

Validación de parámetros para el ensayo de consolidación a velocidad constante de deformación "CRS" para suelos de Cochabamba-Bolivia

Franz Pablo ANTEZANA LÓPEZ^{a,1} y Abel CRUZ CHUQUICHAMBI^a

^aLaboratorio de Geotecnia -Universidad Mayor de San Simón - Bolivia

Resumen. La consolidación rápida con la célula Rowe fue desarrollada para aplicar un aumento de la carga a una velocidad constante de deformación (CRS), siendo una alternativa para el edómetro con carga incremental (IL), lo que reduce considerablemente el tiempo de ejecución del ensayo de consolidación para determinar los parámetros de esfuerzo-deformación de suelos arcillosos cohesivos. En este estudio se analiza el comportamiento de la curva de consolidación de laboratorio, coeficiente de consolidación " c_v ", el coeficiente de compresión " c_c ", de muestras alteradas e inalteradas a diferentes velocidades de deformación bajo las recomendaciones de la norma ASTM D4186. De los resultados se ha observado una gran similitud tanto en la curva de laboratorio y en los parámetros de consolidación en arcillas con una característica de baja plasticidad de la ciudad de Cochabamba, aplicando las teorías propuestas por Wissa et al y K. Lee, y más aún si el parámetro β es inferior a 0,1 aplicando velocidades bajas.

Palabras Clave. Consolidación unidimensional, velocidad constante de deformación, coeficiente de cambio volumétrico, módulo confinado de compresión, conductividad hidráulica.

1. Introducción

El ensayo de consolidación a velocidad constante de deformación (CRS) es una alternativa rápida para estudiar la consolidación de un suelo en comparación del edómetro de carga variable (IL), también conocido como edómetro. Ambos ensayos permiten obtener los parámetros de deformación de un suelo de grano fino, sin embargo, existe una diferencia notable entre ambos; el tiempo de ejecución del ensayo, siendo que el CRS demora menos que el IL.

En 1969 Smith y Wahls dan a conocer la primera solución aproximada para el ensayo CRS basada en la teoría lineal de deformaciones pequeñas. Años más tarde [1] desarrollaron la teoría no lineal de deformaciones pequeñas que fue introducida en la norma *ASTM D4186* del año 1989. Luego de años de investigación se llegó a un avance con la teoría de las deformaciones largas [2], la cual actualmente está añadida a la norma *ASTM D4186* del año 2006.

¹ Correspondencia del autor: c/Manuela Rodríguez N° 2292; Cercado – Cochabamba, Bolivia; Telf: +591-79962515; E-mail: f.p.antezana@outlook.com

El método de consolidación (CRS) tiene algunos aspectos que deben ser tomados en cuenta; el suelo es homogéneo, cohesivo y saturado, las cuales son características de un suelo arcilloso. La variación de volumen tiene su origen en la relación del exceso de presión de poros, también se debe tomar en cuenta que el flujo es unidimensional y por último el coeficiente de consolidación " c_v " y el coeficiente de permeabilidad " k " permanecen constantes a lo largo del ensayo [3].

El método de análisis propuesto por [1] está restringido a un valor de relación de presión de poros entre 5 a 15%. Sin embargo, existe una posibilidad de que se presenten deformaciones largas, tema propuesto por [2]. Esta teoría tiene suposiciones idénticas a la anterior suposición de pequeñas deformaciones, que no es la realidad de los ensayos del CRS, donde la magnitud de deformaciones es tan alta como el 30 % y normalmente se encuentra cerca del 20%. También la definición de deformación en la mayoría de las teorías de pequeñas deformaciones no está bien definida y puede tener interpretaciones ambiguas.

2. Elección de la velocidad de deformación

Una elección adecuada de velocidad de deformación y su cálculo aún siguen siendo estudiadas. Según la norma *ASTM D4186* del 2006, la relación de presión de poros " $PPR=u_b/\sigma_v$ " debe encontrarse entre el 5% a 15% para la determinación adecuada del coeficiente de consolidación " c_v ", además se debe procurar que dicho valor no sea bajo para que no se establezcan grandes gradientes hidráulicos i . Asimismo, la presión de poros en la base de la muestra " u_b " juega un papel muy importante en la interpretación del ensayo CRS. Un valor de " u_b " igual o cercano a cero hará que las expresiones carezcan de sentido. Por otra parte, si la presión de poros se vuelve excesiva, las suposiciones hechas de las teorías no serán adecuadas debido a la distribución desconocida de la presión de poros que se asume.

En consecuencia, en este estudio se aplicaron velocidades de deformación en función a: i) del límite líquido del suelo [4] así como podemos ver en la *Tabla 1*, ii) al tipo de material y altura de la muestra (1% / h) [5], iii) del parámetro $\beta = (r \cdot H_o)/c_v$, que no debe ser mayor que 0,1 [2].

Tabla 1. Velocidad constante de deformación recomendada [4].

Límite líquido	Velocidad de deformación (%/min)
0 – 40	0,04
40 – 60	0,01
60 – 80	0,004
80 – 100	0,001
100 – 120	0,0004
120 – 140	0,0001

3. Programa experimental

3.1. Descripción de las muestras

Se extrajeron muestras de grano fino de cuatro sitios diferentes del departamento de Cochabamba, 3 en la provincia Cercado y 1 en la provincia Ayopaya. Sobre estas

muestras fueron desarrollados ensayos de caracterización según se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades físicas de las muestras estudiadas.

Características del suelo	M-01	M-02	M-03	M-04
	Compactada	Inalterada	Inalterada	Compactada
Gravedad específica	2.66	2.84	2.72	2.65
Clasificación SUCS	CL	ML	CL	CL
Límite líquido [%]	25.1	48.3	34.9	30.5
Límite plástico [%]	17.3	29.7	18.8	18.8
Índice de plasticidad [%]	7.8	18.6	16.1	11.7
% Menor a 0.0075 [mm]	69.8	83.7	88.7	83.8
% Menor a 0.002 [mm]	47.0	31.3	22.3	62.9
Actividad	0.16	0.59	0.72	0.18
Contenido de agua natural [%]	15.0	-	-	19.3
Peso unitario seco [kN/m³]	18.30	-	-	16.87

3.2. Procedimiento del ensayo

Los ensayos de consolidación CRS fueron desarrollados siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D 4186 del año 2006. Las muestras fueron preparadas en condiciones inalteradas y recompactadas, posteriormente se procedió a saturar las mismas a presiones entre 400-1000 [kPa]. Los ensayos CRS fueron desarrollados en una celda Rowe de consolidación, Figura 1.



Figura 1. Edómetro de consolidación, marca Wykeham and Farrace.

En el estudio se probaron distintas velocidades de deformación, en la Tabla 3 se muestra el resumen de los resultados: contenido de agua “w”, índice de vacíos “e”, saturación “S” y peso unitario “γ” para condiciones antes y después de los ensayos.

Tabla 3. Propiedades índices de las muestras en condiciones inicial y final.

Muestra	Ensayo	w_o [%]	e_o	S_o [%]	δ_{max} [mm]	$\gamma_d[seco]$ [kN/m ³]	w_f [%]	e_f	S_f [%]
M-01	IL	14,9	0,45	88,4	2,0	18,1	14,9	0,36	100
	CRS (0,01 mm/min)	16,4	0,46	95,4	2,0	17,9	14,9	0,31	100
	CRS (0,0076 mm/min)	14,7	0,44	88,7	2,3	18,1	15,0	0,27	100
	CRS. (0,003mm/min) (Drenado)	15,7	0,42	100	1,3	18,2	17,4	0,36	100
	CRS. (0,003 mm/min) (No drenado)	15,9	0,43	97,6	1,3	18,4	13,8	0,35	100
M-02	IL	32,6	0,82	100	4,4	15,3	29,6	0,59	100
	CRS (0,005 mm/min)	27,5	0,81	96,2	3,8	15,4	31,6	0,26	100
	CRS(0,00019mm/min) (Drenado)	27,6	0,81	96,9	2,4	15,3	24,7	0,58	100
	CRS.(0,00019 m/min) (No drenado)	29,3	0,83	100	2,3	19,7	20,3	0,61	100
M-03	IL	16,9	0,78	59,4	4,3	15,0	22,3	0,51	100
	CRS (0,01 mm/min)	16,0	0,78	55,8	2,9	15,0	23,8	0,24	100
	CRS (0,0076 mm/min)	16,1	0,75	58,3	3,2	15,2	31,8	0,46	100
M-04	IL	20,6	0,66	90,6	1,5	15,7	22,5	0,54	100
	CRS (0,015 mm/min)	17,9	0,69	68,7	2,5	15,4	18,7	0,48	100
	CRS (0,0076 mm/min)	21,9	0,65	95,8	2,6	15,8	17,9	0,40	100
	CRS (0,003 mm/min)	21,4	0,66	84,4	1,7	15,7	20,6	0,51	100

Nota. CRS: *Constant Rate of Strain* (Velocidad Constante de deformación)
IL: *Incremental Load* (Carga Incremental)

4. Parámetros de consolidación

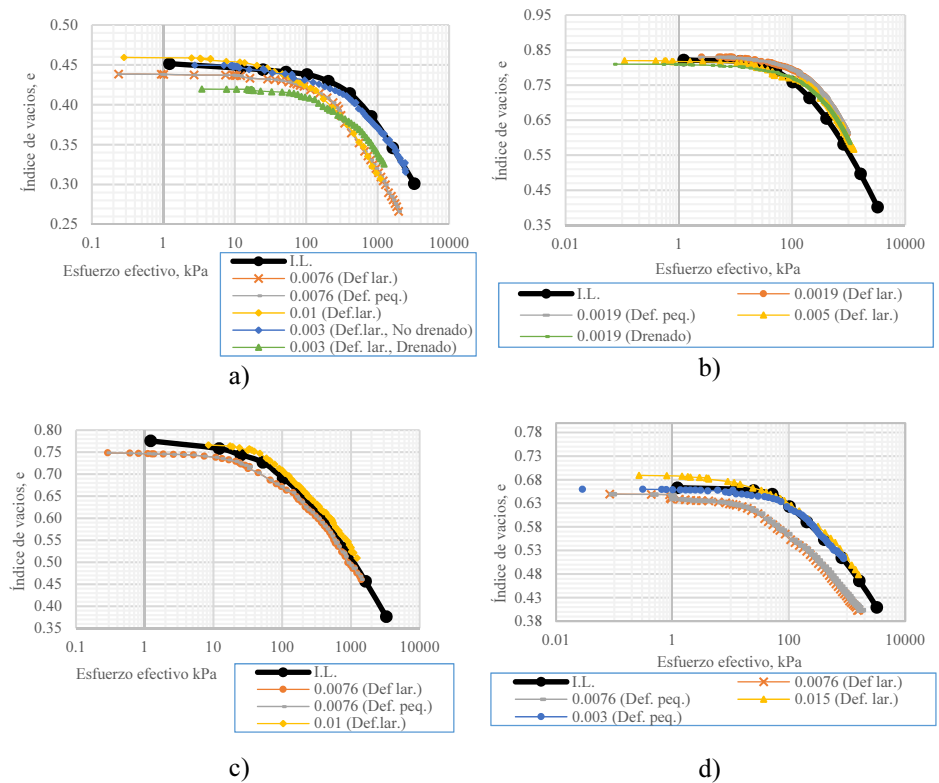
Las curvas de consolidación estudiadas fueron obtenidas con las formulaciones de la teoría de deformaciones pequeñas [1] y largas [2], Ecs. (1) y (2) respectivamente, que dependen del esfuerzo vertical aplicado y el exceso de presión de poros en la base de la muestra.

$$\sigma'_{(promedio)} = (\sigma_v^3 - 2 \cdot \sigma_v^2 \cdot u_b + \sigma_v \cdot u_b^2)^{1/3} \quad (1)$$

$$\sigma'_{(promedio)} = \sigma_v - \frac{2}{3} \cdot u_b \quad (2)$$

Las curvas de compresibilidad en muestras compactadas muestran mayor variabilidad con respecto a la curva obtenida realizando el método de carga incremental, la principal razón se debe a la variación del peso unitario y contenido de humedad.

A continuación, se muestra un resumen gráfico en la Figura 2 y resultados numéricos en la Tabla 4 de comparación de las curvas de consolidación en las cuales se puede apreciar que las curvas obtenidas mediante la aplicación de la teoría de las deformaciones largas en comparación con la teoría de las deformaciones pequeñas son similares.



Nota: Las velocidades están expresadas en [mm/min]

Figura 2. Curvas de consolidación de las muestras: a) M-01, b) M-02, c) M-03, d) M-04.

Tabla 4. Determinación del esfuerzo de preconsolidación a través de diferentes métodos.

Muestra	Ensayo	σ'_c	σ'_c	σ'_c	σ'_c	σ'_c	σ'_c
		Casagrande [kPa]	Log-Log [kPa]	Pacheco Silva [kPa]	Gráfica σ' vs. u_b [kPa]	Gráfica σ' vs. e_c [kPa]	Gráfica σ' vs. c_v [kPa]
M-01	IL	580,5	512,8	517,1	-	-	-
	CRS (0,01 mm/min)	223,1	215,2	210,5	-	-	-
	CRS (0,0076 mm/min)	223,0	298,7	278,2	250,0	269,2	269,6
	CRS (0,003mm/min) (Drenado)	567,1	498,7	523,4	-	-	-
	CRS (0,003 mm/min) (No drenado)	574,1	500,2	521,3	-	-	-
M-02	IL	394,0	384,1	290,7	-	-	-
	CRS (0,005 mm/min)	352,0	320,0	204,5	-	-	-
	CRS (0,0019 mm/min) (Drenado)	245,1	230,1	130,1	-	-	-
	CRS (0,0019 mm/min) (No drenado)	309,1	318,2	283,1	216,0	334,9	256,1
M-03	IL	349,5	362,4	212,1	-	-	-
	CRS (0,01 mm/min)	245,1	232,0	210,0	-	-	-
	CRS (0,0076 mm/min)	348,0	300,0	360,2	207,2	273,9	273,9
M-04	IL	254,7	276,0	279,5	-	-	-
	CRS (0,015 mm/min)	250,0	220,0	230,0	-	-	-
	CRS (0,0076 mm/min)	115,0	110,0	108,0	127,1	107,4	100,0
	CRS (0,003 mm/min)	254,3	241,8	224,7	-	-	-

En la Figura 3 se puede observar la curva esfuerzo – presión de poros se puede distinguir el esfuerzo de preconsolidación [4], es así que en los resultados de “ σ'_p ” obtenidos en el ensayo CRS fueron comparados con los valores “ σ'_p ” hallados en el ensayo IL, esta comparación indica que existe una diferencia de valores entre un rango de 10 – 15%, aproximadamente.

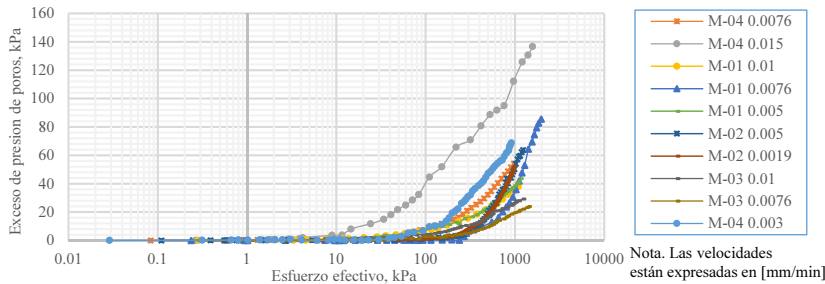


Figura 3. Comportamiento esfuerzo efectivo – exceso de presión de poros (condiciones no drenadas).

La Figura 4 muestra el comportamiento de la presión de poros registrada en la base u_b para las muestras drenadas durante todo el ensayo (M-01 y M-02 en estado drenado), se puede observar que hay un aumento de presión al aproximarse al esfuerzo de preconsolidación. Antes de llegar a dicho esfuerzo la presión baja considerablemente durante el ensayo, esto se debe al esfuerzo aplicado sobre la muestra y la válvula abierta que ocasiona disminución de presión, asimismo, cabe mencionar que se obtuvieron resultados similares debido a que el ensayo fue realizado de la misma manera que se realiza una consolidación con carga incremental con la variación de que la carga se aplica a una velocidad constante, teniendo deformaciones controladas y constantes.

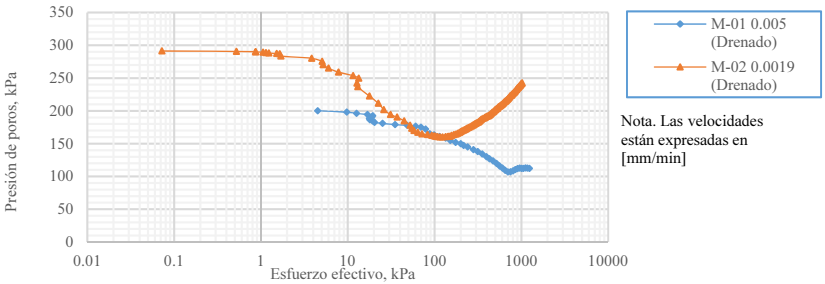


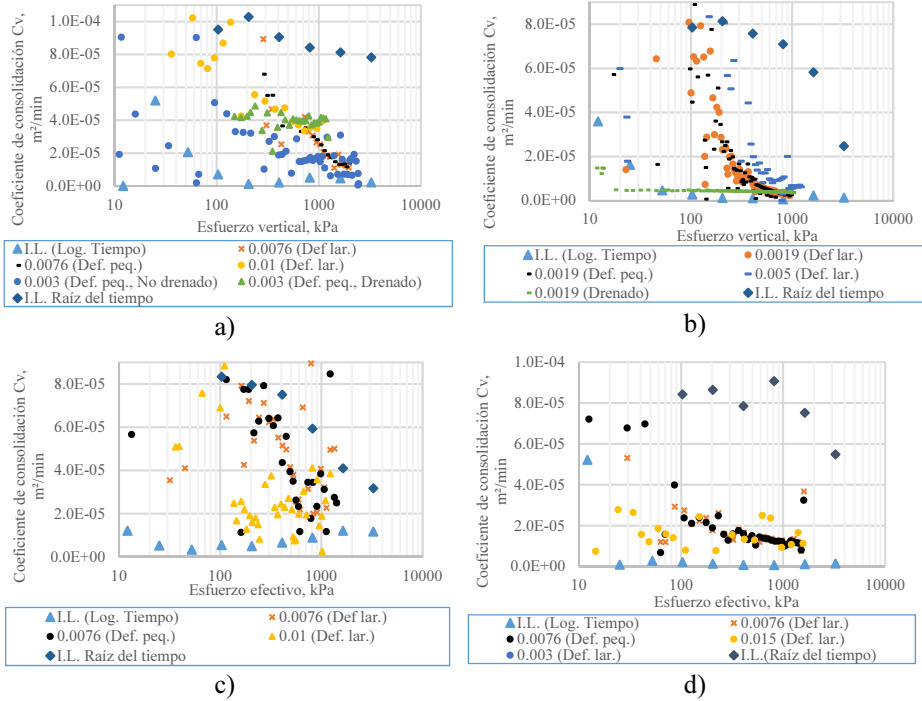
Figura 4. Comportamiento del esfuerzo efectivo – Presión de poros (condiciones drenadas).

4.1. Coeficiente de consolidación, c_v

Para los ensayos CRS se observa un comportamiento constante del esfuerzo de consolidación a partir del valor de 100 [kPa], más en algunos resultados como por ejemplo la muestra M-01 ensayada a una velocidad de 0,0076 [mm/min], el coeficiente de consolidación no es constante hasta sobrepasar el esfuerzo de preconsolidación, esto se debe al comportamiento de la presión de poros, ya que sufre un cambio brusco de pendiente al sobrepasar el exceso de presión de poros, tal es el caso de la muestra M-02 ensayada a una velocidad de 0,0019 [mm/min], cabe discutir que el coeficiente de

consolidación en todas las muestras tiende a ser constante al sobrepasar el esfuerzo de preconsolidación [6].

En Figura 5 siguientes se puede apreciar las gráficas esfuerzo efectivo – coeficiente de consolidación comparándolas con el ensayo de carga incremental interpretado por el método de la raíz cuadrada del tiempo y logaritmo del tiempo. La Ec. (3) se utiliza para encontrar el coeficiente de consolidación aplicando la teoría de deformaciones pequeñas, y la Ec. (4) mediante el método de deformaciones largas, ambos métodos muestran buenos resultados, tanto así con la teoría de consolidación de Terzaghi, utilizando el gráfico del logaritmo del tiempo.



Nota: Las velocidades están expresadas en [mm/min]

Figura 5. Comportamiento del coeficiente consolidación de las muestras, a) M-01, b) M-02, c) M-03, d) M-04.

$$c_v = \frac{H^2 \cdot \log\left(\frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}}\right)}{2 \cdot \Delta t \cdot \log\left(1 - \frac{u_b}{\sigma_{v(Prom.)}}\right)} \quad (3)$$

$$c_v = \left(\frac{H^2}{2 \cdot u_a}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_v}{\Delta t}\right) \quad (4)$$

La muestra M-02 de 0,0019 [mm/min] en condiciones no drenadas muestra una tendencia muy similar a los resultados interpretados con método Logaritmo del tiempo. Es importante apuntar que el comportamiento es similar al ensayo de carga incremental debido a que no se presentan incrementos excesivos de la presión de poros.

En la Tabla 5 se puede observar los resultados correspondientes a los parámetros de consolidación, es importante recalcar que el coeficiente de consolidación “ c_v ” fue determinado mediante dos métodos de interpretación (logaritmo del tiempo y raíz cuadrada del tiempo).

Tabla 5. Resultados obtenidos de los parámetros de consolidación.

Ensayo	c_v (log t) [m ² /min]	c_v (raiz t) [m ² /min]	c_c	β_{max}	m_v [m ² /MN]	k [m/s]
IL	$3,69 \times 10^{-6}$	$8,87 \times 10^{-5}$	0,15	-	0,04	$6,34 \times 10^{-10}$
M-01 CRS (0,01 mm/min) DL	$5,00 \times 10^{-5}$	-	0,25	$7,9 \times 10^{-3}$	0,06	$8,21 \times 10^{-10}$
CRS (0,0076 mm/min) DP	$7,85 \times 10^{-5}$	-	0,17	-	0,05	$9,29 \times 10^{-10}$
CRS (0,003 mm/min) (Drenado) DL	$4,63 \times 10^{-5}$	-	0,16	$8,0 \times 10^{-3}$	0,06	$5,20 \times 10^{-10}$
CRS (0,003 mm/min) (No drenado) DL	$1,02 \times 10^{-5}$	-	0,14	$4,0 \times 10^{-2}$	0,04	$6,53 \times 10^{-10}$
IL	$1,54 \times 10^{-6}$	$6,49 \times 10^{-5}$	0,32	-	0,16	$1,99 \times 10^{-9}$
M-02 CRS (0,005 mm/min) DL	$8,07 \times 10^{-6}$	-	0,28	$2,9 \times 10^{-2}$	0,17	$2,76 \times 10^{-10}$
CRS (0,0019 mm/min) (Drenado)	$4,45 \times 10^{-6}$	-	0,31	-	0,14	$7,22 \times 10^{-11}$
CRS (0,0019 mm/min) (No Drenado) DP	$3,96 \times 10^{-6}$	-	0,24	-	0,12	$7,74 \times 10^{-11}$
IL	$8,26 \times 10^{-6}$	$6,17 \times 10^{-5}$	0,27	-	0,17	$2,05 \times 10^{-9}$
M-03 CRS (0,01 mm/min) DL	$2,17 \times 10^{-5}$	-	0,27	$6,4 \times 10^{-2}$	0,18	$7,19 \times 10^{-10}$
CRS (0,0076 mm/min) DP	$3,79 \times 10^{-5}$	-	0,22	-	0,11	$6,48 \times 10^{-10}$
IL	$1,19 \times 10^{-6}$	$7,83 \times 10^{-5}$	0,19	-	0,12	$1,69 \times 10^{-9}$
M-04 CRS (0,001 mm/min) DL	$1,30 \times 10^{-5}$	-	0,20	$3,5 \times 10^{-2}$	0,07	$1,05 \times 10^{-11}$
CRS (0,0076 mm/min) DP	$1,55 \times 10^{-5}$	-	0,17	-	0,09	$2,28 \times 10^{-10}$
CRS (0,003 mm/min) DL	$7,33 \times 10^{-6}$	-	0,18	$9,6 \times 10^{-3}$	0,11	$1,51 \times 10^{-10}$

Nota. CRS: (Constat Rate of Strain), Velocidad constante de deformación DL: Deformaciones largas
IL: Carga incremental DP: Deformaciones pequeñas

Se observó que a velocidades superiores a 0,01 [mm/min] las curvas de consolidación son difícil distinguir el punto de mayor curvatura para determinar el esfuerzo de preconsolidación utilizando el método de Casagrande.

5. Conclusiones

La teoría de deformaciones largas y la no lineal de deformaciones pequeñas presentan resultados similares con respecto al ensayo de carga incremental.

Se recomienda desarrollar el ensayo de consolidación a velocidad constante de deformación el mayor tiempo posible con velocidades bajas tal como indica la Norma ASTM D 4186, debido a que el exceso de presión a velocidades altas genera un incremento mucho más alto como podemos observar en la Figura 3 (tal es el caso de la muestra M-04 a una velocidad de 0,015 mm/min).

Se debería añadir una velocidad de deformación recomendable en la ASTM para Limos (ML), debido a que sólo existe recomendaciones para suelos tipo: MH, CL, MH.

Referencias

- [1] Wissa, A.E.Z., Christian, J.T., Davis, E.H., and Heiberg, S. 1971. *Consolidation at constant rate of strain. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 97(SM10): 1393–1413.
- [2] Lee, K. (1981). *Consolidation with constant rate of deformation*. *Géotechnique*, 31(2), 215-229.
- [3] Gorman, C. T., Hopkins, T. C., Deen, R. C., & Drnevich, V. P. (1978). *Constant rate-of strain and controlled-gradient consolidation testing*. *Geotechnical Testing Journal*, 1(1), 3-15.
- [4] KH Head & RJ Epps (1988), “*Soil Laboratory Manual Vol 3. Effective stress*”, Engineer laboratory Equipment Limited.
- [5] ASTM D4186 / D4186M-06e1, *Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Saturated Cohesive Soils Using Controlled-Strain Loading*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [6] Castelo Rojas (1998), “*Ensayo de consolidación a velocidad constante de deformación*”, Universidad Mayor de San Simón, Proyecto de grado