

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE CONSOLIDACIÓN DE ALGUNOS  
SUELOS DE BUCARAMANGA

MARÍA FERNANDA BARINAS TIRIA  
HUGO ARMANDO CASTELBLANCO RUEDA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA

2012

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE CONSOLIDACIÓN DE ALGUNOS  
SUELOS DE BUCARAMANGA

MARÍA FERNANDA BARINAS TIRIA  
HUGO ARMANDO CASTELBLANCO RUEDA

Trabajo de grado para optar al título de  
INGENIERO CIVIL

Directora:  
HEBENLY CELIS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA

2012

## DEDICATORIA

La vida está llena de sueños, Dios, la perseverancia, la constancia y la entrega hacen que cada uno de ellos se vaya haciendo realidad, por eso quiero dedicar este trabajo de grado al rey de reyes y señor de señores: Jesucristo nuestro señor, Él siempre guió mi camino y me iluminó, me levantó cuando las dificultades parecían derrumbarme, anduvo de la mano conmigo toda mi carrera, también a mis padres: Armando CastelblancoVesga e Inés Rueda cortés, por su apoyo incondicional, su infinito amor, sus innumerables esfuerzos y sacrificios, nunca olvidaré todo lo que han hecho por mí y espero poder más adelante recompensarlos por ser los mejores papas del mundo, a mi hermana: Diana Catelblanco que es mi consentida y me ayudó a alimentarme bien en momentos donde las obligaciones diarias me consumían, quiero demostrarle con esta tesis que nada es imposible y que Dios la tiene para cosas grandes, a mi linda novia Silvia Ramírez por su amor y su compañía fundamental para culminar mi meta, también a mi compañero de luchas David Díaz que siempre estuvo hombro a hombro conmigo defendiendo la Educación Pública.

*“Para empezar un gran proyecto, hace falta valentía. Para terminar un gran proyecto, hace falta perseverancia.”*

***Hugo Armando Castelblanco Rueda***

## DEDICATORIA

A Dios por darme la dicha de la vida, por permitirme refugiar en Él en momentos de desesperación y tristeza, por ser mi camino, mi luz y mi fuerza, por brindarme su amor incondicional, pero sobre todo por darme la oportunidad de ser lo que soy.

A mi madre quien siempre confió en mí, que me acompañó en los buenos y malos momentos en mi formación como profesional y como mujer, por la fuerza que me brindo para siempre seguir siempre adelante, por los consejos, el cariño y la admiración que ha tenido hacia mí, por ser la mejor amiga, la mejor confidente, la mejor mujer y sobre todo la mejor mamá, que gracias a ese espíritu de lucha y superación que siempre la caracteriza hoy dio frutos al contribuir con el cumplimiento de esta meta. A mi hermana Alejandra que con su ternura e inocencia me enseñó a disfrutar de pequeños detalles, que siempre tuvo una sonrisa y una palabra de amor, pero sobre todo por llegar a mi vida.

Por último y no menos importante a ti Iván Fernando, por tu constante apoyo, tus innumerables muestras de amor, por cultivar en mí la perseverancia, por hacer parte de mi vida y afrontar conmigo todos aquellos obstáculos que la vida ponía en mi camino, por los múltiples momentos de felicidad, pero sobre todo por mostrarme el verdadero significado del amor.

***María Fernanda Barinas Tiria***

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer enormemente a mi directora de trabajo de grado la ingeniera Hebenly Celis por su paciencia, sus enseñanzas y sus conocimientos, al Ingeniero Vladimir Merchán por su ayuda desinteresada y amable para aprender a manejar el Software con el que desarrollé mi tesis, al laboratorista Jairo “La mechuda” por su colaboración, su ayuda y por ese excelente café que hacían amenos los días en el laboratorio, a mi tío Arturo Castelblanco que ha estado en momentos cruciales para darme sus consejos con el mayor cariño del mundo y me ha apoyado a mí y a mi familia en momentos difíciles.

**Hugo Armando Castelblanco Rueda**

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi gratitud, principalmente está dirigida a Dios, quien me dio la fe, la fortaleza, la salud y la esperanza que me acompañaron en cada etapa de este proceso. Gracias por ayudarme a levantar en mis fracasos, por aprender de ellos y principalmente por permitirme realizar el sueño más importante de mi vida.

A mi directora la ingeniera Hebenly Celis quien me ha orientado en todo momento en la realización de este proyecto, compartiéndome sus conocimientos y opiniones para el pleno desarrollo de este propósito.

A los docentes que me han asistido durante el proceso, a Vladimir Merchán quien me brindo siempre su orientación con profesionalismo ético en la adquisición de conocimientos y afianzando mi formación y a Luis Alberto Capacho por su paciencia, sus consejos e incondicional apoyo.

**María Fernanda Barinas Tiria**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	22
1. OBJETIVOS.....	23
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	23
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
2. VERIFICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN .....	24
2.1 EXTENSÓMETRO.....	24
2.2 PISTÓN DE CARGA.....	27
3. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS MUESTRAS TOMADAS.....	33
4. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS .....	34
5. CONSOLIDACIÓN.....	35
5.1 ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN .....	35
5.1.1 PROCEDIMIENTO.....	35
5.1.2 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TIEMPO DEFORMACIÓN .....	38
ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN: MUESTRA N°3.....	39
5.1.3 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TIEMPO DEFORMACIÓN POR CASAGRANDE.....	40
5.1.4 MÉTODO DE TAYLOR O RAÍZ CUADRADA DE TIEMPO .....	45
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	50
6.1 RESULTADOS DE LA PARTE EXPERIMENTAL.....	50
6.2 MODELAMIENTO NUMÉRICO .....	51
6.2.1 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA .....	52
6.2.2 DEFINICIÓN DE ATRIBUTOS Y CONDICIONES .....	53
6.2.3 DEFINICIÓN DE LOS MATERIALES .....	56
6.2.4 RESULTADOS GRÁFICOS DE GID EN EL POS PROCESO .....	60
6.2.5 DATOS DE SALIDA.....	63
6.2.6 RESULTADOS NUMÉRICOS DE GID EN EL POS PROCESO.....	65
6.2.7 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES DE CONSOLIDACIÓN.....	76

7. CONCLUSIONES .....	77
REFERENCIAS .....	78
ANEXOS.....	79

## LISTA DE FIGURAS

	Pag.
<i>Figura 1. Extensómetro digital, máquina de corte directo</i>	
<i>Figura 2. Extensómetro analógico, máquina de consolidación</i>	24
<i>Figura 3. Deformaciones analógicas y digitales con respecto al tiempo</i>	26
<i>Figura 4. Gráfica de calibración para obtener el valor de calibración media</i>	26
<i>Figura 5. Celda de carga puesta bajo el marco de carga</i>	27
<i>Figura 6. Relación entre la carga real y la carga directa</i>	30
<i>Figura 7. Relación entre la carga real y la carga indirecta</i>	30
<i>Figura 8. Relación entre la carga real y la carga directa e indirecta</i>	31
<i>Figura 9. Esquema de un marco de carga, para un ensayo de consolidación</i>	32
<i>Figura 10. Ubicación geográfica</i>	33
<i>Figura 11. Toma de la muestra in situ</i>	37
<i>Figura 12. Preservación de la humedad</i>	32
<i>Figura 13. Colocación de la muestra en la anilla de consolidación</i>	38
<i>Figura 14. Montado del consolidómetro con extensómetro digital</i>	38
<i>Figura 15. Determinación del coeficiente de consolidación por el método de logaritmo de tiempo para el primer día de carga</i>	40
<i>Figura 16. Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el segundo día de carga</i>	41
<i>Figura 17. Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el tercer día de carga</i>	42
<i>Figura 18. Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el cuarto día de carga</i>	43
<i>Figura 19. Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el quinto día de carga</i>	44
<i>Figura 20. Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el primer día de carga</i>	45
<i>Figura 21. Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el segundo día de carga</i>	46

<i>Figura 22. Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el tercer día de carga</i>	47
<i>Figura 23. Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el cuarto día de carga</i>	48
<i>Figura 24. Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el quinto día de carga</i>	49
<i>Figura 25. Logo del Software</i>	51
<i>Figura 26. Entorno gráfico del software</i>	51
<i>Figura 27. Diagrama de flujo de trabajo</i>	52
<i>Figura 28. Parte geométrica inicial de la muestra</i>	53
<i>Figura 29. Definición de la geometría en GID</i>	53
<i>Figura 30. Modelamiento en GID (1)</i>	54
<i>Figura 31. Modelamiento en GID (2)</i>	54
<i>Figura 32. Modelamiento en GID (3)</i>	55
<i>Figura 33. Modelamiento en GID (4)</i>	56
<i>Figura 34. Tabla de Code_Brighth (1)</i>	57
<i>Figura 35. Tabla de Code_Brighth (2)</i>	57
<i>Figura 36. Tabla de Code_Brighth (3)</i>	57
<i>Figura 37. Modelamiento en GID (5)</i>	58
<i>Figura 38. Tabla de Code_Brighth (4)</i>	58
<i>Figura 39. Tabla de Code_Brighth (4)</i>	59
<i>Figura 40. Tabla de Code_Brighth (4)</i>	59
<i>Figura 41. Modelamiento en GID (6)</i>	59
<i>Figura 42. Tabla de Code_Brighth (4)</i>	60
<i>Figura 43. Modelamiento en GID (6)</i>	60
<i>Figura 44. Distribución de presión de poros en el día 0</i>	61
<i>Figura 45. Distribución de presión de poros 1 Hora</i>	61
<i>Figura 46. Distribución de presión de poros 2 Horas</i>	61
<i>Figura 47. Distribución de presión de poros 4 Horas</i>	61
<i>Figura 48. Distribución de presión de poros 8 Horas</i>	62

<i>Figura 49. Distribución de presión de poros 16 horas</i>	62
<i>Figura 50. Distribución de presión de poros en el día 1</i>	62
<i>Figura 51. Distribución de presión de poros en el día 2</i>	62
<i>Figura 52. Distribución de presión de poros en el día 3</i>	62
<i>Figura 53. Distribución de presión de poros en el día 4</i>	62
<i>Figura 54. Distribución de presión de poros en el día 5</i>	63
<i>Figura 55. Exportación de los datos de salida a Excel (1)</i>	64
<i>Figura 56. Exportación de los datos de salida a Excel (2)</i>	64
<i>Figura 57. Exportación de los datos de salida a Excel (3)</i>	65
<i>Figura 58. Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el primer día de carga con los Datos de salida de GID</i>	66
<i>Figura 59. Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el segundo día de carga con los Datos de salida de GID</i>	67
<i>Figura 60. Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el tercer día de carga con los Datos de salida de GID</i>	68
<i>Figura 61. Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el cuarto día de carga con los Datos de salida de GID</i>	69
<i>Figura 62. Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el quinto día de carga con los Datos de salida de GID</i>	70
<i>Figura 63. Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el primer día de carga</i>	71
<i>Figura 64. Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el segundo día de carga</i>	72
<i>Figura 65. Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el tercer día de carga</i>	73
<i>Figura 66. Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el cuarto día de carga</i>	74
<i>Figura 67. Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el cuarto día de carga</i>	75

*Figura 68. Cuadro comparativo entre el modelamiento numérico y el ensayo experimental*

76

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1. Análisis de resultados obtenidos en la verificación de la deformación</i>	25
<i>Tabla 2. Análisis de resultados obtenidos en la verificación de la carga</i>	29
<i>Tabla 3. Convenciones de las muestras extraídas</i>	33
<i>Tabla 4. Resultados de la caracterización de los suelos</i>	34
<i>Tabla 5. Datos de la muestra n°3 al inicio del ensayo</i>	39
<i>Tabla 6. Datos de la muestra n°3 al final del ensayo</i>	39
<i>Tabla 7. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 30,40 kPa</i>	40
<i>Tabla 8. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 61,80 kPa</i>	41
<i>Tabla 9. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 123,60 kPa</i>	42
<i>Tabla 10. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 248,20 kPa</i>	43
<i>Tabla 11. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 495,58 kPa</i>	44
<i>Tabla 12. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 30,40 kPa</i>	45
<i>Tabla 13. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 61,80 kPa</i>	46
<i>Tabla 14. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 123,60 kPa</i>	47
<i>Tabla 15. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 248,20 kPa</i>	48
<i>Tabla 16. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 495,40 kPa</i>	49
<i>Tabla 17. Parámetros de consolidación de las muestras analizadas</i>	50
<i>Tabla 18. Humedades de las muestras en las fases inicial y final</i>	50

<i>Tabla 19. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 30463.91 Pa</i>	65
<i>Tabla 20. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 6990 Pa</i>	66
<i>Tabla 21. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 122018 Pa</i>	67
<i>Tabla 22. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 243960 Pa</i>	68
<i>Tabla 23. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 487820 Pa</i>	69
<i>Tabla 24. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 30460 Pa</i>	70
<i>Tabla 25. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 61800 Pa</i>	71
<i>Tabla 26. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 123600 Pa</i>	72
<i>Tabla 27. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 248200 Pa</i>	73
<i>Tabla 28. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 495400 Pa</i>	74

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. GLOSARIO DE TÉRMINOS .....	79
ANEXO B. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO .....	81
ANEXO C. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	95
ANEXO D. ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN MUESTRA N°1 Y MUESTRA N°2 .....	103
ANEXO E. PROCEDIMIENTO DETERMINACIÓN $C_v$ DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TIEMPO DEFORMACIÓN.....	125
ANEXO F. INTERVALOS DE TIEMPO.....	128

## RESUMEN

**TITULO:** ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE CONSOLIDACIÓN DE ALGUNOS SUELOS EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA\*

**AUTORES:** MARÍA FERNANDA BARINAS TIRIA\*\*  
HUGO ARMANDO CASTELBLANCO RUEDA

**PALABRAS CLAVES:** asentamiento, hidromecánico, compresión, elasticidad, software, caracterización, consolidación.

**CONTENIDO:** La industria de la construcción ha sido clave para el desarrollo económico del País en los últimos años debido a su gran evolución; por esta razón es de vital importancia realizar con detalle un profundo estudio geotécnico, con el fin de determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo cumpliendo el objetivo propuesto en el presente proyecto, garantizando así las condiciones óptimas para su pleno desarrollo y total funcionalidad.

A partir de la necesidad de identificar el comportamiento de los suelos presentes en la ciudad de Bucaramanga, se ejecutaron ensayos de consolidación unidimensional basados en la teoría de Terzaghi, a muestras de suelos presentes en dicha ciudad y así de esta manera poder determinar la velocidad y magnitud del asentamiento de estructuras fundadas sobre este tipo de suelos.

La clasificación de los suelos fue uno de los primeros objetivos del proyecto, la cual mediante ensayos de granulometría por tamizado y límites de Atterberg, se pudo establecer criterios de tipificación para estos. El desarrollo de los ensayos señalados está fundamentado en las normas ASTM D 2435-90, AASHTO T 216, I.N.V. E – 126 – 07, I.N.V. E – 125 – 07, I.N.V. E – 123 – 07. El modelamiento de las muestras analizadas inicialmente en laboratorio, se hizo mediante el software GID; el cual ha sido diseñado para cubrir todas las necesidades comunes en el campo de las simulaciones numéricas desde el pre-proceso hasta el post-proceso, generando de esta manera el modelado geométrico, análisis de datos, generación de mallas, transferencia de datos a software de análisis y visualización de resultados , garantizando de esta manera una eficiente evaluación del proceso al que fueron sometidas las muestras.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingeniarías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería civil, Directora Ingeniera Hebenly Celis

## ABSTRACT

**TITLE:** STUDY THE CONSOLIDATION OF SOME PROPERTIES OF SOILS IN THE CITY OF BUCARAMANGA\*

**AUTHOR:** MARÍA FERNANDA BARINAS TIRIA\*\*  
HUGO ARMANDO CASTELBLANCO RUEDA

**DESCRIPTION:** The construction industry has been a key part to economic development of the country in recent years due to its evolution, because of this, it is vitally important to do a detailed and profound geotechnical study in order to determine the soil's physical and mechanical properties, to achieve the goal proposed in the present project, ensuring optimal conditions for the full development and full functionality of the studies.

By the need to identify the behavior of the soils present in the city of Bucaramanga, one-dimensional consolidation tests were performed, based on Terzaghi theory, to some samples of soils present in this city, and thus able to determine the speed and magnitude of settlement of structures founded on these soils.

The soil classification was one of the main objectives of the project, and was achieved by testing grain using sieving and Atterberg limits, and classification criteria could established for this sample. The development of tests indicated is based on ASTM D 2435-90, AASHTO T 216, INV E - 126 - 07, I.N.V. E - 125 - 07, I.N.V. E - 123 - 07.

The modeling of the samples initially analyzed in the laboratory, was executed by the GID software, which has been designed to cover common needs in the field of numerical simulation process from pre-to post-process, generating geometric modeling, data analysis, mesh generation, data transfer to software analysis and visualization of results, thus ensuring an efficient evaluation of the process to which the samples were submitted.

---

\* Grade Project

\*\* Physical-Mechanical Engineering Faculty. Civil Engineering School. Director: Engineer Hebenly Celis.

## INTRODUCCIÓN

El proceso de consolidación es de gran importancia en las obras civiles, sobre todo en el caso específico de los suelos saturados ya que se presentan con mayor frecuencia en la práctica ingenieril. El tema de consolidación de suelos empezó a ser tratado analíticamente a partir de la década del 40, teniendo en cuenta la teoría fundamental con problemas prácticos, recién en la década del 70 fueron considerados problemas más cercanos de la realidad, con una orientación numérica. El objeto del presente trabajo es mostrar las propiedades de consolidación de algunos suelos de Bucaramanga y hacer una correlación práctica con una herramienta computacional capaz de realizar la simulación numérica del fenómeno de consolidación en suelos saturados, mediante su resolución por elementos finitos.

La importancia del estudio de los suelos saturados reside en que, desde el punto de vista de comportamiento mecánico, es uno de los casos más desfavorables de una masa de suelo frente a cargas por las elevadas presiones intersticiales, deformaciones excesivas, hinchamiento y colapso. Hasta el momento, para resolver los problemas de consolidación de suelos saturados solo se contaba los datos prácticos de laboratorio; pero en diversos casos su utilización no mostraba los resultados esperados o no se podían abordar la totalidad de los casos, surgiendo de esta manera la necesidad de expandirnos y comparar resultados prácticos que sin una técnica adecuada puede arrojar resultados erróneos. Por ello nos respaldaremos en cuestiones empíricas, experimentales y numéricas para que la perspectiva o el enfoque este trabajo no se centre en dar una noción de cómo se consolidan algunos suelos en la ciudad de Bucaramanga, sino cómo podemos interpretar los resultados con herramientas computacionales modernas para aplicarlos al uso diario de la ingeniería.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar las propiedades de consolidación de algunos suelos característicos en la ciudad de Bucaramanga.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Verificar el estado de los aparatos de medición mediante la calibración de los equipos utilizados para el ensayo de consolidación.
- Ubicar en un mapa los puntos de estudio de las muestras para el proyecto.
- Realizar ensayos de laboratorio a las muestras seleccionadas.
- Obtener correlación entre el análisis práctico de las muestras en el laboratorio y un software que modele los ensayos de consolidación.
- Evaluar los resultados obtenidos de acuerdo a los suelos encontrados.

## 2. VERIFICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

La calibración de los instrumentos de medición es fundamental en el momento de interpretar las lecturas obtenidas en el ensayo de consolidación; el concepto de consolidación aplicativamente debe basarse técnicamente en la precisión de los resultados para obtener coherencia entre el marco conceptual y práctico. Por eso se analizarán dos instrumentos claves para este ensayo:

- Extensómetro
- Pistón de carga

### 2.1 EXTENSÓMETRO

Un extensómetro es un instrumento de deformación de alta precisión que está en condiciones de medir la deformación de un suelo causado por la aplicación de fuerza en la longitud axial de la probeta.



**Figura 1.** Extensómetro digital, máquina de corte directo analógico.



**Figura 2.** Extensómetro Máquina de consolidación.

Para verificar el funcionamiento del extensómetro se hace un análisis práctico y analítico; la parte práctica consiste en comparar la deformación obtenida en varios

instantes de tiempo en el extensómetro digital de la máquina de corte directo y compararla con el extensómetro analógico de la máquina de consolidación en cuestión; y así determinar si existe un margen de error medianamente aceptable menor al 1%, los valores obtenidos se pueden observar a continuación en la **Tabla 1**.

**Tabla 1.** Análisis de resultados obtenidos en la verificación de la deformación

Tiempo [seg]	Deformación del Extensómetro digital, $\delta_1$ [mm]	Deformación del Extensómetro analógico, $\delta_2$		% error	CALIBRACIÓN $\delta_1/\delta_2$
		Div	Deformación del Extensómetro Mecánico, $\delta_2$ [mm]		
10	0,175	69,5	0,17375	0,71	1,007194245
20	0,362	144	0,36	0,55	1,005555556
30	0,535	214,4	0,536	0,19	0,998134328
40	0,707	282	0,705	0,28	1,002836879
50	0,868	347,5	0,86875	0,09	0,999136691
60	1,034	414	1,035	0,10	0,999033816
70	1,207	483	1,2075	0,04	0,999585921
80	1,385	553,8	1,3845	0,04	1,000361141
90	1,587	635	1,5875	0,03	0,999685039
100	1,759	703	1,7575	0,09	1,000853485
110	1,949	779,5	1,94875	0,01	1,000128287
120	2,119	847,2	2,118	0,05	1,000472144

Al obtener los resultados prácticos se procede a analizar el comportamiento de las gráficas de la deformación digital y analógica v.s tiempo

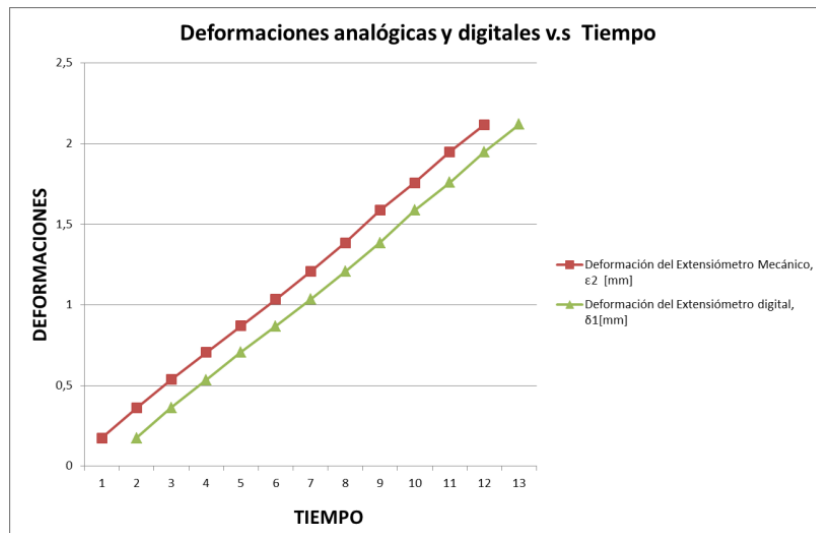


Figura 3. Deformaciones analógicas y digitales con respecto al tiempo

Obteniendo así un valor de calibración de calibración media de 1.0011 correspondiente al promedio aritmético de  $\delta_1 / \delta_2$ .

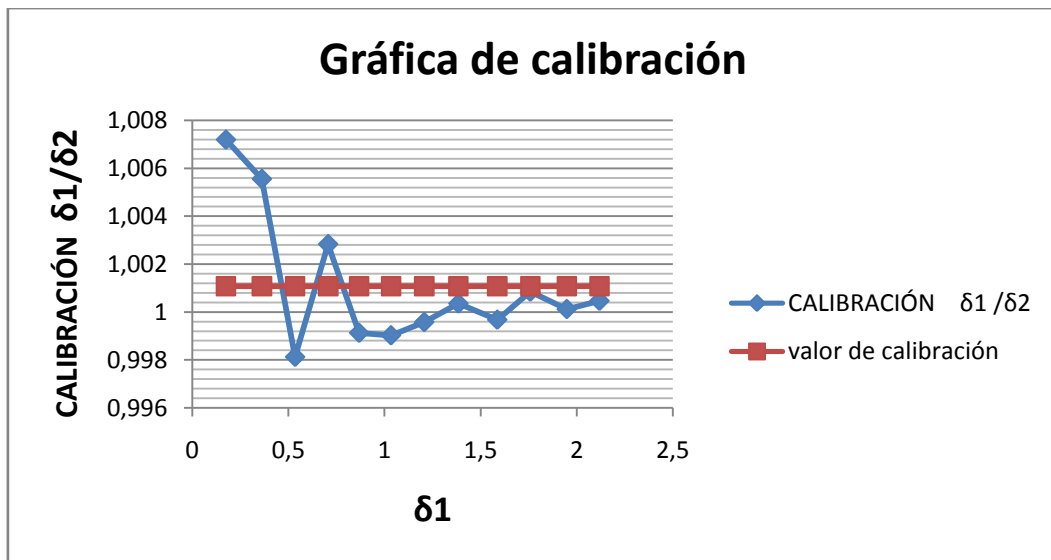


Figura 4. Gráfica de calibración para obtener el valor de calibración media

El anterior análisis permite indicar con veracidad que el extensómetro analógico presenta una precisión aceptable ya que el mayor margen de error obtenido es de 0,71% y se presenta en la primera toma de datos, a los 10 segundos, la utilización del valor de calibración se utiliza de la siguiente manera:

$$\frac{\sum_i^n \left( \frac{\delta_{i1}}{\delta_{i2}} \right)}{n} = 1,001$$

Donde

$\delta_{i1}$ : Es el valor real de deformación en cada instante de tiempo

$\delta_{i2}$ : Es el valor del extensómetro en cada instante de tiempo

$n$  = Es el número de intervalos de tiempo

$$\therefore \text{para obtener el valor real } \delta_{2,real} = \delta_1 \times 1,001$$

## 2.2 PISTÓN DE CARGA













Para evaluar la precisión del pistón de carga es necesario hacer una comparación práctica entre la carga puesta y la que trasmite el marco de carga a la muestra. Como lo muestra la siguiente figura:



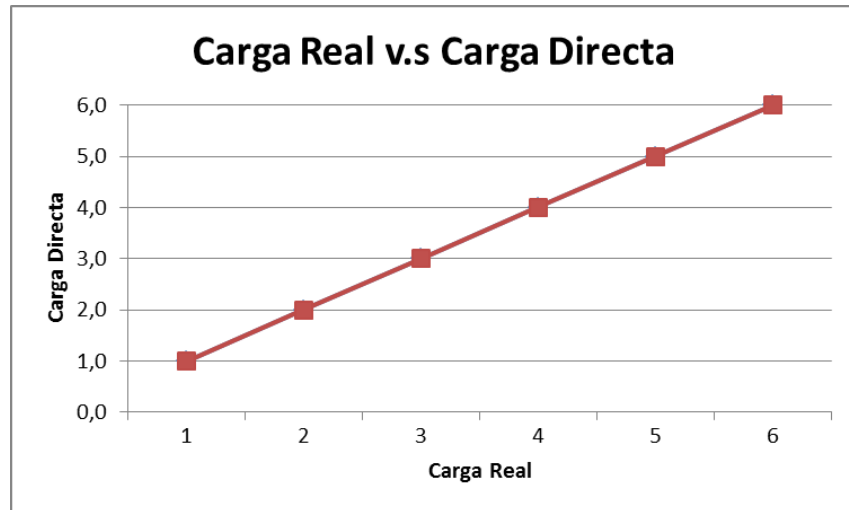
**Figura 5.** Celda de carga puesta bajo el marco de carga

Para verificar el funcionamiento del pistón de carga se hace un análisis práctico y analítico; la parte práctica consiste en comparar la carga obtenida con varios patrones de carga en la celda de carga y compararla con el pistón de carga de la máquina de consolidación en cuestión; teniendo en cuenta que la carga leída en el punto B de la figura anterior está regida por la constante del brazo de carga y es mayor a la carga puesta en el punto A, para así obtener la constante más aproximada mostrada en la **Tabla 2**.

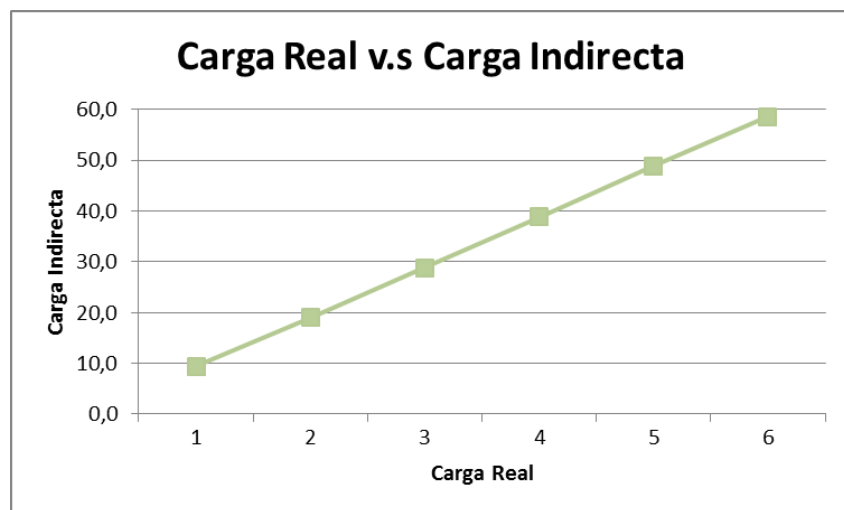
**Tabla 2.** Análisis de resultados obtenidos en la verificación de la carga

Lectura tomada directamente por la celda de carga, $P_1$	FOTO	Lectura tomada por la celda de carga indirectamente por el marco de carga, $P_2$	FOTO	CONSTANTE (K)
1,0		9,4		9,400
2,0		19,0		9,500
3,0		28,8		9,600
4,0		38,8		9,700
5,0		48,8		9,760
6,0		58,6		9,767

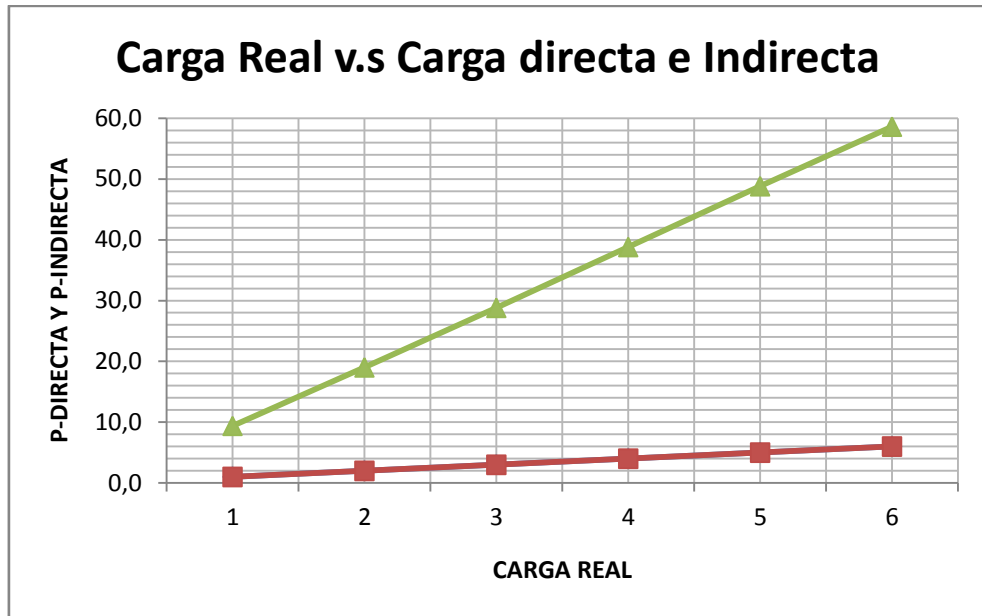
En las siguientes gráficas hay tres tipos de cargas: La carga real que es la carga de la pesa, la carga directa que es la carga puesta directamente sobre la celda y la carga indirecta que es la carga puesta en la máquina de consolidación.



**Figura 6.** Relación entre la carga real y la carga directa



**Figura 7.** Relación entre la carga real y la carga indirecta



**Figura 8.** Relación entre la carga real y la carga directa e indirecta

Al obtener los resultados prácticos se calcula el valor de la constante del brazo del pistón de carga de la siguiente manera:

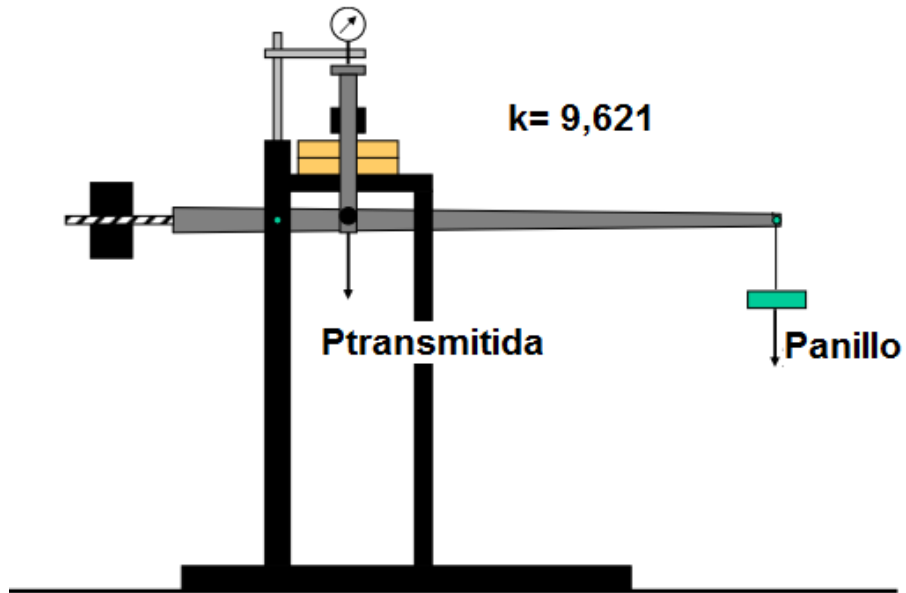
$$K = \frac{\sum_i^n \left( \frac{P_{i1}}{P_{i2}} \right)}{n} = \frac{57,727}{6} = 9,621$$

Donde

$P_{i1}$ : Lectura tomada directamente por la celda de carga en cada incremento de carga

$P_{i2}$ : Lectura tomada indirectamente por la celda desde el pistón de carga

$n$  = Es el número de intervalos de carga



**Figura 9.** Esquema de un marco de carga, para un ensayo de consolidación.

Para obtener el valor de carga real transmitida a la muestra solo basta con multiplicar por la constante anteriormente hallada así:

$$P_{t-muestra} = P_{anillo} \times 9,621$$

*P<sub>t-muestra</sub>*: Carga transmitida a la muestra

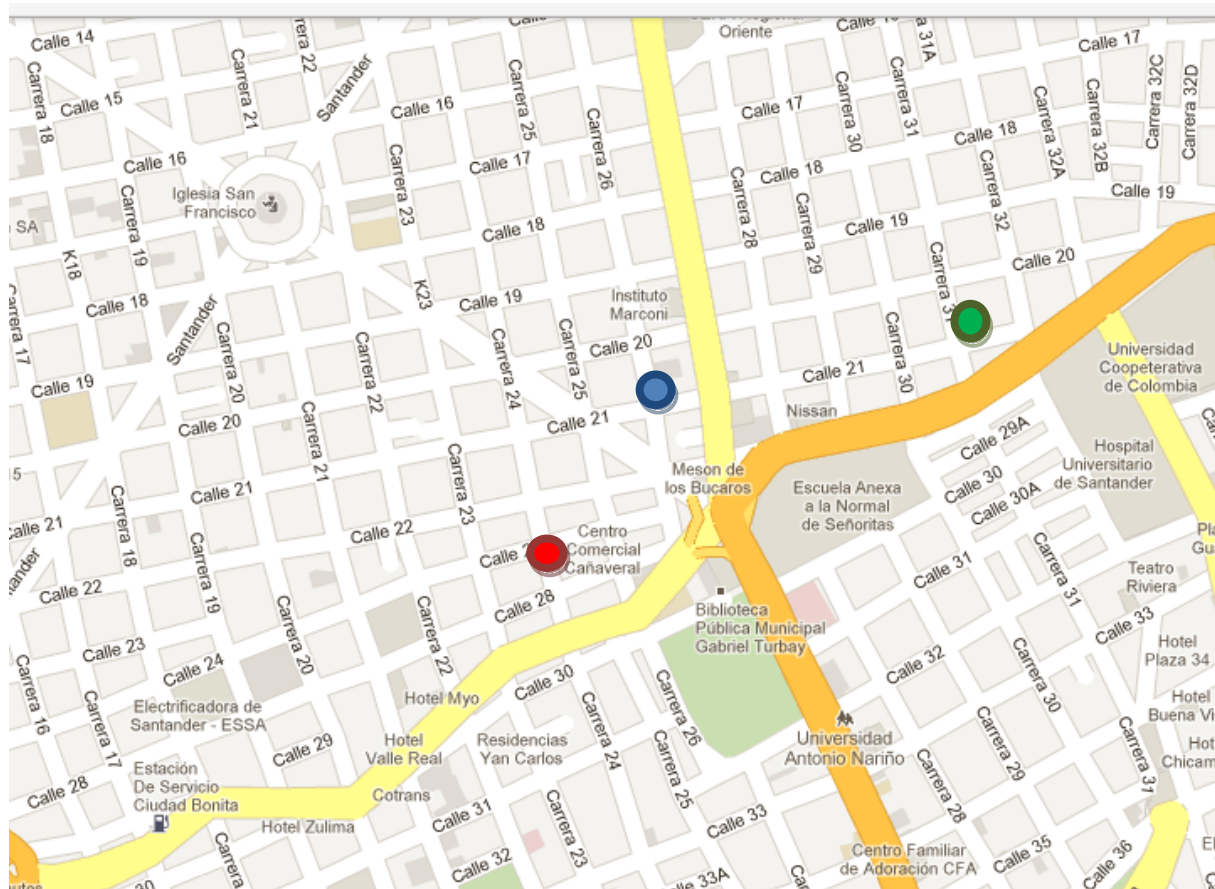
*P<sub>anillo</sub>* : Carga del anillo

### 3. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS MUESTRAS TOMADAS

Las muestras con las que se realizaron los ensayos para este trabajo de grado, fueron tomadas en la zona de San Alonso y San Francisco, su ubicación se define en la **Tabla N°3** y están ubicadas en el mapa siguiendo la convención de colores:

**Tabla 3.** Convenciones de las muestras extraídas

MUESTRA	DIRECCIÓN	BARRIO	PROFUNDIDAD	DESCRIPCIÓN
1	CALLE 20 # 26 - 08	San Francisco	4,30 m	CL: Arcillas arenosas de color amarillo
2	CALLE 22 # 24-54	San Francisco	2,60 m	CL: Arcillas arenosas de color amarillo, con cierto grado de impurezas
3	CALLE 19 # 31-36	San Alonso	3,20 m	CL-ML: Limos arcillosos de color naranjado, humedad alta



**Figura 10.** Ubicación geográfica

#### 4. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS

Las muestras tomadas fueron llevadas al laboratorio y se realizaron los siguientes ensayos:

- Granulometría
- Límites
- Gravedad específica
- Consolidación

En el **Anexo A**, se encuentra el glosario el cual permitirá contextualizar los términos aquí usados. La realización de los ensayos se realizó de acuerdo a los procedimientos del **Anexo B**.

El resumen de los resultados obtenidos en la granulometría, límites y gravedad específica de cada una de las muestras se describe en la **Tabla N°4**

**Tabla 4.** Resultados de la caracterización de los suelos

MUESTRAS	LÍMITES DE ATTEMBERG			GRANULOMETRÍA			GRAVEDAD ESPECÍFICA	CLASIFICACIÓN DE SUELO
	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO	ÍNDICE DE PLASTICIDAD	% DE GRAVAS	% DE ARENAS	% DE ARENA FINA		
MUESTRA 1	30,88	18,28	12,60	0,4	33,1	66,5	2,64	CL
MUESTRA 2	31,50	14,02	17,48	0,5	19,4	80,1	2,68	CL
MUESTRA 3	20,78	14,48	6,29	1	39,4	59,6	2,47	CL-ML

## 5. CONSOLIDACIÓN

La teoría utilizada para el ensayo de consolidación y las hipótesis tenidas en cuenta para este ensayo se entregan de manera clara y detallada en el **Anexo C**.

### 5.1 ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

En la parte experimental se harán procedimientos para determinar la magnitud y la velocidad de consolidación de un suelo confinado lateralmente y con drenaje axial, cuando está sujeto a cargas aplicadas en incrementos definidos bajo el esfuerzo controlado.

Los resultados de estos ensayos son usados para estimar la magnitud y velocidad de los asentamientos totales y diferenciales de una estructura o terraplén, información que es de suma importancia en el diseño de estructuras y evaluación de su comportamiento.

Para realizar los ensayos de consolidación unidimensional de suelo a los diferentes tipos de muestra analizados nos basaremos en las normas **I.N.V.E - 151, ASTM D 2435-90 y AASTHO T 216**.

#### 5.1.1 PROCEDIMIENTO

El procedimiento inicia con la toma de muestras, que como la norma lo señala deben ser relativamente inalteradas, para que estas puedan conservar su humedad y de esta manera poder aumentar la utilidad de estos resultados. Se buscó lugares en los cuales se estuviera llevando a cabo la etapa de excavación en el proceso de construcción de una edificación, con la ayuda de un tubo de PVC se extrajo la muestra, posteriormente se selló con parafina, para que no existiera

evidencia de secamiento parcial de esta. El almacenamiento de esta muestra duró un día.

Se retira cuidadosamente la capa de parafina la capa de parafina de los extremos del tubo, se hace un corte transversal al mismo de modo que se puedan sacar varias muestras en caso de alteración de la muestra y procedemos a insertar la anilla de consolidación.

Luego se extrae la anilla y se engrasa la muestra con el borde del anillo utilizando una espátula. Se coloca en el interior de la base del molde del consolidómetro la piedra porosa inferior saturada anteriormente y sobre esta un papel de filtro, luego se introdujo el anillo que contiene la muestra a ensayar y antes de poner la piedra porosa superior igualmente saturada, situamos encima de la muestra papel de filtro, posteriormente se fijó con los tornillos correspondientes el anillo de sujeción de la piedra porosa superior, el que permite mantener agua sobre la muestra, para evitar pérdida de humedad por evaporación, es importante centrar correctamente las piedras porosas para prevenir el atascamiento contra el anillo durante la prueba; se determinó el peso, la altura inicial y el diámetro.

Se estableció previamente al ensayo el contenido natural de humedad, peso específico, límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico) y granulometría a la muestra. Todas estas pruebas se llevaron a cabo con base en las Normas **INV E-122, INV-128, INV E-125, INV E-126 e INV E-123** respectivamente. Estos ensayos se realizaron con el fin de identificar y caracterizar el suelo.

Teniendo la muestra en el consolidómetro, se ubica en el dispositivo de carga, se satura mediante los tubos laterales que comunican con la piedra porosa inferior y se aplica una carga de inicialización de 5 KPa, durante los 5 minutos siguientes ajustamos el extensómetro para la inicial o igual a cero.

Terminados los cinco minutos aplicamos el primer incremento de carga correspondiente a 1 Kg y simultáneamente tomamos lecturas de deformación a tiempos transcurridos de 0.1, 0.25, 0.50, 1, 2, 4, 8, 15 y 30 minutos, 1, 2, 4 y 24 horas, hasta que haya poco cambio en la lectura de deformación. Después de transcurridas las 24 horas se cambió la carga al siguiente valor de 2Kg y nuevamente se toman lecturas de la deformación generada por la aplicación de esta nueva carga en los mismos intervalos de tiempos controlados. Seguimos este procedimiento de aumentar el doble de la carga aplicada cada 24 horas (4Kg, 8Kg y 16Kg) y seguimos registrando las lecturas de deformación contra tiempo, este procedimiento se llevó a cabo durante 5 días.

Finalizada la etapa de carga de a la muestra, procedemos a iniciar el proceso de descarga en los decrementos de carga hasta la presión inicial, igualmente registramos las lecturas de tiempo y deformación. Concluida la descarga procedemos a efectuar la recarga con los mismos hasta llegar a una presión superior a la lograda en la etapa de carga.

Luego de retirada toda la carga, se deja que la muestra expanda hasta que no se registre expansión en el extensómetro por un periodo de 24 horas. Al terminar la prueba, se quita el extensómetro y se desarma el Consolidómetro. Se registra el peso del anillo de consolidación y de la superficie de la muestra y los secamos en el horno. Luego de secado se determina el peso seco de la muestra ( $W_d$ ) y el contenido final de humedad.



**Figura 11.** Toma de la muestra in situ

El transporte y manejo de la muestra se llevó a cabo de acuerdo a **I.N.V. E-103-07** para preservar las propiedades físicas y de humedad.



**Figura 12.** Preservación de la humedad **Figura 13.** Colocación de la muestra de la muestra con parafina en la anilla de consolidación



**Figura 14.** Montado del consolidómetro con extensómetro digital

### 5.1.2 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TIEMPO DEFORMACIÓN

A partir de los datos tiempo – deformación registrados durante cada una de las etapas de carga de (30.40, 61.80, 123.60, 248.20, 495.40 [KPa] ó 1, 2, 4, 8, 16 [Kg] respectivamente) es posible determinar el coeficiente de consolidación  $C_v$ , para cada uno de los incrementos de carga.

**NOTA:**

A continuación se entregarán los resultados analíticos de la **muestra N° 3** escogida para el trabajo de grado, en el **Anexo D**, se entregarán los cálculos de cada una de las muestras utilizadas.

**ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN: MUESTRA N°3**

- **MUESTRA AL INICIO DEL ENSAYO:**

**Tabla 5.** Datos de la muestra n°3 al inicio del ensayo

DIAM.(mm):	62,77
ALT. (mm)	23,64
AREA (cm <sup>2</sup> ):	30,95
V <sub>m</sub> (cm <sup>3</sup> ):	73,1658
Wanillo (gr):	504,9
Wa+Mh (gr):	649,6
Wmh (gr):	144,7
γ <sub>m</sub> (gr/cm <sup>3</sup> ):	1,98
γ <sub>s</sub> (gr/cm <sup>3</sup> ):	2,8

- **MUESTRA AL FINAL DEL ENSAYO:**

**Tabla 6.** Datos de la muestra n°3 al final del ensayo

Wa+Mh (gr):	639,7
Wa+Ms (gr):	627,2
Wmh (gr):	134,8
Ws (gr):	122,3
w(%):	10%

Existen dos métodos para calcular el coeficiente de consolidación, ambos en base al análisis de las curvas teóricas de consolidación y la comparación de esas curvas con las curvas obtenidas en los ensayos. La teoría esta en el **Anexo E**.

Método de Casagrande-Defv.sLog(T)(t<sub>50</sub>, Tv para U=50%)

Método de Taylor-Defv.s√T(t<sub>90</sub>, Tv para U=90%)

### 5.1.3 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TIEMPO DEFORMACIÓN POR CASAGRANDE

➤ Día 1

Tabla 7. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 30,40 kPa

Carga (kg): 1	ΔP (Pa)	30400
TIEMPO (S/M/Hs)	LECTURA (divis)	DEFORM (mm)
6 Seg	11	0,0275
15 Seg	12,8	0,032
30 Seg	16,2	0,0405
1 Min	20,8	0,052
2 Min	24,2	0,0605
4 Min	29,8	0,0745
8 Min	37,8	0,0945
15 Min	49	0,1225
30 Min	62,2	0,1555
1 Hs	82,6	0,2065
2 Hs	98,8	0,247
4 Hs	116,2	0,2905
8 Hs	128,8	0,322
24 Hs	143	0,3575

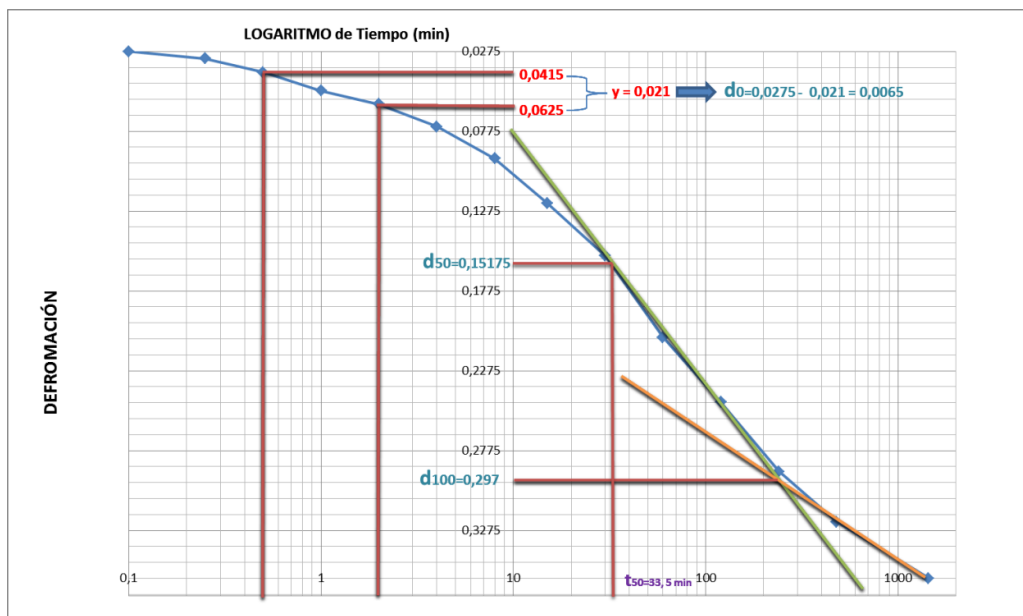


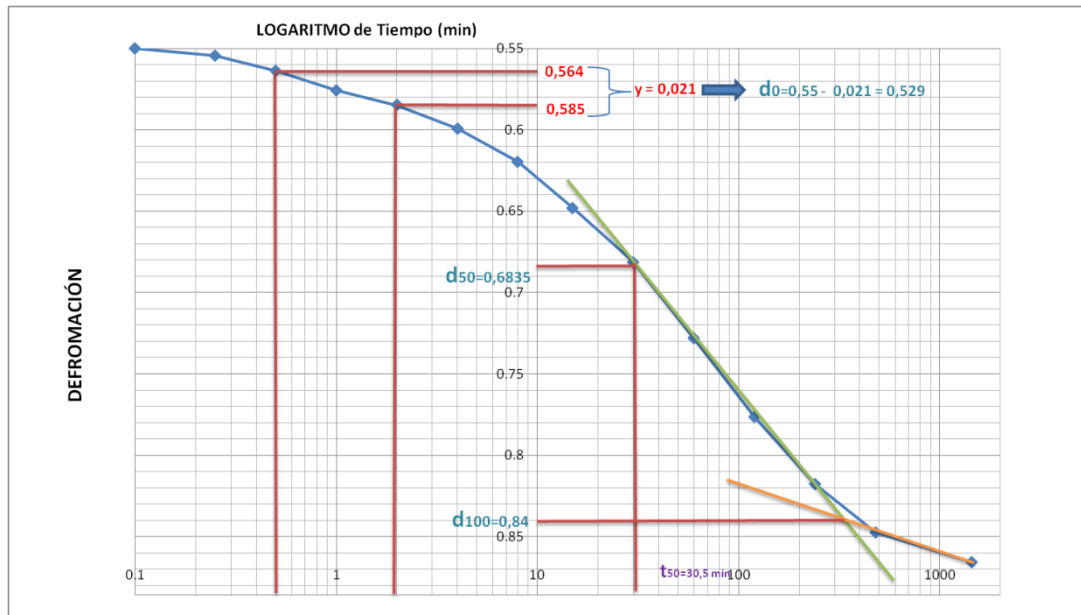
Figura 15. Determinación del coeficiente de consolidación por el método de logaritmo de tiempo para el primer día de carga

$$C_v = \frac{0,197 H_{ef}^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times (1,1744)^2}{33,5} = 0,008111 \left[ \text{cm}^2 / \text{seg} \right]$$

➤ Día 2

**Tabla 8.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 61,80 kPa

Carga (kg): 2	$\Delta P$ (Pa)	61800
TIEMPO (S/M/Hs)	LECTURA (divis)	DEFORM (mm)
6 Seg	220	0,55
15 Seg	221,76	0,5544
30 Seg	225,56	0,5639
1 Min	230,32	0,5758
2 Min	233,92	0,5848
4 Min	239,68	0,5992
8 Min	247,88	0,6197
15 Min	259,24	0,6481
30 Min	272,64	0,6816
1 Hs	291,2	0,728
2 Hs	310,6	0,7765
4 Hs	327,16	0,8179
8 Hs	338,96	0,8474
24 Hs	346,32	0,8658



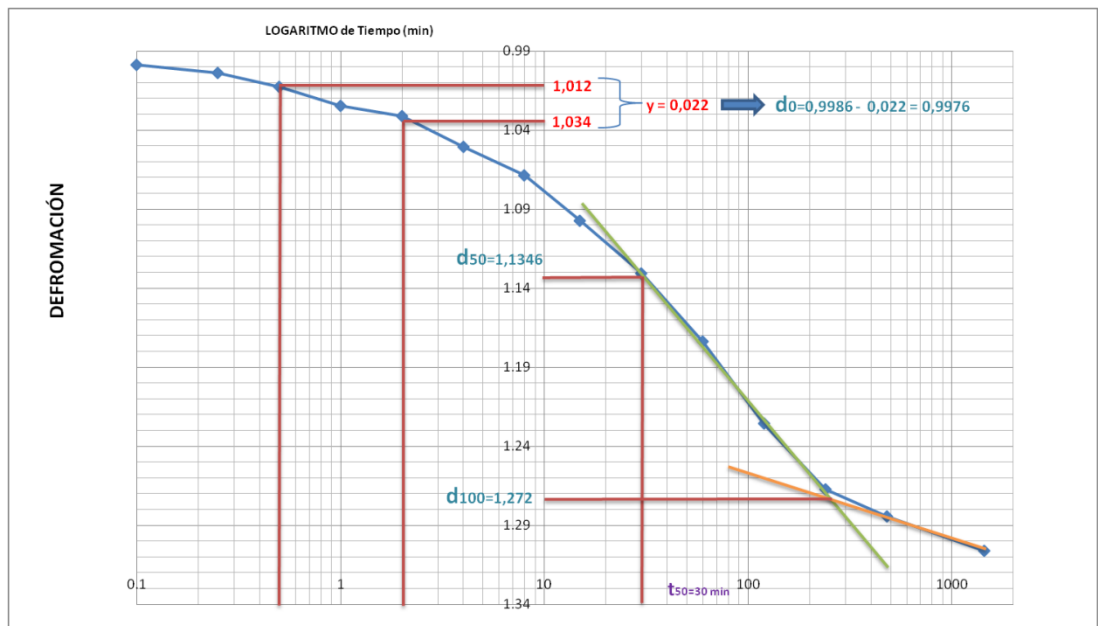
**Figura 16.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el segundo día de carga

$$C_v = \frac{0,197H_{ef}^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times (1,1475)^2}{30,5} = 0,00850 \left[ \text{cm}^2/\text{seg} \right]$$

➤ Día 3

**Tabla 9.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 123,60kPa

Carga (kg): 4		$\Delta P$ (Pa)	123600
TIEMPO (S/M/Hs)	LECTURA (divis)	DEFORM (mm)	
6 Seg	399,44	0,9986	
15 Seg	401,62	1,00405	
30 Seg	405,06	1,01265	
1 Min	409,84	1,0246	
2 Min	412,48	1,0312	
4 Min	420,26	1,05065	
8 Min	427,5	1,06875	
15 Min	438,88	1,0972	
30 Min	452,32	1,1308	
1 Hs	469,6	1,174	
2 Hs	490,34	1,22585	
4 Hs	506,92	1,2673	
8 Hs	513,76	1,2844	
24 Hs	522,45	1,306125	



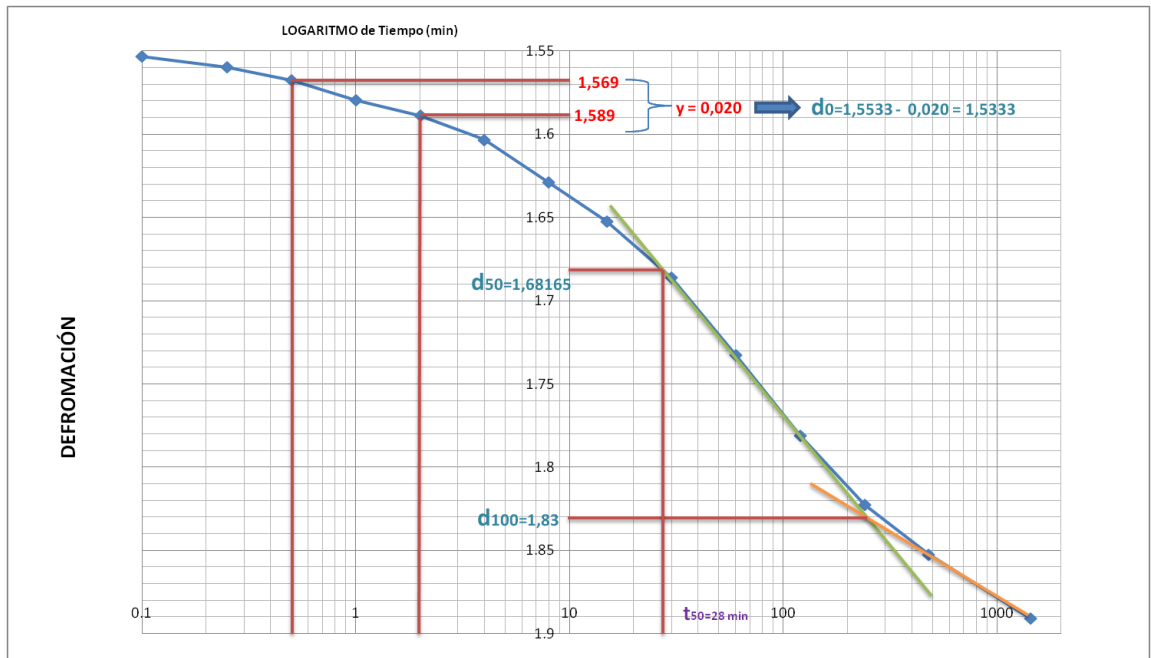
**Figura 17.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el tercer día de carga

$$C_v = \frac{0,197H_{ef}^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times (1,1248)^2}{30} = 0,00831 \left[ \text{cm}^2/\text{seg} \right]$$

➤ Día 4

**Tabla 10.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 248,20kPa

Carga (kg): 8	$\Delta P$ (Pa)	248200
TIEMPO (S/M/Hs)	LECTURA (divis)	DEFORM (mm)
6 Seg	621,32	1,5533
15 Seg	623,92	1,5598
30 Seg	626,98	1,56745
1 Min	631,8	1,5795
2 Min	635,48	1,5887
4 Min	641,28	1,6032
8 Min	651,54	1,62885
15 Min	660,94	1,65235
30 Min	674,42	1,68605
1 Hs	693,02	1,73255
2 Hs	712,48	1,7812
4 Hs	729,08	1,8227
8 Hs	740,96	1,8524
24 Hs	756,36	1,8909



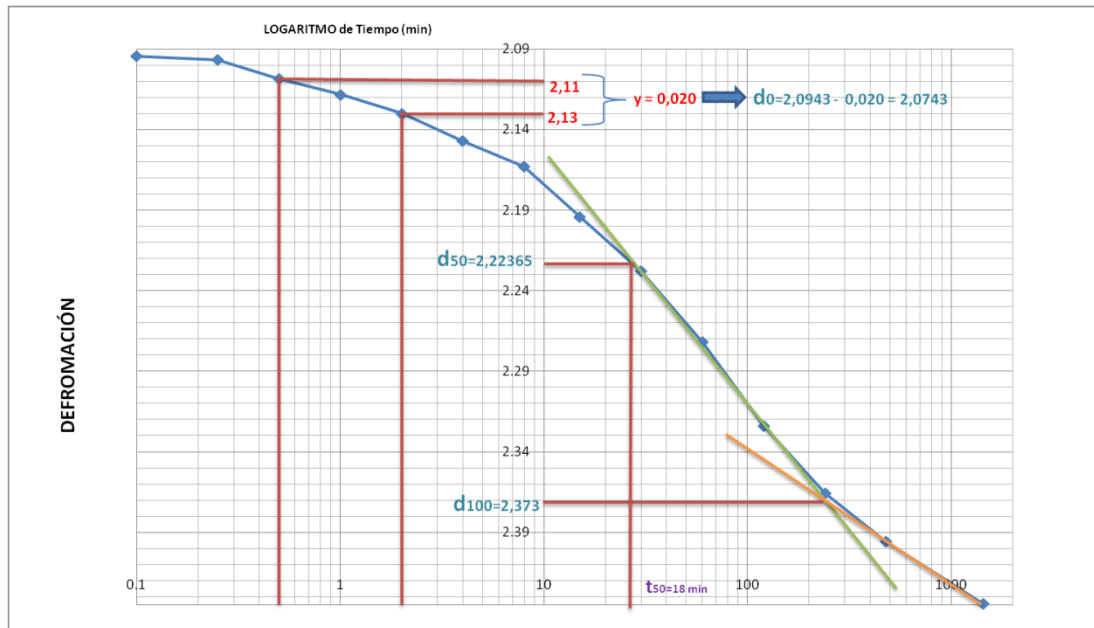
**Figura 18.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el cuarto día de carga

$$C_v = \frac{0,197 H_{ef}^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times (1,0979)^2}{28} = 0,008481 \left[ \text{cm}^2 / \text{seg} \right]$$

➤ Día 5

**Tabla 11.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 495,58kPa

Carga (kg): 16	ΔP (Pa)	495400
TIEMPO (S/M/Hs)	LECTURA (divis)	DEFORM (mm)
6 Seg	837,72	2,0943
15 Seg	838,76	2,0969
30 Seg	843,46	2,10865
1 Min	847,32	2,1183
2 Min	852,04	2,1301
4 Min	858,88	2,1472
8 Min	865,18	2,16295
15 Min	877,62	2,19405
30 Min	891,14	2,22785
1 Hs	908,78	2,27195
2 Hs	929,68	2,3242
4 Hs	946,32	2,3658
8 Hs	958,24	2,3956
24 Hs	973,68	2,4342



**Figura 19.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el quinto día de carga

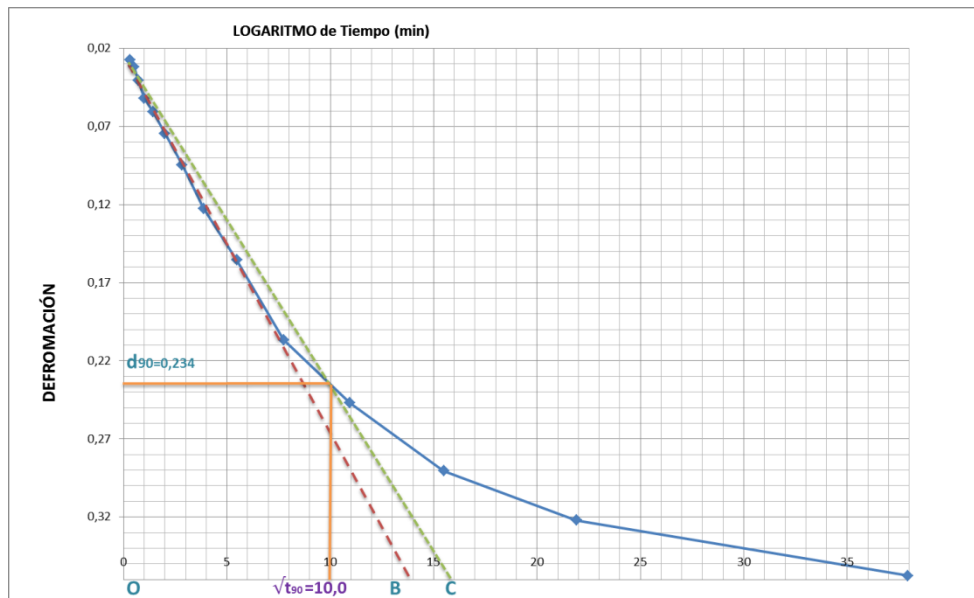
$$C_v = \frac{0,197 H_{ef}^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times (1,0708)^2}{18} = 0,012549 \left[ \text{cm}^2 / \text{seg} \right]$$

### 5.1.4 MÉTODO DE TAYLOR O RAÍZ CUADRADA DE TIEMPO

➤ Día 1

**Tabla 12.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 30,40kPa

Carga (kg): 1	$\Delta P$ (Pa)	30400
TIEMPO (S/M/Hs)	LECTURA (divis)	DEFORM (mm)
6 Seg	11	0,0275
15 Seg	12,8	0,032
30 Seg	16,2	0,0405
1 Min	20,8	0,052
2 Min	24,2	0,0605
4 Min	29,8	0,0745
8 Min	37,8	0,0945
15 Min	49	0,1225
30 Min	62,2	0,1555
1 Hs	82,6	0,2065
2 Hs	98,8	0,247
4 Hs	116,2	0,2905
8 Hs	128,8	0,322
24 Hs	143	0,3575



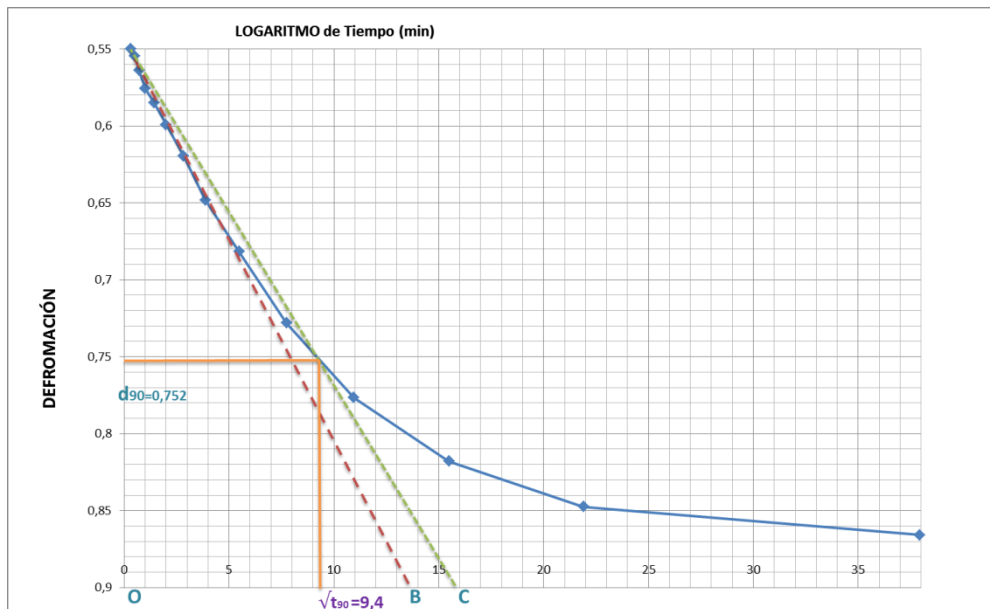
**Figura 20.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el primer día de carga

$$C_v = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times (1,1703)^2}{100} = 0,01161 \left[ \text{cm}^2/\text{seg} \right]$$

➤ Día 2

**Tabla 13.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 61,80kPa

Carga (kg): 2, ΔP (Pa)		61800
TIEMPO (S/M/Hs)	LECTURA (divis)	DEFORM (mm)
6 Seg	220	0,55
15 Seg	221,76	0,5544
30 Seg	225,56	0,5639
1 Min	230,32	0,5758
2 Min	233,92	0,5848
4 Min	239,68	0,5992
8 Min	247,88	0,6197
15 Min	259,24	0,6481
30 Min	272,64	0,6816
1 Hs	291,2	0,728
2 Hs	310,6	0,7765
4 Hs	327,16	0,8179
8 Hs	338,96	0,8474
24 Hs	346,32	0,8658



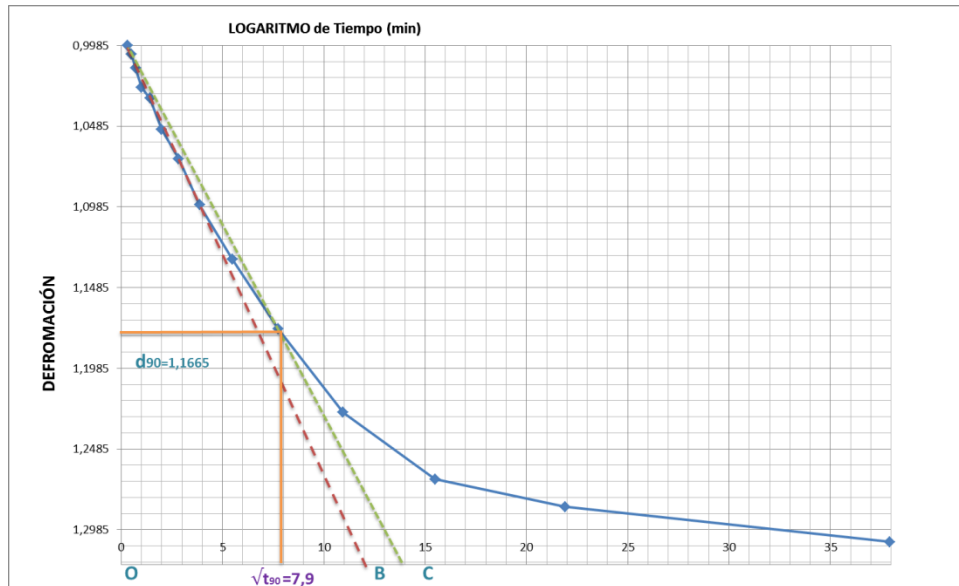
**Figura 21.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el segundo día de carga

$$C_v = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times (1,1444)^2}{88,36} = 0,01257 \left[ \text{cm}^2/\text{seg} \right]$$

➤ Día 3

**Tabla 14.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 123,60kPa

Carga (kg): 4	$\Delta P$ (Pa)	123600
TIEMPO (S/M/Hs)	LECTURA (divis)	DEFORM (mm)
6 Seg	399,44	0,9986
15 Seg	401,62	1,00405
30 Seg	405,06	1,01265
1 Min	409,84	1,0246
2 Min	412,48	1,0312
4 Min	420,26	1,05065
8 Min	427,5	1,06875
15 Min	438,88	1,0972
30 Min	452,32	1,1308
1 Hs	469,6	1,174
2 Hs	490,34	1,22585
4 Hs	506,92	1,2673
8 Hs	513,76	1,2844
24 Hs	522,45	1,306125



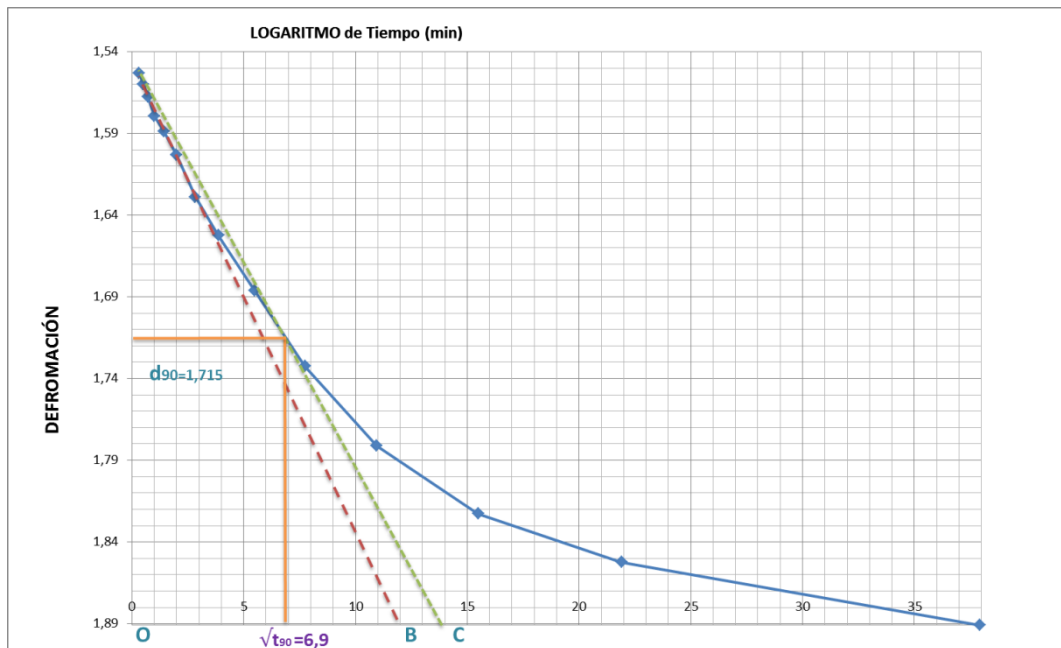
**Figura 22.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el tercer día de carga

$$C_v = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times (1,1237)^2}{62,41} = 0,01716 \left[ \frac{cm^2}{seg} \right]$$

➤ Día 4

**Tabla 15.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 248,20kPa

Carga (kg): 8	$\Delta P$ (Pa)	248200
TIEMPO (S/M/Hs)	LECTURA (divis)	DEFORM (mm)
6 Seg	621,32	1,5533
15 Seg	623,92	1,5598
30 Seg	626,98	1,56745
1 Min	631,8	1,5795
2 Min	635,48	1,5887
4 Min	641,28	1,6032
8 Min	651,54	1,62885
15 Min	660,94	1,65235
30 Min	674,42	1,68605
1 Hs	693,02	1,73255
2 Hs	712,48	1,7812
4 Hs	729,08	1,8227
8 Hs	740,96	1,8524
24 Hs	756,36	1,8909



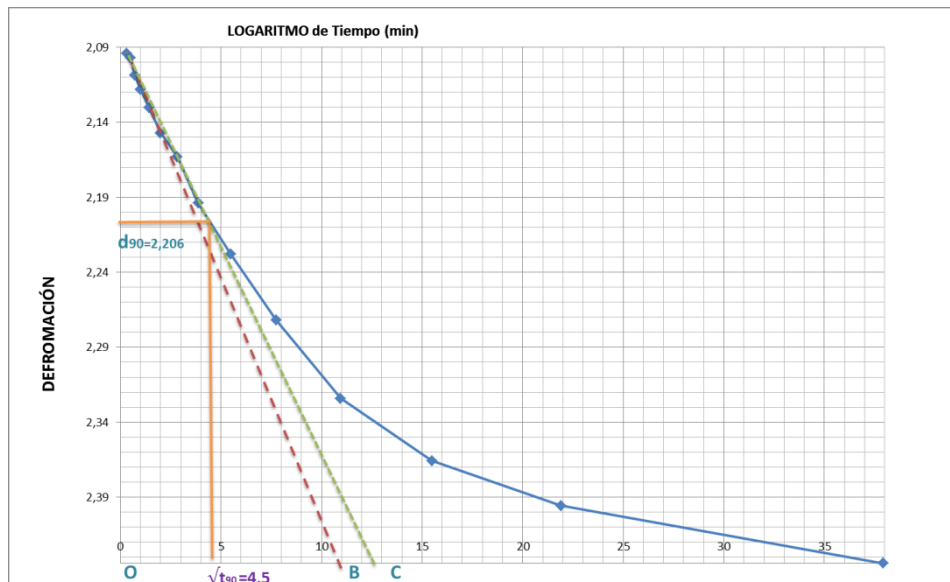
**Figura 23.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el cuarto día de carga

$$C_v = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times (1,0963)^2}{47,61} = 0,02141 \left[ \frac{cm^2}{seg} \right]$$

➤ Día 5

**Tabla 16.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 495,40kPa

Carga (kg): 16	ΔP (Pa)	495400
TIEMPO (S/M/Hs)	LECTURA (divis)	DEFORM (mm)
6 Seg	837,72	2,0943
15 Seg	838,76	2,0969
30 Seg	843,46	2,10865
1 Min	847,32	2,1183
2 Min	852,04	2,1301
4 Min	858,88	2,1472
8 Min	865,18	2,16295
15 Min	877,62	2,19405
30 Min	891,14	2,22785
1 Hs	908,78	2,27195
2 Hs	929,68	2,3242
4 Hs	946,32	2,3658
8 Hs	958,24	2,3956
24 Hs	973,68	2,4342



**Figura 24.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el quinto día de carga

$$C_v = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times (1,0717)^2}{20,25} = 0,04810 \left[ \frac{cm^2}{seg} \right]$$

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1 RESULTADOS DE LA PARTE EXPERIMENTAL

Para tener un análisis detallado y resumido a continuación mostraremos los parámetros de consolidación, humedad y grado de saturación, obtenidos de las muestras analizadas.

**Tabla 17.** Parámetros de consolidación de las muestras analizadas

	PRESION *k(kg/cm <sup>2</sup> )	ASENATAMIENTO (mm)	Coeficiente de consolidación vertical (Cv) (cm <sup>2</sup> /min)		Índice de compresión (Cc) (cm <sup>2</sup> /kg)	Coeficiente de pre-consolidación (av) (cm <sup>2</sup> /kg)	Coeficiente de consolidación volumétrica (mv) (cm <sup>2</sup> /kg)	Índice de hinchamiento o endurecimiento (Cs) (cm <sup>2</sup> /kg)
			CASAGRANDE	TAYLOR				
MUESTRA N°1	2,9814	0,6945	0,0067	0,0163	0,099828	0,002653	0,001298	0,019966
	6,0609	1,0168	0,0068	0,0309				
	12,1219	1,3422	0,0072	0,0317				
	24,3418	1,6825	0,0080	0,0342				
	48,5856	2,0229	0,0088	0,0463				
MUESTRA N°2	2,9814	0,6375	0,0087	0,0163	0,096528	0,002566	0,001304	0,019306
	6,0609	0,9533	0,0086	0,0165				
	12,1219	1,2933	0,0088	0,0174				
	24,3418	1,6351	0,0092	0,0210				
	48,5856	1,975	0,0095	0,0228				
MUESTRA N°3	2,9814	0,3575	0,0081	0,0116	0,075902429	0,002017361	0,001257236	0,015180486
	6,0609	0,6733	0,0076	0,0126				
	12,1219	0,9901	0,0067	0,0172				
	24,3418	1,3277	0,0085	0,0214				
	48,5856	1,6676	0,0125	0,0481				

**Tabla 18.** Humedades de las muestras en las fases inicial y final

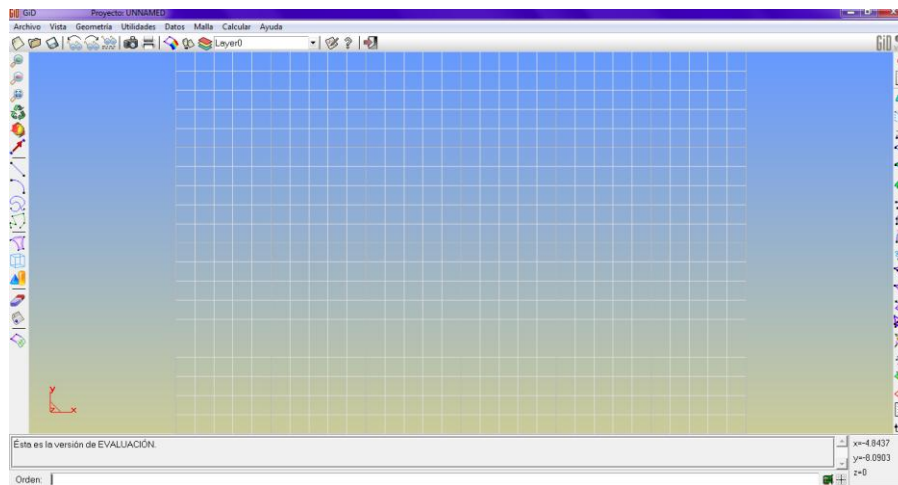
		MUESTRA N° 1	MUESTRA N° 2	MUESTRA N° 3
HUMEDAD	INICIAL	31%	22%	27%
	FINAL	17%	16%	10%
PESO UNITARIO	INICIAL	1.1917	1.309	1.557
	FINAL	1.2949	1.340	1.672
PESO UNITARIO	INICIAL	0.3694	0.288	0.420
	FINAL	0.2201	0.214	0.167
GRADO DE SATURACION	INICIAL	64.317	54.050	94.731
	FINAL	48.461	39.060	50.275

## 6.2 MODELAMIENTO NUMÉRICO

Para el modelamiento numérico utilizaremos una herramienta informática llamada **GID** es un programa de simulación de última tecnología, amplio, adaptable y fácil de usar para la simulación numérica en ciencias e ingeniería. Ha sido diseñado para cubrir todas las necesidades comunes en el campo de las simulaciones numéricas de post procesamiento: modelado geométrico, la definición efectiva de análisis de datos, generación de mallas, de transferencia de datos al software de análisis y visualización de resultados.



**Figura 25.** Logo del Software

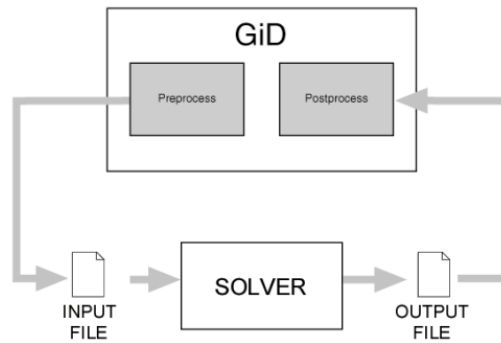


**Figura 26.** Entorno gráfico del software

Este análisis numérico se hará en dos etapas:

- El pre-proceso
- El post-proceso

El pre-proceso en GiD hace un análisis del objeto bajo estudio y se genera una malla de elementos, cada uno de los cuales se le asigna un material y algunas condiciones. Esta información del pre-procesamiento en GiD (mallas, materiales y condiciones) permite que el módulo de cálculo genere resultados.



**Figura 27.** Diagrama de flujo de trabajo

El problema de consolidación de suelos es un problema hidro-mecánico en donde se convierten presiones neutras a presiones efectivas dentro de la masa del suelo dejando como consecuencia los asentamientos.

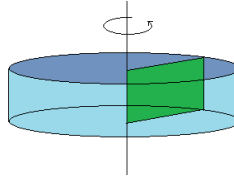
Este medio actúa con un CAD que permite dibujar de manera fácil la geometría y a la vez atarse a otros software de modelamiento y aplicación numérica, para que el programa prepare los datos analizados, por ejemplo se utiliza ansys55, pero en este caso se utilizará una herramienta muy útil en el área de geotecnia llamada: *Codebrighth*.

### **6.2.1 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA**

La geometría que va a regir el análisis numérico busca hacer similitud entre los ensayos prácticos con el software por lo tanto haremos una réplica casi exacta a la muestra puesta en la máquina, y las condiciones hidráulicas y mecánicas que serán señaladas más adelante:

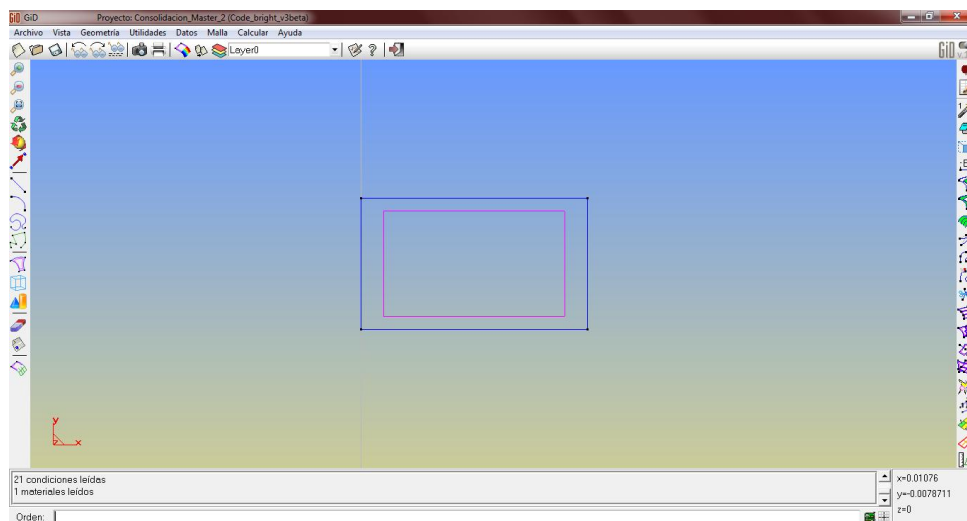
Para poder describir la geometría en GiD se dibujará la geometría de un rectángulo cuyas medidas son la altura inicial de la muestra antes del ensayo y el

radio de la misma, y se procederá a rotar sobre un eje vertical de una de sus caras como lo muestra la siguiente figura:



**Figura 28.** Parte geométrica inicial de la muestra

Obteniendo en el programa lo siguiente:



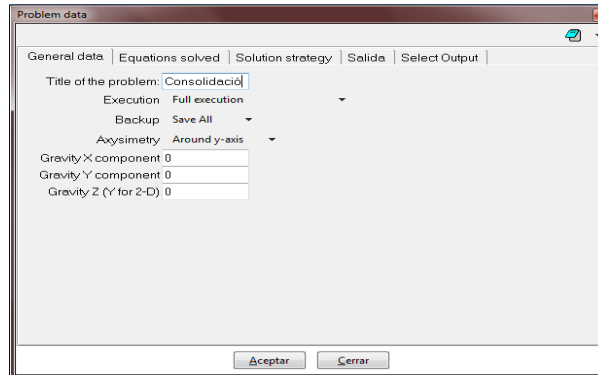
**Figura 29.** Definición de la geometría en GID

## 6.2.2 DEFINICIÓN DE ATRIBUTOS Y CONDICIONES

### 6.2.2.1 DEFINICIÓN DE LOS DATOS DEL PROBLEMA

Las ventanas de Datos *de Problema* permiten al usuario introducir todos los datos generales que Code\_Bright requiere para llevar a cabo una simulación. Estos datos incluyen todos los datos no relacionados a la parte geométrica o en un intervalo de tiempo. Los pasos para esta etapa del modelamiento son:

1. Definir el título del problema en este utilizaremos el nombre de “Consolidación Unidimensional”.
2. Definir si el problema tiene simetría axial, en este caso es alrededor del eje “Y”

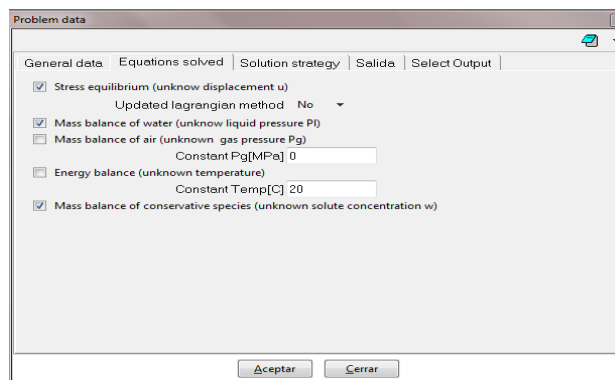


**Figura 30.** Modelamiento en GID (1)

### 6.2.2.2 ESPECIFICAR LA SOLUCIÓN DE ECUACIONES

Esta opción permite ir definiendo la solución de ecuaciones (cualquier combinación entre equilibrio de la tensión, el balance de masas de agua, el balance de masa de aire y el balance energético). Esta simulación implica un problema hidro-mecánico puro, teniendo en cuenta el flujo de líquido y las presiones ejercidas. Los pasos para esta etapa del modelamiento son:

1. Definir el equilibrio de esfuerzos, no se utilizará el método lagrangiano en este caso específico.



**Figura 31.** Modelamiento en GID (2)

2. Definir el Balance de masa de agua (presión de líquido desconocido PI)

### 6.2.2.3 ESPECIFICAR LA ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN

Esta sección contiene los parámetros que definen la estrategia utilizada para lograr la solución de la simulación. Los pasos para esta etapa del modelamiento son:

1. En esta etapa del modelamiento solo se define el máximo número de iteraciones por paso de tiempo, los demás parámetros se dejan por defecto.

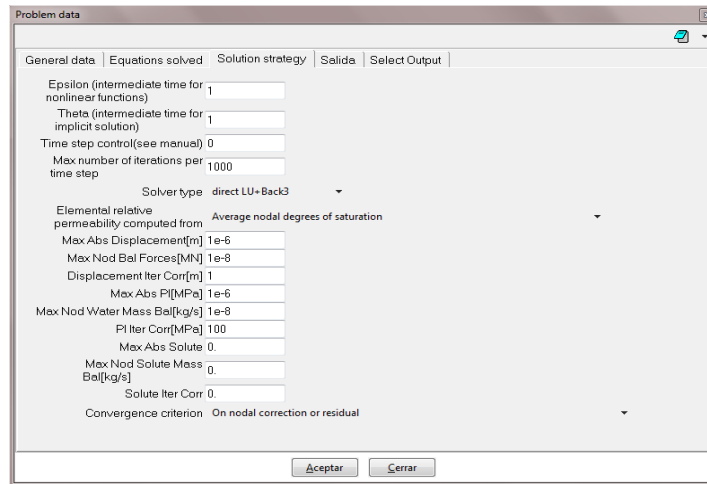
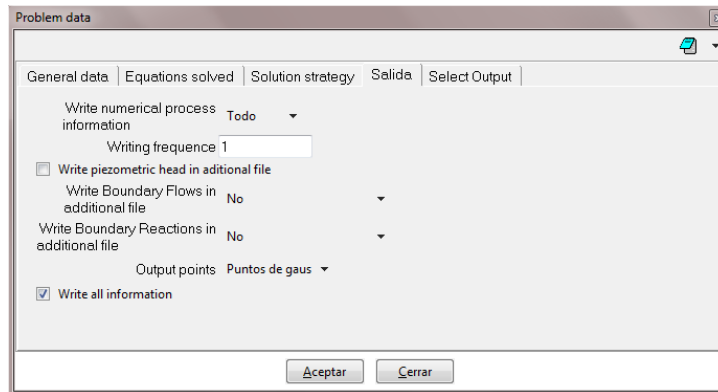


Figura 32. Modelamiento en GID (3)

### 6.2.2.4 DEFINIR LA SALIDA DE DATOS

Esta sección contiene el modo de entrega de los datos de salida del problema. Los pasos para esta etapa del modelamiento son:

1. Se configura para que se entreguen toda la información sobre la convergencia del archivo de salida.
2. En el cuadro de edición se valor indica la frecuencia de entrega los resultados en el archivo de salida con respecto a los incrementos de tiempo.



**Figura 33.** Modelamiento en GID (4)

3. Se ordena no escribir flujos de frontera en un archivo adicional sino entregarnos en la misma carpeta.
4. Se ordena no escribir las reacciones de frontera en un archivo adicional sino entregarnos en la misma carpeta.
5. Se selecciona en los puntos de salida “Los puntos de gauss” siendo esta cuadratura que selecciona los puntos de la evaluación de manera óptima y no en una forma igualmente espaciada.

### 6.2.3 DEFINICIÓN DE LOS MATERIALES

Las propiedades del suelo se definen dentro de este tema. Para este caso, las propiedades del material incluyen los parámetros hidro-mecánicos. Para ello se tiene en cuenta las tablas de **CODE-BRIGT**.

#### 6.2.3.1 DATOS MECÁNICOS

En esta etapa del modelamiento se indican los parámetros mecánicos con los que se ejecutará el modelo. Los pasos para esta etapa del modelamiento son:

1. Se identifica cuál es la ley que rige el ensayo de consolidación, para este caso específico se utilizará un material lineal elástico, las tablas utilizadas

**MECHANICAL CONSTITUTIVE LAWS (part b)**

ICL	NAME	ITYCL	DESCRIPTION
1	ELASTICITY	1	Linear elasticity model
		2	Bilinear elasticity model
		16	Elasticity law - Zero thickness element
5	ELASTICITY (THERMAL AND PORE PRESSURE TERMS)	1	Linear expansion coefficients induced by temperature and suction changes
4	NONLINEAR ELASTICITY	1	Volumetric strain is calculated in a reversible way
		2	Nonlinear elasticity model with micro-macro interaction
		5	Volumetric strain is calculated in a reversible way with two independent coupling terms
2	VISCOELASTICITY FOR SALINE MATERIALS	1	Parameters for linear viscous deformation model
3	VISCOPLASTICITY FOR SALINE MATERIALS	1	Creep of porous salt aggregates (nonlinear dependences on stresses)
33	VISCOPLASTICITY FOR GRANULAR MATERIALS (Viscosity can be written as a function of temperature)	1	Yield function and flow rule
		2	Yield function and flow rule
		3	Yield function and flow rule. Cam-clay
		4,5	Yield function and flow rule. Mohr-Coulomb
		9	Yield function and flow rule. For rock salt with dilatancy
34	VISCOPLASTICITY FOR UNSATURATED SOILS BASED ON BBM	1	Viscoplasticity (general model for unsaturated soils based on Desai and Perzyna theory). Parameters for viscoplasticity
		16	Viscoplasticity - Zero thickness element
35	VISCOPLASTICITY FOR UNSATURATED SOILS BASED ON BBM	1	Parameters for yield function and plastic potential
		16	Viscoplasticity - Zero thickness element
36	VISCOPLASTICITY FOR UNSATURATED SOILS BASED ON BBM	1	Parameters for LC curve
		2	Parameters for LC curve for rockfill materials
		3	Parameters for LC curve for rockfill materials
		16	Viscoplasticity - Zero thickness element

son:

**Figura 34. Tabla de Code\_Brigh (1)**

CODE\_BRIGHT. CONSTITUTIVE LAWS

Vib.3

ELASTICITY

CODES in <i>ROOT_gen.dat</i>	ICL=1 ITYCL=1, 2, 16
DESCRIPTION	Elastic parameters (linear elasticity model). Linear elasticity with parameters $E$ and $\nu$ . Young modulus can be variable.
EQUATIONS	ITYCL = 1 $E = E_o + (\phi - \phi_o) \frac{dE}{d\phi} \geq E_{min}$

**Figura 35. Tabla de Code\_Brigh (2)**

PARAMETERS			
ITYCL=1			
P1	$E$	MPa	Young Modulus
P2	$dE/d\phi$	MPa	Variation of Young modulus with porosity
P3	$\nu$	-	Poisson's Ratio
P4	$\phi_o$	-	Reference porosity
P5	$\phi_{min}$	-	Minimum porosity
P6	$E_{min}$	MPa	Minimum elastic modulus

**Figura 36. Tabla de Code\_Brigh (3)**

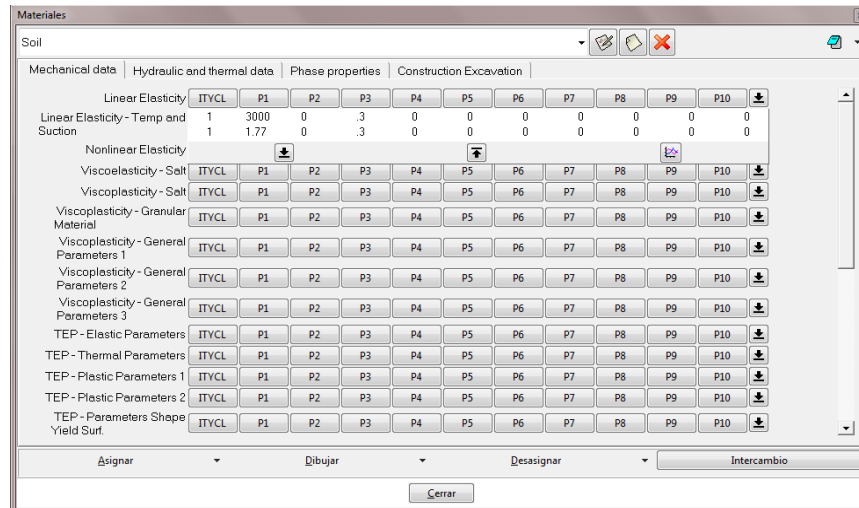


Figura 37. Modelamiento en GID (5)

### 6.2.3.2 DATOS HIDRÁULICOS Y TÉRMICOS

En esta etapa del modelamiento se indican los parámetros hidráulicos con los que se ejecutará el modelo. Los pasos para esta etapa del modelamiento son:

1. Se identifica cuál es la ley que rige el ensayo de consolidación en la parte hidráulica, en este caso solo interesará la permeabilidad intrínseca, utilizando el modelo de Kozeny derivado de la Ley de Darcy, las tablas utilizadas son:

HYDRAULIC AND THERMAL LAWS			
ICL	NAME	ITYCL	DESCRIPTION
6	RETENTION CURVE	1	van Genuchten model
		2	Linear model
		4	Square law
		9	Van Genuchten model with asymptotic branch that goes to negative capillary pressures
		12	Van Genuchten model modified for FEBEX project
7	INTRINSIC PERMEABILITY	1	Kozeny's model
		2	Exponential law
		4	Kozeny's model + aperture (the normal strain to the discontinuity is used)
		5	Kozeny's model + aperture (the volumetric strain to the discontinuity is used)
		16	Barton's law - Joint element
		14	LIQUID PHASE RELATIVE PERMEABILITY
19	GAS PHASE RELATIVE PERMEABILITY	5	Liquid perfectly mobile
		6	Generalised power
		8	Power with initial cut off
		11	DIFFUSIVE FLUX OF VAPOR
12	DIFFUSIVE FLUXES OF DISSOLVED SALT AND AIR	2	Molecular diffusion of vapour or air + Tortuosity is variable with gass pressure (Pg)
		1	Molecular diffusion of dissolved salt and dissolved air
8	DISPERSIVE FLUXES OF MASS AND ENERGY	1	Fick's law (mass flux) and Fourier's law (heat flux)
9	CONDUCTIVE FLUX OF HEAT (1)	1	Thermal conductivity dependence on porosity (Geometric weighted mean)
		2	Thermal conductivity dependence on porosity (Weighted arithmetic mean)
		3	Thermal conductivity dependence on porosity (Nonlinear function of porosity)
20	CONDUCTIVE FLUX OF HEAT (2)	1	Dependence on degree of saturation
		2	Dependence on degree of saturation
		4	Dependence on degree of saturation
		6	Dependence on degree of saturation (Chen & Ledesma, 2009)

Figura 38. Tabla de Code\_Bright (4)

INTRINSIC PERMEABILITY

CODES in <i>ROOT_gen.dat</i>	ICL=7 ITYCL=1,2,4,5,16
DESCRIPTION	Intrinsic permeability
EQUATIONS	<p>For a continuum medium (Kozeny's model):</p> $\mathbf{k} = \mathbf{k}_o \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \frac{(1-\phi_o)^2}{\phi_o^3}$ <p><math>\phi_o</math> : reference porosity  <math>\mathbf{k}_o</math> : intrinsic permeability for matrix <math>\phi_o</math></p> <p>which is used in <b>Darcy's law</b>:</p> $\mathbf{q}_\alpha = - \frac{\mathbf{k}k_{r\alpha}}{\mu_\alpha} (\nabla P_\alpha - \rho_\alpha \mathbf{g})$ <p>where viscosity, density and relative permeability are defined in other laws.</p>

Figura 39. Tabla de Code\_Brigh (4)

PARAMETERS FOR ITYCL=1			
P1	$(k_{11})_o$	m <sup>2</sup>	Intrinsic permeability, 1 <sup>st</sup> principal direction
P2	$(k_{22})_o$	m <sup>2</sup>	Intrinsic permeability, 2 <sup>nd</sup> principal direction
P3	$(k_{33})_o$	m <sup>2</sup>	Intrinsic permeability, 3 <sup>rd</sup> principal direction
P4	$\phi_o$		Reference porosity for read intrinsic permeability. If $\phi_o=0$ , permeability will be constant.
P5	$\phi_{min}$		Minimum porosity, porosity will not be lower than this value

Figura 40. Tabla de Code\_Brigh (4)

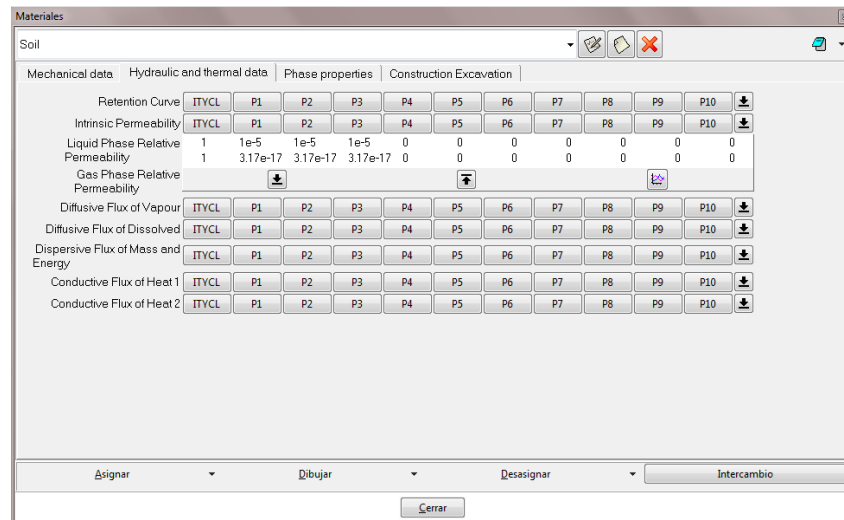


Figura 41. Modelamiento en GID (6)

### 6.2.3.3 PROPIEDADES DE FASE

En esta etapa del modelamiento se indican las propiedades de fase con las que se ejecutará el modelo. Los pasos para esta etapa del modelamiento son:

1. Se identifica que propiedades de fase rigen el ensayo de consolidación, en este caso solo interesará las propiedades de fase de los sólidos y más específicamente la densidad de los sólidos, las tablas utilizadas son:

PARAMETERS FOR ITYCL=1			
P1	$C_s$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	Solid phase specific heat (default: 1000 kg/m3)
P2	$\rho_s$	$\text{kg m}^{-3}$	Solid phase density (default: 2700 kg/m3)
P3	$\alpha_s$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	Linear thermal expansion coefficient for grains (not volumetric) (default=0.0). This does not produce thermal expansion of the medium.
P4	$T_o$	$^{\circ}\text{C}$	Reference temperature for thermal expansion (default: 40)
P5			
P6			
P7	$1/K_s$	$\text{MPa}^{-1}$	Compressibility of solid phase against mean stress changes (default=0)
P8	$p_o$	$\text{MPa}$	Reference pressure for solid compressibility (default: 0.1 MPa)

Figura 42. Tabla de Code\_Brigh (4)

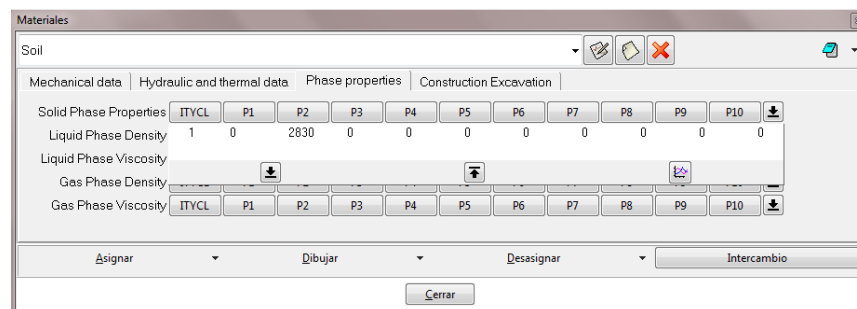


Figura 43. Modelamiento en GID (6)

## 6.2.4 RESULTADOS GRÁFICOS DE GID EN EL POS PROCESO

### 6.2.4.1 DISTRIBUCIÓN DE PRESIÓN DE POROS

T=0

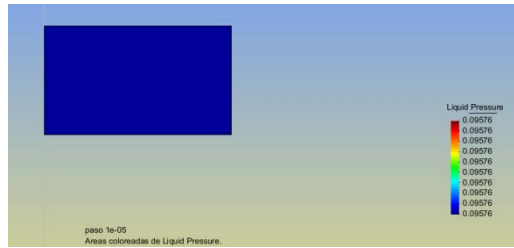


Figura 44. Distribución de presión de poros en el día 0

T>0

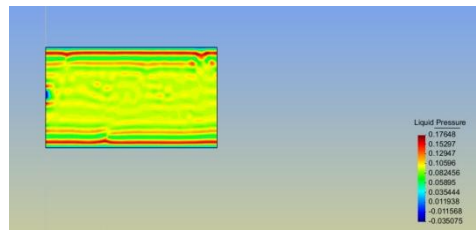
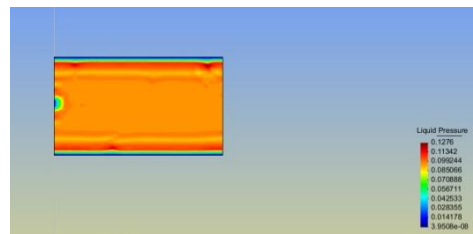


Figura 45. Distribución de presión de poros 1 Hora

Figura 46. Distribución



de presión de poros 2

Horas

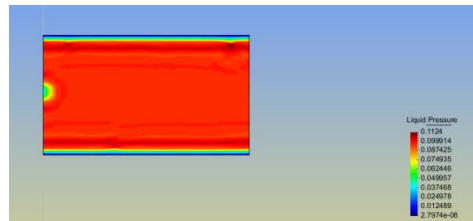
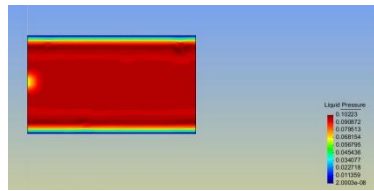
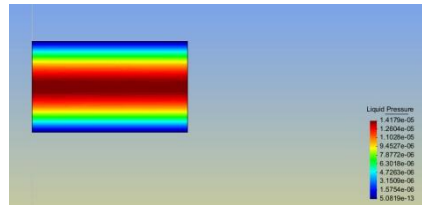


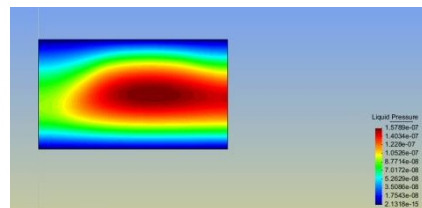
Figura 47. Distribución de presión de poros 4 Horas



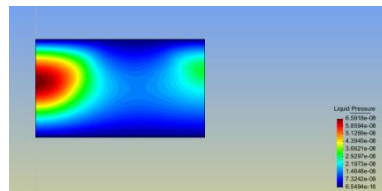
**Figura 48.** Distribución de presión de poros 8 Horas



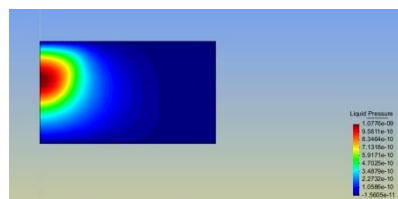
**Figura 49.** Distribución de presión de poros 16 horas



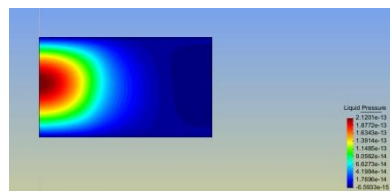
**Figura 50.** Distribución de presión de poros en el día 1



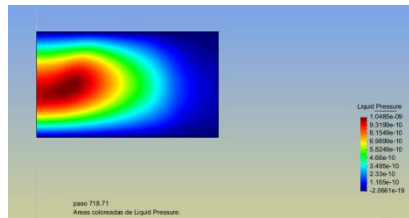
**Figura 51.** Distribución de presión de poros en el día 2



**Figura 52.** Distribución de presión de poros en el día 3



**Figura 53.** Distribución de presión de poros en el día 4



**Figura 54.** Distribución de presión de poros en el día 5

Cómo se puede ver con solo caracterizar las propiedades de los materiales teniendo en cuenta, tres componentes importantes: El módulo de elasticidad (**E**), El coeficiente de poisson (**v**) y la permeabilidad intrínseca (**K**) se simulará de manera acertada el comportamiento de la muestra, pero además se obtendrá los resultados de deformación contra tiempo como si se obtuvieran los datos del laboratorio, para efectos prácticos se utilizarán los datos de salida de **GID** de la muestra N°3 para hacer sencilla su correlación entre los resultados prácticos y los resultados obtenidos en el modelamiento numérico. Los intervalos de tiempo utilizados tendrán un lapso de equilibrio y posteriormente se aplicará el otro incremento de carga, para ellos se asignarán las condiciones de flujo, para ver cada uno de los intervalos de tiempos ver **Anexo F**.

### 6.2.5 DATOS DE SALIDA

Como se mencionó anteriormente el GID es un programa de pre y post proceso que está ligado a uno programa de modelamiento con elementos finitos llamado Code\_Brigh, por ello los datos de salida se entregarán de forma gráfica y luego se exportarán a una hoja de datos en Excel que permita una mejor organización de los resultados, esta manera de entregar resultados numéricos es una de las deficiencias del programa, a continuación se muestra superficialmente el proceso de exportación:

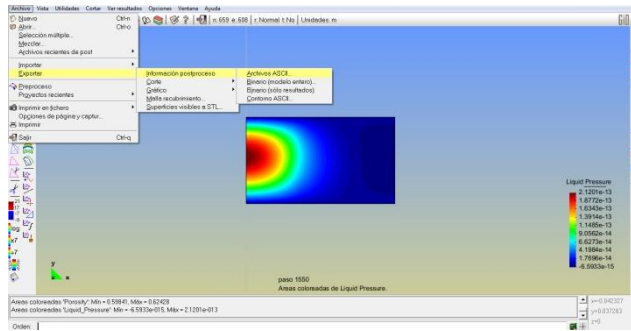


Figura 55. Exportación de los datos de salida a Excel (1)

Luego de guardarse con un nombre específico, se abre directamente desde Excel en donde deberá configurarse la hoja para organizar los espacios entre columnas.

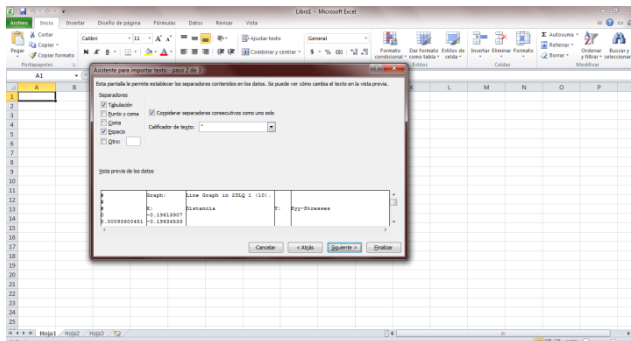


Figura 56. Exportación de los datos de salida a Excel (2)

Luego los resultados de deformación v.s tiempo se reorganizan en las hojas de cálculo utilizadas en este trabajo de grado están en el **Anexo D**, en donde a partir de ahí podrán hallarse con facilidad las propiedades de consolidación y posteriormente compararse con los datos obtenidos en el ensayo práctico.

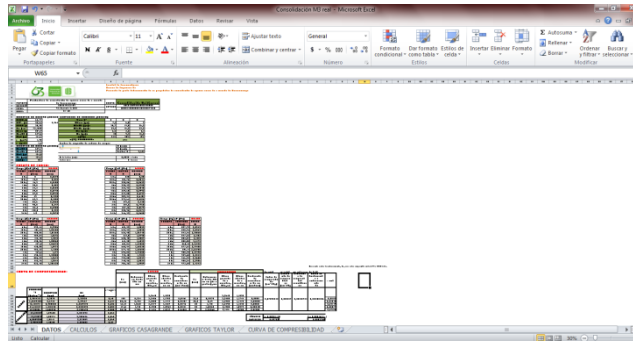


Figura 57. Exportación de los datos de salida a Excel (3)

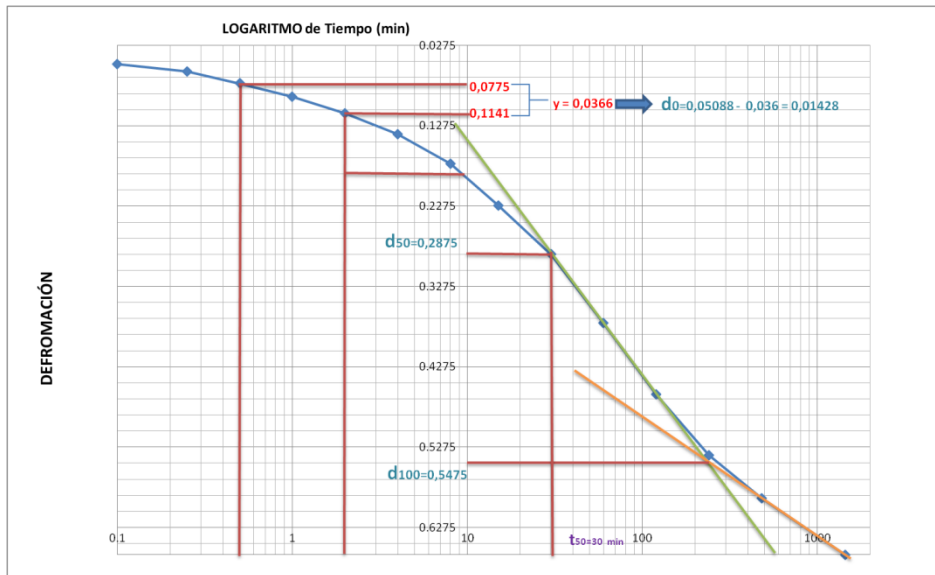
## 6.2.6 RESULTADOS NUMÉRICOS DE GID EN EL POS PROCESO

### 6.2.6.1 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TIEMPO DEFORMACIÓN POR CASAGRANDE

➤ Día 1

Tabla 19. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 30463.91 Pa

Carga (kg): 1	30463.91
TIEMPO (S/M/Hs)	DEFORM (mm)
6 Seg	0.050882406
15 Seg	0.060133753
30 Seg	0.074935907
1 Min	0.091588331
2 Min	0.111941294
4 Min	0.137845064
8 Min	0.174850451
15 Min	0.226657992
30 Min	0.287716879
1 Hs	0.372829268
2 Hs	0.461642195
4 Hs	0.537503237
8 Hs	0.591161048
24 Hs	0.661471282



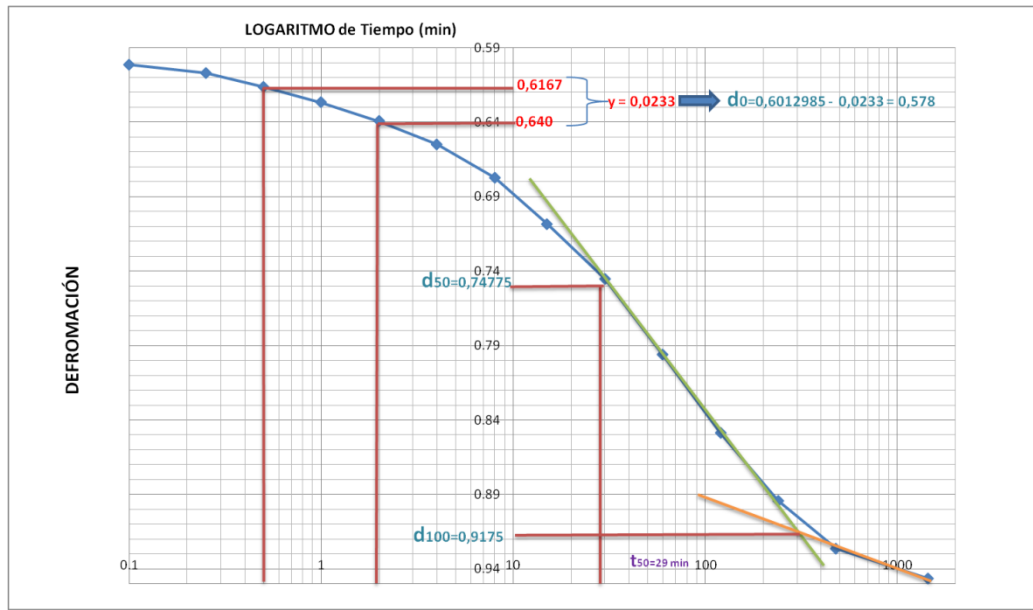
**Figura 58.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el primer día de carga con los Datos de salida de GID

$$C_v = \frac{0,197 H_{ef}^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times (1,1676)^2}{30} = 0,00895 \left[ \text{cm}^2 / \text{seg} \right]$$

➤ **Día 2**

**Tabla 20.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 6990 Pa

Carga (kg): 2	60990
TIEMPO (S/M/Hs)	DEFORM (mm)
6 Seg	0.6012985
15 Seg	0.607202158
30 Seg	0.616494953
1 Min	0.626771691
2 Min	0.639344296
4 Min	0.655087384
8 Min	0.677499419
15 Min	0.708548287
30 Min	0.745172832
1 Hs	0.79590056
2 Hs	0.848924155
4 Hs	0.894185533
8 Hs	0.926436998
24 Hs	0.946553166



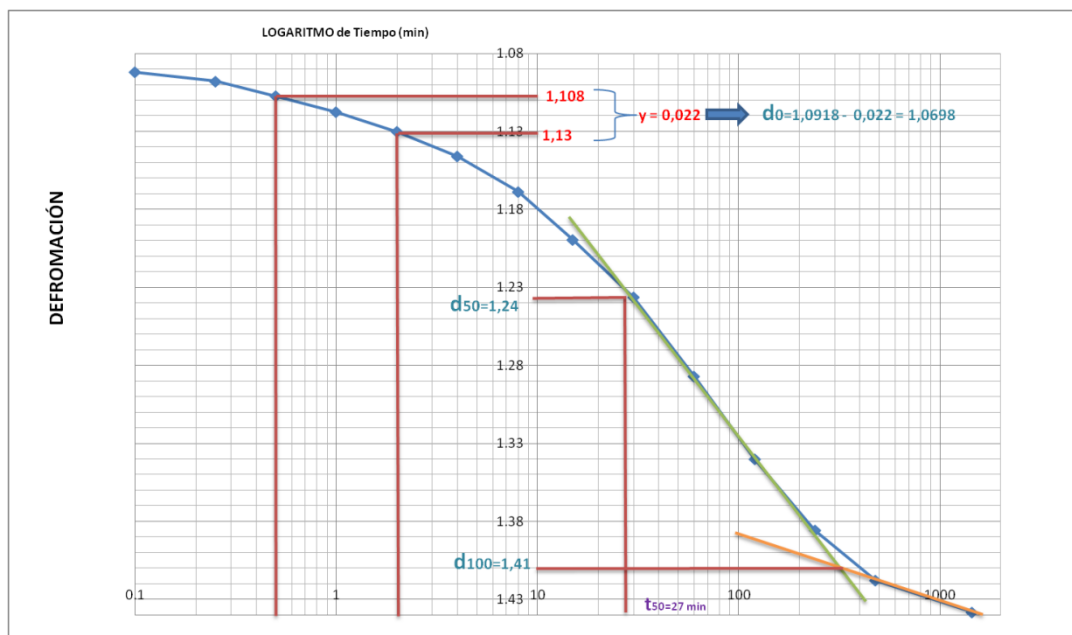
**Figura 59.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el segundo día de carga con los Datos de salida de GID

$$C_v = \frac{0,197H_{ef}^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times (1,1446)^2}{29} = 0,00890 \left[ \text{cm}^2/\text{seg} \right]$$

➤ **Día 3**

**Tabla 21.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 122018 Pa

Carga (kg): 4	122018
TIEMPO (S/M/Hs)	DEFORM (mm)
6 Seg	1.09186924
15 Seg	1.09782827
30 Seg	1.10723151
1 Min	1.11756414
2 Min	1.13024758
4 Min	1.14604721
8 Min	1.16857125
15 Min	1.19967848
30 Min	1.23641672
1 Hs	1.28720515
2 Hs	1.34034439
4 Hs	1.38566582
8 Hs	1.41803046
24 Hs	1.43820369



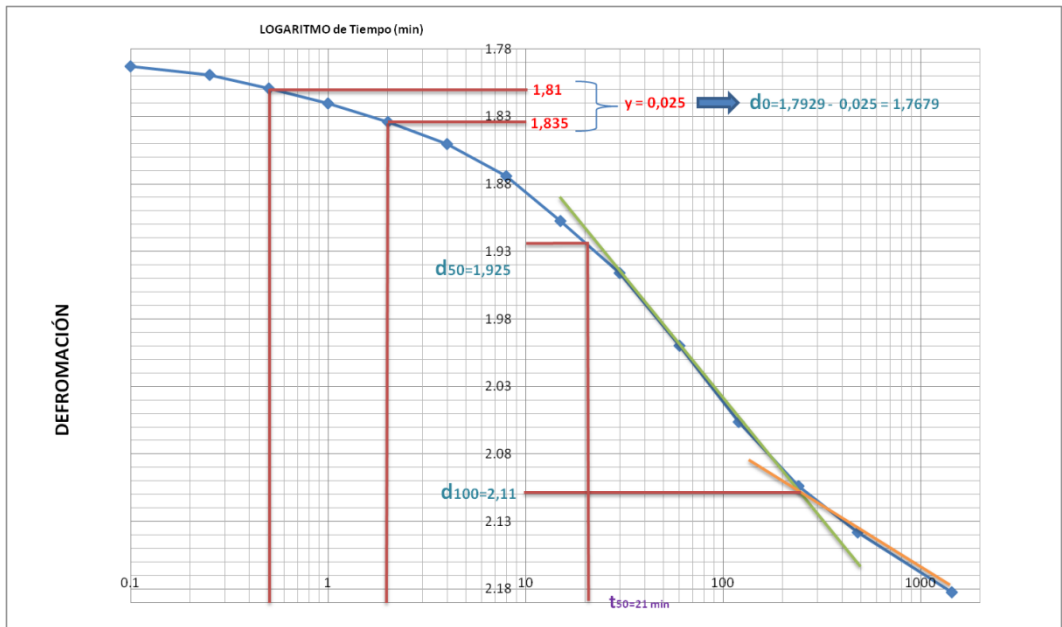
**Figura 60.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el tercer día de carga con los Datos de salida de GID

$$C_v = \frac{0,197H_{ef}^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times (1,12)^2}{27} = 0,00915 \left[ \text{cm}^2/\text{seg} \right]$$

➤ **Día 4**

**Tabla 22.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 243960 Pa

Carga (kg): 8	243960
TIEMPO (S/M/Hs)	DEFORM (mm)
6 Seg	1.79297419
15 Seg	1.79932284
30 Seg	1.809307535
1 Min	1.8203311
2 Min	1.83383641
4 Min	1.85057376
8 Min	1.874410055
15 Min	1.907307605
30 Min	1.946207515
1 Hs	1.999882465
2 Hs	2.05603916
4 Hs	2.10394261
8 Hs	2.13822532
24 Hs	2.18266587



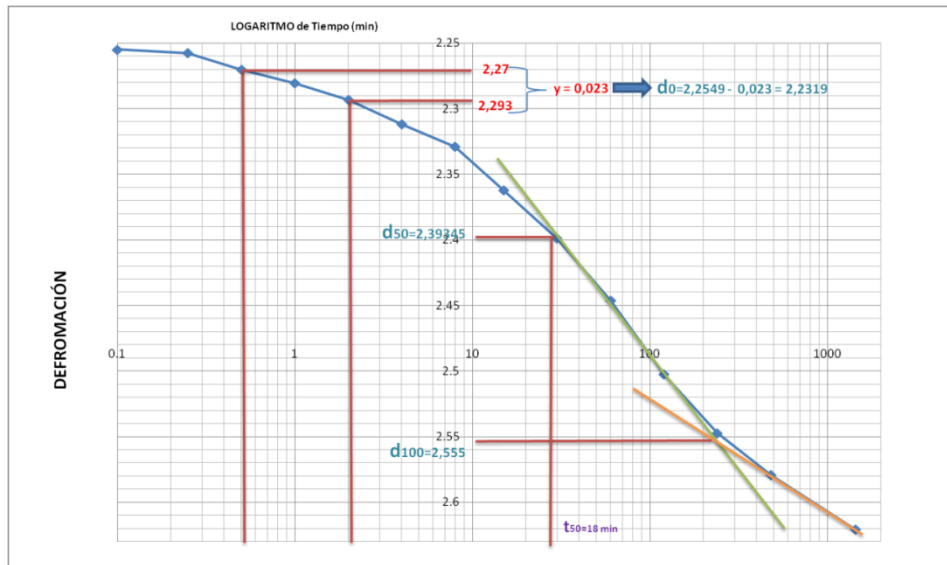
**Figura 61.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el cuarto día de carga con los Datos de salida de GID

$$C_v = \frac{0,197 H_{ef}^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times (1,0858)^2}{21} = 0,01106 \left[ \text{cm}^2 / \text{seg} \right]$$

➤ **Día 5**

**Tabla 23.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 487820 Pa

Carga (kg): 16	487920
TIEMPO (S/M/Hs)	DEFORM (mm)
6 Seg	2.25493281
15 Seg	2.25773223
30 Seg	2.270383455
1 Min	2.28077361
2 Min	2.29347867
4 Min	2.31189024
8 Min	2.328848265
15 Min	2.362333635
30 Min	2.398726095
1 Hs	2.446208565
2 Hs	2.50246614
4 Hs	2.54725686
8 Hs	2.57934252
24 Hs	2.62090314



**Figura 62.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el quinto día de carga con los Datos de salida de GID

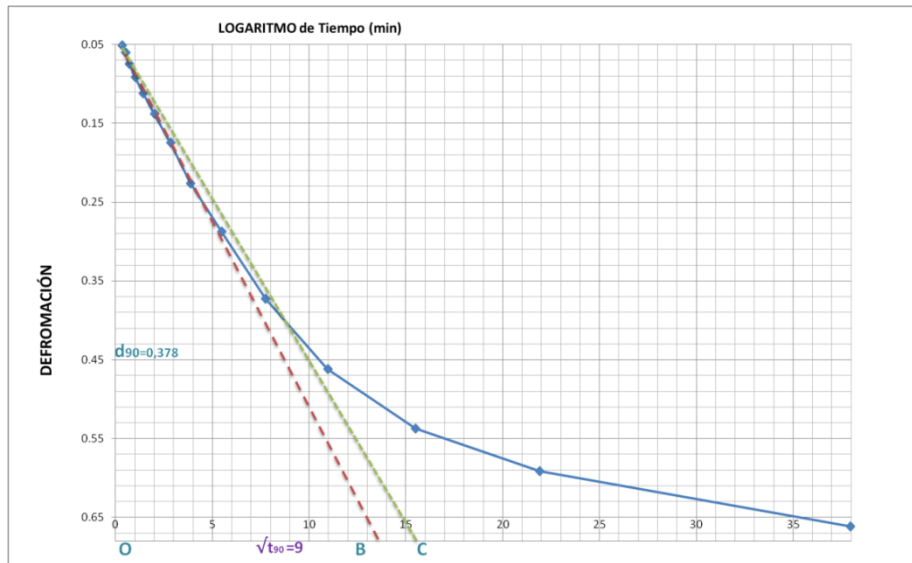
$$C_v = \frac{0,197H_{ef}^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times (1,0623)^2}{18} = 0,01235 \left[ \text{cm}^2/\text{seg} \right]$$

### 6.2.6.2 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TIEMPO DEFORMACIÓN POR TAYLOR

➤ Día 1

**Tabla 24.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 30460 Pa

Carga (kg): 1	30460
TIEMPO (S/M/Hs)	DEFORM (mm)
6 Seg	0.050882406
15 Seg	0.060133753
30 Seg	0.074935907
1 Min	0.091588331
2 Min	0.111941294
4 Min	0.137845064
8 Min	0.174850451
15 Min	0.226657992
30 Min	0.287716879
1 Hs	0.372829268
2 Hs	0.461642195
4 Hs	0.537503237
8 Hs	0.591161048
24 Hs	0.661471282



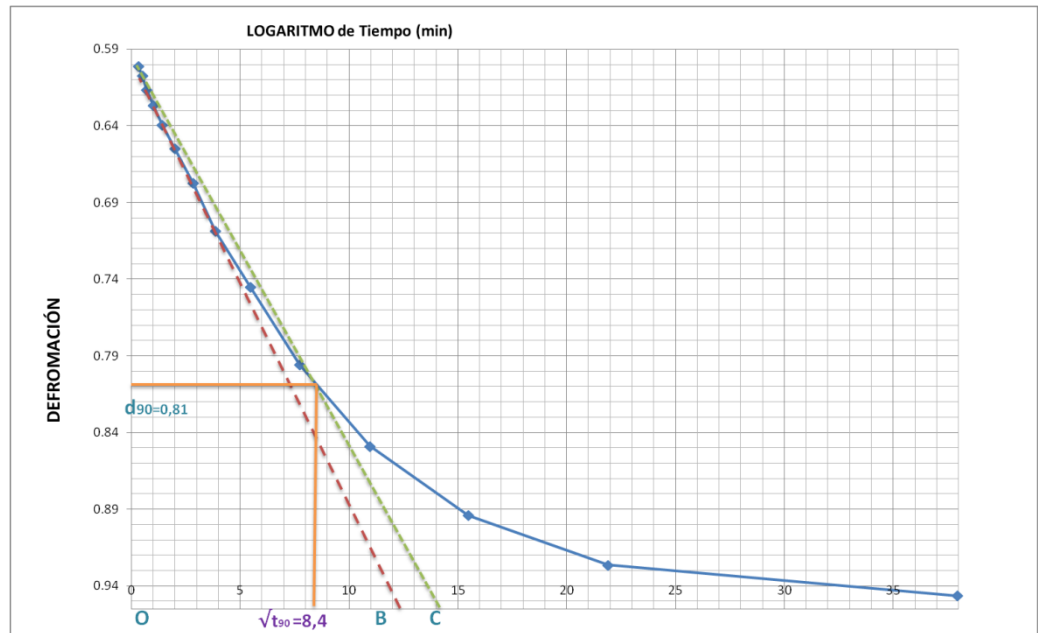
**Figura 63.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el primer día de carga

$$C_v = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times (1,1631)^2}{81} = 0,01416 \left[ \text{cm}^2/\text{seg} \right]$$

➤ **Día 2**

**Tabla 25.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 61800 Pa

Carga (kg): 2		61800
TIEMPO (S/M/Hs)	DEFORM (mm)	
6 Seg	0.6012985	
15 Seg	0.607202158	
30 Seg	0.616494953	
1 Min	0.626771691	
2 Min	0.639344296	
4 Min	0.655087384	
8 Min	0.677499419	
15 Min	0.708548287	
30 Min	0.745172832	
1 Hs	0.79590056	
2 Hs	0.848924155	
4 Hs	0.894185533	
8 Hs	0.926436998	
24 Hs	0.946553166	



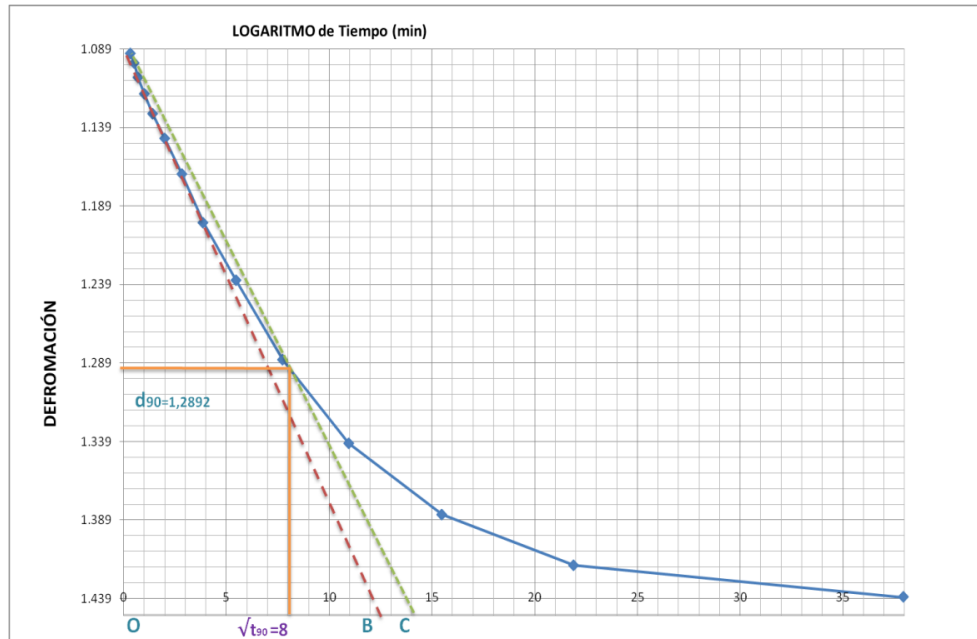
**Figura 64.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el segundo día de carga

$$C_v = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times (1,1415)^2}{70,56} = 0,01566 \left[ \frac{cm^2}{seg} \right]$$

➤ **Día 3**

**Tabla 26.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 123600 Pa

Carga (kg): 4		123600
TIEMPO (S/M/Hs)	DEFORM (mm)	
6 Seg	1.09186924	
15 Seg	1.09782827	
30 Seg	1.10723151	
1 Min	1.11756414	
2 Min	1.13024758	
4 Min	1.14604721	
8 Min	1.16857125	
15 Min	1.19967848	
30 Min	1.23641672	
1 Hs	1.28720515	
2 Hs	1.34034439	
4 Hs	1.38566582	
8 Hs	1.41803046	
24 Hs	1.43820369	



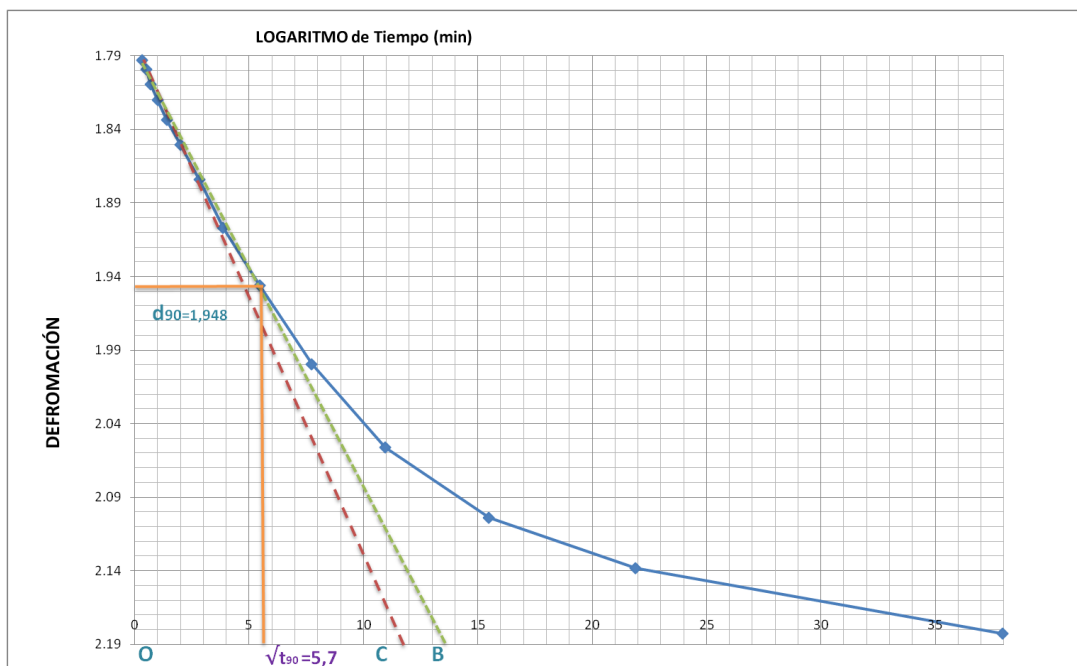
**Figura 65.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el tercer día de carga

$$C_v = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times (1,1175)^2}{64} = 0,01655 \left[ \frac{cm^2}{seg} \right]$$

➤ **Día 4**

**Tabla 27.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 248200 Pa

Carga (kg): 8		248200
TIEMPO (S/M/Hs)	DEFORM (mm)	
6 Seg	1.79297419	
15 Seg	1.79932284	
30 Seg	1.809307535	
1 Min	1.8203311	
2 Min	1.83383641	
4 Min	1.85057376	
8 Min	1.874410055	
15 Min	1.907307605	
30 Min	1.946207515	
1 Hs	1.999882465	
2 Hs	2.05603916	
4 Hs	2.10394261	
8 Hs	2.13822532	
24 Hs	2.18266587	



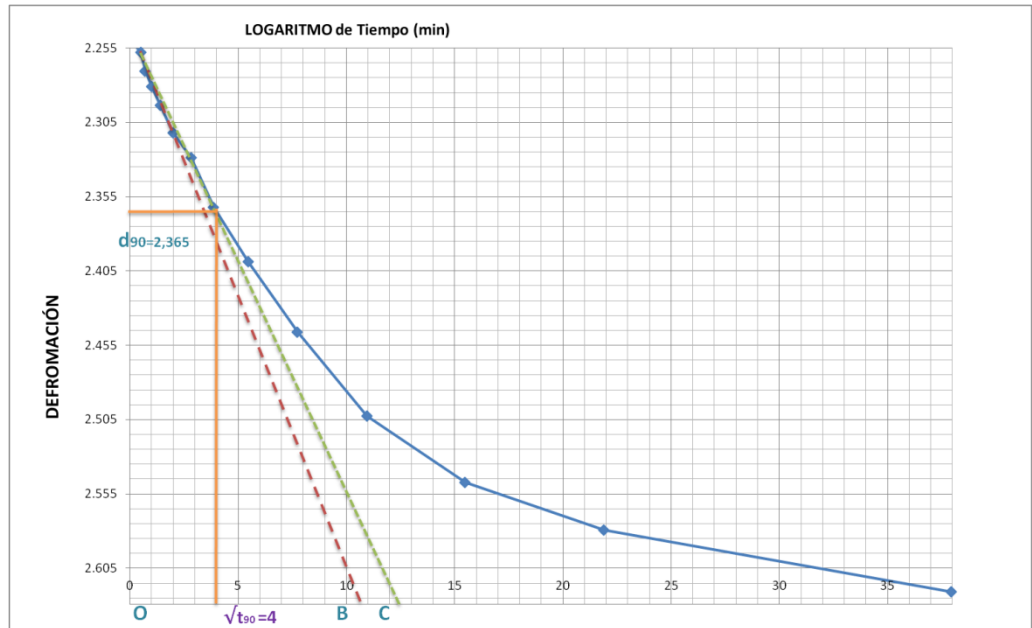
**Figura 66.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el cuarto día de carga

$$C_v = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times (1,0846)^2}{32,49} = 0,03070 \left[ \frac{cm^2}{seg} \right]$$

➤ **Día 5**

**Tabla 28.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 495400 Pa

Carga (kg): 16	495400
TIEMPO (S/M/Hs)	DEFORM (mm)
6 Seg	2.25493281
15 Seg	2.25773223
30 Seg	2.270383455
1 Min	2.28077361
2 Min	2.29347867
4 Min	2.31189024
8 Min	2.328848265
15 Min	2.362333635
30 Min	2.398726095
1 Hs	2.446208565
2 Hs	2.50246614
4 Hs	2.54725686
8 Hs	2.57934252
24 Hs	2.62090314



**Figura 67.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el cuarto día de carga

$$C_v = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times (1,0638)^2}{16} = 0,05998 \left[ \frac{cm^2}{seg} \right]$$

## 6.2.7 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES DE CONSOLIDACIÓN

La correlación de datos entre el GID y los datos experimentales es la siguiente:

	MUESTRA N° 1				MUESTRA N° 2				MUESTRA N° 3			
	GID		EXPERIMENTAL		GID		EXPERIMENTAL		GID		EXPERIMENTAL	
	TAYLOR	CASA GRANDE	TAYLOR	CASA GRANDE	TAYLOR	CASA GRANDE	TAYLOR	CASA GRANDE	TAYLOR	CASA GRANDE	TAYLOR	CASA GRANDE
Coeficiente de consolidación $C_v$ (cm <sup>2</sup> /min)	0,0093	0,0095	0,0163	0,0067	0,0167	0,0083	0,0163	0,0087	0,0142	0,0090	0,0116	0,0081
	0,0195	0,0099	0,0309	0,0068	0,0184	0,0094	0,0165	0,0086	0,0157	0,0089	0,0126	0,0076
	0,0213	0,0098	0,0317	0,0072	0,0212	0,0106	0,0174	0,0088	0,0165	0,0092	0,0172	0,0067
	0,0235	0,0095	0,0342	0,0080	0,0271	0,0103	0,0210	0,0092	0,0307	0,0111	0,0214	0,0085
	0,3623	0,0097	0,0463	0,0088	0,0563	0,0098	0,0228	0,0095	0,0600	0,0124	0,0481	0,0125
Indice de compresión $C_c$ (cm <sup>2</sup> /kg)	0,05280169		0,099828195		0,022275713		0,096528089		0,06022693		0,075902429	
Coeficiente de compresibilidad $a_v$ (cm <sup>2</sup> /kg)	0,001403382		0,002653269		0,000592052		0,002565557		0,00160073		0,002017361	
Coeficiente de compresibilidad volumétrica $m_v$ (cm <sup>2</sup> /kg)	0,000496878		0,001298077		0,000327415		0,001303504		0,00054955		0,001257236	
Indice de hinchamiento o endurecimiento $C_s$ (cm <sup>2</sup> /kg)	0,010560338		0,019965639		0,004455143		0,019305618		0,01204539		0,015180486	

**Figura 68.** Cuadro comparativo entre el modelamiento numérico y el ensayo experimental

## 7. CONCLUSIONES

- Como resultado de la verificación de los instrumentos de medición empleados en el proceso de consolidación, se obtuvo que el factor de calibración para el extensómetro analógico es de 1,001 y para el pistón de carga se obtuvo un brazo de 9,621 lo cual indica que los resultados obtenidos a partir de estas consideraciones tienen un buen grado de confiabilidad y permite tener mayor precisión para posteriores ensayos.
- Las muestras ensayadas en este trabajo son Arcillas (CL) y limos arcillosos (CL-ML) de la ciudad de Bucaramanga las cuales presentaron un rango de coeficiente de consolidación ( $C_v$ ) 0,01880 - 0,03185 en la parte experimental y de 0,0274 - 0,0872 en el modelamiento numérico, lo que es aceptable para los valores de las fórmulas empíricas de correlación de las propiedades de consolidación.
- Se compararon los valores obtenidos con diferentes métodos y se observa que los valores obtenidos con el software difieren en un rango de valores de 2,64 – 141,3 % los cuales son aceptables por lo que implica simular el proceso de consolidación mediante el uso de un software
- Para posteriores estudios se deberá tener en cuenta que el modelamiento numérico adopta como hipótesis fundamental un problema lineal elástico, para mayor facilidad hay que agregar que los suelos no son homogéneos, que su comportamiento es elástico en un rango muy pequeño por ello cambian sus propiedades mecánicas con variaciones en el contenido de humedad mínimas, y que su estudio es de por sí bastante difícil, por lo tanto si utilizamos más variables en el modelamiento tendremos una aproximación más adecuada a la situación real.

## REFERENCIAS

- A. SRIDHARAN AND H.B. NAGARAJ. Compressibility behaviour of remoulded, finegrained. Canada. 2000.
- ARANGO V, Antonio. Ingeniero Antonio Arango V. Manual de laboratorio de mecánica de suelos. Universidad Nacional de Colombia. Seccional Medellín.
- BARAJA .M Das .Fundamentos de ingeniería Geotécnica. (2001). Capítulo 6.
- COVO TORRES, Álvaro Ignacio. Revista ciencia e ingeniería al día. Cartagena.
- GEOTECNIA I. Guía Práctica para el seguimiento de las clases teóricas de Consolidación de Suelos. Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de la Plata. Argentina.
- Guía académica de prácticas de laboratorio de mecánica de suelos I, 2009. Universidad Central del Ecuador.
- JUAREZ BADILLO, Eulalio. RICO RODRÍGUEZ, Alfonso. Mecánica de suelos. Tomo I “Fundamentos de la mecánica de suelos”. (1980). Capítulo X.
- MUELA RODRÍGUEZ, Ángel. Manual de mecánica del suelo y cimentaciones. Capitulo 1: caracterización de los suelos.
- TAYLOR, Donald. Principios Fundamentales de Mecánica de Suelos. (1961). Capítulo 10.
- <http://www.slideshare.net/UCGcertificacionvial/consolidacin-unidimensional-de-los-suelos-1823900>
- [http://icc.ucv.cl/geotecnia/11\\_nuestro\\_laboratorio/laboratorio/consolidacion/consolidacion.htm](http://icc.ucv.cl/geotecnia/11_nuestro_laboratorio/laboratorio/consolidacion/consolidacion.htm)
- <http://www.galeon.com/geomecanica/cap9.pdf>

## ANEXO A. GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Coefficiente de consolidación vertical (Cv):** el coeficiente de consolidación se relaciona con el tiempo en que tendrá lugar una determinada cantidad de consolidación.

**Índice de compresión (Cc):** define características de esfuerzo-deformación del suelo, y se relaciona con cuanta consolidación o asentamiento tendrá lugar.

**Coefficiente de pre-consolidación (av):** mide la razón de variación de la relación de vacíos con la presión.

**Coefficiente de consolidación volumétrica (mv):** físicamente expresa la compresibilidad del suelo, relacionándola con su volumen inicial.

**Relación de vacíos (e):** es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos. Varía entre

**Contenido de humedad ó agua de un suelo (w):** expresa la proporción de agua presente en el suelo. Es la relación entre el peso de agua del suelo y el peso de su fase sólida. Generalmente se expresa en porcentaje.

**Consolidómetro:** dispositivo para mantener la muestra dentro del anillo el cual puede estar fijado a la base o puede ser flotante, con piedras porosas sobre cada cara de la muestra.

**Consolidación primaria:** se debe a la reducción gradual del volumen de vacíos por eliminación de agua, bajo esfuerzos efectivos variables, es un cambio lento provocado por los esfuerzos de compresión bajo la influencia de las presiones de poro que resisten una reducción más rápida de volumen.

**Consolidación secundaria:** reducción de un macizo que se produce por la acción de una carga permanente, la causa es la reducción gradual de volumen del suelo

bajo esfuerzos efectivos constantes, ya que la estructura interna ha absorbido gran parte del agua del suelo, esta fase comienza cuando las presiones de poro se vuelven aproximadamente cero y se supone que continúa para siempre.

**Asentamiento:** cuando actúa una carga vertical sobre la superficie del terreno, se presenta el asentamiento, el esfuerzo provoca deformación y la aplicación de la carga provoca desplazamiento.

**Arcilla normalmente consolidada:** aquella que nunca estuvo sometida a tensiones efectivas mayores a las actualmente existentes

**Extensómetro:** instrumento de precisión con el cual se miden las deformaciones de las piezas sometidas a esfuerzos de tracción o de compresión.

**Norma Técnica:** documento donde se definen los procedimientos y requisitos a que se debe ajustarse un determinado producto o trabajo.

**Proyecto:** son las distintas etapas que van desde la concepción hasta la materialización de una obra civil, complejo industrial o programa de desarrollo de las más diversas áreas. Los temas tratados en este tienen relación con la construcción de una obra, la cual queda definida físicamente a través del estudio de suelos.

**Permeabilidad:** la facilidad con que un suelo permite el paso de un fluido a través de él sin alterar su estructura interna.

## ANEXO B. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO

### CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS PARA CADA UNA DE LAS MUESTRAS

#### 1. GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO

Es un proceso mecánico mediante el cual se separan las partículas de un suelo en sus diferentes tamaños, denominado a la fracción menor (Tamiz No 200) como limo, Arcilla y Coloide. Se lleva a cabo utilizando tamices en orden decreciente. La cantidad de suelo retenido indica el tamaño de la muestra, esto solo separa una porción de suelo entre dos tamaños. Para las muestras tomadas se hizo basándonos en la norma ***I.N.V. E – 123 – 07***



Figura 69. Procedimiento del ensayo de granulometría

## 1.1 ENSAYO DE GRANULOMETRÍA: MUESTRA N°1

Tabla 29. Análisis granulométrico muestra n°1

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido (%)	Peso que pasa Acumulado (%)
3"	76,20	0,00	0,0	100,0
2"	50,80	0,00	0,0	100,0
1 1/2"	38,10	0,00	0,0	100,0
1"	25,40	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,05	0,00	0,0	100,0
3/8"	9,525	4,20	0,4	99,6
N° 4	4,750	14,70	1,5	98,1
N° 10	2,000	19,00	1,9	96,2
N° 40	0,425	74,90	7,5	88,7
N° 100	0,150	137,50	13,8	74,9
N° 200	0,075	83,90	8,4	66,46
<b>PASA 200</b>		662,10	66,5	<b>0,00</b>
<b>TOTAL</b>		996,30	<b>100,0</b>	

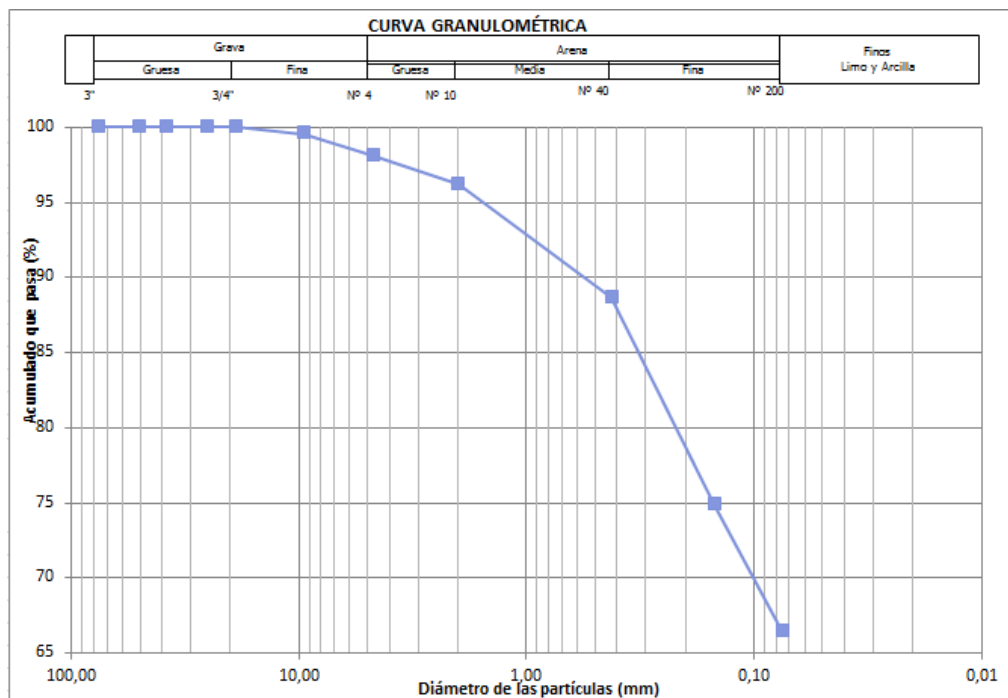


Figura 70. Curva granulométrica muestra N°1

## 1.2 ENSAYO DE GRANULOMETRÍA: MUESTRA N°2

Tabla 30. Análisis granulométrico muestra n°2

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido (%)	Peso que pasa Acumulado (%)
3"	76,20	0,00	0,0	100,0
2"	50,80	0,00	0,0	100,0
1 1/2"	38,10	0,00	0,0	100,0
1"	25,40	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,05	0,00	0,0	100,0
3/8"	9,525	4,60	0,5	99,5
N° 4	4,750	10,60	1,1	98,5
N° 10	2,000	25,90	2,6	95,9
N° 40	0,425	76,15	7,6	88,3
N° 100	0,150	59,80	6,0	82,3
N° 200	0,075	21,60	2,2	80,10
<b>PASA 200</b>		799,72	80,1	<b>0,00</b>
<b>TOTAL</b>		998,37	<b>100,0</b>	

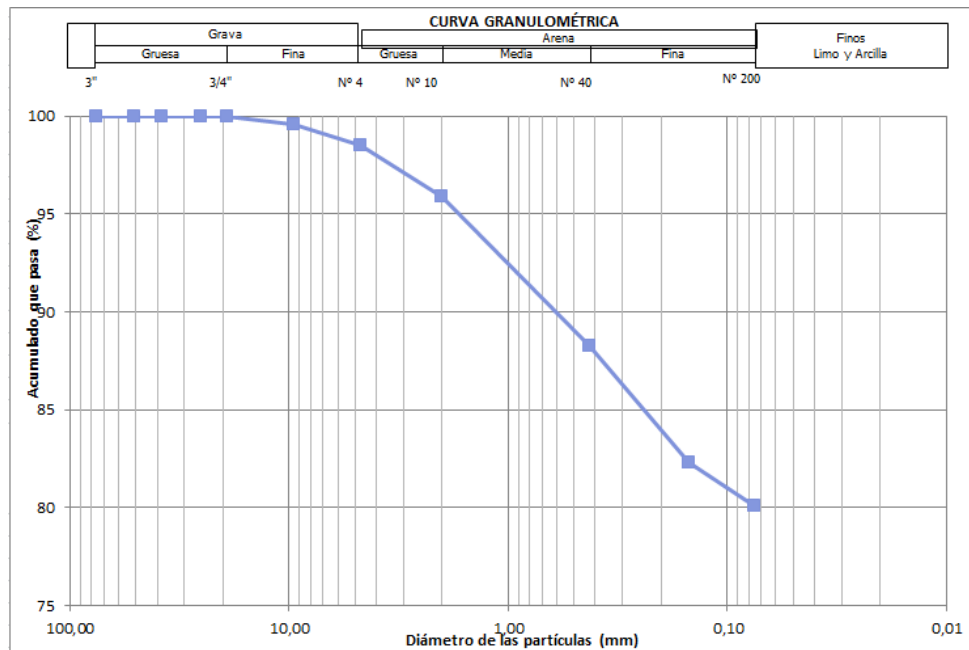
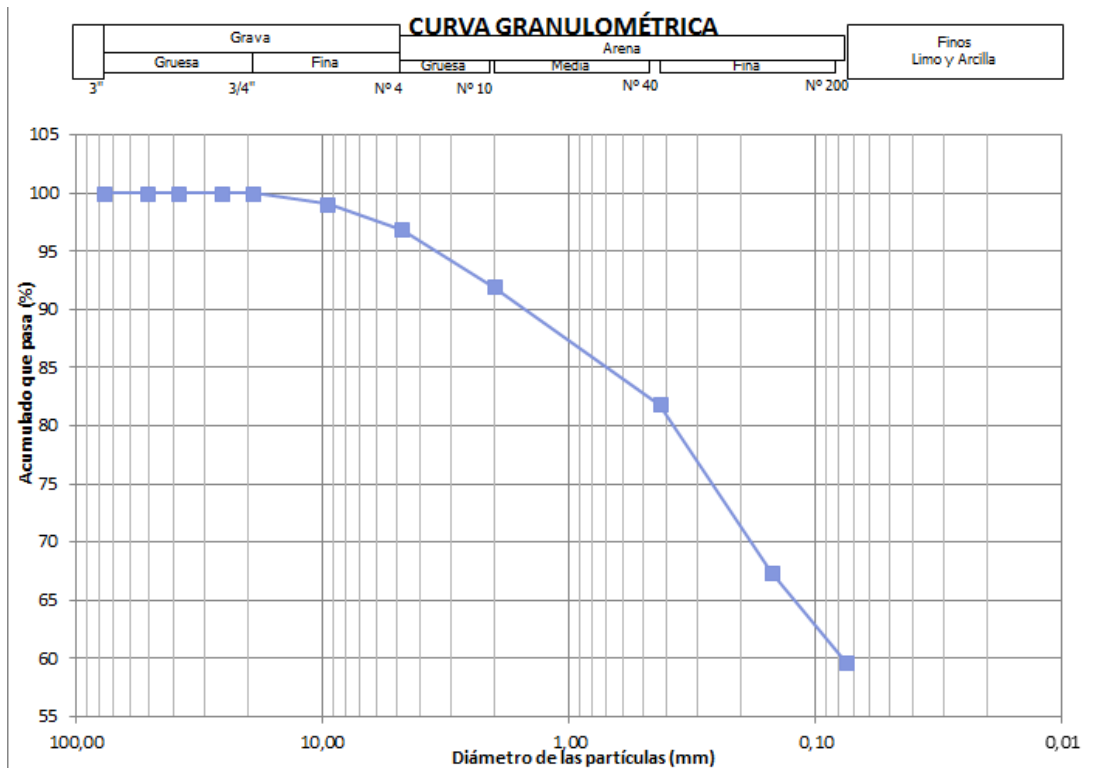


Figura 71. Curva granulométrica muestra n°2

### 1.3 ENSAYO DE GRANULOMETRÍA: MUESTRA N°3

**Tabla 31.** Análisis granulométrico muestra n°3

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido (%)	Peso que pasa Acumulado (%)
3"	76,20	0,00	0,0	100,0
2"	50,80	0,00	0,0	100,0
1 1/2"	38,10	0,00	0,0	100,0
1"	25,40	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,05	0,00	0,0	100,0
3/8"	9,525	9,50	1,0	99,0
N° 4	4,750	21,80	2,2	96,9
N° 10	2,000	49,30	4,9	91,9
N° 40	0,425	100,60	10,1	81,8
N° 100	0,150	144,10	14,4	67,4
N° 200	0,075	76,90	7,7	59,68
<b>PASA 200</b>		595,30	59,7	<b>0,00</b>
<b>TOTAL</b>		997,50	<b>100,0</b>	



**Figura 72.** Curva granulométrica muestra n°3

## 2. LÍMITE LÍQUIDO

Nos indica el contenido de humedad en el que el suelo pasa del estado plástico al líquido e indica también si el suelo contiene humedad suficiente para superar la fricción y cohesión interna. Para las muestras tomadas se hizo basándonos en la norma *I.N.V. E – 125 – 07*

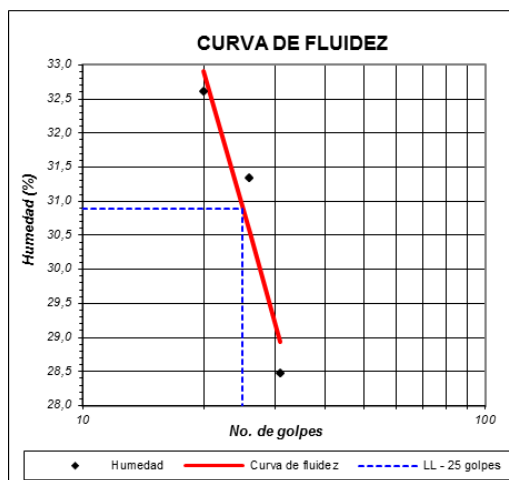


**Figura 73.** Procedimiento del ensayo de límite líquido

## 2.1 ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO: MUESTRA N°1

**Tabla 32.** Obtención de los datos de límite líquido en laboratorio para la muestra n°1

CRISTAL No.	Wh + tara (grs)	Ws + tara (grs)	W AGUA (grs)	W tara (grs)	Ws (grs)	HUMEDAD (%)	No. GOLPES
<b>LÍMITE LÍQUIDO</b>							
<b>1</b>	25,4	21,7	3,7	8,7	13	28,5	31
<b>2</b>	17,8	15,2	2,6	6,9	8,3	31,3	26
<b>3</b>	18,9	16	2,9	7,1	8,9	32,6	20



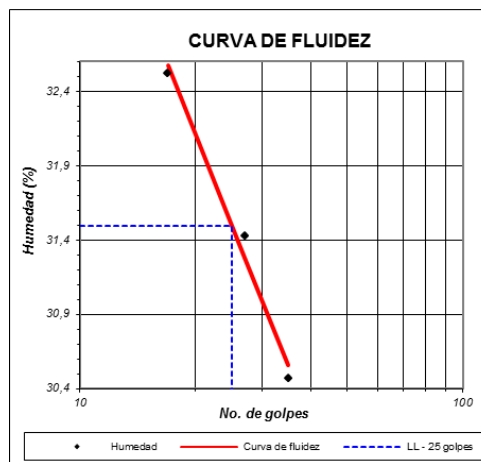
**Figura 74.** Curva de fluidez para la muestra n°1

**Límite Líquido= 30,9 %**

## 2.2 ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO: MUESTRA N°2

**Tabla 33.** Obtención de los datos de límite líquido en laboratorio para la muestra n°2

CRISTAL No.	Wh + tara (grs)	Ws + tara (grs)	W AGUA (grs)	W tara (grs)	Ws (grs)	HUMEDAD (%)	No. GOLPES
<b>LÍMITE LÍQUIDO</b>							
<b>1</b>	23,8	19,9	3,9	7,1	12,8	30,5	35
<b>2</b>	20,7	17,4	3,3	6,9	10,5	31,4	27
<b>3</b>	23,1	19,1	4	6,8	12,3	32,5	17



**Figura 75.** Curva de fluidez para la muestra n°1

Límite Líquido= 31,5 %

### 2.3 ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO: MUESTRA N°3

**Tabla 34.** Obtención de los datos de límite líquido en laboratorio para la muestra n°3

CRISTAL No.	Wh + tara (grs)	Ws + tara (grs)	W AGUA (grs)	W tara (grs)	Ws (grs)	HUMEDAD (%)	No. GOLPES
<b>LÍMITE LÍQUIDO</b>							
<b>1</b>	26,7	23,8	2,9	6,9	16,9	17,2	33
<b>2</b>	22,9	20,2	2,7	6,7	13,5	20,0	28
<b>3</b>	19,8	17,3	2,5	6,8	10,5	23,8	19

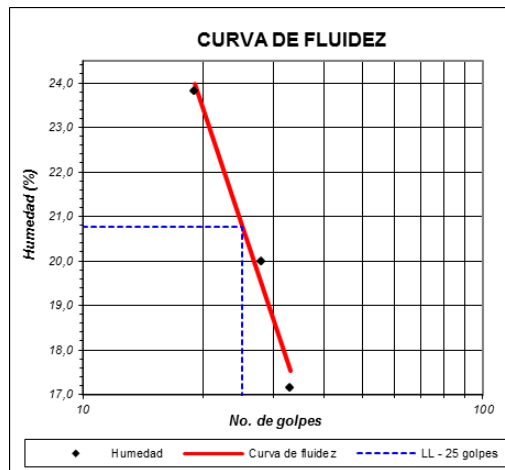


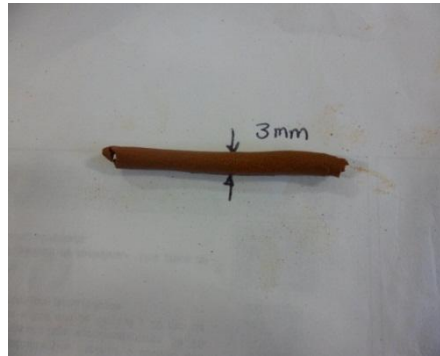
Figura 76. Curva de fluidez para la muestra n°3

Límite Líquido= 20,8 %

### 3. LÍMITE PLÁSTICO

Cuando el suelo pasa de semi-sólido a plástico porque contiene humedad suficiente se dice que ha traspasado su límite plástico. La resistencia del suelo disminuye rápidamente al aumentar el contenido de humedad más allá del límite plástico. Para las muestras tomadas se hizo basándonos en la norma **I.N.V. E – 126 – 07**





**Figura 77.** Procedimiento del ensayo de límite plástico

### 3.1 ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO: MUESTRA N°1

**Tabla 35.** Obtención de los datos de límite plástico en laboratorio para la muestra n°1

CRISTAL No.	Wh + tara (grs)	Ws + tara (grs)	W AGUA (grs)	W tara (grs)	Ws (grs)	HUMEDAD (%)
<b>LÍMITE PLÁSTICO</b>						
<b>1</b>	7,5	7,4	0,1	6,8	0,6	16,7
<b>2</b>	8,2	8	0,2	6,9	1,1	18,2
<b>3</b>	7,2	7,1	0,1	6,6	0,5	20,0

**Límite Plástico= 18,3 %**

### 3.2 ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO: MUESTRA N°2

**Tabla 36.** Obtención de los datos de límite plástico en laboratorio para la muestra n°2

CRISTAL No.	Wh + tara (grs)	Ws + tara (grs)	W AGUA (grs)	W tara (grs)	Ws (grs)	HUMEDAD (%)
<b>LÍMITE PLÁSTICO</b>						
<b>1</b>	9,2	9,1	0,1	8,4	0,7	14,3
<b>2</b>	9,7	9,6	0,1	8,7	0,9	11,1
<b>3</b>	7,5	7,4	0,1	6,8	0,6	16,7

**Límite Plástico= 14,0 %**

### 5.3.3 ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO: MUESTRA N°3

**Tabla 37.** Obtención de los datos de límite plástico en laboratorio para la muestra n°3

CRISTAL No.	Wh + tara (grs)	Ws + tara (grs)	W AGUA (grs)	W tara (grs)	Ws (grs)	HUMEDAD (%)
<b>LÍMITE PLÁSTICO</b>						
<b>1</b>	9,2	9,1	0,1	8,3	0,8	12,5
<b>2</b>	9,4	9,2	0,2	8	1,2	16,7
<b>3</b>	9	8,9	0,1	8,2	0,7	14,3

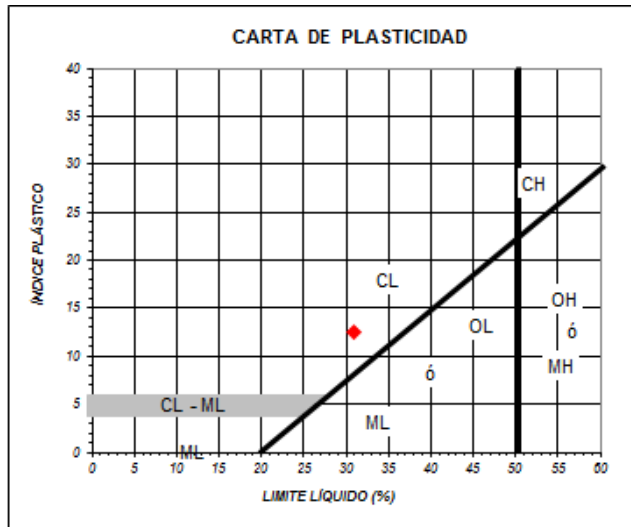
**Límite Plástico= 14,5 %**

## 4. ÍNDICE DE PLASTICIDAD

Refleja la diferencia numérica entre el índice plástico del suelo y el límite líquido. Permite medir la capacidad de compresión y la cohesión del suelo. Para las muestras tomadas se hizo basándonos en la norma **I.N.V. E – 126 – 07**

$$IP = LL - LP$$

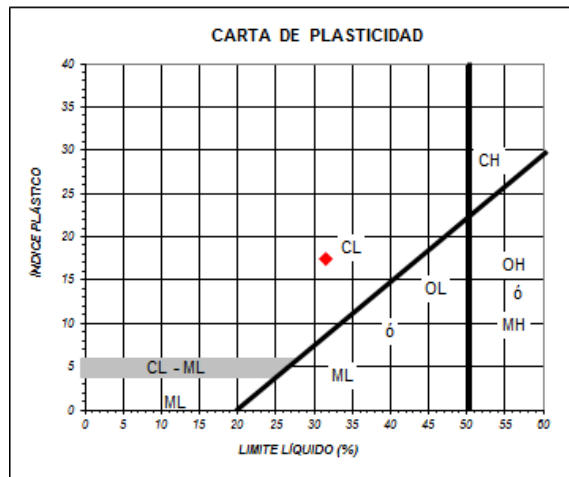
#### 4.1 ÍNDICE DE PLASTICIDAD: MUESTRA N°1



**Figura 78.** Carta de plasticidad para la muestra n°1

$$IP = LL - LP = 30,9 - 18,3 = 12,6$$

#### 4.2 ÍNDICE DE PLASTICIDAD: MUESTRA N°2



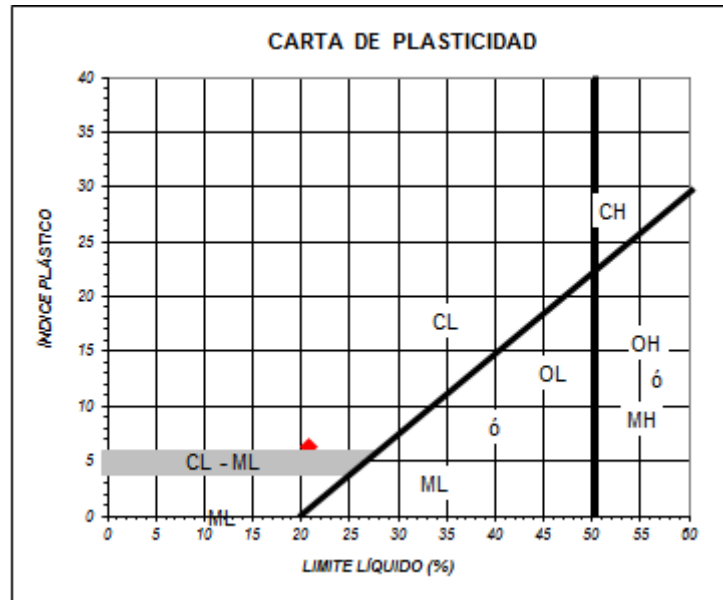
**Figura 79.** Carta de plasticidad para la muestra n°2

$$IP = LL - LP = 31,5 - 14,0 = 17,5$$

Las muestras 1 y 2 están en la carga de plasticidad ubicadas dentro del rango de CL

**CL:** Esta clasificación corresponde a las Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras; estos materiales contienen cierto grado de impurezas, lo que afecta sus propiedades plásticas, es decir, que a mayor contenido de impurezas se obtiene una pasta menos plástica al amasarla con agua. Este grupo está definido por un límite líquido menor a 50% e índice plástico superior a 6%.

#### 4.3 ÍNDICE DE PLASTICIDAD: MUESTRA N°3



**Figura 80.** Carta de plasticidad para la muestra n°3

$$IP = LL - LP = 20,8 - 14,5 = 6,3$$

La muestra N° 3 está en la carga de plasticidad ubicada dentro del rango de CL-ML

**CL-ML:** Esta clasificación corresponde a limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, limo arcilloso, poco plástico, arenas finas limosas, arenas finas arcillosas. Limos inorgánicos y arenas muy finas limosas con ligera plasticidad.

**Tabla 38.** Resumen clasificación de los suelos

		MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
LIMITES DE ATTERBERG	LIMITE LIQUIDO	30,88	31,50	20,78
	LIMITE PLASTICO	18,28	14,02	14,48
	INDICE DE PLASTICIDAD	12,60	17,48	6,29
GRANULOMETRIA	% DE GRAVAS	0,4	0,5	1
	% DE ARENAS	33,1	19,4	39,4
	% ARENA FINA	66,5	80,1	59,6
GRAVEDAD ESPECÍFICA		2,64	2,68	2,47
CLASIFICACIÓN DEL SUELO		CL	CL	CL-ML
CARACTERISTICAS DEL SUELO		Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcilla arenosas, arcillas limosas.	Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcilla arenosas, arcillas limosas.	Limos inorgánicos y arenas muy finas polvo de roca, arenas finas arcillosas o limosas con ligera plasticidad
GRAVAS+ARENAS		33,5	19,9	40,4
FINOS		66,5	80,1	59,6
		100	100	100

## ANEXO C. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 5. CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE SUELOS

Al someter una masa de suelo saturado a un incremento de carga, ésta es soportada inicialmente por el agua contenida en los poros, ya que ella es incompresible en comparación con la estructura del suelo. La presión que resulta en el agua a causa del incremento de la carga es llamada exceso de presión hidrostática. A medida que el agua drena de los poros del suelo, el incremento de carga es transmitido a la estructura del suelo. La transferencia de carga es acompañada por un cambio en el volumen del suelo igual al volumen de agua drenada. Este proceso es conocido como consolidación.

Este es un proceso que tiene un tiempo acotado de ocurrencia, comienza cuando se aplica el incremento de carga, y finaliza cuando la presión de los poros es igual a la hidrostática, o lo que es lo mismo, cuando se ha producido la totalidad de la transferencia de carga del agua a la estructura de suelo. Terminado este proceso llamado consolidación primaria, el suelo continúa deformándose, aunque en menor magnitud, debido a un reajuste de los granos. A este último proceso se lo denomina consolidación secundaria.

El asiento total, suponiendo que el último valor medido coincide con el momento en que desaparece toda la sobrepresión intersticial creada al aplicar la carga, es una medida de la deformación del esqueleto del suelo. Si se realizan varios escalones de carga, se obtendrá una curva de compresibilidad, que relaciona la presión efectiva (en escala logarítmica) con la deformación del esqueleto mineral, expresada por el índice de poros o relación de vacíos.

El propósito fundamental del ensayo de consolidación es determinar ciertos parámetros que se utilizan para predecir la velocidad y la magnitud del

asentamiento de estructuras fundadas sobre arcillas. Además, el ensayo permite obtener información acerca de la historia de presiones a que ha sido sometido el suelo.

Los parámetros más importantes que se obtienen del suelo al realizar el ensayo son:

- a)** El coeficiente de consolidación ( $C_v$ ), que indica el grado de asentamiento del suelo bajo un cierto incremento de carga y vinculado a la velocidad del mismo.
- b)** El índice de compresibilidad ( $C_c$ ), que expresa la compresibilidad de una muestra.
- c)** Coeficiente de pre-consolidación ( $a_v$ ): Mide la razón de variación de la relación de vacíos con la presión.

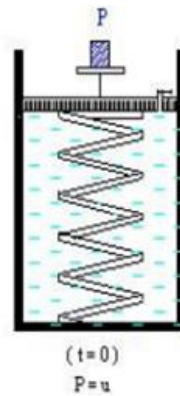
## 6. HIPÓTESIS FUNDAMENTALES EN LA TEORÍA DE CONSOLIDACIÓN

- Se supone al suelo homogéneo, cohesivo y saturado.



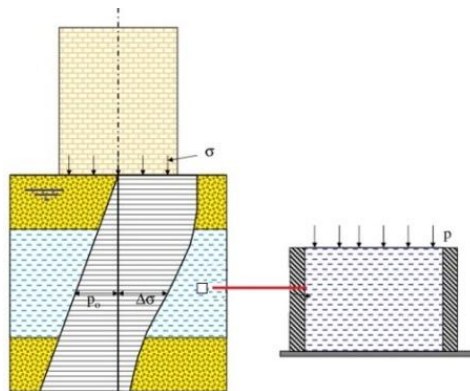
**Figura 81.** Representación de suelo homogéneo, cohesivo y saturado

- Las partículas de suelo y el agua son incompresibles.



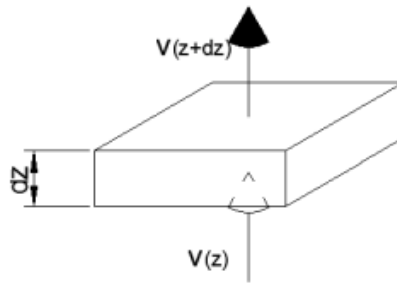
**Figura 82.** Las partículas del suelo y el agua son incompresibles

- La compresión del suelo in situ es unidimensional.



**Figura 83.** Muestra de suelo con compresión unidimensional

- La variación de volumen tiene su origen en la relajación del exceso de presión de poros.
- El flujo es unidimensional.



- $V_z$  es la velocidad vertical del flujo que entra en el elemento
- $V_{(z+dz)}$  es la velocidad vertical del flujo que sale del elemento

**Figura 84.** Muestra infinitesimal de suelo con flujo unidimensional

- El Coeficiente de Consolidación  $C_v$  y Permeabilidad  $K$ , permanecen constantes a lo largo del proceso.
- Se cumple la ley de Darcy

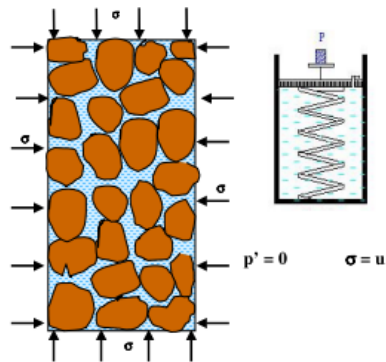
## 7. PRINCIPIO: LEY DE DARCY

Supongamos un elemento de suelo blando y saturado que tiene la posibilidad de drenar el agua contenida en sus poros según la ley de Darcy y al que sometemos a una presión hidrostática “ $\sigma$ ” exterior.

### Estado inicial Tiempo $t = 0$

-Toda la tensión externa la toma el agua que es incompresible por lo que no hay cambio de volumen.

-Los granos no interfieren entre sí por lo tanto no generan tensiones de fricción lo que equivale a decir que no hay tensión efectiva.

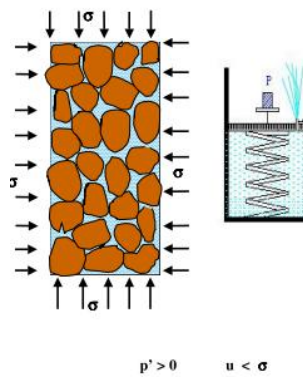


**Figura 85.** Estado inicial de tiempo

**Estado intermedio tiempo  $t \neq 0$**

El agua comienza a drenar, el volumen total disminuye y los granos comienzan a tocarse entre sí, por lo tanto generan tensiones de fricción lo que equivale a decir que hay tensión efectiva.

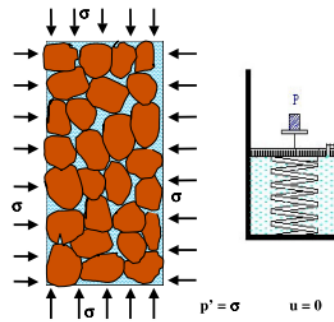
El agua sigue con presión y disminuyendo por lo tanto la presión neutra es menos a la presión  $\sigma$  aplicada.



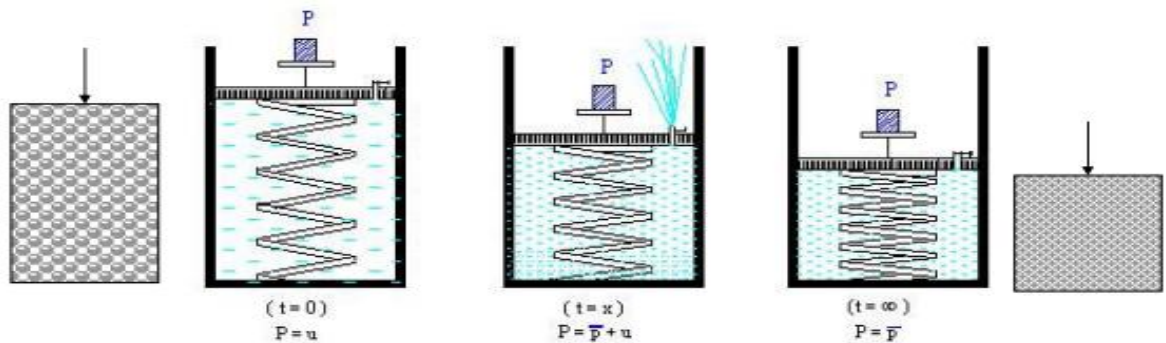
**Figura 86.** Estado intermedio de tiempo

**Estado final tiempo  $t = \infty$**

El agua drenó, el volumen disminuyó, lo que provocó un mayor contacto entre los granos, de tal forma que ahora la estructura granular es capaz de tomar la totalidad de la carga externa, por lo tanto no hay más presión neutra.



**Figura 87.** Estado inicial de tiempo

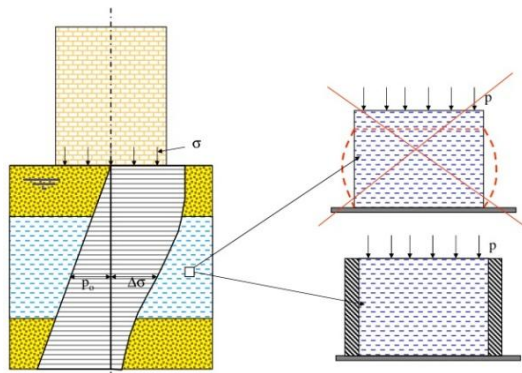


**Figura 88.** Resumen de los estados de tiempo

La transferencia de presión neutra “U” a tensión efectiva “p” se mide con el porcentaje de consolidación U%

$$U\% = \frac{P_{efectiva}}{P_{Total}} \times 100$$

Obteniendo una muestra inalterada del manto de suelos compresible, tenemos que tratar bajo un estado de carga unidimensional, se deforme de la misma forma que lo hace en el terreno.



**Figura 89.** Deformación apropiada en el ensayo

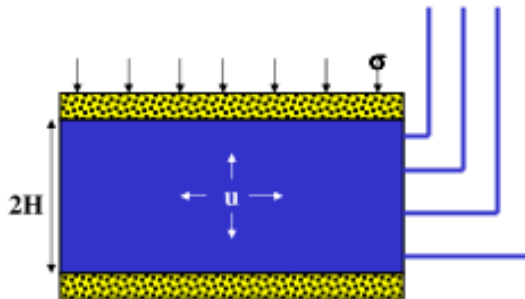
Otro aspecto relevante para tener en cuenta es que el proceso de Consolidación es la transferencia de presiones neutras a presiones efectivas dentro de la masa del suelo. Y la consecuencia de todo ello son los asentamientos.

**En  $t=0 \rightarrow \sigma = u$  (No drenada)**

$$\Delta u \approx \Delta \sigma u$$

$$\Delta \sigma' = \Delta \sigma u - \Delta u$$

$$\Delta \sigma' = 0 ; \varepsilon_v = 0$$

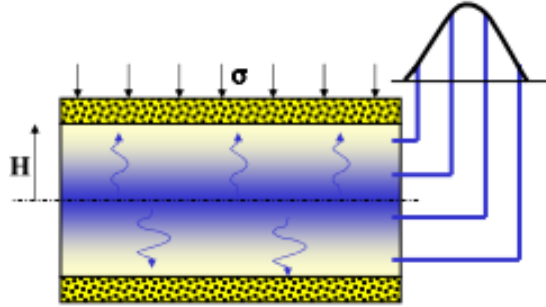


**Figura 90.** Transferencia de presiones en la etapa inicial

En  $t=0 \rightarrow \sigma = \sigma' + u$  (Drenada)

El agua empieza a desplazarse hacia las piedras porosas recorriendo un camino máximo = H

El tiempo necesario para que  $u = 0$  dependerá de la tensión aplicada, de la permeabilidad del suelo y de la distancia H



**Figura 91.** Transferencia de presiones para tiempos mayores a cero

## ANEXO D. ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN MUESTRA N°1 Y MUESTRA N°2

### 8. ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN: MUESTRA N°1

- MUESTRA AL INICIO DEL ENSAYO:

Tabla 39. Datos de la muestra n°1 al inicio del ensayo

DIAM.(mm):	62,77
ALT. (mm)	23,78
AREA (cm <sup>2</sup> ):	30,95
Vm (cm <sup>3</sup> ):	73,5991
Wanillo (gr):	504,9
Wa+Mh (gr):	619,8
Wmh (gr):	114,9
$\gamma_m$ (gr/cm <sup>3</sup> ):	1,56
$\gamma_s$ (gr/cm <sup>3</sup> ):	2,8

- MUESTRA AL FINAL DEL ENSAYO:

Tabla 40. Datos de la muestra n°1 al final del ensayo

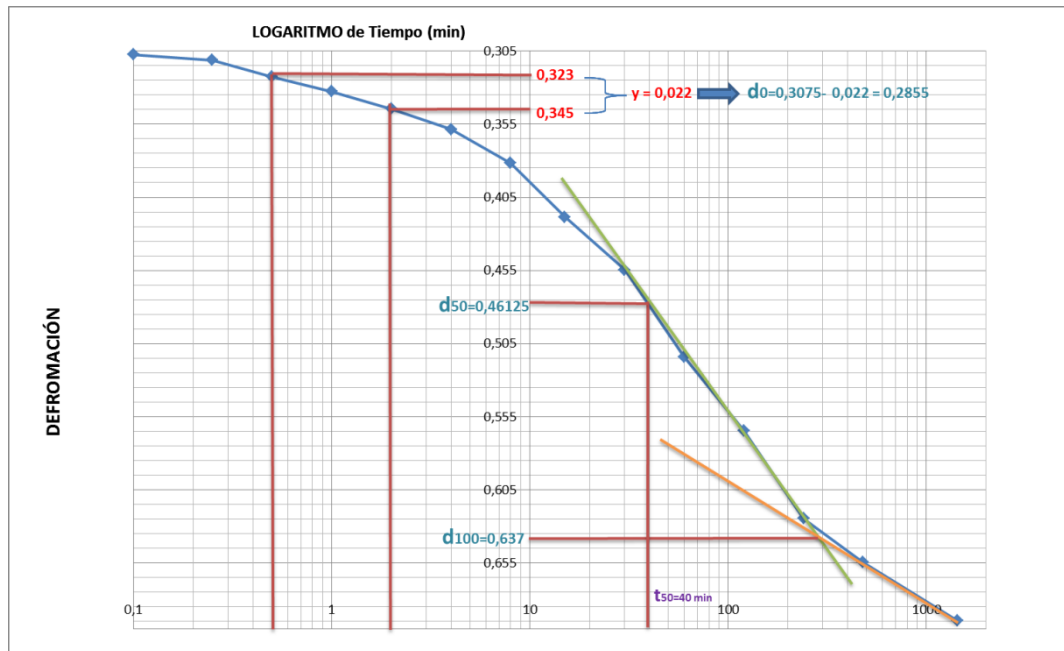
Wa+Mh (gr):	616,4
Wa+Ms (gr):	600
Wmh (gr):	111,5
Ws (gr):	95,1
w(%):	17%

### 8.1 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TIEMPO DEFORMACIÓN POR CASAGRANDE

- Día 1

**Tabla 41.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 30,40 kPa

Carga (kg): 1	$\Delta P$ (Pa)	30400
TIEMPO (S/M/Hs)	LECTURA (divis)	DEFORM (mm)
6 Seg	123	0,3075
15 Seg	124,5	0,31125
30 Seg	129	0,3225
1 Min	133	0,3325
2 Min	137,8	0,3445
4 Min	143,4	0,3585
8 Min	152,6	0,3815
15 Min	167,4	0,4185
30 Min	181,8	0,4545
1 Hs	205,6	0,514
2 Hs	225,8	0,5645
4 Hs	249,8	0,6245
8 Hs	261,8	0,6545
24 Hs	277,8	0,6945



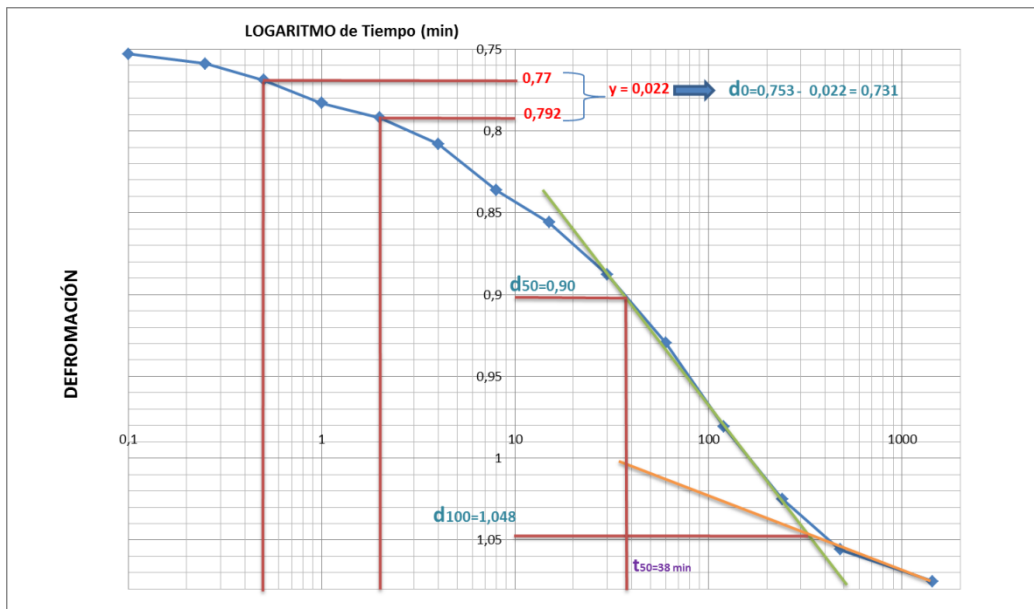
**Figura 92.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de logaritmo de tiempo para el primer día de carga

$$C_v = \frac{0,197 H_{ef}^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times (1,1659)^2}{40} = 0,00670 \left[ \text{cm}^2 / \text{seg} \right]$$

➤ Día 2

**Tabla 42.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 61,80 kPa

Carga (kg): 2	$\Delta P$ (Pa)	61800
TIEMPO (S/M/Hs)	LECTURA (divis)	DEFORM (mm)
6 Seg	301,20	0,753
15 Seg	303,60	0,759
30 Seg	307,56	0,7689
1 Min	313,16	0,7829
2 Min	316,76	0,7919
4 Min	323,16	0,8079
8 Min	334,56	0,8364
15 Min	342,36	0,8559
30 Min	355,16	0,8879
1 Hs	371,76	0,9294
2 Hs	392,36	0,9809
4 Hs	409,96	1,0249
8 Hs	422,36	1,0559
24 Hs	430,12	1,0753



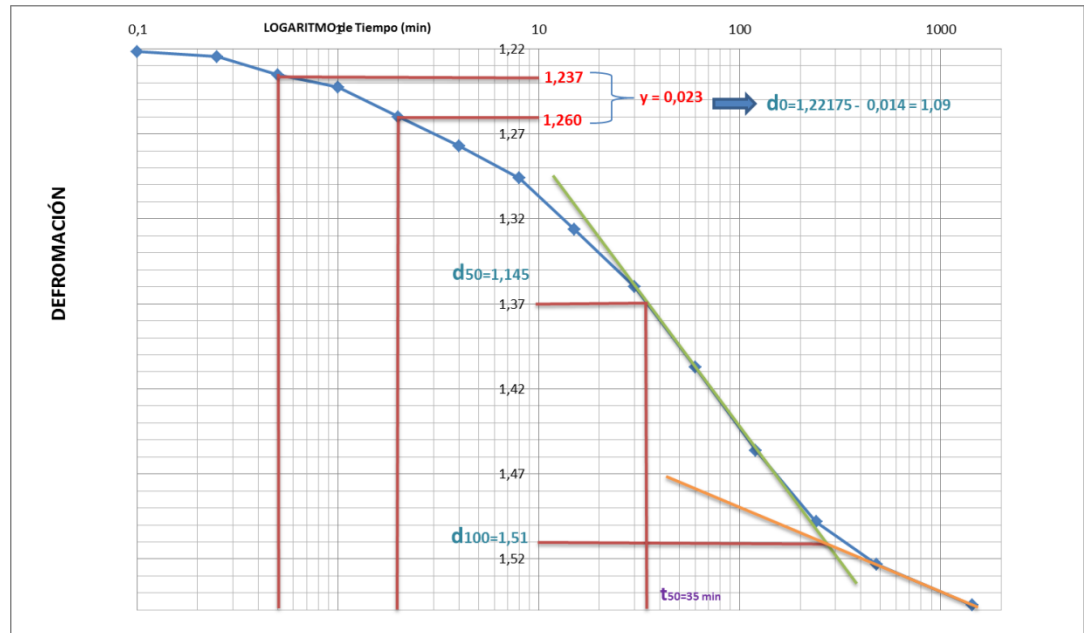
**Figura 93.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el segundo día de carga

$$C_v = \frac{0,197 H_{ef}^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times (1,1440)^2}{38} = 0,00678 \left[ \text{cm}^2 / \text{seg} \right]$$

➤ Día 3

**Tabla 43.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 123,60kPa

Carga (kg): 4		ΔP (Pa)	123600
TIEMPO (S/M/Hs)	LECTURA (divis)	DEFORM (mm)	
6 Seg	488,7	1,22175	
15 Seg	489,9	1,22475	
30 Seg	494,1	1,23525	
1 Min	497,02	1,24255	
2 Min	504,02	1,26005	
4 Min	510,848	1,27712	
8 Min	518,448	1,29612	
15 Min	530,448	1,32612	
30 Min	544,048	1,36012	
1 Hs	562,848	1,40712	
2 Hs	582,448	1,45612	
4 Hs	599,248	1,49812	
8 Hs	609,248	1,52312	
24 Hs	618,848	1,54712	



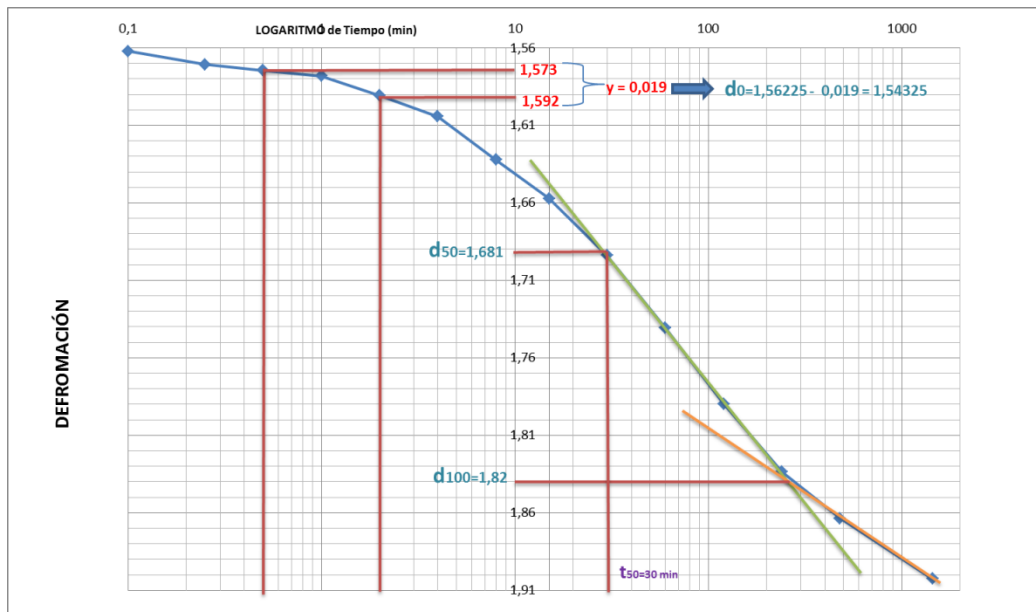
**Figura 94.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el tercer día de carga

$$C_v = \frac{0,197 H_{ef}^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times (1,1318)^2}{35} = 0,00721 \left[ \text{cm}^2 / \text{seg} \right]$$

➤ Día 4

**Tabla 44.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 248,20kPa

Carga (kg): 8 ΔP (Pa)		248200
TIEMPO (S/M/Hs)	LECTURA (divis)	DEFORM (mm)
6 Seg	624,9	1,56225
15 Seg	628,26	1,57065
30 Seg	629,82	1,57455
1 Min	631,3	1,57825
2 Min	636,3	1,59075
4 Min	641,7	1,60425
8 Min	652,9	1,63225
15 Min	662,9	1,65725
30 Min	677,58	1,69395
1 Hs	696,3	1,74075
2 Hs	715,9	1,78975
4 Hs	733,5	1,83375
8 Hs	745,42	1,86355
24 Hs	761,02	1,90255



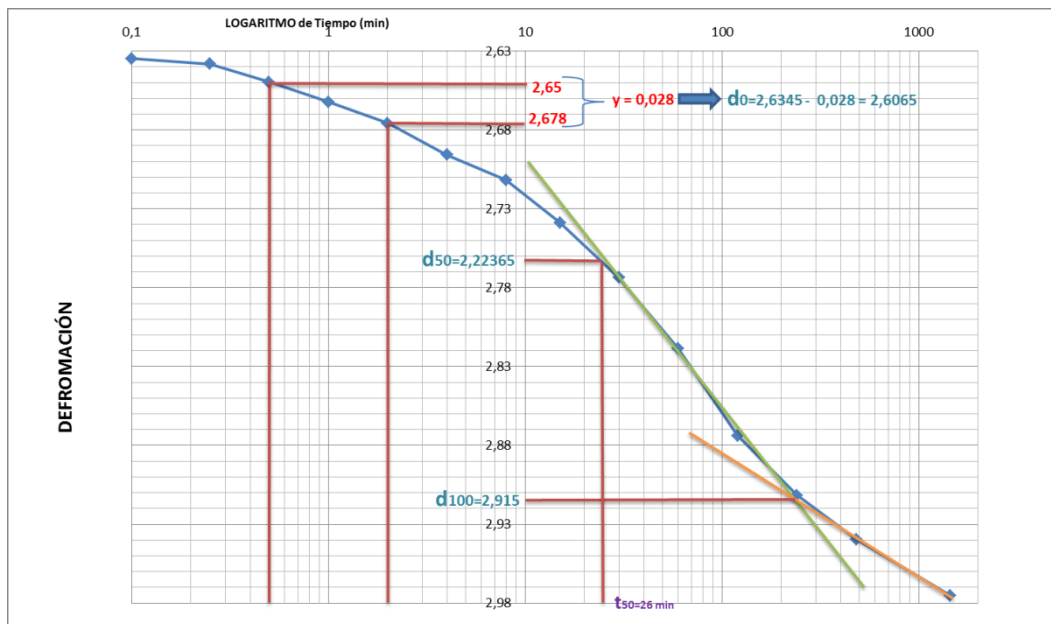
**Figura 95.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el cuarto día de carga

$$C_v = \frac{0,197 H_{ef}^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times (1,1050)^2}{30} = 0,00802 \left[ \frac{cm^2}{seg} \right]$$

➤ Día 5

**Tabla 45.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 495,40kPa

Carga (kg): 16	$\Delta P$ (Pa)	495400
TIEMPO (S/M/Hs)	LECTURA (divis)	DEFORM (mm)
6 Seg	1053,9	2,63475
15 Seg	1055,3	2,63825
30 Seg	1059,9	2,64975
1 Min	1064,9	2,66225
2 Min	1070,3	2,67575
4 Min	1078,3	2,69575
8 Min	1084,7	2,71175
15 Min	1095,5	2,73875
30 Min	1109,5	2,77375
1 Hs	1127,5	2,81875
2 Hs	1149,5	2,87375
4 Hs	1164,7	2,91175
8 Hs	1175,82	2,93955
24 Hs	1190,06	2,97515



**Figura 96.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el quinto día de carga

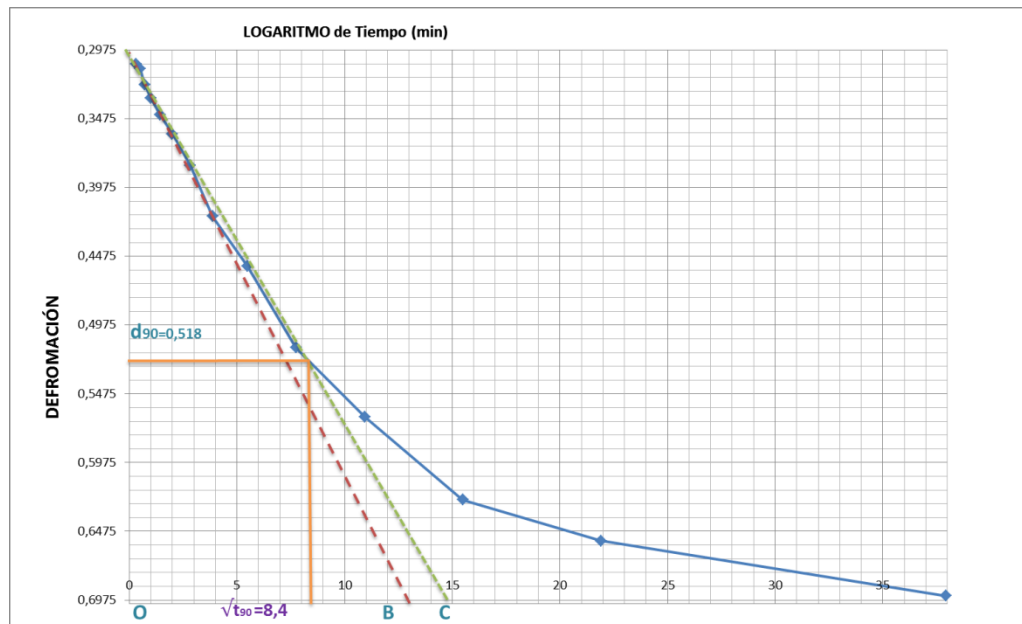
$$C_v = \frac{0,197 H_{ef}^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times (1,0778)^2}{26} = 0,00880 \left[ \text{cm}^2 / \text{seg} \right]$$

## 8.2 MÉTODO DE TAYLOR O RAÍZ CUADRADA DE TIEMPO

➤ Día 1

**Tabla 46.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 30,40kPa

Carga (kg): 1	$\Delta P$ (Pa)	30400
TIEMPO (S/M/Hs)	LECTURA (divis)	DEFORM (mm)
6 Seg	123	0,3075
15 Seg	124,5	0,31125
30 Seg	129	0,3225
1 Min	133	0,3325
2 Min	137,8	0,3445
4 Min	143,4	0,3585
8 Min	152,6	0,3815
15 Min	167,4	0,4185
30 Min	181,8	0,4545
1 Hs	205,6	0,514
2 Hs	225,8	0,5645
4 Hs	249,8	0,6245
8 Hs	261,8	0,6545
24 Hs	277,8	0,6945



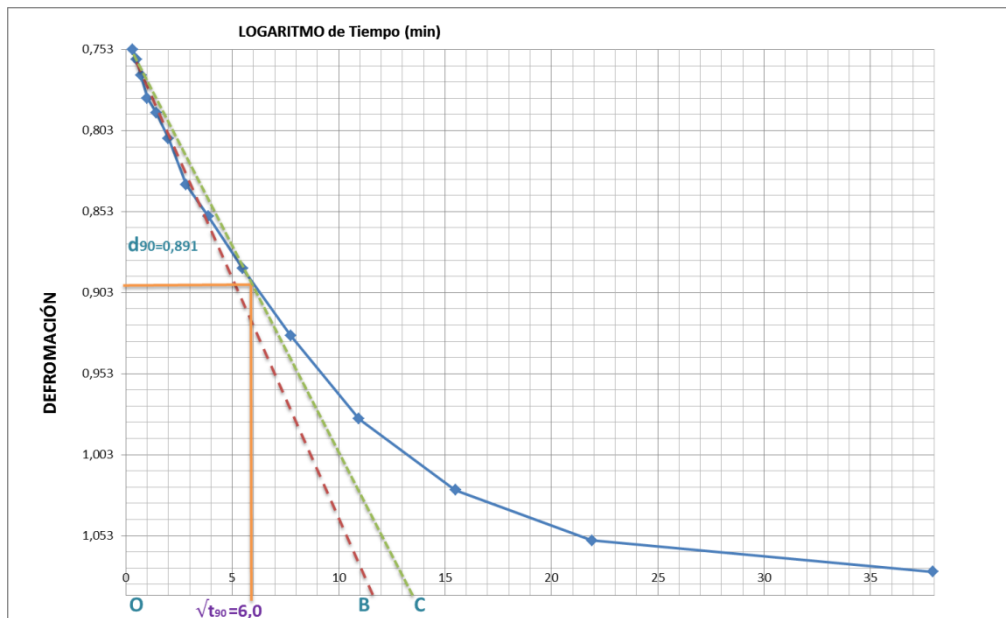
**Figura 97.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el primer día de carga

$$C_v = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times (1,1631)^2}{70,56} = 0,01626 \left[ \text{cm}^2/\text{seg} \right]$$

➤ Día 2

**Tabla 47.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 61,80kPa

Carga (kg): 2		$\Delta P$ (Pa)	61800
TIEMPO (S/M/Hs)	LECTURA (divis)	DEFORM (mm)	
6 Seg	301,20	0,753	
15 Seg	303,60	0,759	
30 Seg	307,56	0,7689	
1 Min	313,16	0,7829	
2 Min	316,76	0,7919	
4 Min	323,16	0,8079	
8 Min	334,56	0,8364	
15 Min	342,36	0,8559	
30 Min	355,16	0,8879	
1 Hs	371,76	0,9294	
2 Hs	392,36	0,9809	
4 Hs	409,96	1,0249	
8 Hs	422,36	1,0559	
24 Hs	430,12	1,0753	



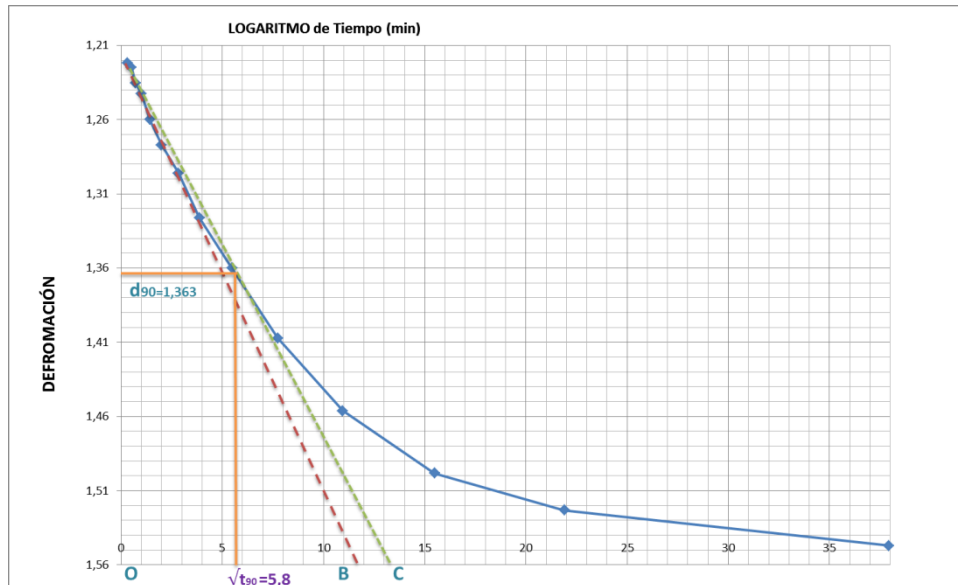
**Figura 98.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el segundo día de carga

$$C_v = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times (1,1445)^2}{36} = 0,03085 \left[ \text{cm}^2/\text{seg} \right]$$

➤ Día 3

**Tabla 48.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 123,60kPa

Carga (kg): 4	$\Delta P$ (Pa)	123600
TIEMPO (S/M/Hs)	LECTURA (divis)	DEFORM (mm)
6 Seg	488,7	1,22175
15 Seg	489,9	1,22475
30 Seg	494,1	1,23525
1 Min	497,02	1,24255
2 Min	504,02	1,26005
4 Min	510,848	1,27712
8 Min	518,448	1,29612
15 Min	530,448	1,32612
30 Min	544,048	1,36012
1 Hs	562,848	1,40712
2 Hs	582,448	1,45612
4 Hs	599,248	1,49812
8 Hs	609,248	1,52312
24 Hs	618,848	1,54712



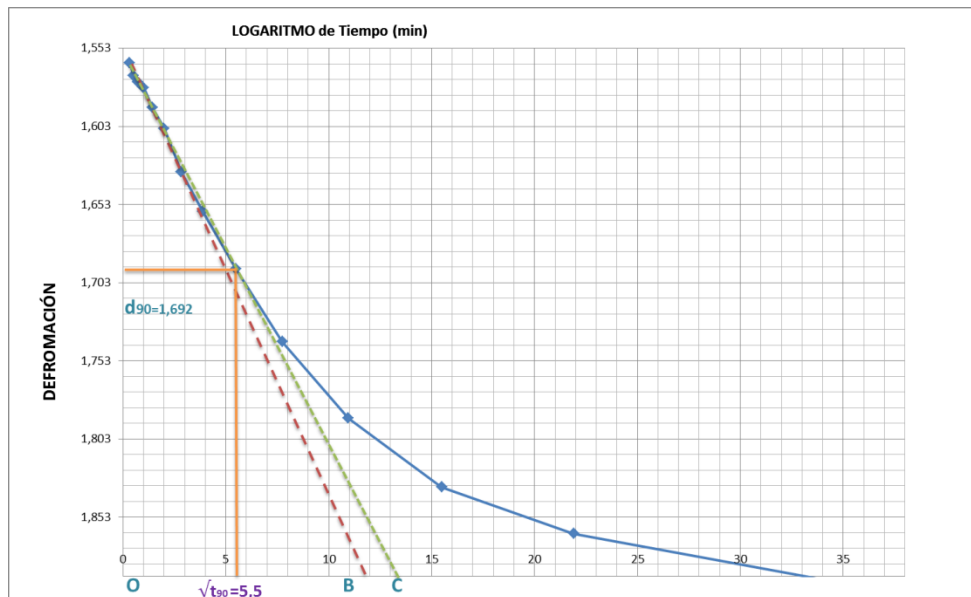
**Figura 99.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el tercer día de carga

$$C_v = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times (1,1209)^2}{33,64} = 0,03167 \left[ \frac{cm^2}{seg} \right]$$

➤ Día 4

**Tabla 49.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 248,20kPa

Carga (kg): 8	$\Delta P$ (Pa)	248200
TIEMPO (S/M/Hs)	LECTURA (divis)	DEFORM (mm)
6 Seg	624,9	1,56225
15 Seg	628,26	1,57065
30 Seg	629,82	1,57455
1 Min	631,3	1,57825
2 Min	636,3	1,59075
4 Min	641,7	1,60425
8 Min	652,9	1,63225
15 Min	662,9	1,65725
30 Min	677,58	1,69395
1 Hs	696,3	1,74075
2 Hs	715,9	1,78975
4 Hs	733,5	1,83375
8 Hs	745,42	1,86355
24 Hs	761,02	1,90255



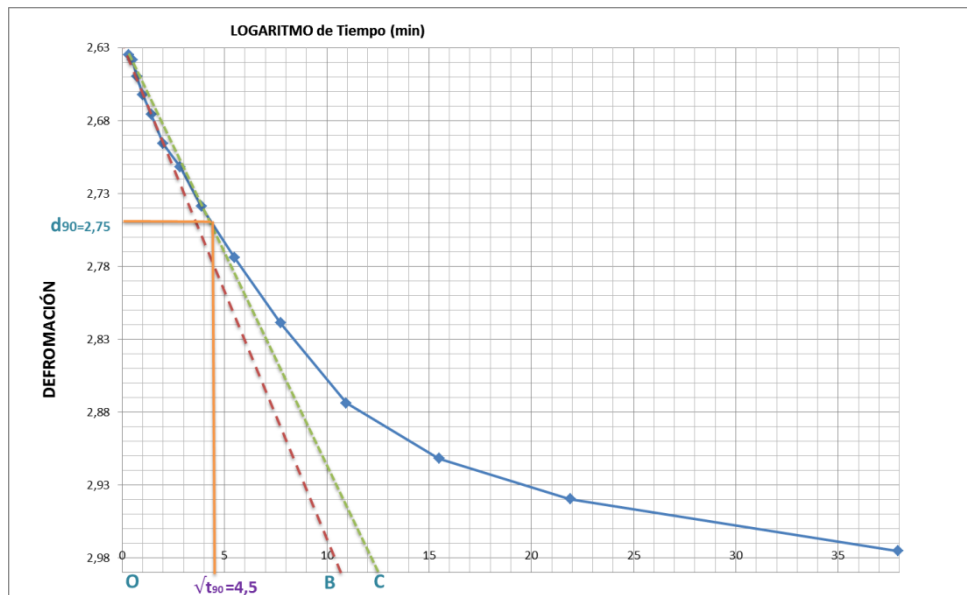
**Figura 100.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el cuarto día de carga

$$C_v = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times (1,1044)^2}{30,25} = 0,03419 \left[ \frac{cm^2}{seg} \right]$$

➤ Día 5

**Tabla 50.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 495,40kPa

Carga (kg): 16	$\Delta P$ (Pa)	495400
TIEMPO (S/M/Hs)	LECTURA (divis)	DEFORM (mm)
6 Seg	1053,9	2,63475
15 Seg	1055,3	2,63825
30 Seg	1059,9	2,64975
1 Min	1064,9	2,66225
2 Min	1070,3	2,67575
4 Min	1078,3	2,69575
8 Min	1084,7	2,71175
15 Min	1095,5	2,73875
30 Min	1109,5	2,77375
1 Hs	1127,5	2,81875
2 Hs	1149,5	2,87375
4 Hs	1164,7	2,91175
8 Hs	1175,82	2,93955
24 Hs	1190,06	2,97515



**Figura 101.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el quinto día de carga

$$C_v = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times (1,0515)^2}{20,25} = 0,04630 \left[ \text{cm}^2/\text{seg} \right]$$

## 9. ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN: MUESTRA N°2

- MUESTRA AL INICIO DEL ENSAYO:

Tabla 51. Datos de la muestra n°2 al inicio del ensayo

DIAM.(mm):	62,77
ALT. (mm)	23,76
AREA (cm <sup>2</sup> ):	30,95
V <sub>m</sub> (cm <sup>3</sup> ):	73,5372
Wanillo (gr):	504,9
Wa+Mh (gr):	622,3
Wmh (gr):	117,4
$\gamma_m$ (gr/cm <sup>3</sup> ):	1,6
$\gamma_s$ (gr/cm <sup>3</sup> ):	2,8

- MUESTRA AL FINAL DEL ENSAYO:

Tabla 52. Datos de la muestra n°1 al final del ensayo

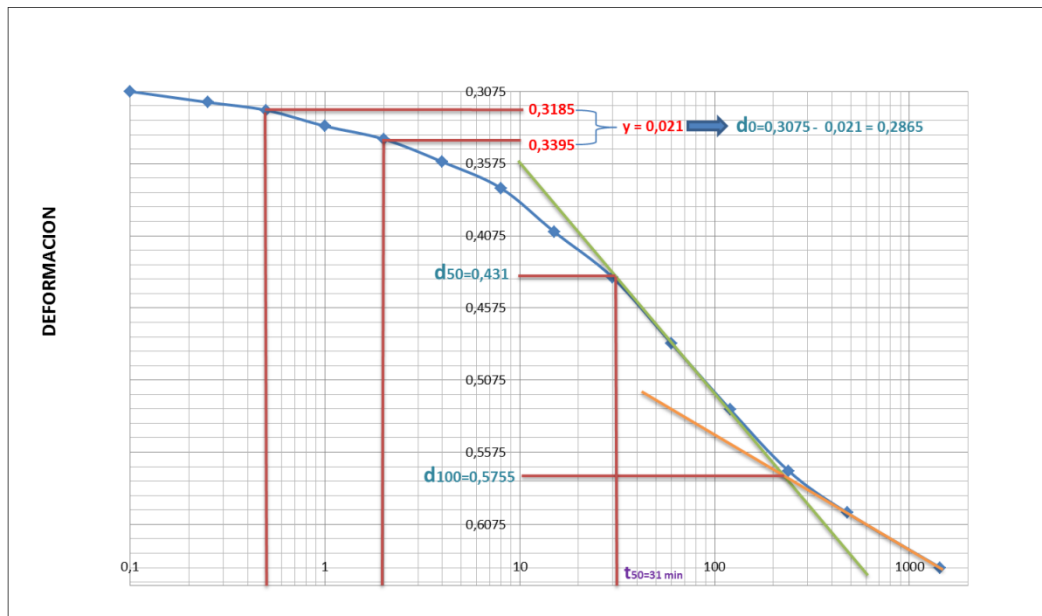
Wa+Mh (gr):	619,2
Wa+Ms (gr):	603,8
Wmh (gr):	114,3
Ws (gr):	98,9
w(%):	16%

### 9.1 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TIEMPO DEFORMACIÓN POR CASAGRANDE

- Día 1

**Tabla 53.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 30,40 kPa

Carga (kg): 1	$\Delta P$ (Pa)	
		30400
TIEMPO (S/M/Hs)	DEFORM (mm)	
6 Seg	0,3075	
15 Seg	0,315	
30 Seg	0,3205	
1 Min	0,3315	
2 Min	0,3405	
4 Min	0,35626	
8 Min	0,3745	
15 Min	0,40475	
30 Min	0,4365	
1 Hs	0,482	
2 Hs	0,52775	
4 Hs	0,5705	
8 Hs	0,5995	
24 Hs	0,6375	



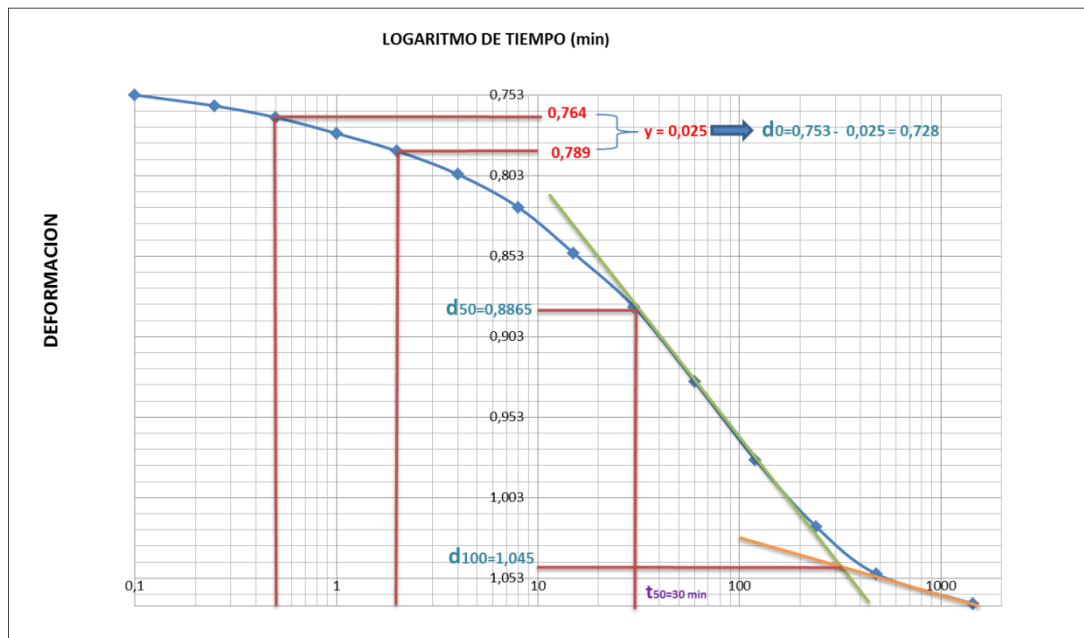
**Figura 102.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de logaritmo de tiempo para el primer día de carga

$$C_v = \frac{0,197 H_{ef}^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times (1,167)^2}{31} = 0,0087 \left[ \text{cm}^2/\text{seg} \right]$$

➤ Día 2

**Tabla 54.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 61,80 kPa

Carga (kg): 2	ΔP (Pa)	61800
TIEMPO (S/M/Hs)	DEFORM (mm)	
6 Seg	0,753	
15 Seg	0,7598	
30 Seg	0,7669	
1 Min	0,7768	
2 Min	0,7878	
4 Min	0,8022	
8 Min	0,8227	
15 Min	0,8511	
30 Min	0,8846	
1 Hs	0,931	
2 Hs	0,9795	
4 Hs	1,0209	
8 Hs	1,0504	
24 Hs	1,0688	



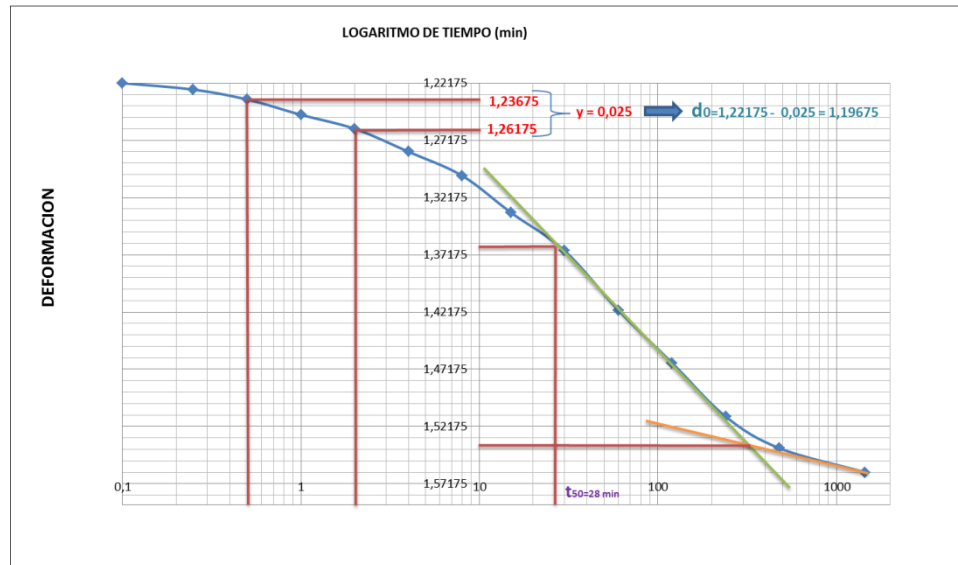
**Figura 103.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el segundo día de carga

$$C_v = \frac{0,197 H_{ef}^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times (1,145)^2}{30} = 0,0086 \left[ \text{cm}^2 / \text{seg} \right]$$

➤ Día 3

**Tabla 55.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 123,60kPa

Carga (kg): 4	ΔP (Pa)	123600
TIEMPO (S/M/Hs)	DEFORM (mm)	
6 Seg	1,22175	
15 Seg	1,22745	
30 Seg	1,2361	
1 Min	1,24945	
2 Min	1,2617	
4 Min	1,2817	
8 Min	1,3027	
15 Min	1,3349	
30 Min	1,36825	
1 Hs	1,4202	
2 Hs	1,4663	
4 Hs	1,5133	
8 Hs	1,5408	
24 Hs	1,56175	



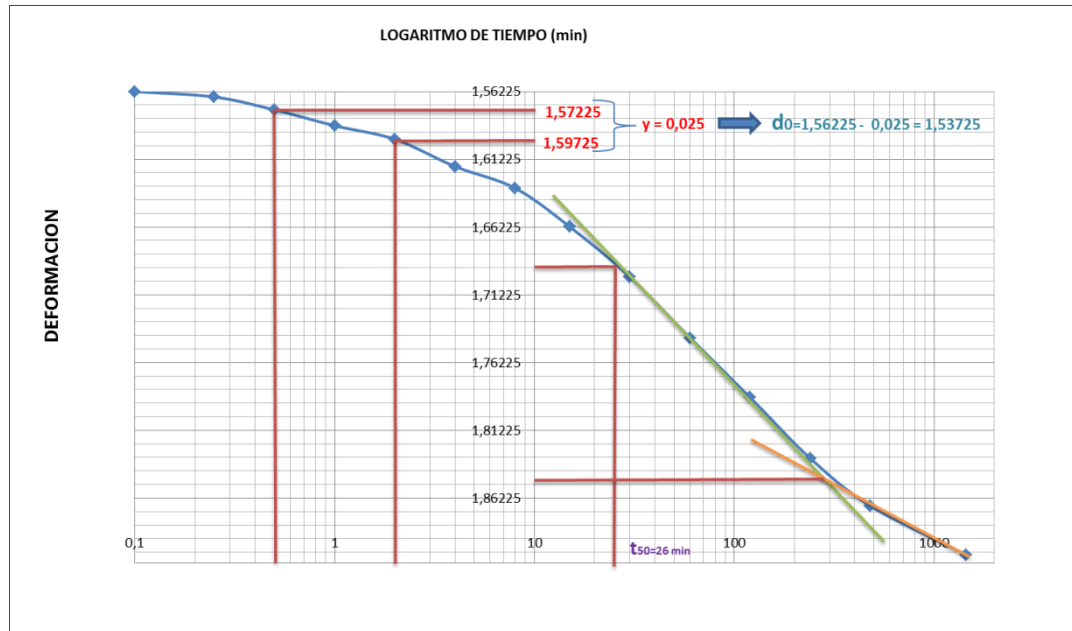
**Figura 104.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el tercer día de carga

$$C_v = \frac{0,197H_{ef}^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times (1,121)^2}{28} = 0,0088 \left[ \text{cm}^2/\text{seg} \right]$$

➤ Día 4

**Tabla 56.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 248,20kPa

Carga (kg): 8	ΔP (Pa)	248200
TIEMPO (S/M/Hs)	DEFORM (mm)	
6 Seg	1,56225	
15 Seg	1,56625	
30 Seg	1,57575	
1 Min	1,58745	
2 Min	1,59745	
4 Min	1,61755	
8 Min	1,63355	
15 Min	1,66205	
30 Min	1,69905	
1 Hs	1,74405	
2 Hs	1,78805	
4 Hs	1,83305	
8 Hs	1,86805	
24 Hs	1,90405	



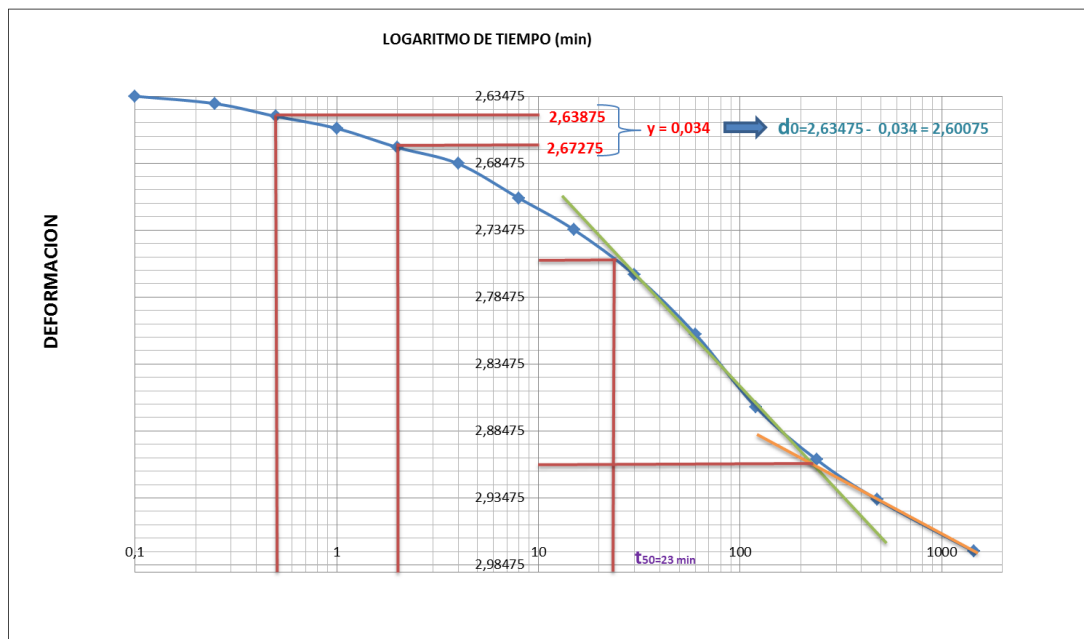
**Figura 105.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el cuarto día de carga

$$C_v = \frac{0,197H_{ef}^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times (1,104)^2}{26} = 0,0092 \left[ \text{cm}^2/\text{seg} \right]$$

➤ Día 5

**Tabla 57.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 495,40kPa

Carga (kg): 16	ΔP (Pa)	495400
TIEMPO (S/M/Hs)	DEFORM (mm)	
6 Seg	2,63475	
15 Seg	2,64035	
30 Seg	2,64985	
1 Min	2,65875	
2 Min	2,67305	
4 Min	2,68515	
8 Min	2,7109	
15 Min	2,7345	
30 Min	2,7683	
1 Hs	2,8124	
2 Hs	2,86715	
4 Hs	2,90625	
8 Hs	2,93605	
24 Hs	2,97465	



**Figura 106.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo de tiempo para el quinto día de carga

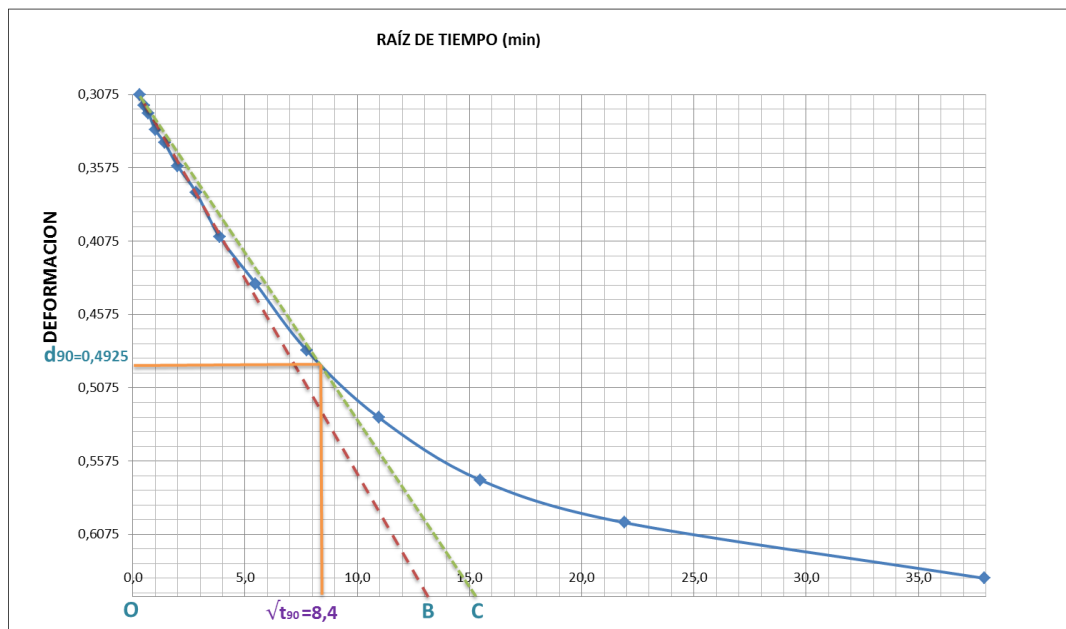
$$C_v = \frac{0,197H_{ef}^2}{t_{50}} = \frac{0,197 \times (1,051)^2}{23} = 0,0095 \left[ \text{cm}^2/\text{seg} \right]$$

## 9.2 MÉTODO DE TAYLOR O RAÍZ CUADRADA DE TIEMPO

➤ Día 1

**Tabla 58.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 30,40kPa

Carga (kg): 1	$\Delta P$ (Pa)	30400
TIEMPO (S/M/Hs)	DEFORM (mm)	
6 Seg	0,3075	
15 Seg	0,315	
30 Seg	0,3205	
1 Min	0,3315	
2 Min	0,3405	
4 Min	0,35626	
8 Min	0,3745	
15 Min	0,40475	
30 Min	0,4365	
1 Hs	0,482	
2 Hs	0,52775	
4 Hs	0,5705	
8 Hs	0,5995	
24 Hs	0,6375	



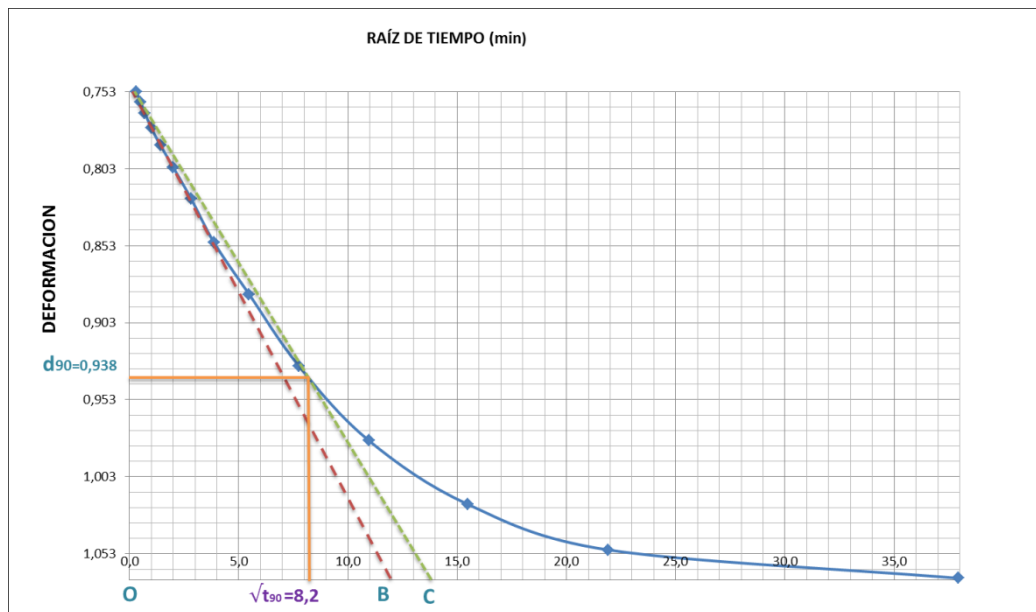
**Figura 107.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el primer día de carga

$$C_v = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times (1,1644)^2}{70,56} = 0,0163 \left[ \frac{cm^2}{seg} \right]$$

➤ Día 2

**Tabla 59.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 61,80kPa

Carga (kg): 2	$\Delta P$ (Pa)	61800
TIEMPO (S/M/Hs)	DEFORM (mm)	
6 Seg	0,753	
15 Seg	0,7598	
30 Seg	0,7669	
1 Min	0,7768	
2 Min	0,7878	
4 Min	0,8022	
8 Min	0,8227	
15 Min	0,8511	
30 Min	0,8846	
1 Hs	0,931	
2 Hs	0,9795	
4 Hs	1,0209	
8 Hs	1,0504	
24 Hs	1,0688	



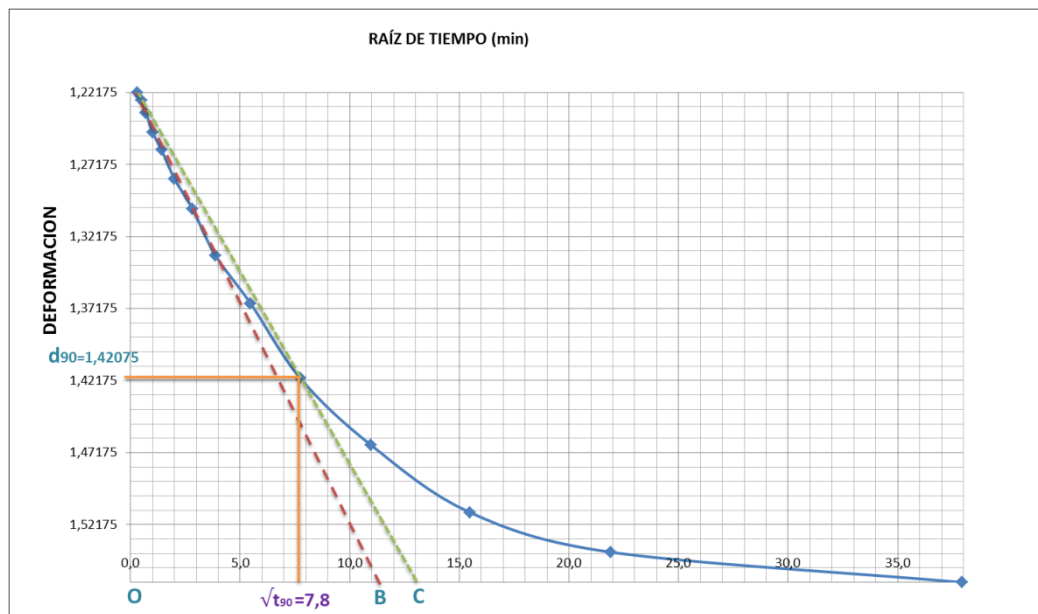
**Figura 108.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el segundo día de carga

$$C_v = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times (1,1421)^2}{67,24} = 0,0165 \left[ \frac{cm^2}{seg} \right]$$

➤ Día 3

**Tabla 60.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 123,60kPa

Carga (kg): 4	ΔP (Pa)	123600
TIEMPO (S/M/Hs)	DEFORM (mm)	
6 Seg	1,22175	
15 Seg	1,22745	
30 Seg	1,2361	
1 Min	1,24945	
2 Min	1,2617	
4 Min	1,2817	
8 Min	1,3027	
15 Min	1,3349	
30 Min	1,36825	
1 Hs	1,4202	
2 Hs	1,4663	
4 Hs	1,5133	
8 Hs	1,5408	
24 Hs	1,56175	



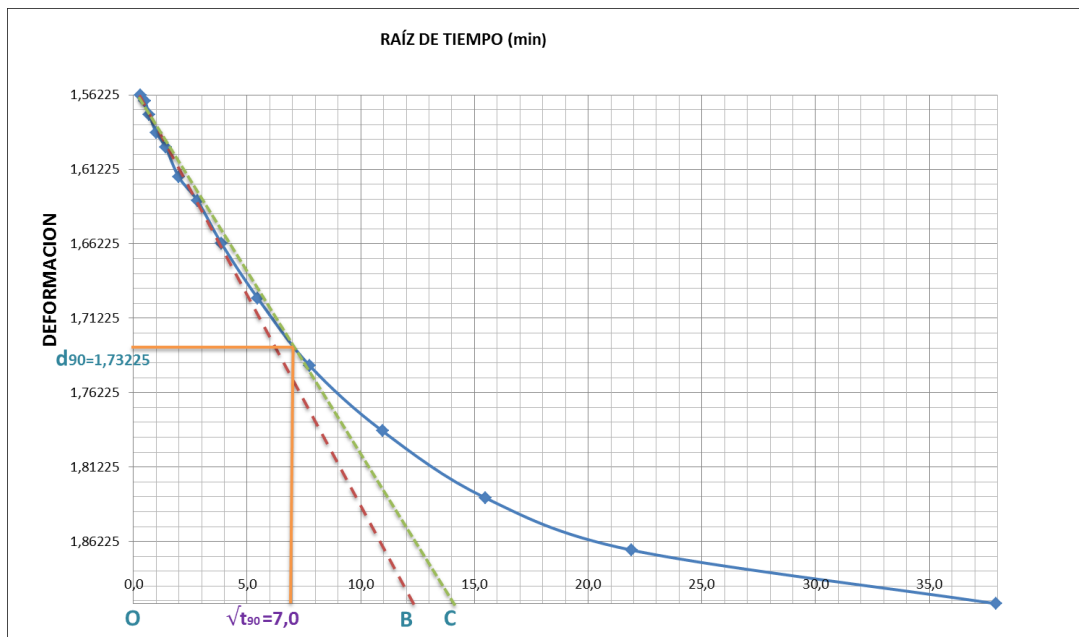
**Figura 109.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el tercer día de carga

$$C_v = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times (1,1180)^2}{60,84} = 0,0174 \left[ \text{cm}^2/\text{seg} \right]$$

➤ Día 4

**Tabla 61.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 248,20kPa

Carga (kg): 8	$\Delta P$ (Pa)	248200
TIEMPO (S/M/Hs)	DEFORM (mm)	
6 Seg	1,56225	
15 Seg	1,56625	
30 Seg	1,57575	
1 Min	1,58745	
2 Min	1,59745	
4 Min	1,61755	
8 Min	1,63355	
15 Min	1,66205	
30 Min	1,69905	
1 Hs	1,74405	
2 Hs	1,78805	
4 Hs	1,83305	
8 Hs	1,86805	
24 Hs	1,90405	



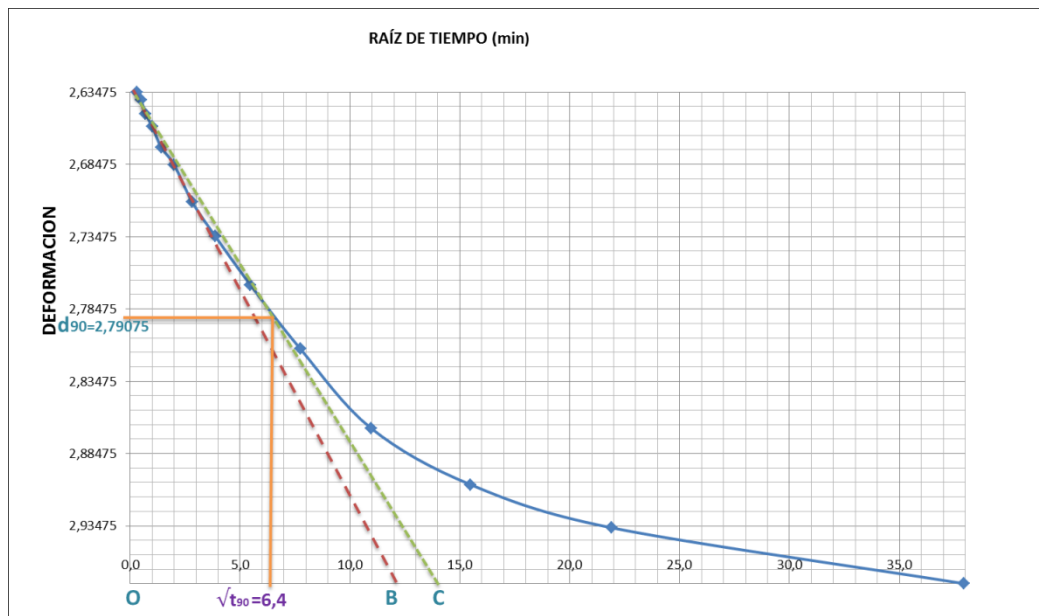
**Figura 110.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el cuarto día de carga

$$C_v = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times (1,1024)^2}{49} = 0,0210 \left[ \text{cm}^2/\text{seg} \right]$$

➤ Día 5

**Tabla 62.** Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 495,40kPa

Carga (kg): 16	ΔP (Pa)	495400
TIEMPO (S/M/Hs)	DEFORM (mm)	
6 Seg	2,63475	
15 Seg	2,64035	
30 Seg	2,64985	
1 Min	2,65875	
2 Min	2,67305	
4 Min	2,68515	
8 Min	2,7109	
15 Min	2,7345	
30 Min	2,7683	
1 Hs	2,8124	
2 Hs	2,86715	
4 Hs	2,90625	
8 Hs	2,93605	
24 Hs	2,97465	



**Figura 111.** Determinación del coeficiente de consolidación por el método de raíz cuadrada de tiempo para el quinto día de carga

$$C_v = \frac{0,848H_{ef}^2}{t_{90}} = \frac{0,848 \times (1,0495)^2}{40,96} = 0,0228 \left[ \text{cm}^2/\text{seg} \right]$$

## ANEXO E. PROCEDIMIENTO DETERMINACIÓN $C_v$ DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TIEMPO DEFORMACIÓN

A partir de los datos de tiempo-deformación registrados durante cada una de las etapas de carga, es posible determinar el coeficiente de consolidación,  $C_v$ , para cada uno de los incrementos de carga.

Dos son los procedimientos de mayor aplicación para este propósito, el método del logaritmo de tiempo y el método de la raíz cuadrada del tiempo.

### 1.1 MÉTODO DE CASAGRANDE O MÉTODO DEL LOGARITMO DEL TIEMPO

Para determinar la carga de Pre consolidación, utilizamos un método gráfico empírico propuesto por el Prof. Casagrande que consiste en:

- Extender la porción de línea recta de la consolidación primaria y secundaria, hasta que se intercepten en el punto A. La ordenada de A es representada por  $d_{100}$ , esto es, la deformación en el 100% de consolidación primaria.
- La porción de curva inicial del gráfico deformación vs.  $\log t$  es aproximadamente una parábola en la escala natural. Seleccionando tiempos  $t_1$  y  $t_2$  sobre la porción curva de tal forma que  $t_2 = 4t_1$ . Hacer que la diferencia de deformación de la muestra durante el tiempo  $(t_2 - t_1)$  sea igual a  $x$ .
- Dibujar una línea horizontal **DE** tal que la distancia vertical **BD** sea igual a  $x$ . La deformación correspondiente a la línea **DE** es igual a  $d_0$  (esto es, la deformación al 0 % de consolidación).
- La ordenada del punto **F** sobre la curva de consolidación representa la deformación al 50% de consolidación primaria, y la abscisa representa el tiempo correspondiente ( $t_{50}$ ).
- Para 50 % de grado de consolidación promedio  $T_{50} = 0.197$ .

$$T_{50} = \frac{C_v t_{50}}{H_{ef}^2} \quad \text{ó} \quad C_v = \frac{0,197 H_{ef}^2}{t_{50}}$$

Donde

$H_{dr}$  = Es la trayectoria más larga de drenaje promedio durante el proceso de consolidación.

Para muestras drenadas en la parte superior y en el fondo,  $H_{ef}$  es igual a la mitad de la altura promedio de la muestra durante la consolidación. Para muestras drenadas solamente sobre un lado,  $H_{ef}$  es igual a la altura efectiva de la muestra durante la consolidación.

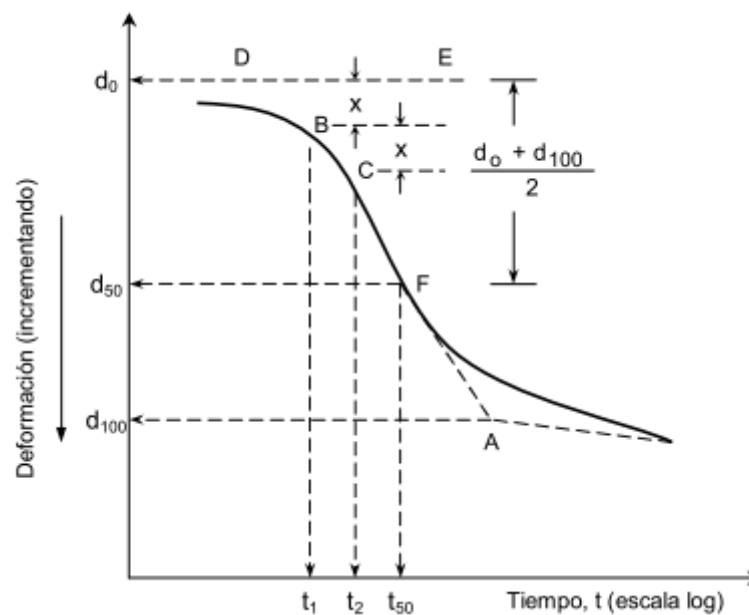


Figura 112. Método de Logaritmo del Tiempo para determinar el coeficiente de consolidación

## 1.2 MÉTODO DE TAYLOR O RAÍZ CUADRADA DE TIEMPO

En este método, se realiza un gráfico deformación vs. raíz cuadrada de tiempo para una carga incremental según se muestra en la siguiente figura. Se requieren también las siguientes construcciones gráficas:

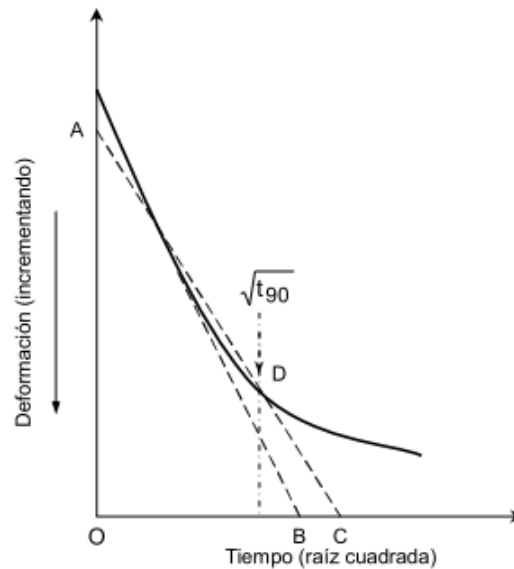
- Dibujar una línea **AB** a través de la porción inicial de la curva.

- Dibujar una línea **AC** de tal forma que **OC = 1.15 OB**. La abscisa del punto **D**, la cual es la intersección de **AC** y la curva de consolidación, nos da la raíz cuadrada de tiempo correspondiente al **90 %** de consolidación ( $t_{90}$ ).
- Para 90 % de la consolidación,  **$T_{90} = 0.848$**

$$T_{50} = \frac{C_v t_{90}}{H_{dr}^2} \quad \text{ó} \quad C_v = \frac{0,848 H_{dr}^2}{t_{90}}$$

Dónde:

$H_{dr}$ = Se determina similar que para el método de logaritmo de tiempo- Es la trayectoria más larga de drenaje promedio durante el proceso de consolidación.



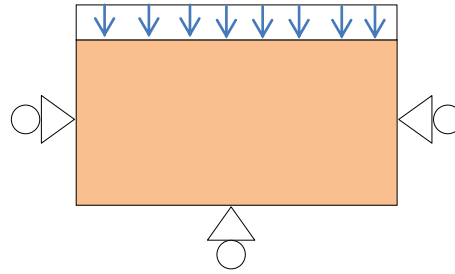
**Figura 113.** Método de La raíz cuadrada de para determinar el coeficiente de consolidación

## ANEXO F. INTERVALOS DE TIEMPO

### INTERVALOS DE CARGA Y TIEMPOS TENIDOS EN CUENTA EN EL MODELAMIENTO

- Creamos un intervalo de tiempo para la etapa inicial de equilibrio.

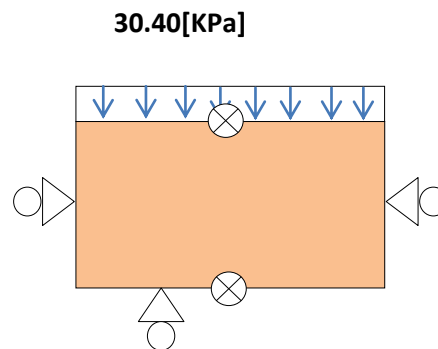
**t = 0 - 10 (minutos)**



**Figura 114.** Etapa de equilibrio (1)

- Asignamos las condiciones de flujo y un intervalo de tiempo correspondiente a las 24 horas de un día de carga.

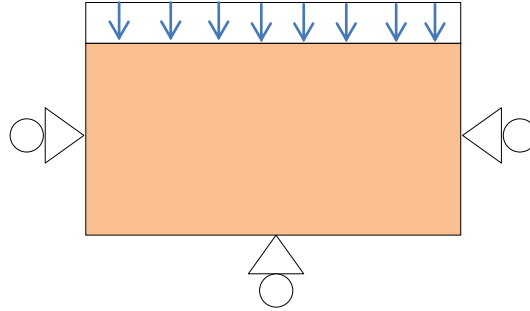
**t = 10 - 1450 (minutos)**



**Figura 115.** Aplicación de carga (1)

- Creamos un nuevo intervalo incluyendo los datos de la anterior condición, como los iniciales para esta fase, simulando nuevamente un equilibrio de 5 minutos.

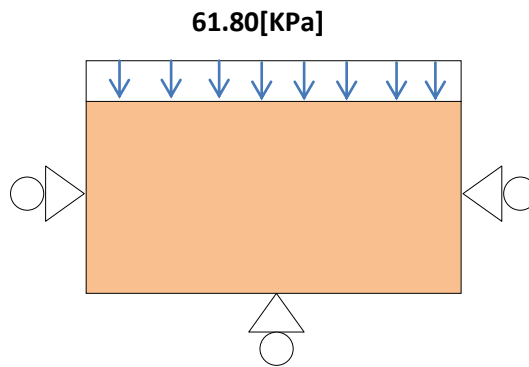
**t = 1450 - 1455 (minutos)**



**Figura 116.** Etapa de equilibrio (2)

- Nuevamente generamos las condiciones de flujo relacionadas al incremento de carga, y a su vez el nuevo intervalo de tiempo que incluirá como en la fase anterior 24 horas.

**t = 1455 - 2985 (minutos)**



**Figura 117.** Aplicación de carga (2)

**Nota:** Repetimos el mismo procedimiento, formando nuevos intervalos de tiempo cada vez que incrementemos la carga, teniendo en cuenta el estado de equilibrio al que siempre le asignamos un rango de 5 minutos.