

ART. 4

COMPRESIBILIDAD DE LAS ARCILLAS DE VALLE CENTRAL DE TARIJA: PARÁMETROS PRINCIPALES, CORRELACIONES Y MODELOS MATEMÁTICOS



COMPRESIBILIDAD DE LAS ARCILLAS DEL VALLE CENTRAL DE TARIJA: PARÁMETROS PRINCIPALES, CORRELACIONES Y MODELOS MATEMÁTICOS

COMPRESSIBILITY OF VALLEY CLAYS TARIJA CENTRAL: MAIN PARAMETERS, CORRELATIONS AND MATHEMATICAL MODELS

Alberto Benítez Reynoso

albere3716@gmail.com

Laura Karina Soto Salgado

laraksosal@gmail.com

Ingeniero Civil, M.Sc., Ph.D., Dr. Sc. y Post Doctorado en Ingeniería. Docente e Investigador del Departamento de Estructuras y Ciencias de los Materiales.

Ingeniera Civil, M.Sc., Docente e Investigadora del Departamento de Vías de Comunicación.

RESUMEN

En este artículo se establecen correlaciones y se formulan modelos matemáticos, expresados en términos de ecuaciones, para la determinación indirecta o estimación del índice de compresión y del coeficiente de consolidación, para las arcillas del Valle Central de Tarija, tomando en cuenta que el ensayo edométrico de laboratorio toma mucho tiempo y es más costoso.

Los modelos formulados son aplicables para los rangos de variación (acotados por los valores máximos y mínimos) de las variables consideradas en el estudio.

Los resultados principales se reflejan en las correlaciones muy fuertes, entre el índice de compresión y los límites de Atterberg, así como entre el coeficiente de consolidación y los mismos límites, especialmente el límite líquido. Estos resultados (modelos matemáticos) se expresan en términos de ecuaciones fácilmente utilizables.

Palabras clave:

Compresibilidad, correlación, modelos matemáticos, límites de Atterberg.

ABSTRACT

In this article correlations are established and mathematical models are formulated, expressed in terms of equations, for the indirect determination or estimation of the compression index and the consolidation coefficient, for the clays of the Central Valley of Tarija, taking into account that the oedometric laboratory testing is time consuming and expensive.

The models formulated are applicable for the ranges of variation (bounded by the maximum and minimum values) of the variables considered in the study.

The main results are reflected in the very strong correlations, between the compression index and the Atterberg limits, as well as between the consolidation coefficient and the limits themselves, especially the liquid limit. These results (mathematical models) are expressed in terms of easily usable equations.

Key words

Compressibility, correlation, mathematical models, Atterberg limits.

INTRODUCCIÓN

Un fenómeno muy importante en la Mecánica de Suelos, Ingeniería Geotécnica e Ingeniería Estructural es la consolidación de los suelos. Este fenómeno, habitualmente, se expresa en términos de algunas variables y/o propiedades, tales como asentamientos de las estructuras (deformación), relación de vacíos, esfuerzo efectivo y otras.

El incremento de esfuerzo ocasionado por la construcción de una estructura comprime las capas de suelo. Esta compresión es causada por: (a) la deformación de partículas del suelo, (b) el reacomodo de las partículas del suelo y (c) la expulsión de aire o agua de los vacíos. En general, el asentamiento del suelo causado por la carga puede dividirse en las siguientes categorías (Das y Sobhan 2018):

- (1) Asentamiento elástico, causado por la deformación elástica del suelo seco y de los suelos húmedos y saturados sin ningún cambio en el contenido de humedad.

Los cálculos de los asentamientos elásticos se basan generalmente en ecuaciones derivadas de la teoría de la elasticidad.

- (2) Asentamiento de consolidación, resultado del cambio de volumen en un suelo cohesivo saturado debido a la expulsión de agua intersticial. El asentamiento de consolidación es dependiente del tiempo.

Estos aspectos conceptuales y la teoría completa de la consolidación pueden hallarse en excelentes libros y publicaciones de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (Das y Sobhan 2018; Terzaghi, K. y R. Peck, 1967), teoría que no se expone en este artículo, ya que sus objetivos y alcance son otros. Sin embargo, es absolutamente

pertinente destacar que algunas variables inherentes al fenómeno de la consolidación tienen importancia en el cálculo de estructuras tales como las cimentaciones. El ensayo de consolidación (en laboratorio), mediante el edómetro o consolidómetro, permite simular la realidad y determinar variables de uso en la práctica de la Ingeniería Geotécnica y Estructural.

Dos de estas variables, que representan al fenómeno, son el índice de compresión, C_c , y el coeficiente de consolidación, C_v . El ensayo mencionado tiene una duración de bastantes horas, incluso días, por ello, frecuentemente es necesario estimar estas variables usando otros procedimientos, por ejemplo, mediante modelos matemáticos de regresión, basados en información experimental (de laboratorio), que es la parte central del presente artículo. Consecuentemente, los objetivos de la presente investigación son:

- a) Formular correlaciones y modelos matemáticos, expresados en términos de ecuaciones, que permitan estimar las dos variables mencionadas, en función de otras propiedades, cuya determinación experimental es más simple y toma mucho menos tiempo, para las arcillas del Valle Central de Tarija.
- b) Sobre la base de los resultados obtenidos, precisar el grado de compresibilidad de las arcillas del Valle Central de Tarija y establecer la validez de los modelos obtenidos.

MATERIALES Y MÉTODOS

En términos científicos generales, se ha usado el método empírico (experimental), como también el método racional o teórico, típicos en este tipo de investigaciones. Con relación a la fase experimental, es pertinente destacar los siguientes aspectos:

➤ En el Proyecto Múltiple San Jacinto, (Provincia Cercado del Departamento de Tarija, Bolivia), en el cual ha trabajado uno de los autores, se han realizado 33 ensayos de consolidación, usando el edómetro o consolidómetro.

➤ Estos ensayos han permitido determinar (experimentalmente) el índice de compresión, C_c , y el coeficiente de consolidación, C_v .

➤ Además, para las 33 muestras, referidas en el párrafo precedente, se ha determinado (en laboratorio) algunas propiedades geotécnicas, entre éstas, los límites de Atterberg.

Sobre la fase racional o teórica, se destacan los siguientes elementos como fundamentales:

➤ Los ensayos de laboratorio mencionados, han permitido construir una serie estadística, que luego de analizada, permitió establecer tres tendencias y, por lo tanto, tres series de trabajo, cuyos indicadores principales se resumen en los cuadros 1, 2 y 3.

➤ Para formular las correlaciones y los modelos matemáticos de regresión, se ha usado el método de los mínimos cuadrados, estableciendo que, el primer indicador, sobre la idoneidad de los modelos, es el coeficiente de correlación, el cual debe ser próximo a la unidad (Ang and Tang, 2007; Mendenhall, W. y Sincich T., 1997; Benjamin and Cornell, 1970 Magnan, J.P., 1982; Benítez, 2019, 2017, 2015, 2012, 2010, 2004 y 1997).

➤ También, se han realizado pruebas adicionales como la prueba de valores medidos contra valores predichos (por los modelos), la prueba de residuales y la prueba de normalidad de los mismos, como factores que permiten ratificar (o no) la idoneidad referida (Ang and Tang, 2007; Mendenhall, W. y Sincich T., 1997; Benjamin and Cornell,

1970 Magnan, J.P., 1982; Benítez, 2019, 2017, 2015, 2012, 2010, 2004 y 1997).

CUADRO 1
INDICADORES ESTADÍSTICOS C_c , LL y LP
PROYECTO SAN JACINTO 1 (SJ1)

INDICADOR	C_c	LL	IP
n	11	11	11
\bar{M}	0.20	32.01	14.19
S	0.044	5.83	3.49
CV	0.23	0.18	0.25
Min	0.143	26.20	10.20
Max	0.276	44.00	20.10

CUADRO 2
INDICADORES ESTADÍSTICOS C_c , LL y LP
PROYECTO SAN JACINTO 2 (SJ2)

INDICADOR	C_c	LL	IP
n	11	11	11
\bar{M}	0.104	31.44	12.80
S	0.070	8.90	4.21
CV	0.67	0.28	0.33
Min	0.023	23.30	5.40
Max	0.243	48.4	20.8

CUADRO 3
INDICADORES ESTADÍSTICOS C_c , LL y LP
PROYECTO SAN JACINTO 3 (SJ3)

INDICADOR	C_c	LL	IP
n	11	11	11
\bar{M}	0.064	38.55	17.07
S	0.023	9.08	6.81
CV	0.36	0.24	0.40
Min	0.023	23.30	10.90
Max	0.104	54.00	31.30

Sobre esa base, las tres series fueron sometidas a un análisis de regresión, mediante el cual se han obtenido los modelos matemáticos representados por las ecuaciones (1), (2) y (3), con sus respectivos coeficientes de correlación R.

SJ1: $C_c = 0.0072(LL - 4.64)$ (1)

$R = 0.942$

SJ2: $C_c = 0.0077(LL - 17.97)$ (2)

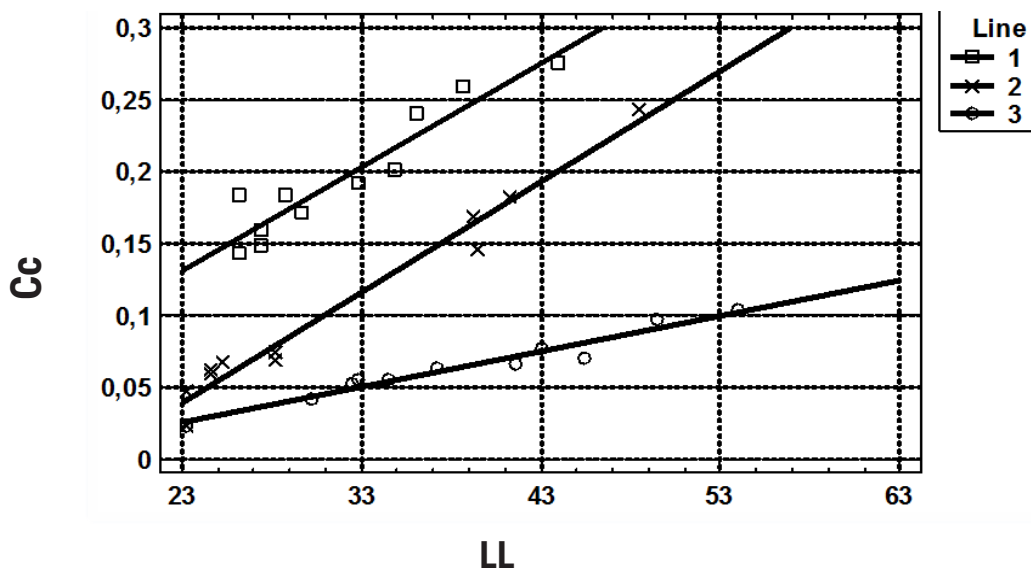
$R = 0.987$

SJ3: $C_c = 0.0025(LL - 12.4)$ (3)

$R = 0.975$

Se han representado gráficamente los pares de puntos (LL, Cc), para las tres series, así como sus modelos matemáticos, expresados como una recta (**figura 1**).

Figura 1
 Índice de compresión contra Límite Líquido (San Jacinto)



Según los valores que adopta el índice de compresión, las arcillas pueden clasificarse como de compresibilidad muy baja, baja, media, alta y muy alta, tal como sugieren Carter y Bentley (2016). Consecuentemente, las ecuaciones (1), (2) y (3) son válidas para arcillas de compresibilidad alta, media y baja, respectivamente, todas del Valle Central de Tarija, que se ubica en la Provincia Fisiográfica de Bolivia denominada Subandino.

Las pruebas adicionales (valores medidos contra valores estimados con el modelo, prueba de residuales y prueba de normalidad de los mismos), se han realizado, como ejemplo, solo para la serie 2 (SJ2). Así, la **figura 2**, representa la prueba de valores medidos (experimentalmente) contra los valores estimados (con el modelo), en tanto que, **la figura 3** representa la prueba de residuales, ambas satisfactorias.

Con relación a la prueba de normalidad de los residuales, la misma ha sido satisfactoria usando dos criterios, la prueba Chi-Cuadrada y la prueba de Smirnov-Kolmogorov.. En ambos casos, se concluye que “no se puede rechazar la hipótesis de que la serie de residuales proviene de una distribución normal, con un 95% de confianza”.

Figura 2
Prueba de Valores Medidos Contra Valores Estimados

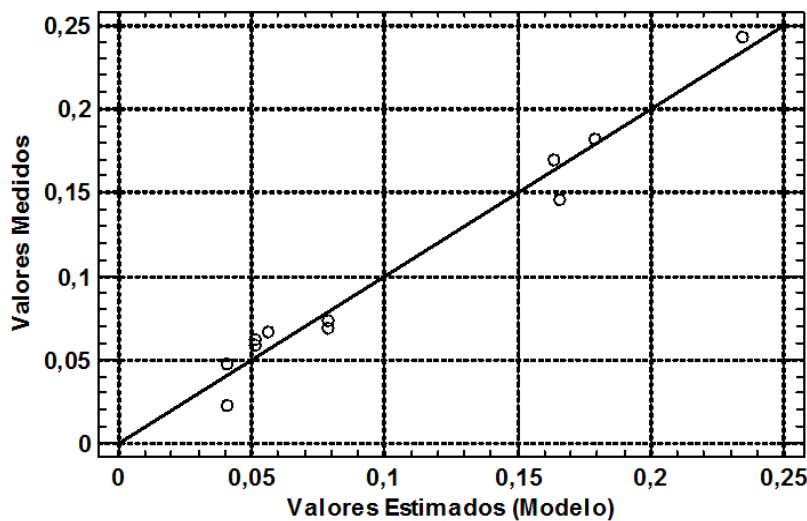
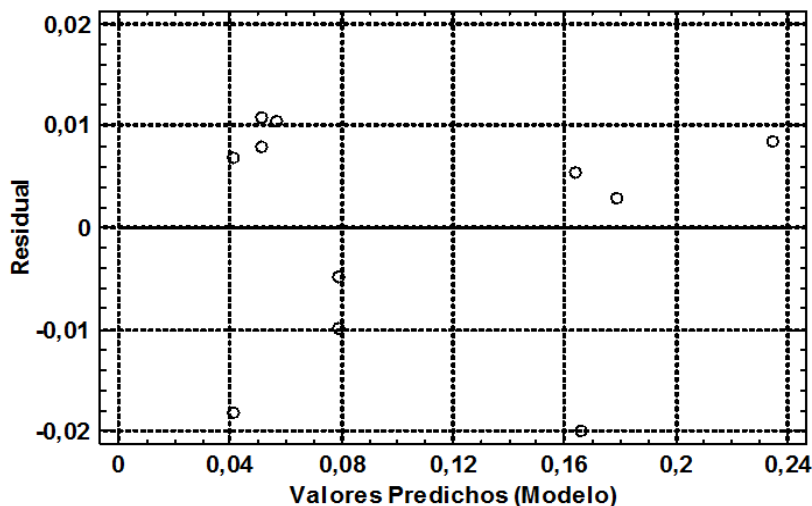


Figura 3
Prueba de residuales



Para el mismo Proyecto San Jacinto, se ha determinado en (laboratorio) el coeficiente de consolidación, **Cv** y otras propiedades de los suelos, constituyéndose una serie de estadística cuyos indicadores se muestran en el **cuadro 5**.

CUADRO 5
 INDICADORES ESTADÍSTICOS DE C_v y LL VALLE CENTRAL DE TARIJA

INDICADOR	C _v (m ² /s)	LL (%)
n	13	13
M̄	0.00042	38.65
S	0.00060	9.72
CV	1.43	0.25
Min	0.000051	23.3
Max	0.00214	53.8

Siguiendo la misma metodología, con las mismas pruebas, los pares de valores de esta serie (LL, Cv), han permitido establecer la correlación y determinar el modelo de regresión siguiente:

$$C_v = \frac{39799,1}{(LL)^{5.319}} \quad (4)$$

$$R = 0.997$$

Otros modelos interesantes, con coeficientes de correlación bastante altos, son los representado por las ecuaciones (5) y (6).

$$C_v = \frac{1}{(-8816.16+360.47*LL)} \quad (5)$$

$$(0.000094 \leq C_v \leq 0.001145); \quad (26 \leq LL \leq 53.8)$$

$$R = 0.998$$

$$C_v = \frac{13994.6}{(LL)^{5.01}} \quad (6)$$

$$(0.000094 \leq C_v \leq 0.001145); \quad (26 \leq LL \leq 53.8)$$

$$R = 0,995$$

A la luz de los resultados obtenidos, tanto en la fase experimental, como en la etapa teórica o racional, se formulan las siguientes conclusiones:

- Un primer aspecto a destacar se refiere al grado de compresibilidad de las arcillas del Valle Central de Tarija. Esta compresibilidad varía de ALTA a BAJA, pasando por la compresibilidad MEDIA, dependiendo de zona de ubicación de las arcillas.
- La correlación es mucho más fuerte entre el índice de compresión y el límite líquido, lo cual es compatible por lo demostrado por otros investigadores.
- Es cierto que, también hay una muy buena correlación con el límite plástico e incluso con el índice de plasticidad, pero, los coeficientes de correlación son menores que el caso referido en el párrafo precedente.
- La utilidad de los modelos es muy evidente, pues, a falta de medios, tiempo o equipos para realizar el ensayo de consolidación en laboratorio, se puede usar los modelos formulados para estimar indirectamente el índice de compresión y el coeficiente de consolidación, en función del límite líquido que es de más fácil y rápida determinación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asociación San Jacinto - Sofrelec y Consa, S.R.L. (1978). Estudio de pre factibilidad del proyecto múltiple San Jacinto – Planillas de Laboratorio. Tarija, Bolivia
- Ang and Tang (2007). Probability Concepts in Engineering – Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering. John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Benítez, A (2019). Modelos Matemáticos Generales para la Predicción del CBR (California Bearing Ratio) en los Suelos Bolivianos. Revista Universitaria de Divulgación Científica “VENTANA CIENTÍFICA”, Vol. 9 N° 15, pp. 9-24, junio, 2019, Tarija.
- Benítez, A. (2018). Principios Dialécticos de la Ingeniería Estructural e Implicaciones en la Seguridad, “Congreso Panamericano en Seguridad, Construcciones Seguras y Manejo de Desastres”, Cartagena de Indias, 10 y 11, en el marco de la XXXVI Convención de la UPADI (Unión Panamericana de Asociaciones de Ingenieros).
- Benítez, A. (2017). Propiedades mecánicas de las arcillas bolivianas: modelos matemáticos, correlaciones e implicaciones en la Ingeniería Estructural. PRIMER CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 26-28 de octubre, Tarija (Bolivia).
- Benítez, A. (2017). Métodos de Investigación en Ingeniería Estructural. PRIMER CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 26-28 de octubre, Tarija (Bolivia).
- Benítez, A. (2015). Estimación de algunas propiedades geotécnicas de los suelos mediante análisis multivariado (regresión múltiple) y su utilidad en la Ingeniería Civil: Suelos Finos del Oriente Boliviano. Revista INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN (órgano oficial de la Sociedad de Ingenieros de Bolivia), N° 5, pp. 36-43. Depósito Legal: 4-3-10-14.
- Benítez, A. (2014). Dialéctica de la Ingeniería Estructural. Convenio Andrés Bello, Universidad Nacional Siglo XX e Instituto Internacional de Integración. Depósito Legal: 4-1-1568-14, ISBN: 978-99954-98-15-3, La Paz (Tesis Doctoral y Libro).
- Benítez, A. (2012). Propiedades mecánicas de los suelos, correlaciones, modelos matemáticos e implicaciones en la ingeniería vial. XVI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, 22-26 de octubre, Córdoba.
- Benítez, A. (2010). Modelos multivariados en la estimación de algunas propiedades mecánicas de los suelos y sus implicaciones en la ingeniería vial. XX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (6 al 9 de octubre) publicación en CD e impresa (libro del Congreso) ISBN: 978-950-42-0129-8, Mendoza (Argentina).
- Benítez, A. (2004). Generalización de las relaciones entre los procesos del ciclo hidrológico para la cuenca internacional del río de La Plata: “Enfoque Sistemico y Aná-

lisis Multivariado". Tesis de doctorado, Universidad de Sevilla, España.

☛ Benítez, A. (1997). Modelos matemáticos para la estimación de propiedades mecánicas de los suelos y su aplicación al diseño de firmes. Los suelos del valle Central de Tarija. Revista Rutas, No. 59 – II época, marzo-abril, pp. 73-78, Madrid, España.

☛ Benjamin and Cornell (1970). Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers. McGraw Hill, USA.

☛ Bunge, M. (2011). La investigación científica. Siglo Veintiuno Editores, México.

☛ Carter, M. y Bentley, S.P. (2016). Soil properties and their Correlations. John Wiley & Sons, Inc., UK.

☛ Das and Sobhan (2018). Principles of Geotechnical Engineering. Cengage Learning, Boston, MA.

☛ Germaine, J. and A. Germaine (2009). Geotechnical Laboratory Measurements for Engineers. John Wiley & Sons, Inc., USA.

☛ Magnan, J.P., 1982. Les méthodes statistiques et probabilistas en mécanique des sols. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, París.

☛ Mendenhall, W. y Sincich, T., 1997. Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias. Prentice Hall. México.

☛ Taylor, R. (1990). Interpretation of the correlation coefficient: A basic review. JDMS 1:35-39, Logan, WV.

☛ Terzaghi, K. y R. Peck (1967). Soil mechanics in engineering practice. John Wiley, Lodon.

☛ Verbrugge and Schroeder (2018). Geotechnical Correlations for Soils and Rocks. John Wiley & Sons, Inc., Lodon