

# AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DE CONSOLIDACIÓN MEDIANTE USO DE HERRAMIENTAS DE PROGRAMACIÓN



JOSE ENRIQUE PARIS GALLARDO

Director:

Ing. PhD. Jorge A. Rodríguez Ordoñez

Evaluador:

Ing. PhD. Carlos E. Rodríguez Pinto

TRABAJO DE GRADO  
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE CIVIL  
BOGOTÁ D.C. 11 DE JUNIO 2010

# TABLA DE CONTENIDO

<b>TABLA DE CONTENIDO .....</b>	<b>2</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>5</b>
<b>3. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>9</b>
<b>4. OBJETIVOS .....</b>	<b>10</b>
4.1 OBJETIVO GENERAL .....	10
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	10
<b>5. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>11</b>
<b>6. MARCO CONCEPTUAL .....</b>	<b>18</b>
6.1 EL ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL .....	18
6.2 EL EDÓMETRO.....	18
6.3 CONSOLIDACIÓN PRIMARIA.....	19
6.4 CONSOLIDACIÓN SECUNDARIA.....	19
6.5 MÉTODO DE CASAGRANDE.....	20
6.6 MÉTODO DE TAYLOR.....	22
<b>7. METODOLOGÍA DEL APLICATIVO.....</b>	<b>24</b>
7.1 PASO 1:FORMULARIO .....	25
7.2 PASO2:CÁLCULO DE $C_v$ .....	27
7.2.1 Procedimiento 1 (Curva U vs T de los datos de laboratorio).....	27
7.2.2 Procedimiento 2 (Curva U vs T de teórica).....	28
7.2.3 Procedimiento 3 (Cálculo de la distancia entre puntos).....	29
7.2.4 Procedimiento 4 (Ajuste mediante la iteración del parámetro $C_v$ ).....	30
<b>8. ANALISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>31</b>
8.1 RESULTADOS OBTENIDOS .....	31
8.1.1 Análisis del parámetro $C_v$ obtenido por el aplicativo .....	31
8.1.2 Análisis de la condición de saturación al inicio de la prueba .....	32
8.1.3 Análisis de los parámetros de permeabilidad .....	34
8.2 COMO INTERPRETAR LA CURVA DE DISPERSIÓN .....	38
8.3 INSPECCIÓN GRÁFICA DE LOS TIEMPOS TEÓRICOS $T_{90}$ Y $T_{50}$ .....	41
<b>9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>43</b>
9.1 CONCLUSIONES .....	43
9.2 RECOMENDACIONES .....	44
<b>10. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>45</b>

# 1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento y confiabilidad de factores del suelo como su deformabilidad y condiciones geológicas, son aspectos de fundamental importancia para el ingeniero interesado en caracterizar el comportamiento mecánico del suelo de fundación.

Pueden efectuarse pruebas de laboratorio sobre muestras inalteradas de arcilla saturada (D-2435 de la ASTM)<sup>1</sup> y (I.N.V.E-151-07)<sup>2</sup> para determinar el asentamiento por consolidación inducido por varios incrementos de carga, Terzaghi (1955) propuso los conceptos teóricos del proceso de consolidación, además diseñó el primer instrumento de medición del fenómeno al cual denominó edómetro. En la actualidad el edómetro de anillo flotante sigue siendo un instrumento popular en nuestro país y en el mundo para hacer un estimativo tanto de la proporción, como de la magnitud del asentamiento diferencial y/o total de una estructura o de un relleno, siempre y cuando el suelo de fundación sea del tipo cohesivo saturado y de baja permeabilidad.

El coeficiente de consolidación  $C_v$  indica el grado de asentamiento del suelo bajo un incremento de carga determinado y vinculado a la velocidad del mismo, el estado del arte en lo que concierne a la obtención del parámetro  $C_v$ , mediante un ensayo de consolidación unidimensional, plantea varias metodologías, entre las más comunes se encuentran los métodos de interpretación gráfica, como lo son el Método de Casagrande<sup>3</sup> y el Método de Taylor<sup>4</sup>, este último resulta ser el método de mayor acogida en nuestro país. El segundo capítulo de este documento invita al lector a reflexionar sobre como la precisión y exactitud en la obtención del parámetro  $C_v$ , mediante la interpretación visual de los tiempos teóricos de consolidación<sup>5</sup>  $t_{90}$  y  $t_{50}$ , pueden entenderse en varios modos y por ende admitir distintas interpretaciones del parámetro  $C_v$  por parte de quien se encuentra analizando los resultados del ensayo.

La presente propuesta de grado plantea la posibilidad de obtener mayor precisión, confiabilidad y rapidez en la estimación del parámetro  $C_v$ , mediante la implementación de un algoritmo de programación basado en la ecuación de la consolidación unidimensional para flujo vertical planteada por Terzaghi (1955), el parámetro  $C_v$  se interpreta como el resultado del ajuste entre la gráfica de grado de consolidación promedio  $U$  en función del factor tiempo  $T$  de laboratorio con la gráfica  $U$  vs  $T$  teórica<sup>6</sup>. Además este aplicativo computacional busca potenciar la información que se puede obtener mediante un ensayo de consolidación estándar, pues cuenta con la formulación teórica e interpretación

---

<sup>1</sup> ASTM International es una de las mayores organizaciones en el mundo que desarrollan normas voluntarias por consenso.

<sup>2</sup> Norma del instituto nacional de vías (INVIAS), título "consolidación unidimensional de suelos".

<sup>3</sup> También conocido como método del logaritmo de  $t$ , metodología sugerida por (D-2435-ASTM)

<sup>4</sup> También conocido como método de la raíz de  $t$ , metodología sugerida por (I.N.V.E-151-07)

<sup>5</sup> Parámetros que resultan fundamentales para el posterior cálculo del coeficiente  $C_v$  por medio de las metodologías de Taylor y de Casagrande respectivamente.

<sup>6</sup> Para conocer más acerca de esta formulación ver capítulo 7.2

gráfica de algunas propiedades índice del material tales como Permeabilidad, Porosidad, Humedad Natural y Peso Unitario entre otros, con el fin de de facilitar al ingeniero la diferenciación de suelos de una misma categoría, e interpretar las condiciones de estado del suelo y comportamiento físico.

Con el fin de validar la precisión del aplicativo la presente propuesta de investigación incluye el análisis mediante el aplicativo computacional, de 20 ensayos de consolidación unidimensional efectuados por el laboratorio de pruebas y ensayos la Pontificia Universidad Javeriana<sup>1</sup>, estos ensayos datan del año 2003 hasta el presente año y fueron interpretados mediante la metodología de Taylor.

Una importante firma de ingeniería requirió estudiar y caracterizar la permeabilidad un material de relleno para dos proyectos distintos con el fin de elaborar el diseño detallado de una barrera impermeable los resultados obtenidos por ensayos de permeabilidad con cabeza constante fueron comparados, con el valor de permeabilidad obtenido en función del módulo volumétrico  $M_v$  y el parámetro  $C_v$ , reportado por el aplicativo.<sup>2</sup> Finalmente se equipó el aplicativo computacional con la formulación de las ecuaciones teóricas de Taylor y Casagrande, lo cual permite al usuario inspeccionar de forma gráfica los tiempos teóricos de consolidación  $t_{90}$  y  $t_{50}$  correspondientes con el valor de  $C_v$  obtenido por el aplicativo<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> La presente propuesta de grado cuenta con la autorización para efectuar la revisión de estos resultados con el compromiso de usar los resultados (sin nombre de proyecto sin nombre de cliente y únicamente para ejecución del presente trabajo de grado) ver anexo 1.

<sup>2</sup> Los valores de permeabilidad obtenidos pueden ser consultados en el capítulo 8.1

<sup>3</sup>La herramienta para la inspección gráfica de los tiempos teóricos  $t_{90}$  y  $t_{50}$  puede ser consultada en el capítulo 8.2.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El presente capítulo ejemplifica como la precisión y exactitud de las metodologías de Taylor y Casagrande<sup>1</sup> se ven afectadas, debido a la necesidad de una interpretación visual de los resultados, como veremos dicha interpretación puede entenderse en varios modos y admitir distintas soluciones, lo cual ocasiona duda e incertidumbre, condición que facilita obtener como resultado valores erróneos en el cálculo de los tiempos teóricos de consolidación  $t_{90}$  y  $t_{50}$ , parámetros que resultan fundamentales para el posterior cálculo del coeficiente  $C_v$  por medio de las metodologías de Taylor y de Casagrande, respectivamente. En particular esta ambigüedad en la interpretación de la metodología de Taylor radica en la formulación descrita por la primera sentencia del método citada como se expone a continuación:

*“Se puede emplear un procedimiento que requiere de un gráfico de deformación contra  $\sqrt{t}$  para determinar los puntos del 0 y 100 % de consolidación, así como el coeficiente de consolidación para cada incremento. La parte inicial de la curva se aproxima mediante una línea recta<sup>2</sup>. Se extrapola la línea hasta  $t=0$ . La correspondiente ordenada de deformación representa el 0% de la consolidación primaria”.*

La sintaxis de esta sentencia da lugar a la posibilidad de múltiples interpretaciones de la mejor recta que se puede trazar en la parte inicial de la curva, pues esta no necesariamente es la recta que contenga la mayor cantidad de puntos, o la mejor recta tangente, inclusive el porcentaje de ampliación<sup>3</sup>, con el que se encuentre trabajando la hoja de cálculo, influye de manera significativa en el trazo de esta línea recta que se extrapola hasta  $t=0$ .

A continuación se expone un análisis de la inexactitud y errores de apreciación encontrados para un ensayo de consolidación unidimensional realizado a una muestra de arcilla de la ciudad de Bogotá<sup>4</sup>, extraída a una profundidad de entre (3,8-4,4) metros medidos desde la superficie, para el primer ciclo de incremento de carga<sup>5</sup>, los resultados del ensayo fueron analizados mediante la metodología de Taylor ver (Figura 1).

<sup>1</sup> Las metodologías de Taylor y Casagrande se describen en el capítulo 6.5 y 6.6, como lo reporta el documento (I.N.V.E-151-07).

<sup>2</sup> Sumado a la interpretación visual de quien ejecuta el método, la sentencia subrayada destaca como la metodología de Taylor basa la precisión de su ajuste únicamente en una aproximación de la parte inicial de la curva, segmento que representa sólo un segmento de la información del ensayo.

<sup>3</sup> También conocido como zoom.

<sup>4</sup> Para consultar la información reportada por el ensayo remítase al archivo magnético 086-02 en el Cd anexo a este documento “anexo I”.

<sup>5</sup> El esfuerzo ejercido fue de  $(0,41) \text{ Kg/cm}^2$ , la escala de la figura1 no presenta ninguna modificación, con respecto al reporte del laboratorio de pruebas y ensayos de la Universidad Javeriana.

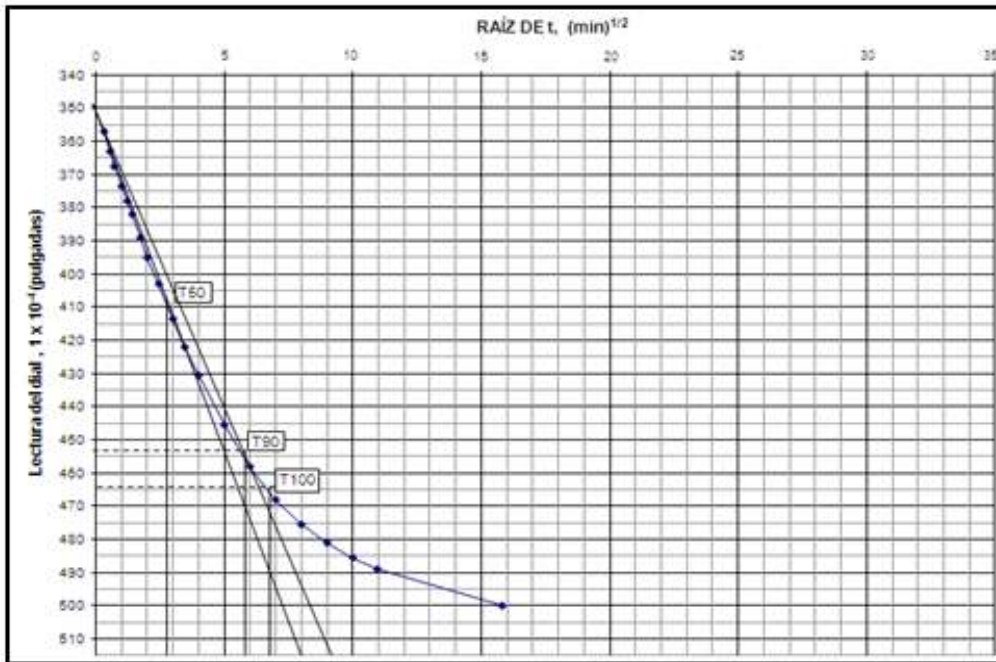


Figura 1: Método de Taylor sin modificar

Los valores de tiempo en función del porcentaje de deformación,  $t_{90}$  y  $t_{100}$  obtenidos resultan ser menores al valor esperado, pues como se puede apreciar la tendencia de la curva de deformación continua sin mayor cambio después del valor  $t_{100}$  estimado, motivo por el cual se puede inferir que en el ejemplo anterior no se encuentra correctamente definida la transición entre la consolidación y primaria y la consolidación secundaria del material. El ejercicio se repitió con los mismos datos pero cambiando la escala y el zoom de la hoja de cálculo ver Figura 2.

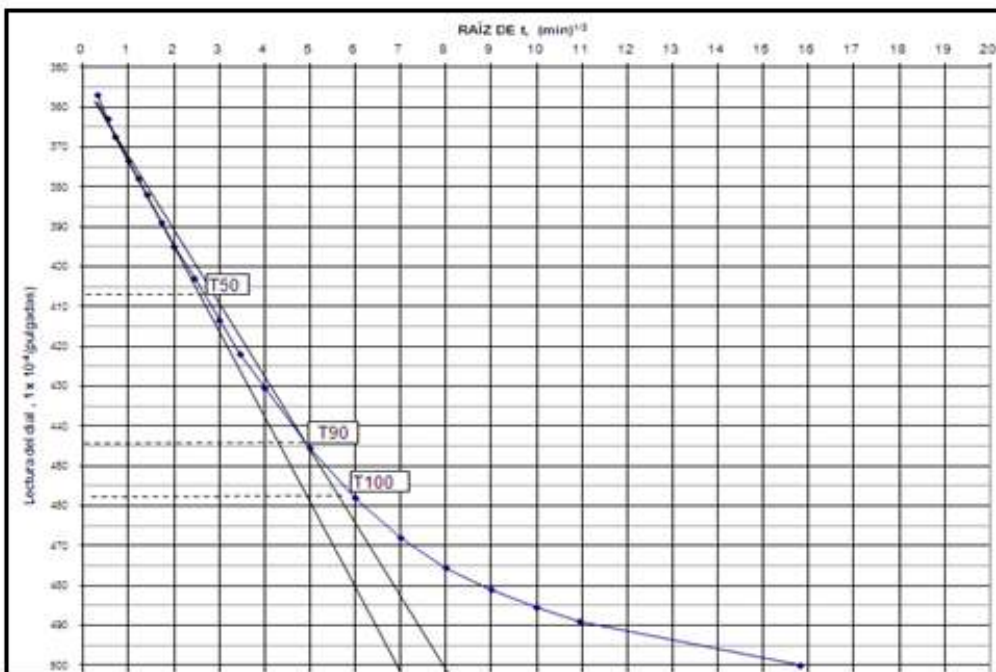


Figura 2: Método de Taylor con escala y zoom modificados

Finalmente se repitió una vez más el procedimiento de interpretación del parámetro  $C_v$ , con los mismos datos pero graficando los valores obtenidos en función del grado de consolidación promedio (U) Figura 3.

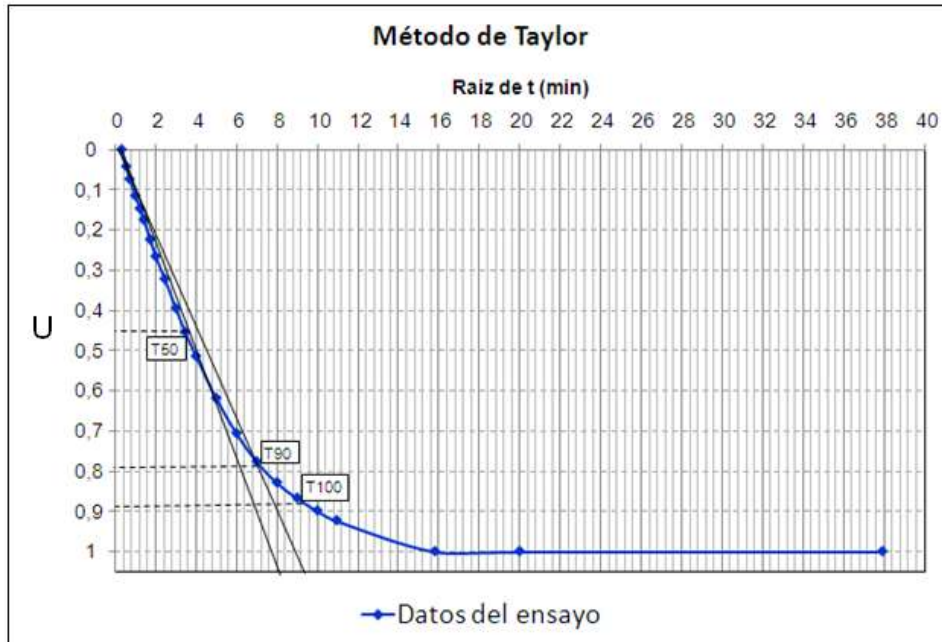


Figura 3: Método de Taylor expresado como U contra raíz del tiempo

La inexactitud en interpretación del valor de tiempo en función del porcentaje de deformación  $t_{90}$  se transmite en forma directa al cálculo del parámetro  $C_v$  obtenido mediante la metodología de Taylor, pues este resulta de resolver la Ecuación 1, donde H representa el espesor de la muestra en metros o pies para una muestra con drenaje doble, en particular  $H=2,413\text{cm}$  para la muestra analizada.

$$C_v = \frac{0.21 * H^2}{t_{90}}$$

Ecuación 1 : Ecuación de Taylor para cálculo de  $C_v$  a partir de  $t_{90}$ .

La tabla1 presenta los valores obtenidos de  $t_{90}$ , y su correspondiente valor de  $C_v$  para las tres interpretaciones propuestas en las figuras 1,2 y 3.

		$\sqrt{t}$ (min)	t (seg)		$\text{cm}^2/\text{s} * 10^{-2}$
Figura 1	$t_{90}$	5	1500	$C_{v90}$	0,0815
Figura 2	$t_{90}$	6	2089	$C_{v90}$	0,0585
Figura 3	$t_{90}$	7	2940	$C_{v90}$	0,0416

Tabla 1: Valores obtenidos de  $C_v$  según la interpretación de la metodología de Taylor planteada en las figuras 1,2 y 3.

En el ámbito académico es ampliamente reconocido el hecho de que para una misma muestra de suelo sometida a un ensayo de consolidación, se pueden interpretar distintos valores para el coeficiente  $C_v$  si se comparan los resultados obtenidos mediante el método de Taylor con el de Casagrande.<sup>1</sup> El procedimiento requerido para la interpretación de la metodología de Casagrande está descrito por las siguientes sentencias:

*“Se determina el asentamiento que representa el 100% de la consolidación primaria para cada incremento de carga. Se dibuja primero la línea recta a través de los puntos que representan las lecturas finales y que exhiben una tendencia recta tangente a la parte más pronunciada de la curva de logaritmo de tiempo vs asentamiento. La intersección representa el asentamiento primario. A continuación se determina la deformación que representa el 0 % de la consolidación primaria. Para ello se seleccionan dos tiempos ( $t_B$  y  $t_A$ ) que tengan una relación de 1 a 4 ( $t_A=4t_B$ ), de tal manera que la deformación correspondiente al mayor de los dos tiempos será mayor que  $1/4$ , pero menor que  $1/2$  del cambio total de la deformación para el incremento de carga<sup>2</sup>.”*

La inexactitud en interpretación del valor de tiempo en función del porcentaje de deformación  $t_{50}$ , se transmite en forma directa al cálculo del parámetro  $C_v$ , pues este resulta de resolver la Ecuación 1, donde H representa el espesor de la muestra en metros o pies para una muestra con drenaje doble.

$$C_v = \frac{0.05 * H^2}{t_{50}}$$

Ecuación 2 : Ecuación de Casagrande para cálculo de  $C_v$  a partir de  $t_{50}$ .

Sumado a la incertidumbre e imprecisión que acarrea la necesidad de una interpretación visual de los resultados del ensayo de consolidación, ya sea mediante la metodología de Taylor o de Casagrande, resulta de suma importancia señalar como estos métodos gráficos no tienen en consideración toda la información del ensayo de consolidación unidimensional. Como vimos el método de Taylor basa la precisión de su resultado en el segmento inicial de la curva de consolidación, Mientras que la metodología de Casagrande confía su resultado en la parte final de la curva de consolidación y dos puntos del segmento inicial. La presente propuesta de grado, sugiere el uso de una metodología que no depende de la interpretación visual de los resultados, y que además tenga en consideración todos los resultados obtenidos mediante el ensayo de consolidación unidimensional.

<sup>1</sup>Se sabe que el  $C_v$  reportado por el método de Taylor, resulta sobrestimado con respecto al de Casagrande Reddy (2006)

<sup>2</sup> el subrayado es propio, pretende resaltar las sentencias que por su sintaxis, permiten distintas interpretaciones por parte del usuario.

### 3. JUSTIFICACIÓN

En su ejercicio profesional el ingeniero civil a menudo se enfrenta con el desafío de diseñar y/o construir sobre un suelo blando<sup>1</sup>, este tipo de suelo usualmente ha sido depositado en un ambiente aluvial, lacustre o marino. A nivel de fundación una de las principales consideraciones que debe realizar el ingeniero para garantizar un buen diseño, consiste en estimar la cantidad y velocidad en que se espera se produzca el asentamiento del suelo además de un análisis de estabilidad para una condición no drenada del material. A su vez es necesario realizar una predicción de la rata de consolidación para cada una de las etapas de construcción, el coeficiente de consolidación ( $C_v$ ) permite obtener el grado de asentamiento esperado para un determinado tiempo ( $t$ ) en una condición de drenaje vertical.

Un aplicativo computacional que calcule  $C_v$  mediante una metodología que no dependa de la interpretación visual de los resultados, y que además tenga en consideración todos los resultados del ensayo de consolidación unidimensional, supone una mejora significativa en la precisión, exactitud y velocidad de interpretación de los resultados del ensayo de consolidación unidimensional, además este aplicativo ofrece la posibilidad de potenciar la cantidad de información que se reporta en un informe convencional del ensayo.

Como se mencionó en el capítulo introductorio haciendo uso de los resultados de un ensayo de consolidación unidimensional, el aplicativo computacional ofrece la posibilidad de consultar para cada incremento de carga al que se someta la muestra las siguientes propiedades índice y parámetros de diseño:

- Relación de vacíos ( $e$ )
- Porosidad ( $n$ )
- Humedad natural ( $w_n$ )
- Peso unitario ( $\gamma_t$ )
- Altura de la muestra ( $H$ )
- Permeabilidad ( $k$ )
- Modulo volumétrico ( $M_v$ )
- Esfuerzo efectivo ( $\sigma'$ )
- Coeficiente de consolidación ( $C_v$ )
- Curva de compresibilidad.
- Relación de fase del material.
- Retro cálculo a la metodología de Taylor.
- Retro cálculo a la metodología de Casagrande.

---

<sup>1</sup> Existe una condición de terreno blando cuando la construcción carga un suelo cohesivo de cimentación más allá de su esfuerzo de pre-consolidación.

## 4. OBJETIVOS

### 4.1 Objetivo General

Formular e implementar un método para la interpretación de datos del ensayo de consolidación unidimensional basado en un procedimiento de ajuste que utilice todos los datos del ensayo.

### 4.2 Objetivos Específicos

- Implementar y validar un modelo matemático que ajuste la gráfica de Grado de consolidación  $U$  en función del factor tiempo  $T$  de laboratorio con la gráfica  $U$  vs  $T$  teórica mediante el uso del coeficiente de consolidación  $C_v$ .
- Desarrollar y validar la precisión de un aplicativo computacional que ajuste la gráfica de Grado de consolidación  $U$  en función del factor tiempo  $T$  de laboratorio con la grafica  $U$  vs  $T$  teórica mediante el uso del coeficiente de consolidación  $C_v$ .

## 5. MARCO TEÓRICO

Según Das (2006) las consideraciones a tener en cuenta para la selección de cualquier tipo de cimentación son: (a) la carga de la superestructura; (b) las condiciones del subsuelo; (c) el asentamiento tolerable deseado, sobre este último aspecto sabemos que todos los materiales experimentan una deformación cuando son sujetos a un cambio en sus condiciones de esfuerzo inicial Badillo y Rodríguez (1981), cuando el esfuerzo sobre un estrato de arcilla saturada se incrementa, la presión de poro en la arcilla se incrementará y debido a la condición de baja permeabilidad que caracteriza a las arcillas se requerirá de algún tiempo para que la presión de poro se disipe y el incremento de esfuerzo ejercido se transfiera a la estructura del suelo<sup>1</sup>.

Los resultados obtenidos a partir del ensayo de consolidación unidimensional pueden verse enormemente afectados por la pérdida de las características originales de la muestra, es necesario proceder con extrema precaución en la selección y preparación para minimizar los posibles daños, producto de la extracción y manipulación<sup>2</sup> Según DeGroot (2003) en arcillas inalteradas el valor calculado de  $C_v$ , calculado en el segmento de recompresión resulta ser de 5 a 10 veces el valor calculado de  $C_v$  en el segmento de compresión virgen, fenómeno asociado a un descenso el valor de módulo volumétrico en la zona de recompresión del material.<sup>3</sup>

En el ejercicio profesional durante la etapa en que se analiza el asentamiento del suelo, es una práctica común ignorar los asentamientos iniciales, los cuales están asociados con la condición no drenada del material. Esta consideración resulta razonable en la mayoría de los casos, sin embargo para el caso de arcillas altamente plásticas (CH), y arcillas de tipo orgánico (OH) suelos de fundación con bajos factores de seguridad que presenten una escasa rata de deformación, según Ladd (1991) este tipo de condiciones son propicias para asentamientos excesivos durante el proceso de carga o fenómenos de creep. La potencial existencia de compresión secundaria durante la consolidación primaria resulta controversial pues a la fecha se reportan dos teorías opuestas y ampliamente reconocidas, Mesri et al, (1994) asumen que la compresión primaria solo puede ocurrir al final de la compresión secundaria mientras que Leroueil (1994) afirma que la compresión secundaria se produce simultáneamente con la compresión primaria.

<sup>1</sup> Este incremento gradual de esfuerzo efectivo en el estrato de arcilla que ocasiona asentamientos durante cierto tiempo se define como consolidación.

<sup>2</sup> "Recientemente se ha hecho énfasis en la determinación in situ de las propiedades de resistencia y deformación del suelo debido a que así se evita la perturbación de las muestras durante la exploración de campo sin embargo bajo ciertas circunstancias no todos los parámetros pueden determinarse debido a motivos económicos o de otra índole" Braja M. Das (2006).

<sup>3</sup> El lector podrá evidenciar este fenómeno mediante el aplicativo computacional haciendo uso de la gráfica ( $C_v$  contra  $\sigma'$ ).

La solución ecuación de la consolidación unidimensional asume dos hipótesis en su formulación Badillo y Rodríguez (1981), (1) tanto el agua como las partículas de suelo son totalmente incompresibles, (2) el agua llena totalmente los vacíos del suelo; es decir, que el suelo se encuentra totalmente saturado, la primera hipótesis puede considerarse muy cercana a la realidad sin embargo en el caso de la segunda hipótesis, se recalculó el parámetro de saturación del material mediante un análisis de relación de fase, tomando como valores de entrada el contenido de humedad ( $W_n$ ), El peso unitario total ( $\gamma_t$ ) y el Peso específico relativo ( $G_s$ )<sup>1</sup>, en la mayoría datos procesados se encontraron resultados saturación menores al cien por ciento o que sobrepasan el cien por ciento, este tipo de inconsistencias en el valor de saturación de la muestra, están asociadas a que el valor o tiempo de la precarga destinada a saturar la muestra no fueron suficientes y a errores de medición respectivamente<sup>2</sup>.

En el caso de las muestras que no estaban completamente saturadas, en particular durante los primeros datos del ensayo, en estos casos la teoría de la consolidación unidimensional de Terzaghi no sería estrictamente aplicable, en esta situación se observa una acentuada diferencia entre lo calculado con la teoría y lo medido<sup>3</sup>, fenómeno que se va atenuando al transcurso del ensayo ya que al aumentar la presión y reducirse el volumen eventualmente las muestras quedan saturadas.

A continuación se reporta la formulación que describe la ecuación diferencial de la consolidación unidimensional bajo flujo vertical, según la interpretación de la formulación descrita por Badillo y Rodríguez (1981). La diferencia entre la cantidad de agua que sale por la cara I de una muestra de suelo del tipo fino cohesivo saturado de espesor  $dt$  sometido a un incremento de carga vertical  $P_1$  a  $P_2$ , y la que entra por la cara II en el tiempo  $dt$ , se representa en forma gráfica mediante la (Figura 4)<sup>4</sup>.

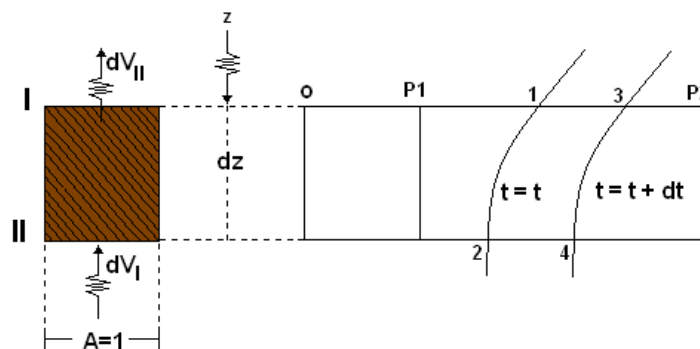


Figura 4: Distribución de presiones en los tiempos  $t$  y  $t+dt$

<sup>1</sup> Parámetros obtenidos en el reporte del ensayo.

<sup>2</sup> Para profundizar sobre este procedimiento se recomienda consultar el capítulo 8.1.2

<sup>3</sup> Mediante la inspección de la curva de dispersión de todos ciclos de carga a los que fue sometida la muestra es posible apreciar este fenómeno, el capítulo 8.1 reporta las muestras que en su interpretación mediante el aplicativo evidenciaron este fenómeno.

<sup>4</sup> Por simplicidad en los cálculos se considera que las fronteras superior e inferior del elemento cubren un área unitaria.

Partiendo de la hipótesis teórica de que esta diferencia entre la cantidad de agua que es evacuada por las caras o superficies I y II es igual al cambio de volumen en compresión o expansión de la muestra para un mismo instante de tiempo, y de que esta cantidad de agua depende de los gradientes hidráulicos actuantes en ambas superficies, los cuales son proporcionales a la pendiente de las graficas de distribución de presión en los puntos 1,2,3 y 4 ilustrados en la distribución de presiones en los tiempos  $t$  y  $t+dt$ , el gradiente hidráulico que se define como la pérdida de carga por unidad de longitud en el punto 1 queda descrito por:

$$i_1 = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (5-1)$$

*“La notación con derivada parcial obedece a que ahora  $u$  es función tanto de  $z$  como de  $t$ , pero solo su variación con respecto a  $z$  interesa para definir el gradiente hidráulico. El coeficiente  $1/\gamma_w$  se utiliza para transformar la presión  $u$  a carga hidráulica expresada como altura de agua. El gradiente  $i_1$  es representativo para toda la cara superior del elemento de la (Figura 4) en el tiempo  $t$ .”<sup>1</sup>*

Análogamente, el gradiente hidráulico en el punto 2, es descrito por:

$$i_2 = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial z} \left( u + \frac{\partial u}{\partial z} dz \right) \quad (5-2)$$

La formulación descrita por Terzaghi supone valida la ley de Darcy, luego la cantidad de agua en unidades de volumen, que sale del elemento por la superficie I en el instante de tiempo  $dt$ , se describe como:

$$dV_I = \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} dt (A = 1) \quad (5-3)$$

Donde  $K$  representa la permeabilidad del material, mediante el mismo procedimiento lógico descrito en (5-3) la cantidad de agua que entra por la superficie II en el instante de tiempo  $dt$ , se describe como:

$$dV_{II} = \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial z} \left( u + \frac{\partial u}{\partial z} dz \right) dt (A = 1) \quad (5-4)$$

La diferencia entre los volúmenes  $dV_I$  y  $dV_{II}$  representan cantidad neta de fluido que es expulsado del material durante el proceso de consolidación unidimensional bajo flujo vertical:

$$\Delta dV = dV_I - dV_{II} = \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} dt - \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial z} \left( u + \frac{\partial u}{\partial z} dz \right) dt = - \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz dt \quad (5-5)$$

Si se repite el anterior procedimiento para, los puntos 3 y 4 de la curva correspondiente al tiempo  $t + dt$  de la (Figura 4), obtenemos el mismo resultado

$$\text{Gradiente hidráulico en 3} = i_3 = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial z} \left( u + \frac{\partial u}{\partial t} dt \right) \quad (5-6)$$

<sup>1</sup> Tomado de Juárez Badillo (1981)

$$\text{Gradiente hidráulico en 4} = i_4 = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial z} \left( u + \frac{\partial u}{\partial t} dt + \frac{\partial u}{\partial z} dz + \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial z} dt dz \right) \quad (5-7)$$

$$\text{Cantidad de fluido neta entre 3-4} = \Delta dV = - \frac{h}{\gamma_w} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz + \frac{\partial^3 u}{\partial t \partial z^2} dt dz \right) dz \quad (5-8)$$

$$\text{Resultando:} \quad \Delta dV = - \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz dt \quad (5-9)$$

La ecuación (5-9) representa el cambio de volumen en la muestra de espesor  $dz$  para un tiempo  $dt$ . La formulación entre el cambio en la relación de vacíos  $e$  y el cambio de volumen  $dz$  de un elemento sometido al ensayo de consolidación unidimensional bajo flujo vertical se describe como<sup>1</sup>:

$$\Delta dV = \frac{de}{1+e} dz \quad (5-10)$$

El coeficiente de compresibilidad  $a_v$  se define como la relación entre el cambio de la relación de vacíos y el cambio en el incremento de carga actuante  $dp$ :

$$a_v = \frac{de}{dp} \quad (5-11)$$

La ecuación (5-9) se puede expresar en función del coeficiente de compresibilidad y  $d\bar{p}$  que representa el cambio de esfuerzo efectivo sobre la estructura de suelo a una profundidad constante  $z$ , que haya tenido lugar en el tiempo  $dt$ .

$$de = a_v d\bar{p} \quad (5-12)$$

Sustituyendo (5-12) en (5-10) se tiene:

$$\Delta dV = \frac{a_v}{1+e} d\bar{p} dz \quad (5-13)$$

Para el plano descrito por la superficie del elemento del suelo de espesor  $dz$ , entre los tiempos  $t$  y  $t + dt$  entre los puntos 1 y 3, la ecuación (5-14) describe el incremento en el esfuerzo efectivo en relación con la diferencia de presiones  $u$  entre este par de puntos para el tiempo  $dt$ .

$$d\bar{p} = -du = - \frac{\partial u}{\partial t} dt \quad (5-14)$$

Despejando la expresión (5-14) en (5-13) tenemos:

$$\Delta dV = - \frac{a_v}{1+e} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} dt \cdot dz \quad (5-15)$$

Como se menciona anteriormente la solución ecuación de la consolidación unidimensional asume dos hipótesis, el agua es incompresible y el suelo se

---

<sup>1</sup> Por simplicidad en los cálculos se considera que las fronteras superior e inferior del elemento cubren un área unitaria.

encuentra saturado, a raíz de estas hipótesis podemos igualar las ecuaciones (5-9) y (5-15).

$$-\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz dt = -\frac{a_v}{1+e} \frac{\partial u}{\partial t} dz \cdot dt$$

De donde:

$$\frac{k(1+e)}{a_v \gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (5-16)$$

La ecuación (5-16) establece la relación entre la presión en exceso de la hidrostática  $u$ , la profundidad  $z$  y el tiempo  $t$ , esta ecuación permite conocer la distribución de presiones en el suelo durante un proceso de consolidación o expansión unidimensional. El modulo volumétrico  $m_v$  representa el grado de variación del volumen unitario que se produce a consecuencia de un aumento unitario del esfuerzo efectivo, físicamente expresa la compresibilidad del suelo, relacionándola con su volumen inicial  $(1+e)$ .

$$m_v = \frac{\partial v}{1+e} \quad (5-17)$$

En términos del modulo volumétrico, la ecuación (5-16) puede escribirse:

$$\frac{k}{m_v \gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (5-18)$$

La rata y la magnitud de la consolidación de una muestra de suelo cuando se confina lateralmente se drena axialmente y se somete a un incremento controlado de esfuerzo vertical se representa mediante el coeficiente de consolidación  $C_v$ , que se define como:

$$C_v = \frac{k(1+e)}{a_v \gamma_w} = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (5-19)$$

Reemplazando la ecuación (5-19) en (5-18), podemos obtener la ecuación diferencial del proceso de consolidación unidimensional bajo flujo vertical en término del coeficiente de consolidación como se muestra a continuación:

$$C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (5-20)$$

A continuación se describe la formulación que, define el grado o porcentaje medio de consolidación, para un estrato completo  $2H$  como la relación entre la consolidación que ha tenido lugar en ese tiempo, y la total que haya de producirse, representada por el símbolo  $U$  (%).

$$U(\%) = \frac{\int_0^{2H} (\Delta p - u) dz}{\Delta p \cdot 2H} * 100 \quad (5-21)$$

De la anterior fórmula, puede escribirse:

$$U(\%) = \left[ 1 - \frac{1}{\Delta p \cdot 2H} \int_0^{2H} u dz \right] * 100 \quad (5-22)$$

Donde U es una serie convergente por lo que integrarse término a término. La integración se efectúa a continuación:

$$\int_0^{2H} u dz = \int_0^{2H} \left\{ \Delta p \sum_{j=0}^{\infty} \frac{4}{(2j+1)\pi} \operatorname{sen} \left[ \frac{(2j+1)\pi z}{2H} \right] \cdot e^{-\frac{(2j+1)^2 \pi^2 C_V t}{4H^2}} \right\} dz \quad (5-23)$$

Al multiplicar en ambos extremos de la ecuación (5-19), por la proporción entre el valor tiempo para un instante determinado y el cuadrado de la mitad de la altura de cabeza drenante, obtenemos el factor tiempo adimensional (T), que es función de las constantes físicas del complejo suelo-agua, que determina el proceso de consolidación y se expresa como:

$$T = \frac{k(1+e)}{a_v \gamma_w} \cdot \frac{t}{H^2} = \frac{t \cdot c_v}{H^2} \quad (5-24)$$

Por lo cual (5-23) puede escribirse:

$$\int_0^{2H} u dz = \Delta p \sum_{j=0}^{\infty} \left\{ \frac{4}{(2j+1)\pi} e^{-\frac{(2j+1)^2 \pi^2 T}{4}} \int_0^{2H} \operatorname{sen} \left[ \frac{(2j+1)\pi}{2} \cdot \frac{z}{H} \right] dz \right\} \quad (5-25)$$

Integrando:

$$\int_0^{2H} u dz = \Delta p \sum_{j=0}^{\infty} \left\{ \frac{4}{(2j+1)\pi} e^{-\frac{(2j+1)^2 \pi^2 T}{4}} \left[ -\frac{2H}{(2j+1)\pi} \cos \left( \frac{(2j+1)\pi}{2} \cdot \frac{z}{H} \right) \right] \frac{2H}{0} \right\} \quad (5-26)$$

Por lo tanto, se tiene:

$$\int_0^{2H} u dz = \Delta p \cdot 2H \sum_{j=0}^{\infty} \left\{ \frac{4}{(2j+1)^2 \pi^2} e^{-\frac{(2j+1)^2 \pi^2 T}{4}} \left[ -\cos \frac{(2j+1)\pi}{2} \cdot \frac{z}{H} \right] \frac{2H}{0} \right\} \quad (5-27)$$

Ahora, teniendo en cuenta que:

$$\left[ -\cos \frac{(2j+1)\pi}{2} \cdot \frac{z}{H} \right] \frac{2H}{0} = -[\cos(2j+1)\pi - \cos 0] = -[-1 - 1] = 2$$

Se obtiene finalmente:

$$\int_0^{2H} u dz = \Delta p \cdot 2H \sum_{j=0}^{\infty} \frac{8}{(2j+1)^2 \pi^2} e^{-\frac{(2j+1)^2 \pi^2 T}{4}} \quad (5-28)$$

Sustituyendo la ecuación (5-28) en (5-22) obtenemos:

$$U (\%) = 100 \left[ 1 - \sum_{j=0}^{\infty} \frac{8}{(2j+1)^2 \pi^2} e^{-\frac{(2j+1)^2 \pi^2 T}{4}} \right] \quad (5-29)$$

Se presenta entonces el hecho afortunado de que el grado de consolidación promedio del estrato es sólo función del factor tiempo adimensional (T), debido a que las variables t y H son conocidas durante todo el ensayo se puede reemplazar la ecuación (5-24) en la ecuación (5-29) obteniendo como resultado:

$$U = 1 - \frac{8}{\pi^2} \left[ \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{(2j+1)^2 \pi^2} e^{-\frac{(2j+1)^2 \pi^2 c_v t}{4H^2}} \right] \quad (5-30)$$

Donde:

J: Número de iteraciones requerido para que la serie converja.

e: Número de Euler o constante de Napier.

$c_v$ : Coeficiente de consolidación unidimensional  $\left[ \left( \frac{cm^2}{s} \right) \cdot 10^{-2} \right]$ .

t: Valor del tiempo para un instante determinado (*min*).

H: la mitad de la altura de cabeza drenante (*cm*).

Desde luego T y t son directamente proporcionales para una muestra dada, en una cierta condición de carga, el presente aplicativo estima que el suelo sigue los requerimientos de la ecuación teórica de Terzaghi, luego el grado de consolidación promedio y las lecturas micrométricas de deformación, están relacionadas por una ley lineal de proporcionalidad, puesto que por ejemplo las condiciones a un 50% de consolidación total, están asociadas a la mitad de la deformación del suelo.

El coeficiente de consolidación permite obtener el grado de consolidación, o bien, el asentamiento esperado para un tiempo t, en este orden de ideas la curva teórica descrita por la ecuación (5-30) y las curvas de consolidación de laboratorio deberán ser semejantes, haciendo uso del gráfico de dispersión, el usuario del aplicativo podrá obtener una medida simple, para inspeccionar según los resultados de laboratorio lo que el suelo se aparta estrictamente de la teoría de Terzaghi.

## 6. MARCO CONCEPTUAL

A continuación se describen algunos conceptos, equipos y procedimientos sobre los cuales el usuario del aplicativo deberá tener claridad, con el fin de garantizar una correcta interpretación de los resultados del aplicativo computacional.

### 6.1 El ensayo de consolidación unidimensional

El método requiere que una muestra del suelo sea restringida lateralmente y que se cargue axialmente con incrementos constantes de carga, aplicados hasta que todo exceso de la presión de agua en los poros se disipe, para cada incremento. Durante el proceso de compresión se efectuarán medidas de la disminución del espesor de la muestra, datos mediante los cuales el aplicativo calcula los parámetros, que describen la relación entre el esfuerzo efectivo y la relación de vacíos o la deformación, porosidad y humedad entre otros así como la rata a la cual ocurren.

### 6.2 El edómetro

Como se comentó en el capítulo introductorio el edómetro es un aparato de laboratorio útil para conocer la compresibilidad de un suelo que va a ser objeto de una consolidación, la muestra que se requiere para efectuar el ensayo se somete a condiciones de compresión confinada. Al aplicar la carga, el agua se evacúa por dos piedras porosas ubicadas en la parte superior e inferior de cilindro de muestra. La carga se ejerce de manera incremental, para registrar mediante un extensómetro, las deformaciones obtenidas contra el tiempo. Las cargas se van doblando cada vez y los incrementos se deben hacer cada 24 horas, finalmente, la descarga se hace de forma gradual ver Figura 5.

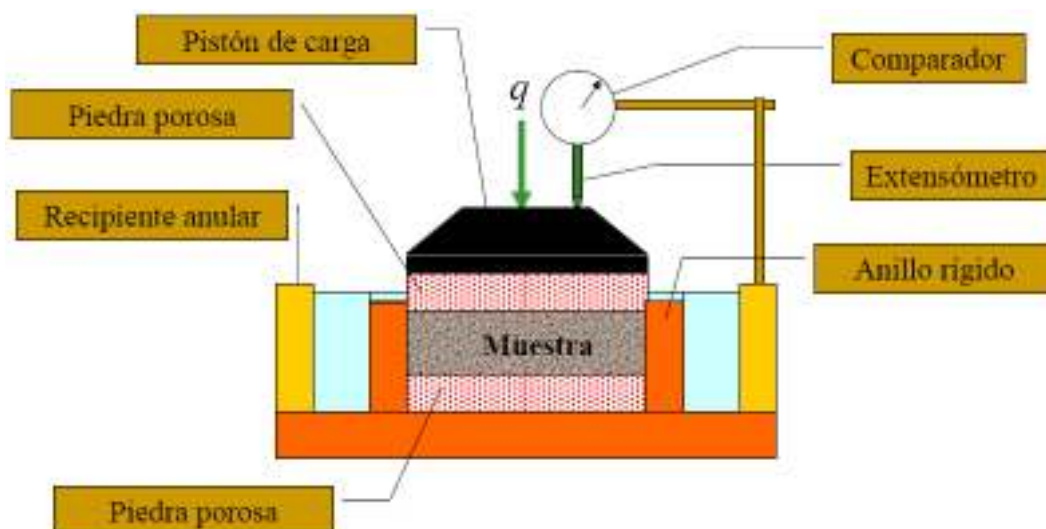


Figura 5: Esquema de un edómetro (Poblete 2006)

### 6.3 Consolidación primaria

Posterior a la consolidación inicial<sup>1</sup>, la consolidación primaria se define como la reducción en el volumen de la masa de un suelo, causada por la aplicación de una carga adicional permanente y la expulsión del agua de los vacíos, acompañada por una transferencia de carga del agua a las partículas sólidas del suelo, debido a la disipación de la presión de poros.

### 6.4 Consolidación secundaria

Se define como la reducción en el volumen de la masa del suelo en un fenómeno de flujo viscoso, causada por la aplicación de una carga permanente y el acomodo de la estructura interna de su masa, luego de que la mayor parte de la carga ha sido transferida a las partículas sólidas del suelo, este efecto se hace notable en las curvas de consolidación, mediante un tramo típico sensiblemente recto en el trazado semilogarítmico.

Puesto que la compresión secundaria representa esencialmente un reacomodo adicional de la estructura interna del suelo después de que la mayor parte de la carga ha sido transferida del agua a la materia sólida, se estima que las velocidades de este tipo de compresión dependan del esfuerzo efectivo. Según Badillo y Rodríguez (1981) cuanto menor resulte el incremento de carga, en porcentaje de la carga precedente aplicada, menos clara resulta la transición entre los efectos primario y secundario. Para suelos altamente orgánicos y a la vez bastante porosos tales como la turba, la compresión primaria ocurre normalmente en forma simultánea con la aplicación de la carga, Das (1999) afirma por lo tanto para el caso de un terraplén construido sobre un depósito de turba, en quien interese conocer el proceso de asentamiento ocurrido una vez terminada la estructura, se necesitará prestar especial atención a la consolidación secundaria, pues la compresión del material se deberá a ella, casi en su totalidad ver Figura 6.

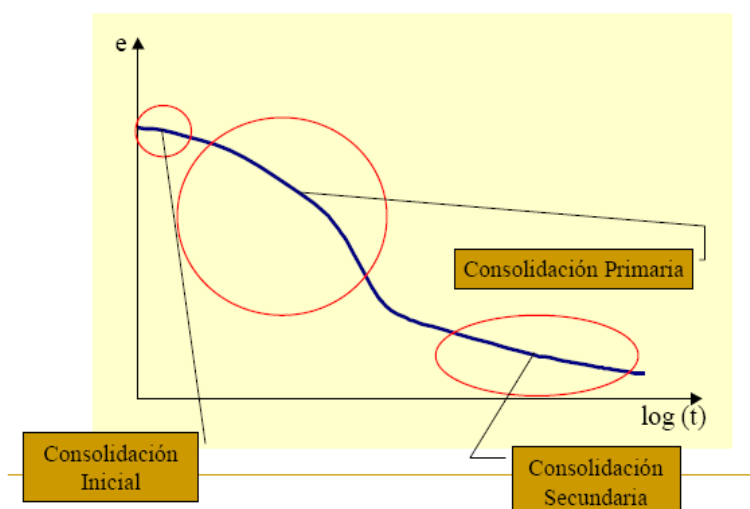


Figura 6: Esquema tipo de los segmentos que componen una curva de consolidación  
Fuente: (Poblete 2006).

<sup>1</sup> Reducción de vacíos por la eliminación de aire

## 6.5 Método de Casagrande

A continuación se describe el procedimiento a seguir para el cálculo del parámetro  $C_v$  mediante la metodología Log (t) o método de Casagrande, tal como se reporta en la norma INVE-151-07 (Instituto Nacional de Vías 2007). Se deben graficar los resultados de deformación contra el logaritmo del tiempo suministrados por el ensayo de consolidación ver (Figura 7),

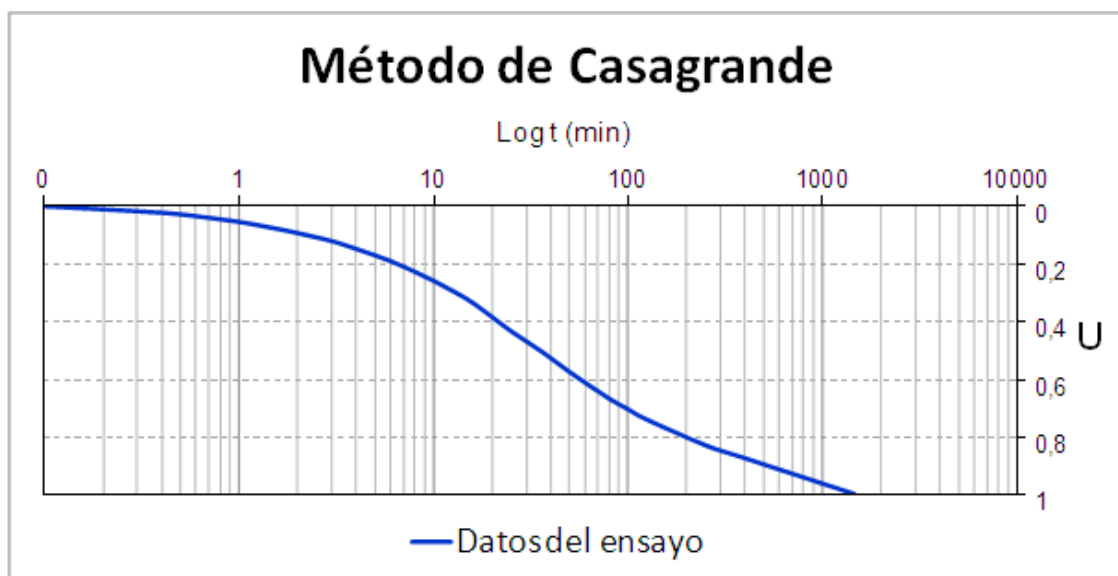


Figura 7: Gráfica de la deformación total Vs log (t)

A continuación se determina el asentamiento que representa el 100 % de la consolidación primaria para cada incremento de carga. Se dibuja primero una línea recta a través de los puntos que representan las lecturas finales y que exhiben una tendencia recta y una inclinación suave.

Se dibuja una segunda recta tangente a la parte más pronunciada de la curva de logaritmo de tiempo vs Asentamiento. La intersección representa el asentamiento primario, la consolidación que ocurra después del 100% de la consolidación primaria se define como consolidación secundaria, se determina la deformación que representa el 0 % de la consolidación primaria. Para ello se seleccionan dos tiempos ( $t_B$  y  $t_A$ ) que tengan una relación de 1 a 4 ( $t_A = 4 t_B$ ), de tal manera que la deformación correspondiente al mayor de los dos tiempos será mayor que  $\frac{1}{4}$ , pero menor que  $\frac{1}{2}$  del cambio total de la deformación para el incremento de carga, el 0 % de la consolidación primaria se obtiene al restar la diferencia de las deformaciones para los dos tiempos  $t_A$  y  $t_B$  seleccionados, del valor de deformación de  $t_B$  ver (Figura 8).

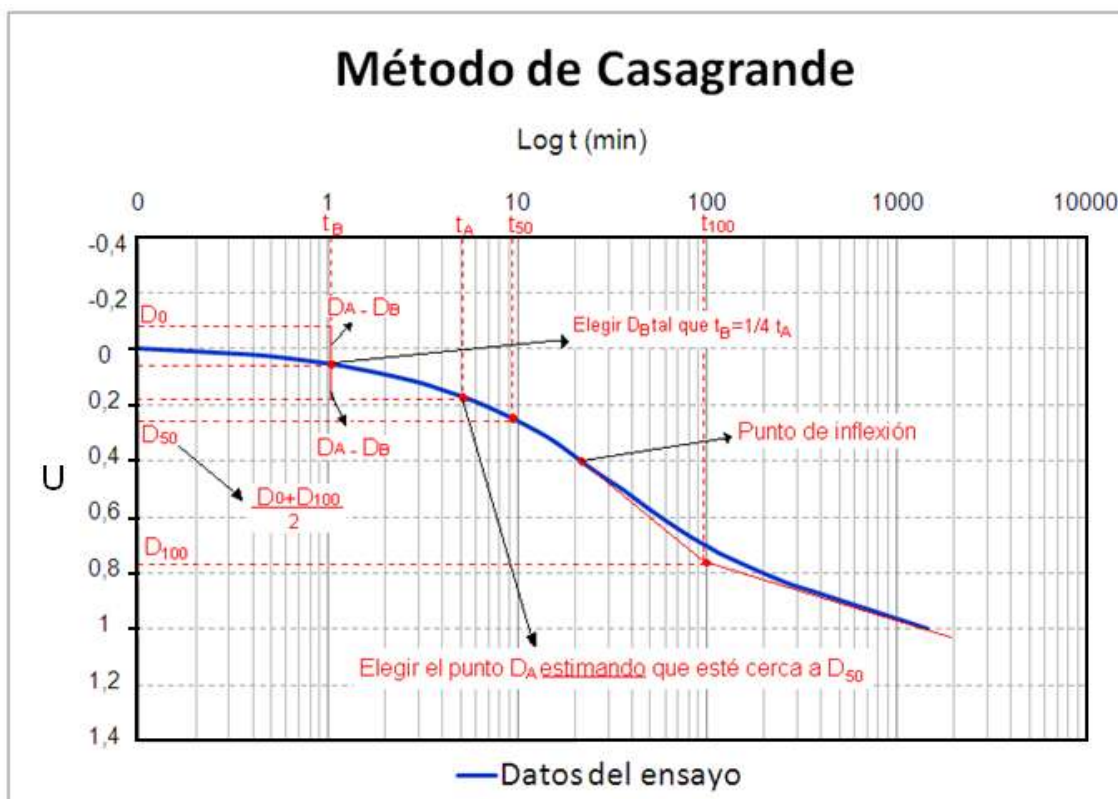


Figura 8: Esquema del procedimiento gráfico requerido en la metodología de Casagrande.

El asentamiento correspondiente al 50 % de la consolidación primaria para cada incremento de carga, es igual al promedio de los asentamientos no corregidos que corresponden al 0 y 100 %. El tiempo requerido para el 50 % de la consolidación bajo cualquier incremento de carga, se puede hallar gráficamente a partir de la curva de asentamiento-logaritmo del tiempo para dicho incremento, observando el tiempo que corresponda al 50 % de la consolidación primaria de la curva, para cada incremento de carga en el cual se obtuvieron lecturas de tiempo asentamiento, se calcula el coeficiente de consolidación  $C_v$  así:

$$C_v = \frac{0.05 * H^2}{t_{50}}$$

Ecuación 3 : Ecuación de Casagrande para cálculo de  $C_v$  a partir de  $t_{50}$ .

Donde:

$H$  = altura de la muestra en metros o pies para una muestra con drenaje doble al 50 % de consolidación,

$t_{50}$  = tiempo para el 50 % de consolidación en años, y

$C_v$  = coeficiente de Consolidación en  $\text{m}^2/\text{año}$  o  $\text{pies}^2/\text{año}$ .

Si  $H$  está en  $\text{mm}$  y  $t$  en segundos o minutos,  $C_v$  quedará expresado en  $\text{mm}^2/\text{s}$  o  $\text{mm}^2/\text{min}$ , respectivamente, y será preferible hacer la conversión a unidades más convenientes.

## 6.6 Método de Taylor

A continuación se describe el procedimiento a seguir para el cálculo del parámetro  $C_v$  mediante la metodología Log (t) o método de Casagrande, tal como se reporta en la norma INVE-151-07 (Instituto Nacional de Vías 2007). La metodología de Taylor para el cálculo de  $C_v$ , requiere un gráfico de deformación contra  $\sqrt{t}$  para determinar los puntos del 0 y 100 % de consolidación (Figura 9).

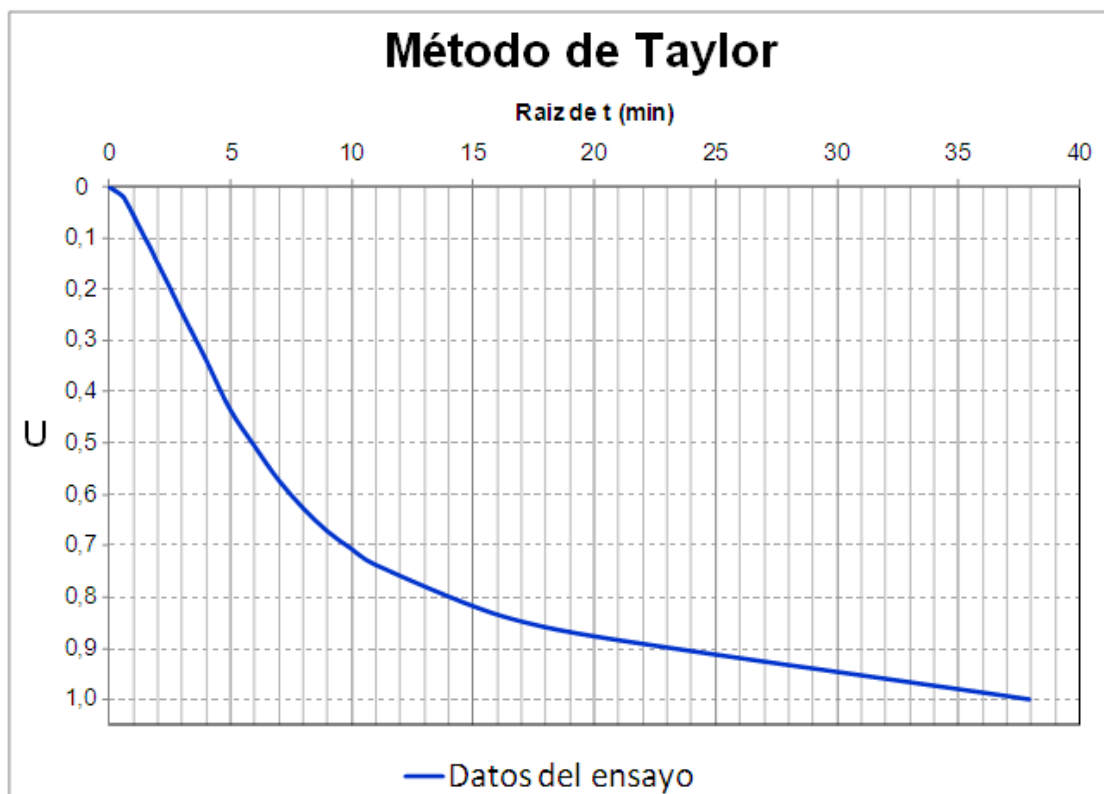


Figura 9: Gráfica de deformación total Vs  $\sqrt{t}$ .

La parte inicial de la curva se aproxima mediante una línea recta. Se extrapola la línea hasta  $t = 0$ . La correspondiente ordenada de deformación representa el 0 % de la consolidación primaria. Se dibuja una segunda línea recta a través de este punto de manera que la abscisa de esta línea sea 1.15 veces la abscisa de la aproximación en línea recta de la parte inicial de la curva. La intersección de esta nueva línea con la curva de deformación contra la raíz cuadrada del tiempo corresponde al 90 % de consolidación primaria.

La deformación al 100 % de la consolidación primaria es 1/9 mayor que la diferencia entre las deformaciones a 0 y 90 % de consolidación. Análogamente, la deformación al 50 % de consolidación primaria es 5/9 de la diferencia en las deformaciones entre el 0 y el 90 % de consolidación (Figura 10).

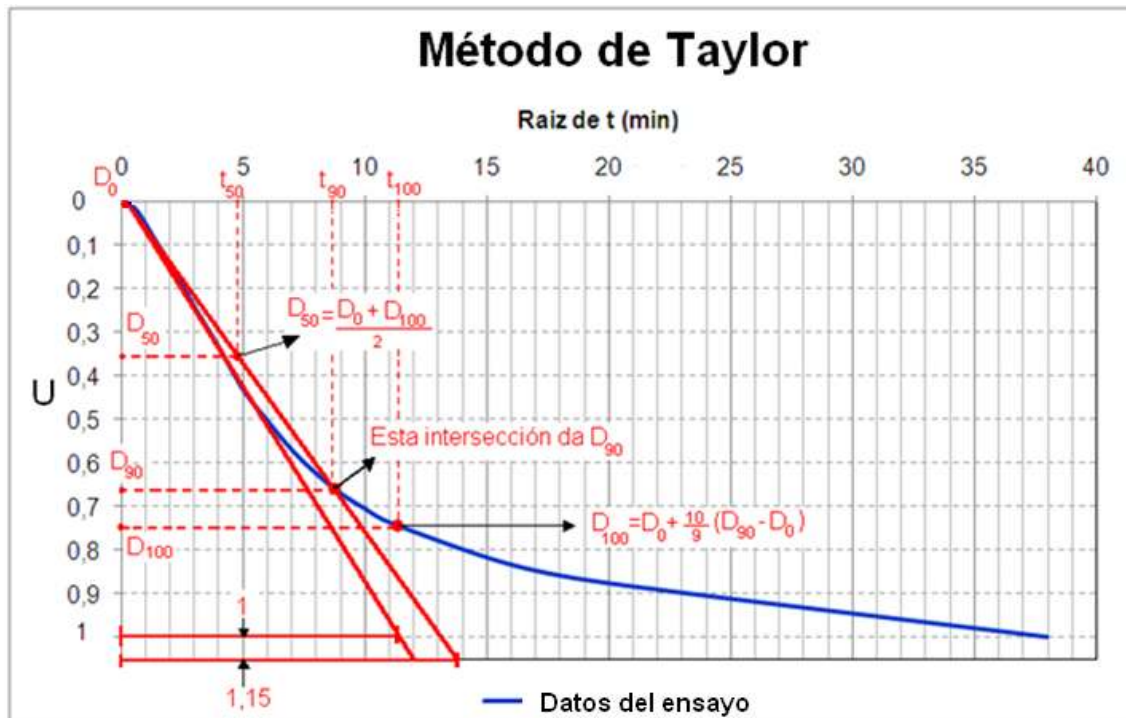


Figura 10: Esquema del procedimiento gráfico requerido en la metodología de Taylor

$D_0$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{100}$  serán las deformaciones correspondientes al 0 %, 50 % y 100 % de consolidación. El coeficiente de consolidación se puede hallar entonces a partir del tiempo del 90 % de consolidación mediante la (Ecuación 1)

$$C_v = \frac{0.21 * H^2}{t_{90}}$$

Ecuación 4 : Ecuación de Taylor para cálculo de  $C_v$  a partir de  $t_{90}$ .

$H$  = espesor de la muestra en m (pies) para una muestra con drenaje doble,

$t_{90}$  = tiempo para el 90 % de consolidación en años.

$C_v$  = coeficiente de consolidación, en  $m^2/año$  ( $pies^2/año$ ).

## 7. Metodología del aplicativo

El presente aplicativo fue desarrollado en el lenguaje de programación visual Basic para Excel 2007, debido a que la manipulación programa Office Microsoft Excel le es bastante familiar tanto al ingeniero como al laboratorista, además es común que los resultados del ensayo de consolidación se digiten en Excel con el fin de elaborar el reporte del procedimiento. El archivo que contiene el aplicativo con todas sus funciones se llama: Ajuste de los parámetros de consolidación mediante el uso de herramientas de programación, Al ejecutar el aplicativo es usual que todos los botones se encuentren deshabilitados por el sistema de editor de confianza, con el que se encuentre operando el equipo, con el fin de habilitar el contenido del aplicativo a continuación se describe el procedimiento necesario para deshabilitar una macro:

- Si el centro de confianza detecta el contenido de macros en el archivo, aparece una barra de mensajes para notificarle de que hay una macro que puede no ser segura.



Ilustración 1: Barra de advertencia de seguridad

- Si hace clic en opciones en la barra de mensajes, aparece un cuadro de diálogo que le permite habilitar la macro.

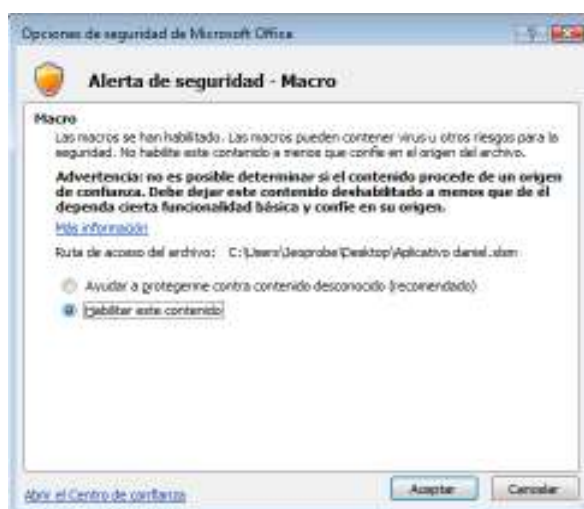


Ilustración 2: Cuadro de alerta de seguridad

## 7.1 Paso 1:Formulario

Una vez habilitado el contenido de la macro, se despliega una ventana que contiene el menú de comandos, con los cuales el usuario deberá ejecutar el comando formulario ver (Ilustración 3)

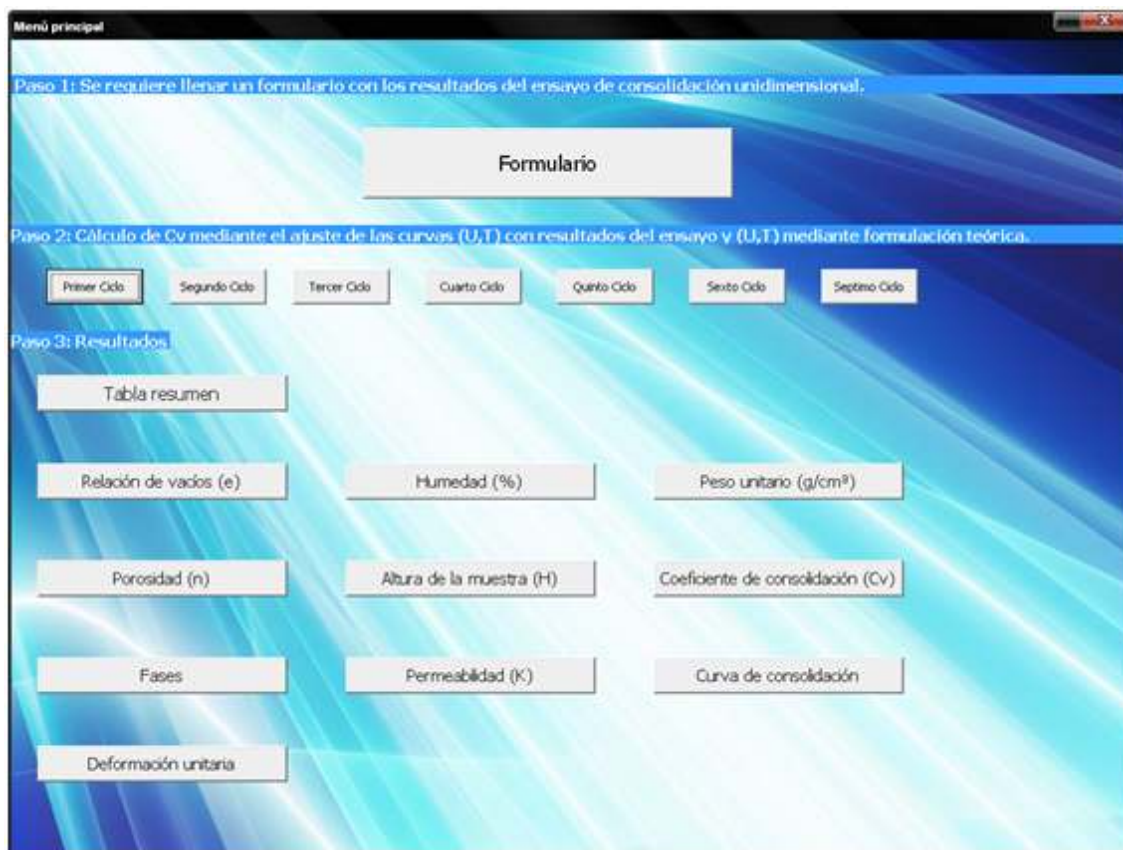


Ilustración 3: Menú principal del aplicativo

El primer paso para hacer un uso correcto del aplicativo consiste en llenar un formulario con los datos del ensayo de consolidación unidimensional<sup>1</sup>ver (Ilustración 4), la hoja valores de entrada está compuesta por cuatro tablas que tienen como función captar la información del ensayo de consolidación, en la Ilustración 4 podemos apreciar que este aplicativo se encuentra limitado a un máximo número de siete ciclos de carga para analizar, así mismo el máximo número de datos tomados por ciclo no puede ser mayor a veintidós<sup>2</sup>, a continuación digite en la parte superior de la tabla, el valor de carga al que sometió la muestra, seguido de los valores de deformación reportados por el ensayo, en caso de que el ensayo reporte un número de datos por ciclo de carga, menor a 22 el usuario debe completar los datos restantes<sup>3</sup> con el último valor de deformación, como se explica en la columna (I) que corresponde al primer ciclo de carga ver (Ilustración 5).

<sup>1</sup> El diseño de la hoja de formulario está basado en el reporte del ensayo de consolidación unidimensional del laboratorio de pruebas y ensayos de la Universidad Javeriana.

<sup>2</sup> los valores t(min) son sugeridos y pueden ser modificados por el usuario

<sup>3</sup> El capítulo 8,1 expone los motivos por los cuales no se deben reducir los tiempos de adquisición de datos durante un ciclo de carga, bajo la premisa de que la muestra ya alcanzó el 100% de su compresión secundaria.

TIEMPO TRANSCURRIDO		Primer ciclo de carga (kg/cm <sup>2</sup> )	Segundo ciclo de carga (kg/cm <sup>2</sup> )	Tercer ciclo de carga (kg/cm <sup>2</sup> )	Cuarto ciclo de carga (kg/cm <sup>2</sup> )	Quinto ciclo de carga (kg/cm <sup>2</sup> )	Sexto ciclo de carga (kg/cm <sup>2</sup> )	Septimo ciclo de carga (kg/cm <sup>2</sup> )
t (min)	v(t) (mm)	LECTURA DEL DEFORMIMETRO EN 1 X 10 <sup>-4</sup> (Pulgadas)						
0,1	0,316							
0,3	0,548							
0,5	0,707							
1	1,000							
1,5	1,225							
2	1,414							
3	1,732							
4	2,000							
6	2,449							
9	3,000							
12	3,464							
16	4,000							
25	5,000							
36	6,000							
49	7,000							
64	8,000							
81	9,000							
100	10,000							

Ilustración 4: Ciclos de carga y lectura del extensómetro

F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
0,1	0,316	294	553	786	1038	1558	2047		
0,3	0,548	305	562	796	1103	1573	2067		
0,5	0,707	313	567	802	1112,5	1585	2083		
1	1,000	326	577	813	1129	1605	2112		
1,5	1,225	337	584,5	822	1143	1622	2135		
2	1,414	345,5	596	830	1154	1636	2155		
3	1,732	359,5	602	843,5	1176	1659,5	2189		
4	2,000	370	611	854,5	1190,5	1680	2218		
6	2,449	387,5	626,5	873	1221	1714	2265,5		
9	3,000	409	643,5	894	1256	1756	2322		
12	3,464	427	657	910	1286,5	1790	2365		
16	4,000	449	670,5	928,5	1319	1826,5	2409		
25	5,000	475,5	693	959,5	1359	1883,5	2471		
36	6,000	495,5	709	983	1408	1922	2507		
49	7,000	508	720,5	1000,5	1434	1948,5	2529		
64	8,000	517	728,5	1013	1455	1967	2546		
81	9,000	522,5	734	1025	1437	1978,5	2554		
100	10,000	522,5		1030,5	1475	1987	2562		
120	10,954	522,5				1993	2567		
250	15,811	522,5							
400	20,000	522,5							
1440	37,947	522,5							

Ilustración 5: Esquema del procedimiento a seguir con el fin de llenar correctamente el formulario.

Finalmente se solicita al usuario, digitar los datos de descarga del material, peso de la muestra datos iniciales y finales ver (Ilustración 6)

Datos del ciclo de descarga		Datos iniciales y finales	Peso de la muestra (g)		
Carga	Deformaci	Diámetro Interior Anillo (cm)	DATO	INICIAL	FINAL
(kg)	$1 \times 10^{-4}$ (pulg)	Alt. muestra, H (cm)	W mh (g)		
		Peso del Anillo, Wa (g)	W rms (g)		
		Peso Muestra + Anillo, Wma (g) INICIAL	W rl (g)		
		Relación de Brazo	Temperatura (°C)		
		Peso Piedra Por.+Blq, WP+B (g)	Tx (°C) Inicial	20	
		Peso Especifico de Sólidos Gs	Tx (°C) Final	20	
		Peso Muestra + Anillo, Wma (g) FINAL			

Menú principal

Ilustración 6: Tablas 2,3 y4 de la hoja valores de entrada

## 7.2 Paso2:Cálculo de $C_v$

A continuación se describe gráficamente las relaciones y procedimientos empleados por el aplicativo con el fin de interpretar el parámetro  $C_v$ .

### 7.2.1 Procedimiento 1 (Curva $U$ vs $T$ de los datos de laboratorio)

Una vez se el usuario a ingresado la información solicitada en el paso 1 el aplicativo traza la gráfica de grado de consolidación promedio contra factor tiempo adimensional ver (Figura 11).

El grado de consolidación promedio es obtenido mediante las lecturas micrométricas de deformación ver (Ecuación 5), mientras que el factor tiempo adimensional se obtiene a partir de la ecuación (5-24)<sup>1</sup>, empleando un valor de  $C_v$ , aleatorio en, valor que posteriormente será modificado mediante el proceso iterativo descrito en el procedimiento 3.

$$U = \frac{[(\hat{H} - \delta_n) - (\hat{H} - \delta_{n+i})]}{[(\hat{H} - \delta_n) - (\hat{H} - \delta_{n+f})]}$$

Ecuación 5: Grado de consolidación promedio para los resultados de laboratorio.

Donde:

$\hat{H}$ : Altura inicial de la muestra (cm)

$\delta_n$ : Primera lectura de deformación reportada por el ensayo.

$\delta_{n+i}$ : Primera lectura de deformación

$\delta_f$ : Ultima lectura de deformación reportada por el ensayo.

Los puntos correspondientes al 0 y al 100% de consolidación no son calculados debido a que para la ecuación teórica de la consolidación unidimensional,  $U=0\%$  es indeterminado y  $U=100\%$  es infinito,

<sup>1</sup> Ecuación que describe el factor tiempo adimensional.

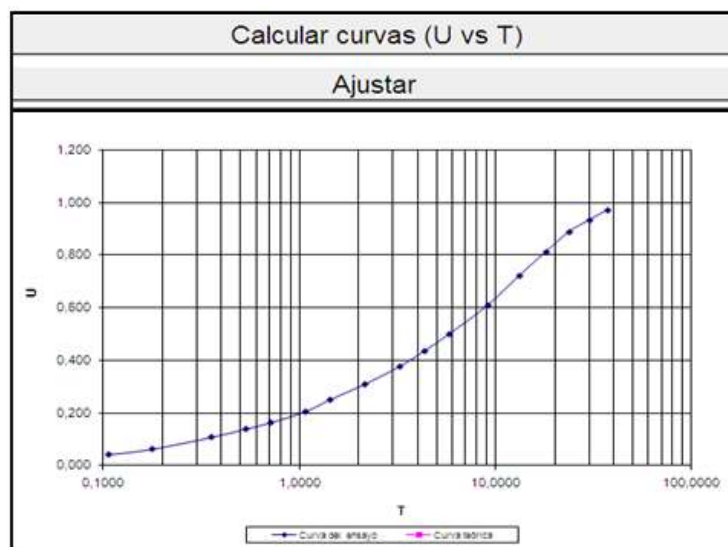


Figura 11: Grado de consolidación promedio Vs factor tiempo para la muestra sometida a un incremento de carga.

### 7.2.2 Procedimiento 2 (Curva U vs T de teórica)

La ecuación (5-30)<sup>1</sup> puede ser resuelta para diferentes valores de  $C_v^2$ , obteniendo como resultado los correspondientes valores de U teóricos, reportados por el ensayo de laboratorio, para el primer incremento de carga se asume como un valor constante la altura inicial de la muestra despreciando el cambio de altura a causa del incremento de carga inducido<sup>3</sup> ver (Figura 12).

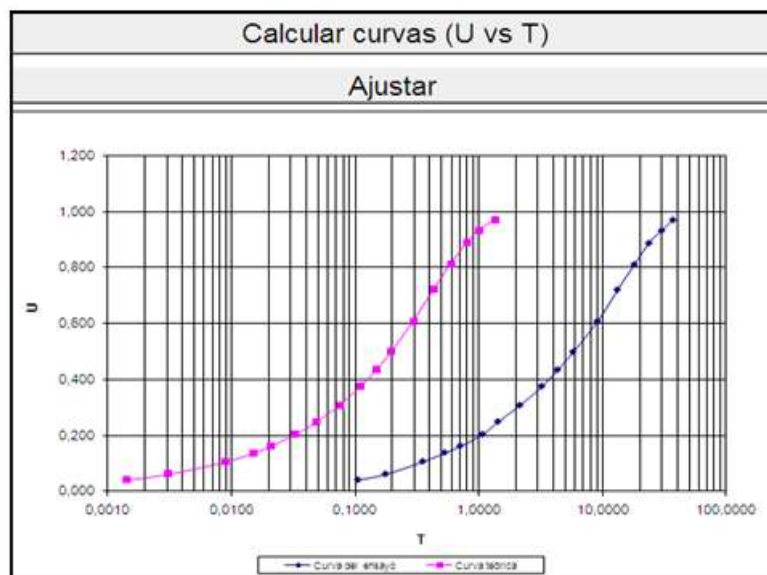


Figura 12: Gráfica U vs T teórica contra U vs T de laboratorio

<sup>1</sup> Ecuación que describe la solución de la ecuación para la consolidación unidimensional bajo flujo vertical en función de  $C_v$ .

<sup>2</sup> En este instante del procedimiento de ajuste entre el par de curvas el aplicativo cuenta con distintos valores de  $C_v$  teóricos y un valor de  $C_v$  aleatorio, ninguno de estos representa el valor real, mediante el procedimiento 4 estos valores de  $C_v$  convergen a un único valor que representa el valor final reportado por el aplicativo.

<sup>3</sup> Para los siguientes ciclos el valor de la altura se calcula como la diferencia entre la altura inicial y el valor de deformación acumulado.

### 7.2.3 Procedimiento 3 (Cálculo de la distancia entre puntos)

Una vez el usuario oprime el botón ajustar, el aplicativo hace uso de la función objetivo ver (Figura 13)

Dato	T		Función Objetivo
	Laboratorio	Ecuación teórica	
1	0.002	0.001	-0.186
2	0.003	0.003	-0.032
3	0.006	0.006	0.046
4	0.008	0.010	0.091
5	0.011	0.013	0.086
6	0.017	0.020	0.086
7	0.022	0.028	0.095
8	0.033	0.041	0.094
9	0.050	0.058	0.060
10	0.067	0.075	0.052
11	0.089	0.097	0.036
12	0.140	0.143	0.010
13	0.202	0.192	-0.022
14	0.276	0.250	-0.043
15	0.361	0.306	-0.072
16	0.458	0.369	-0.094
17	0.567	0.452	-0.099
18	0.682	0.531	-0.109
19			
20			
21			

Figura 13: Esquema de cómo lucen en el aplicativo los resultados de la función objetivo.

El propósito de la función objetivo es encontrar la distancia horizontal entre los puntos de color magenta “puntos teóricos” y los puntos de color azul “Puntos reportados en el ensayo” ver (Figura 14), la formulación de la función objetivo es muy simple recordemos que:

$$\log_x \frac{A}{B} = \log_x A - \log_x B$$

Ecuación 6: Ecuación de la función objetivo

Donde:

A: Factor tiempo adimensional de teórico.

B: Factor tiempo adimensional de los resultados del ensayo.

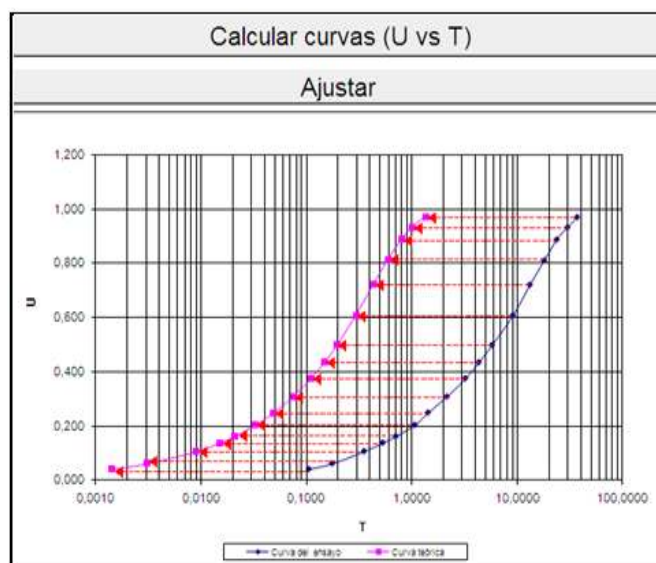


Figura 14: Esquema de la distancia horizontal entre los puntos teóricos y de laboratorio.

#### 7.2.4 Procedimiento 4 (Ajuste mediante la iteración del parámetro $C_v$ )

El cálculo del coeficiente de consolidación se reduce a un problema de optimización de la distancia entre los puntos calculados por la función objetivo problema que es resuelto mediante la iteración del parámetro  $C_v$ . **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, obteniendo como resultado un único valor único de  $C_v$  que realiza el mejor ajuste entre el par de curvas ver (Figura 15).

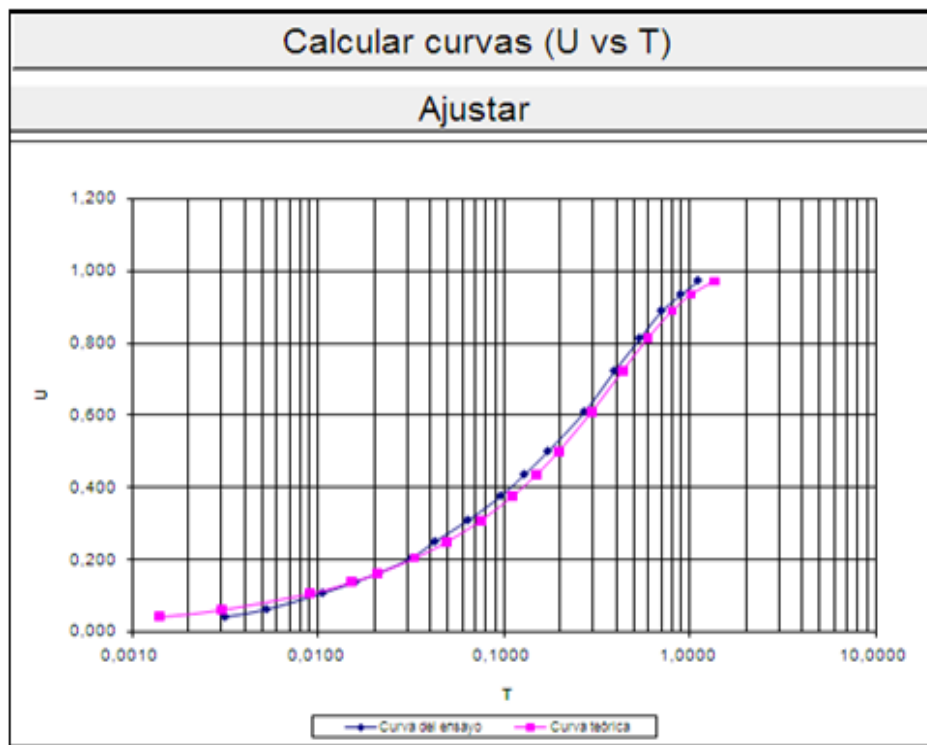


Figura 15: Ajuste entre la curva del ensayo y su correspondiente curva teórica

Con el fin de interpretar el valor del parámetro  $C_v$ , el aplicativo requiere de la misma información que las metodologías de Taylor y Casagrande, en caso de no contar con la información de las tablas 2,3 y 4 al momento de responder el formulario del aplicativo el usuario podrá calcular  $C_v$ .

## 8. ANALISIS DE RESULTADOS

### 8.1 Resultados obtenidos

El presente capítulo tiene como objetivo reportar e interpretar los resultados obtenidos tras la estimación del parámetro  $C_v$ , mediante 18 ensayos de consolidación unidimensional<sup>1</sup>, mediante la metodología sugerida por el aplicativo computacional. Además el presente capítulo busca ofrecer al lector herramientas de juicio sobre la precisión, efectividad y alcance de esta herramienta computacional.

#### 8.1.1 Análisis del parámetro $C_v$ , obtenido por el aplicativo

Los valores de  $C_v$ , obtenidos mediante el aplicativo reportan una diferencia considerable, con respecto a los resultados obtenidos mediante la interpretación de la metodología de Taylor por el laboratorio de pruebas y ensayos ver (Figura 16).

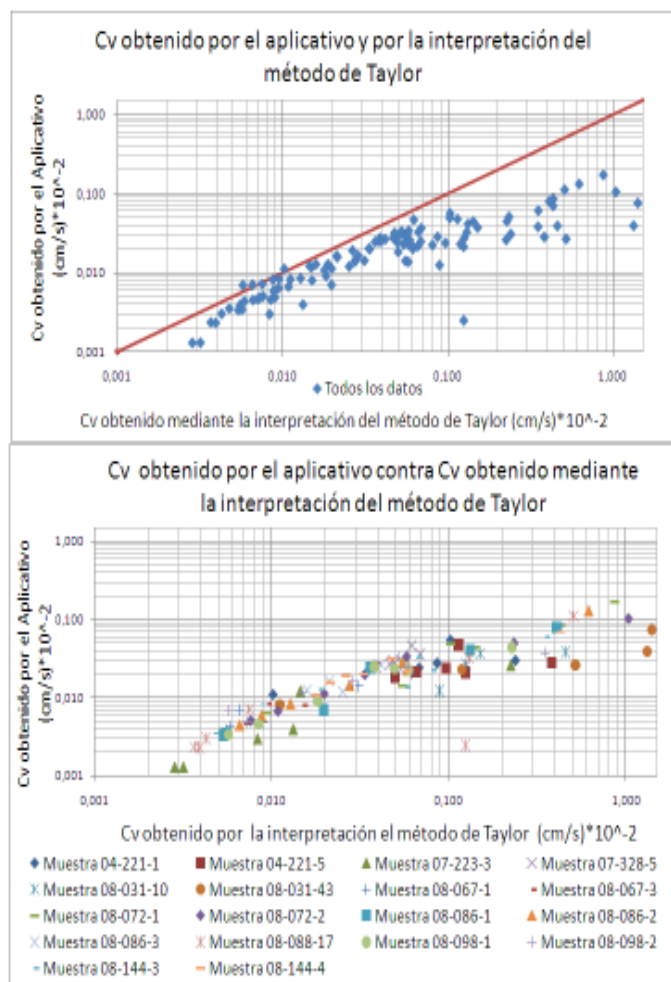


Figura 16:  $C_v$  (Estimado por el aplicativo Vs el interpretado por el método de Taylor).

<sup>1</sup> Como se menciona en el capítulo introductorio se interpretaron 20 muestras sin embargo solo 18 de ellas cuentan con la interpretación  $C_v$  haciendo uso de la metodología de Taylor por parte del laboratorio de pruebas y ensayos de la Universidad Javeriana.

Como podemos apreciar en la figura 16, los valores de  $C_v$  estimados mediante la metodología de Taylor, se encuentran sobrestimados con respecto a los resultados obtenidos mediante el aplicativo computacional, de igual forma podemos apreciar como existe una mayor dispersión en los resultados obtenidos mediante la interpretación el método de Taylor, a medida que incrementa el valor del parámetro de consolidación  $C_v$ , sobre este último aspecto se estima que si el valor reportado de  $C_v$  es alto con respecto a los valores típicos, describirá una recta de mayor inclinación en el primer segmento de la curva de deformación contra la raíz del tiempo, motivo por el cual quien se encuentra interpretando el ensayo haciendo uso de la metodología de Taylor, puede verse tentado a subestimar el valor del tiempo teórico  $t_{90}$  sobrestimando de esta forma el valor de  $C_v$ .

Se sabe que 18 de las 20 muestras interpretadas provienen de la ciudad de Bogotá, Mediante la tabla 2 y los resultados de la figura 16 podemos concluir que los valores estimados de  $C_v$  reportados por el aplicativo se asemejan al rango reportado para la Arcilla de México, mientras que gran parte de los valores de  $C_v$  obtenidos mediante la interpretación del método de Taylor se encuentran sobrestimados con respecto a los valores típicos reportados.

Suelo	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)*10 <sup>-2</sup>
Arcilla de México (Leonards y Girault, 1961)	0,009 - 0,015
Arcilla de San francisco (Leonards y Girault, 1961)	0,020 – 0,040
Limo orgánico (Lowe,Zaccheco y Feldman, 1964)	0,020 – 0,10
Arcilla de chicago (Terzaghi y Peck, 1967)	0,085

Tabla 2: Valores típicos del parámetro  $C_v$ , Fuente (Holtz 1981)

En el anexo 2 del presente documento se incluye una tabla que reporta los valores de  $C_v$  obtenidos por la metodología sugerida y la interpretación del método de Taylor, así como el error absoluto<sup>1</sup> para los valores estimados por este par de metodologías. Este anexo tiene como propósito estimar en forma cuantitativa si la diferencia entre los valores de  $C_v$  reportados resulta representativa.

### 8.1.2 Análisis de la condición de saturación al inicio de la prueba

Como se menciona en el capítulo 5 el parámetro de saturación del material fue calculado mediante un análisis de relación de fase mediante haciendo uso de los valores reportados por el ensayo de contenido de humedad ( $W_n$ ), peso unitario total ( $\gamma_t$ ) y el peso específico relativo ( $G_s$ ) ver (Ilustración 7).

<sup>1</sup> Calculado como la diferencia en valor positivo entre los valores de  $C_v$ , en algunas muestras la magnitud del error absoluto fue tan grande que supera hasta 10 veces el valor de  $C_v$  reportado por el aplicativo.

	Inicio	
w =	27,28	
Gs =	2,549	
$\gamma_0 =$	10	
$\gamma_T =$	19,5	

	Inicio	
Vt	Va =	-0,03074
	Vw =	0,695448
1,7	Vs = 1	1

	Inicio	
Wa=0	0	Wt
Ww=wGs/w	0,695	
Ws=G <sub>s</sub> /w	2,549	3,2

	Inicio	
Vv = e =	0,66	
$\gamma_T =$	19,49	
n =	0,40	
S =	104,62	

Ilustración 7: Ejemplo de un análisis de relación de fase según las condiciones iniciales reportadas por el laboratorio muestra (04-221-5).

Como podemos apreciar en la Tabla 3 en la mayoría datos procesados se encontraron resultados saturación menores al cien por ciento o que sobrepasan el cien por ciento, se calculo el valor de contenido de humedad requerido para satisfacer la condición de saturación, mediante el valor de contenido de humedad reportado y el valor de humedad requerido para garantizar la saturación de la muestra es posible calcular un error relativo entre este par de resultados<sup>1</sup>.

Saturación (%)	Nombre de la muestra	Humedad reportada	Humedad requerida	Error relativo (%)
108,3	Muestra 08-088-17	47,4	38,9	21,7
108,0	P2-02-10	25,09	21,28	17,9
105,0	Muestra 08-072-2	95,4	81,6	16,8
104,8	Muestra 04-221-5	61,3	54,3	12,9
96,0	Muestra 08-086-2	93,4	106,3	12,2
103,6	Muestra 08-072-1	64,2	58,4	10,1
104,6	Muestra 08-031-10	27,3	24,8	10,0
97,5	Muestra 08-067-3	131,9	145,7	9,5
102,8	Muestra 04-221-1	86,8	79,9	8,7
97,1	Muestra 08-144-3	77,5	84,8	8,6
97,8	Muestra 08-086-1	133,5	145,9	8,5
102,4	Muestra 08-098-2	94,1	87,2	7,9
102,4	Muestra 08-098-1	79,8	74,5	7,2
103,0	Muestra 08-031-43	32,5	30,8	5,6
102	P1-01-10	25,1	24	4,6
98,8	Muestra 08-086-3	49,4	50,8	2,8
99,5	Muestra 07-223-3	173,8	178,0	2,4
100,0	Muestra 08-067-1	99,3	97,7	1,6
100,6	Muestra 08-144-4	57,9	57,0	1,5
99,8	Muestra 07-328-5	60,7	61,0	0,4

Tabla 3: Porcentaje de saturación inicial para las 20 muestras interpretadas.

<sup>1</sup> Este procedimiento tiene como único propósito estimar en forma cuantitativa la diferencia entre los valores de contenido de humedad reportados y requeridos, sin embargo el error en la medición de los parámetros de laboratorio bien podría estar en el peso específico relativo o el peso unitario de la muestra y no necesariamente en el contenido de humedad.

### 8.1.3 Análisis de los parámetros de permeabilidad

Como se mencionó en el capítulo introductorio, se compararon los resultados obtenidos por dos ensayos de permeabilidad con cabeza constante con el valor de permeabilidad obtenido mediante la interpretación del ensayo de consolidación unidimensional reportado por el aplicativo.

Estos ensayos no fueron realizados para este proyecto de investigación, una importante firma de ingeniería requirió de esta información con el fin de elaborar el diseño detallado de una barrera impermeable, el material sometido a estudio se trata de una muestra de material de relleno conformada con lodo bentonítico en una concentración de 6%, de bentonita Wyoming, mezclado con sedimentos de desecho en las proporciones necesarias para cumplir con un criterio de asentamiento, se adicionó un 2% de bentonita Bentogel en seco.

Debido a que el ensayo de consolidación unidimensional generalmente se realiza sobre muestras de suelos finos (partículas tamaño arcilla y limo) y que una muestra representativa del material a ensayar corresponde a suelo areno arcilloso, se empleó una cámara de consolidación de dimensiones mayores respecto a la cámara estándar, con ello se minimiza la influencia del tamaño de partícula en las propiedades de compresibilidad y por tanto en la permeabilidad calculada. La cámara de consolidación con diámetro de 102.82mm y altura de 40.19mm, permite el drenaje por los dos extremos de la muestra de material de relleno mientras es sometido a carga incremental, el ensayo se realizó para cuatro incrementos de carga<sup>1</sup>, a continuación se describen las relaciones y procedimientos empleados con el fin de obtener parámetros de permeabilidad mediante los resultados del ensayo de consolidación unidimensional.

El valor de permeabilidad puede despejarse de la ecuación (5-24) dando origen a (8-1) como se muestra a continuación:

$$T = \frac{k(1+e)}{a_v \gamma_w} \cdot \frac{t}{H^2} = \frac{t \cdot c_v}{H^2} \quad (5-24)$$

$$k = \frac{(c_v a_v \gamma_w)}{1+e_0} \quad (8-1)$$

Si reemplazamos la ecuación que define el módulo volumétrico (5-17) en la ecuación (8-1) obtenemos:

$$k = c_v m_v \gamma_w \quad (8-2)$$

<sup>1</sup> Incrementos de (4,8,16 y 32)  $\frac{Kg}{cm^2}$

El modulo volumétrico también puede expresarse como:

$$m_v = \frac{\varepsilon}{\Delta\sigma'/100} \quad (8-3)$$

Donde:

$m_v$ : Modulo volumétrico en (cm<sup>2</sup>/Kg).

$\varepsilon$ : Deformación unitaria acumulada para cada incremento de carga.

$\sigma'$ : Esfuerzo vertical efectivo para cada incremento de carga (Kpa)

En este orden de ideas el valor de permeabilidad obtenido por el aplicativo se puede calcular por:

$$k = c_v * \frac{\varepsilon}{(\Delta\sigma'/100)} * \gamma_w * \frac{1}{(1000)} * \frac{1}{(60)} \quad (8-4)$$

Donde:

$\varepsilon$ : Deformación unitaria para cada incremento de carga.

$\sigma'$ : Esfuerzo vertical efectivo para cada incremento de carga (Kpa).

$\gamma_w$ : Peso unitario del agua (g/vm<sup>3</sup>).

$m_v$ : Modulo volumétrico (cm<sup>2</sup>/Kg).

$\sigma'$ : Esfuerzo vertical efectivo para cada incremento de carga (Kpa)

$c_v$ : Coeficiente de consolidación (cm<sup>2</sup>/min).

Para cada uno de los incrementos de carga mencionados anteriormente se empleo el procedimiento anteriormente descrito como se muestra a continuación:

$\sigma'$ (kPa)	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /min)	$av$ (cm <sup>2</sup> /kg)	$M_v$ (cm <sup>2</sup> /Kg)	$K$ (cm/s)	$K$ (m/s)
39,770	0,0052	0,115085562	0,2893778	2,49484E-08	2,49484E-10
78,309	0,0081	0,039694256	0,1029966	1,38588E-08	1,38588E-10
155,388	0,0100	0,038692047	0,0501980	8,34225E-09	8,34225E-11
309,546	0,0030	0,131889148	0,0855548	4,31782E-09	4,31782E-11

Tabla 4: Permeabilidad obtenida por el aplicativo (muestra P1-01-10)

Como podemos apreciar en la tabla 4 los resultados de permeabilidad obtenidos por el aplicativo se encuentran en un rango entre  $2,49 \cdot 10^{-8}$  cm/s y  $4,31 \cdot 10^{-9}$  cm/s.

Otra forma de medir la permeabilidad del material de relleno, esta vez en forma más directa, es a través de pruebas de permeabilidad en las que se obliga a pasar el fluido a través de la muestra de suelo; el gradiente hidráulico para que se genere el flujo a través de la muestra se consigue aumentando la carga hidráulica del fluido en un extremo de la muestra y permitiendo el flujo libre en el otro extremo, mientras la muestra permanece confinada lateralmente. Esta prueba se realizó bajo la modalidad de cabeza constante, es decir, la presión

aplicada en uno de los extremos de la muestra se mantiene constante durante la ejecución del ensayo mediante aplicación de presión con un sistema neumático. La mezcla tenía un diámetro de 100mm y 200mm de altura, las proporciones de los componentes corresponden con las de la muestra sometida al ensayo de consolidación.

En la Figura 17, se observa la permeabilidad obtenida para el material de relleno, el ensayo se realizó para cuatro presiones en el rango entre (100-350) KPa, equivalentes a la presión hidrostática ejercida por una columna de agua de 10 a 30m, la permeabilidad tiende a valores comprendidos en un rango entre  $3,2 \cdot 10^{-8}$  cm/s y  $7,2 \cdot 10^{-8}$  cm/s.

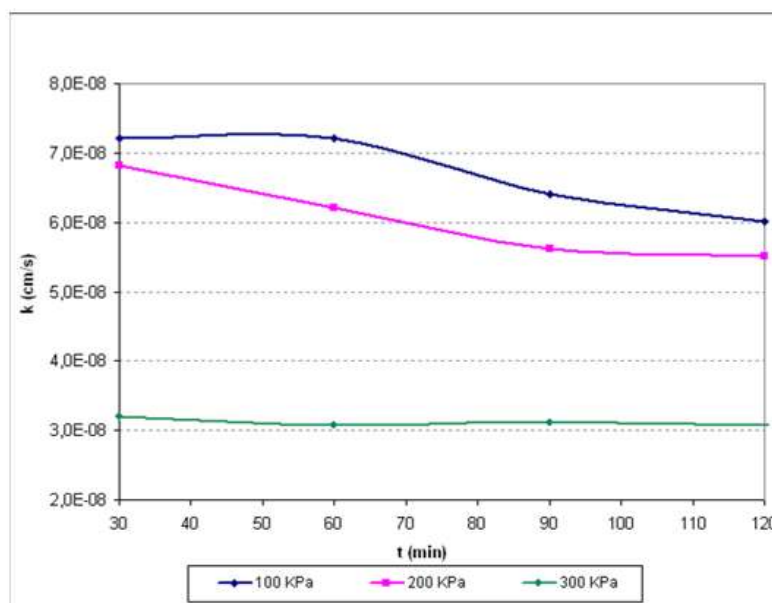


Figura 17: Permeabilidad del material de relleno (muestra P1-01-10)

A partir de los resultados reportados en la Tabla 4 y la Figura 17 podemos apreciar que los valores de permeabilidad se asemejan.

Se efectuó el mismo procedimiento para otro proyecto que también requirió realizar un ensayo de consolidación unidimensional y un ensayo de cabeza drenante con el fin de elaborar el diseño detallado de una barrera impermeable. el material sometido a estudio se trata de una muestra de material de relleno conformada con lodo bentonítico en una concentración de 6%, de bentonita Wyoming, mezclado con material proveniente de la excavación.

Nuevamente se empleo una cámara de consolidación de dimensiones mayores respecto a la cámara estándar, con el fin de minimizar la influencia del tamaño de partícula en las propiedades de compresibilidad y por tanto en la permeabilidad calculada, Se empleo un cámara de consolidación con de igual diámetro de 102.82mm al de la muestra (P1-01-10), sin embargo se modifico la altura a 50.62 mm.

$\sigma'$ (kPa)	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /min)	$\epsilon$	$M_v$ (cm <sup>2</sup> /Kg)	$K$ (cm/s)	$K$ (m/s)
25,306	0,0290	0,041842155	0,1653462	7,98779E-08	7,98779E-10
49,402	0,0473	0,040991361	0,1701134	1,34085E-07	1,34085E-09
73,499	0,0592	0,025731077	0,1067835	1,05446E-07	1,05446E-09
97,595	0,0598	0,015911159	0,0660310	6,57879E-08	6,57879E-10
121,692	0,0601	0,012507667	0,0519066	5,20043E-08	5,20043E-10
145,788	0,0656	0,012707024	0,0527339	5,76808E-08	5,76808E-10

Tabla 5: Permeabilidad obtenida por el aplicativo (muestra P2-02-10)

Como podemos apreciar en la Tabla 5 los resultados de permeabilidad obtenidos por el aplicativo se encuentran en un rango entre  $1,05 \cdot 10^{-7}$  cm/s y  $5,78 \cdot 10^{-8}$  cm/s.

También se efectuó un ensayo de cabeza constante para la muestra (P2-02-10), la permeabilidad obtenida para el material de relleno, el ensayo se realizó para cuatro presiones en el rango entre (100-250) KPa, equivalentes a la presión hidrostática ejercida por una columna de agua de 10 a 25m, los valores de permeabilidad obtenidos reportan un rango entre  $1,5 \cdot 10^{-7}$  cm/s y  $2,46 \cdot 10^{-7}$  cm/s ver (Figura 18).

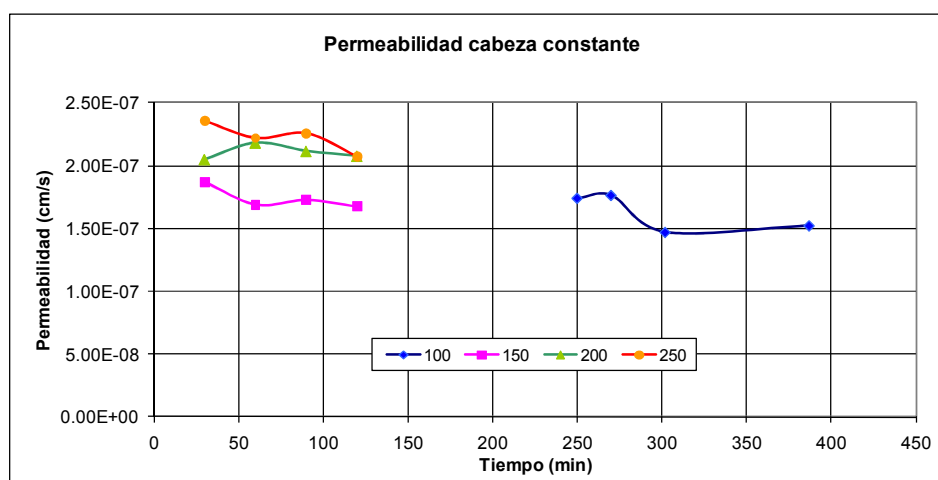


Figura 18: Permeabilidad del material de relleno (muestra P2-02-10)

Al comparar los resultados reportados en la Tabla 5 y la Figura 18 podemos apreciar que los valores de permeabilidad concuerdan bastante bien, en particular para los valores más altos de permeabilidad.

Según (M.Das 2006), es común encontrar los siguientes valores típicos de de permeabilidad según la formación típica del material.

Permeabilidad Relativa	Permeabilidad K (cm/s)	Formación típica
Muy permeable	Mayor que $10^{-1}$	Grava media a gruesa
Permeabilidad media	$10^{-1}$ a $10^{-3}$	Arena gruesa a fina
baja permeabilidad	$10^{-1}$ a $10^{-5}$	Arena fina, Arena limosa
Muy baja permeabilidad	$10^{-4}$ a $10^{-6}$	Limo, Limo Arcilloso, Arcilla limosa
Impermeable	Menor que $10^{-7}$	Arcillas

Tabla 6: Rango de valores típicos de permeabilidad (M.Das 2006)

En base al rango de valores típicos reportados por la (Tabla 6), podemos observar en la (Figura 19), que el rango de permeabilidad, estimado por el aplicativo para las 20 muestras analizadas está entre  $1,8 * 10^{-7} \left(\frac{cm}{s}\right)$  y  $1,2 * 10^{-10} \left(\frac{cm}{s}\right)$ , rango que según la tabla lo cual corresponde con la descripción de las arcillas.

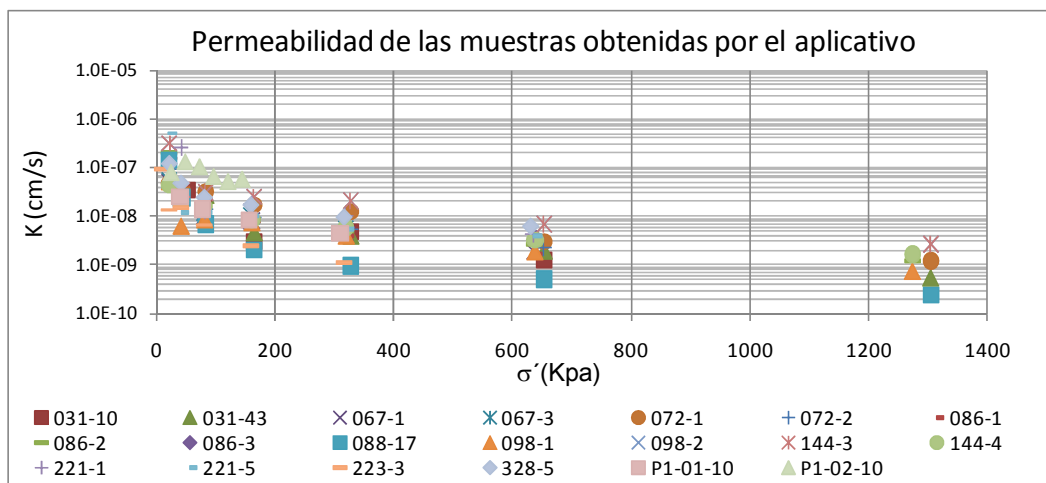


Figura 19: Valores de permeabilidad encontrados por el aplicativo.

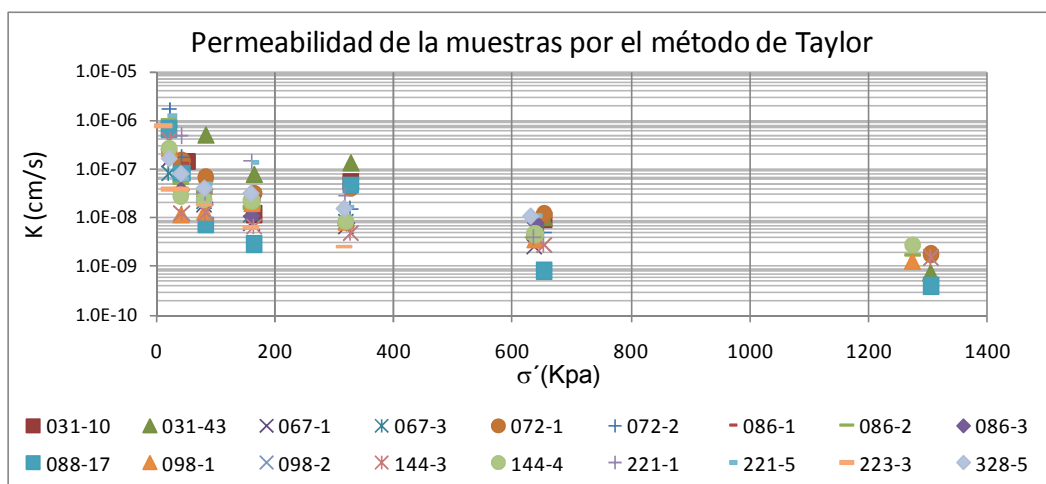


Figura 20: Valores de permeabilidad obtenidos por la interpretación del método de Taylor.

A pesar de la enorme diferencia en los resultados reportados de  $C_v$  entre este par de metodologías, los resultados de la (Figura 20) sugieren un rango entre  $1,2 * 10^{-6} \left(\frac{cm}{s}\right)$  y  $1,4 * 10^{-10} \left(\frac{cm}{s}\right)$  que reporta como era de esperar valores de permeabilidad mayores a los reportados por el aplicativo sin embargo se puede concluir que los parámetros de permeabilidad resultan muy similares con los reportados en la (Figura 19).

## 8.2 Como interpretar la curva de dispersión

La “curva de dispersión” fue elaborada con el fin de ofrecer al usuario una herramienta que le permitiese inspeccionar la tendencia y ajuste entre los resultados obtenidos por el ensayo de consolidación y su correspondiente curva teórica calculada. En el capítulo 7,2 vimos como la función objetivo calcula la distancia<sup>1</sup> entre el logaritmo del factor tiempo experimental y logaritmo del factor tiempo teórico, es posible graficar la diferencia entre este par de resultados contra el numero de dato de tiempo deformación registrado durante la ejecución del ensayo, a manera de ejemplo la Figura 21 reporta la dispersión entre los datos del ensayo (08-086-3) para un incremento de carga igual a 4(Kg/cm<sup>2</sup>).

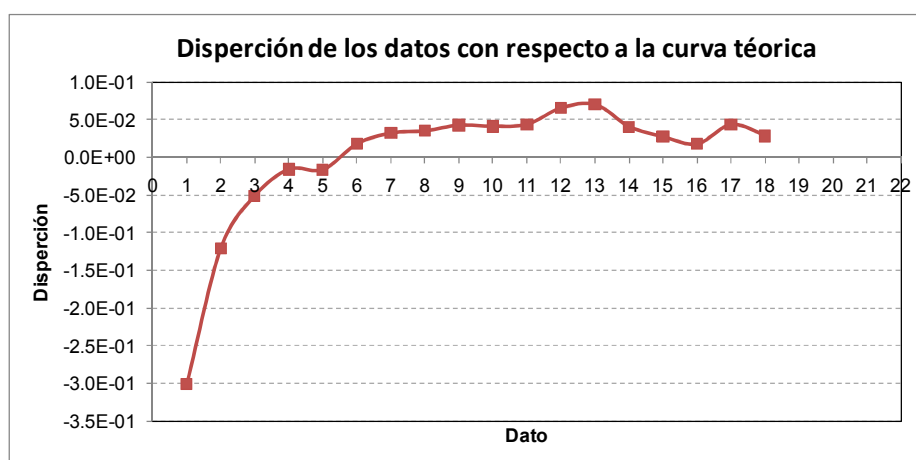


Figura 21: Dispersión entre los datos del ensayo (08-086-3) y su correspondiente curva teórica.

Asumiendo que  $C_v$  es constante para cada incremento de carga existe una tendencia generalizada en los resultados de dispersión, los primeros datos representan los valores obtenidos al inicio del ensayo y es precisamente en este segmento donde se produce la mayor dispersión. Este fenómeno puede estar asociado al remoldeo que sufre la muestra al momento de su extracción y manipulación en el laboratorio, otro tipo de comportamiento fue encontrado en diez<sup>2</sup> de las diecinueve muestras analizadas, donde se produjo una condición de deformación rápida, inmediatamente después de la aplicación del incremento de carga, debido posiblemente a que el suelo contenía algo de aire al momento de inicial el ensayo o la muestra no se encontraba ajustada correctamente al anillo.

Mediante la curva de dispersión reportada por el aplicativo es posible evidenciar este fenómeno, pues se observa una anomalía en la orientación de la curva que corresponde al primer ciclo de incremento de carga, con respecto a la tendencia que reportan las curvas de dispersión de los siguientes incrementos ver (Ilustración 8).

<sup>1</sup> La magnitud de esta distancia puede ser interpretada como un error absoluto.

<sup>2</sup> Muestras (07-223-3; 08-031-43; 08-072-1; 08-072-2; 08-086-1; 08-086-2; 08-098-; 08-098-; 08-144-3; 08-144-4)

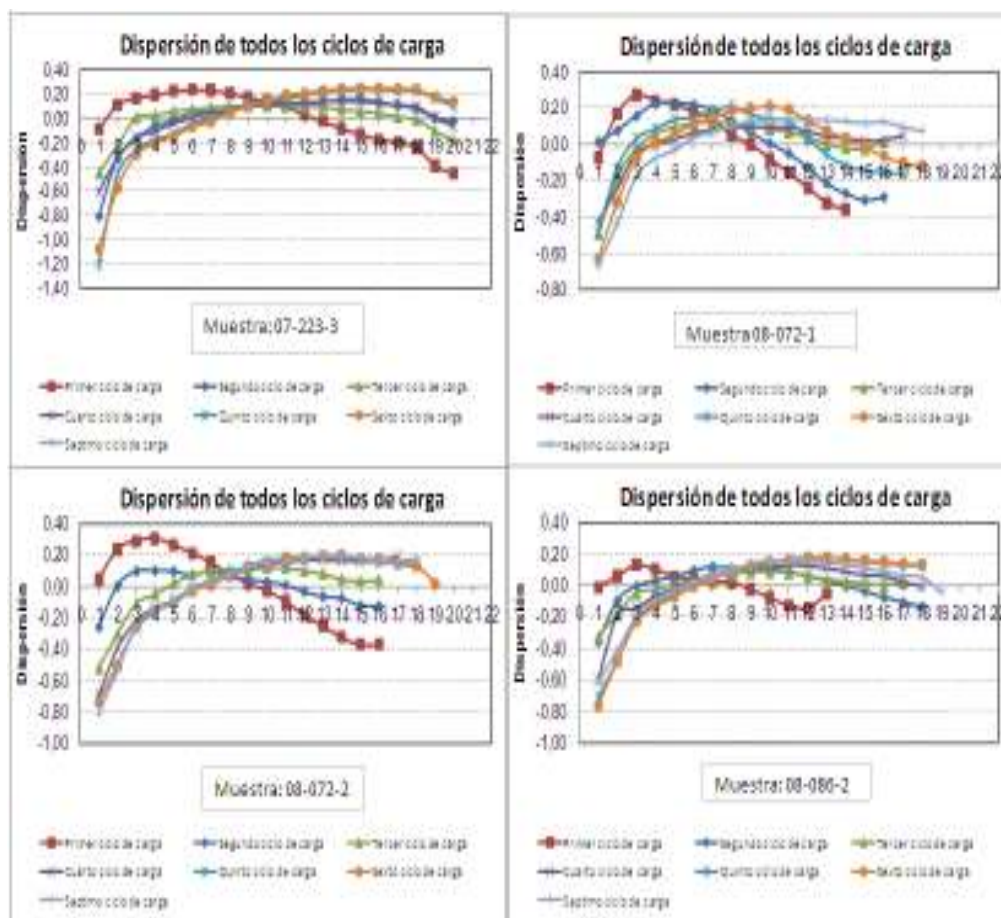


Ilustración 8: Curvas de dispersión que sugieren una condición de deformación rápida de la muestra al inicio del ensayo.

A partir del análisis de las curvas de dispersión calculadas para los 20 ensayos interpretados mediante el aplicativo, se elaboró la Tabla 7 que reporta los valores de dispersión para cada ciclo de incremento de carga, se elaboraron dos columnas que discriminan los puntos que componen la curva de dispersión como valores sobrestimados por el aplicativo si los puntos que describen la curva se encuentran por encima de la ordenada cero, o subestimados si se encuentran por debajo de la ordenada cero.<sup>1</sup>

	Datos subestimados	Datos sobrestimados
Primer ciclo	-0,15	0,10
Segundo ciclo	-0,15	0,08
Tercer ciclo	-0,16	0,08
Cuarto ciclo	-0,17	0,10
Quinto ciclo	-0,24	0,11
Sexto ciclo	-0,27	0,12
Séptimo ciclo	-0,27	0,11
<b>Promedio</b>	<b>-0,20</b>	<b>0,10</b>

Tabla 7: Dispersión de todas las muestras con respecto a la curva teórica

<sup>1</sup> Los resultados de dispersión de todas las muestras pueden ser consultados en medio magnético ver anexo (1)

Se puede estimar que un buen ajuste en la curva de dispersión, corresponde con una curva que se encuentre definida en el rango entre (-0,2 y 0,1) en unidades del factor tiempo adimensional.

### 8.3 Inspección gráfica de los tiempos teóricos $t_{90}$ y $t_{50}$

Al momento de estimar el parámetro  $C_v$ , el aplicativo cuenta con la opción de obtener los tiempos teóricos de consolidación  $t_{90}$  y  $t_{50}$ , parámetros requeridos para la interpretación del coeficiente  $C_v$  por medio de las metodologías de Taylor y de Casagrande respectivamente. Para cada incremento de carga, el usuario encontrara en la parte inferior de la gráfica de dispersión, una tabla con los tiempos teóricos de consolidación  $t_{90}$  y  $t_{100}$  ver (Ilustración 9).

Método de Taylor					
$t_{90}$ (min)	$t_{100}$ (min)	u	Raiz t (min)	$C_v(\text{cm}^2/\text{s}) \cdot 10^{-2}$	0.027
8.9	11.0	0.00	0.32	El tiempo para el cual la muestra se encuentra al 90% de su consolidación primaria $t_{90}$ (min), se calcula mediante el valor de $C_v$ obtenido por el aplicativo y la altura inicial de la muestra al inicio de cada incremento según la ecuación de Taylor, mientras que $t_{100}$ (min) representa la última lectura de tiempo reportada por el ensayo, no se trata necesariamente del valor correspondiente al tiempo teórico en que el material alcanza un porcentaje de consolidación en particular.	
8.9	11.0	0.04	0.55		
8.9	11.0	0.07	0.71		
8.9	11.0	0.11	1.00		
8.9	11.0	0.14	1.22		
8.9	11.0	0.17	1.41		
8.9	11.0	0.21	1.73		
8.9	11.0	0.25	2.00		
8.9	11.0	0.30	2.45		
8.9	11.0	0.37	3.00		
8.9	11.0	0.42	3.46		
8.9	11.0	0.47	4.00		
8.9	11.0	0.59	5.00		
8.9	11.0	0.68	6.00		
8.9	11.0	0.77	7.00		
8.9	11.0	0.84	8.00		
8.9	11.0	0.91	9.00		
8.9	11.0	0.96	10.00		
8.9	11.0	1.00	10.95		
8.9	11.0	1.00	15.81		
8.9	11.0	1.00	20.00		
8.9	11.0	1.00	37.95		

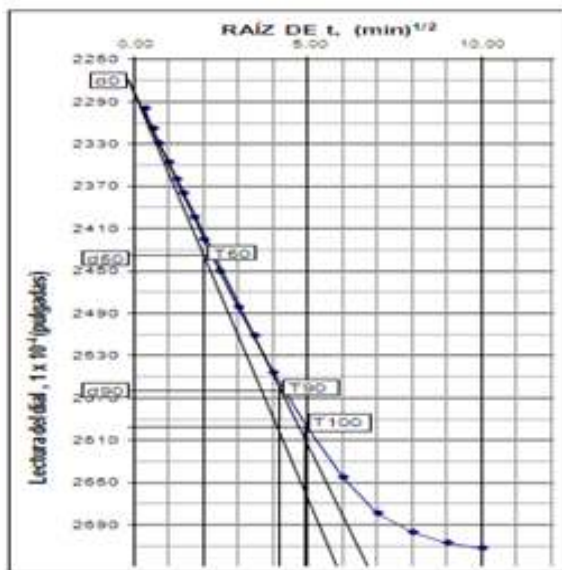
$$C_v = \frac{0.21H_m^2}{t_{90}}$$

Ilustración 9: Retrocálculo del al valor teórico de consolidación  $t_{90}$  mediante el coeficiente de consolidación  $C_v$  calculado por el aplicativo.

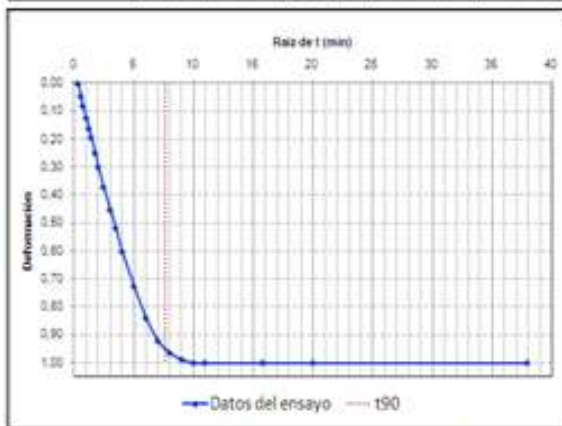
Al momento de interpretar los resultados reportados en la ilustración 10, se debe tener en cuenta que el tiempo para el cual la muestra se encuentra al 90% de su consolidación primaria  $t_{90}$  (min), es calculado mediante el valor de  $C_v$  ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ), obtenido por el aplicativo y la altura inicial de la muestra para cada incremento de carga, mientras que valor reportado  $t_{100}$  según la (I.N.V.E-151-07)<sup>1</sup> debería reportar el valor correspondiente al 100% de la consolidación primaria del material, sin embargo al interpretar este par de tiempos teóricos mediante el procedimiento descrito en la (Ilustración 9) en varias ocasiones no se encontró evidencia de que el valor reportado de  $t_{100}$  en efecto correspondiese al 100% de la consolidación primaria del material.

A continuación se reporta un ejemplo de cómo el aplicativo ofrece al usuario la posibilidad de inspeccionar gráficamente un los tiempos teóricos  $t_{90}$  y  $t_{50}$  mediante un retrocalculo del parámetro de  $C_v$  obtenido.

<sup>1</sup> El capítulo 10.4 de la (I.N.V.E-151-07) sugiere que si se piensa interpretar los resultados del ensayo haciendo uso de la metodología de Taylor, es posible tomar lecturas de tiempo asentamiento menores al mínimo tiempo sugerido de 24 horas siempre y cuando se garantice que la muestra completo el 100% de su consolidación primaria.



\*Interpretación de la mejor recta sugerida en la metodología de Taylor por parte de laboratorio de pruebas y ensayos, donde el valor estimado de  $t_{90}$  = 4,2 min.



\*Gráfico elaborado por el aplicativo computacional, donde  $t_{90}$  = 7,2 min.



\*Este gráfico sugiere la manera en que se debería interpretar, la metodología de Taylor con el fin del obtener un valor de  $t_{90}$ , consecuente con el valor de  $C_v$  estimado por el aplicativo computacional.

Figura 22: Esquema de la interpretación del tiempo teórico  $t_{90}$ , mediante el aplicativo computacional para la muestra (04-221-1)

## 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 9.1 CONCLUSIONES

- Al hacer uso de la metodología de Taylor para interpretar los resultados de un ensayo de consolidación, es posible que la precisión del valor estimado para el tiempo teórico  $t_{90}$  se vea afectada por la necesidad de una interpretación visual de los resultados, en particular si se trata de una muestra con un valor de  $C_v$  alto, con respecto a los valores típicos reportados.
- Se logro Formular e implementar un método para la interpretación de datos del ensayo de consolidación unidimensional basado en un procedimiento de ajuste que utilice todos los datos del ensayo.
- Al comparar y analizar los valores del parámetro  $C_v$  obtenidos mediante la interpretación de la metodología de Taylor, se encontró que estos se encontraban sobrestimados con respecto a al aplicativo y a los valores típicos reportados en la tabla 2.
- Mediante un análisis de relación de fase se encontró que en la mayoría de los resultados de laboratorio, se presentaban resultados de saturación menores al cien por ciento o que sobrepasaban el cien por ciento, este tipo de inconsistencias en el valor de saturación, están asociadas a que el valor y tiempo de la precarga destinada a saturar la carga no fueron suficientes y a errores de medición respectivamente.

#### 9.1.1 *Implicaciones practicas*

- Es posible obtener mayor precisión, confiabilidad y rapidez de interpretación de los parámetros de consolidación, mediante un ensayo de consolidación unidimensional, al hacer uso de la metodología planteada por el aplicativo computacional.
- Es posible potenciar la información que se puede obtener mediante un ensayo de consolidación unidimensional estándar, facilitando al ingeniero la diferenciación de suelos de una misma categoría e interpretar las condiciones de estado del suelo y comportamiento físico.
- Es posible obtener una medida confiable de la permeabilidad del material mediante la metodología sugerida en el aplicativo.

## 9.2 RECOMENDACIONES

- Se deben tener en cuenta las condiciones de saturación de la muestra ya que influyen en los resultados y en el caso que los especímenes de ensayo no se encuentren totalmente saturados estos deben ser interpretados con una teoría diferente a la convencional de la consolidación de Terzagui. Se recomienda realizar un análisis de relación de fase del material antes de ejecutar el ensayo de consolidación, con el fin de reportar con mayor precisión el contenido de humedad de la muestra al inicio del ensayo.
- Los resultados obtenidos pueden ser verse enormemente afectados por la pérdida de las características originales de la muestra, se recomienda proceder con extrema cautela, en la extracción de la muestra así como en la selección y preparación de la muestra para minimizar los daños que se le pueden ocasionar a esta.
- Se recomienda tomar las lecturas de tiempo-asentamiento durante un mínimo de 24 horas, incluso si se piensa interpretar los resultados del ensayo mediante la metodología de Taylor, ya que al definir el tiempo teórico de consolidación  $t_{90}$ , en un instante de tiempo cercano al inicio del ensayo bajo la premisa de que la muestra ya alcanzo el 100% de su consolidación primaria, se corre el riesgo de sobrestimar  $C_v$ .

## 10. BIBLIOGRAFIA

- Badillo, Juárez, y Rodríguez, Rico. «Mecánica de suelos.» En *Mecánica de suelos*, de Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 245. Mexico: Limusa, 1981.
- Ladd, Charles C. Hon, M., ASCE. «Práctica Recomendada para la caracterización de sitios en terreno blando.» *12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2003: 23-27.
- Das, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Mexico: Thomson Learning, 1999.
- DeGroot, Don J. «Conferencia Arthur Casagrande.» *Conferencia No12 de mecánica de suelos e ingeniería geotécnica*, 2003: 30-33.
- Holtz, Robert. «Introducción a la ingeniería geotécnica.» En *Introducción a la ingeniería geotécnica*, de Holtz Robert, 405. New jersey: Prentice-hall, 1981.
- Instituto Nacional de Vias. *INV E-151-07*. Bogota, 2007.
- Ladd, Charles. «Evaluación del fenómeno de creep en la estabilidad estructural.» *Lectura No 22 de terzaghi sobre ingeniería geotécnica*, 1991: 540-615.
- Lambe, T.W, y Whitman, R.V. «Mecánica de suelos.» En *Mecánica de suelos*, de William Lambe y Robert Whitman, 429. Massachusetts: Limusa, 1981.
- Leroueil, S. «Aspectos fundamentales sobre la compresibilidad de las arcillas.» *ASCE GSP 40*, 1994: 57-76.
- Das, Braja.M «Principios de ingeniería de cimentaciones.» En *Principios de ingeniería de cimentaciones*, de Braja M.Das, 1-2. California State University,Sacramento: Thomson, 2006.
- Mesri.G.,Kwang Lo, D.O y Feng, T.W «Asentamiento de terraplenes sobre arcillas blandas.» *ASCE GSP 40*,, 1994: 8-56.
- Poblete, Mauro. *Teoría y Ensayo de consolidación*. 22 de febrero de 2006.[http://web2.ucsc.cl/~mpoblete/geotecnia/ING\\_4203/Unidad2/Clase %202%20Teoria%20y%20Ensayo%20de%20consolidacion.pdf](http://web2.ucsc.cl/~mpoblete/geotecnia/ING_4203/Unidad2/Clase%202%20Teoria%20y%20Ensayo%20de%20consolidacion.pdf) (último acceso: 8 de Mayo de 2010).
- Reddy, Krishna. *Ensayo de consolidación para mecánica de suelos*. Sri Lanka: Universidad de Moratuwa , 2006.
- Terzaghi, Karl. *La mecánica se suelos en la ingeniería practica*. moretto: Ateneo, 1955.

## **11. Anexo 1 (Aplicativo en medio magnético)**

## 12. Anexo 2: Error absoluto para los valores reportados de $C_v$ .

Aplicativo $C_v(\text{cm}^2/\text{s}) \cdot 10^{-2}$	Interpretación de Taylor $C_v(\text{cm}^2/\text{s}) \cdot 10^{-2}$	Error absoluto (%)	Muestra No
0.055	0.103	0.048	04-221-1
0.028	0.086	0.058	
0.030	0.240	0.210	
0.024	0.068	0.044	
0.011	0.010	0.001	
0.047	0.114	0.067	04-221-5
0.021	0.124	0.103	
0.023	0.097	0.073	
0.028	0.383	0.355	
0.021	0.066	0.044	
0.018	0.050	0.032	07-223-3
0.026	0.225	0.199	
0.004	0.013	0.009	
0.012	0.015	0.003	
0.003	0.008	0.005	
0.001	0.003	0.002	07-328-5
0.001	0.003	0.002	
0.046	0.062	0.016	
0.036	0.069	0.033	
0.030	0.048	0.019	
0.027	0.049	0.022	031-10
0.025	0.039	0.015	
0.027	0.047	0.020	
0.037	0.151	0.114	
0.027	0.126	0.099	
0.038	0.460	0.421	08-031-43
0.012	0.089	0.076	
0.075	1.408	1.333	
0.026	0.519	0.493	
0.039	1.328	1.289	
0.023	0.119	0.096	08-067-1
0.008	0.011	0.003	
0.020	0.061	0.042	
0.014	0.031	0.017	
0.005	0.009	0.004	
0.007	0.007	0.000	067-3
0.004	0.006	0.002	
0.004	0.006	0.002	
0.027	0.039	0.012	
0.014	0.027	0.014	
0.008	0.015	0.007	
0.008	0.009	0.001	
0.005	0.007	0.002	

Aplicativo Cv(cm <sup>2</sup> /s)*10 <sup>-2</sup>	Interpretación de Taylor Cv(cm <sup>2</sup> /s)*10 <sup>-2</sup>	Error absoluto (%)	Muestra No
0.169	0.871	0.703	08-072-1
0.085	0.433	0.348	
0.049	0.102	0.054	
0.029	0.056	0.027	
0.044	0.142	0.099	
0.014	0.055	0.041	
0.006	0.009	0.003	
0.103	1.039	0.936	08-072-2
0.050	0.234	0.184	
0.033	0.058	0.024	
0.020	0.034	0.014	
0.011	0.020	0.009	
0.007	0.011	0.004	
0.005	0.008	0.003	
0.078	0.409	0.331	08-086-1
0.041	0.132	0.091	
0.024	0.036	0.012	
0.007	0.020	0.013	
0.003	0.005	0.002	
0.004	0.006	0.002	
0.130	0.621	0.492	08-086-2
0.023	0.059	0.036	
0.028	0.055	0.027	
0.014	0.028	0.013	
0.008	0.013	0.004	
0.006	0.009	0.003	
0.004	0.007	0.002	
0.026	0.042	0.015	08-086-3
0.023	0.054	0.031	
0.016	0.021	0.005	
0.013	0.016	0.003	
0.012	0.025	0.013	
0.110	0.508	0.398	08-088-17
0.032	0.130	0.098	
0.007	0.008	0.000	
0.003	0.004	0.001	
0.002	0.124	0.122	
0.002	0.004	0.001	
0.002	0.004	0.002	
0.044	0.227	0.183	08-098-1
0.024	0.049	0.026	
0.025	0.038	0.013	
0.023	0.060	0.037	
0.009	0.018	0.009	
0.005	0.008	0.004	
0.003	0.006	0.002	
0.038	0.351	0.313	08-098-2
0.025	0.059	0.033	
0.033	0.052	0.020	
0.016	0.029	0.012	
0.012	0.015	0.003	

Aplicativo $C_v(\text{cm}^2/\text{s}) \cdot 10^{-2}$	Interpretación de Taylor $C_v(\text{cm}^2/\text{s}) \cdot 10^{-2}$	Error absoluto (%)	Muestra No
0.060	0.352	0.292	08-144-3
0.022	0.081	0.058	
0.032	0.066	0.034	
0.014	0.058	0.044	
0.013	0.019	0.006	
0.008	0.009	0.001	
0.003	0.005	0.001	
0.069	0.432	0.364	08-144-4
0.020	0.033	0.013	
0.031	0.047	0.016	
0.022	0.058	0.036	
0.019	0.026	0.008	
0.015	0.021	0.006	
0.011	0.018	0.007	