sección de control tipo.

mota construida y otros tres en la zona del relleno, a distancias de 10, 20 y 30 m de la mota. Se consideró un distancia drenante ( $H_d$ ) de 6,50 m, teniendo en cuenta los 13,00 m de espesor de la capa de arcillas grises mencionada en la tabla 1.

Para la zona Norte, se analizaron los datos correspondientes al periodo desde 20/12/2010 hasta el 23/02/2012, totalizando así 352 días. De manera similar a lo planteado en la zona Sur, se establecieron tres secciones de control (Secciones 5, 6 y 7), cada una con lecturas de cinco hitos de nivelación. En este caso se consideró un distancia drenante ( $H_d$ ) de 11m, de acuerdo al modelo de perfil estratigráfico de la tabla 2.

De esta manera, se analizaron registros de asientos de 30 distintos hitos de nivelación en las ambas zonas estudiadas (15 en la zona Sur y 15 en la zona Norte).

#### 4. RESULTADOS OBTENIDOS

##### 4.1. Zona sur

Para realizar el análisis de la zona Sur, se ha considerado primeramente que los hitos de nivelación ubicados sobre la mota de todo uno (correspondientes a HNN.50 y HNN.40, para la diferentes secciones) fueron sometidos sólo a un proceso de carga (de cota 0.00 a +4.00). La zona donde estaban ubicados los HNN.30, HNN.20 y HNN.10 fue sometida a dos etapas de carga, correspondientes a la carga del relleno. La carga fue primeramente realizada de cota 0.00 a +4.00, y posteriormente de +4.00 a +6.00.

Como fue citado anteriormente, el periodo de registros utilizados para el análisis de esta zona fue de 519 días. De

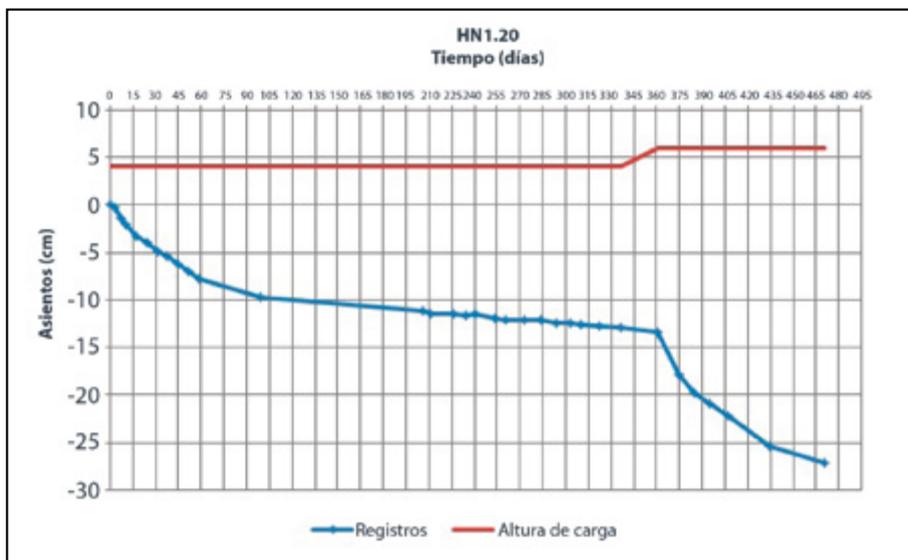


Figura 8. Registro de asientos – HN1.20.

**Tabla 3.** Resultados obtenidos – Zona Sur

		Sección 1	HN1.50	HN1.40	HN1.30	HN1.20	HN1.10
ASAOKA	$S_{ult}$ (cm)		26,7	32,8	37,8	29,6	21,3
	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)		0,016	0,015	0,029	0,028	0,035
HIPERBOLICO	$S_{ult}$ (cm)		27,7	31,3	43,3	31,5	24,2
	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)		0,019	0,010	0,017	0,021	0,025
		Sección 2	HN2.50	HN2.40	HN2.30	HN2.20	HN2.10
ASAOKA	$S_{ult}$ (cm)		28,8	34,8	36,9	32,2	25,4
	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)		0,017	0,015	0,025	0,026	0,025
HIPERBOLICO	$S_{ult}$ (cm)		29,5	33,8	44,4	36,3	26,6
	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)		0,017	0,015	0,014	0,017	0,026
		Sección 3	HN3.50	HN3.40	HN3.30	HN3.20	HN3.10
ASAOKA	$S_{ult}$ (cm)		34,9	40,5	ND	30,4	27,9
	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)		0,017	0,015	ND	0,022	0,027
HIPERBOLICO	$S_{ult}$ (cm)		36,7	41,3	ND	38,3	33,2
	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)		0,012	0,019	ND	0,009	0,012

(\*) Los valores calculados con el método de Asaoka corresponden a  $\Delta t = 15$  días.

(\*\*) Los valores indicados como "ND" corresponden a registros que no pudieron ser analizados por presentar irregularidades.

ese total, 409 días corresponden a registros tomados durante el periodo en que la carga del relleno se encontraba a cota +4.00, y 110 días corresponden a registros tomados durante el periodo de carga a cota +6.00.

#### 4.2. Zona norte

Para el análisis de la zona norte, se tomaron consideraciones similares a la del análisis de la zona Sur. Los HNN.50 y HNN.40 fueron sometidos a sólo un proceso de carga, y los HNN.30, HNN.20 y HNN.10 fueron sometidos a dos etapas de carga. Como fue citado anteriormente, el periodo de registros utilizados para el análisis de esta zona fue de 352 días. De ese total, 42 días corresponden a registros tomados durante el periodo en que la carga del relleno se encontraba a cota +4.00, y 310 días corresponden a registros tomados durante el periodo de carga a cota +6.00m.

**Tabla 4.** Resultados obtenidos – Zona Norte

		Sección 5	HN5.50	HN5.40	HN5.30	HN5.20	HN5.10
ASAOKA	$S_{ult}$ (cm)		30,9	37,6	46,1	46,1	37,1
	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)		0,028	0,031	0,034	0,024	0,033
HIPERBOLICO	$S_{ult}$ (cm)		39,1	38,3	46,6	43,4	37,5
	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)		0,014	0,020	0,034	0,034	0,034
		Sección 6	HN6.50	HN6.40	HN6.30	HN6.20	HN6.10
ASAOKA	$S_{ult}$ (cm)		46,1	54,1	63,6	52,9	32,9
	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)		0,017	0,017	0,028	0,024	0,028
HIPERBOLICO	$S_{ult}$ (cm)		57,8	66,2	64,0	49,4	34,7
	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)		0,008	0,009	0,032	0,036	0,03
		Sección 7	HN7.50	HN7.40	HN7.30	HN7.20	HN7.10
ASAOKA	$S_{ult}$ (cm)		ND	ND	ND	49,5	40,0
	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)		ND	ND	ND	0,027	0,020
HIPERBOLICO	$S_{ult}$ (cm)		ND	ND	ND	51,6	38,6
	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)		ND	ND	ND	0,023	0,022

(\*) Los valores calculados con el método de Asaoka corresponden a  $\Delta t = 15$  días.

(\*\*) Los valores indicados como "ND" corresponden a registros que no pudieron ser analizados por presentar irregularidades.

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

### 5.1. Asientos

Para realizar una comparación significativa de las predicciones de asiento calculadas se decidió promediar los resultados obtenidos en las diferentes líneas de estudio (n.50, n.40, n.30, n.20, n.10) para las diferentes secciones de control adoptadas. Se ha realizado este procedimiento tanto en la zona Sur como en la zona Norte. En el análisis, también se decidió incluir un rango de valores representativos obtenidos utilizando predicciones mediante el método edométrico.

#### 5.1.1. Zona sur

Se observa claramente una dispersión mayor de resultados obtenidos para la zona de HN1.30, HN1.20 y HN1.10,

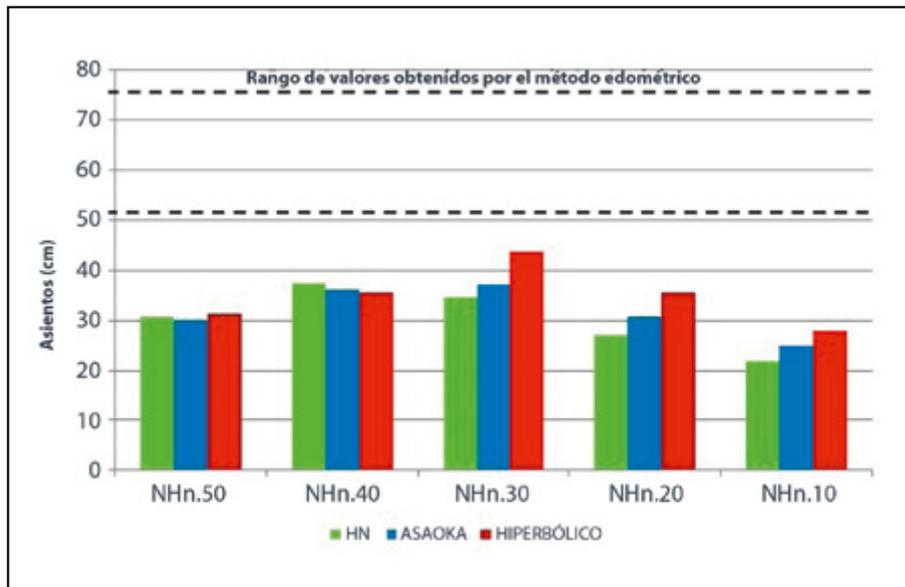


Figura 9. Comparación de asientos – Zona Sur.

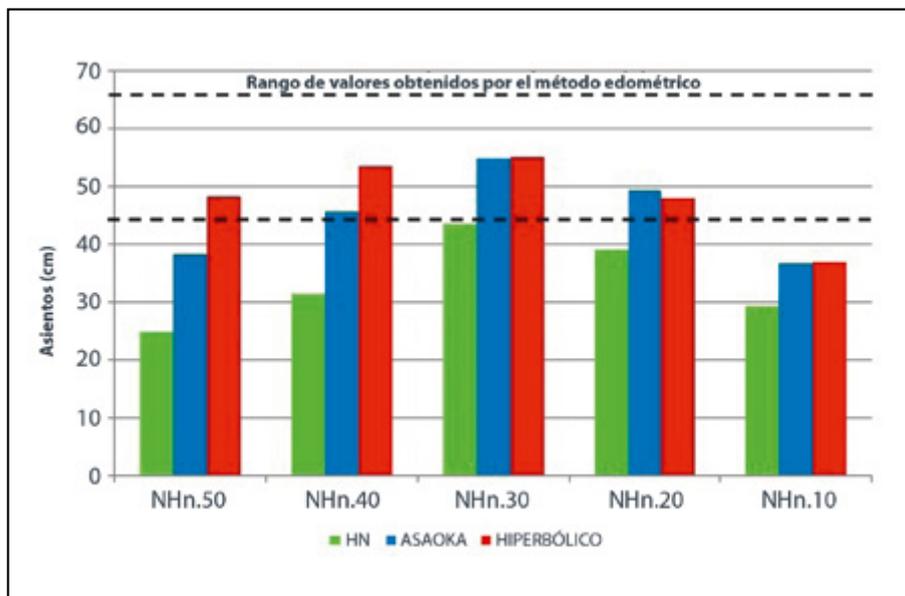


Figura 10. Comparación de asientos – Zona Norte.

los cuales corresponden a la zona cargada en dos etapas. Esto se puede explicar observando los datos utilizados para el análisis de esa zona. Como había sido mencionado, se utilizaron sólo datos de un periodo de 110 días para realizar el análisis correspondiente a la carga a cota +6.00. Mirando las curvas asientos vs tiempo, se observa que este periodo de análisis es muy corto, y que en muchos casos los asientos todavía están en un periodo de pleno crecimiento, sin tendencia a estabilizarse. Por esta razón, se dificulta la interpretación de los datos analizados, y las curvas de ajuste pueden resultar bastante imprecisas.

Se observa inclusive que los métodos observacionales en algunos casos predicen valores por debajo de los valores de los registros de los hitos de nivelación. Esto podría deberse a que la zona está siendo influenciada por la carga adyacente a una cota superior en la zona de relleno. Se podría también pensar que ya está iniciando el proceso de consolidación secundaria, pero al graficar las curvas de asiento en función al logaritmo del tiempo se demuestra lo contrario.

### 5.1.2. Zona norte

A diferencia de lo observado en la zona Sur, donde los asientos en la líneas n.50 y n.40 tenían una tendencia a estabilizarse, en esta zona de estudio los mismos están en pleno aumento. Se observa que los valores obtenidos por los métodos observacionales entran en el rango de valores obtenidos por el método edométrico.

## 6. COEFICIENTES DE CONSOLIDACIÓN VERTICAL

### 6.1. Zona sur

De manera interesante, se puede observar que los coeficientes de consolidación se encuentran en un rango intermedio a los valores establecidos teóricamente. Si bien los análisis realizados con los métodos observacionales teóricamente sólo analizan el estrato de arcilla que se está consolidando, la interpretación del mismo se ve claramente afectado por las capas superiores o intercalaciones que

puede haber en el mismo. Es interesante agregar también que los valores calculados por el método de Asaoka son generalmente superiores a los calculados por el método hiperbólico.

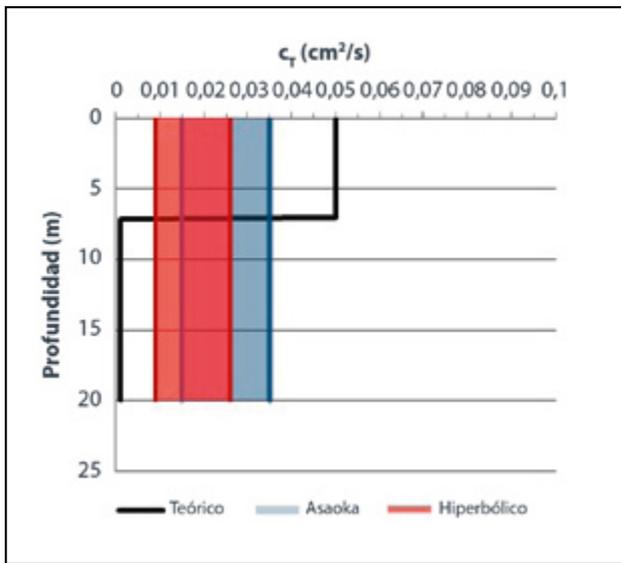


Figura 11. Coeficientes de consolidación vertical – Zona Sur.

## 6.2. Zona norte

Los valores conseguidos en la zona Norte presentan de manera general las mismas tendencias que los indicados para la zona Sur, si bien en este caso el método hiperbólico presenta un rango de valores mayor. Con respecto a la comparación con el valor teórico, esta diferencia se podría justificar diciendo que la estratificación de esta zona de obra realmente se asemeja más a propuesta para la zona Sur, en la que se considera la presencia de materiales con coeficientes de consolidación más altos en los estratos superiores.

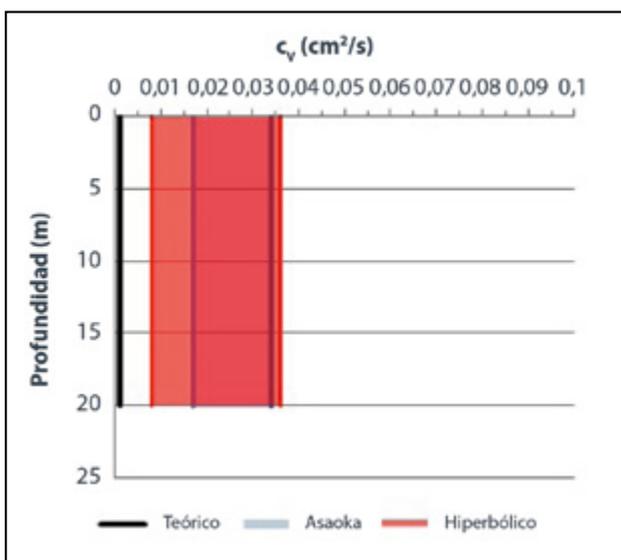


Figura 12. Coeficientes de consolidación vertical – Zona Norte.

## 7. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

En este trabajo se han analizado datos de 30 diferentes registros de asentamientos, por dos métodos diferentes, totalizando así 60 casos estudiados de manera independiente.

A continuación se presentan ciertos comentarios que valen la pena resaltar tras la experiencia adquirida utilizando los métodos de Asaoka e hiperbólico:

- La aplicación de ambos métodos requiere delicada atención para interpretar los datos que se analizan. No es simplemente un proceso de graficar puntos y trazar una curva de ajuste.
- Ambos métodos fueron teóricamente concebidos para analizar casos de estratos relativamente homogéneos de suelo, utilizando ensayos de laboratorio para comprobar los mismos. La situación en obra es bastante diferente a la del laboratorio. Los registros de asentamientos vs. tiempo pueden diferir bastante de los teóricos, complicando así su interpretación.
- En casos de aparente heterogeneidad en el terreno, se debe realizar consideraciones particulares, intentando estudiar los resultados obtenidos a modo general y no analizando una sola capa de suelo en particular.
- El método de Asaoka permite su aplicación directa en casos de carga por etapas, analizando todos los datos disponibles en un solo gráfico.
- El método hiperbólico presenta mayores dificultades al analizar casos de carga por etapas. Para su correcta utilización, se necesita analizar los datos de cada etapa de carga por separado y posteriormente relacionar los datos obtenidos para ambas etapas de carga.
- La aplicación del método de Asaoka requiere utilizar datos a intervalos iguales de tiempo, en cambio el método hiperbólico no. Posiblemente utilizar también el método hiperbólico con datos de intervalos iguales de tiempo ayudaría a una interpretación más fácil de los mismos.
- Está comprobado que con ambos métodos se obtienen buenos resultados analizando datos posteriores al 60% de la consolidación. En los casos analizados en los que aparentemente todavía no se habían llegado a etapas avanzadas de la consolidación, el empleo del método hiperbólico fue muy complicado ya que la identificación de los puntos para trazar la curva de ajuste es muy difícil.
- En los casos analizados, existe una tendencia de estimar asentamientos mayores con el método hiperbólico.
- En relación a los coeficientes de consolidación, existe una tendencia de estimar valores mayores con el método de Asaoka.
- Sin lugar a dudas, el amplio análisis realizado ha demostrado satisfactoriamente que estos métodos tienen mucha utilidad y con su correcta utilización, pueden convertirse en herramientas importantes para los ingenieros geotécnicos.

## 8. AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer especialmente al Prof. Enrique Asanza por facilitarme la información para desarrollar este trabajo, por guiarme y ayudarme en el desarrollo de este artículo, que forma parte de mi tesina desarrollada para finalizar el Master de Mecánica de Suelos organizado por el CEDEX en el año 2014. También quisiera agradecer al Prof. José Manuel Martínez Santamaría, quien se ha ofrecido gentilmente a orientarme durante las etapas finales de elaboración de este trabajo.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Almeida, M.S.S. y Marques, M.E.S. (2013). *Design and performance of embankments on very soft soils*. London, UK: CRS Press, Taylor & Francis Group.
- Asaoka, A. (1978). Observational procedure of settlement prediction. *Soils and Foundations*, Vol.18, No.4, 67-101.
- CEDEX (2012). *Paseo Marítimo de Huelva. Análisis de la Destabilización de la Mota Norte*. Informe Técnico para Puertos del Estado. Informe Parcial No.4.
- Magnan, J. P. y Deroy J. M. (1980). *Analyse graphique des tassements observés sous les ouvrages*, Bull, Liaison Laboratoire Central des Ponts.et Chaussees, 109, 1980.
- Nicholson, D., Tse, C., y Penny, C. (1999). *The Observational Method in ground engineering – principles and applications*. Report 185, CIRIA, London.
- Peck, R. B. (1969). *Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics*. Géotechnique., Vol 19, No.2, 171-187.
- Sridharan, A., Murthy, N. S. y Prakash, K. (1987). *Rectangular hyperbola method of consolidation analysis*. Geotechnique. Vol 37, No 3, 355-368.
- Tan, S. A. (1995). *Validation of hyperbolic method for settlement in clays with vertical drains*. *Soils and Foundations*, Vol.35, No.1, 101-113.
- Tan, S. A. y Chew, S. H. (1996). *Comparison of the hyperbolic and Asaoka observational method of monitoring consolidation with vertical drains*. *Soils and Foundations*. Vol.36, No.3, 31-42.
- Tan, T. S., Inoue, T. y Lee, S. L. (1991). *Hyperbolic method for consolidation analysis*. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.117, No.11, 1723-1737.