

# Probabilidad aplicada a la estimación de asentamientos por consolidación primaria. Caso de estudio.

Nicolás G. Bolcatto

Torres y Vercelli S.R.L., Rosario, Argentina,

Universidad Nacional de Rosario, Argentina. [nicolasbolcatto@hotmail.com](mailto:nicolasbolcatto@hotmail.com)

**RESUMEN:** El cálculo de asentamientos por consolidación primaria es una práctica usual en la ingeniería geotécnica. Habitualmente la actividad industrial implica la aplicación de sobrecargas sobre grandes superficies, induciendo asentamientos en zonas con presencia de estratos de suelos de consistencia blanda. La estimación de la magnitud de estos asentamientos incluye una serie de incertidumbres relacionadas a la variabilidad natural de las propiedades de los suelos, como así también a la caracterización geotécnica de los mismos. El enfoque clásico con el cual se aborda esta temática en el campo profesional está basado en la teoría de consolidación propuesta originalmente por Terzaghi, y los resultados obtenidos tienen carácter determinista. En este trabajo se busca investigar la influencia de las incertidumbres involucradas en el análisis, mediante un enfoque basado en la teoría de probabilidad. Para ello se analizó el caso real de una playa de acopio en una planta siderúrgica de la Provincia de Santa Fe, en donde está previsto depositar materiales pesados en sectores de amplia superficie. En base a ensayos de identificación y ensayos de consolidación unidimensional sobre muestras inalteradas, se estudió la variabilidad de las propiedades que definen el análisis de asentamientos por consolidación primaria y se pudieron obtener conclusiones sobre la confianza en los resultados obtenidos. Para el análisis de la respuesta frente a la incertidumbre en las variables independientes se utilizaron 2 métodos distintos: la simulación de Montecarlo y el método de las Estimativas Puntuales. La aplicación de estos métodos para el análisis de asentamientos requiere muy poco esfuerzo extra respecto del análisis determinista de rutina, siendo necesario únicamente contar con datos de un número suficiente de ensayos de laboratorio, de manera tal de poder estimar el valor medio, el desvío estándar y el coeficiente de variación de cada uno de ellos. En el caso del método de Montecarlo, se propusieron distribuciones probabilísticas para las variables aleatorias, cuya bondad de ajuste se comprobó mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov. El uso de la teoría de probabilidad, de manera complementaria al cálculo de asentamientos por consolidación primaria, permite cuantificar la variabilidad existente entre los cálculos y el comportamiento real en servicio. Este análisis resulta de suma utilidad a la hora de la toma de decisiones, siendo posible conocer los riesgos y desvíos posibles respecto las previsiones de proyecto.

**PALABRAS CLAVE:** Consolidación, Asentamientos, Probabilidad.

## 1 INTRODUCCIÓN

La incertidumbre en ingeniería geotécnica constituye actualmente una de las áreas de investigación más fuertemente activas, dada la enorme influencia que ejerce sobre los parámetros de diseño en distintos proyectos de obras industriales y civiles. La incertidumbre en

las propiedades geotécnicas tiene como componentes principales (Baecher & Christian, 2005):

1. La variabilidad inherente a los suelos, incluso dentro de masas de suelo aparentemente homogéneas.
2. El número limitado de resultados de ensayos

y mediciones, y los errores de medición o interpretación de los resultados.

3. Los errores en el modelo matemático utilizado para describir los fenómenos estudiados.

Se utilizará la teoría de probabilidad para la estimación de los asentamientos por consolidación primaria producidos en suelos de consistencia media y blanda ( $N < 8$  en el ensayo de penetración standard). El caso de estudio corresponde a una Planta Siderúrgica ubicada en la Provincia de Santa Fe (Argentina), que se encuentra actualmente en construcción y prevé para su funcionamiento el acopio en superficies de gran magnitud de distintos materiales, que transmitirán presiones de variada magnitud a los suelos inferiores. Se considera a los parámetros de compresibilidad de los suelos como variables aleatorias, cuya interacción en las expresiones teóricas de magnitud de asentamiento máximo convierte a este último en una variable aleatoria dependiente. No se incluye en este análisis el tiempo necesario para que se produzca el asentamiento máximo por consolidación primaria.

Se utilizaron dos metodologías diferentes para este objetivo:

- Simulación de Montecarlo
- Método de estimativas puntuales

En el primer caso, es necesario definir las distribuciones probabilísticas de las variables básicas para generar muestras aleatorias de cada una de ellas y simular la respuesta en el cálculo del asentamiento máximo.

En el segundo caso, no es necesario estimar la distribución probabilística de las mismas, ya que la variabilidad en la respuesta se estima solamente en base al primer y segundo momento (media y varianza) de cada variable.

El objetivo es obtener conclusiones sobre los análisis probabilísticos y su influencia en las decisiones de proyecto, al contar con un número limitado de ensayos de laboratorio.

## 2 PERFIL GEOTÉCNICO

Para caracterizar el perfil geotécnico se ejecutaron en distintos sondeos ensayos de penetración standard (SPT), con toma de muestras mediante tomamuestras Terzaghi y tomamuestras de zapatas intercambiables para identificación y clasificación. En ubicaciones específicas, se tomaron muestras inalteradas con tomamuestras de pared delgada (Shelby), para la ejecución de ensayos de consolidación unidimensional mediante la norma ASTM D2435 y ensayos triaxiales no consolidados no drenados (UU) mediante la Norma ASTM D2850. Las mismas fueron tomadas en los suelos de consistencia blanda y media que son objeto de este estudio. Dentro de los más de 70 puntos de auscultación investigados en el proyecto, se centró el análisis en 9 de ellos ubicados en la zona de mayor concentración de cargas, hasta 15 m. de profundidad. El sector estudiado tiene 200 m. de largo por 170 m. de ancho en planta.

En la Figura 1 se observa el perfil geotécnico obtenido. Desde la superficie verificó la presencia de un terraplén artificial de suelo seleccionado de espesor 1,20 m. construido sobre suelos preconsolidados de consistencia blanda o media, de plasticidad variable, con un espesor aproximado de 3,00 m (CL, ML y CH). En ellos se observa un proceso errático de infiltración calcárea, con formación de tosquillas. Por debajo de este estrato se encuentran limos de baja plasticidad de consistencia muy firme o dura, con infiltración calcárea y formación de tosquillas. Se ha considerado que su compresibilidad es prácticamente despreciable en relación a la del estrato superior. El nivel freático fue encontrado en la interfase entre el suelo natural y el terraplén artificial.

El terraplén fue construido de manera prácticamente simultánea a la extracción de muestras y ejecución de ensayos de laboratorio, con lo cual la hipótesis utilizada para los cálculos considera al peso del terraplén como una carga externa aplicada sobre los suelos de consistencia media y blanda, teniendo en cuenta que no se han producido efectos de consolidación apreciables debido a dicha carga

al momento de la toma de muestras, que afecten a los parámetros de compresibilidad.

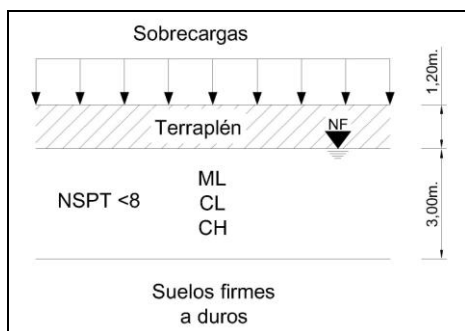


Figura 1. Perfil geotécnico

### 3 ENSAYOS DE LABORATORIO

En coincidencia con 9 puntos de auscultación, se extrajeron muestras inalteradas mediante tubos Shelby y se ejecutaron 24 ensayos de consolidación unidimensional, sobre muestras talladas cilíndricas de 6,35 mm. de diámetro y 2,55 mm. de altura. Se utilizaron edómetros verticales de anillo fijo, aplicando las cargas de forma incremental, y ejecutando mediciones de deformación vertical sobre escalones de presión de 12,5, 25, 50, 100, 200, 400 y 800 kPa, cada uno de los cuales fue mantenido durante 24 hs. a partir de la aplicación de la carga.

Se realizó lo mismo para la descarga, con escalones de presión de 400, 200 y 50 kPa.

Se obtuvieron para cada uno de estos ensayos: Relación de vacíos inicial ( $e_0$ ), Coeficiente de compresión ( $C_c$ ), Coeficiente de recompresión ( $C_r$ ), Presión efectiva vertical de preconsolidación ( $\sigma'_{vp}$ ), y Peso específico saturado ( $\gamma_{sat}$ ).

Paralelamente, se obtuvieron del perfil geotécnico y de la posición del nivel freático, la presión efectiva vertical de tapada ( $\sigma'_{v0}$ ) y el peso específico aparente ( $\gamma$ ).

En la Figura 2 se visualiza la variabilidad de los parámetros en profundidad.

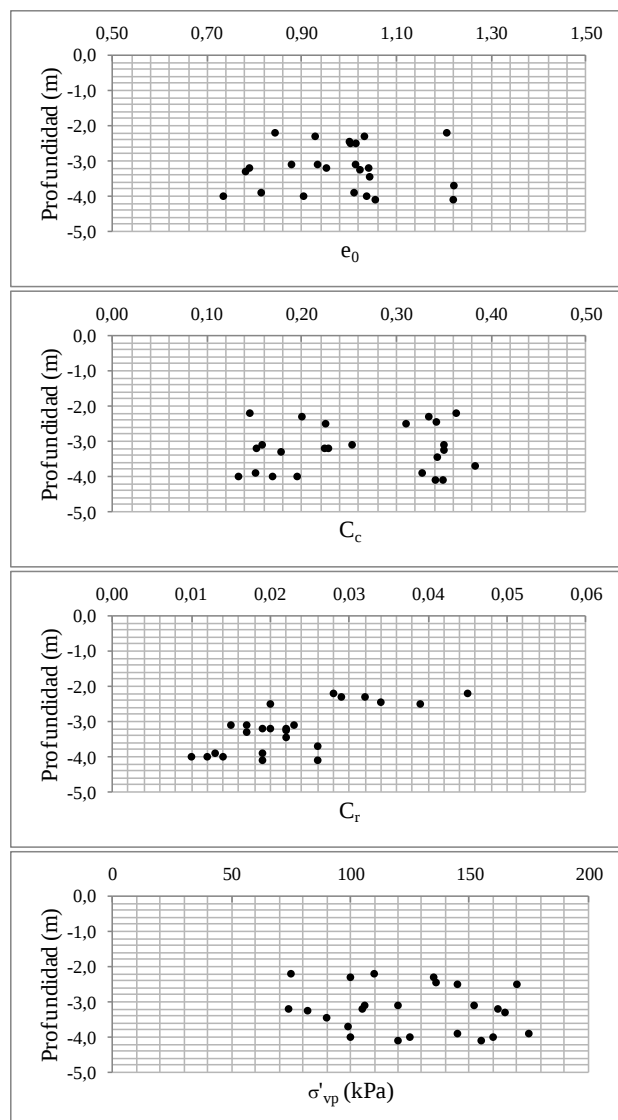


Figura 2. Variabilidad de las propiedades de compresibilidad en profundidad

Se observa una variación más o menos aleatoria de los parámetros analizados en la profundidad del estrato en estudio.

En la Tabla 1 se indican los resultados obtenidos en términos estadísticos:

Tabla 1. Variables aleatorias.

| Variable       | Unidad | Media | Min   | Max   | COV (%) |
|----------------|--------|-------|-------|-------|---------|
| Humedad        | %      | 35,8  | 25,3  | 43,9  | 13      |
| LL             | %      | 41,6  | 31,5  | 65,5  | 19      |
| IP             | %      | 15,0  | 4,5   | 35,6  | 46      |
| $e_0$          | -      | 0,978 | 0,734 | 1,221 | 13      |
| $C_c$          | -      | 0,258 | 0,133 | 0,383 | 33      |
| $C_r$          | -      | 0,023 | 0,010 | 0,045 | 38      |
| $\sigma'_{vp}$ | kPa    | 125   | 74    | 175   | 25      |

#### 4 CARACTERIZACIÓN PROBABILÍSTICA DE VARIABLES

Para llevar a cabo la Simulación de Montecarlo, es necesario definir las funciones de probabilidad que representarán las variables aleatorias en cada caso. Para ajustar los resultados obtenidos en los ensayos a distribuciones probabilísticas típicas conocidas, se realizó un proceso de ajuste (“fitting”) para cada variable X.

Se ha propuesto para cada variable X que

$$Y = \log(X) \quad (1)$$

tenga distribución Normal, de forma tal de que X tenga distribución Log-Normal. Como una distribución de este último tipo solo admite valores positivos de la variable aleatoria, se logran evitar valores negativos para X en la simulación posterior, evitando una respuesta carente de sentido físico.

Para cada una de las variables Y se hizo uso de la prueba de bondad de Kolmogorov-Smirnov (Massey, 1951), verificando la hipótesis de normalidad. Para contrastar esta hipótesis se utilizaron los valores críticos  $D_\alpha$  obtenidos de tablas publicadas (Lilliefors, 1967) en donde los momentos estadísticos deben ser estimados a partir de muestras finitas de una población.

En la Tabla 2 se muestran los resultados de las pruebas de bondad y los parámetros de las distribuciones obtenidas en cada caso:

Tabla 2. Prueba de bondad Kolmogorov-Smirnov.

| Valor      | Variable     |              |              |                       |
|------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|
|            | Log( $e_0$ ) | Log( $C_c$ ) | Log( $C_r$ ) | Log( $\sigma'_{vp}$ ) |
| Media      | -0,031       | -1,406       | -3,856       | 4,800                 |
| SDev       | 0,134        | 0,326        | 0,367        | 0,246                 |
| Max D      | 0,15         | 0,19         | 0,06         | 0,11                  |
| $\alpha$   | 0,05         | 0,01         | 0,05         | 0,05                  |
| $D_\alpha$ | 0,182        | 0,209        | 0,182        | 0,182                 |

En todos los casos las distribuciones propuestas resultaron aceptables con el nivel de significancia indicado. En el caso de  $C_c$  fue necesario utilizar un nivel de significancia de 0,01.

En la Tabla 3 se representa la matriz de

coeficientes de correlación de las variables:

Tabla 3. Matriz de coeficientes de correlación

|                | $e_0$  | $C_c$  | $C_r$  | $\sigma'_{vp}$ |
|----------------|--------|--------|--------|----------------|
| $e_0$          | 1,000  | 0,829  | 0,495  | -0,225         |
| $C_c$          | 0,829  | 1,000  | 0,569  | -0,214         |
| $C_r$          | 0,495  | 0,569  | 1,000  | -0,268         |
| $\sigma'_{vp}$ | -0,225 | -0,214 | -0,268 | 1,000          |

Se observa que  $e_0$  y  $C_c$  tienen una fuerte correlación positiva. El resto de las variables presentan cierto grado de correlación débil, tanto positiva como negativa según el caso.

#### 5 FORMULACIÓN TEÓRICA DEL PROBLEMA

Se ha supuesto que por la configuración de los acopios se producirá en el estrato estudiado un estado de compresión unidimensional.

La compresibilidad de los suelos cohesivos depende fundamentalmente de su relación de vacíos inicial ( $e_0$ ), la presión vertical efectiva de tapada ( $\sigma'_{v0}$ ) y la presión de preconsolidación vertical ( $\sigma'_{vp}$ ).

El cálculo de asentamientos por consolidación primaria se realizó mediante la teoría clásica de Terzaghi, utilizando los parámetros obtenidos en los ensayos de consolidación unidimensional. La fórmula analítica utilizada para el cálculo es la siguiente:

$$S = H \left( \frac{C_r}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_{vp}}{\sigma'_{v0}} + \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_{vp}} \right) \quad (2)$$

Donde:

H = Espesor inicial del estrato de consistencia blanda (m).

$e_0$  = Relación de vacíos inicial.

$C_r$  = Coeficiente de recompresión.

$C_c$  = Coeficiente de compresión.

$\sigma'_{v0}$  = Presión efectiva vertical de tapada en el centro del estrato (kPa).

$\sigma'_{vp}$  = Presión efectiva vertical de preconsolidación (kPa).

$\Delta\sigma'_v$  = Presión efectiva vertical de sobrecarga en el centro del estrato (kPa).

Los dos términos dentro del paréntesis en el

lado derecho de la ecuación (2) corresponden a las ramas de recompresión y curva virgen, separadas por la presión efectiva de preconsolidación determinada en los ensayos.

Ciertas variables fueron consideradas determinísticas, asignando valores medios, por su variabilidad relativamente menor. Estas variables son el peso específico aparente de los suelos de consistencia blanda ( $\gamma$ ), el espesor del estrato de dichos suelos considerado en el análisis (H), y la posición del nivel freático. La presión efectiva vertical de tapada en el centro del estrato ( $\sigma'_{v0}$ ) resulta constante. A continuación se indican los valores utilizados:

$$\begin{aligned} H &= 3,00 \text{ m} \\ \gamma' &= 8,22 \frac{kN}{m^3} \\ \sigma'_{v0} &= 12,32 kPa \end{aligned} \quad (3)$$

Según lo previsto por la actividad industrial, existirán sobrecargas originadas por el peso propio del terraplén y por distintas cargas de acopio de materiales. Se han considerado distintos escalones de sobrecarga según la información disponible. Si bien podría haberse introducido ésta como una variable aleatoria más, no se cuenta con información suficiente para ello.

## 6 SIMULACIÓN DE MONTECARLO

Se aplicó el método de Montecarlo realizando 5000 simulaciones para el cálculo del máximo asentamiento para distintos escalones de presión. Se utilizó el siguiente procedimiento para conservar la interdependencia estadística entre las variables:

1. Utilización de un pseudo-generator de números aleatorios con distribución uniforme entre 0 y 1 para generar una muestra de variables aleatorias  $U$   $u = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$
2. Transformación a variables normales estándar no correlacionadas  $Z$  con  $z_i = \Phi^{-1}(u_i)$
3. Utilización de fórmulas empíricas (Der

Kiureghian & Liu, 1986) para obtener la matriz  $R_0$  de correlación de las variables  $y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$  con distribución normal standard. Como todas las variables básicas tienen distribución LogNormal, resulta:

$$F = \frac{\rho_{0ij}}{\rho_{ij}} = \frac{COV}{\sqrt{\ln(1 + COV^2)}} \quad (4)$$

$$R_0 = \begin{bmatrix} \rho_{0,11} & \cdots & \rho_{0,41} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{0,14} & \cdots & \rho_{0,44} \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} \rho_{11} & \cdots & \rho_{41} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{14} & \cdots & \rho_{44} \end{bmatrix} \quad (5)$$

4. Transformación de las variables  $Z$  a las variables  $Y$  según la descomposición de Cholesky

$$R_0 = LL^T \rightarrow y = Lz \quad (6)$$

5. Igualación de las funciones de distribución de probabilidades de  $X$  e  $Y$  para generar la muestra:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_N) = F_{x_i}^{-1}[\Phi(y_i)] \quad (7)$$

La influencia que ejerce el grado de correlación en los resultados de la simulación puede verse en la Figura 3, donde se destaca la conservación del grado de correlación entre  $e_0$  y  $C_c$  ( $\rho_{e_0, C_c} = 0,829$ ). A su vez, la aplicación de la función de probabilidad para cada una de ellas genera valores concentrados alrededor del promedio de cada variable, y menor cantidad de valores extremos.

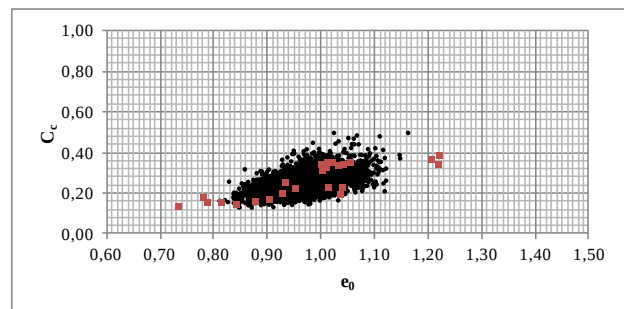


Figura 3. Simulación correlacionada para  $C_c$  y  $e_0$ . En rojo, resultados de ensayos.

En la Figura 4 se observan las bandas de

resultados de simulación, donde se graficó además el promedio del asentamiento máximo, junto con las curvas de probabilidad acumulada (distribución empírica resultante de la simulación) para el 90%, 95% y 99%. El asentamiento máximo calculado con los valores promedio de los parámetros coincide (con un pequeño error) con el promedio de los resultados de la simulación.

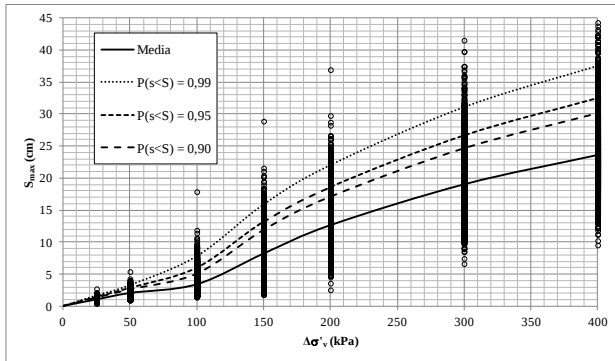


Figura 4. Simulación de Montecarlo (N=5000).

Esto significa que para una presión efectiva vertical en el centro del estrato igual a 200 kPa, existe un 95% de probabilidad de que el asentamiento máximo sea menor a 18 cm., y una probabilidad del 99% de que sea menor a 21 cm. Al observar la forma de las curvas se puede afirmar que:

1. Existe una dispersión del asentamiento máximo respecto al promedio que es más o menos constante para distintas presiones, con un ligero aumento alrededor de los 100 a 150 kPa. Esto corresponde al entorno en que se encuentra  $\sigma'_{vp}$ , lo cual es matemáticamente consistente, dada la fuerte discontinuidad que presenta la formulación teórica en el rango de presiones cercano a este valor.
2. Existe en dicha zona asimismo un fuerte cambio de pendiente del promedio, dado por la aparición de  $C_c$  en el cálculo teórico (al superarse  $\sigma'_{vp}$ ).
3. Como consecuencia de esta discontinuidad, el coeficiente de variación del asentamiento máximo se incrementa entre los 100 y los 200 kPa, para volver a decrecer a mayores presiones (Tabla 4). Esto significa que para presiones cercanas a  $\sigma'_{vp}$  existe una mayor incertidumbre en el cálculo de

asentamientos.

Tabla 4. Coeficientes de variación en Simulación MC

| $\Delta\sigma_v$<br>(kPa) | 25 | 50 | 100 | 150 | 200 | 300 | 400 |
|---------------------------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| COV<br>(%)                | 22 | 22 | 38  | 34  | 27  | 23  | 21  |

## 7 MÉTODO DE ESTIMATIVAS PUNTUALES

El Método de Estimativas Puntuales (Rosenblueth, 1975 ; Christian & Baecher, 1999) permite obtener los primeros momentos de una variable aleatoria dependiente  $Y$ , en función de los primeros momentos de las variables aleatorias  $X$  y la función determinística  $Y=g(X)$ . En este caso las variables  $X$  son los parámetros  $e_0$ ,  $C_c$ ,  $C_r$  y  $\sigma'_{vp}$ , mientras que el asentamiento máximo se denota con  $Y$ . La función determinística es la indicada en (2). Se utilizó el caso general, donde las variables son correlacionadas. Como las variables  $X$  son 4, se obtuvieron  $2^4=16$  pesos o factores de ponderación y se calculó el asentamiento en 16 puntos para cada presión de sobrecarga. El  $m$ -ésimo momento de  $Y$  y los pesos asociados se obtienen a partir de las ecuaciones

$$E[Y^m] \approx \sum P_i (y_i)^m \quad (8)$$

$$P_i = \frac{1}{2^n} \left[ 1 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (s_i)(s_j)\rho_{ij} \right] \quad (9)$$

Donde

$s_i$  = signo positivo cuando el valor de la  $i$ -ésima variable se encuentra un desvío estándar por encima de la media y es un signo negativo cuando se encuentra un desvío estándar por debajo de la media (ídem a  $s_j$ ).

$n$  = es el número de variables.

$P_i$  = es  $i$ -ésimo factor de ponderación.

$\rho_{ij}$  = es el coeficiente de correlación entre las variables  $j$  e  $i$ .

El promedio y desvío estándar del asentamiento máximo se determina a partir de

$$\mu_Y = E[Y] = \sum P_i y_i \quad (10)$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\sum P_i (y_i)^2 - (\sum P_i y_i)^2} \quad (11)$$

Como el método únicamente obtiene una estimación de la media y el desvío estándar, se debe asumir una distribución probabilística para aproximar la respuesta. Se adoptó la distribución normal.

En la Figura 5 se agregaron a las curvas mostradas en la Figura 4, aquellas gráficas análogas obtenidas mediante el método de estimativas puntuales, y adoptando la hipótesis de normalidad.

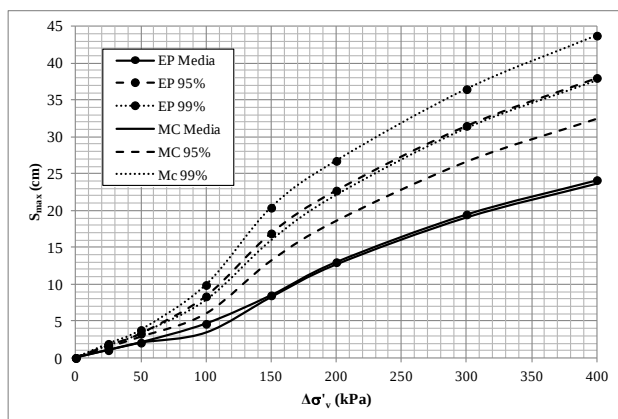


Figura 5. Comparación EP vs. MC.

En general, el promedio estimado para el asentamiento máximo coincide para ambos métodos. Existe sin embargo una mayor variabilidad en la respuesta con el método en estudio, motivada por la menor cantidad de puntos de cálculo involucrados. La curva del 99% para el método de Montecarlo coincide prácticamente con la del 95% de probabilidad para el método de Estimativas Puntuales.

## 8 APLICACIÓN PRÁCTICA

Se aplicarán los conceptos a una playa aledaña al edificio de Acería, el cual posee conexiones subterráneas y pavimentos que soportan un asentamiento diferencial respecto de la playa de acopio de 5 cm. Si vemos la Figura 4, existe un 90% de probabilidad de que el asentamiento máximo sea menor a 5 cm. para una presión de 100 kPa. Si el terraplén construido transmite 25 kPa y la densidad de un acopio de chatarra de

oxicorte es de 10 kN/m<sup>3</sup>, se podrá acopiar como máximo una pila de altura igual a

$$h_{max}(90\%) = \frac{100kPa - 25kPa}{10 \frac{kN}{m^3}} = 7,50m \quad (12)$$

Mediante esta herramienta se logra conocer el grado de confianza con el cual se toman decisiones operativas y de proyecto. Siguiendo con el ejemplo, si se decide acopiar una pila de 10,00 m. de alto, la presión aumentará a 125 kPa y el grado de confianza será menor al 90%. Si se toma la decisión de proceder, será posible contrastar esta probabilidad menor con los posibles costos de reparación o salidas de operación que puedan ocurrir por un exceso de asentamiento diferencial. De manera inversa, es posible elegir niveles de confianza más altos para asentamientos que resulten críticos en cierto proceso.

Adicionalmente, se puede realizar un registro de los asentamientos producidos, para comenzar la construcción de las partes más sensibles sólo cuando se haya producido un cierto porcentaje del asentamiento máximo previsto. En ese caso también es útil conocer el grado de confianza en las estimaciones.

Si se eligieran los valores medios de los parámetros para calcular el asentamiento máximo, el resultado sería de 3,5 cm. Teóricamente, este valor estaría por debajo del límite aceptable de 5 cm. Con un criterio más conservador, podrían elegirse combinaciones pesimistas de los parámetros que aseguren un valor de asentamiento máximo calculado difícil de superar, aunque este procedimiento no permite conocer el nivel de riesgo específico con el cual se diseñará el acopio.

## 9 CONCLUSIONES

En una estimación o cálculo de asentamientos puramente determinista, resulta lógico considerar valores lo suficientemente conservadores de los parámetros para calcular un valor del asentamiento máximo que pueda ser excedido sólo en raras ocasiones. El hecho

de sumar conceptos de probabilidad en la estimación de asentamientos permite conocer con precisión el grado de confianza utilizado en el cálculo, y lo que resulta más importante, permite tomar decisiones en base a un criterio racional.

Para el caso de estudio, esto equivale a elegir las alturas que alcanzarán los acopios de un material de densidad conocida, para asegurar un asentamiento de cierto sector de la playa de acopio que sea compatible con las infraestructuras aledañas y la operatoria de la planta.

La decisión en cuanto al método a aplicar está fuertemente condicionada por la naturaleza del problema, el modelo matemático y la información disponible sobre los suelos. En este caso, pudo verificarse que el método de Montecarlo para variables básicas correlacionadas permitió un adecuado abordaje de las discontinuidades presentes en el modelo matemático, debido al quiebre de pendiente en la curva de compresibilidad. El método de Estimativas Puntuales arroja en este caso una excesiva variabilidad en la respuesta, por basarse en menor número de puntos de cálculo, que no alcanzan a detectar la discontinuidad. Por otra parte, se hace necesario asumir una distribución probabilística para el asentamiento máximo. En este trabajo se adoptó la distribución normal, aunque no existe un respaldo matemático demostrado que asegure el ajuste a dicha distribución.

Al realizar un seguimiento y registro de asentamientos constata de las zonas más sensibles, los modelos matemáticos probabilísticos se pueden actualizar, y se pueden planificar las etapas de ejecución de conexiones, pavimentos, estructuras enterradas, etc. de manera sistémica junto con la operación en las playas de acopio. Con ello es posible reducir costos de reparación y mantenimiento, y mantener acotado el riesgo geotécnico asociado a asentamientos diferenciales.

Todo ello permite reducir el error asociado al muestreo y ensayo, mejorando la calidad de las predicciones. La estimación de la relación asentamiento-tiempo por vía probabilística es una herramienta que también puede incorporarse, aunque se debe tener en cuenta

que las condiciones de drenaje locales afectan fuertemente las diferencias entre el comportamiento real y el estimado a partir de los ensayos de consolidación.

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Sociedad Argentina de Ingeniería Geotécnica por el apoyo económico recibido para la presentación de este trabajo en el COBRAMSEG 2016 (GEOJOVEM).

## REFERENCIAS

- Baecher, G. B., & Christian, J. T. (2005). *Reliability and statistics in geotechnical engineering*. John Wiley & Sons.
- Christian, J. T., & Baecher, G. B. (1999). Point-estimate method as numerical quadrature. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(9), 779-786.
- Der Kiureghian, A., & Liu, P. L. (1986). Structural reliability under incomplete probability information. *Journal of Engineering Mechanics*, 112(1), 85-104.
- Duncan, J. M. (2000). Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126(4), 307-316.
- Huber, M. (2013). Soil variability and its consequences in geotechnical engineering. Inst. f. Geotechnik.
- Krizek, R.J., Corotis, R.B., & El-Moursi, H.H.(1977). Probabilistic analysis of predicted and measured settlements. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.14, No.1, pp.17-33.
- Lilliefors, H. W. (1967). On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American Statistical Association*, 62(318), 399-402.
- Massey Jr, F. J. (1951). The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American statistical Association*, 46(253), 68-78.
- Rosenblueth, E. (1975). Point estimates for probability moments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 72(10), 3812-3814.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- Won, J. Y. (2009). A probabilistic approach to estimate one dimensional consolidation settlements. In *Proc. of the 17th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.-Alexandria* (pp. 2012-2015).