

# Variabilidad inherente en la determinación del esfuerzo de preconsolidación de suelos mediante ensayos edométricos convencionales

A. J. Aparicio-Ortubé<sup>a</sup>, Exneyder A. Montoya-Araque<sup>b</sup> y David G. Zapata-Medina<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Estudiante de Doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Departamento de Ingeniería Civil, Medellín, ANT 050034, Colombia. E-mail: [aaparicioo@unal.edu.co](mailto:aaparicioo@unal.edu.co)

<sup>b</sup> Asistente de Investigación Graduado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Departamento de Ingeniería Civil, Medellín, ANT 050034, Colombia. E-mail: [eamontoyaa@unal.edu.co](mailto:eamontoyaa@unal.edu.co)

<sup>c</sup> Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Departamento de Ingeniería Civil, Medellín, ANT 050034, Colombia. E-mail: [dgzapata@unal.edu.co](mailto:dgzapata@unal.edu.co)

## RESUMEN

Este artículo examina la variabilidad inherente en la determinación del esfuerzo de preconsolidación,  $\sigma'_p$ , de suelos de métodos generalmente empleados en la investigación y práctica geotécnica mediante ensayos edométricos convencionales. Nueve métodos fueron evaluados: Casagrande, Pacheco Silva, Butterfield, Oikawa, Becker et al., Morin, Onitsuka et al., Wang & Frost y Boone. La discusión se centra en la aproximación lineal de los rangos de recompresión y compresión, los cuales causan variabilidad en la determinación de  $\sigma'_p$ . Dos criterios fueron tomados en cuenta para la aproximación lineal del rango de compresión: pendiente máxima entre dos incrementos consecutivos de carga y últimos tres incrementos de carga; y para el rango de recompresión: primer y último punto de la primera etapa de descarga, todos los puntos de la primera etapa de descarga, incrementos de carga por debajo del esfuerzo vertical *in situ*,  $\sigma'_{v0}$ , y encima de  $\sigma'_{v0}$  de acuerdo al método usado. Los resultados mostraron que los métodos propuestos por Casagrande, Pacheco Silva y Boone tienen la menor variabilidad inherente en la determinación de  $\sigma'_p$  para las condiciones aquí evaluadas.

**Palabras clave:** esfuerzo de preconsolidación, suelo, ensayo edométrico convencional.

## ABSTRACT

This paper examines the inherent variability in the determination of the preconsolidation pressure,  $\sigma'_p$ , of soils of methods typically employed in research and geotechnical practice via conventional oedometer testing. Nine methods were evaluated: Casagrande, Pacheco Silva, Butterfield, Oikawa, Becker et al., Morin, Onitsuka et al., Wang & Frost, and Boone. The discussion is centered on the linear approximation of the recompression and compression ranges which cause variability in the determination of  $\sigma'_p$ . Two criteria were taken into account to the linear approximation of the compression range: maximum slope between two consecutive load increments, and last three load increments; and for the recompression range: first and last point of the first unloading stage, all the points of the first unloading stage, load increments below the *in situ* effective vertical stress,  $\sigma'_{v0}$ , and above  $\sigma'_{v0}$  according to the method used. The results showed that the method proposed by Casagrande, Pacheco Silva, and Boone have the smallest inherent variability in the determination of  $\sigma'_p$  for the conditions herein evaluated.

**Key words:** preconsolidation pressure, soil, conventional oedometer testing.

## INTRODUCCIÓN

Desde 1936, varios métodos se han propuesto para determinar el esfuerzo de preconsolidación,  $\sigma'_p$ , de suelos a través de la respuesta de compresibilidad unidimensional, la cual es obtenida por medio de ensayos de laboratorio de compresión bajo condiciones de deformación lateral restringida (i.e., condiciones  $K_0$  o edométricas). El comportamiento del suelo observado por medio de estos ensayos muestra una respuesta "bilineal", desde una respuesta relativamente rígida a otra más blanda, definiéndose esta transición como  $\sigma'_p$ . Este cambio de rigidez que experimenta el suelo ante la acción de cargas de compresión está asociado a la historia de esfuerzos del material, por tanto, si el suelo es sometido a un nivel de esfuerzo mayor al que ha experimentado durante su historia geológica, cambios importantes en su estructura se inducirán. La determinación de este parámetro mecánico, también llamado esfuerzo de cedencia, es esencial para predecir asentamientos y distorsiones en el diseño de cimentaciones superficiales, así como también para entender la respuesta mecánica del suelo en términos de rigidez y resistencia.

La interpretación de  $\sigma'_p$  a través de la curva de compresibilidad no solo depende del método empleado sino también de la calidad de la muestra ensayada. Investigaciones sobre los efectos de la perturbación de la muestra en la respuesta mecánica del suelo han mostrado que el muestreo, transporte y almacenaje inadecuado, preparación del espécimen de suelo, manipuleo y técnicas empleadas durante el ensayo alteran la estructura del suelo (Bjerrum, 1973; Cho et al., 2007; Clayton et al., 1992; Hight, 2001; Olson, 1986), "oscureciendo" el cambio de rigidez en la curva de compresibilidad. Los criterios sugeridos por Andresen & Kolstad (1979) y Lunne et al. (2006) posibilitan evaluar el nivel de perturbación o calidad de la muestra con datos de ensayos edométricos, clasificándola en los siguientes niveles: muy buena a excelente, buena, regular, pobre y muy pobre. Terzaghi et al. (1996) indican que los ensayos de laboratorio realizados con muestras de suelo de calidad buena o superior (e.g., muestras de bloque, Sherbrooke, Laval, pistón fijo o tubos Shelby de pared delgada) proporcionan parámetros mecánicos representativos de las condiciones *in situ*.

Los métodos existentes para determinar  $\sigma'_p$  generalmente involucran construcciones gráficas, la aproximación visual de los rangos de recompresión y compresión en trayectorias rectas y/o la determinación de la mag-

nitud de  $\sigma'_p$  sobre el espacio de análisis, en ocasiones en escala logarítmica, también de forma visual. Estos procedimientos reducen la objetividad de los métodos y repetibilidad en la obtención de la magnitud de  $\sigma'_p$ . Li (1989) demostró que la evaluación visual de la respuesta de compresibilidad es influenciada por el tamaño del gráfico y las escalas del espacio de análisis, incluso en espacios aritméticos, indicando que una curva puede enderezarse o viceversa por un cambio o ajuste de escalas. Clementino (2005) evaluó el efecto de la escala en la percepción visual usando el método de Casagrande, concluyendo que a medida que se incrementa la escala del eje de la relación de vacíos,  $e$ , la magnitud de  $\sigma'_p$  tiende a disminuir. Si bien las observaciones arriba descritas pueden evitarse mediante la implementación de métodos analíticos y numéricos, el ajuste lineal de los rangos de recompresión y compresión aún siguen siendo subjetivos ya que depende del analista geotécnico determinar la cantidad de puntos o incrementos de carga, causando de esta forma una variabilidad inherente en la determinación de  $\sigma'_p$ .

Este trabajo examina la variabilidad inherente en la determinación de  $\sigma'_p$  de métodos comúnmente usados en la comunidad geotécnica, como los propuestos por: Casagrande (1936), Pacheco Silva (1970), Butterfield (1979), Oikawa (1987), Becker et al. (1987), Morin (1988), Onitsuka et al. (1995), Wang & Frost (2004) y Boone (2010). Métodos analíticos y numéricos son empleados por medio del software de aplicación *pySigmaP* desarrollado por Montoya-Araque et al. (2020) para obtener una evaluación más objetiva de la variabilidad inherente. La evaluación es realizada en función de criterios existentes que no dependen del tamaño del gráfico y escalas del espacio de análisis. Dos criterios son tomados en cuenta para la aproximación lineal del rango de compresión: pendiente máxima entre dos incrementos consecutivos de carga y últimos tres incrementos de carga; y cuatro criterios para el rango de recompresión: primer y último punto de la primera etapa de descarga, todos los puntos de la primera etapa de descarga, incrementos de carga por debajo del esfuerzo vertical *in situ*,  $\sigma'_{v0}$ , y encima de  $\sigma'_{v0}$  de acuerdo al empleado. Adicionalmente, los procedimientos para calcular  $\sigma'_p$  de los métodos en estudio son descritos y presentados en el Apéndice.

## EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD INHERENTE

La Tabla 1 resume los criterios de evaluación de la variabilidad inherente en la determinación de  $\sigma'_p$  de nueve métodos: Casagrande, Pacheco Silva, Butterfield, Oikawa, Becker et al., Morin, Onitsuka et al., Wang & Frost y Boone.

Tabla 1. Criterios de evaluación de la variabilidad inherente.

Criterio	Método
RC1	Todos los métodos en estudio
RC2	Todos los métodos en estudio
RR1	Wang & Frost, Boone
RR2	Wang & Frost, Boone
RR3	Butterfield, Oikawa, Becker et al., Morin, Onitsuka et al.
RR4	Butterfield, Oikawa, Becker et al., Morin, Onitsuka et al.

**Nota:** RC1: pendiente máxima entre dos incrementos consecutivos de carga; RC2: últimos tres incrementos de carga; RR1: primer y último punto de la primera etapa de descarga; RR2: todos los puntos de la primera etapa de descarga; RR3: incrementos de carga por debajo de  $\sigma'_{v0}$ ; RR4: incrementos de carga por encima de  $\sigma'_{v0}$ .

Los criterios listados en la Tabla 1 fueron seleccionados en base a recomendaciones encontradas en la literatura y práctica común para aproximar linealmente los rangos de compresión y recompresión. RC1, RC2 y RR3 fueron sugeridos por Ladd & Degroot (2003), Wang & Frost (2004) y Becker et al. (1987), respectivamente. Todos estos criterios serán combinados en todas sus formas posibles con el fin de determinar rangos de variabilidad a través de magnitudes mínimas y máximas de  $\sigma'_p$  de los métodos en estudio.

La Tabla 2 y Figura 1 muestran los resultados de un ensayo edométrico por carga incremental realizado en un espécimen cortado a mano de 20 mm de altura y 50 mm de diámetro (relación altura-diámetro de 0.4) usando una relación de carga incremental (LIR) de 1.0 y siguiendo el método B de la ASTM D2435 (2011). El material fue extraído en tubo Shelby de pared delgada de un depósito arcilloso a 12 m de profundidad ( $\sigma'_{v0} \gg 150$  kPa), clasificado como arcilla de alta plasticidad (CH). El nivel freático fue encontrado a 5 m de profundidad. Note que la relación de vacíos inicial,  $e_0$ , fue insertada en la primera fila de la Tabla 2.

Tabla 2. Ensayo edométrico por carga incremental.

$\sigma'_v$ [kPa]	$\epsilon_a$ [%]	$e$	Etapa
---	---	0.852	Carga
6	2.53	0.805	
12	2.76	0.801	
25	3.06	0.795	
50	3.38	0.789	
100	3.90	0.779	
200	4.76	0.764	
400	6.57	0.730	
800	11.17	0.645	Descarga
400	11.07	0.647	
200	10.84	0.651	
100	10.60	0.655	Carga
200	10.63	0.655	
400	10.99	0.648	
800	11.67	0.635	
1600	15.38	0.567	Descarga
800	15.18	0.570	
400	14.94	0.575	

**Nota:**  $\sigma'_v$ : esfuerzo vertical efectivo;  $\epsilon_a$ : deformación unitaria axial.

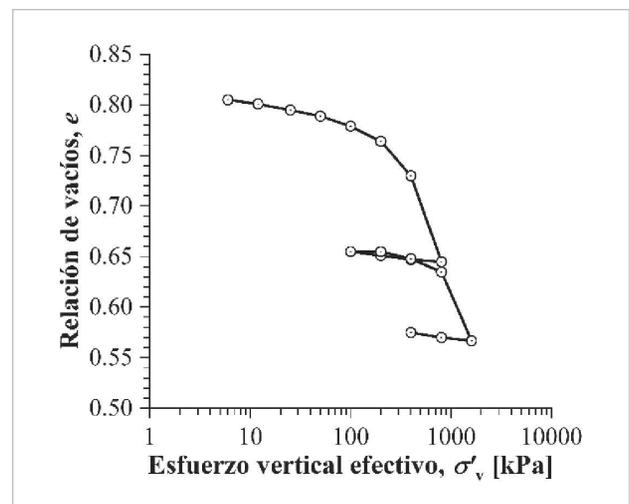


Figura 1. Ensayo edométrico por carga incremental.

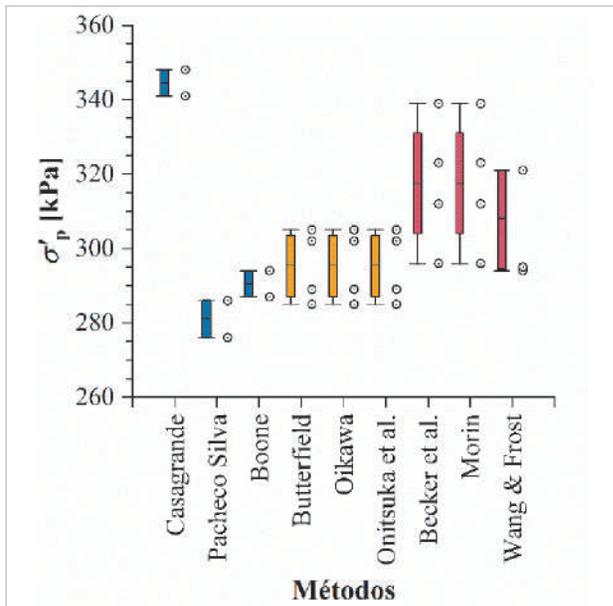
## RESULTADOS

La Tabla 3 y Figura 2 presentan los resultados de la evaluación de la variabilidad inherente en función del espacio de análisis de los métodos en estudio (i.e.,  $e\text{-log}\sigma'_v$ , bilogaritmos y energía de deformación). Debido a la cantidad de valores de  $\sigma'_p$  determinados, solo se ilustran un resultado por método en el Apéndice. El punto de máxima curvatura en el método de Casagrande fue determinado por diferenciación a través de un ajuste polinomial de cuarto orden sobre los puntos de la curva de compresibilidad igualado a cero. Este criterio es sugerido por Arvidsson & Keller (2004) para una determinación más objetiva de  $\sigma'_p$ .

Los resultados muestran que los métodos de Casagrande, Pacheco Silva y Boone, en el espacio de análisis  $e\text{-log}\sigma'_v$ , tienen la menor variabilidad inherente. Esto se debe a que estos métodos, a excepción del método de Boone, solo requieren la aproximación lineal del rango de compresión. Note en la Figura 2 que los valores de  $\sigma'_p$  determinados por el método de Casagrande se encuentran más alejados en comparación con la media aritmética de todos los valores de  $\sigma'_p$  obtenidos ( $\sigma'_{p, promedio} \approx 304$  kPa). Esta observación sugiere que el método de Boone es el más adecuado entre los tres. Los métodos bilogarítmicos de Butterfield, Oikawa y Onitsuka et al. dieron resultados iguales, lo que sugiere que pueden usarse indistintamente. Los métodos de Becker et al., Morin y Wang & Frost tienen la mayor variabilidad inherente, aunque el método de Wang & Frost es ligeramente mayor al de los métodos bilogarítmicos. Dado que estos métodos son más sensibles a la selección de incrementos de carga para aproximar los rangos de compresión y recompresión en líneas rectas, se recomienda emplear un mayor "juicio ingenieril" al momento de determinar  $\sigma'_p$ .

**Tabla 3. Variabilidad inherente en la determinación de  $\sigma'_p$ .**

Método	$\sigma'_p$ [kPa]	Rango [kPa]	Criterio
Casagrande	348	7	RC1
Casagrande	341	(2.1%)	RC2
Pacheco Silva	286	10	RC1
Pacheco Silva	276	(3.6%)	RC2
Boone	294		RC1-RR1
Boone	294	7	RC1-RR2
Boone	287	(2.4%)	RC2-RR1
Boone	287		RC2-RR2
Butterfield	289		RC1-RR3
Butterfield	305	20	RC1-RR4
Butterfield	285	(7.0%)	RC2-RR3
Butterfield	302		RC2-RR4
Oikawa	289		RC1-RR3
Oikawa	305	20	RC1-RR4
Oikawa	285	(7.0%)	RC2-RR3
Oikawa	302		RC2-RR4
Onitsuka et al.	289		RC1-RR3
Onitsuka et al.	305	20	RC1-RR4
Onitsuka et al.	285	(7.0%)	RC2-RR3
Onitsuka et al.	302		RC2-RR4
Becker et al.	323		RC1-RR3
Becker et al.	339	43	RC1-RR4
Becker et al.	296	(14.5%)	RC2-RR3
Becker et al.	312		RC2-RR4
Morin	323		RC1-RR3
Morin	339	43	RC1-RR4
Morin	296	(14.5%)	RC2-RR3
Morin	312		RC2-RR4
Wang & Frost	321		RC1-RR1
Wang & Frost	321	27	RC1-RR2
Wang & Frost	294	(9.2%)	RC2-RR1
Wang & Frost	295		RC2-RR2



**Figura 2.** Variabilidad inherente en la determinación de  $\sigma'_p$ .

Si bien la variabilidad inherente puede considerarse como un indicador mínimo de la dispersión de valores que puede obtenerse al utilizar un método para determinar  $\sigma'_p$ , este criterio no es absoluto para definir cuál es el mejor. Por lo tanto, se sugiere tomar estos resultados como punto de partida al momento de interpretar  $\sigma'_p$  con datos de ensayos edométricos por carga incremental.

## CONCLUSIONES

La variabilidad inherente en la determinación de  $\sigma'_p$  de suelos de nueve métodos generalmente usados en la comunidad geotécnica mediante ensayos edométricos convencionales fue examinada en este artículo. Dos criterios para la aproximación lineal del rango de compresión y cuatro para el rango de recompresión fueron analizados. Métodos analíticos y numéricos, a través del software de aplicación *pySigmaP*<sup>®</sup>, fueron empleados para obtener una evaluación más objetiva.

A partir de la información presentada aquí, se concluye que los métodos de Casagrande, Pacheco Silva y Boone tienen la menor variabilidad inherente, seguido por los métodos bilogarítmicos, i.e., método de Butterfield, Oikawa y Onitsuka et al. y finalmente por los métodos basa-

dos en energía de deformación, i.e., Becker et al., Morin y Wang & Frost.

El procedimiento aquí empleado para obtener la variabilidad inherente en la determinación de  $\sigma'_p$  puede extenderse a otras respuestas de compresibilidad en función del grado de sobreconsolidación y forma, como también a otros ensayos de laboratorio, como ser ensayo edométrico a velocidad de deformación constante (CRS), a velocidad de carga constante (CRL) y en cámara triaxial (pseudo  $K_0$ -TX).

## AGRADECIMIENTOS

Apoyo financiero fue proporcionado por COLCIENCIAS, Programa No. 757-2016. Datos de laboratorio fueron proporcionados por INTEINSA. El apoyo de estas instituciones es altamente apreciado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andresen, A., & Kolstad, P. (1979). The NGI 54 mm Sampler for Undisturbed Sampling of Clays and Representative Sampling of Coarser Materials. *International Symposium of Soil Sampling*, 13–21.
- Arvidsson, J., & Keller, T. (2004). Soil Precompression Stress. *Soil and Tillage Research*, 77(1), 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.01.003>
- ASTM D2435. (2011). *Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. ASTM.
- Becker, D. E., Crooks, J. H. A., Been, K., & Jefferies, M. G. (1987). Work as a Criterion for Determining In Situ and Yield Stresses in Clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 24(4), 549–564. <https://doi.org/10.1139/t87-070>
- Bjerrum, L. (1973). Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays, State of the Art Report. *Proc. of 8th ICSMFE, Moscow*, 109–159.
- Boone, S. J. (2010). A Critical Reappraisal of “Preconsolidation Pressure” Interpretations using the Oedometer Test. *Canadian Geotechnical Journal*, 47(3), 281–296. <https://doi.org/10.1139/T09-093>
- Butterfield, R. (1979). A Natural Compression Law for Soils (an advance on  $e - \log p'$ ). *Géotechnique*, 29(4), 469–

480. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.4.469>

Casagrande, A. (1936). The Determination of Pre-consolidation Load and its Practical Significance. *1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 3, 60–64.

Cho, W., Holman, T., Jung, Y., & Finno, R. (2007). Effects of Swelling During Saturation in Triaxial Tests in Clays. *Geotechnical Testing Journal*, 30(5), 378–386. <https://doi.org/10.1520/GTJ100797>

Clayton, C. R. I., Hight, D. W., & Hopper, R. J. (1992). Progressive Deconstructing of Bothkennar Clay. Implications for Sampling and Reconsolidation Procedures. *Géotechnique*, 42(2), 219–239. <https://doi.org/10.1680/geot.1992.42.2.219>

Clementino, R. V. (2005). Discussion of “An Oedometer Test Study on the Preconsolidation Stress of Glaciomarine Clays.” *Canadian Geotechnical Journal*, 42(3), 972–974. <https://doi.org/10.1139/t05-010>

Hight, D. W. (2001). Sampling Effects in Soft Clay: An Update on Ladd and Lambe (1963). *Soil Behavior and Soft Ground Construction*, 86–121. [https://doi.org/10.1061/40659\(2003\)4](https://doi.org/10.1061/40659(2003)4)

Ladd, C. C., & Degroot, D. J. (2003). Recommended Practice for Soft Ground Site Characterization. *12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 0–55.

Li, K. S. (1989). Work as a Criterion for Determining In Situ and Yield Stresses in Clays: Discussion. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(2), 324–326. <https://doi.org/10.1139/t89-041>

Lunne, T., Berre, T., Andersen, K. H., Strandvik, S., & Sjørsen, M. (2006). Effects of Sample Disturbance and Consolidation Procedures on Measured Shear Strength of Soft Marine Norwegian Clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(7), 726–750. <https://doi.org/10.1139/t06-040>

Montoya-Araque, E., Aparicio-Ortubé, A. J., Zapata-Medina, D. G., & Arboleda-Monsalve, L. G. (2020). *pySigmaP* (0.1.8). <https://pypi.org/project/pysigmaP/>

Morin, P. (1988). Work as a Criterion for Determining In Situ and Yield Stresses in Clays: Discussion. *Canadian Geotechnical Journal*, 25(4), 845–847. <https://doi.org/10.1139/t88-096>

Oikawa, H. (1987). Compression Curve of Soft Soils. *Soils and Foundations*, 27(3), 99–104. [https://doi.org/10.3208/sandf1972.27.3\\_99](https://doi.org/10.3208/sandf1972.27.3_99)

Olson, R. E. (1986). State of the Art: Consolidation Testing. In *Consolidation of Soils: Testing and Evaluation* (pp. 7–70). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/STP346065>

Onitsuka, K., Hong, Z., Hara, Y., & Yoshitake, S. (1995). Interpretation of Oedometer Test Data for Natural Clays. *Soils and Foundations*, 35(3), 61–70. <https://doi.org/10.3208/sandf.35.61>

Pacheco Silva, F. (1970). A New Graphical Construction for Determination of the Preconsolidation Stress of a Soil Sample. *Proceedings of the 4th Brazilian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, 225–232.

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (Third Edit). John Wiley & Sons.

Wang, L. B., & Frost, J. . D. (2004). Dissipated Strain Energy Method for Determining Preconsolidation Pressure. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(4), 760–768. <https://doi.org/10.1139/t04-013>

## APÉNDICE

### A.1. Resultados

A continuación se ilustran las determinaciones de  $\sigma'_p$ , un ejemplo por cada método evaluado.

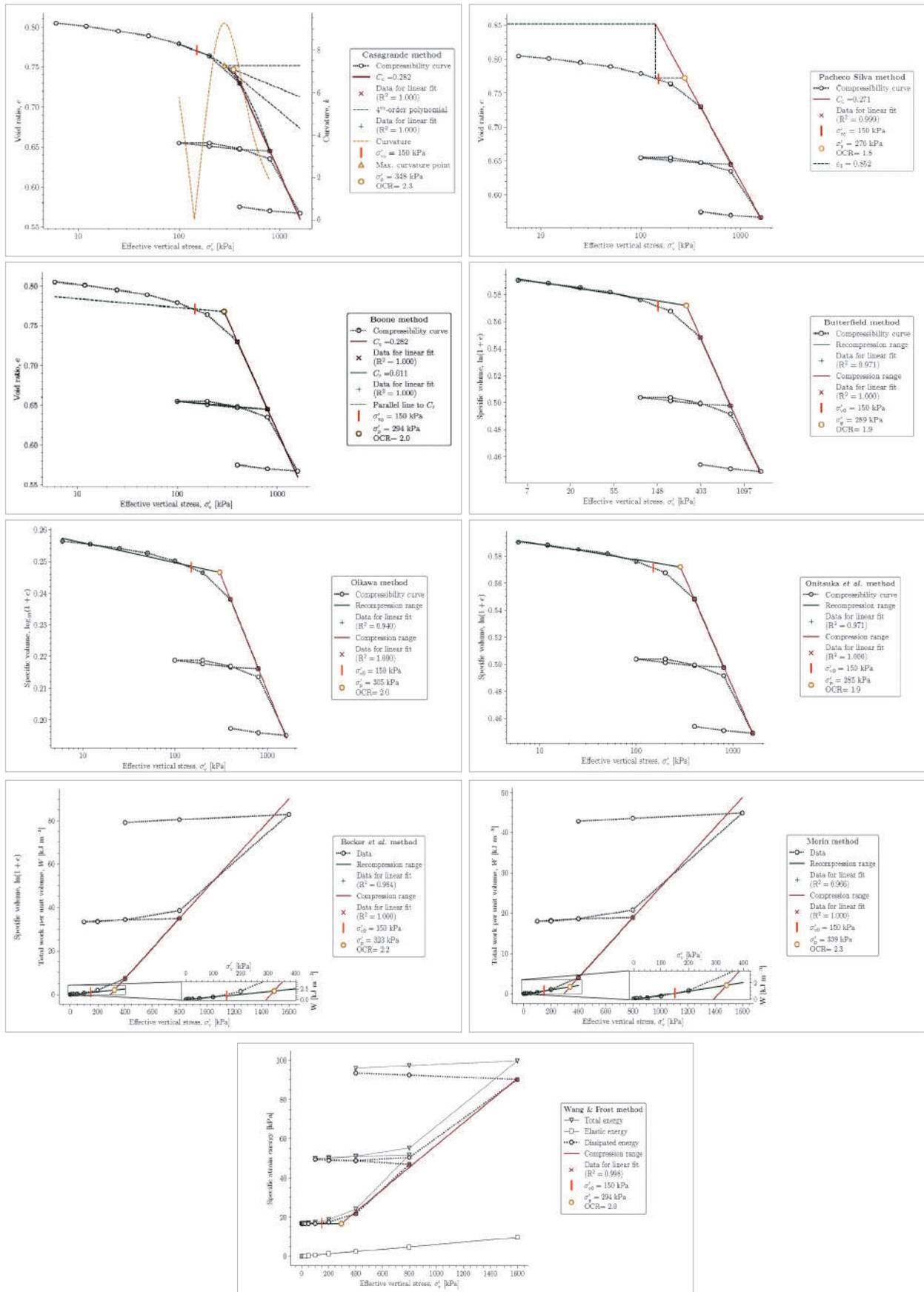


Figura A.1. Determinación de  $\sigma'_p$  por el método de Casagrande, Pacheco Silva, Boone, Butterfield, Oikawa, Onitsuka et al., Becker et al., Morin y Wang & Frost.

## A.2. Métodos para determinar $\sigma'_p$

A continuación se describen los procedimientos para determinar  $\sigma'_p$  de los métodos en estudio.

- Método de Casagrande: (1) en el espacio  $e\text{-log}\sigma'_v$ , estime el punto de máxima curvatura; (2) dibuje una línea tangente y horizontal a partir de este punto; (3) dibuje una línea bisectando el ángulo entre la línea horizontal y tangente; (4) extienda la porción lineal más empinada del rango de compresión hasta intersectar la bisectriz; y (5) el punto de intersección define  $\sigma'_p$ .
- Método de Pacheco Silva: (1) en el espacio  $e\text{-log}\sigma'_v$ , dibuje una línea horizontal a la altura de  $e_0$ ; (2) extienda la porción lineal del rango de compresión hasta intersectar la línea horizontal a la altura de  $e_0$ ; (3) a partir de este punto, dibuje una línea vertical hasta intersectar la curva de compresibilidad; (4) a partir de este punto, dibuje una línea horizontal hasta intersectar la extensión del rango de compresión; y (5) el punto de intersección define  $\sigma'_p$ .
- Método de Butterfield: (1) en el espacio  $\ln(1+e)\text{-ln}\sigma'_v$ , aproxime el rango de recompresión con una línea recta; (2) aproxime el rango de compresión con una línea recta; y (3) el punto de intersección define  $\sigma'_p$ .
- Método de Oikawa: (1) en el espacio  $\log(1+e)\text{-log}\sigma'_v$ , aproxime el rango de recompresión con una línea recta; (2) aproxime el rango de compresión con una línea recta; y (3) el punto de intersección define  $\sigma'_p$ .
- Método de Becker et al.: calcule el trabajo por unidad de volumen para cada incremento de carga,  $\Delta W$ , como:

$$\Delta W = \left[ \frac{\sigma'_{v,i} + \sigma'_{v,i+1}}{2} \right] (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \quad \text{Eq. (1)}$$

donde  $\varepsilon$  es la deformación natural incremental e  $i$  denota el incremento de carga. (1) en el espacio  $W\text{-}\sigma'_v$ , aproxime el rango de recompresión con una línea recta; (2) aproxime el rango de compresión

con una línea recta; y (3) el punto de intersección define  $\sigma'_p$ .

- Método de Morín: calcule el trabajo por unidad de volumen para cada incremento de carga,  $\Delta W$ , como:

$$\Delta W = \left[ \frac{\sigma'_{v,i} + \sigma'_{v,i+1}}{2} \right] \frac{(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)}{1 + e_0} \quad \text{Eq. (2)}$$

(1) en el espacio  $W\text{-}\sigma'_v$ , aproxime el rango de recompresión con una línea recta; (2) aproxime el rango de compresión con una línea recta; y (3) el punto de intersección define  $\sigma'_p$ .

- Método de Onitsuka et al.: (1) en el espacio  $\ln(1+e)\text{-log}\sigma'_v$ , aproxime el rango de recompresión con una línea recta; (2) aproxime el rango de compresión con una línea recta; y (3) el punto de intersección define  $\sigma'_p$ .
- Método de Wang & Frost: calcule la energía de deformación total incremental (ITSE),  $\Delta E_i^t$ , para cada incremento de carga como:

$$\Delta E_i^t = \left[ \frac{\sigma'_{v,i} + \sigma'_{v,i+1}}{2} \right] (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \quad \text{Eq. (3)}$$

la energía de deformación total acumulada (ATSE),  $E_i^t$ , como:

$$E_i^t = \sum_{k=1}^i E_k^t \quad \text{Eq. (4)}$$

la energía de deformación elástica acumulada (AESE),  $E_i^e$ , como:

$$E_i^e = \frac{C_r \sigma'_{v,i}}{1 + e_0} \quad \text{Eq. (5)}$$

donde  $C_r$  es el índice de recompresión en el ciclo descarga-recarga. Calcule la energía de deformación disipada acumulada (ADSE),  $E_i^d$ , como:

$$E_i^d = E_i^t - E_i^e \quad \text{Eq. (6)}$$

determine el intercepto, OR, y la pendiente del rango de compresión,  $m$ , realizando un ajuste lineal con los

últimos tres valores de  $\sigma'_{v,i}$  y  $E_i^d$ . Calcule la energía de deformación total acumulada corregida (ATSEC) como:

$$ATSEC = ATSE + OR \quad \text{Eq. (7)}$$

la energía de deformación disipada acumulada corregida (ADSEC) como:

$$ADSEC = ADSE + OR \quad \text{Eq. (8)}$$

y  $\sigma'_p$  como:

$$\sigma'_p = \frac{OR}{m} \quad \text{Eq. (9)}$$

(1) En el espacio SSE- $\sigma'_{v,i}$ , dibuje la pendiente,  $m$ ; (2) dibuje una línea horizontal a la altura de OR; y (3) el punto de intersección define  $\sigma'_p$ .

- Método de Boone: (1) en el espacio  $e$ - $\log \sigma'_{v,i}$ , localice el incremento de carga igual a  $\sigma'_{v0}$  para determinar la relación de vacíos *in situ*,  $e_{v0}$ . Si la curva de compresibilidad no incluye este incremento de carga, determine  $\sigma'_{v0}$  y  $e_{v0}$  por interpolación; (2) extienda la pendiente donde el índice de compresión entre dos incrementos consecutivos de carga es máximo,  $C_{c \max}$ . El esfuerzo más grande y la relación de vacíos más pequeña en  $C_{c \max}$  son  $\sigma'_{v \max}$  y  $e_{\min}$ , respectivamente; (3) determine  $C_r$  del ciclo descarga-recarga, dibuje una línea paralela en  $\sigma'_{v0}$  y calcule los valores del intercepto a lo largo del eje de la relación de vacíos para las líneas del índice de compresión,  $e_c$  y recompresión,  $e_r$ , como:

$$e_c = C_{c \max} \log (\sigma'_{v \max}) + e_{\min} \quad \text{Eq. (10)}$$

$$e_r = C_r \log (\sigma'_{v0}) + e_{v0} \quad \text{Eq. (11)}$$

(4) calcule y dibuje el punto de intersección de las líneas definidas por  $C_{c \max}$  y  $C_r$  (en  $\sigma'_{v0}$ ) como:

$$e_p = \left( \frac{e_c}{C_{c \max}} - \frac{e_r}{C_r} \right) / \left( \frac{1}{C_{c \max}} - \frac{1}{C_r} \right) \quad \text{Eq. (12)}$$

$$\sigma'_p = 10^{[(e_c - e_p) / C_{c \max}]} \quad \text{Eq. (13)}$$

donde  $e_p$  y  $\sigma'_p$  son la relación de vacíos al nivel del esfuerzo de preconsolidación y el esfuerzo de preconsolidación, respectivamente.

