

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



TRABAJO DE DISERTACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO CIVIL

TEMA:

ADAPTACIÓN DE UN MEDIDOR DE PRESIÓN ELECTRÓNICO  
COMERCIAL EN UN PROTOTIPO DE EDÓMETRO BASADO EN LA  
NORMA ASTM D2435 Y VERIFICACIÓN DE SU EFECTIVIDAD  
DURANTE EL ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN SOBRE UNA MUESTRA  
PATRÓN

AUTORES:

MARIELA ALEXANDRA ANAGUANO MARCILLO

DAVID ALEJANDRO ARCOS CARRIÓN

DIRECTOR:

ING. GUILLERMO REALPE, MSc.

QUITO DM, JUNIO DE 2022

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

---

### DECLARACIÓN

Certifico que entiendo el certificado de plagio y que la investigación presentada es mi propio trabajo, excepto donde específicamente se indique lo contrario. Al firmar este documento, estoy de acuerdo en que este trabajo puede ser sometido a una prueba electrónica de plagio en cualquier momento y ofreceré una versión adicional de este trabajo en un formato apropiado cuando se solicite.

**Nombre:** Mariela Alexandra Anaguano Marcillo **ID:** 1722379540 **Firma:**



**Nombre:** David Alejandro Arcos Carrión **ID:** 1717493660 **Firma:**



## **“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

---

### **AGRADECIMIENTOS**

*A mis padres, Nancy Marcillo y Mario Anaguano, por el esfuerzo, la paciencia y el apoyo. Sobre todo, a mi madre, por corregir mis malas acciones e impulsarme a conseguir mis metas y sueños, por consolarme y cuidarme de mi misma en todos mis malos momentos, gracias a ella he llegado a ser todo lo que soy.*

*A mi hermana, Jennyfer Anaguano, por las desveladas, las risas, los llantos, las peleas y el apoyo incondicional frente a todos los momentos buenos y malos de mi vida.*

*A David, Verónica y Efendy por abrirme las puertas de su hogar, de su corazón y por ser un apoyo y ejemplo para mi crecimiento personal, profesional. A mi abuelita, Isabel, por sus oraciones que lograron otorgarme la fuerza y la fe necesaria para culminar esta etapa de mi vida.*

*A mis tíos, Rolando, Elena y su familia por estar pendientes de mí y estar presentes en mis buenos y malos momentos.*

*Al Laboratorio de Materiales de Construcción – PUCE, por darme la oportunidad de demostrarme a mí misma de lo que soy capaz y por contribuir a mi crecimiento personal y profesional. A José Morán, por ser mi amigo, consejero, maestro y guía en el laboratorio. Al personal del laboratorio, Patricio, Wilson, “Gabica”, Jhovanny, Freddy, por su amistad y conocimiento impartido para mi crecimiento profesional.*

*Al tiempo, ayuda y apoyo de los ingenieros, Jorge Albuja, Andrés Muñoz, Juan Carlos Montero y Sebastián Morales.*

*A mi director de tesis, Ing. Guillermo Realpe, por las oportunidades, el apoyo y sobre todo por ser un ejemplo de que sí se puede ser un excelente profesional y persona, por ayudarme a encontrar el camino y el amor por la Mecánica de Suelos y la Geotecnia.*

*A mis amigos, Christopher Capelo, Omar Encalada, Iván Paredes, Jossue Camacho, Ariel Beltrán, Didi Povea, Alejandra Chauca, Jorge Martínez, Jorge Rea, por su apoyo, motivación incondicional, pero sobre todo por su amistad.*

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

---

*A mi mejor amigo, Paúl Molina, por ser esa persona con la que pude contar desde el primer día que pisé la universidad, por ser ese ángel que estuvo y está para mí en los buenos, malos y sobre todo los peores momentos de mi vida desde que lo conocí.*

*A David, por todas las experiencias compartidas, el amor, el apoyo, la felicidad, las risas, la tristeza y el llanto. Gracias totales.*

***Atentamente: Mariela Alexandra Anaguano Marcillo***

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

---

*A mis padres por darme todo por mí, por enseñarme el camino, apoyarme en las oportunidades de la vida, y prepararme para enfrentar todas las adversidades.*

*A mi hermano, por siempre estar ahí para darme una sonrisa y apoyarme en todo lo que hago.*

*A mi tío Fabrizio por ser siempre ese buen consejero que necesitaba en todo momento*

*A mi amigo Ivan por ser fiel capitán de mis locuras y felicidades, de mi ira y mi tristeza, por ser más que un amigo, mi hermano.*

*A mis amigos Anthony, Dominique, Melanie, Lizeth y Galo, por convertirse en mi segunda familia y segundo hogar.*

*A toda mi familia por siempre apoyarme.*

*A Mari, por toda la felicidad y las experiencias. Por todo el tiempo y las oportunidades.*

***Atentamente: David Arcos Carrión***

## **DEDICATORIA**

*¡A todos los ángeles que tengo en el cielo!*

*A mis abuelos, María Margarita Pinto (+) y Segundo Luis Marcillo (+), quienes desde allí arriba, sé que están felices y orgullosos. Esto es de ustedes y para ustedes... Quizás la vida fue cruel por alejarlos de mi lado poco a poco... A mis 14 años cuando no alcancé a dedicarles un logro como tal y a mis 17 años cuando no era consciente de todo lo que era capaz. Sin embargo, desde aquel 10 de enero del 2013, he vivido para conseguir cosas que los hagan ser felices y los hagan saltar de júbilo.*

*A mi mascota y hermana, Candy (+), quien se fue hace no mucho tiempo y dejó un vacío muy grande en mi corazón, fuiste el último recuerdo de mis abuelos... Esto es para ti, por todos los años de felicidad y amor infinito que me brindaste mientras estabas a mi lado, por la fortaleza y valentía en los últimos días de tu vida. Pero sobre todo por tu don de escuchar y mover la colita cuando me sentía triste o quería rendirme. La vida también fue cruel, porque no alcancé a compartir esto contigo. Sin embargo, sé que estas mejor y que donde sea que estés me miras y me mueves tu colita como el primer día que llegaste a mi vida, hasta el último día en que te fuiste...*

*A su memoria dedicaré este y muchas cosas más.*

***Atentamente: Mariela Alexandra Anaguano Marcillo***

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

---

*Este trabajo va dedicado a aquellos que no pudieron estar presentes para verme conseguir este logro. A mi abuelito Hugo quien me enseñó de muy pequeño a amar los estudios y que el tiempo es lo más valioso que tenemos. A mis abuelitas Marcela y Matilde, porque sé que estarían orgullosas de ver lo que he logrado y de ver en lo que me he convertido.*

*A mi padre, por enseñarme el camino siempre. Cada día contigo es una nueva lección y estoy agradecido por lo que has logrado. Has moldeado a alguien bueno y nunca me alcanzará para pagarte todo el esfuerzo que has puesto para darme todo.*

*A mi madre, por enseñarme a abrir mi corazón, a siempre ayudar a las personas sin esperar nada a cambio. Por darme un amor ilimitado que solo una madre puede dar. Por trabajar diariamente por darme todo.*

*Los quiero Hugo y Karina*

***Atentamente: David Arcos Carrión***

## **RESUMEN**

La teoría de consolidación de Terzaghi se basa en la relación de la variación volumétrica de una muestra y su disipación de presión de los poros saturados en el tiempo, esto como consecuencia de la aplicación de un incremento de esfuerzo. En la práctica, este fenómeno es observado a través del ensayo de consolidación unidimensional, definido por la normativa ASTM D2435, mediante su variación de deformación en el tiempo. Diversos autores han generado diferentes métodos de cálculo fundamentados en la determinación de una disipación de presión promedio, calculada a través de la mensuración de su deformabilidad. No obstante, el análisis de la presión de poros es el que realmente describe el comportamiento real de la consolidación en el tiempo, y es el único mecanismo a través del cual se pueden plantear comparativas viables (Olek, 2020). Es por eso por lo que se ha planteado el diseño de un prototipo de edómetro orientado a la lectura simultánea de la deformación y disipación de presión fundamentada en la normativa de ensayo y en un modelo teórico (Head, 1994). Este dispositivo será puesto a prueba para una probeta normalizada con la finalidad de generar, dentro de lo posible, resultados alejados de la influencia de variables dentro del procedimiento de elaboración de la muestra.

**Palabras clave:** Consolidación, presión de poros, deformación, prototipo, probeta normalizada

## **ABSTRACT**

Terzaghi's consolidation theory insinuates that water pore pressure dissipation throughout time is related to specimen's volumetric variation and the applied load increment. On practice, this phenomenon is observed through a One-dimensional Consolidation Test, defined by Standard test method ASTM D2435, in which the strain variation is measured. Many authors had established calculation methods based on average pore pressure dissipation obtained through deformation data. However, only the pore dissipation analysis can describe the real consolidation behavior, being the most reliable parameter to generate a viable comparison (Olek, 2020). For this reason, a prototype design aiming to a simultaneous measurement of strain and water pore pressure is established. This device, which complies with both the ASTM regulations and a theoretical model (Head, 1994), will be tested with a normalized specimen in order to create reliable test results, uninfluenced by variables within the sample preparation procedure.

**Key words:** Consolidation, pore pressure, strain, prototype, normalized specimen

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Modelo trifásico. Fundamentos de ingeniería geotécnica. (p. 50). Das, 2015, México D.F.: CENGAGE Learning Editores S.A. ....	5
Figura 2.2. Modelo bifásico. Fundamentos de ingeniería geotécnica. (p. 56). Das, 2015, México D.F.: CENGAGE Learning Editores S.A. ....	6
Figura 2.3. Isócronas para la condición de drenaje en dos direcciones. Elaboración propia..	16
Figura 2.4. Isócronas para la condición de drenaje en una sola dirección. Elaboración propia. ....	17
Figura 2.5. Definición del coeficiente de consolidación secundaria. Fundamentos de ingeniería geotécnica. (p. 202). Das, 2015, México D.F.: CENGAGE Learning Editores S.A. ....	17
Figura 2.6. Método de Casagrande para determinar el coeficiente de consolidación $c_v$ . Fundamentos de ingeniería geotécnica. (p.210). Das, 2015, México D.F.: CENGAGE Learning Editores S.A. ....	19
Figura 2.7. Método de Taylor para determinar el coeficiente de consolidación $c_v$ . Fundamentos de ingeniería geotécnica. (p. 211). Das, 2015, México D.F.: CENGAGE Learning Editores S.A. ....	20
Figura 2.8. Isócronas de la metodología de Stanichevsky. Elaboración propia. ....	21
Figura 3.1. Método simple para la medición de presión de poros utilizando un tubo de capilaridad. En Manual of soil laboratory testing, volume 2. Permeability, shear strength and compressibility tests. (p. 417), por Head, 1994, New York – Toronto: JOHN & SONS, INC. ....	22
Figura 3.2. Captura de pantalla del DS7.1 .....	24
Figura 3.3. Edómetro de 2.5 pulgadas distribuido por ELE International. En “Consolidation Cell Complete 2.5 Inch Diameter Sample. Inc. Porous Discs and Cutting Ring”, por ELE International, 2022, <a href="https://www.ele.com/product/consolidation-cell-complete-2-5-inch-diameter-sample-inc-porous-discs-and-cutting-ring-/656">https://www.ele.com/product/consolidation-cell-complete-2-5-inch-diameter-sample-inc-porous-discs-and-cutting-ring-/656</a> .....	25
Figura 3.4. Plano de diseño del consolidómetro. Corte 1-1. Vista de la base en corte 1-1. Elaboración propia. ....	26
Figura 3.5. Plano de diseño del consolidómetro. Corte 2-2. Vista de la base en corte 2-2. Elaboración propia. ....	27
Figura 3.6. Plano de diseño del consolidómetro. Vista en corte y planta del anillo pieza inferior. Elaboración propia .....	28

Figura 3.7. Plano de diseño del consolidómetro. Vista en corte y planta del anillo pieza superior. Elaboración propia.....	29
Figura 3.8. Plano de diseño del consolidómetro. Vista en corte y planta de la pieza de carga. Elaboración propia. ....	30
Figura 3.9. Plano de diseño del consolidómetro. Vista en planta del equipo armado. Elaboración propia. ....	31
Figura 3.10. Plano de diseño del consolidómetro. Vista en planta de la pantalla de duralón. Elaboración propia. ....	32
Figura 3.11. Piezas constituidas de bronce dulce. ....	33
Figura 3.12. Piezas constituidas de duralón.....	34
Figura 3.13. Disco de acrílico. ....	34
Figura 3.14. Piedras porosas. ....	35
Figura 3.15. Ubicación de los o'rings en la base de la cámara. ....	35
Figura 3.16. Bloque de desaireación.....	36
Figura 3.17. Transductor de presión. ....	36
Figura 4.1. Esquema de preparación de la muestra por decantación. Elaboración propia. ....	47
Figura 4.2. Gráfica para la determinación del LL (1). ....	48
Figura 4.3. Gráfica para la determinación del LL (2). ....	49
Figura 4.4. Gráfica para la determinación del LL (3). ....	50
Figura 4.5. Descripción según la Carta de Plasticidad (1). ....	51
Figura 4.6. Descripción según la Carta de Plasticidad (2). ....	52
Figura 4.7. Descripción según la Carta de Plasticidad (3). ....	53
Figura 4.8. Curva granulométrica por hidrometría (1). ....	56
Figura 4.9. Curva granulométrica por hidrometría (2). ....	57
Figura 4.10. Curva granulométrica por hidrometría (3). ....	58
Figura 4.11. Curvas granulométricas por hidrometría en conjunto. ....	59
Figura 4.12. Curva de granulometría por hidrómetro con agente dispersante (1). ....	61
Figura 4.13. Curva de granulometría por hidrómetro sin agente dispersante (1). ....	62
Figura 4.14. Curva de granulometría por hidrómetro con agente dispersante (2). ....	63
Figura 4.15. Curva de granulometría por hidrómetro sin agente dispersante (2). ....	64
Figura 4.16. Curva de granulometría por hidrómetro con agente dispersante (3). ....	65
Figura 4.17. Curva de granulometría por hidrómetro sin agente dispersante (3). ....	66
Figura 4.18. Hidrometrías en conjunto con agente dispersante. ....	66

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

---

Figura 4.19. Hidrometrías en conjunto sin agente dispersante. ....	67
Figura 5.1. Batidora empleada durante el proceso de mezcla.....	71
Figura 5.2. Colocación de la muestra en el edómetro de presión. ....	72
Figura 5.3. Expulsión de aire y distribución homogénea de la superficie mediante el impacto sobre una base sólida. ....	72
Figura 5.4. Nivelación del brazo de palanca del equipo de carga.....	72
<i>Figura 5.5. Colocación y ajuste deformímetros. ....</i>	<i>73</i>
Figura 5.6. Proceso de precarga de la muestra.....	73
Figura 5.7. Inundado de las muestras con agua destilada. ....	74
Figura 5.8. Verificación del paso del agua en el sensor.....	74
Figura 5.9. Superposición de curvas de compresibilidad en escala aritmética. ....	76
Figura 5.10. Superposición de curvas en escala semilogarítmica.....	76
Figura 5.11. Resumen de curvas de consolidación en escala semilogarítmica - Probeta A. ..	78
Figura 5.12. Resumen de curvas de consolidación en escala semilogarítmica - Probeta B. ..	78
Figura 5.13. Resumen de curvas de consolidación en escala semilogarítmica - Probeta C. ..	79
Figura 5.14. Resumen de curvas de consolidación en escala aritmética - Probeta A. ....	79
Figura 5.15. Resumen de curvas de consolidación en escala aritmética - Probeta B. ....	80
Figura 5.16. Resumen de curvas de consolidación en escala aritmética - Probeta C. ....	80
Figura 5.17. Trayectoria del $C_v$ obtenido por el método de Casagrande - Probeta A.....	81
Figura 5.18. Trayectoria del $C_v$ obtenido por el método de Taylor - Probeta A.....	81
Figura 5.19. Trayectoria del $C_v$ obtenida por el método de Casagrande - Probeta B. ....	82
Figura 5.20. Trayectoria del $C_v$ obtenido por el método de Taylor - Probeta B. ....	82
Figura 5.21. Trayectoria del $C_v$ obtenida por el método de Casagrande - Probeta C. ....	83
Figura 5.22. Trayectoria del $C_v$ obtenida por el método de Taylor - Probeta C. ....	83
Figura 5.23. Datos crudos depurados - 50 kPa. ....	86
Figura 5.24. Datos crudos depurados - 100 kPa. ....	87
Figura 5.25. Datos crudos depurados - 200 kPa. ....	87
Figura 5.26. Datos crudos depurados - 400 kPa. ....	88
Figura 6.1. Compilación de trayectorias del $C_v$ obtenidas por el método de Casagrande. ....	92
Figura 6.2. Compilación de trayectorias de $C_v$ obtenidas por el método de Taylor.....	92
Figura 6.3. Superposición de curvas de consolidación para 50 kPa. ....	94
Figura 6.4. Superposición de curvas de consolidación para 100 kPa. ....	94
Figura 6.5. Superposición de curvas de consolidación para 200 kPa. ....	95

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

Figura 6.6. Superposición de curvas de consolidación para 400 kPa. ....	96
Figura 6.7. Porcentaje de consolidación secundaria según el nivel de esfuerzos aplicado. ...	97
Figura 6.8. Porcentaje de consolidación secundaria respecto a la primaria para cada nivel de esfuerzos. ....	97
Figura 6.9. Curva ajustada de presión de poros - 50 kPa.....	99
Figura 6.10. Curva ajustada de presión de poros - 100 kPa. ....	99
Figura 6.11. Curva ajustada de presión de poros - 200 kPa.....	100
Figura 6.12. Curva ajustada de presión de poros - 400 kPa.....	100
Figura 6.13. Compilación de trayectorias de Cv obtenidas por el método de Stanichevsky para el 50% y 90% de grado de consolidación. ....	101
Figura 6.14. Curvas de grado de consolidación vs. tiempo - 50 kPa.....	102
Figura 6.15. Curvas de grado de consolidación vs. tiempo - 100 kPa.....	102
Figura 6.16. Curvas de grado de consolidación vs. tiempo - 200 kPa.....	103
Figura 6.17. Curvas de grado de consolidación vs. tiempo - 400 kPa.....	103
Figura 7.1. Verificación de uniformidad de las probetas previo al ensayo de consolidación. ....	107

### LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Comparativa de requisitos geométricos según la norma ASTM D2435. ....	25
Tabla 4.1. Rangos para Caolín Prosper 2021.....	38
Tabla 4.2. Resumen de ensayos realizados sobre la muestra patrón. ....	39
Tabla 4.3. Contenido de humedad higroscópica para los ensayos de Gs. ....	41
Tabla 4.4. Resultados de Gs 1.....	41
Tabla 4.5. Resultados de Gs 2.....	42
Tabla 4.6. Resultados de Gs 3.....	43
Tabla 4.7. Resultados del contenido de humedad de la muestra patrón. ....	44
Tabla 4.8. Resultados de la granulometría 1.....	45
Tabla 4.9. Resultados de la granulometría 2.....	46
Tabla 4.10. Resultados de la granulometría 3.....	46
Tabla 4.11. Resultados límites de consistencia (LL, LP, IP) [1] .....	48
Tabla 4.12. Resultados límites de consistencia (LL, LP, IP) [2]. ....	49
Tabla 4.13. Resultados límites de consistencia (LL, LP, IP) [3]. ....	50

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

---

Tabla 4.14. Resultados SUCS-01.....	51
Tabla 4.15. Resultados SUCS-02.....	52
Tabla 4.16. Resultados SUCS-03.....	53
Tabla 4.17. Resultados límite de contracción. ....	54
Tabla 4.18. Resultados hidrometría 1 .....	56
Tabla 4.19. Resultados hidrometría 2 .....	57
Tabla 4.20. Resultados hidrometría 3 .....	58
Tabla 4.21. Porcentaje de limos y arcillas promedio para la muestra patrón .....	59
Tabla 4.22. Resultados hidrometría 1 con agente dispersante. ....	60
Tabla 4.23. Resultados hidrometría 1 sin agente dispersante. ....	61
Tabla 4.24. Resultados hidrometría 2 con agente dispersante. ....	62
Tabla 4.25. Resultados hidrometría 2 sin agente dispersante. ....	63
Tabla 4.26. Resultados hidrometría 3 con agente dispersante. ....	64
Tabla 4.27. Resultados hidrometría 3 sin agente dispersante. ....	65
Tabla 4.28. Porcentaje de limos y arcillas correspondientes a las hidrometrías con agente dispersante.....	66
Tabla 4.29. Porcentaje de limos y arcillas correspondientes a las hidrometrías sin agente dispersante.....	67
Tabla 4.30. Resultado del ensayo de doble hidrometría. ....	67
Tabla 4.31. Resumen de resultados obtenidos para la muestra patrón. ....	68
Tabla 4.32. Resultados del análisis mineralógico realizado sobre la muestra patrón.....	70
Tabla 5.1. Resultados de relación de vacíos inicial y densidad por probeta luego del proceso de acondicionamiento de la muestra.....	75
Tabla 5.2. Resumen de resultados de $P_c$ , $C_s$ y $C_c$ . ....	77
Tabla 5.3. Resumen de resultados obtenidos de $C_v$ para la probeta A.....	82
Tabla 5.4. Resumen de resultados obtenidos de $C_v$ para la probeta B.....	83
Tabla 5.5. Resumen de resultados obtenidos de $C_v$ para la probeta C.....	84
Tabla 5.6. Porcentajes de consolidación primaria y secundaria - Probeta A.....	84
Tabla 5.7. Porcentajes de consolidación primaria y secundaria - Probeta B. ....	84
Tabla 5.8. Porcentajes de consolidación primaria y secundaria - Probeta C. ....	85
Tabla 5.9. Coeficientes de consolidación secundaria - Probeta A.....	85
Tabla 5.10. Coeficientes de consolidación secundaria - Probeta B. ....	85
Tabla 5.11. Coeficientes de consolidación secundaria - Probeta C. ....	85

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

Tabla 6.1. Resultados del análisis estadístico de la relación de vacíos inicial y densidad total. ....	89
Tabla 6.2. Resultados del análisis estadístico del $P_c$ , $C_s$ y $C_c$ . ....	90
Tabla 6.3. Resultados del análisis estadístico del $C_v$ obtenido por el método de Casagrande. ....	91
Tabla 6.4. Resultados del análisis estadístico del $C_v$ obtenido por el método de Taylor. ....	91
Tabla 6.5. Análisis estadístico para curvas de compresibilidad a 50 kPa. ....	94
Tabla 6.6. Análisis estadístico para curvas de compresibilidad a 100 kPa. ....	95
Tabla 6.7. Análisis estadístico para curvas de compresibilidad a 200 kPa. ....	95
Tabla 6.8. Análisis estadístico para curvas de compresibilidad a 400 kPa. ....	96
Tabla 6.9. Porcentajes de consolidación primaria y secundaria de una probeta ensayada en un edómetro tradicional. ....	98
Tabla 6.10. Análisis estadístico del coeficiente de consolidación secundaria $C_{\alpha}$ . ....	98
Tabla 6.11. Resultados de $C_v$ obtenidos por el método de Stanichevsky. ....	101
Tabla 7.1. Resumen de resultados de la caracterización de la muestra patrón. ....	105

### LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 2.1. Ecuación del $G_s$ . ....	6
Ecuación 2.2. Ecuación de la relación de vacíos. ....	6
Ecuación 2.3. Ecuación de la densidad húmeda del suelo. ....	7
Ecuación 2.4. Ecuación del peso específico húmedo del suelo. ....	7
Ecuación 2.5. Ecuación para determinar el contenido de humedad. ....	7
Ecuación 2.6. Ecuación para determinar la saturación del suelo. ....	8
Ecuación 2.7. Ecuación del esfuerzo total en un perfil de suelo. ....	10
Ecuación 2.8. Ecuación de la sobrepresión hidrostática. ....	12
Ecuación 2.9. Variación de la porosidad respecto al coeficiente de compresibilidad ( $a_v$ ) y la relación de vacíos inicial ( $e_0$ ). ....	13
Ecuación 2.10. Expresión del gradiente de velocidad a través de un elemento. ....	13
Ecuación 2.11. Coeficiente de consolidación en función de la permeabilidad. ....	14
Ecuación 2.12. Ecuación diferencial básica de la consolidación. ....	14
Ecuación 2.13. Solución a la ecuación diferencial básica de la consolidación. ....	15
Ecuación 2.14. Factor tiempo de la consolidación. ....	15
Ecuación 2.15. Ecuación del grado de consolidación. ....	15

Ecuación 2.16. Ecuación para la determinación del coeficiente de consolidación secundaria.  
..... 18

Ecuación 4.1. Ecuación para obtener el porcentaje de dispersión en arcillas..... 60

## LISTA DE SÍMBOLOS

### *Roman (mayúsculas)*

$C_v$	coeficiente de consolidación, $m^2/s$ .
$C_\alpha$	coeficiente de consolidación secundaria.
$M_s$	masa de las partículas del sólido del suelo, [M].
$M_t$	masa total del suelo, [M].
$M_w$	masa de agua contenida en los poros del suelo, [M].
$N_{m,2\mu m,nd}$	porcentaje que pasa más fino que 2 $\mu m$ del espécimen sin dispersante.
$N_{m,2\mu m,d}$	porcentaje que pasa más fino que 2 $\mu m$ del espécimen con dispersante.
$T_v$	factor tiempo.
$U_z$	grado de consolidación a una distancia $z$ en cualquier tiempo $t$ .
$V_s$	volumen de sólidos, [ $L^3$ ].
$V_t$	volumen total del suelo, [ $L^3$ ].
$V_v$	volumen de vacíos, [ $L^3$ ].
$V_w$	volumen de agua, [ $L^3$ ].
$W_t$	peso total ejercido por la masa total por acción de la gravedad, [ $MLT^{-2}$ ].

### *Roman (minúsculas)*

$a_v$	coeficiente de compresibilidad, $m^2/kN$ .
$g$	gravedad, $9.81 m/s^2$ .
$h$	carga hidráulica con respecto al nivel freático, [L].
$k$	coeficiente de permeabilidad, $m/s$ .
$m$	número entero.

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

---

$m_v$	coeficiente de compresibilidad volumétrico.
$t$	tiempo.
$u_z$	presión de poros en un tiempo $t$ .
$u_0$	presión de poros inicial.

### *Griego (mayúsculas)*

$\Delta e$	variación de la relación de vacíos.
$\Delta n$	variación de porosidad.
$\Delta p$	incremento de presión, kN/m <sup>2</sup> .
$\Delta \bar{p}$	incremento de esfuerzo efectivo.
$\Delta u$	presión de poros, T/m <sup>2</sup> .

### *Griego (minúsculas)*

$\gamma_s$	peso específico del sólido, [MLT <sup>-2</sup> ]/[L <sup>3</sup> ].
$\gamma_w$	peso específico del agua, [MLT <sup>-2</sup> ]/[L <sup>3</sup> ].
$\sigma_T$	esfuerzo total, T/m <sup>2</sup> .
$\sigma'$	esfuerzo efectivo, T/m <sup>2</sup> .

## **ÍNDICE DE CONTENIDOS**

Agradecimientos .....	i
Dedicatoria .....	iv
Resumen.....	vi
Abstract.....	vi
Lista de figuras.....	vii
Lista de tablas .....	x
Lista de ecuaciones .....	xii
Lista de símbolos .....	xiii
Índice de contenidos .....	xv
1. Introducción .....	1
1.1. Planteamiento del problema .....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos .....	2
1.3.1. Objetivo general.....	2
1.3.2. Objetivos específicos .....	2
1.4. Alcance.....	3
1.5. Antecedentes .....	3
2. Fundamentación teórica .....	5
2.1. Generalidades .....	5
2.2. Estructuración de los suelos .....	8
2.2.1. Estructura dispersa .....	9
2.2.2. Estructura floculante .....	9
2.2.3. Estructura floculante salina.....	10
2.3. Esfuerzos en la masa del suelo.....	10
2.4. Teoría de consolidación .....	11
2.5. Planteamiento matemático de la consolidación unidimensional.....	12

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

---

2.6.	Solución de la ecuación diferencial básica y desarrollo de isócronas.....	15
2.7.	Consolidación secundaria.....	17
2.8.	Determinación del coeficiente de consolidación ( $C_v$ ).....	18
2.8.1.	Método de Casagrande ( $t_{50}$ ).....	18
2.8.2.	Método de Taylor o de la raíz del tiempo ( $t_{90}$ ).....	19
2.8.3.	Medida de la presión de poro-referencia: Método de Stanichevsky.....	20
3.	Diseño del equipo.....	22
3.1.	Principios básicos de diseño.....	22
3.2.	Funcionamiento.....	23
3.3.	Diseño del equipo.....	25
3.3.1.	Requerimientos del equipo.....	25
3.3.2.	Planos de diseño.....	26
3.3.3.	Materiales.....	33
3.4.	Metodología de prueba del prototipo.....	37
4.	Caracterización de la muestra patrón y sus resultados.....	38
4.1.	Ensayos de la muestra patrón.....	38
4.1.1.	Gravedad específica (Gs).....	40
4.1.2.	Clasificación SUCS.....	44
4.1.3.	Límite de contracción (LC).....	54
4.1.4.	Granulometría mediante sedimentación por hidrómetro.....	55
4.1.5.	Ensayo de dispersión en arcillas por doble hidrómetro.....	59
4.1.6.	Ensayos mineralógicos.....	69
5.	Consolidación unidimensional y sus resultados.....	70
5.1.	Preparación de la muestra.....	70
5.2.	Pasos previos al ensayo de consolidación para el edómetro de presión.....	74
5.3.	Ensayo de consolidación.....	75
5.4.	Resultados del ensayo de consolidación.....	75

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

---

5.4.1.	Curvas de compresibilidad.....	76
5.4.2.	Esfuerzo de preconsolidación .....	77
5.4.3.	Curvas de consolidación .....	77
5.4.4.	Trayectoria del coeficiente de consolidación ( $C_v$ ).....	81
5.4.5.	Relación entre la consolidación primaria y secundaria.....	84
5.4.6.	Curvas de disipación de presión de poros.....	86
6.	Análisis de resultados .....	89
6.1.	Análisis de relación de vacíos inicial .....	89
6.2.	Análisis del esfuerzo de preconsolidación .....	90
6.3.	Análisis coeficiente de consolidación ( $C_v$ ).....	91
6.4.	Análisis de la superposición de curvas para cada estado de esfuerzo.....	93
6.4.1.	Método de Casagrande.....	94
6.5.	Análisis de la consolidación primaria y secundaria .....	97
6.6.	Análisis de la disipación de la presión de poros.....	99
6.6.1.	Método referencial según Stanichevsky .....	99
6.6.2.	Comparativa curvas grado de consolidación vs. tiempo.....	102
7.	Conclusiones y Recomendaciones.....	104
7.1.	Conclusiones .....	104
7.2.	Recomendaciones.....	110
8.	Bibliografía .....	111
9.	Anexos .....	1
9.1.	Curvas de compresibilidad.....	1
9.1.1.	Probeta A .....	1
9.1.2.	Probeta B.....	2
9.1.3.	Probeta C.....	3
9.2.	Esfuerzos de preconsolidación .....	4
9.2.1.	Probeta A .....	4

## **“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

---

9.2.2. Probeta B.....	4
9.2.3. Probeta C.....	5
9.3. Curvas de consolidación.....	5
9.3.1. Método de Casagrande ( $t_{50}$ ) .....	5
9.3.2. Método de Taylor ( $t_{90}$ ) .....	17

## **1. INTRODUCCIÓN**

### *1.1. Planteamiento del problema*

Según Brendan (2017), las turbas poseen un alto contenido de humedad, alto contenido orgánico, bajas densidades y Gs. Además, presentan una baja resistencia al corte y muy alta compresibilidad. Lo mencionado anteriormente definen a este tipo de depósito como un material que posee pésimas cualidades, que presenta dificultad para su caracterización. En su comportamiento errático, principalmente adjudicado a su contenido de humedad y baja cantidad de sólidos, la mayoría de los ensayos de laboratorio no pueden modelar de manera adecuada sus características. En lo que respecta a la consolidación según la norma ASTM D2435, las deformaciones tienden a ser elevadas y, en muchos de los casos, ocurre en periodos de tiempo muy extensos. La metodología o procedimiento de la norma para este tipo de materiales no permite distinguir con claridad cuándo ocurre la consolidación primaria y secundaria, ni establecer la deformación final que sufrirá el suelo en función a la carga patrón. En este escenario la teoría permite una vía de posible solución u obtener más información del fenómeno si se pudiera seguir el proceso de disipación de presión de poros.

Actualmente el ensayo de consolidación establecido en la norma ASTM D2435, señala el procedimiento para determinar la magnitud y tasa de consolidación del suelo al restringirlo lateralmente y permitiendo un drenaje vertical, mediante la recopilación de lecturas de deformación en intervalos tiempo. (ASTM 2435/D2435M-11, 2011). Sin embargo, en lo que respecta a la determinación de presión de poros, ya existen aparatos capaces de medir la variación de este parámetro. Estos dispositivos están basados en el ensayo de consolidación original, utilizando transductores con la capacidad de recopilar esta información. (Robinson & Soundara, 2008). En el mercado existen dispositivos más sofisticados que permiten establecer de manera precisa lecturas de la presión de poros y su variación. Compañías como GILSON COMPANY, INC. Distribuyen este producto al mercado internacional (*HM-567 Back Pressure Consolidometer*), el cual permite la medición de presión de poros durante el ensayo de consolidación con una precisión que dependerá del aparato que sea empleado para la recopilación de datos, la misma que puede llegar a ser décimas de centímetro cúbico o hasta centésimas de kPa. (GILSON COMPANY INC., 2021). No obstante, el costo que representan estos equipos para un laboratorio tiende a ser bastante elevados, lo cual supone un problema.

Por ende, la investigación plantea verificar el parámetro de presión a través de una propuesta alternativa, estandarizando un equipo y procedimiento mediante una muestra normalizada.

### 1.2. Justificación

Los suelos con alto contenido orgánico, entre ellas las turbas, representan un problema para la fundación de cualquier tipo de estructura, dadas sus deformaciones significativas. Estos asentamientos se deben principalmente al proceso de consolidación, fundamentado en su composición, alto contenido de humedad y microporos que contienen agua. El estudio de las turbas representa un reto para la investigación experimental siendo un material que contiene un contenido de humedad extremadamente alto y contenido de fibras, haciéndolo susceptible a la biodegradación y a dificultades para obtener resultados válidos en laboratorio. La consolidación es especialmente compleja, puesto que, esta puede darse de manera desordenada, y en la mayoría de los casos con deformaciones exageradas en cortos periodos de tiempo, o con intervalos de tiempo demasiado extensos. Un acercamiento para tratar de comprender la conducta de este tipo de material es la medición de la variación de la presión de poros, el cual permita definir en cierta medida el comportamiento de la consolidación. (O’Kelly, 2017).

### 1.3. Objetivos

#### *1.3.1. Objetivo general*

Implementar una instrumentación en equipos tradicionales modificados que permita captar de manera legible el incremento y disipación de presión de poros durante el ensayo de consolidación.

#### *1.3.2. Objetivos específicos*

- Diseñar la celda de consolidación que se adapte al objetivo de la investigación, es decir, un elemento que permita ejecutar el ensayo de consolidación basado en la norma ASTM D2435, con el añadido de un sistema de medición de poros en el centro de la parte inferior de la muestra.
- Calibrar el sistema por medio de una comparación entre los métodos gráficos (Casagrande y Taylor) y los gráficos obtenidos en base al comportamiento de variación del exceso de presión de poros vs. tiempo en una muestra patrón con un rango de esfuerzos normalizados.

#### 1.4. Alcance

El estudio propone la implementación de un prototipo de equipo y procedimiento de ensayo con capacidad de mensurar y almacenar datos sobre la variación de presión de poros en un punto ubicado en la parte inferior central de una muestra durante el ensayo de consolidación siguiendo, como referencia, el proceso señalado por la norma ASTM D2435. Parte fundamental del estudio será comparar los resultados obtenidos con el dispositivo, a través de una muestra patrón de características conocidas, con el análisis común de consolidación ASTM D 2435. Se intenta verificar, dentro de rangos razonables, el fin de la consolidación primaria por medio de la disipación del exceso de presión de poros generada por los estados de carga programados, y su coincidencia con el fin de la consolidación primaria determinado por procesos normalizados como el de Casagrande y Taylor. Se ha utilizado como muestra patrón un caolín normalizado empleado por la industria de cerámicos EDESA S.A.; material suelto sujeto a un tratamiento específico para formar los especímenes de ensayo según recomendaciones de Sachan et al. (2013). Por tanto, los resultados serán válidos únicamente para el caolín con características físicas y químicas determinadas en esta investigación.

#### 1.5. Antecedentes

En décadas recientes, se han presentado varios problemas de ingeniería asociados a depósitos de turbas, puesto que este material no debería ser utilizado para la construcción. Sin embargo, la construcción informal, es decir, no controlada ni regularizada, ignora la presencia de este material y con el tiempo se convierte en un problema dada su baja capacidad de carga y alta deformabilidad. Generalmente, gran parte de los asentamientos en este tipo de material no están relacionados al fenómeno de consolidación, por lo cual es común que las curvas de consolidación no presenten el comportamiento definido por los conceptos teóricos. (Berry & Poskitt, 1972). Bajo esta premisa, la medición de la deformación no genera un panorama claro de la consolidación de este tipo de material.

Han existido varios estudios que han tratado de abarcar el comportamiento de las turbas (Berry & Poskitt, 1972), así como aquellos que tratan de generar metodologías para solucionar el problema de deformabilidad de estos suelos (Nguyen et al., 2015). Por lo explicado anteriormente, es común que estas investigaciones giren en torno a la medición e interpretación de la presión de poros, siendo este último la única manera de indagar la consolidación de este.

## **“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

---

Bartłomiej menciona que el análisis de la presión de poros no es común en el estudio de la consolidación, ya que la cantidad de métodos para evaluarla en la literatura son muy escasos. Además, resalta que el estudio de la consolidación por medio de sus deformaciones no entrega la información suficiente para una interpretación real del comportamiento de la consolidación, razón por la cual su determinación es sumamente relevante. (Olek, 2020).

El desarrollo de comparativas basadas en la variación del exceso de presión de poros requiere obligatoriamente de mecanismos para la lectura confiable de esta, por lo cual los dispositivos más recientes para el ensayo de consolidación cuentan con capacidad de lectura para deformación y presión simultáneamente. (GILSON COMPANY INC., 2021).

## 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 2.1. Generalidades

“Para propósitos de ingeniería, el suelo se define como un depósito compuesto por granos minerales cementados y materia orgánica descompuesta con líquido y gas en sus espacios entre partículas sólidas”. (Das, 2015).

Esto puede ser representado mediante un modelo trifásico. A partir de este surgen las distintas relaciones fundamentales, las cuales tienen una amplia aplicación en mecánica de suelos para el cálculo de esfuerzos, compresibilidad, además de determinar varias propiedades del suelo.

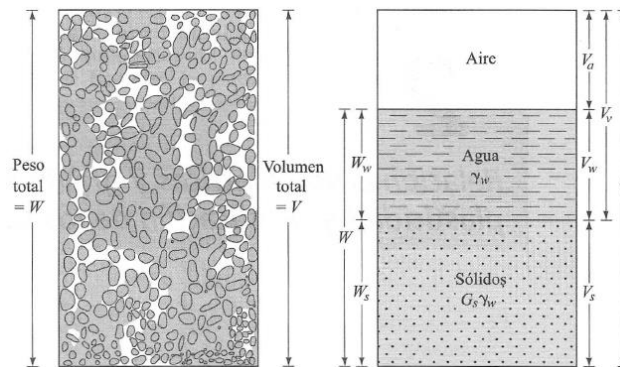


Figura 2.1. Modelo trifásico. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. (p. 50). Das, 2015, México D.F.: CENGAGE

Learning Editores S.A.

Sin embargo, si se considera que el volumen de agua es igual al volumen de vacíos, se genera una condición saturada, la cual se representa por una variante del modelo presentado anteriormente, el cual únicamente posee dos fases; sólidos y agua, más conocido como modelo bifásico. Este es utilizado en el análisis de consolidación unidimensional de suelos, ya que para su estudio se considera que la muestra está totalmente saturada.

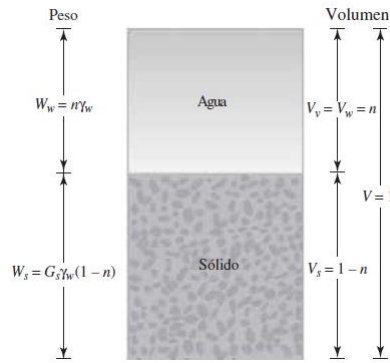


Figura 2.2. Modelo bifásico. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. (p. 56). Das, 2015, México D.F.: CENGAGE Learning Editores S.A.

Considerando el modelo bifásico, así como la necesidad de caracterizar el caolín según la norma ASTM D2487 requerido para el ensayo de consolidación, se detalla el sustento teórico de los parámetros a determinar:

- *Gravedad específica*: Según la norma ASTM D854 es la relación entre el peso específico del sólido, respecto al peso específico del agua. Para la investigación se empleó el método A, el cual se detallará posteriormente.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

*Ecuación 2.1.* Ecuación del  $G_s$ .

Dónde:

$\gamma_s$ : peso específico del sólido,  $[MLT^{-2}]/[L^3]$ .

$\gamma_w$ : peso específico del agua,  $[MLT^{-2}]/[L^3]$ .

- *Relación de vacíos*: Refiere a la relación del volumen de vacíos respecto al volumen de sólidos. Este parámetro indica la cantidad de vacíos por unidad de sólidos en una muestra de suelo.

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

*Ecuación 2.2.* Ecuación de la relación de vacíos.

Dónde:

$V_v$ : volumen de vacíos,  $[L^3]$ .

$V_s$ : volumen de sólidos,  $[L^3]$ .

- *Densidad*: Corresponde a la masa del suelo por unidad de volumen.

$$\rho_h = \frac{M_t}{V_t}$$

*Ecuación 2.3.* Ecuación de la densidad húmeda del suelo.

Dónde:

$M_t$ : masa total del suelo, [M].

$V_t$ : volumen total del suelo, [L<sup>3</sup>].

- *Peso específico*: Refiere al peso, como fuerza, aplicado en un volumen determinado.

$$\gamma_h = \frac{M_t * g}{V_t} = \frac{W_t}{V_t}$$

*Ecuación 2.4.* Ecuación del peso específico húmedo del suelo.

Dónde:

$W_t$ : peso total ejercido por la masa total por acción de la gravedad, [MLT<sup>-2</sup>].

$g$ : gravedad, 9.81 m/s<sup>2</sup>.

- *Humedad*: Según la norma ASTM D2216, se define como la relación entre la masa de agua contenida en los poros del suelo, respecto a la masa de las partículas del sólido. Para la investigación se empleó el método A, el cual se detallará más adelante.

$$\%w = \frac{M_w}{M_s} * 100$$

*Ecuación 2.5.* Ecuación para determinar el contenido de humedad.

Dónde:

$M_w$ : masa de agua contenida en los poros del suelo, [M].

$M_s$ : masa de las partículas del sólido del suelo, [M].

- *Saturación:* Refiere a la relación entre el volumen de agua, respecto al volumen de vacíos. Representa el porcentaje de vacíos llenos de agua. Esta no puede ser mayor al 100%.

$$S = \frac{V_w}{V_v} * 100$$

*Ecuación 2.6.* Ecuación para determinar la saturación del suelo.

Dónde:

$V_w$ : volumen de agua, [L<sup>3</sup>].

- *Análisis granulométrico:* Según la norma ASTM D6913, consiste en la determinación cuantitativa de la masa de partículas de sólido para un rango de diámetro de partícula determinado.
- *Límites de Atterberg:* En suelos que poseen suficiente cantidad de material fino y agua, presentan propiedades de plasticidad, cohesión y tenacidad, donde un fragmento de suelo podrá ser remodelado a una nueva forma. Si el contenido de humedad incrementa cambiará su estado físico de sólido, a semi-plástico, plástico y líquido. (Barnes, 2016).

Para suelos cohesivos originalmente se definieron seis límites de consistencia, los cuales son; el límite superior viscoso, el límite líquido, el límite pegajoso, el límite de cohesión, el límite plástico y el límite de contracción. Sin embargo, actualmente para usos ingenieriles se define únicamente al límite líquido, límite plástico y límite de contracción. (ASTM D4318-17, 2017).

## 2.2. Estructuración de los suelos

Juárez Badillo y Rico Rodríguez (2005), insisten en la siguiente afirmación:

Un suelo nunca es un mero agregado desprovisto de organización; antes, al contrario, sus partículas se disponen siempre en forma organizada, siguiendo algunas leyes fijas y según la acción de fuerzas naturales susceptibles de análisis. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

En suelos predominantemente granulares gruesos como; gravas y arenas, las fuerzas que intervienen en la conformación de la estructura del depósito, son relativamente bien conocidas y simples de calificar; en estas se identifican estructuras como: granular única y panaloide. Sin embargo, para suelos cohesivos, limos y arcillas, las fuerzas que intervienen son más complejas, mientras que se presentan estructuras como: dispersas, floculantes y floculantes salinas. Debido al interés de esta investigación se detalla las correspondientes a depósitos cohesivos:

### *2.2.1. Estructura dispersa*

Este tipo de estructura se explica en el comportamiento de una arcilla en suspensión diluida, dónde las partículas se repelen entre sí debido a la gran distancia entre sí; en esta condición cada una de estas puede asentarse lentamente o mantenerse en suspensión formando estructuras paralelas similares a un muro de piedras planas colocadas una encima de otra, generando así una estructura densa e impermeable, con una relación de vacíos menor a 0.5. (Sowers B & Sowers F, 1970).

### *2.2.2. Estructura floculante*

Este tipo de estructuras se forma durante el movimiento aleatorio en suspensión de una partícula, que inicialmente se encuentra dispersa, dónde otras partículas se adhieren a esta formando flóculos, los cuales se constituyen debido al contacto de las esquinas con carga de negativa, y los lados de la partícula con carga positiva. Este proceso de aglutinamiento entre partículas se conoce como floculación, la cual es dependiente del tipo y concentración de las partículas de arcilla y del electrólito al que se encuentren expuestas. (Sowers B & Sowers F, 1970).

Durante el proceso de sedimentación de suelos con este tipo de estructura, se tiene que dos partículas de diámetro inferior a 0.02 mm llegan a tocarse, adhiriéndose con fuerza para sedimentarse juntas, lo cual provoca la formación de flóculos; estos poseen una conformación similar a un panal generando un espécimen blando, suelto y con gran volumen de vacíos, donde el sólido puede no representar más de un 5-10%. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

### 2.2.3. *Estructura floculante salina*

Al incluir sal en la suspensión agua-arcilla, la cual inicialmente se encuentra dispersa, los iones tienden a reducir la doble capa alrededor de las partículas, provocando que las partículas se atraigan unas con otras en forma de flóculos.

### 2.3. Esfuerzos en la masa del suelo

La determinación de esfuerzos es útil para analizar problemas de compresibilidad, motivo por el cual es imperativo conocer la naturaleza de su distribución a lo largo de la sección transversal de un perfil de suelo, es decir, determinar qué fracción del esfuerzo normal es soportada por el esqueleto del suelo y por el agua intersticial en un modelo bifásico. Lo cual se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_T = \Delta u + \sigma'$$

*Ecuación 2.7.* Ecuación del esfuerzo total en un perfil de suelo.

Dónde:

$\sigma_T$ : Esfuerzo total, T/m<sup>2</sup>.

$\Delta u$ : Presión de poros, T/m<sup>2</sup>.

$\sigma'$ : Esfuerzo efectivo, T/m<sup>2</sup>.

*Definiciones:*

- *Esfuerzo efectivo ( $\sigma'$ ):* Es aquel esfuerzo desarrollado por el contacto partícula a partícula de una masa de suelo.
- *Presión de poros ( $\Delta u$ ):* Es aquel esfuerzo generado por el agua contenida en los vacíos del sólido.
- *Esfuerzo total ( $\sigma_T$ ):* Representa la suma de todos los esfuerzos aplicados en la masa del suelo.

#### 2.4. Teoría de consolidación

Según Whitlow (1994), la relación entre el movimiento del suelo y la estabilidad de la estructura es compleja, en primer lugar, dado que existen diferentes mecanismos capaces de mover el suelo, además de la variedad de estructuras que existen, cada una con un potencial diferente para resistir el movimiento o ser afectada por el mismo. Sin embargo, la mayor parte de daños en los edificios surgen debido a la aparición de condiciones no previstas en el suelo, como son los asentamientos elásticos y por consolidación.

Para comprender de mejor manera este fenómeno, es necesario conocer que, durante el proceso natural de deposición, los suelos de grano fino quedan sometidos a un proceso de consolidación, donde el agua que se encuentra entre partículas es expulsada debido al peso de las capas que se depositan por encima. (Whitlow, 1994). Por lo tanto, cuando un estrato de suelo se somete a un aumento de esfuerzo, la presión de poros o intersticial incrementa repentinamente. En suelos arenosos el drenaje ocurre inmediatamente debido a su alta permeabilidad, por ende, se distorsiona la estructura de la masa del suelo provocando asentamientos. Debido al rápido drenaje en suelos granulares, el asentamiento elástico y de consolidación ocurren simultáneamente. No obstante, al aplicar un incremento de esfuerzo en una capa de arcilla saturada, el asentamiento elástico ocurre de manera inmediata debido a la variación del volumen. El incremento de presión de poros que experimenta el depósito compresible, debido a su baja permeabilidad, disminuye o se disipa gradualmente en función del tiempo y la carga aplicada. (Das, 2015).

En el caso de las arcillas el cambio de volumen asociado (consolidación), es un fenómeno que ocurrirá a largo plazo, el cual se explicará a continuación:

En base a la ecuación 2.1. para determinar esfuerzos en la masa del suelo:

$$\Delta\sigma_T = \Delta u + \Delta\sigma'$$

Debido a la baja permeabilidad de la arcilla y que el agua es incompresible, al compararla con la masa del suelo, se indica lo siguiente:

$$t = 0 \rightarrow \Delta\sigma_T = \Delta u ; \Delta\sigma' = 0$$

Lo cual representa que, en el instante de aplicación de la carga, esta es soportada inicialmente por el agua. Por lo tanto, el esqueleto del suelo no trabaja en su totalidad.

$$0 < t < \infty \rightarrow \Delta\sigma_T = \Delta u + \Delta\sigma' ; \downarrow \Delta u \quad \uparrow \Delta\sigma'$$

Esto nos indica que, con el pasar del tiempo la presión de poros se disipará, y en consecuencia la presión efectiva aumentará, lo cual implica que la carga aplicada sea soportada por el poro de agua que aún no ha sido drenado y por una fricción de contacto entre partículas de los sólidos de suelo. En esta etapa debido a la disipación de la presión intersticial se genera un cambio de volumen de masa de suelo, produciendo asentamientos.

$$t = \infty \rightarrow \Delta\sigma_T = \Delta\sigma' ; \Delta u = 0$$

Finalmente, se determina que para un tiempo  $t$ , donde se haya completado la transferencia de presión de poros a presión efectiva, concluye el proceso de consolidación, en el cual el incremento de carga es soportado en su totalidad por el esqueleto del suelo.

La consolidación secundaria ocurre inmediatamente después de haberse concluido la consolidación primaria. Esto puede suceder debido a distintos factores, principalmente por la presencia de microporos que contienen agua. Principalmente se basan en el proceso de consolidación donde el agua se transfiere desde los microporos hacia los macroporos. La reducción de volumen en la consolidación primaria produce una disminución del tamaño de los macroporos y de la permeabilidad, en consecuencia, la salida de agua de los microporos se dificulta, provocando un tiempo de asentamiento mucho mayor. Para el caso de turbas, su composición provoca deformaciones adicionales a largo plazo, teniendo como resultado que las deformaciones por consolidación secundaria sean más significativas que aquellas provocadas por la consolidación primaria. (Barden, 1968).

### 2.5. Planteamiento matemático de la consolidación unidimensional

Cualquier sobrepresión hidrostática se puede definir con la expresión:

$$u = \gamma_w h$$

*Ecuación 2.8.* Ecuación de la sobrepresión hidrostática.

Dónde:

$h$ : carga hidráulica con respecto al nivel freático, [L].

$\gamma_w$ : peso específico del agua, [MLT<sup>-2</sup>]/[L<sup>3</sup>].

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

---

En el fenómeno de consolidación la transferencia de la presión de poros a esfuerzo efectivo está definida a partir del principio de que el suelo mantiene su esfuerzo total constante. El valor de la presión de poros va disminuyendo a la par de la deformación del estrato, hasta que en un momento y bajo una carga determinada, el esfuerzo pasa a convertirse en efectivo en su totalidad.

Si tomamos un elemento de profundidad diferencial del estrato y asumimos que solo puede drenar en sentido vertical. Podemos aplicar la Ley de Darcy, del movimiento de fluidos en un medio poroso, para establecer la velocidad y grado de la consolidación en un momento específico. Entonces tenemos:

$$v = ki = -k \frac{\partial h}{\partial z} = -k \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z}$$

De la ecuación:

$$\Delta n = \frac{a_v}{1 + e_0} \Delta p = m_v \Delta p$$

*Ecuación 2.9.* Variación de la porosidad respecto al coeficiente de compresibilidad ( $a_v$ ) y la relación de vacíos inicial ( $e_0$ ).

Dónde:

$a_v$ : coeficiente de compresibilidad,  $m^2/kN$ .

$m_v$ : coeficiente de compresibilidad volumétrico.

$\Delta n$ : variación de porosidad.

$\Delta p$ : incremento de presión,  $kN/m^2$ .

Podemos decir que lo anterior en términos diferenciales es equivalente a:

$$\frac{\partial v}{\partial z} = m_v \frac{\partial(\Delta \bar{p})}{\partial t}$$

*Ecuación 2.10.* Expresión del gradiente de velocidad a través de un elemento.

Dónde:

$\Delta \bar{p}$ : incremento de esfuerzo efectivo.

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

---

Dado que el incremento de presión ( $\Delta\bar{p}$ ) se mantiene constante, podemos transformar lo anterior a:

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -m_v \frac{\partial u}{\partial t}$$

Del despeje y consideración del coeficiente de consolidación vertical, podemos establecer lo siguiente:

$$(1) \frac{\partial v}{\partial z} = -k \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$(2) \frac{\partial v}{\partial z} = -m_v \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w m_v} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

Con:

$$C_v = \frac{k}{\gamma_w m_v}$$

*Ecuación 2.11.* Coeficiente de consolidación en función de la permeabilidad.

Dónde:

$C_v$ : coeficiente de consolidación,  $m^2/s$ .

$k$ : coeficiente de permeabilidad,  $m/s$ .

Obtenemos como resultado final la ecuación diferencial que establece la variación de la presión de poros de un estrato bajo consolidación:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

*Ecuación 2.12.* Ecuación diferencial básica de la consolidación.

2.6. Solución de la ecuación diferencial básica y desarrollo de isócronas

La solución de la ecuación 2.6. se presenta a continuación:

Según Das (2015), se consideran las siguientes condiciones de frontera:

$$z = 0, \quad u = 0$$

$$z = 2 * H_{dr}, \quad u = 0$$

$$t = 0, \quad u = u_0$$

Teniendo como solución lo siguiente:

$$u = \sum_{m=0}^{m=\infty} \left[ \frac{2 * u_0}{M} * \sin \left( \frac{M * z}{H_{dr}} \right) \right] * e^{-M^2 * T_v}$$

*Ecuación 2.13.* Solución a la ecuación diferencial básica de la consolidación.

$$T_v = \frac{C_v * t}{H_{dr}^2}$$

*Ecuación 2.14.* Factor tiempo de la consolidación.

$$M = \frac{\pi}{2} * (2m + 1)$$

Dónde:

m: número entero.

$u_0$ : presión de poros inicial.

$T_v$ : factor tiempo.

$$U_z = 1 - \frac{u_z}{u_0}$$

*Ecuación 2.15.* Ecuación del grado de consolidación.

Dónde:

$U_z$ : grado de consolidación a una distancia z en cualquier tiempo t.

$u_z$ : presión de poros en un tiempo t.

Variando los valores de  $T_v$  se pueden construir las isócronas, que representan el grado de consolidación, en función de la variación de la presión de poros, en para cualquier punto en la altura de la muestra. El valor de  $T_v$ , se puede calcular con la ecuación 2.14.

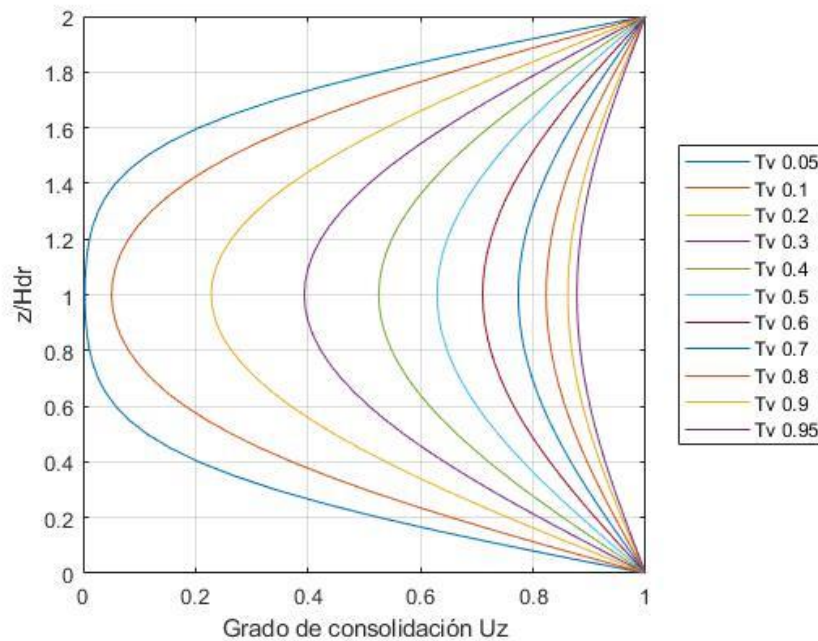


Figura 2.3. Isócronas para la condición de drenaje en dos direcciones. Elaboración propia

El valor del grado de consolidación a lo largo de toda la altura de la muestra depende de las condiciones de drenaje que esta posea. La figura anterior contiene las isócronas con drenaje superior e inferior. Sin embargo, cuando la muestra limita su drenaje en una sola dirección, las isócronas se modifican de la siguiente manera:

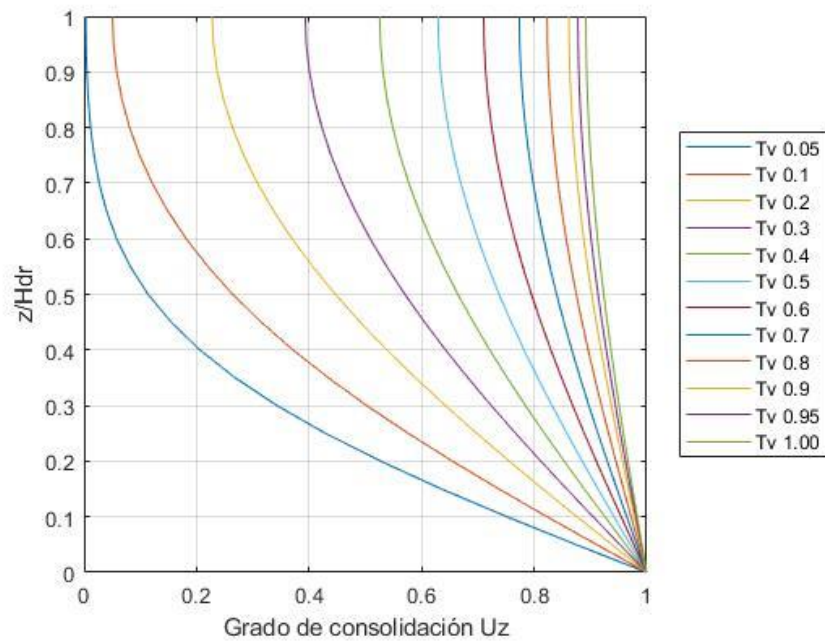


Figura 2.4. Isócronas para la condición de drenaje en una sola dirección. Elaboración propia.

### 2.7. Consolidación secundaria

Se define como consolidación secundaria a aquella que ocurre debido a un ajuste plástico del suelo posterior a la finalización de la consolidación primaria. Generalmente esta sección de la curva tiene una tendencia lineal para la gráfica de relación de vacíos vs. el tiempo en escala semilogarítmica. (Das, 2015).

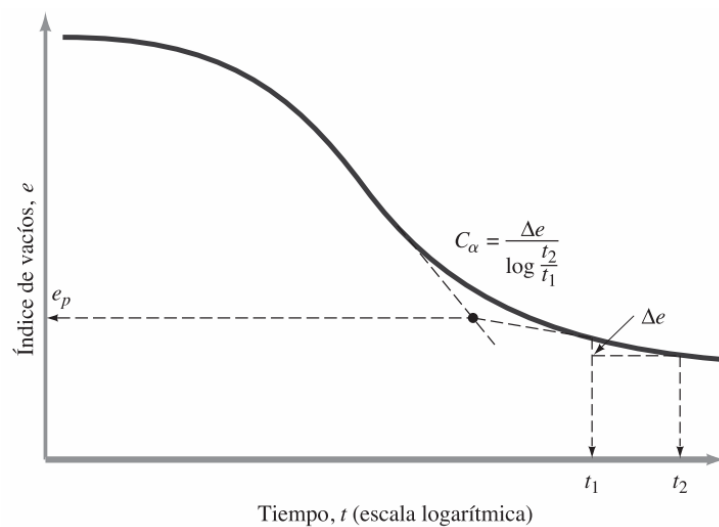


Figura 2.5. Definición del coeficiente de consolidación secundaria. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. (p. 202). Das, 2015, México D.F.: CENGAGE Learning Editores S.A.

La determinación de este parámetro está definida por la pendiente de la sección de la curva correspondiente a la consolidación secundaria, establecida por la siguiente expresión:

$$C_{\alpha} = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}$$

*Ecuación 2.16.* Ecuación para la determinación del coeficiente de consolidación secundaria.

Dónde:

$C_{\alpha}$ : coeficiente de consolidación secundaria.

$\Delta e$ : variación de la relación de vacíos.

$t_1, t_2$ : tiempo.

## 2.8. Determinación del coeficiente de consolidación ( $C_v$ )

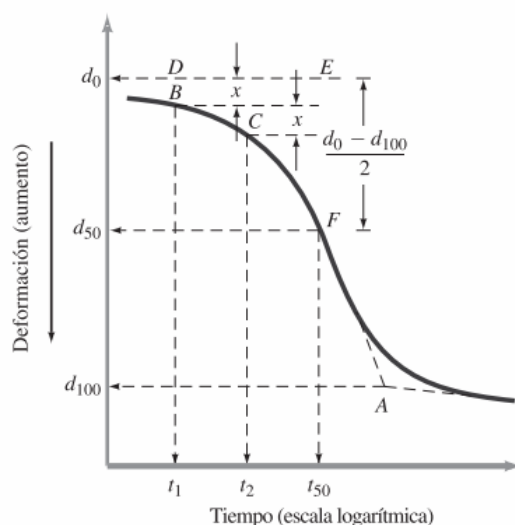
El coeficiente de consolidación ( $C_v$ ) sirve como pilar fundamental para definir la variación del grado de consolidación de una muestra en función del factor tiempo ( $T_v$ ). En la ejecución del ensayo de consolidación, este parámetro es obtenido considerando soluciones simplificadas mediante métodos gráficos, establecidos sobre un valor promedio de deformación superficial del espécimen. Generalmente se emplea la metodología establecida por Casagrande y Taylor.

### *2.8.1. Método de Casagrande ( $t_{50}$ )*

Casagrande observó que, al graficar la deformación vs. tiempo en escala semilogarítmica, estaba conformada por tres partes distintas: una porción similar a una parábola, una sección lineal en la parte intermedia y una parte asintótica paralela a la horizontal o con una ligera pendiente. (Barnes, 2016).

A partir de un punto seleccionado de la primera parte, puede definirse un segundo punto cuyo valor de tiempo sea 4 veces el correspondiente al primer punto; la diferencia entre los valores de deformación ( $x$ ) entre los dos puntos permite definir el inicio de la consolidación ( $d_0$ ). Al extender dos rectas tangentes, una de ellas en el tramo intermedio y la otra tangente al

tramo final, en el cruce de estas se podrá definir la deformación para la cual se ha completado la consolidación primaria ( $d_{100}$ ). Si se encuentra el punto intermedio entre las rectas horizontales que definen el inicio y el fin de la consolidación primaria, encontraremos la deformación en el eje de las ordenadas ( $d_{50}$ ) y el tiempo ( $t_{50}$ ) en el eje de las abscisas para un grado de consolidación del 50%. El valor del coeficiente de consolidación puede ser calculado en base a la ecuación 2.14., considerando un valor de  $T_v$  para el grado de consolidación  $U$  del 50%.



*Figura 2.6. Método de Casagrande para determinar el coeficiente de consolidación  $c_v$ . Fundamentos de ingeniería geotécnica. (p.210). Das, 2015, México D.F.: CENGAGE Learning Editores S.A.*

### 2.8.2. Método de Taylor o de la raíz del tiempo ( $t_{90}$ )

Según Barnes (2016)., Taylor en 1948 encontró que la teoría de consolidación de Terzaghi tenía una tendencia lineal cuando la deformación se graficaba con respecto a la raíz del tiempo al menos hasta el 60% de la consolidación y también que el 90% de la consolidación ocurría a 1.15 veces de la extrapolación de la porción lineal de la curva.

Inicialmente se debe trazar una recta (AB) en el tramo de la curva que tenga una tendencia lineal, la cual debe cortar el eje de las ordenadas en un punto A y debe extenderse hasta cruzar con una línea horizontal de referencia que no debe cortar la curva, en el punto B. A partir de la distancia entre este punto de corte y el origen (OB), debe hallarse un punto C de tal manera que la distancia entre este punto con respecto al origen, se igual a 1.15 veces la distancia OB. Posteriormente deben unirse con una recta los puntos A y C, lo cual generará dos puntos de intersección en la curva, de los cuales el que se encuentra más alejado del origen,

con respecto al eje de las abscisas, determinará el  $\sqrt{t_{90}}$ . El valor del coeficiente de consolidación puede ser calculado en base a la ecuación 2.14, considerando un valor de  $T_v$  para el grado de consolidación  $U$  del 90%.

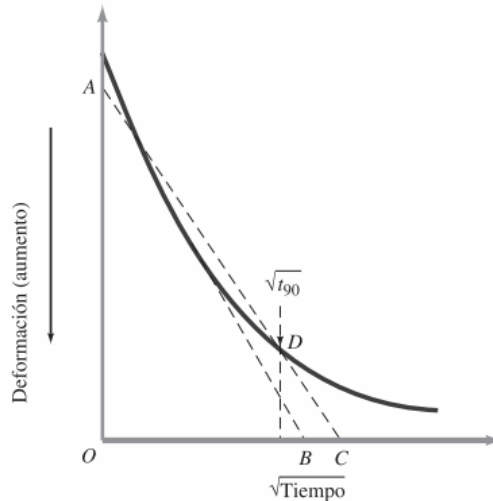


Figura 2.7. Método de Taylor para determinar el coeficiente de consolidación  $c_v$ . *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. (p. 211). Das, 2015, México D.F.: CENGAGE Learning Editores S.A.

### 2.8.3. Medida de la presión de poro-referencia: Método de Stanichevsky

En teoría, la presión de poros es el parámetro que define el comportamiento de consolidación de una muestra, dado que, a partir de este se puede determinar directamente el grado de consolidación según la ecuación 2.15. Así mismo, se puede estimar el tiempo exacto para un grado de consolidación específico, y calcular el coeficiente de consolidación correspondiente a este.

El método establecido por Stanichevsky, pretende determinar el coeficiente de consolidación en base a la disipación de la presión de poros, relacionando el factor tiempo ( $T_v$ ) y la relación entre la presión de poros a una profundidad ( $u_z$ ) y la presión de poros inicial ( $u_0$ ), mediante la siguiente figura:

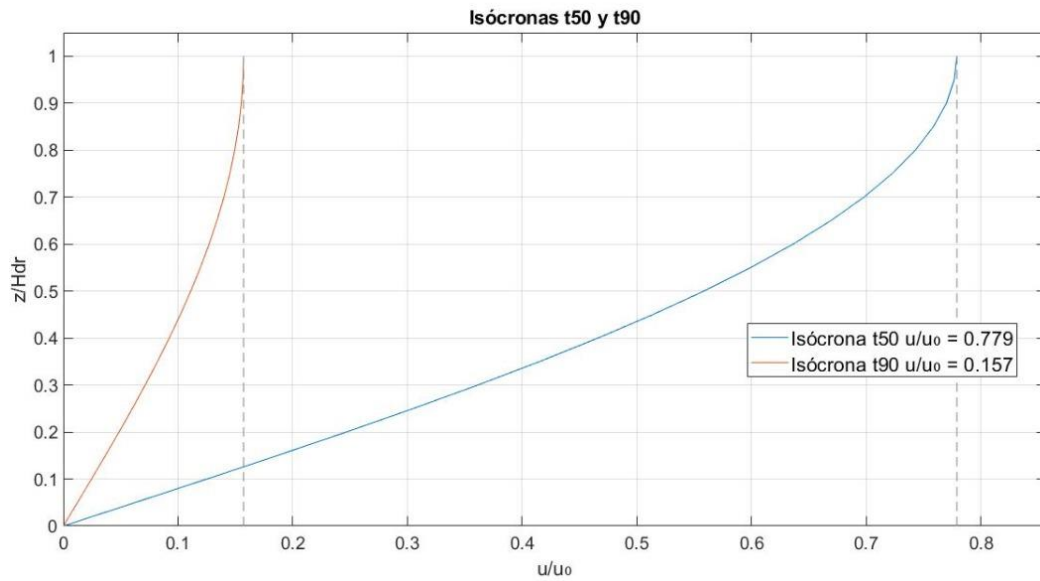


Figura 2.8. Isócronas de la metodología de Stanichevsky. Elaboración propia.

Para la obtención de la figura 2.7, se debe emplear la fórmula para la obtención de la presión de poros para cualquier profundidad  $z$ , ecuación 2.13, implementando el factor tiempo ( $T_v$ ) correspondiente al grado de consolidación ( $U\%$ ) del que se desea analizar el tiempo. Este valor debe relacionarse con la presión de poros inicial y analizarse para toda la altura de la muestra. Como resultado obtendremos un valor de relación entre  $u/u_0$ , los cuales se deben ser proyectados horizontalmente en la curva de disipación de presión de poros respecto al tiempo. La proyección con respecto al eje de las abscisas corresponderá al tiempo para el grado de consolidación en cuestión.

### 3. DISEÑO DEL EQUIPO

#### 3.1. *Principios básicos de diseño*

El ensayo convencional de consolidación normalizado sustenta su análisis en el monitoreo de la deformación en la superficie de una probeta respecto al tiempo, y la variación de volumen en relación con el incremento de esfuerzos aplicado. Sin embargo, el objetivo de este estudio se enfoca en la observación de la variación del exceso de la presión de poros, en el fondo o base del equipo, por cada estado de carga implementado.

El prototipo tiene como base el esquema presentado en la figura 3.1., dónde se pretende consolidar una muestra inalterada dentro del tubo de muestreo. Para esto se considera un tubo U-100 con una longitud de 100 mm apropiada para el ensayo. Al espécimen de suelo se le aplica una carga por medio de un pistón asegurando que no exista fricción entre este y la pared del tubo. Además, se considera la colocación de un disco poroso entre el pistón y la muestra para permitir el drenaje de agua; así mismo es posible medir el cambio en la presión de poros por medio de la conexión de un tubo capilar en la parte inferior-central, el cual requiere de una capa de arena gruesa completamente saturada y libre de aire, que debe estar contenida entre dos mallas de alambre fino. (Head, 1994).

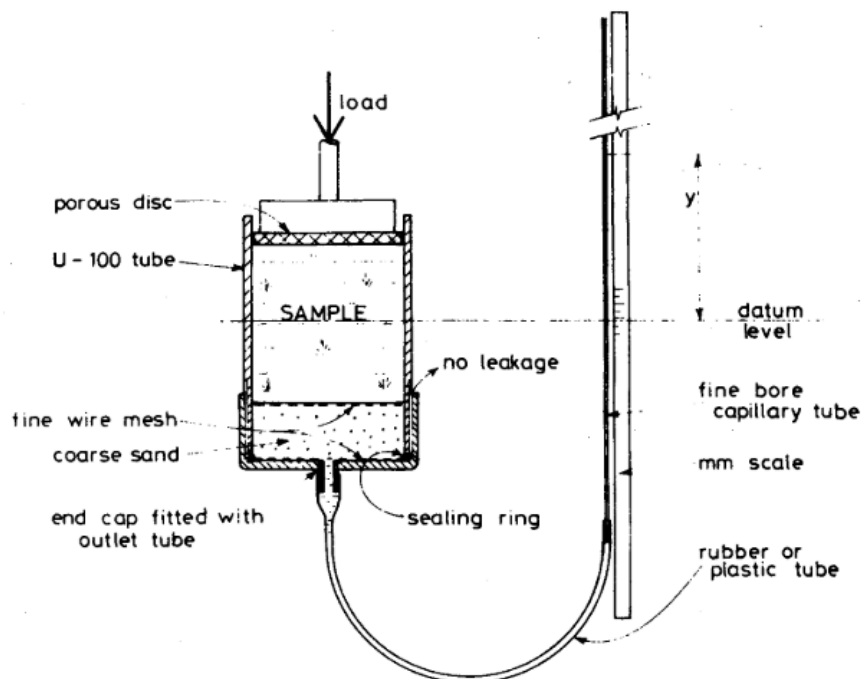


Figura 3.1. Método simple para la medición de presión de poros utilizando un tubo de capilaridad. En *Manual of soil laboratory testing, volume 2. Permeability, shear strength and compressibility tests.* (p. 417), por Head, 1994, New York – Toronto: JOHN & SONS, INC.

Según Head (1994), durante el inicio de la prueba, el agua contenida dentro del tubo capilar debe ascender hasta la mitad de la altura del espécimen, considerada como nivel de referencia, mientras que, cada lectura de altura de agua “y”, medida a partir de este nivel, debe ser medida simultáneamente con cada lectura de deformación. De igual forma, menciona que se requiere aproximadamente 1 m de tubo capilar sobre el nivel de referencia por cada 10 kPa de presión aplicada.

Para la ejecución de este estudio se consideró como base las premisas previamente mencionadas, con ciertas modificaciones adaptadas a edómetros más actuales y basados en la norma ASTM D2435. Por ejemplo, en la parte inferior de la muestra se utilizó una piedra porosa, en lugar de una capa de arena gruesa; a su vez para mensurar la presión de poros se utilizó un sensor de presión, en lugar de tomar alturas por medio de un tubo capilar. Por último, en la parte superior se colocó un disco de acrílico con el objetivo de modificar el tipo de drenaje de la muestra en un solo sentido, concentrando de esta forma la disipación de la presión de poros en la parte inferior-central del dispositivo.

### 3.2. Funcionamiento

Un consolidómetro es un dispositivo diseñado para contener una muestra de suelo en un anillo rígido que se encuentra entre dos discos porosos, el cual permite la aplicación de un esfuerzo vertical en la cara superior de la muestra restringiendo su deformación lateral. A su vez, este instrumento puede ser rellenado de agua con el objetivo de inundar el espécimen dentro de este. (ASTM 2435/D2435M-11, 2011).

El equipo empleado en este estudio funciona como cualquier edómetro común permitiendo aplicar la presión por medio del brazo de carga, con la particularidad de que este es capaz de medir deformación y presión de poros de manera simultánea en el tiempo. Para obtener mejores lecturas de presión es necesario reemplazar la piedra porosa de la parte superior con un disco de acrílico de dimensiones similares, con el objetivo de concentrar la presión de poros hacia la parte inferior.

En el prototipo se colocó en la parte inferior, entre la base y el anillo, inmediatamente sobre la ranura para la piedra porosa, un sello hidráulico por medio de un empaque (o’ring), con el propósito de controlar fugas de presión entre la base y el anillo.

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

Es requerido un programa de computadora mediante el cual sea posible la adquisición de datos de estos parámetros y a su vez que nos muestre en tiempo real los datos registrados para el control del ensayo. El Laboratorio de Materiales de Construcción – PUCE, dispone del programa DS7.1 de la empresa *ELE International* que comprende las funciones mencionadas anteriormente. Dentro del software se programó dos parámetros A y B, correspondientes a la presión de poros en kPa y deformación en mm, respectivamente.

El programa DS7.1 es un sistema de compilación y análisis de datos geotécnicos creado y distribuido por la empresa internacional *ELE International*. Este software permite la recolección en tiempo real de diferentes tipos de datos relacionados a ensayos aplicados a suelos, según las normativas BS, ASTM y AASHTO (ELE International). Este funciona a través de una unidad geotécnica de recolección de datos (GDU) que recopile las señales enviadas por los transductores implementados y, en conjunto al programa, los convierta en datos legibles para el usuario.

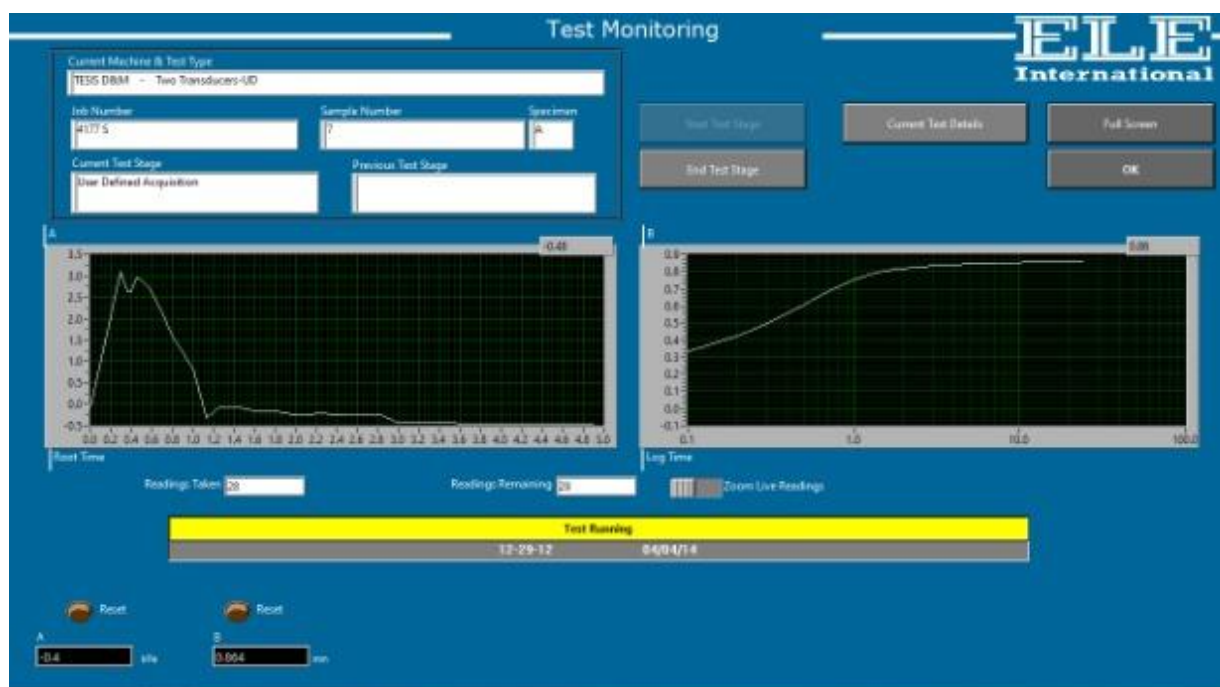


Figura 3.2. Captura de pantalla del DS7.1

### 3.3. Diseño del equipo

#### 3.3.1. *Requerimientos del equipo*

El equipo diseñado cumple con los requerimientos dimensionales establecidos en la norma ASTM D2435, los cuales son:

*Tabla 3.1. Comparativa de requisitos geométricos según la norma ASTM D2435.*

<b>Requerimiento ASTM D2435</b>		<b>Dimensión empleada</b>
Diámetro mínimo del anillo	50 mm	$65 \pm 0.5$ mm
Altura mínima del anillo	12 mm	$25 \pm 0.2$ mm
Relación D/H mínima	2.5	$2.6 \pm 0.05$

El diseño se basó en el modelo de edómetro de 2.5 pulgadas distribuido por ELE International. Debido a la necesidad de medir la presión de poros en la parte inferior-central de la muestra, se tuvo que incrementar la altura de la base del dispositivo para generar una salida lateral de agua que permita el acople del sensor de presión de poros.



*Figura 3.3. Edómetro de 2.5 pulgadas distribuido por ELE International. En “Consolidation Cell Complete 2.5 Inch Diameter Sample. Inc. Porous Discs and Cutting Ring”, por ELE International, 2022,*

# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

## 3.3.2. Planos de diseño

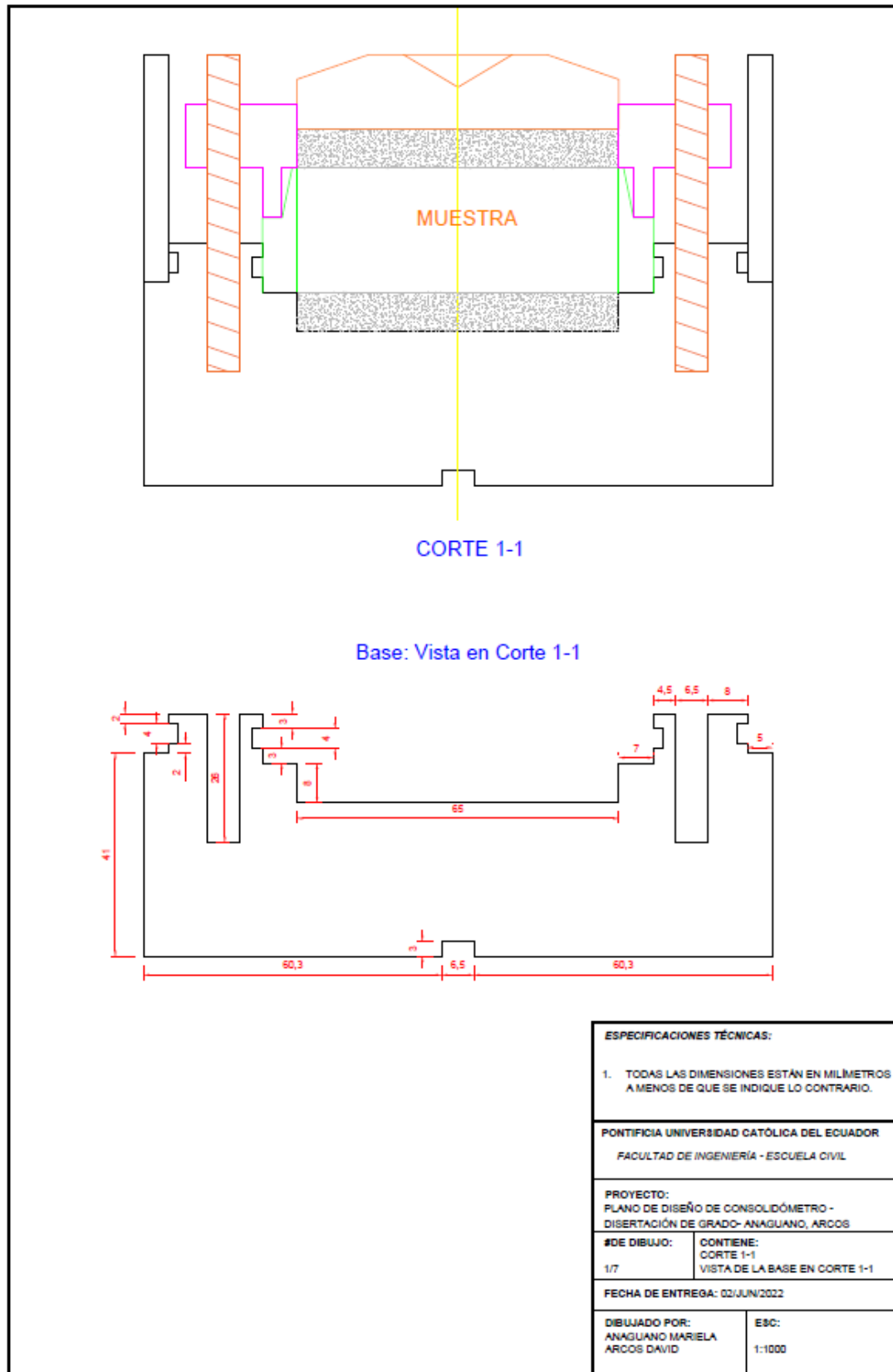


Figura 3.4. Plano de diseño del consolidómetro. Corte 1-1. Vista de la base en corte 1-1. Elaboración propia.



# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

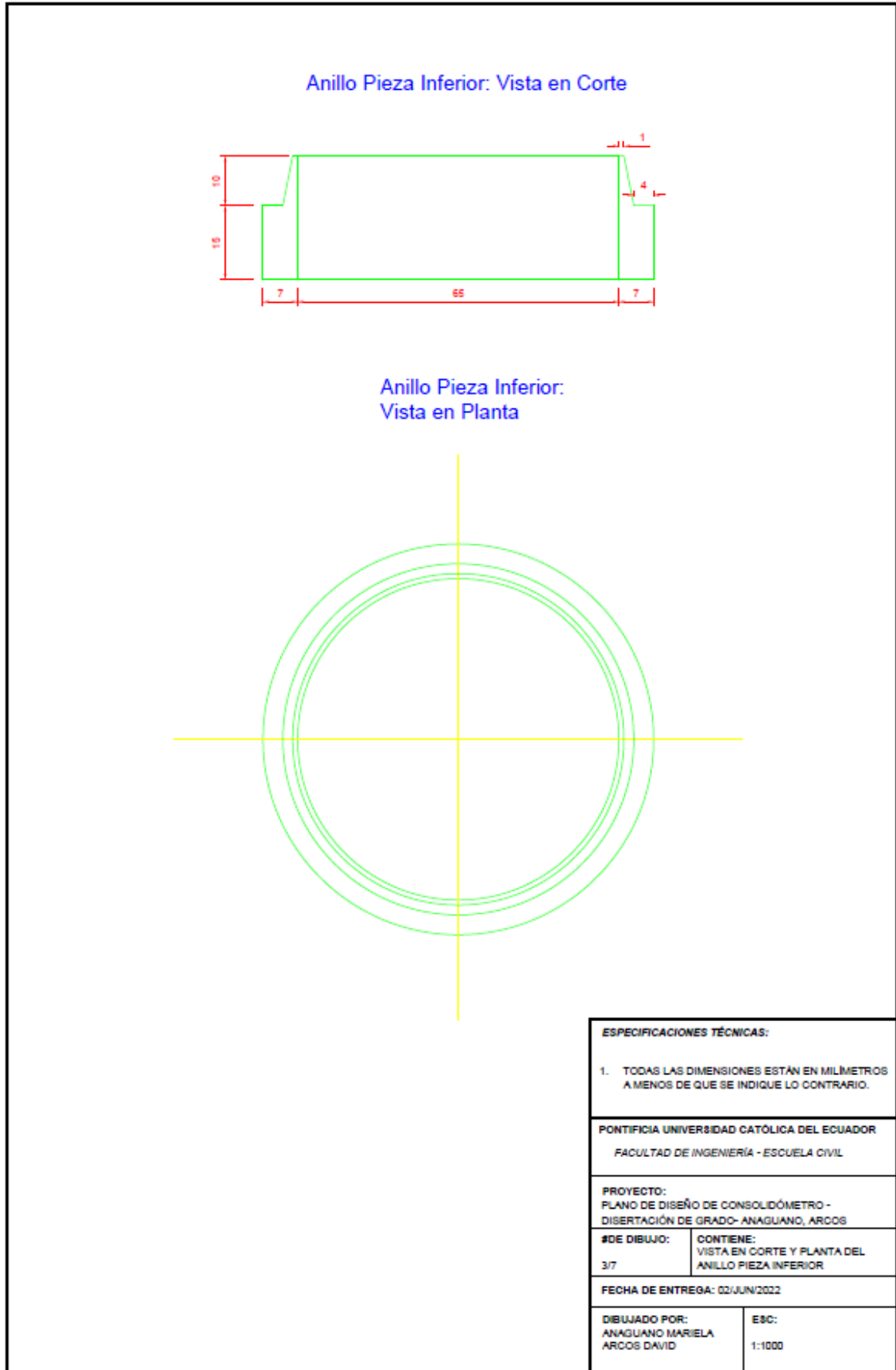


Figura 3.6. Plano de diseño del consolidómetro. Vista en corte y planta del anillo pieza inferior. Elaboración propia

# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

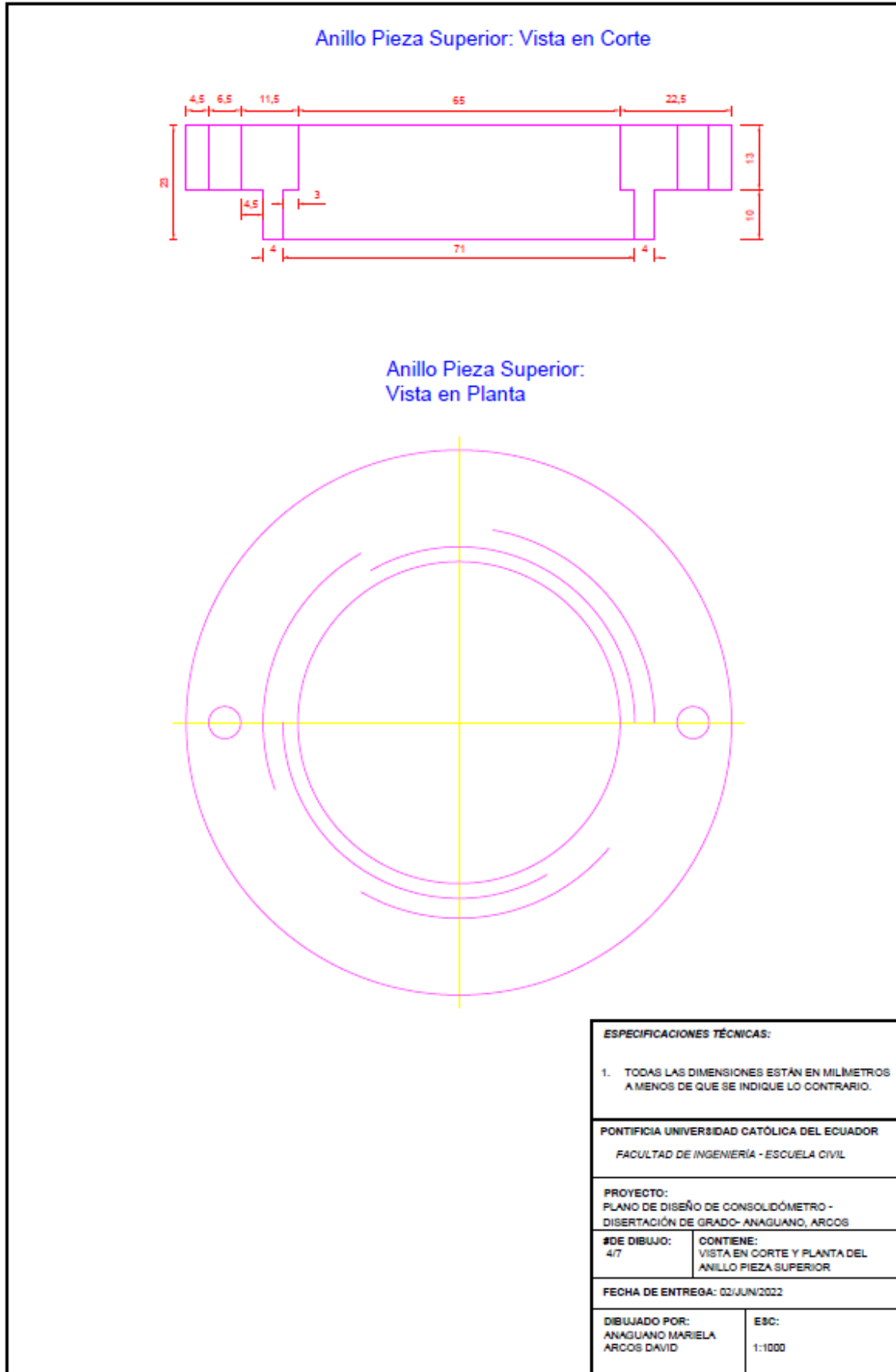


Figura 3.7. Plano de diseño del consolidómetro. Vista en corte y planta del anillo pieza superior. Elaboración propia.

# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

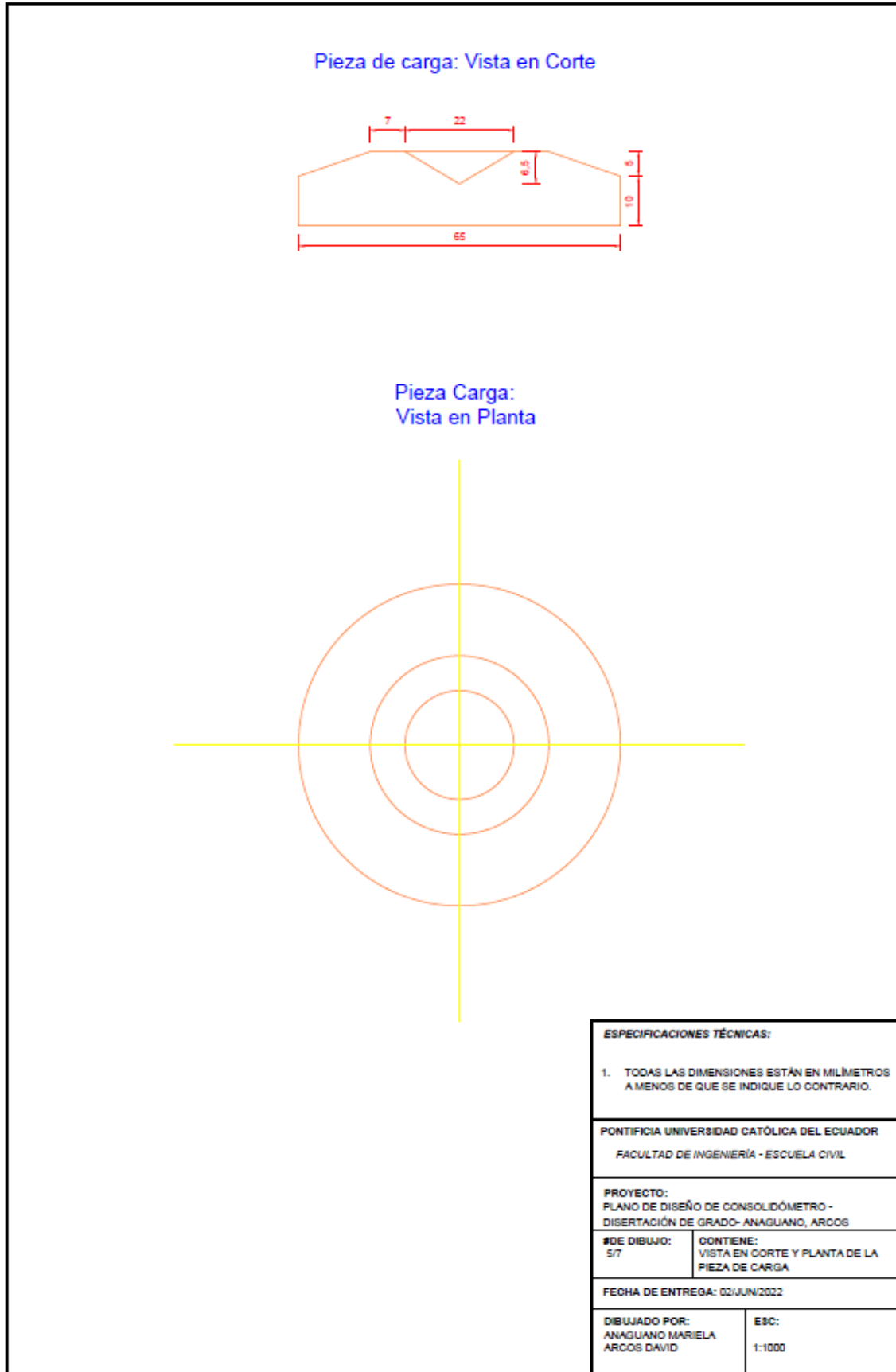


Figura 3.8. Plano de diseño del consolidómetro. Vista en corte y planta de la pieza de carga. Elaboración propia.

# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

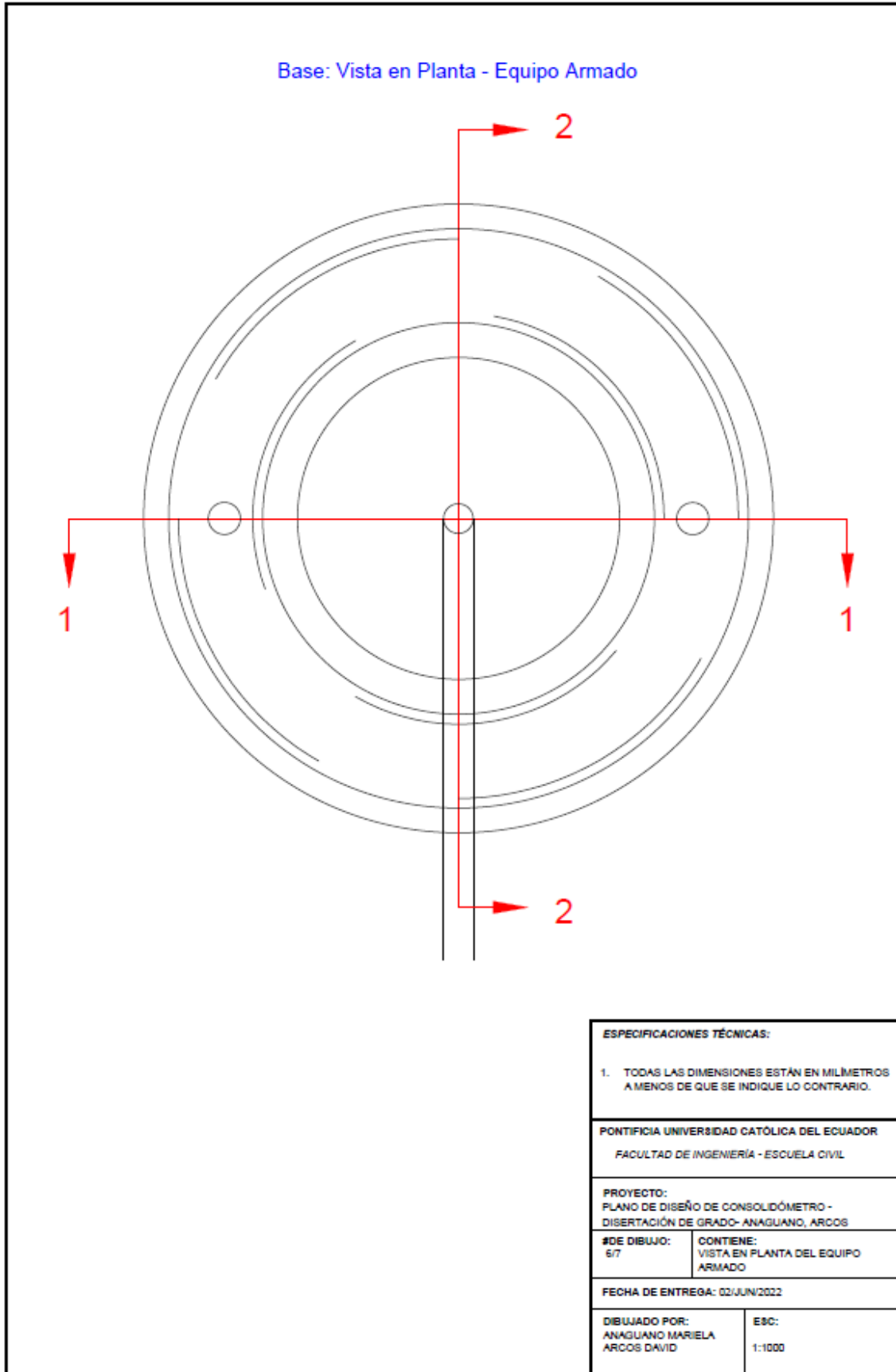


Figura 3.9. Plano de diseño del consolidómetro. Vista en planta del equipo armado. Elaboración propia.

# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

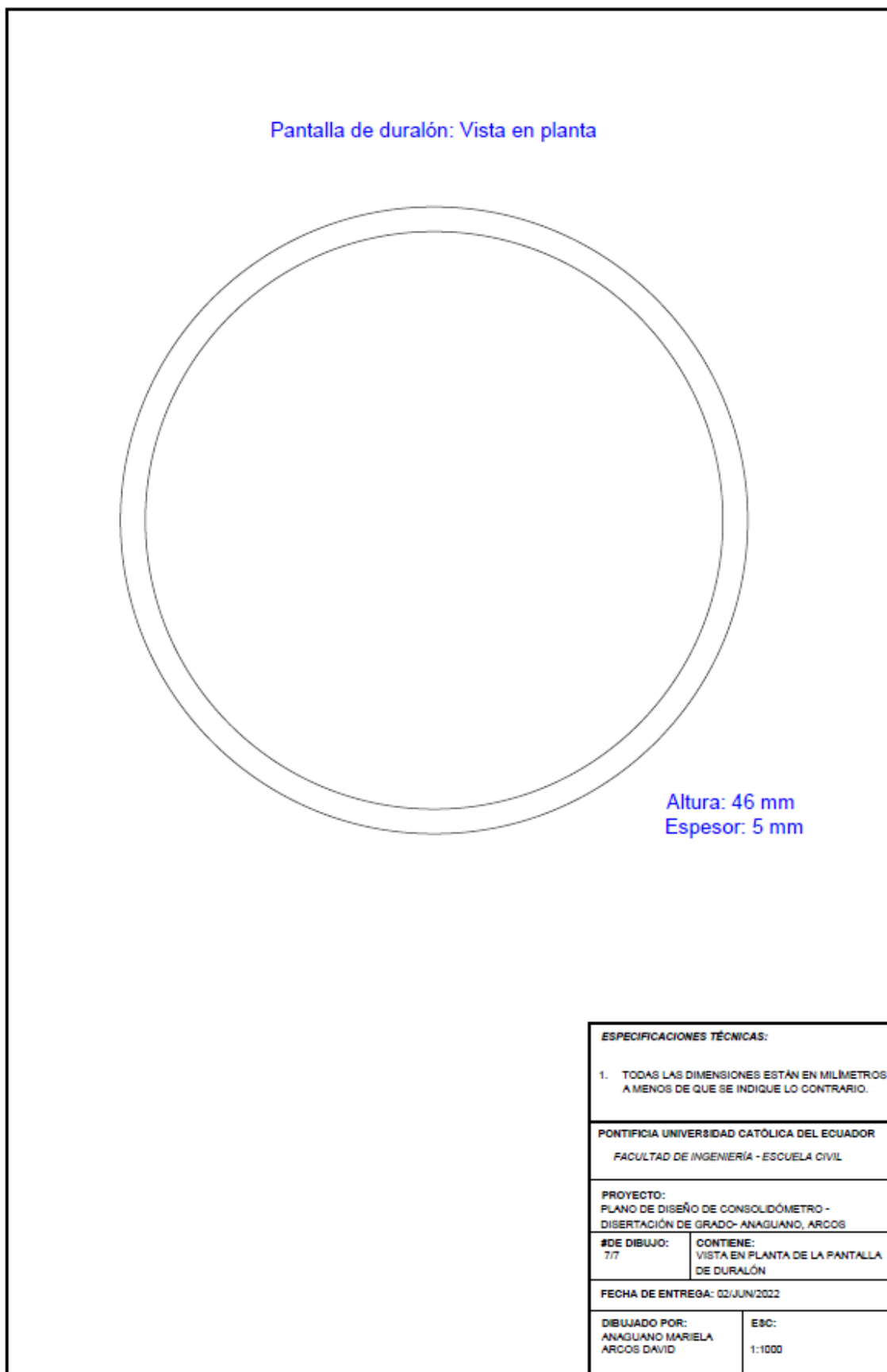


Figura 3.10. Plano de diseño del consolidómetro. Vista en planta de la pantalla de duralón. Elaboración propia.

### 3.3.3. *Materiales*

#### 3.3.3.1. *Bronce dulce*

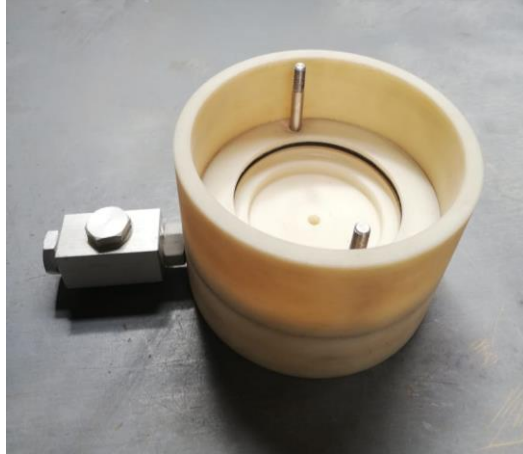
El bronce dulce es una aleación de cobre y zinc, cuya ductilidad permite generar láminas o tubos a través del laminado en frío. Es un material resistente a la corrosión, desgaste y oxidación. (DAVICOM, 2022a). Se empleó este material en la elaboración del anillo y la guía de este para limitar la deformación lateral de la muestra, así como para soportar las condiciones de inundación que requiere el ensayo.



*Figura 3.11.* Piezas constituidas de bronce dulce.

#### 3.3.3.2. *Duralón*

El duralón es un polímero de alta dureza, baja resistencia a la fricción, y alta resistencia a los químicos. Es empleado en la elaboración de engranajes y cojinites que no requiere lubricación, partes eléctricas que no requieren altas temperaturas, o de alto impacto que requieren alta densidad. (DAVICOM, 2022b). Se empleó este material para la construcción de la base de edómetro, considerando su alta resistencia, y su bajo costo.



*Figura 3.12. Piezas constituidas de duralón.*

### *3.3.3.3. Acrílico*

El acrílico es un material transparente, flexible y de alta dureza, que se implementa principalmente en la construcción. Su dureza es equiparable con la del cobre o el latón, y es resistente al agua y a diferentes tipos de químicos. (ComoFunciona, 2022). Fue empleado para limitar el drenaje de la muestra a una sola dirección.



*Figura 3.13. Disco de acrílico.*

### *3.3.3.4. Piedras porosas*

Las piedras porosas son elementos cilíndricos fabricados a partir de óxido de aluminio de un diámetro y espesor definidos. Generalmente poseen un diámetro de 63 a 65 mm y un espesor de alrededor de 6 mm. Estos tienen una alta conductividad hidráulica de 15 a 18 pies cúbicos de aire por minuto, con un tamaño promedio de poro, de alrededor de 179 micras. (GILSON COMPANY INC., 2022). En el ensayo de consolidación son empleadas para

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

permitir el drenaje de la muestra. En base a sus propiedades de hidráulicas, se espera que su impedancia hidráulica no sea lo suficientemente grande como para generar afectaciones al flujo de agua evacuado por la probeta durante el ensayo de consolidación.



Figura 3.14. Piedras porosas.

### 3.3.3.5. Empaques (O'ring)

Los o'ring, también conocidos como aros de goma, constituyen un sello eficaz para evitar la pérdida o fuga de líquidos y gases, puesto que son económicos y requieren espacios reducidos. (Gomez Sellados, 2022). Se emplearon dos de estos, uno de ellos en la parte inferior de la muestra para evitar fugas de presión y otra en la parte externa de la base de la cámara para evitar la salida de agua.

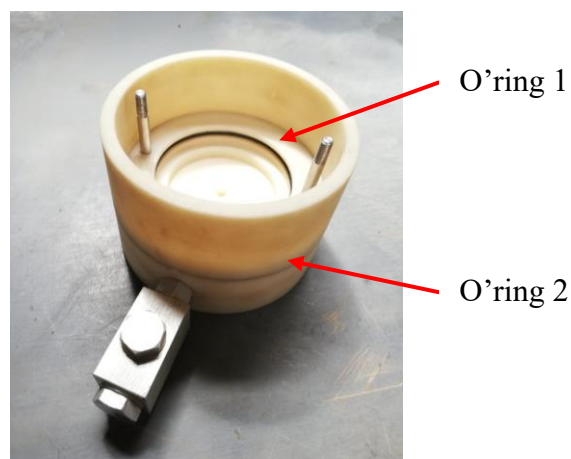
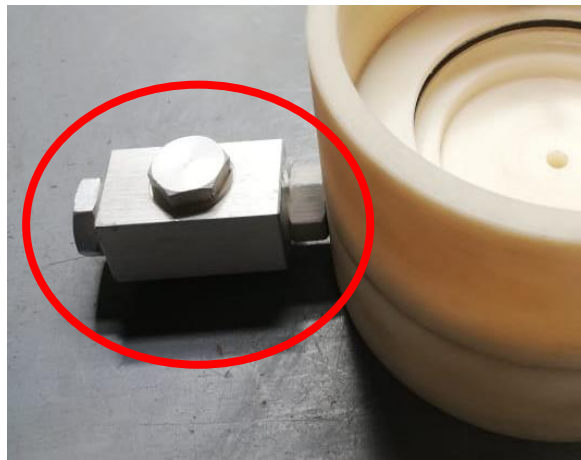


Figura 3.15. Ubicación de los o'rings en la base de la cámara.

### 3.3.3.6. *Transductor de presión*

Los transductores de presión son utilizados con el objetivo de medir presiones de celda, poros y contrapresión durante las pruebas en triaxiales. Estos cuentan con un bloque de desaireación, conector DIN de 5 pines y un certificado de calibración. (ELE International, 2019). El sensor utilizado se conoce en el mercado como “*Pressure Transducer Assembly 1700 kPa Fitted with 5-pin DIN Plug*”, el cual cuenta con una capacidad máxima de lectura de 1700 kPa, con el objetivo de medir la disipación de la presión de poros en la parte inferior de la muestra.



*Figura 3.16.* Bloque de desaireación.



*Figura 3.17.* Transductor de presión.

### *3.4. Metodología de prueba del prototipo*

Para comprobar la funcionalidad del equipo es necesario establecer una muestra patrón en la cual se pueda aplicar un procedimiento de preparación que genere un espécimen homogéneo y replicable. Para lograr este propósito se ha seleccionado un caolín adquirido a la empresa EDESA S.A., para el cual es necesario caracterizar sus propiedades y comprobar que dichas características no suponen una variable para el ensayo de consolidación. Por otro lado, el proceso de obtención de probetas homogéneas y uniformes está basado en el tratamiento descrito por Sachan et al. (2013), en su investigación aplicada a un material de características similares.

Una vez logrados los objetivos anteriormente mencionados, el prototipo será implementado específicamente para el ensayo de consolidación según la norma ASTM D2435, contemplando la lectura de presión de poros como su diseño lo pretende. De estas pruebas, se obtendrán las curvas de compresibilidad, de consolidación, y de disipación de la presión de poros; de las cuales se elaborará un análisis estadístico para comprobar la uniformidad de las muestras respecto a su comportamiento, y un análisis que compare los resultados de deformación y de presión de poros en función del grado de consolidación. (Mocha, 2019).

#### **4. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA PATRÓN Y SUS RESULTADOS**

La presente investigación utilizó un tipo de caolín, denominado: “Caolín Prosper 2021”, adquirido en Edesa S.A, Quito, Ecuador; el cual es utilizado para la elaboración de cerámica. El cual posee la siguiente ficha técnica:

*Tabla 4.1. Rangos para Caolín Prosper 2021.*

<b>Rangos para Caolín Prosper 2021</b>		
<b>Parámetros</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
% Humedad	7.0	11.0
Densidad, g/L	1632.00	1700.00
Residuo M/140, %p/v	0.1	0.5
Viscosidad mínima, cP	100.00	300.00
Tixotropía, cP	0.00	100.00
Baroid húmedo, g	125.00	225.00
Humedad retenida en baroid, %	20.00	30.00
Sulfatos, mg/kg material seco	140.00	220.00
% pérdidas por calcinación	10.00	12.00
% absorción	7.00	10.50
% contracción en crudo	1.60	2.60
% contracción total	9.50	11.50
Deflexión, mm	18.00	26.00
MOR crudo, psi	70.00	90.00

Nota: Edesa S.A., 2021.

##### 4.1. Ensayos de la muestra patrón

Debido al objetivo y alcance de la investigación el proceso de muestreo del lote no es relevante. Los 100 kg disponibles en el laboratorio fueron homogeneizados y a partir de estos se realizaron los procesos de reducción a tamaños requeridos para cada ensayo de caracterización.

A continuación, se presenta una tabla resumen de los ensayos a ser realizados en la muestra adquirida en Edesa S.A. Estos ensayos fueron realizados por triplicado y ejecutados por el mismo operador.

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

*Tabla 4.2. Resumen de ensayos realizados sobre la muestra patrón.*

<b>Ensayo</b>	<b>Normativa</b>	<b>Objetivo del ensayo</b>	<b>Parámetros determinados</b>
Gravedad específica de los sólidos del suelo por medio del picnómetro	ASTM D854-14	Determinar la gravedad específica de la parte sólida del suelo pasante del tamiz N°4.	$G_s$
Contenido de humedad	ASTM D2216-19	Determinar el contenido de agua (humedad) de la masa de suelo.	%w
Análisis del tamaño de partículas de suelos	ASTM D6913-17	Determinación del tamaño de grano retenido en el tamiz N°200.	Tamaño de partículas mayores a 75 $\mu\text{m}$ .
Distribución del tamaño de partículas (gradación) de suelos de grano fino utilizando el análisis de sedimentación por hidrómetro	ASTM D7928-21	Determinación del tamaño de grano pasante del tamiz N°200.	Tamaño de partículas menores a 75 $\mu\text{m}$ .
Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad en suelos	ASTM D4318-17	Determinar el contenido de agua en el cual el suelo cambia su nivel de consistencia.	LL, LP, IP
Determinación del límite de contracción de suelos cohesivos por el método de mercurio	ASTM D427-04	Determinar el contenido de agua en el cual el suelo cambia su nivel de consistencia.	LC
Consolidación unidimensional de suelos	ASTM D2435-11	Determinar propiedades de consolidación unidimensional de suelos.	$a_v, m_v, C_c, C_s, e_o, P_o, OCR, E$

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

---

Método de prueba estándar para las características dispersivas del suelo arcilloso por hidrómetro doble	ASTM D4221-18	Proporcionar un índice de las características de dispersión natural de suelos arcillosos.	% <i>Dispersión</i>
Clasificación de suelos para propósitos ingenieriles (SUCS)	ASTM D2487-17	Determinar la simbología y la descripción de un suelo determinado.	-

---

### 4.1.1. Gravedad específica (*G<sub>s</sub>*)

Este método de ensayo determina la gravedad específica de los sólidos del suelo pasantes del tamiz N°4, con una abertura de 4.75 mm, mediante el uso de un picnómetro, de 250 ml o 500 ml, agua destilada, baño maría, termómetro y una bomba de vacío. La obtención de este parámetro es fundamental para el cálculo de relaciones fundamentales en especímenes de suelos, por ejemplo: relación de vacíos (*e*) y el grado de saturación (*S*). (ASTM D854-14, 2014).

Para esta investigación se utilizó el método A, procedimiento para muestras húmedas, en picnómetros de 250 ml, considerando que la masa mínima de suelo seco es de  $35 \pm 5$  g.

Es importante mencionar que previo a la ejecución del ensayo es necesario seguir un proceso de calibración de los picnómetros utilizados, donde posterior a la extracción de la mayor cantidad de vacío posible del agua destilada, se pesa cada picnómetro lleno de agua destilada a diferentes temperaturas.

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

*Tabla 4.3. Contenido de humedad higroscópica para los ensayos de Gs.*

<b>CONTENIDO DE HUMEDAD HIGROSCÓPICA</b>			
<b>Mc (g)</b>	<b>Mc+sh (g)</b>	<b>Mc+ss (g)</b>	<b>%Humedad</b>
16.89	58.65	57.44	2.98
17.66	63.09	61.81	2.90
<b>% Humedad promedio</b>			<b>2.94</b>

*Tabla 4.4. Resultados de Gs 1.*

<b>Descripción</b>	GS-1
<b>Operadora</b>	Mariela Anaguano
<b>CALIBRACIÓN</b>	
<b>Identificación matraz (g)</b>	S01
<b>Masa Matraz (g)</b>	102.32
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Masa del matraz + agua (g)</b>
20.5	351.45
20.7	351.43
<b>ENSAYO</b>	
Masa Suelo Natural (g)	40.01
Masa de suelo seco (g)	38.87
Masa Matraz (g)	102.32
Masa Matraz + agua (g)	351.45
Masa Matraz + agua + suelo (g)	375.69
Temperatura (°C)	20.5
Cápsula de Evaporación	GS2
Masa Cápsula (g)	255.68
Masa Cápsula+ Suelo seco (g)	294.40
<b>CÁLCULOS</b>	
Peso específico del agua (g/cm <sup>3</sup> )	0.9981
Coficiente de temperatura (K)	0.9999
Volumen del picnómetro (cm <sup>3</sup> )	249.60
Masa del picnómetro + agua a la temperatura del ensayo (g)	351.45
Gt	2.67
<b>GS</b>	<b>2.67</b>

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

*Tabla 4.5. Resultados de Gs 2.*

<b>Descripción</b>	GS-2
<b>Operadora</b>	Mariela Anaguano
<b>CALIBRACIÓN</b>	
<b>Identificación matraz (g)</b>	S02
<b>Masa Matraz (g)</b>	112.06
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Masa del matraz + agua (g)</b>
20.4	361.65
20.5	361.62
<b>ENSAYO</b>	
Masa Suelo Natural (g)	40.00
Masa de suelo seco (g)	38.86
Masa Matraz (g)	112.06
Masa Matraz + agua (g)	361.62
Masa Matraz + agua + suelo (g)	385.66
Temperatura (°C)	20.5
Cápsula de Evaporación	A1
Masa Cápsula (g)	315.01
Masa Cápsula+ Suelo seco (g)	353.44
<b>CÁLCULOS</b>	
Peso específico del agua (g/cm <sup>3</sup> )	0.9981
Coeficiente de temperatura (K)	0.9999
Volumen del picnómetro (cm <sup>3</sup> )	250.04
Masa del picnómetro + agua a la temperatura del ensayo (g)	361.62
Gt	2.67
<b>GS</b>	<b>2.67</b>

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

*Tabla 4.6. Resultados de Gs 3.*

<b>Descripción</b>	GS-3
<b>Operadora</b>	Mariela Anaguano
<b>CALIBRACIÓN</b>	
<b>Identificación matraz (g)</b>	S03
<b>Masa Matraz (g)</b>	105.00
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Masa del matraz + agua (g)</b>
20.5	354.29
20.7	354.26
<b>ENSAYO</b>	
Masa Suelo Natural (g)	40.00
Masa de suelo seco (g)	38.86
Masa Matraz (g)	105.00
Masa Matraz + agua (g)	354.26
Masa Matraz + agua + suelo (g)	378.35
Temperatura (°C)	20.7
Cápsula de Evaporación	820
Masa Cápsula (g)	307.54
Masa Cápsula+ Suelo seco (g)	345.78
<b>CÁLCULOS</b>	
Peso específico del agua (g/cm <sup>3</sup> )	0.99806
Coeficiente de temperatura (K)	0.99985
Volumen del picnómetro (cm <sup>3</sup> )	249.74
Masa del picnómetro + agua a la temperatura del ensayo (g)	354.26
Gt	2.70
<b>GS</b>	<b>2.70</b>
<b>GS promedio</b>	<b>2.68</b>

#### 4.1.2. Clasificación SUCS

Para propósitos de ingeniería es necesario contar con una clasificación convencional y detallada capaz de proporcionar un lenguaje común para definir características generales en distintos tipos de suelos. Para propósitos de ingeniería se utilizó el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), en base a la norma ASTM D2487-17.

Este sistema de clasificación involucra varios ensayos, con los cuales se determinará una simbología y una descripción específica para una muestra dada.

A continuación, se presentará el resultado de los ensayos involucrados para determinar la clasificación de la muestra patrón, los cuales son:

##### 4.1.2.1. Contenido de humedad

Este método de ensayo cubre la determinación de la cantidad de agua (humedad) contenida en la masa de suelo, calculada como la relación entre la masa de agua contenida en los espacios vacíos, respecto a la masa sólida de las partículas de suelo. (ASTM D2216-19, 2019).

*Tabla 4.7. Resultados del contenido de humedad de la muestra patrón.*

<b>Operador</b>		David Arcos		
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD 1</b>				
<b>Cápsula</b>	<b>Peso cápsula (g)</b>	<b>Peso cápsula + suelo húmedo (g)</b>	<b>Peso cápsula + suelo seco (g)</b>	<b>%Humedad</b>
L41	18.46	72.93	70.70	4.27
PS01	17.27	74.88	72.58	4.16
Promedio				<b>4.21</b>
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD 2</b>				
<b>Cápsula</b>	<b>Peso cápsula (g)</b>	<b>Peso cápsula + suelo húmedo (g)</b>	<b>Peso cápsula + suelo seco (g)</b>	<b>%Humedad</b>
L22	17.77	72.95	70.64	4.37
PS30	17.67	77.85	75.28	4.46
Promedio				<b>4.42</b>
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD 3</b>				

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

<b>Cápsula</b>	<b>Peso cápsula (g)</b>	<b>Peso cápsula + suelo húmedo (g)</b>	<b>Peso cápsula + suelo seco (g)</b>	<b>%Humedad</b>
PS20	17.07	71.32	69.03	4.41
41z	17.91	69.52	67.24	4.62
Promedio				<b>4.51</b>
<b>Humedad promedio (%)</b>				<b>4.38</b>

*4.1.2.2. Granulometría por lavado y tamizado*

El análisis granulométrico por lavado y tamizado consiste en separar las partículas de suelo en función a rangos de tamaño, determinando así la masa correspondiente a cada uno de estos. (ASTM D6913-17, 2017). Para la ejecución de este ensayo en primer lugar, se obtuvo una muestra representativa la cual procedió a ser lavada a través del tamiz N°40 (0.425mm) y N°200 (75um), hasta que el agua de lavado sea transparente. Posteriormente, el material retenido en los tamices fue puesto a secar a una temperatura de 110°C durante un periodo de 24h. Finalmente, el material seco fue tamizado a través del tamiz N°4 (4.75 mm) hasta el N°200, registrando el peso retenido acumulado de cada uno de estos.

*Tabla 4.8. Resultados de la granulometría 1.*

<b>Operador</b>		David Arcos	
<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO 1</b>			
Recipiente N°		MS202	
Peso total de suelo húmedo (g)		126.41	
<b>Tamiz N°</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Peso retenido acumulado (g)</b>	<b>% Pasante</b>
4	4.75	0.00	100.00
10	2.00	0.00	100.00
40	0.425	0.05	99.96
200	0.075	0.60	99.53

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

*Tabla 4.9. Resultados de la granulometría 2.*

<b>Operador</b>		David Arcos	
<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO 2</b>			
<b>Recipiente N°</b>		MS115	
Peso total de suelo húmedo (g)		129.80	
<b>Tamiz N°</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Peso retenido acumulado (g)</b>	<b>% Pasante</b>
4	4.75	0.00	100.00
10	2.00	0.00	100.00
40	0.425	0.05	99.96
200	0.075	0.42	99.67

*Tabla 4.10. Resultados de la granulometría 3.*

<b>Operador</b>		David Arcos	
<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO 3</b>			
<b>Recipiente N°</b>		MS302	
Peso total de suelo húmedo (g)		132.2	
<b>Tamiz N°</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Peso retenido acumulado (g)</b>	<b>% Pasante</b>
4	4.75	0.00	100.00
10	2.00	0.00	100.00
40	0.425	0.08	99.94
200	0.075	0.51	99.60

#### 4.1.2.3. Límites de Atterberg (LL, LP, IP)

Para la determinación del límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP), se siguió el procedimiento de método húmedo (A) para la preparación de muestra y el método multipunto, mediante el uso de la copa de Casagrande, ranurador con una abertura de 3 mm y agua destilada. La obtención de estos parámetros físicos, individualmente o en conjunto, pueden ser correlacionados con diversos comportamientos en la ingeniería, como la compresibilidad, conductividad hidráulica, entre otros. (ASTM D4318-17, 2017).

##### *Preparación de la muestra:*

Debido a que el material poseía un contenido de humedad bajo, en promedio el 4.38%, fue necesario obtener el material pasante del tamiz N°40 (0.425 mm) y dejarlo sumergido en agua destilada durante 7 días, mientras decantaba siguiendo el siguiente esquema:

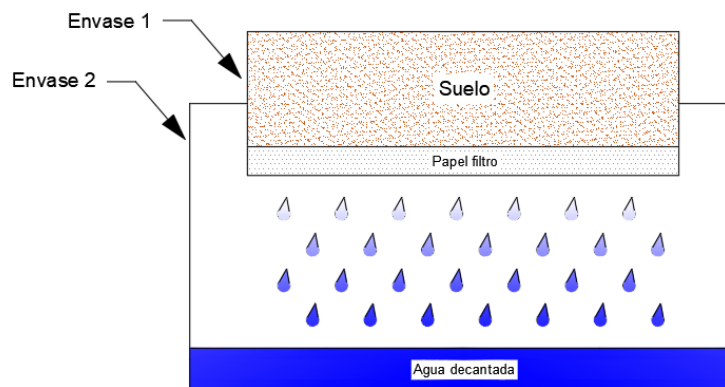


Figura 4.1. Esquema de preparación de la muestra por decantación. Elaboración propia.

De esta forma se aseguró que los vacíos de la muestra estén llenos de agua hasta lograr una consistencia con la cual se pudiera trabajar en la copa de Casagrande. Por este motivo, para encontrar los tres puntos del límite líquido se trabajó del estado más húmedo, al más seco, en tres rangos de valores para el número de golpes, los cuales son: de 15-20, de 20-25 y de 30-35, dentro de los cuales se debe obtener el número de golpes y humedad, cuando la muestra se une 13 mm.

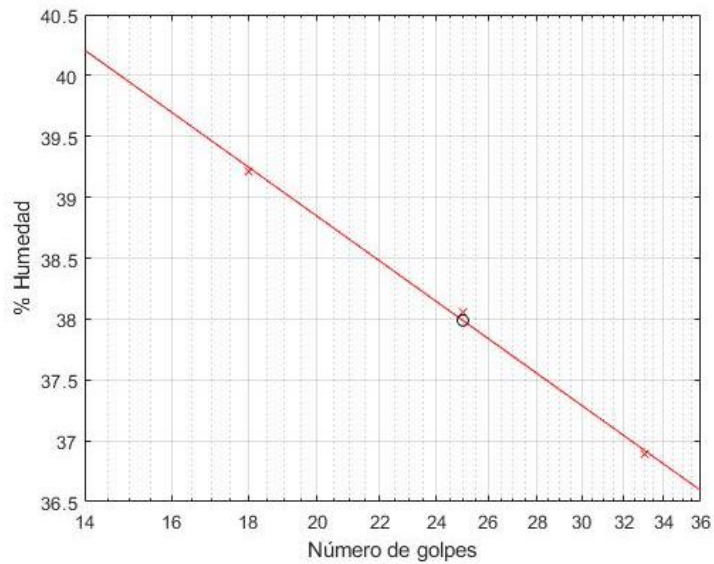
Para la determinación del límite plástico, se realizaron rollitos de aproximadamente 3 mm en el estado más seco posible de la muestra preparada. Mientras que el índice de plasticidad fue calculado como la diferencia entre el LL y LP.

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

*Tabla 4.11. Resultados límites de consistencia (LL, LP, IP) [1]*

<b>Operador</b>		<b>David Arcos</b>			
<b>LÍMITE PLÁSTICO 1</b>					
<b>Cápsula</b>	<b>Peso cápsula (g)</b>	<b>Peso cápsula + suelo húmedo (g)</b>	<b>Peso cápsula + suelo seco (g)</b>	<b>%Humedad</b>	
L30	8.64	16.30	14.66	27.24	
541	9.53	19.24	17.16	27.26	
<b>Límite plástico</b>				<b>27.3</b>	
<b>LÍMITE LÍQUIDO 1</b>					
<b>N° de golpes</b>	<b>Cápsula</b>	<b>Peso cápsula (g)</b>	<b>Peso cápsula + suelo húmedo (g)</b>	<b>Peso cápsula + suelo seco (g)</b>	<b>%Humedad</b>
18	153	9.73	29.22	23.73	39.21
25	721	6.38	22.16	17.81	38.06
33	13Z	6.04	20.55	16.64	36.89
<b>Límite Líquido</b>					<b>38.0</b>
<b>ÍNDICE DE PLASTICIDAD 1</b>					<b>10.7</b>



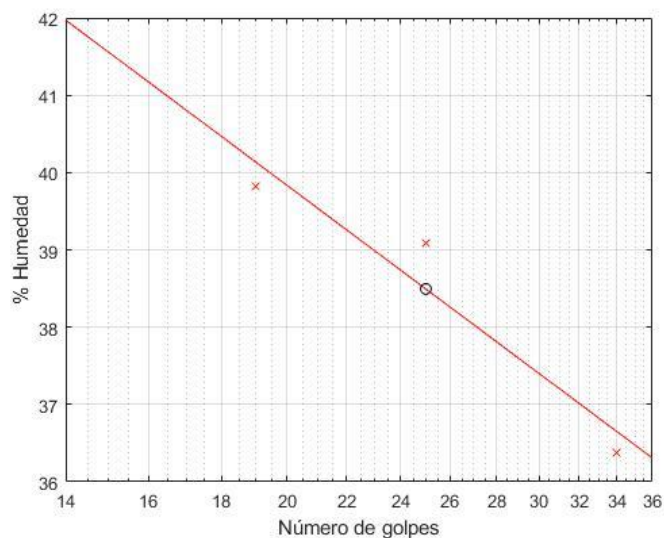
*Figura 4.2. Gráfica para la determinación del LL (1).*

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

*Tabla 4.12. Resultados límites de consistencia (LL, LP, IP) [2].*

<b>Operador</b>		<b>David Arcos</b>				
<b>LÍMITE PLÁSTICO 2</b>						
<b>Cápsula</b>	<b>Peso cápsula (g)</b>	<b>Peso cápsula + suelo húmedo (g)</b>	<b>Peso cápsula + suelo seco (g)</b>	<b>%Humedad</b>		
X21	5.94	13.45	11.89	26.22		
739	6.34	14.29	12.64	26.19		
<b>Límite plástico</b>				<b>26.2</b>		
<b>LÍMITE LÍQUIDO 2</b>						
<b>Nº de golpes</b>	<b>Cápsula</b>	<b>Peso cápsula (g)</b>	<b>Peso cápsula + suelo húmedo (g)</b>	<b>Peso cápsula + suelo seco (g)</b>	<b>%Humedad</b>	
19	133	9.38	23.95	19.80	39.83	
25	740	6.27	27.23	21.34	39.08	
34	740	6.56	23.62	19.07	36.37	
<b>Límite Líquido</b>					<b>38.5</b>	
<b>ÍNDICE DE PLASTICIDAD 2</b>					<b>12.3</b>	



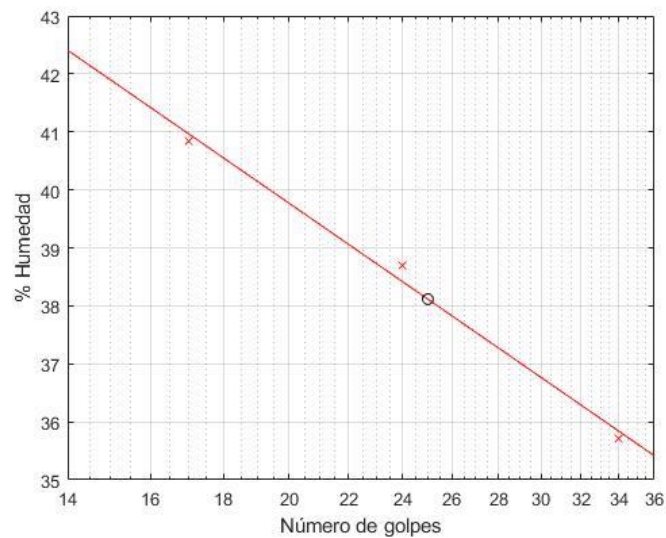
*Figura 4.3. Gráfica para la determinación del LL (2).*

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

*Tabla 4.13. Resultados límites de consistencia (LL, LP, IP) [3].*

<b>Operador</b>		<b>David Arcos</b>				
<b>LÍMITE PLÁSTICO 3</b>						
<b>Cápsula</b>	<b>Peso cápsula (g)</b>	<b>Peso cápsula + suelo húmedo (g)</b>	<b>Peso cápsula + suelo seco (g)</b>	<b>%Humedad</b>		
44z	6.00	14.65	12.87	25.91		
24z	5.87	12.96	11.51	25.71		
<b>Límite plástico</b>				<b>25.8</b>		
<b>LÍMITE LÍQUIDO 3</b>						
<b>N° de golpes</b>	<b>Cápsula</b>	<b>Peso cápsula (g)</b>	<b>Peso cápsula + suelo húmedo (g)</b>	<b>Peso cápsula + suelo seco (g)</b>	<b>%Humedad</b>	
17	730	6.27	23.86	18.76	40.83	
24	76z	6.18	22.49	17.94	38.69	
34	729	6.31	28.85	22.92	35.70	
<b>Límite Líquido</b>					<b>38.1</b>	
<b>ÍNDICE DE PLASTICIDAD 3</b>					<b>12.3</b>	



*Figura 4.4. Gráfica para la determinación del LL (3).*

4.1.2.4. Resultado de la clasificación SUCS

Tabla 4.14. Resultados SUCS-01

<b>Parámetro</b>	<b>Espécimen 1</b>
Humedad (%)	4.21
LL (%)	38.00
LP (%)	27.30
IP (%)	10.70
Gravas (%)	0.00
Arenas (%)	0.49
Finos (%)	99.51
<b>Clasificación SUCS</b>	<b>ML</b>
<b>Descripción</b>	<b>Limo</b>

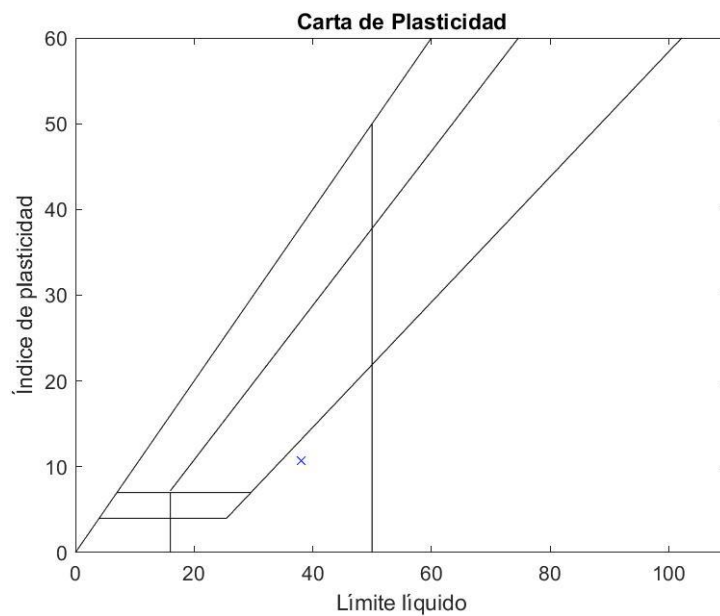


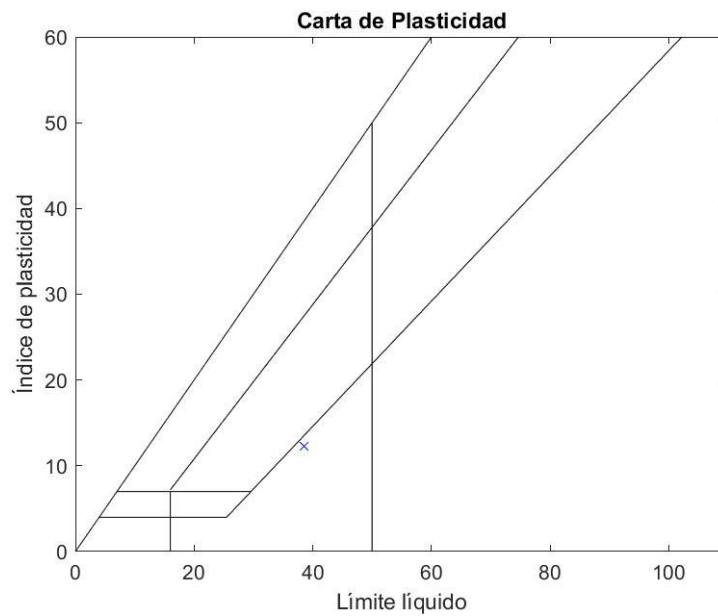
Figura 4.5. Descripción según la Carta de Plasticidad (1).

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

*Tabla 4.15. Resultados SUCS-02*

<b>Parámetro</b>	<b>Espécimen 2</b>
Humedad (%)	4.42
LL (%)	38.50
LP (%)	26.20
IP (%)	12.30
Gravas (%)	0.00
Arenas (%)	0.34
Finos (%)	99.66
<b>Clasificación SUCS</b>	<b>ML</b>
<b>Descripción</b>	<b>Limo</b>



*Figura 4.6. Descripción según la Carta de Plasticidad (2).*

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

Tabla 4.16. Resultados SUCS-03

Parámetro	Espécimen 3
Humedad (%)	4.51
LL (%)	38.10
LP (%)	25.80
IP (%)	12.30
Gravas (%)	0.00
Arenas (%)	0.40
Finos (%)	99.60
<b>Clasificación SUCS</b>	<b>ML</b>
<b>Descripción</b>	<b>Limo</b>

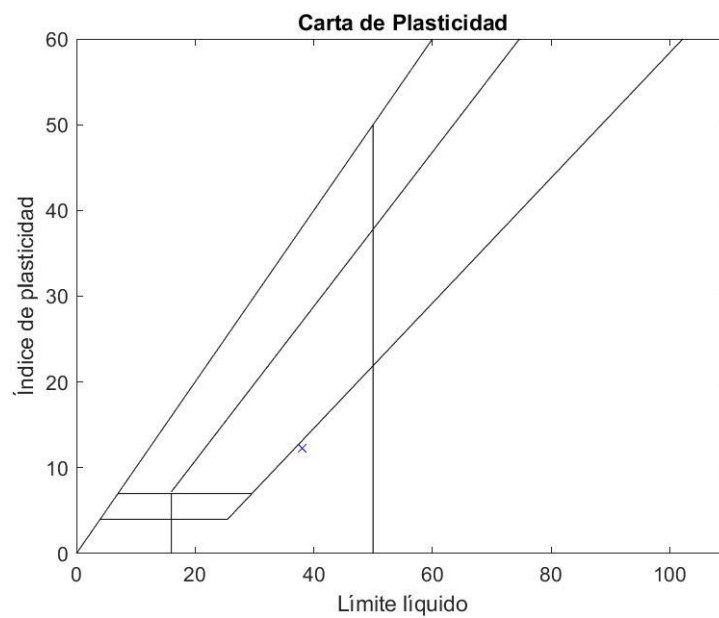


Figura 4.7. Descripción según la Carta de Plasticidad (3).

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

### 4.1.3. Límite de contracción (LC)

La determinación del límite de contracción sirve para representar la cantidad de agua requerida para llenar los vacíos de un determinado suelo cohesivo en su relación de vacíos más baja lograda por un proceso de secado; por lo tanto, puede ser usado para evaluar el potencial de encogimiento o el posible desarrollo de grietas en este tipo de muestras. (ASTM D427-04, 2004). El proceso de preparación de muestra fue el mismo previamente indicado en la sección 3.3.2.3 “Límites de Atterberg (LL, LP, IP)”. A partir de una muestra representativa se buscó la humedad a la cual el suelo se junte 13 mm con 10 golpes en la copa de Casagrande. Posteriormente es colocada en una cápsula recubierta con vaselina y golpeada sobre una superficie rígida hasta eliminar los vacíos; y secada a temperatura ambiente hasta que esta adquiera un color blanquecino sin evidenciar la formación de grietas, para nuestra investigación fue aproximadamente 24 h. Una vez ejecutado lo mencionado anteriormente se deja secar la muestra durante 24 h a una temperatura de 110°C.

Para finalizar este ensayo con ayuda del mercurio se determina lo siguiente: el volumen de la pastilla y el volumen del recipiente que la contenía; estos sumados a la masa final del espécimen permiten determinar el límite de contracción.

Tabla 4.17. Resultados límite de contracción.

LÍMITE DE CONTRACCIÓN			
Operador	David Arcos		
Peso específico mercurio (g/cm <sup>3</sup> )	13.534		
Cápsula N°	A9	S1	S3
Peso Cápsula	22.93	21.34	21.32
Peso Cápsula + Suelo (g)	45.76	44.95	45.01
Peso Cápsula + Suelo seco (g)	38.58	37.49	37.54
Masa suelo seco (g)	15.65	16.15	16.22
Masa suelo húmedo (g)	22.83	23.61	23.69
% Humedad	45.88	46.19	46.05
Peso desplazado de mercurio (g)	138.51	137.6	139.67
Peso cápsula + mercurio (g)	204.19	204.68	204.56
Volumen Suelo (cm <sup>3</sup> )	10.23	10.17	10.32
Volumen Cápsula (cm <sup>3</sup> )	13.39	13.55	13.54
<b>LC</b>	<b>25.7</b>	<b>25.3</b>	<b>26.2</b>
<b>Índice de reducción, R</b>	<b>1.53</b>	<b>1.59</b>	<b>1.57</b>

#### *4.1.4. Granulometría mediante sedimentación por hidrómetro*

Este ensayo cubre la determinación cuantitativa de la distribución del tamaño de partícula de la parte fina de una muestra, es decir, del material pasante del tamiz N°200 (75  $\mu\text{m}$ ), hasta un tamaño de partícula de 0.2  $\mu\text{m}$  (0.0002 mm). El principio empleado en este ensayo es la velocidad de caída de partículas, en base a la ley de Stokes, considerando las siguientes suposiciones: las partículas de suelo poseen la misma densidad, son esféricas, con superficie lisa y no están en contacto entre sí, y el flujo es laminar. (ASTM D7928-21, 2021).

Para la ejecución de este ensayo se requirió el uso del defloculante Hexametáfosfato de sodio ( $\text{NaPO}_3$ ) en una concentración de  $5 \pm 0.1$  g por cada 100ml, para cada una de las muestras secas pasantes del tamiz N°40 (0.425 mm), las cuales reposaron por un periodo de 24h con el defloculante. Posterior a esto se batió cada muestra en una batidora por un tiempo de 5 minutos con el objetivo de formar un slurry y transferirlo a los cilindros sedimentadores de 1000 ml. Previo al inicio de la toma de lecturas se batió manualmente cada muestra dentro del cilindro sedimentador con ayuda de un tapón de caucho, completando 60 ciclos en 1 minuto, luego de realizar este proceso se inició la toma de lecturas con el hidrómetro 152H, puesto que la gravedad específica de la muestra es diferente de 2.65.

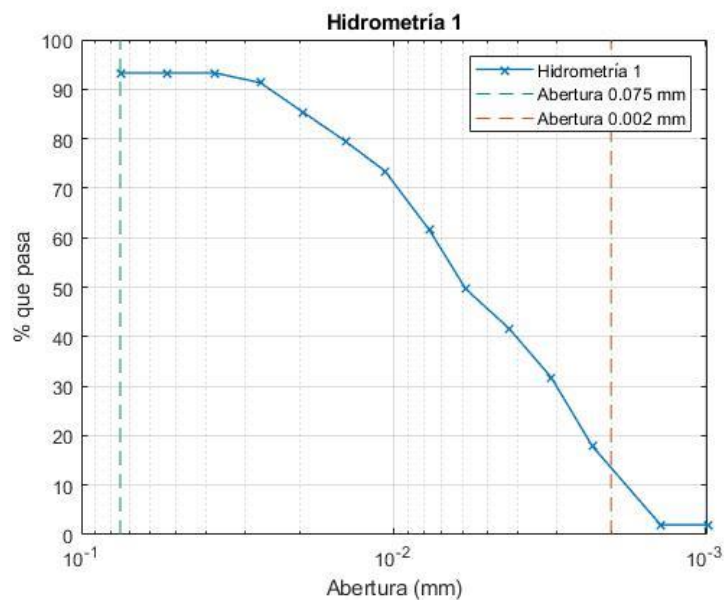
Según la normativa ASTM D7928, la fracción de arcilla corresponde al material más fino que 2  $\mu\text{m}$  (0.002 mm), es decir, que el material menor que 0.075 mm, pero mayor a 0.002 mm es considerado como limo.

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

*Tabla 4.18. Resultados hidrometría 1*

Operador		Mariela Anaguano		
Descripción		H-01		
Tiempo (min)	Lectura real (Rreal)	Porcentaje más fino (%)	D (mm)	%Pasa
0	---	---	---	---
0.25	52	93.29	0.0746	93.29
0.5	52	93.29	0.0528	93.29
1	52	93.29	0.0373	93.29
2	51	91.31	0.0267	91.31
4	48	85.35	0.0194	85.35
8	45	79.40	0.0142	79.40
15	42	73.44	0.0106	73.44
32	36	61.53	0.0077	61.53
60	30	49.62	0.0058	49.62
120	26	41.68	0.0043	41.68
240	21	31.76	0.0031	31.76
480	14	17.86	0.0023	17.86
1440	6	1.98	0.0014	1.98
2880	6	1.98	0.0010	1.98
<b>Limos (%)</b>			<b>87.33</b>	
<b>Arcillas (%)</b>			<b>12.67</b>	



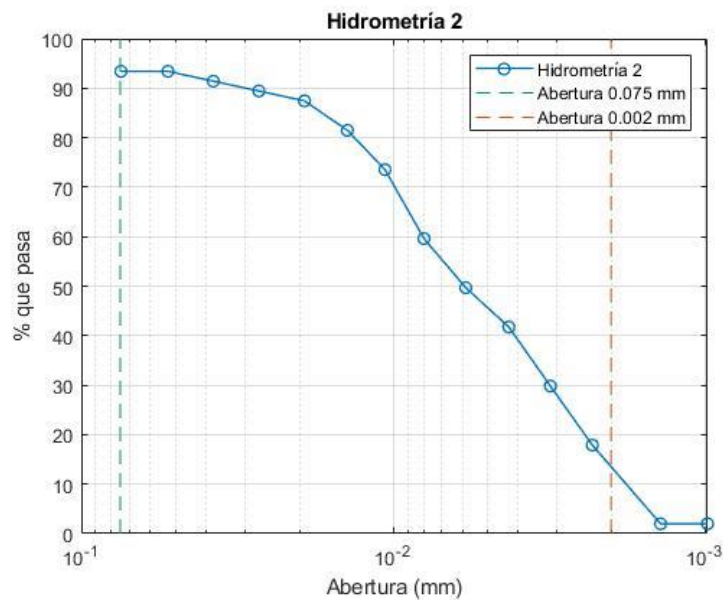
*Figura 4.8. Curva granulométrica por hidrometría (1).*

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

*Tabla 4.19. Resultados hidrometría 2*

Operador		Mariela Anaguano		
Descripción		H-02		
Tiempo (min)	Lectura real (Rreal)	Porcentaje más fino (%)	D (mm)	%Pasa
0	---	---	---	---
0.25	52	93.41	0.0746	93.41
0.5	52	93.41	0.0528	93.41
1	51	91.42	0.0377	91.42
2	50	89.43	0.0269	89.43
4	49	87.45	0.0193	87.45
8	46	81.48	0.0140	81.48
15	42	73.53	0.0106	73.53
30	35	59.62	0.0080	59.62
60	30	49.69	0.0058	49.69
120	26	41.74	0.0043	41.74
240	20	29.81	0.0031	29.81
480	14	17.89	0.0023	17.89
1440	6	1.99	0.0014	1.99
2880	6	1.99	0.0010	1.99
<b>Limos (%)</b>			<b>87.31</b>	
<b>Arcillas (%)</b>			<b>12.69</b>	



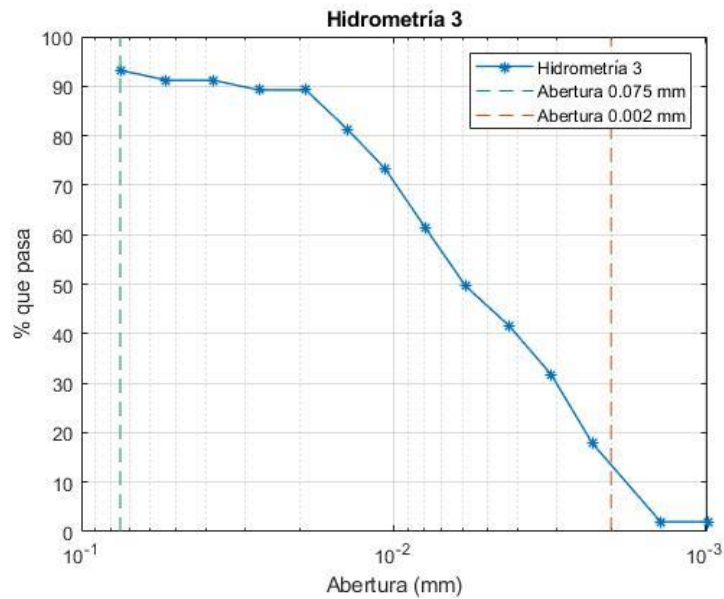
*Figura 4.9. Curva granulométrica por hidrometría (2).*

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

*Tabla 4.20. Resultados hidrometría 3*

<b>Operador</b>		Mariela Anaguano		
<b>Descripción</b>		H-03		
<b>Tiempo (min)</b>	<b>Lectura real (Rreal)</b>	<b>Porcentaje más fino (%)</b>	<b>D (mm)</b>	<b>%Pasa</b>
0	---	---	---	---
0.25	52	93.19	0.0746	93.19
0.5	51	91.21	0.0533	91.21
1	51	91.21	0.0377	91.21
2	50	89.23	0.0269	89.23
4	50	89.23	0.0191	89.23
8	46	81.29	0.0140	81.29
15	42	73.36	0.0106	73.36
30	36	61.47	0.0079	61.47
60	30	49.57	0.0058	49.57
120	26	41.64	0.0043	41.64
240	21	31.72	0.0031	31.72
480	14	17.85	0.0023	17.85
1440	6	1.98	0.0014	1.98
2880	6	1.98	0.0010	1.98
<b>Limos (%)</b>			<b>87.34</b>	
<b>Arcillas (%)</b>			<b>12.66</b>	



*Figura 4.10. Curva granulométrica por hidrometría (3).*

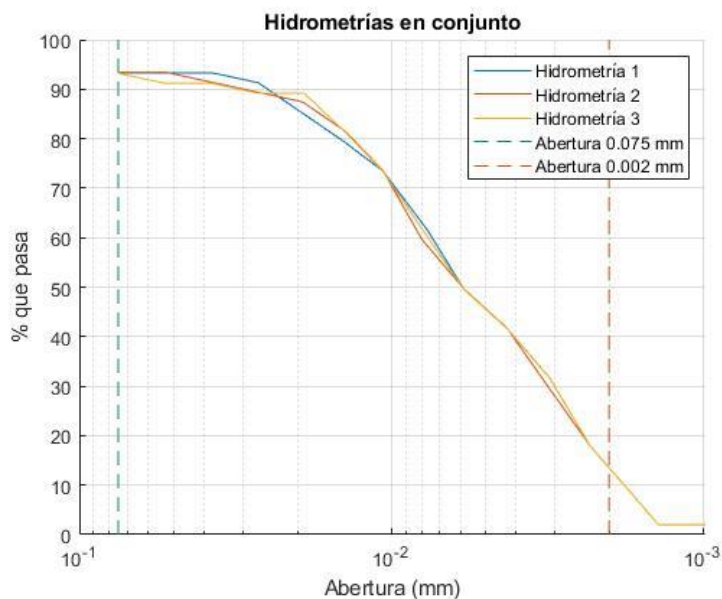


Figura 4.11. Curvas granulométricas por hidrometría en conjunto.

Tabla 4.21. Porcentaje de limos y arcillas promedio para la muestra patrón

<b>Limos promedio (%)</b>	87.33
<b>Arcillas promedio (%)</b>	12.67

#### 4.1.5. Ensayo de dispersión en arcillas por doble hidrómetro

La ejecución de este método de ensayo nos permite obtener un indicador de las características dispersivas naturales de suelos arcillosos comparando la cantidad de partículas más finas que 2  $\mu\text{m}$  (0.002 mm), obtenidas según el método de la norma ASTM D4221-18 y según la norma ASTM D7928, para dos especímenes similares obtenidos de una misma muestra. (ASTM D4221-18, 2018).

Este ensayo es utilizado para suelos que, según la carta de plasticidad, la posición del límite líquido e índice de plasticidad se encuentre en o sobre la línea A y que más del 12% de la fracción fina sea menor a 2  $\mu\text{m}$  según la norma ASTM D7928. Además, esta sigue el mismo procedimiento que el de la norma de hidrometría, establecido por la norma ASTM D7928, con la excepción de que para la formación del slurry no se aplica ningún tipo de dispersión mecánica ni se añade agente defloculante.

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

El porcentaje de dispersión es calculado en base a la siguiente expresión:

$$\%Dispersión = \frac{N_{m,2\mu m,nd}}{N_{m,2\mu m,d}} * 100$$

*Ecuación 4.1. Ecuación para obtener el porcentaje de dispersión en arcillas.*

Dónde:

$N_{m,2\mu m,nd}$ : Porcentaje que pasa más fino que 2 um del espécimen sin dispersante.

$N_{m,2\mu m,d}$ : Porcentaje que pasa más fino que 2 um del espécimen con dispersante.

*Tabla 4.22. Resultados hidrometría 1 con agente dispersante.*

<b>Operador</b>			Mariela Anaguano	
<b>Descripción</b>			DH – CD1	
<b>Tiempo (min)</b>	<b>Lectura real (Rreal)</b>	<b>Porcentaje más fino (%)</b>	<b>D (mm)</b>	<b>%Pasa</b>
0	---	---	---	---
0.25	54	93.66	0.073	93.66
0.5	54	93.66	0.052	93.66
1	54	93.66	0.036	93.66
2	54	93.66	0.026	93.66
4	52	89.84	0.019	89.84
8	49	84.10	0.014	84.10
15	44	74.55	0.010	74.55
32	38	63.08	0.008	63.08
60	32	51.61	0.006	51.61
120	27	42.05	0.004	42.05
240	22	32.49	0.003	32.49
480	16	21.03	0.002	21.03
1440	6	1.91	0.001	1.91
2880	6	1.91	0.001	1.91
<b>Limos (%)</b>			<b>84.83</b>	
<b>Arcillas (%)</b>			<b>15.17</b>	

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

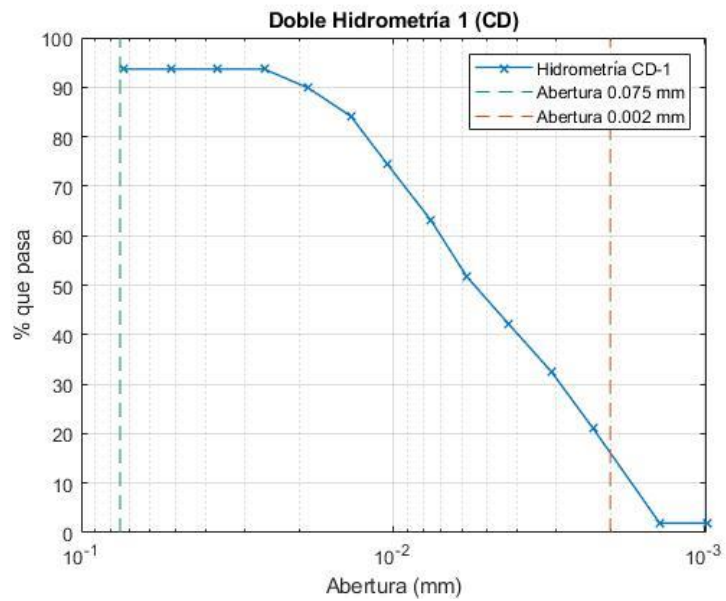


Figura 4.12. Curva de granulometría por hidrómetro con agente dispersante (1).

Tabla 4.23. Resultados hidrometría 1 sin agente dispersante.

<b>Operador</b>		Mariela Anaguano		
<b>Descripción</b>		DH – SD1		
<b>Tiempo (min)</b>	<b>Lectura real (Rreal)</b>	<b>Porcentaje más fino (%)</b>	<b>D (mm)</b>	<b>%Pasa</b>
0	---	---	---	---
0.25	22	87.48	0.096	87.48
0.5	22	87.48	0.068	87.48
1	21	83.51	0.048	83.51
2	21	83.51	0.034	83.51
4	18	71.58	0.025	71.58
8	6	23.86	0.019	23.86
15	1	3.98	0.014	3.98
32	0	0.00	0.010	0.00
60	0	0.00	0.007	0.00
<b>Partículas mayores a 2 um (%)</b>			<b>100.00</b>	
<b>Partículas menores a 2 um (%)</b>			<b>0.00</b>	

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

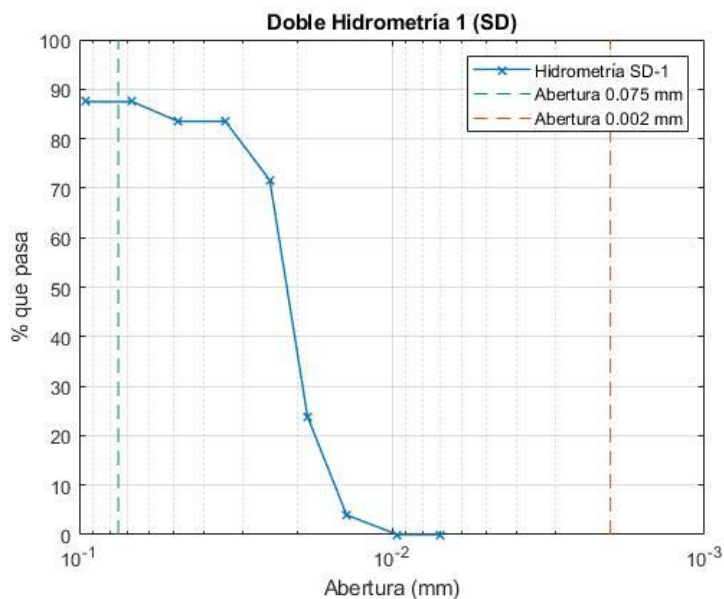


Figura 4.13. Curva de granulometría por hidrómetro sin agente dispersante (1).

Tabla 4.24. Resultados hidrometría 2 con agente dispersante.

Operador		Mariela Anaguano		
Descripción		DH – CD2		
Tiempo (min)	Lectura real (Rreal)	Porcentaje más fino (%)	D (mm)	%Pasa
0	---	---	---	---
0.25	53	91.92	0.074	91.92
0.5	53	91.92	0.052	91.92
1	53	91.92	0.037	91.92
2	52	90.01	0.026	90.01
4	51	88.09	0.019	88.09
8	47	80.43	0.014	80.43
15	44	74.69	0.010	74.69
32	38	63.20	0.008	63.20
60	32	51.71	0.006	51.71
120	27	42.13	0.004	42.13
240	22	32.56	0.003	32.56
480	16	21.07	0.002	21.07
1440	7	3.83	0.001	3.83
2880	6	1.92	0.001	1.92
<b>Limos (%)</b>			<b>84.17</b>	
<b>Arcillas (%)</b>			<b>15.83</b>	

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

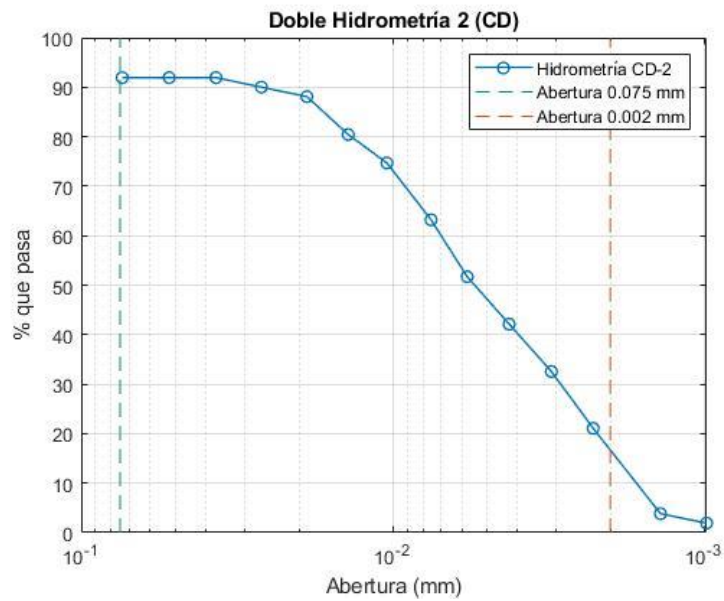


Figura 4.14. Curva de granulometría por hidrómetro con agente dispersante (2).

Tabla 4.25. Resultados hidrometría 2 sin agente dispersante.

Operador		Mariela Anaguano		
Descripción		DH – SD2		
Tiempo (min)	Lectura real (Rreal)	Porcentaje más fino (%)	D (mm)	%Pasa
0	---	---	---	---
0.25	23	91.67	0.095	91.67
0.5	23	91.67	0.067	91.67
1	22	87.69	0.048	87.69
2	21	83.70	0.034	83.70
4	17	67.76	0.025	67.76
8	5	19.93	0.019	19.93
15	1	3.99	0.014	3.99
32	0	0.00	0.010	0.00
60	0	0.00	0.007	0.00
<b>Partículas mayores a 2 um (%)</b>			<b>100.00</b>	
<b>Partículas menores a 2 um (%)</b>			<b>0.00</b>	

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

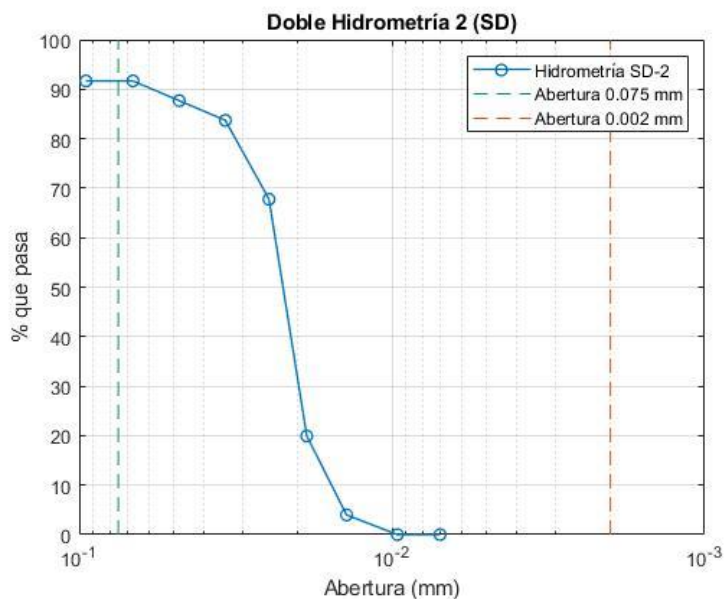


Figura 4.15. Curva de granulometría por hidrómetro sin agente dispersante (2).

Tabla 4.26. Resultados hidrometría 3 con agente dispersante.

Operador		Mariela Anaguano		
Descripción		DH – CD3		
Tiempo (min)	Lectura real (Rreal)	Porcentaje más fino (%)	D (mm)	%Pasa
0	---	---	---	---
0.25	54	94.03	0.073	94.03
0.5	54	94.03	0.052	94.03
1	53	92.11	0.037	92.11
2	53	92.11	0.026	92.11
4	51	88.27	0.019	88.27
8	48	82.51	0.014	82.51
15	44	74.84	0.010	74.84
32	39	65.24	0.007	65.24
60	32	51.81	0.006	51.81
120	28	44.13	0.004	44.13
240	23	34.54	0.003	34.54
480	16	21.11	0.002	21.11
1440	6	1.92	0.001	1.92
2880	6	1.92	0.001	1.92
<b>Limos (%)</b>			<b>84.77</b>	
<b>Arcillas (%)</b>			<b>15.23</b>	

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

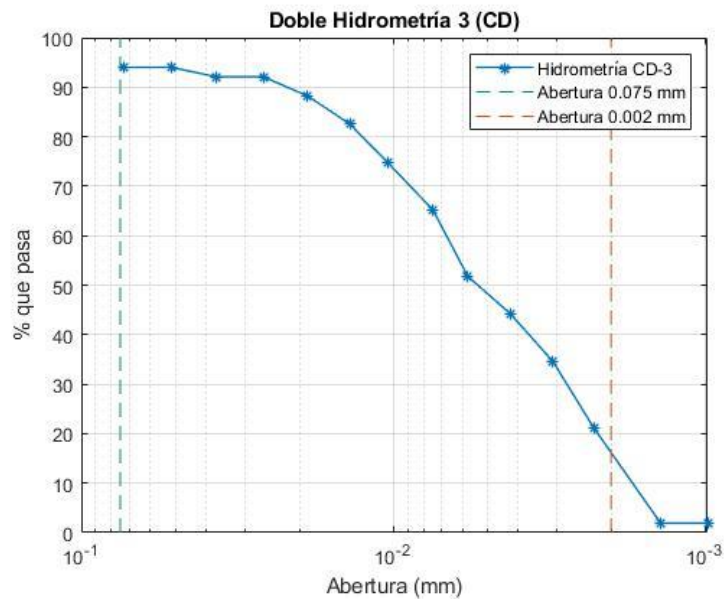


Figura 4.16. Curva de granulometría por hidrómetro con agente dispersante (3).

Tabla 4.27. Resultados hidrometría 3 sin agente dispersante.

Operador			Mariela Anaguano	
Descripción			DH – SD3	
Tiempo (min)	Lectura real (Rreal)	Porcentaje más fino (%)	D (mm)	%Pasa
0	---	---	---	---
0.25	23	91.80	0.095	91.80
0.5	22	87.81	0.068	87.81
1	22	87.81	0.048	87.81
2	21	83.82	0.034	83.82
4	17	67.85	0.025	67.85
8	5	19.96	0.019	19.96
15	1	3.99	0.014	3.99
32	0	0.00	0.010	0.00
60	0	0.00	0.007	0.00
<b>Partículas mayores a 2 um (%)</b>			<b>100.00</b>	
<b>Partículas menores a 2 um (%)</b>			<b>0.00</b>	

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

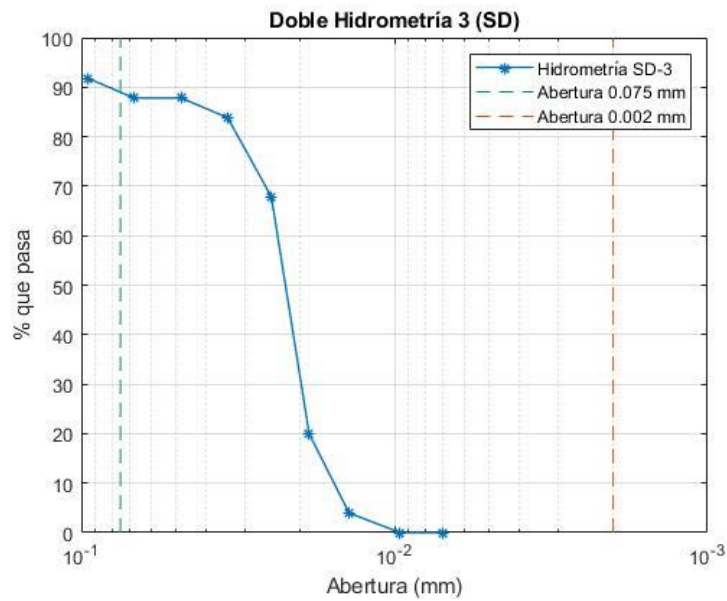


Figura 4.17. Curva de granulometría por hidrómetro sin agente dispersante (3).

Tabla 4.28. Porcentaje de limos y arcillas correspondientes a las hidrometrías con agente dispersante.

<b>Limos promedio (%)</b>	84.59
<b>Arcillas promedio (%)</b>	15.41

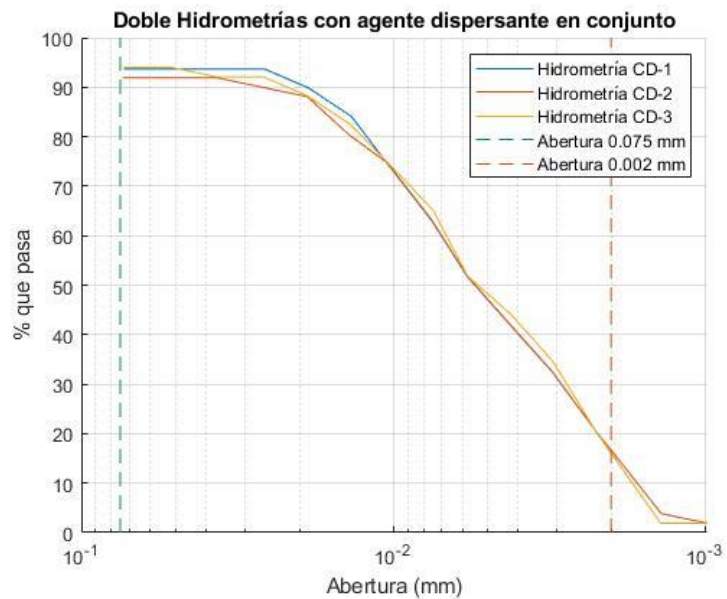


Figura 4.18. Hidrometrías en conjunto con agente dispersante.

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

Tabla 4.29. Porcentaje de limos y arcillas correspondientes a las hidrometrías sin agente dispersante.

<b>Partículas mayores a 2 um (%)</b>	100.00
<b>Partículas menores a 2 um (%)</b>	0.00

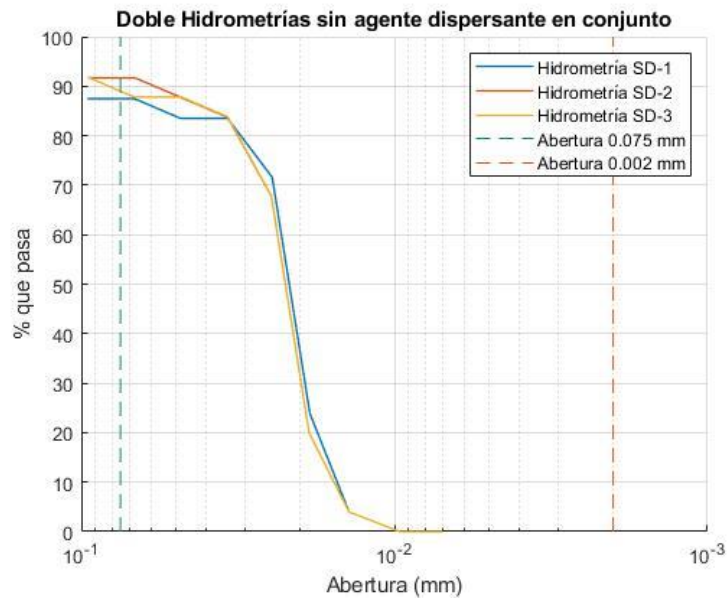


Figura 4.19. Hidrometrías en conjunto sin agente dispersante.

Tabla 4.30. Resultado del ensayo de doble hidrometría.

<b>%que pasa &lt; 2 um [CD]</b>	15.41
<b>%que pasa &lt; 2 um [SD]</b>	0.00
<b>Dispersión (%)</b>	<b>0.00</b>

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

*Tabla 4.31. Resumen de resultados obtenidos para la muestra patrón.*

<b>Descripción</b>	<b>Parámetro</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>Promedio</b>		
<b>Cont. Humedad</b>	w (%)	4.21	4.42	4.51	4.38	±	0.15
<b>Límite plástico</b>	LP (%)	27.3	26.2	25.80	26.4	±	0.8
<b>Límite líquido</b>	LL (%)	38.0	38.5	38.1	38.2	±	0.3
<b>Índice de plasticidad</b>	IP (%)	10.7	12.3	12.3	11.8	±	0.9
<b>Límite de contracción</b>	LC (%)	25.7	25.3	26.2	25.7	±	0.45
	Índice de Reducción (R)	1.53	1.59	1.57	1.56	±	0.03
<b>% Arena</b>	0.425 mm > P > 75 um	0.49	0.34	0.40	0.41	±	0.08
<b>% Finos</b>	P < 75 um	99.51	99.66	99.60	99.61	±	0.08
<b>Gravedad específica</b>	Gs	2.67	2.67	2.70	2.68	±	0.02
	75 um > P > 2 um	87.33	87.31	87.34	87.33	±	0.01
<b>Hidrometría</b>	P < 2 um	12.67	12.69	12.66	12.67	±	0.01
	75 um > P > 2 um (CD)	84.83	84.17	84.77	84.59	±	0.37
<b>Doble hidrometría</b>	P < 2 um (CD)*	15.17	15.83	15.23	15.41	±	0.37
	75 um > P > 2 um (SD)	100.00	100.00	100.00	100.00	±	0.00
	P < 2 um (SD)**	0.00	0.00	0.00	0.00	±	0.00

\*(CD): con agente dispersante.

\*\* (SD): sin agente dispersante.

#### 4.1.6. *Ensayos mineralógicos*

Las arcillas, así como los distintos tipos de suelo, están conformados en base a un modelo trifásico, el cual se compone por sólidos, aire y agua; no obstante, este tipo de materiales poseen una alta variabilidad debido a procesos geológicos, ambientales, físicos y químicos. (Ruge et al., 2019).

Según Ruge et al. (2019), químicamente las arcillas esta conformadas por distintos tipos de minerales de filosilicatos y láminas de alúmina; motivo por el cual es de suma importancia conocer su composición mineralógica, ya que, de esta depende el tamaño, forma y algunas propiedades de las partículas arcillosas.

Actualmente existe una serie de procedimientos capaces de identificar los minerales que constituyen una arcilla, de entre los cuales los métodos de investigación por Rayos X y por altas temperaturas (Balance térmico de las arcillas), son los más conocidos. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

De todas estas metodologías destaca la técnica de difracción por rayos X, la cual es adecuada para determinar una composición cualitativa y cuantitativa de los minerales presentes en un espécimen de suelo. Esta requiere de un proceso de preparación de la muestra, la cual se compone de una fase de pulverización, donde se garantiza un tamaño de partícula menor a 75 um, para luego verter la muestra en un soporte y retirar el exceso de material generando así una superficie plana para llevar a cabo el ensayo. (Ruge et al., 2019).

Para esta investigación se realizó un “*Análisis mineralógico de materias primas, minerales arcillosos y materiales*” por el Método de Difracción de Rayos X en el LABORATORIO Y PLANTA PILOTO de Cerámica de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), con el objetivo de obtener una determinación semicuantitativa de fases cristalinas de la muestra patrón (Caolín Prosper 2021), adquirido en EDESA S.A. Obteniendo los siguientes resultados:

*Tabla 4.32. Resultados del análisis mineralógico realizado sobre la muestra patrón.*

<b>Minerales (%)</b>	<b>Ficha de difracción</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>	<b>Promedio</b>
<b>Caolinita</b>	96-900-9235	72.0	71.2	72.5	71.90 ± 0.66
<b>Illita</b>	96-900-9666	12.9	14.2	12.1	13.07 ± 1.06
<b>Ortoclasa</b>	96-155-0305	15.1	14.6	15.4	15.03 ± 0.40
<b>TOTAL</b>		100.0	100.0	100.0	100.0

Nota: LABORATORIO Y PLANTA PILOTO de Cerámica (EPN), 2022.

## 5. CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL Y SUS RESULTADOS

Según Sachan et al. (2013), la microestructura de las arcillas posee gran influencia sobre el comportamiento mecánico de estas, ya sean estas dispersas, floculadas o permanezcan en un estado intermedio entre estas dos. Por este motivo, la investigación “*Development of Intermediate Microfabric in Kaolin Clay and Its Consolidation Behaviour*” propone una metodología para preparar especímenes cilíndricos sólidos que presenten una microestructura intermedia, por medio de una técnica de consolidación de lodos “slurry”, generando así muestras repetibles y homogéneas para su posterior empleo en análisis de comportamiento mecánico. (Sachan et al., 2013), procedimiento adoptado en esta investigación.

### 5.1. Preparación de la muestra

Previo a la ejecución del ensayo de consolidación se debe realizar el siguiente procedimiento de preparación de muestra:

- 1) *Tamizado de la muestra:* se debe tamizar la muestra en condiciones de humedad natural por el tamiz N°40 con una abertura de 0.425mm.
- 2) *Secado de la muestra:* por un periodo de 24h se debe secar la muestra tamizada en un horno a una temperatura de 110 ± 5°C.
- 3) *Preparación de la mezcla:* se debe seleccionar 800g de muestra tamizada-secada al horno y pesar una masa de agua correspondiente a 2.5 veces el límite líquido (LL) según el procedimiento establecido por Sachan et al. (2013) para alcanzar una saturación del 100%, y batir el conjunto agua-suelo en una batidora a velocidad lenta durante 30 minutos.

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

---



Figura 5.1. Batidora empleada durante el proceso de mezcla.

- 4) *Preparación de edómetros:* se debe tomar dimensiones del anillo (diámetro y altura), además del peso de estos con todos sus componentes (base, anillo, piedras porosas, contrapeso, tornillos, papel filtro), excepto el suelo.
- 5) *Colocación de muestra en los edómetros:* con ayuda de una cuchara se debe colocar el material dentro del anillo del edómetro por tercios, al rellenar cada tercio se debe golpear sobre una base sólida para uniformizar la superficie y eliminar los posibles vacíos existentes. (Sachan et al., 2013). Se debe realizar este proceso hasta que el material cubra toda la altura del anillo y se presente una superficie uniforme.



## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

---

Figura 5.2. Colocación de la muestra en el edómetro de presión.



Figura 5.3. Expulsión de aire y distribución homogénea de la superficie mediante el impacto sobre una base sólida.

- 6) *Preparación de equipos de consolidación:* durante este proceso se debe nivelar el brazo del equipo de carga para consolidación, además de colocar y ajustar los deformímetros.



Figura 5.4. Nivelación del brazo de palanca del equipo de carga.

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

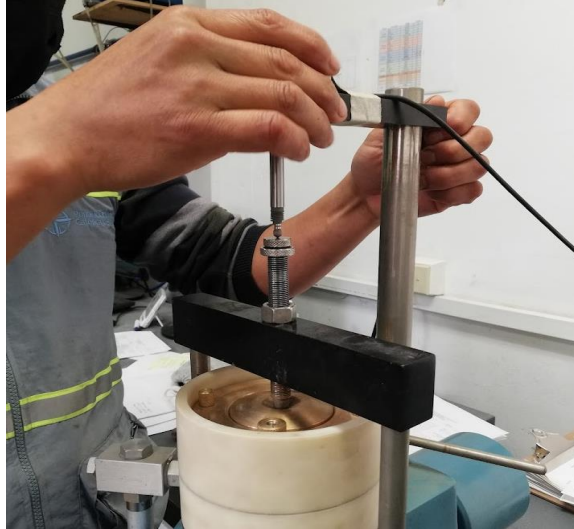


Figura 5.5. Colocación y ajuste deformímetros.

- 7) *Carga de acondicionamiento de la muestra:* este proceso se realiza con la muestra en las condiciones de humedad generados en el proceso señalado en (5); para estados de carga de 5, 50 y 200 kPa, en tiempos de 30 minutos para los dos primeros y de 24h para el último estado según el procedimiento establecido por Sachan et al. (2013), con el objetivo de obtener una deformación constante.



Figura 5.6. Proceso de precarga de la muestra.

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

---

- 8) *Inundado de la muestra*: posterior a la precarga se procede a descargar las muestras, y a inundarlas con agua destilada por un periodo de aproximadamente 72h.



Figura 5.7. Inundado de las muestras con agua destilada.

- 9) *Toma de la humedad inicial*: de un edómetro, después del tiempo de inundado se toma la humedad de la muestra, la cual será considerada como humedad inicial del ensayo de consolidación.

### 5.2. Pasos previos al ensayo de consolidación para el edómetro de presión

- 1) *Verificar el paso de agua en el sensor de presión*: previo a iniciar el ensayo se debe asegurar que la conexión entre el sensor y el edómetro este lleno de agua y permita la lectura de presiones.



Figura 5.8. Verificación del paso del agua en el sensor.

- 2) *Cambio de tipo de drenaje:* para lograr que el drenaje sea en un solo sentido, la piedra porosa de la parte superior debe ser retirada y reemplazada por un disco de acrílico de iguales dimensiones. En consecuencia, el drenaje del ensayo es considerado en un solo sentido.

### 5.3. Ensayo de consolidación

Los ensayos de consolidación para las tres probetas se realizaron siguiendo como referencia la norma ASTM D2435, método A. Mesurando las lecturas de deformación y, simultáneamente monitoreando la disipación de la presión de poros. Este proceso permite generar curvas de compresibilidad y curvas de consolidación empleadas en la solución de los métodos de Casagrande y Taylor, los cuales consideran el grado de consolidación según la medida de la deformación superficial de la muestra.

### 5.4. Resultados del ensayo de consolidación

Una vez generadas las muestras utilizando el procedimiento descrito anteriormente, se realizaron tres ensayos de consolidación implementando el prototipo fabricado. El objetivo de realizar este ensayo por triplicado era el de generar probetas gemelas que compartan características y comportamiento similares, tanto para la deformación como para la disipación de presión de poros. Es así como se obtuvieron los resultados presentados a continuación:

*Tabla 5.1. Resultados de relación de vacíos inicial y densidad por probeta luego del proceso de acondicionamiento de la muestra.*

<b>Probeta</b>	<b><math>e_0</math></b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>A</b>	1.047	1.87
<b>B</b>	1.337	1.65
<b>C</b>	1.467	1.57

Posterior a la aplicación de la carga de acondicionamiento, las probetas presentaron una diferencia en su relación de vacíos y densidad.

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

### 5.4.1. Curvas de compresibilidad

Para verificar el comportamiento y facilitar la comparación de las trayectorias de las curvas de compresibilidad entre las tres probetas, todas fueron sobrepuestas en un mismo gráfico y normalizadas a un mismo origen. En este caso el eje de las ordenadas representa la variación de la relación de vacíos entre probetas y el eje de las abscisas al esfuerzo efectivo.

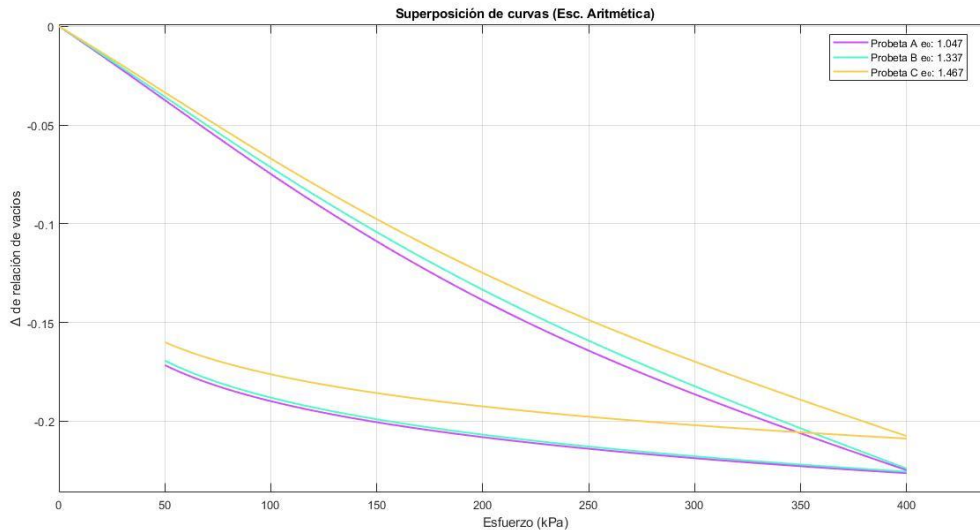


Figura 5.9. Superposición de curvas de compresibilidad en escala aritmética.

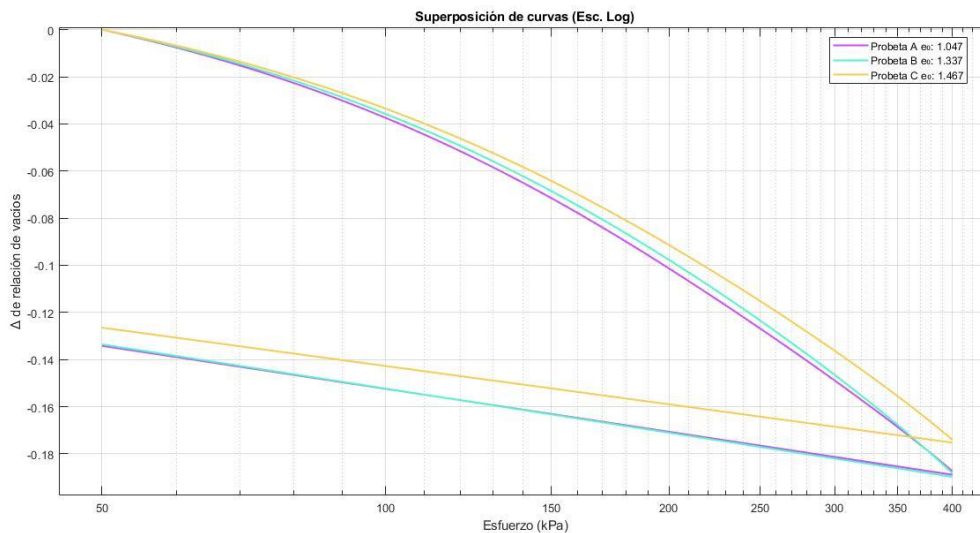


Figura 5.10. Superposición de curvas en escala semilogarítmica.

#### 5.4.2. Esfuerzo de preconsolidación

El esfuerzo de preconsolidación es determinado de manera gráfica a partir de las curvas de compresibilidad en escala semilogarítmica. Adicionalmente, se calcularon los valores del coeficiente de expansión ( $C_s$ ) y del coeficiente de compresibilidad ( $C_c$ ).

*Tabla 5.2. Resumen de resultados de  $P_c$ ,  $C_s$  y  $C_c$ .*

<b>Probeta</b>	<b><math>P_c</math> (kPa)</b>	<b><math>C_s</math></b>	<b><math>C_c</math></b>
<b>A</b>	169.20	0.06	0.34
<b>B</b>	170.49	0.06	0.37
<b>C</b>	169.74	0.05	0.33

El desarrollo completo de la solución para estos resultados se encuentra en los anexos.

#### 5.4.3. Curvas de consolidación

Para cada probeta se presenta a continuación una compilación de las curvas de consolidación de todos los esfuerzos aplicados. Las curvas de consolidación se han elaborado relacionando la deformación vs el tiempo en escala logarítmica, así como la deformación vs la raíz de tiempo requeridas para la estimación del  $t_{50}$  y  $t_{90}$  según los métodos de Casagrande y Taylor respectivamente. El desarrollo de la solución gráfica para estos métodos se puede hallar en los anexos.

# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

## 5.4.3.1. Deformación vs tiempo en escala logarítmica ( $t_{50}$ )

### Probeta A

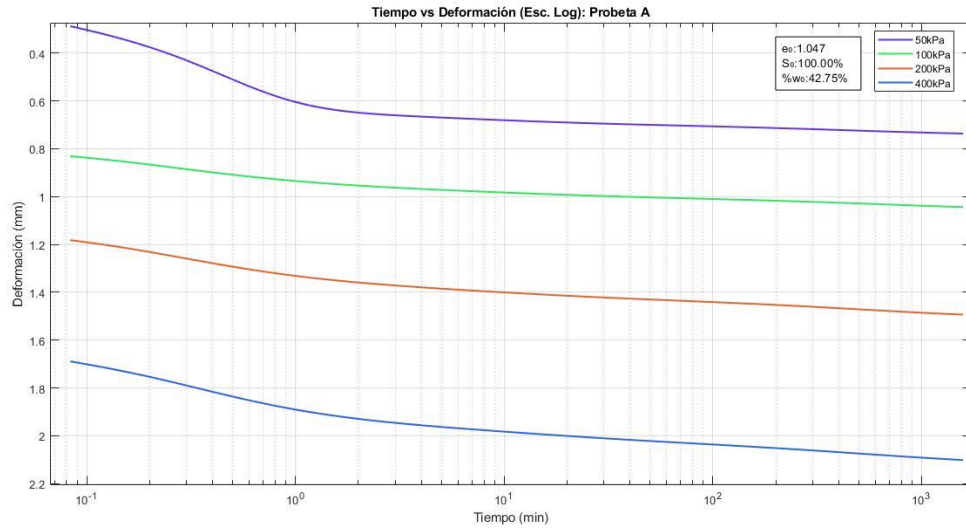


Figura 5.11. Resumen de curvas de consolidación en escala semilogarítmica - Probeta A.

### Probeta B

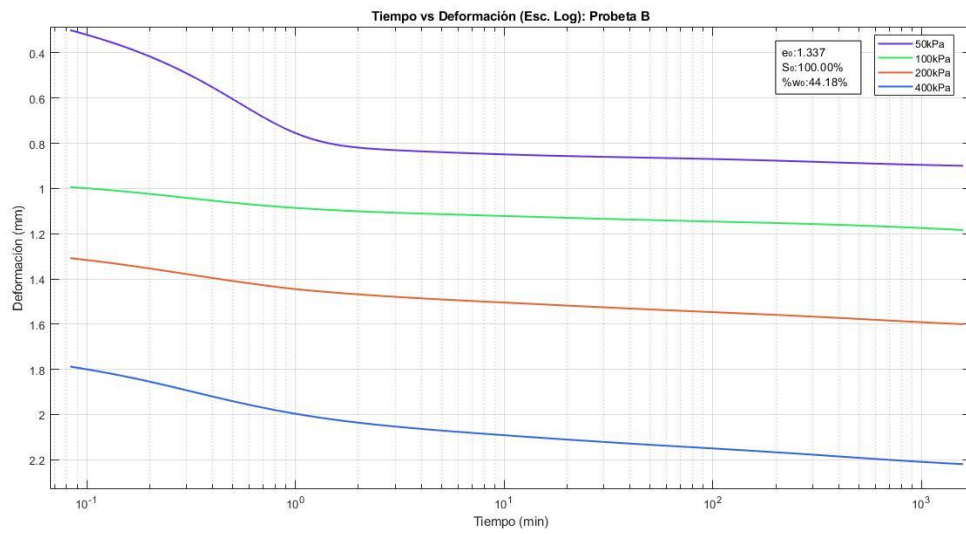


Figura 5.12. Resumen de curvas de consolidación en escala semilogarítmica - Probeta B.

# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

## Probeta C

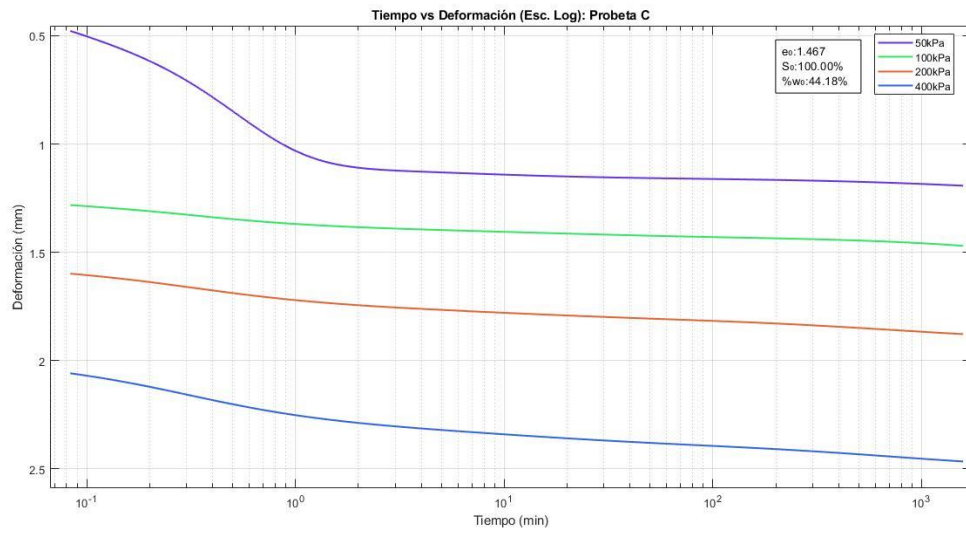


Figura 5.13. Resumen de curvas de consolidación en escala semilogarítmica - Probeta C.

## 5.4.3.2. Deformación vs raíz del tiempo ( $t_{90}$ )

### Probeta A

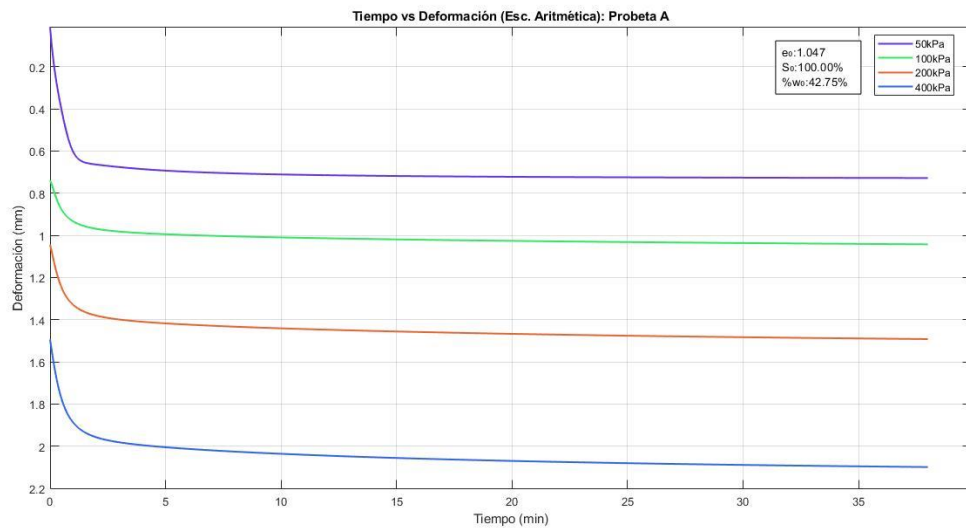


Figura 5.14. Resumen de curvas de consolidación en escala aritmética - Probeta A.

# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

## Probeta B

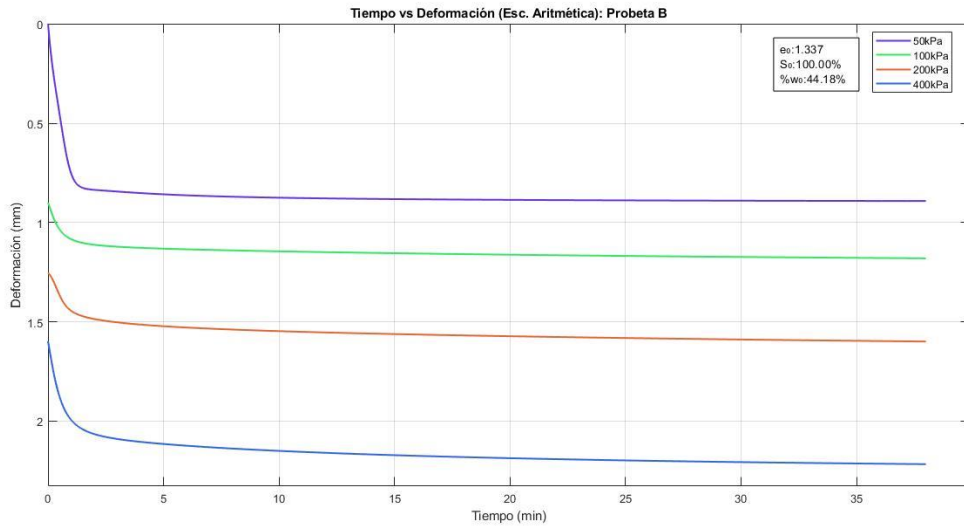


Figura 5.15. Resumen de curvas de consolidación en escala aritmética - Probeta B.

## Probeta C

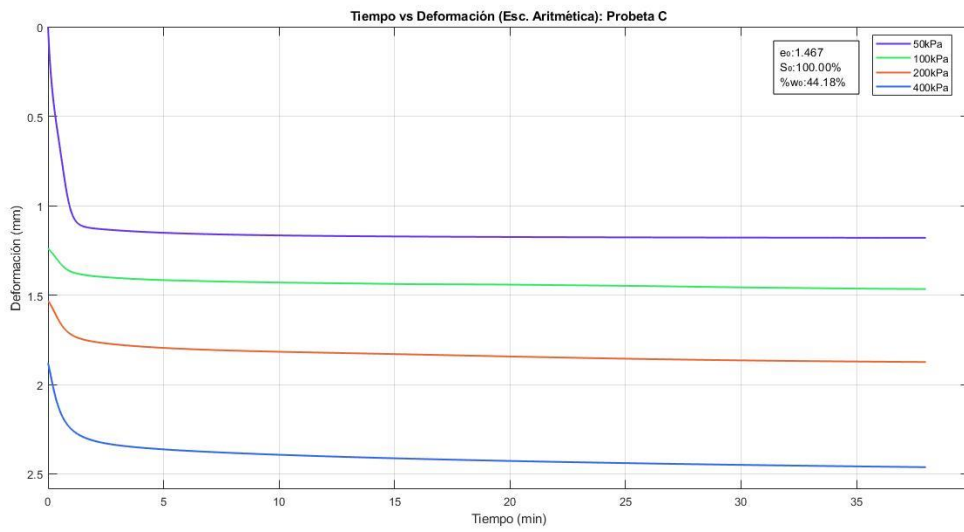


Figura 5.16. Resumen de curvas de consolidación en escala aritmética - Probeta C.

# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

## 5.4.4. Trayectoria del coeficiente de consolidación ( $C_v$ )

Para los datos de tiempo-deformación, se aplicaron las soluciones gráficas de Casagrande y Taylor, a partir de estas se determinaron los valores del coeficiente de consolidación ( $C_v$ ) para un grado de consolidación del 50 y 90% respectivamente. Los resultados pueden resumirse en las trayectorias del  $C_v$  y en los cuadros resumen presentados a continuación:

### 5.4.4.1. Probeta A

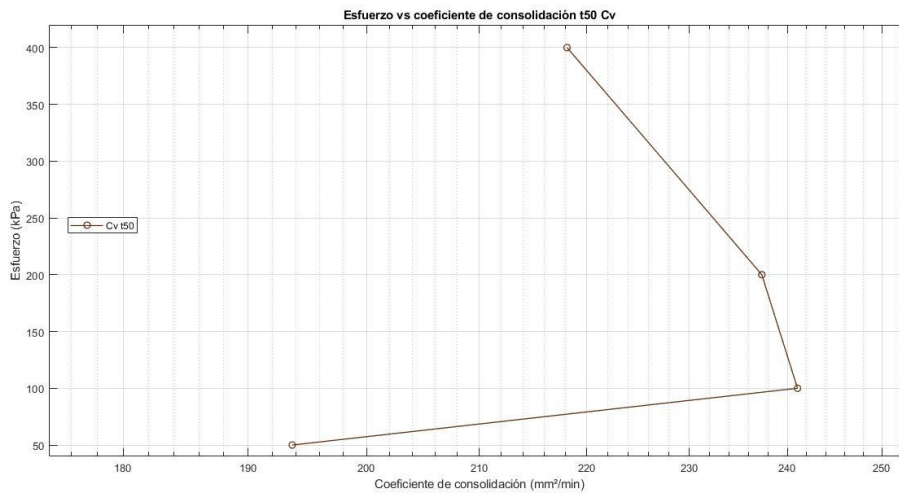


Figura 5.17. Trayectoria del  $C_v$  obtenido por el método de Casagrande - Probeta A.

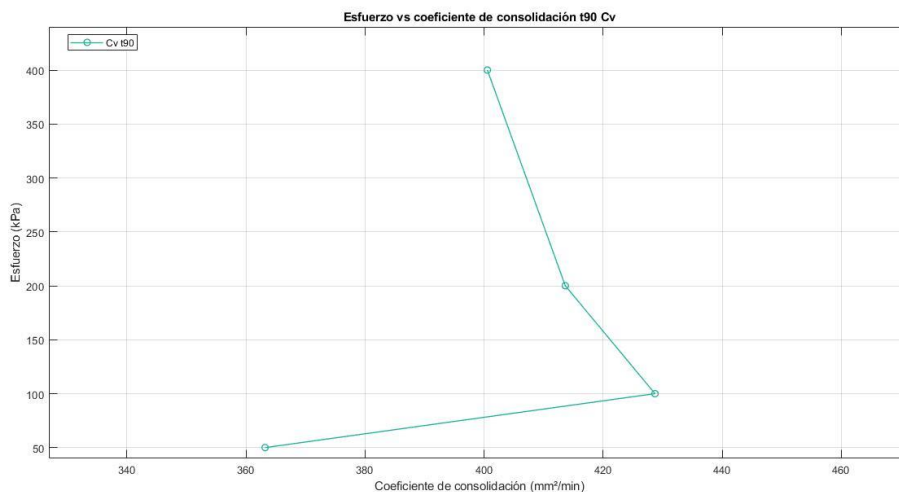


Figura 5.18. Trayectoria del  $C_v$  obtenido por el método de Taylor - Probeta A.

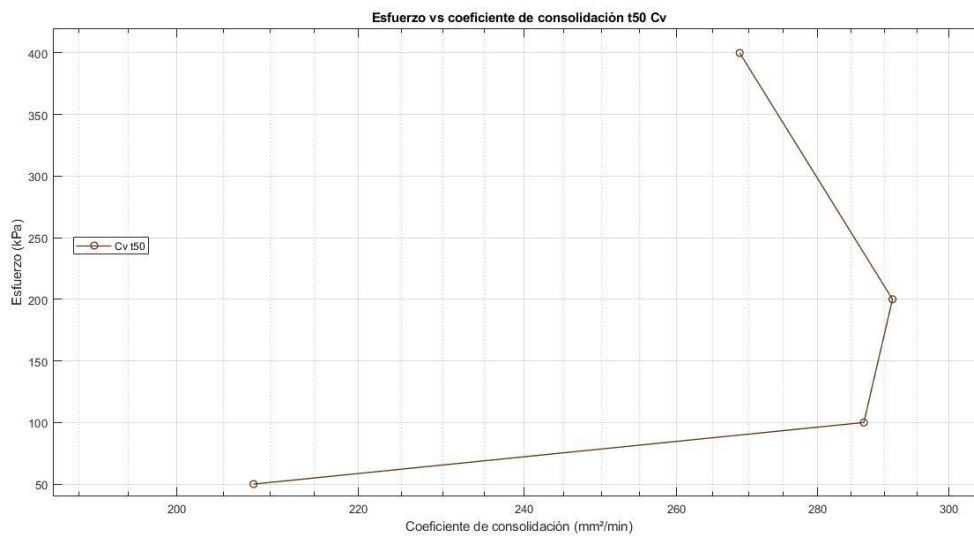
**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

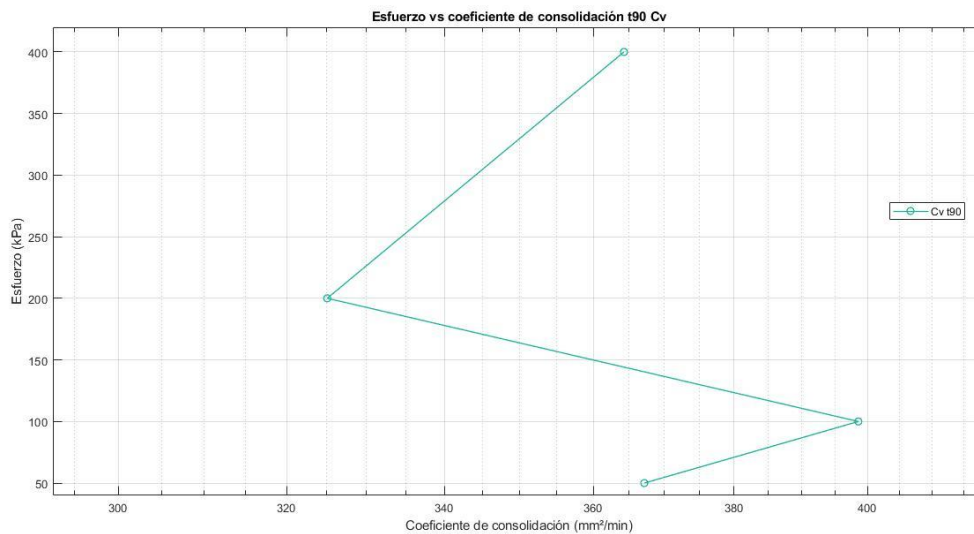
*Tabla 5.3. Resumen de resultados obtenidos de  $C_v$  para la probeta A.*

<b><math>C_v</math> - Probeta A</b>		
<b>Carga (kPa)</b>	<b>Método de Casagrande <math>C_v t_{50}</math> (mm<sup>2</sup>/min)</b>	<b>Método de Taylor <math>C_v t_{90}</math> (mm<sup>2</sup>/min)</b>
50	193.67	363.21
100	241.03	428.70
200	237.34	413.64
400	218.14	400.55

**5.4.4.2. Probeta B**



*Figura 5.19. Trayectoria del  $C_v$  obtenida por el método de Casagrande - Probeta B.*



*Figura 5.20. Trayectoria del  $C_v$  obtenido por el método de Taylor - Probeta B.*

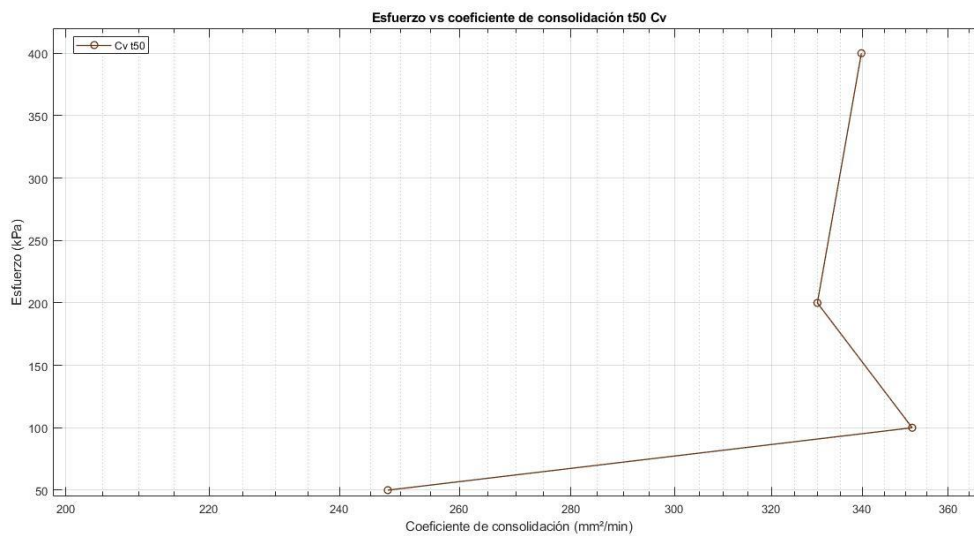
**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

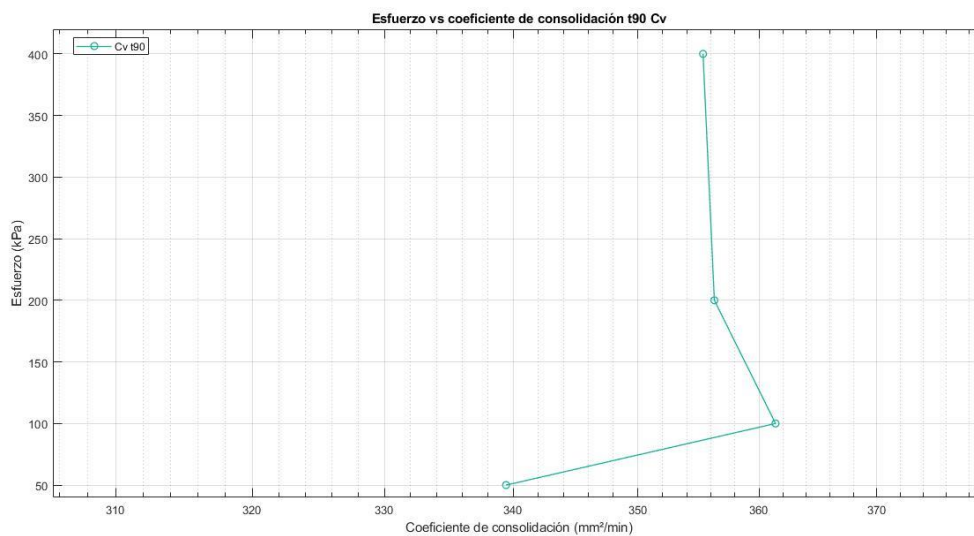
*Tabla 5.4. Resumen de resultados obtenidos de  $C_v$  para la probeta B.*

<b><math>C_v</math> - Probeta B</b>		
<b>Carga (kPa)</b>	<b>Método de Casagrande <math>C_v t_{50}</math> (mm<sup>2</sup>/min)</b>	<b>Método de Taylor <math>C_v t_{90}</math> (mm<sup>2</sup>/min)</b>
50	208.23	367.13
100	286.86	398.59
200	291.21	325.04
400	268.76	364.28

**5.4.4.3. Probeta C**



*Figura 5.21. Trayectoria del  $C_v$  obtenida por el método de Casagrande - Probeta C.*



*Figura 5.22. Trayectoria del  $C_v$  obtenida por el método de Taylor - Probeta C.*

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

*Tabla 5.5. Resumen de resultados obtenidos de  $C_v$  para la probeta C.*

<b><math>C_v</math> - Probeta C</b>		
<b>Carga (kPa)</b>	<b>Método de Casagrande <math>C_v t_{50}</math> (mm<sup>2</sup>/min)</b>	<b>Método de Taylor <math>C_v t_{90}</math> (mm<sup>2</sup>/min)</b>
50	247.85	339.45
100	351.50	361.39
200	329.98	359.29
400	339.80	355.35

*5.4.5. Relación entre la consolidación primaria y secundaria*

Observando el comportamiento de la deformación de las probetas en períodos de 24 horas para cada estado de carga según el método de Casagrande, se ha verificado la variación de la consolidación primaria y secundaria según el grado de consolidación total. Se obtuvieron los siguientes resultados:

*Tabla 5.6. Porcentajes de consolidación primaria y secundaria - Probeta A.*

<b>PROBETA A</b>		
<b>Carga (kPa)</b>	<b>Consolidación Primaria (%)</b>	<b>Consolidación Secundaria (%)</b>
50	87.76	12.24
100	69.10	30.90
200	68.66	31.34
400	71.30	28.70

*Tabla 5.7. Porcentajes de consolidación primaria y secundaria - Probeta B.*

<b>PROBETA B</b>		
<b>Carga (kPa)</b>	<b>Consolidación Primaria (%)</b>	<b>Consolidación Secundaria (%)</b>
50	91.11	8.89
100	69.70	30.30
200	67.35	32.65
400	69.56	30.44

*Tabla 5.8. Porcentajes de consolidación primaria y secundaria - Probeta C.*

<b>PROBETA C</b>		
<b>Carga (kPa)</b>	<b>Consolidación Primaria (%)</b>	<b>Consolidación Secundaria (%)</b>
50	93.19	6.81
100	68.21	31.79
200	66.65	33.35
400	68.63	31.57

*5.4.5.1. Coeficiente de consolidación secundaria  $C_{\alpha}$*

En contraste con el punto anterior, también fue calculado el coeficiente de consolidación secundaria para cada estado de carga aplicado en los tres especímenes. Estos son indicados a continuación:

*Tabla 5.9. Coeficientes de consolidación secundaria - Probeta A.*

<b><math>C_{\alpha}</math> probeta A</b>	
<b>Carga (kPa)</b>	<b><math>C_{\alpha}</math></b>
50	0.0035
100	0.0038
200	0.0057
400	0.0074

*Tabla 5.10. Coeficientes de consolidación secundaria - Probeta B.*

<b><math>C_{\alpha}</math> probeta B</b>	
<b>Carga (kPa)</b>	<b><math>C_{\alpha}</math></b>
50	0.0031
100	0.0035
200	0.0061
400	0.0084

*Tabla 5.11. Coeficientes de consolidación secundaria - Probeta C.*

<b><math>C_{\alpha}</math> probeta C</b>	
<b>Carga (kPa)</b>	<b><math>C_{\alpha}</math></b>
50	0.0032
100	0.0032
200	0.0055
400	0.0074

#### 5.4.6. Curvas de disipación de presión de poros

Los datos de disipación de presión de poros recolectados por el equipo en todos los especímenes generaron información no confiable. La única lectura que se considera con posibilidades de análisis es la producida en el espécimen A, siendo esta la única que será presentada y analizada. Un procedimiento de depuración en los datos crudos fue aplicado para eliminar lecturas negativas. Esto se consiguió restándole a todas las lecturas de presión el valor mínimo registrado correspondiente a todo ese vector de lecturas, desplazando la curva a través de la dirección del eje vertical.

##### 5.4.6.1. Probeta A:

50 kPa

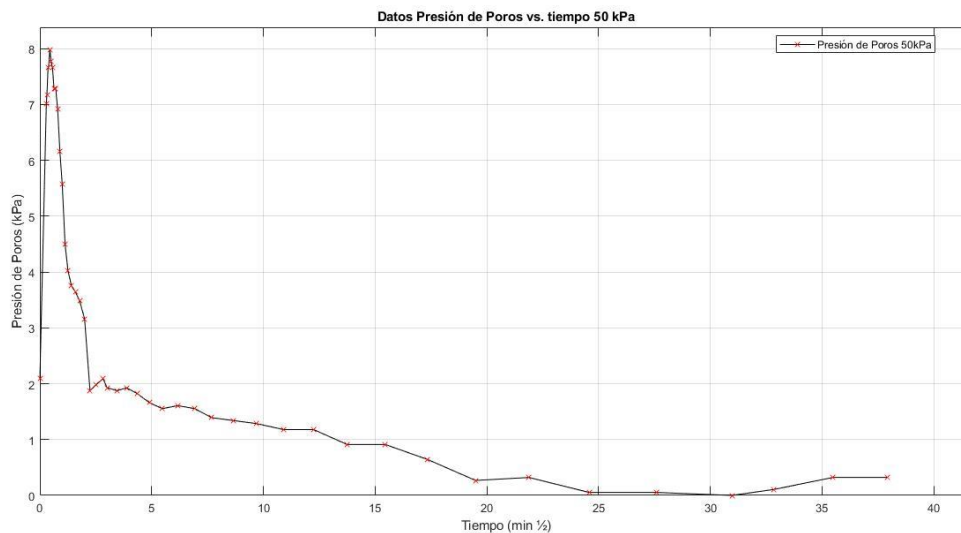


Figura 5.23. Datos crudos depurados - 50 kPa.

# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

100 kPa

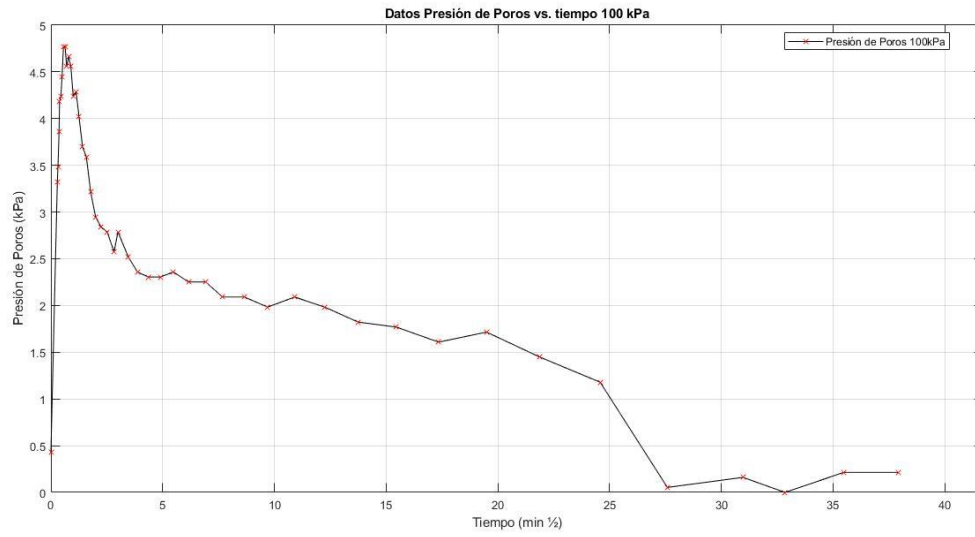


Figura 5.24. Datos crudos depurados - 100 kPa.

200 kPa

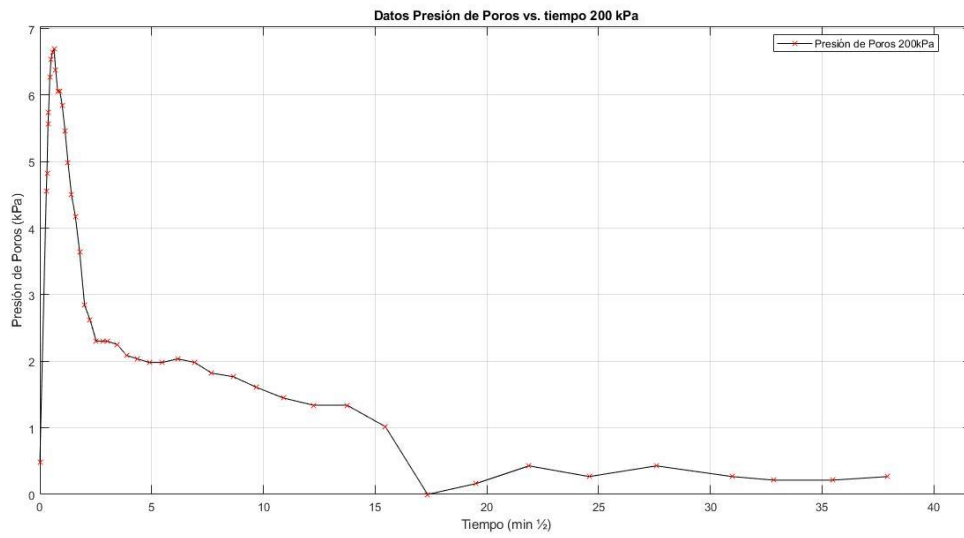


Figura 5.25. Datos crudos depurados - 200 kPa.

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

400 kPa

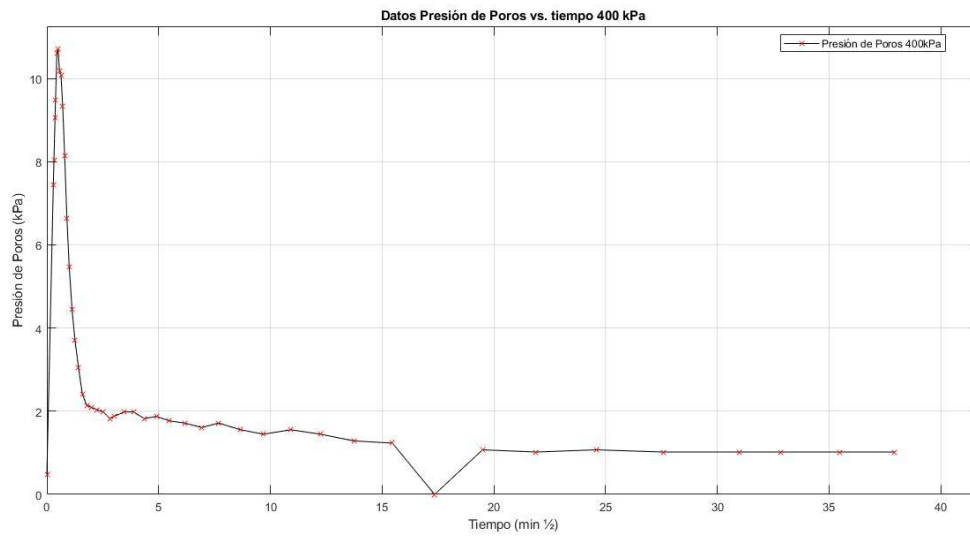


Figura 5.26. Datos crudos depurados - 400 kPa.

Las gráficas no alcanzan su magnitud teórica en su punto máximo; es decir, que no se está registrando un valor completo de presión, sino uno parcial. Las tendencias que describen las curvas son las esperadas, a excepción del estado de carga de 100 kPa que demora en volverse asintótico (Chow et al., 2020).

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el propósito de evidenciar la variación de las propiedades geomecánicas calculadas en los tres especímenes hermanos se determinaron parámetros estadísticos básicos. Principalmente son reportados los siguientes valores: valor promedio, mínimo, máximo y desviación estándar entre las tres probetas ensayadas.

### 6.1. Análisis de relación de vacíos inicial

Los resultados del análisis estadístico de la relación de vacíos inicial se presentan en el siguiente cuadro:

*Tabla 6.1. Resultados del análisis estadístico de la relación de vacíos inicial y densidad total.*

<b>Probeta</b>	<b><math>e_0</math></b>		<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	
<b>A</b>	1.047		1.87	
<b>B</b>	1.337		1.65	
<b>C</b>	1.467		1.57	
<b>Máximo</b>	1.467		1.87	
<b>Mínimo</b>	1.047		1.57	
<b><math>\Delta</math></b>	0.420		0.300	
<b>Desv. Estan</b>	0.215		0.155	
<b>Promedio</b>	1.284	± 0.215	1.697	± 0.155

Los datos obtenidos en los tres especímenes siguiendo el mismo proceso de preparación con el mismo operador presentan una desviación estándar en la relación de vacíos de 0.215, y de 0.155 g/cm<sup>3</sup> en la densidad total de los especímenes.

*6.2. Análisis del esfuerzo de preconsolidación*

Los resultados del análisis estadístico de la relación del esfuerzo de preconsolidación,  $C_c$  y  $C_s$  se presentan en el siguiente cuadro:

*Tabla 6.2. Resultados del análisis estadístico del  $P_c$ ,  $C_s$  y  $C_c$ .*

<b>Probeta</b>	<b><math>P_c</math> (kPa)</b>	<b><math>C_s</math></b>	<b><math>C_c</math></b>
<b>A</b>	169.20	0.06	0.34
<b>B</b>	170.49	0.06	0.37
<b>C</b>	169.74	0.05	0.33
<b>Máximo</b>	170.49	0.06	0.37
<b>Mínimo</b>	169.20	0.05	0.33
<b>Desv. Estan</b>	0.65	0.01	0.02
<b>Promedio</b>	169.81 ± 0.65	0.06 ± 0.01	0.35 ± 0.02

El valor promedio y la desviación de todos los parámetros indican una diferencia entre los datos prácticamente nula. De lo cual se puede inducir que, a nivel de esfuerzos efectivos y su relación con la variación de la relación de vacíos total, la desviación estándar que presentan las muestras patrón A, B y C en la relación de vacíos inicial y su peso unitario total inicial, no presenta influencia en los resultados relativos y convencionales de  $P_c$ ,  $C_s$  y  $C_c$ . Las curvas de compresibilidad tienen una variación de la relación de vacíos muy similar con respecto a cada incremento de esfuerzo.

Si se analiza el valor obtenido de esfuerzo de preconsolidación promedio de 170 kPa, se puede indicar que está relacionado a la carga de acondicionamiento aplicada durante el proceso de creación de la muestra. Sachan et al. (2013) menciona que, al seguir el procedimiento indicado en su investigación, la carga de preconsolidación osciló entre 150-200 kPa.

**6.3. Análisis coeficiente de consolidación ( $C_v$ )**

Un análisis estadístico de todos los resultados obtenidos del coeficiente de consolidación se presenta en la siguiente tabla:

*Tabla 6.3. Resultados del análisis estadístico del  $C_v$  obtenido por el método de Casagrande.*

<b>Resumen de <math>C_v</math> - <math>t_{50}</math> (mm<sup>2</sup>/min)</b>				
<b>Carga (kPa)</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Promedio</b>	
50	193.67	247.85	216.58	± 28.04
100	241.03	351.50	293.13	± 55.50
200	237.34	329.98	286.18	± 46.53
400	218.14	339.80	275.57	± 61.11

*Tabla 6.4. Resultados del análisis estadístico del  $C_v$  obtenido por el método de Taylor.*

<b>Resumen de <math>C_v</math> - <math>t_{90}</math> (mm<sup>2</sup>/min)</b>				
<b>Carga (kPa)</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Promedio</b>	
50	339.45	367.13	356.60	± 14.98
100	361.39	428.70	396.23	± 33.72
200	325.04	413.64	364.99	± 44.94
400	355.35	400.55	373.39	± 23.93

Al comparar los resultados del  $t_{50}$  con los del  $t_{90}$ , se evidencia que este último presenta una menor desviación en cada estado de carga. Al tener desviaciones menos considerables, el coeficiente de consolidación obtenido por el método de Taylor pudiera ser más confiable en este material, dentro de los alcances generados en la elaboración de los especímenes.

# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

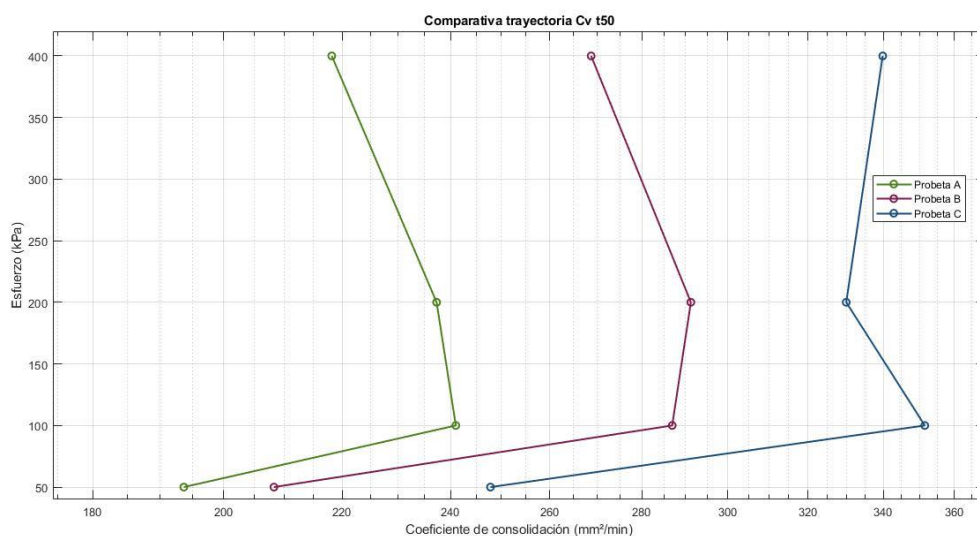


Figura 6.1. Compilación de trayectorias del  $C_v$  obtenidas por el método de Casagrande.

En el caso de la trayectoria del  $C_v$  según el método de Casagrande, se observa un incremento dentro de los estados de 50 a 100 kPa; mientras que para los de 100 a 200 kPa los especímenes A y C experimentan un descenso, a diferencia del espécimen B, que se incrementa ligeramente. De 200 a 400 kPa, los especímenes A y B sufren un descenso mediano del  $C_v$ , mientras que el espécimen C sufre un ligero incremento. En promedio el comportamiento del  $C_v$  es de incremento medio en el intervalo de 50 a 100 kPa, y de descenso ligero para los estados de carga restantes.

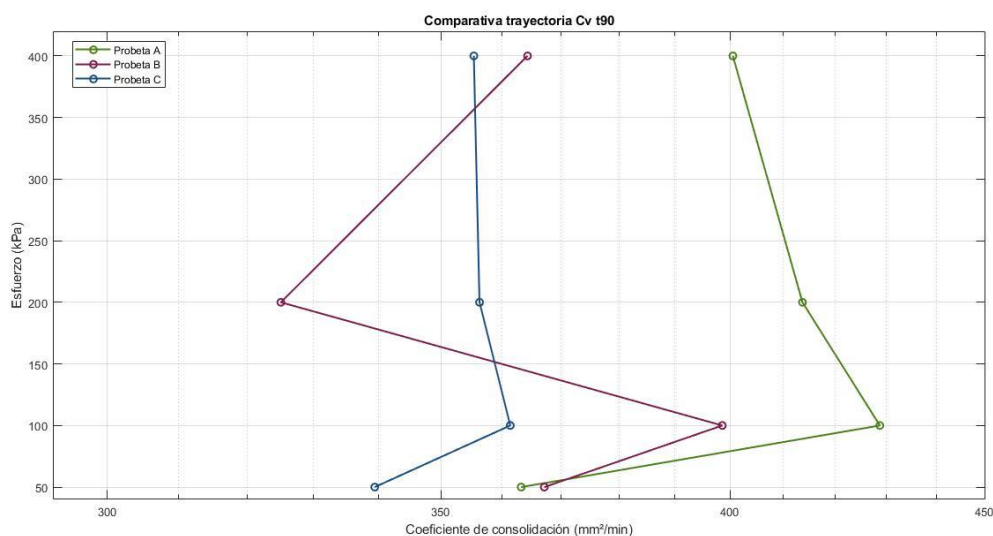


Figura 6.2. Compilación de trayectorias de  $C_v$  obtenidas por el método de Taylor.

La trayectoria observada del  $C_v$  por el método de Taylor, es de incremento medio en el intervalo de 50 a 100 kPa, mientras que en el intervalo de 100 a 200 kPa existe un ligero descenso en los especímenes A y C, en tanto que el espécimen B el descenso es alto. Para el intervalo de 200 a 400 kPa los especímenes A y C sufren un ligero descenso, mientras que el espécimen B genera un alto ascenso. En el promedio, se puede evidenciar un aumento del  $C_v$ , en el intervalo de 50 a 100 kPa, descenso en el intervalo de 100 a 200 kPa, mientras que para en el último intervalo de esfuerzo se observa un ligero incremento.

En resumen, se puede observar, un comportamiento similar entre las tres probetas para el método del  $t_{50}$ , es decir sus trayectorias son aproximadamente paralelas entre sí. No obstante, para el caso del método del  $t_{90}$ , esta última premisa solo es cierta para las probetas A y C. La probeta B presenta una variación importante para el esfuerzo de 200 kPa.

Para esfuerzos posteriores al de 100 kPa se observa una tendencia a una disminución gradual y una convergencia de los resultados para el intervalo de 200 a 400 kPa. Este comportamiento puede relacionarse a la carga de acondicionamiento de 200kPa aplicada durante la preparación de la probeta.

#### *6.4. Análisis de la superposición de curvas para cada estado de esfuerzo*

El análisis entre curvas de consolidación para un mismo esfuerzo puede determinarse en primer lugar mediante un cálculo estadístico que compare los valores de relación de vacíos en las tres probetas para tres valores de tiempo iguales.

A continuación, se realiza un análisis estadístico de la variación de la relación de vacíos en cada espécimen para distintos tiempos escogidos al azar de 0.0083, 26 y 1340 minutos.

# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

## 6.4.1. Método de Casagrande

### 6.4.1.1. 50 kPa

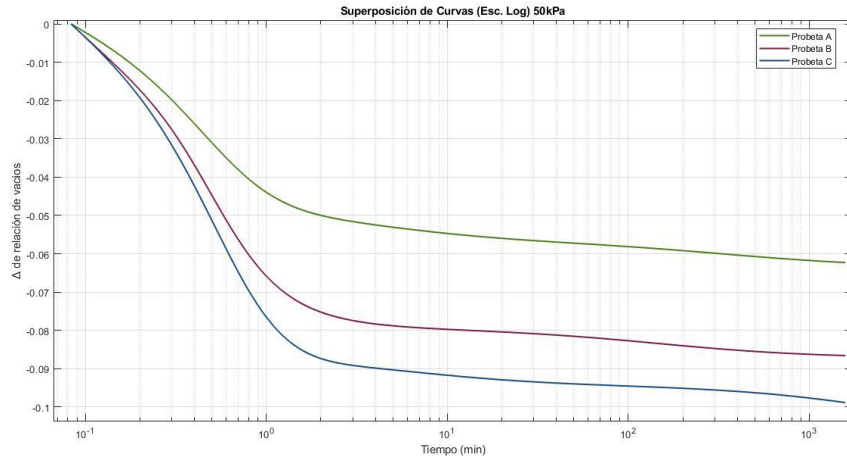


Figura 6.3. Superposición de curvas de consolidación para 50 kPa.

Tabla 6.5. Análisis estadístico para curvas de compresibilidad a 50 kPa.

Estadística comparativa Curvas Tiempo-Relación de Vacíos 50kPa					
Tiempo (min)	Mínimo	Máximo	$\Delta e$	Promedio	
0.083	1.007	1.401	0.394	1.234	$\pm 0.204$
26.000	0.951	1.308	0.357	1.158	$\pm 0.182$
1340.000	0.945	1.303	0.358	1.152	$\pm 0.185$

### 6.4.1.2. 100 kPa

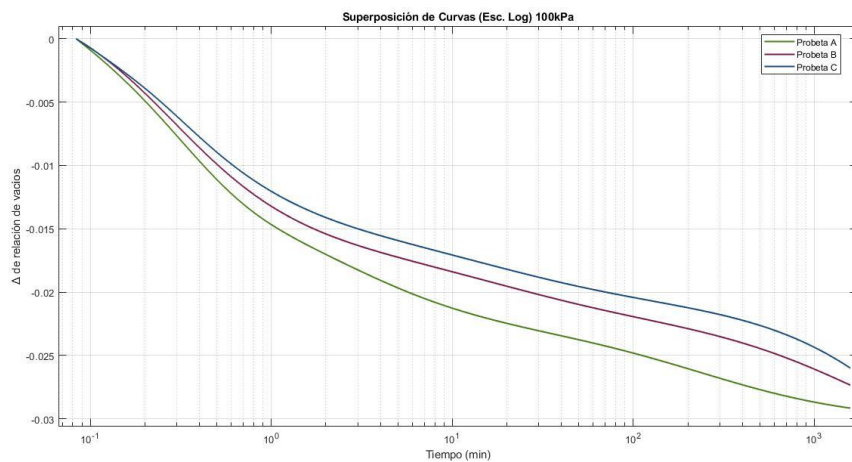


Figura 6.4. Superposición de curvas de consolidación para 100 kPa.

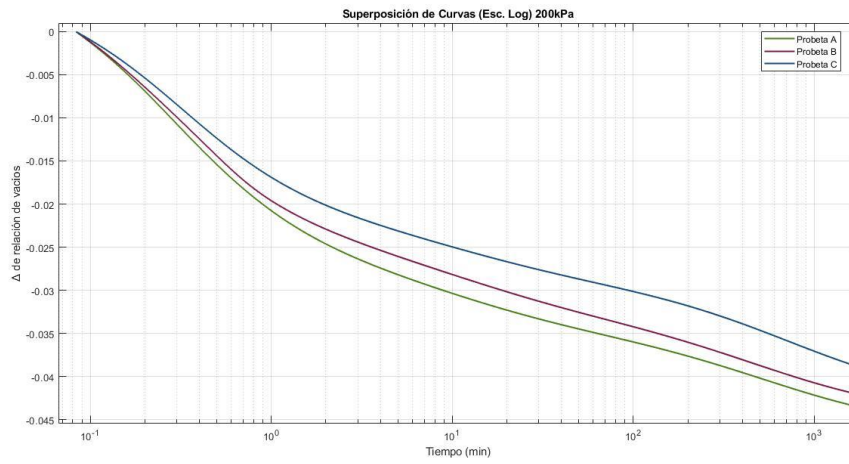
**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

*Tabla 6.6. Análisis estadístico para curvas de compresibilidad a 100 kPa.*

<b>Estadística comparativa Curvas Tiempo-Relación de Vacíos 100kPa</b>					
<b>Tiempo (min)</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b><math>\Delta e</math></b>	<b>Promedio</b>	
0.083	0.932	1.290	0.359	1.139	± 0.186
26.000	0.909	1.272	0.363	1.118	± 0.188
1340.000	0.903	1.265	0.362	1.112	± 0.187

6.4.1.3. 200 kPa



*Figura 6.5. Superposición de curvas de consolidación para 200 kPa.*

*Tabla 6.7. Análisis estadístico para curvas de compresibilidad a 200 kPa.*

<b>Estadística comparativa Curvas Tiempo-Relación de Vacíos 200kPa</b>					
<b>Tiempo (min)</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b><math>\Delta e</math></b>	<b>Promedio</b>	
0.083	0.883	1.247	0.364	1.093	± 0.188
26.000	0.850	1.219	0.369	1.062	± 0.191
1340.000	0.840	1.208	0.368	1.052	± 0.190

6.4.1.4. 400 kPa

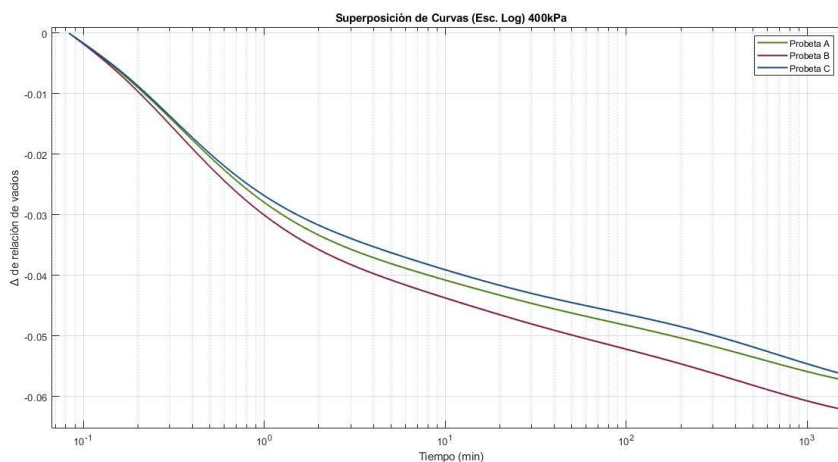


Figura 6.6. Superposición de curvas de consolidación para 400 kPa.

Tabla 6.8. Análisis estadístico para curvas de compresibilidad a 400 kPa.

Estadística comparativa Curvas Tiempo-Relación de Vacíos 400kPa					
Tiempo (min)	Mínimo	Máximo	Δ e	Promedio	
0.083	0.813	1.183	0.370	1.025	± 0.191
26.000	0.768	1.141	0.372	0.980	± 0.191
1340.000	0.756	1.127	0.372	0.967	± 0.191

Para los datos analizados, se observan valores de desviación considerablemente similares para todos los esfuerzos aplicados. A su vez, podemos observar que se reporta un comportamiento igual para el valor de  $\Delta e$ , el cual se asemeja al rango de variación de la relación de vacíos inicial. Valores que demuestran la similitud de trayectoria de los especímenes hermanos

Al observar el comportamiento de las trayectorias de las curvas de consolidación para todos los estados de carga (ver figuras 6.3, 6.4, 6.5 y 6.6) se ratifica visualmente la similitud entre los tres especímenes. Entre mayor es el esfuerzo aplicado, mayor es la semejanza entre las curvas.

6.5. Análisis de la consolidación primaria y secundaria

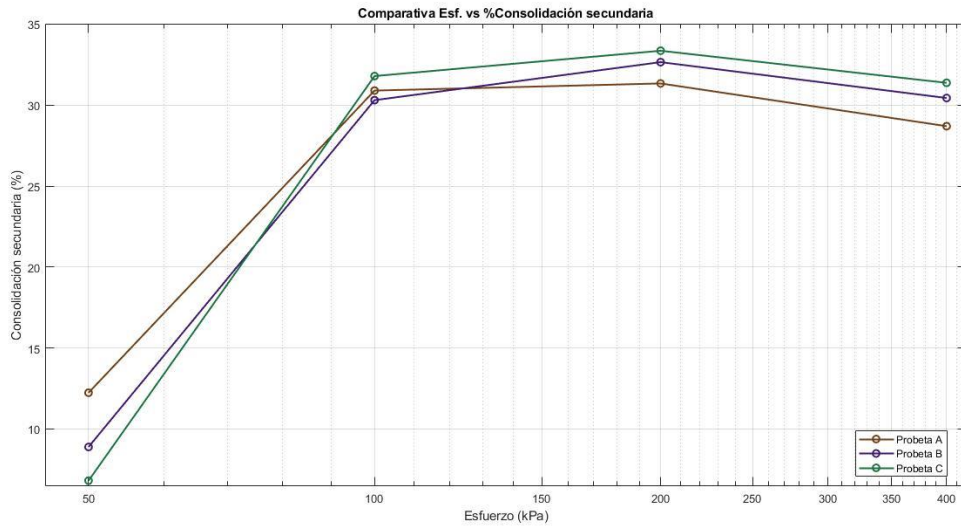


Figura 6.7. Porcentaje de consolidación secundaria según el nivel de esfuerzos aplicado.

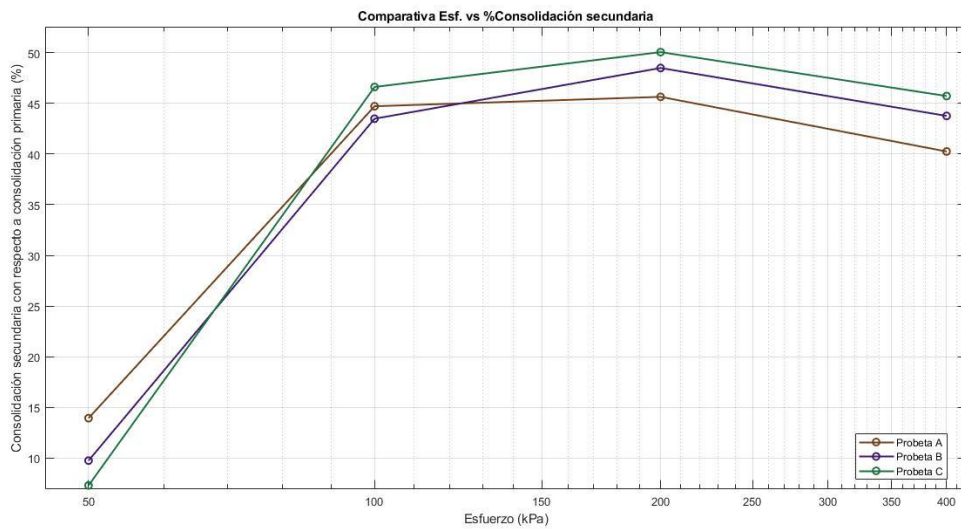


Figura 6.8. Porcentaje de consolidación secundaria respecto a la primaria para cada nivel de esfuerzos.

Al comparar los porcentajes de consolidación primaria y secundaria, podemos observar que, si relacionamos la consolidación secundaria con respecto al tiempo, para el valor inicial de 50 kPa, el porcentaje se mantiene alrededor de 10%. Para valores superiores a la carga de 50 kPa, el valor asciende al 30 %, y aparentemente tiende a mantenerse cerca de ese valor para cargas superiores. Las tres probetas comparten una tendencia similar.

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

Tabla 6.9. Porcentajes de consolidación primaria y secundaria de una probeta ensayada en un edómetro tradicional.

PROBETA EQUIPO NORMAL		
Carga (kPa)	Consolidación Primaria (%)	Consolidación Secundaria (%)
50	92.86	7.14
100	66.58	33.42
200	64.36	35.64
400	65.40	34.60

Esta última tabla presenta los resultados de porcentajes de consolidación primaria y secundaria para un ensayo realizado en un edómetro común. Al tener en los porcentajes de consolidación secundaria valores similares a los de nuestras probetas A, B y C; podemos evidenciar que no se presentan deformaciones adicionales como consecuencia del comportamiento mecánico del duralón.

Tabla 6.10. Análisis estadístico del coeficiente de consolidación secundaria  $C_{\alpha}$ .

Estadística comparativa $C_{\alpha}$				
Carga (kPa)	Mínimo	Máximo	Promedio	
50	0.0031	0.0035	0.0033	± 0.0002
100	0.0032	0.0038	0.0035	± 0.0003
200	0.0055	0.0061	0.0058	± 0.0003
400	0.0074	0.0084	0.0077	± 0.0006

En base a los datos presentados en el acápite 5.4.5.1., se determinó la desviación de este parámetro para cada estado de carga, observándose así una similitud con los resultados para los coeficientes de compresibilidad  $C_c$  y de expansión  $C_s$ .

6.6. Análisis de la disipación de la presión de poros

6.6.1. *Método referencial según Stanichevsky*

Para aplicar el método de Stanichevsky se requiere obtener en primer lugar los valores de la relación  $u/u_0$ , los cuales se presentan en la figura 2.7. Para intentar compararlos con los resultados gráficos de Casagrande y Taylor, el método es implementado para un grado de consolidación del 50% y del 90%. Este análisis permitió obtener las siguientes curvas:

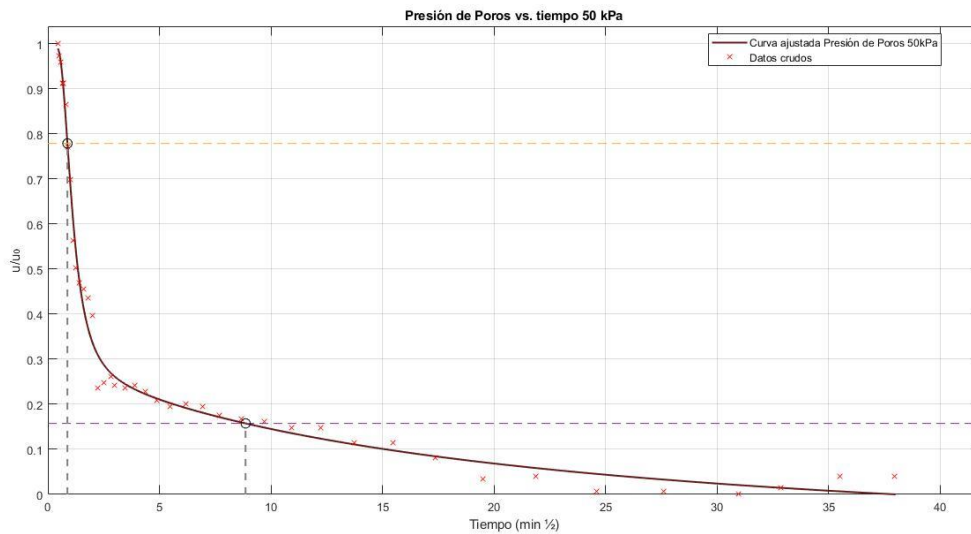


Figura 6.9. Curva ajustada de presión de poros - 50 kPa.

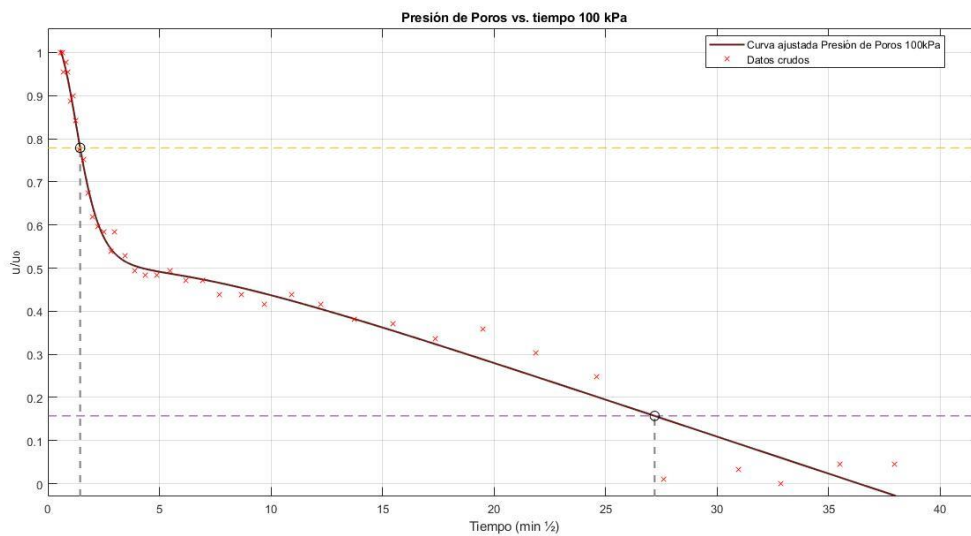


Figura 6.10. Curva ajustada de presión de poros - 100 kPa.

# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

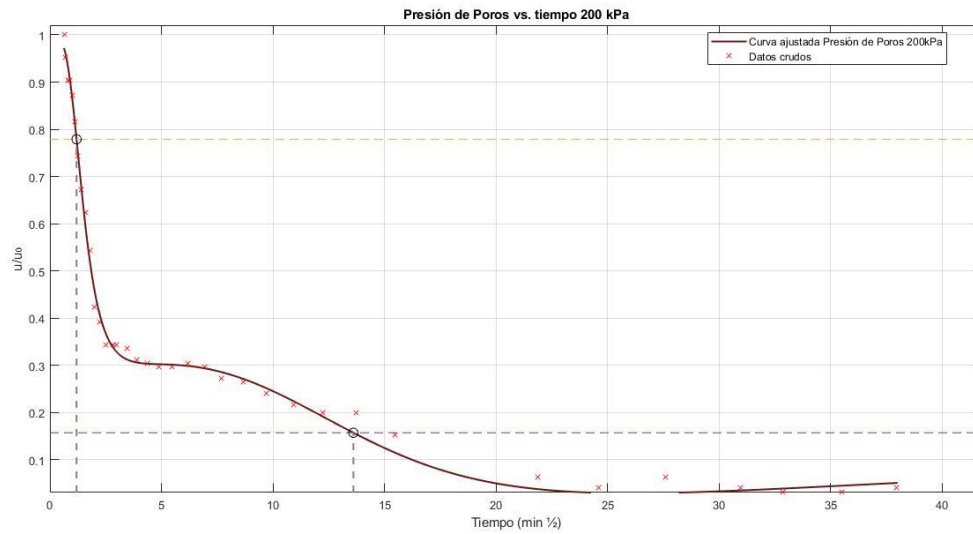


Figura 6.11. Curva ajustada de presión de poros - 200 kPa.

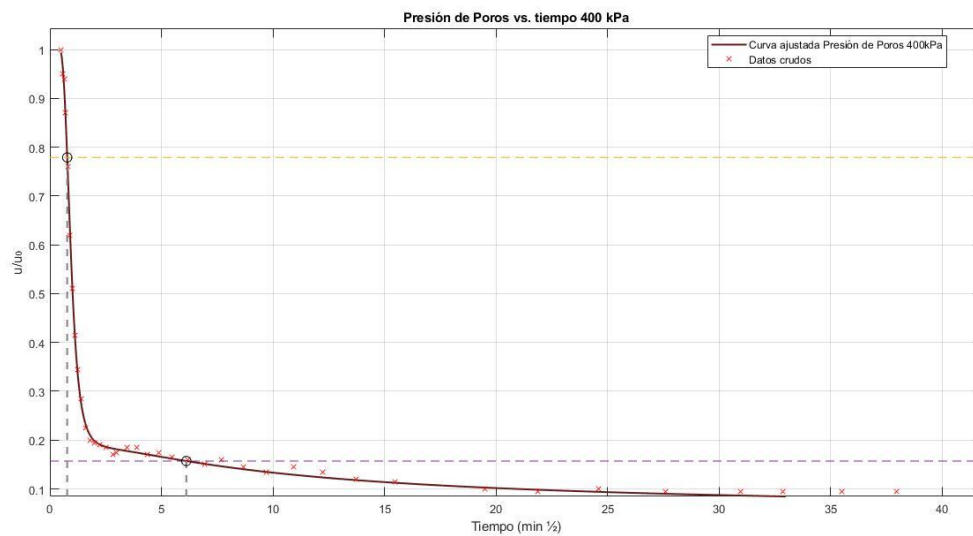


Figura 6.12. Curva ajustada de presión de poros - 400 kPa.

El análisis de estas gráficas permitió calcular el coeficiente de consolidación ( $C_v$ ) utilizando los valores de  $t_{50}$  y  $t_{90}$  calculados al implementar la metodología. Obteniéndose los siguientes resultados:

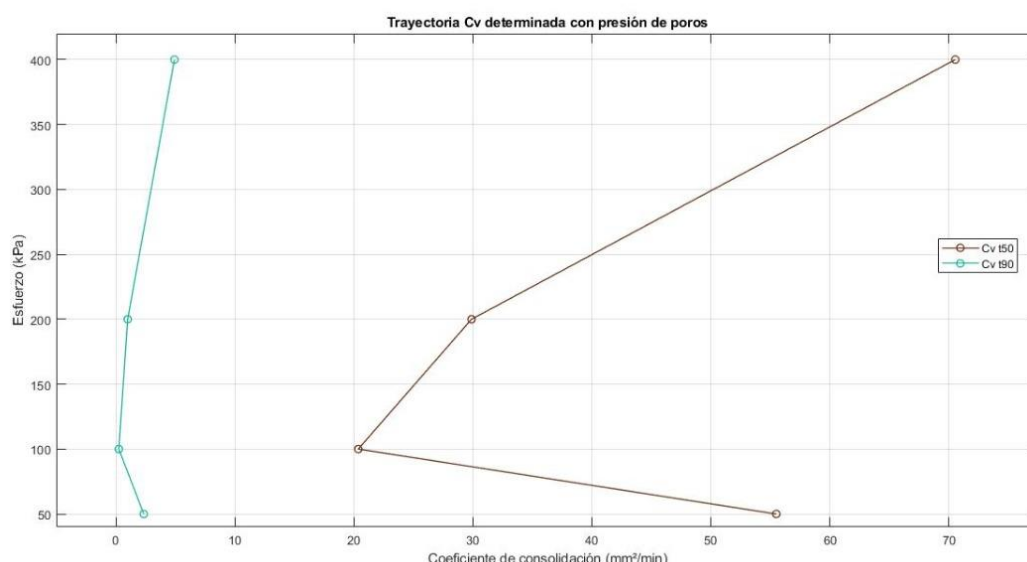
**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

*Tabla 6.11. Resultados de  $C_v$  obtenidos por el método de Stanichevsky*

Cargas (kPa)	$u_0$ (kPa)	$C_v t_{50}$ (mm <sup>2</sup> /min)	$C_v t_{90}$ (mm <sup>2</sup> /min)
50	5.841	55.507	2.345
100	4.287	20.372	0.249
200	6.216	29.893	0.995
400	10.236	70.547	4.924

Como se mencionó anteriormente en el acápite 5.4.6., se dispone únicamente de los datos arrojados por el equipo en el espécimen A, con la limitación de realizar un análisis cualitativo de la variación de presión de poros, debido a que no fue factible la captación completa de la presión de poros inducida por los incrementos de carga.



*Figura 6.13. Compilación de trayectorias de  $C_v$  obtenidas por el método de Stanichevsky para el 50% y 90% de grado de consolidación.*

Las trayectorias observadas del  $C_v$  según el  $t_{50}$  y el  $t_{90}$ , indican que este parámetro disminuye en el intervalo de 50 a 100 kPa, luego experimenta un incremento para los estados desde 100 kPa en adelante. Estos valores no tienen posibilidad de ser comparados con los resultados obtenidos mediante las metodologías tradicionales, Casagrande y Taylor. Por este motivo, se exponen únicamente para ejemplificar la metodología establecida por Stanichevsky, la cual determina los valores del factor tiempo ( $T_v$ ) según el grado de consolidación que se requiera.

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

### 6.6.2. Comparativa curvas grado de consolidación vs. tiempo

Adicionalmente al punto anterior, un estudio comparativo de los grados de consolidación estimados a partir de las curvas de deformación y de presión de poros fue elaborado. Esto con la finalidad de comprobar si las curvas de los datos presentan tendencias similares. El análisis arrojó los siguientes datos:

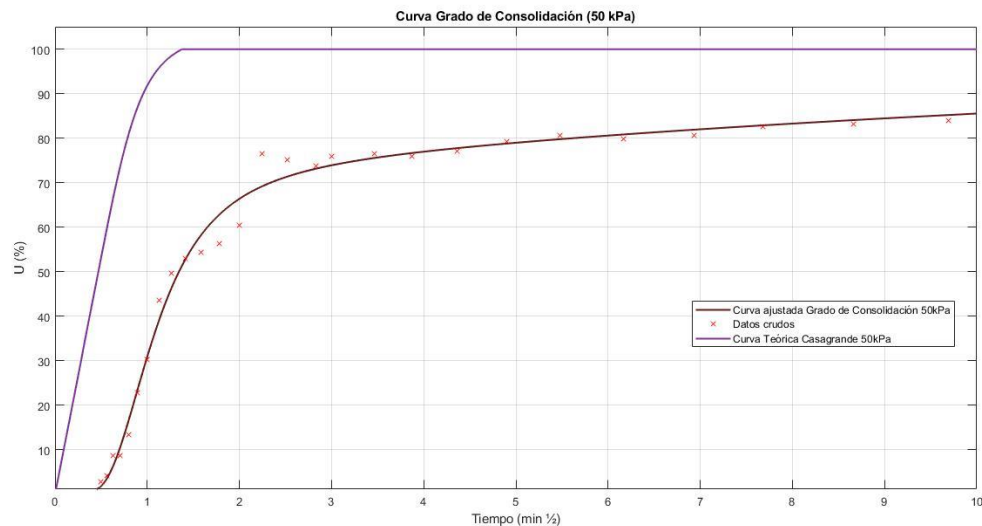


Figura 6.14. Curvas de grado de consolidación vs. tiempo - 50 kPa.

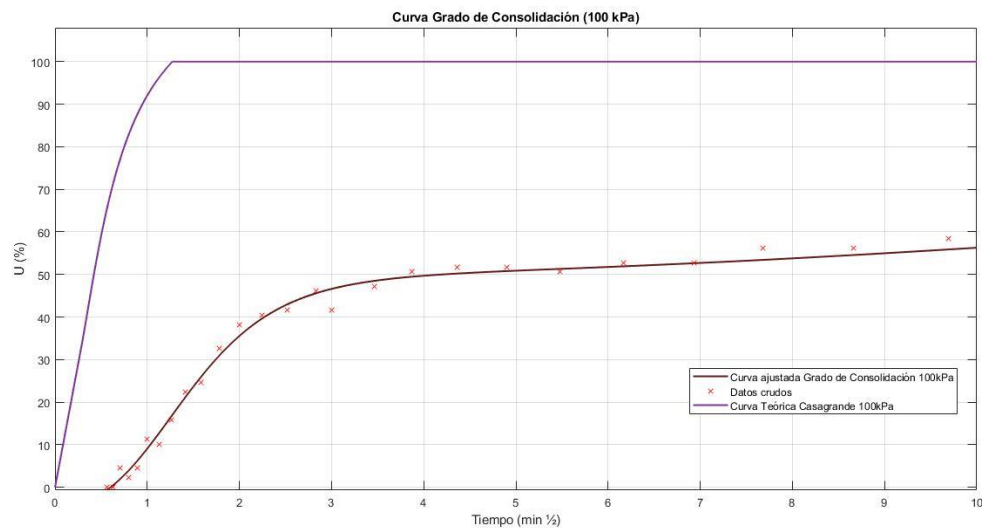


Figura 6.15. Curvas de grado de consolidación vs. tiempo - 100 kPa.

## “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

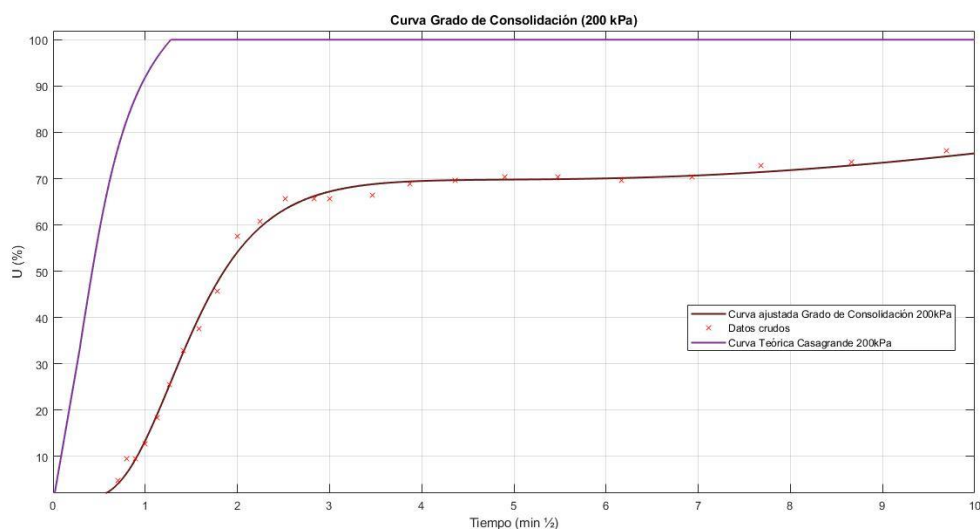


Figura 6.16. Curvas de grado de consolidación vs. tiempo - 200 kPa.

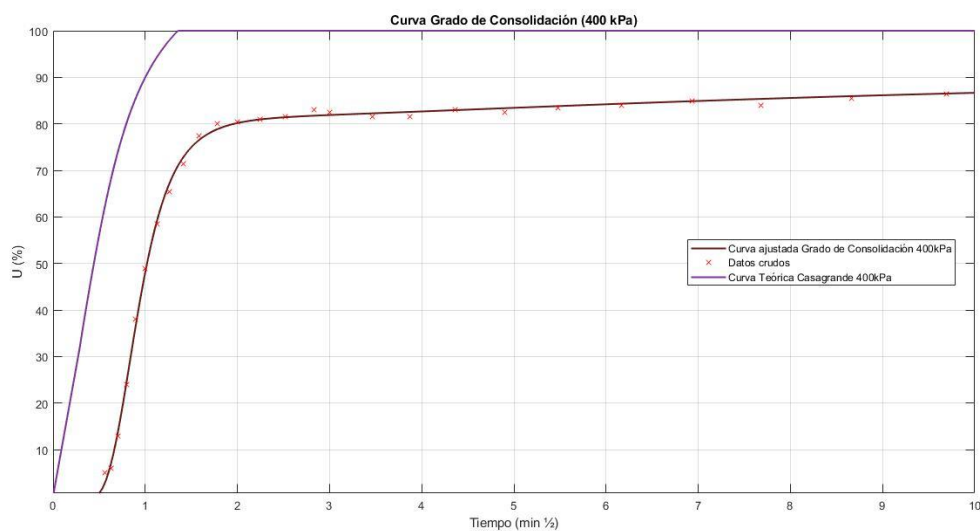


Figura 6.17. Curvas de grado de consolidación vs. tiempo - 400 kPa.

Fue generada una variación del grado de consolidación construida a través de las deformaciones por Casagrande para cada estado de carga. Si bien permite describir de manera aproximada el grado de consolidación a partir de datos de deformación, todavía está lejano de definir una curva precisa de la variación de este parámetro. Las tendencias no coinciden para todos los casos, aunque, podemos observar que las curvas pertenecientes a los estados de carga de 50 y 400 kPa son los que tiene una mayor proximidad. También cabe notar que el desfase

del punto inicial de la presión de poros, cuando  $U=0$ , es un comportamiento esperado debido a la “demora” que genera el acomodo inicial de todo el volumen de la probeta (Chow et al., 2020).

## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### *7.1. Conclusiones*

- Se ha diseñado un prototipo de edómetro con capacidad de lectura de la presión de poros, logrado dentro del marco establecido por la normativa ASTM D2435 y de los conceptos teóricos de consolidación. El sistema de drenaje diseñado es en un solo sentido, generando así la disipación de presión de poros en la sección superior de la probeta y lectura de este parámetro en la parte inferior. En estas condiciones se ha comprobado que se produce el drenaje de agua y este es capaz de obtener lecturas de disipación de presión.
- Se comprobó la fiabilidad del duralón, al demostrarse que su comportamiento mecánico no influye en los resultados. Esto se evidencia al observarse que los porcentajes de consolidación primaria y secundaria en el prototipo son similares a los obtenidos para una muestra ensayada en un edómetro común. Asimismo, el material que compone el equipo no evidenció fisuras, ni fugas de agua de ningún tipo.
- El prototipo fue capaz de combinar el modelo de edómetro establecido por la ASTM y aquel establecido por Head en 1994. Puesto que, este puede ser acoplado al brazo de carga y permite la toma de lecturas de presión en la parte inferior de la muestra debido a la implementación de un transductor de presión.
- Dentro de la metodología de la investigación, la verificación del comportamiento del equipo requería del control de sus posibles variables, debido a esto surge la necesidad de utilizar un material patrón que no constituya o genere modificaciones por causa de condiciones intrínsecas o propias del material. El material escogido fue un caolín utilizado por la industria de cerámica EDESA S.A. La fiabilidad del caolín se ha comprobado sobre la base del comportamiento experimentado en cada uno de los indicadores que caracteriza al material, y que han sido obtenidos por medio de los ensayos según la norma ASTM pertinente. Se puede observar en la tabla 7.1 el resumen de resultados correspondiente al proceso por triplicado de ensayos ejecutados. Se

**“Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”**

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

demuestra el cumplimiento del requerimiento de desviación impuesto por la norma en aquellos que se declara tal exigencia. A más de la fiabilidad del caolín, se verifica la idoneidad del operador para ejecutar los ensayos.

- Se ha determinado dentro de la investigación que el material posee las siguientes propiedades, evaluadas en ensayo triplicados y realizados por el mismo operador:

*Tabla 7.1. Resumen de resultados de la caracterización de la muestra patrón.*

<b>Descripción</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Promedio</b>			<b>Desviación estándar (ASTM)</b>
<b>Cont. Humedad</b>	w (%)	4.38	±	0.15	--
<b>Límite plástico</b>	LP (%)	26.4	±	0.8	0.4
<b>Límite líquido</b>	LL (%)	38.2	±	0.3	0.3
<b>Índice de plasticidad</b>	IP (%)	11.8	±	0.9	0.8
<b>Límite de contracción</b>	LC (%)	25.7	±	0.45	0.75
	Índice de Reducción (R)	1.56	±	0.03	0.017
<b>% Arena</b>	0.425 mm > P > 75 um	0.41	±	0.08	--
<b>% Finos</b>	P < 75 um	99.61	±	0.08	--
<b>Gravedad específica</b>	Gs	2.68	±	0.02	0.06
<b>Hidrometría</b>	75 um > P > 2 um	87.33	±	0.01	--
	P < 2 um	12.67	±	0.01	--
<b>Doble hidrometría</b>	%Dispersión	0.00	±	0.00	3.9-11.1%

\*(CD): con agente dispersante.

\*\* (SD): sin agente dispersante.

- *Granulometría:* De acuerdo con el tamaño de las partículas y regulaciones según el SUCS, el 100 % del material está compuesto por partículas del tamaño de limos y arcillas. Según definiciones establecidas por la ASTM, el material está compuesto del 87% de partículas del tamaño de limos, mientras que el 13% lo compone partículas del tamaño de arcilla. Debido a la composición granulométrica, el límite líquido (38-38.5%) y su índice de plasticidad (10.7-12.3 %), se justifica la clasificación del material según el SUCS como un limo de baja plasticidad, ML.
- *Análisis mineralógicos:* Indican que el material está compuesto en promedio por 71.90% de caolinita, 13.07% de ilita y 15.03% de ortoclasa, por lo cual, mineralógicamente este material es una arcilla. Sin embargo, respecto a la clasificación SUCS, basada en la distribución del tamaño de partícula, clasifica como un limo, mientras que, por sus características de plasticidad, según sus valores de IP y LL, lo colocan justo por debajo de la línea A en la carta de plasticidad, obteniendo así un limo de baja plasticidad (ML).
- *Dispersión:* El ensayo de dispersión indica que en todos los casos se obtuvo un coeficiente de dispersión del 0 %. Razón por la cual la muestra es no dispersiva.

De acuerdo con todas estas características reportadas del material se garantiza la estabilidad y su poca influencia en los resultados.

- Para el ensayo de consolidación se emplearon tres muestras hermanas, las cuales no representan a un depósito natural, por el contrario, son especímenes artificiales fabricados en laboratorio. Estos fueron conformados a partir del material adquirido a la empresa EDESA S.A, y sometidas al procedimiento descrito por Sachan et al. (2013) en su investigación. Al seguir este procedimiento se logró generar tres probetas hermanas que comparten características similares (ver tabla 6.1). Se estima que la desviación reportada de la relación de vacíos pudiera ser disminuida si se controla la cantidad de muestra colocada (slurry) dentro del anillo del edómetro, procedimiento no detallado por Sachan et al. (2013) en su artículo. Esto podría haber generado una diferencia en la cantidad de las partículas ingresadas y, en consecuencia, la dispersión reportada del parámetro  $e_0$ .
- En función del procedimiento empleado se puede verificar la homogeneidad y uniformidad visual de las tres probetas al emplear la metodología de Sachan et al.

(2013). Previo a los ensayos de consolidación se comprobó que las probetas eran uniformes (ver figura 7.1).



Figura 7.1. Verificación de uniformidad de las probetas previo al ensayo de consolidación.

- De los resultados obtenidos en el ensayo de consolidación siguiendo el procedimiento tradicional descrito en el ASTM D2345 y el correspondiente procesamiento se reporta; de las curvas de compresibilidad:

- *Coefficiente de compresión ( $C_c$ )*: El coeficiente de compresión promedio obtenido fue de 0.06 con una desviación de 0.01 bajo el mismo procedimiento de cálculo y realizado por un solo operador.
- *Coefficiente de expansión ( $C_s$ )*: El coeficiente de expansión promedio obtenido fue de 0.35 con una desviación de 0.02 bajo el mismo procedimiento de cálculo y realizado por un solo operador.

Se concluye debido a los bajos valores de dispersión obtenidos en los parámetros que involucran esfuerzos efectivos y relación de vacíos, que los procedimientos empleados en esta investigación han generado especímenes hermanos, siendo de mayor relevancia la declaración de la desviación para un mismo operador, que actualmente la norma ASTM D2435 no dispone.

Se ha demostrado así mismo que la diferencia de la relación de vacíos inicial reportada entre los 3 especímenes ensayados y expresada como desviación estándar de 0.215 en un rango de 1.047 a 1.467 no presentan ninguna influencia en los parámetros de deformabilidad reportados.

- *Presión de preconsolidación ( $P_c$ )*: La presión de preconsolidación promedio fue de 169.81 kPa, con una desviación de 0.65. Por un lado, se evidencia el bajo valor de desviación entre resultados, acorde a la conclusión anteriormente señalada, así como, la influencia de la carga de acondicionamiento aplicada (200

kPa). Esta última se aplicó en condiciones no inundadas para el procedimiento empleado.

- De las curvas de consolidación:

*Coficiente de consolidación ( $C_v$ ):* Se obtuvo una serie de resultados del coeficiente de consolidación tanto para el método de Casagrande como para el de Taylor dentro del procedimiento tradicional. Del análisis de resultados detallado en el capítulo 6.3 desprende:

- La similitud de la trayectoria del  $C_v$  respecto de los niveles de esfuerzo de las tres probetas en los dos métodos utilizados, con excepción del espécimen B en la carga de 200 kPa en el método de Taylor, aunque posteriormente tiende a seguir el patrón. Se destaca que el valor de  $C_v$  inicial (menor esfuerzo) aumenta según el aumento de la relación de vacíos inicial de los especímenes en el caso del método de Casagrande. Mientras que, en el caso de método de Taylor, con excepción del espécimen C, el  $C_v$  inicial aumenta mientras la relación de vacíos inicial disminuye. A diferencia de lo que se demostró con los parámetros de deformabilidad en el que la variación de relación de vacíos inicial no influía en sus resultados, en el caso de los índices de tiempo se evidencia la dependencia respecto de la relación de vacíos inicial. Se entiende este fenómeno por la complejidad de la movilización del agua dentro de los intersticios de los microporos de los especímenes.
- Que la variación de resultados del  $C_v$ , en los tres especímenes hermanos para cada estado de carga reportada en el método de Casagrande es mayor que aquellos presentados por medio del método de Taylor. En el caso de Casagrande la desviación estándar se ubica entre 28,04 a 61,11  $\text{mm}^2/\text{min}$ , mientras que para Taylor se ubica entre 14,95 y 23,93  $\text{mm}^2/\text{min}$ . En los dos métodos la desviación tiende a aumentar con el aumento de esfuerzo. Se desprende así mismo, la mayor confiabilidad de los resultados obtenidos por el método de Taylor respecto a los obtenidos por el método de Casagrande. Conclusión válida en el supuesto de aceptar como tolerable la desviación inicial de los  $C_v$ .
- Se puede observar, finalmente, la convergencia de los resultados del  $C_v$  de los dos métodos para las cargas de 200 y 400 kPa, situación que puede

obedecer al proceso de acondicionamiento al que fueron sometidos los especímenes.

- De los resultados obtenidos en el ensayo de consolidación siguiendo el procedimiento de medida de presión de poro y su procesamiento descrito en el capítulo de análisis de resultados se desprende:
  - Los datos crudos obtenidos a partir de la medición de la presión de poros no son confiables, puesto que, estos parten de un valor inicial distinto al esperado. Sin embargo, al analizar la tendencia de las curvas del grado de consolidación en función al tiempo (ver acápite 6.6.2.), respecto de la trayectoria en el método tradicional comparte cierta semejanza para los estados de carga de 50 y 400 kPa, por tanto, estimula a seguir en el desarrollo y avance del equipo.
  - Se ha expuesto la metodología establecida por Stanichevsky, la cual permite determinar el tiempo de consolidación para cualquier grado de consolidación deseado, siempre y cuando se conozca la variación en tiempo real de la presión de poros. Por motivos de esta investigación este método fue empleado para determinar valores de tiempo en función al 50% y 90% del grado de consolidación, los cuales generaron sus valores de  $C_v$  respectivos. No obstante, estos valores no pueden ser comparables a los obtenidos por los métodos de Casagrande y Taylor.
  - La metodología como tal permitió, dentro del ensayo, recolectar y tabular la información de disipación de la presión de poros de la probeta A. Sin embargo, se verifica que los datos obtenidos dentro del diseño generado no son confiables, observándose una pérdida de presión considerable. La presión inicial se pierde y disipa rápidamente, razón por la cual es necesario controlar la salida del agua o drenaje sin que se produzcan pérdidas en el sistema.

### 7.2.Recomendaciones

- Un elemento fundamental para generar repetibilidad en los todos los ensayos realizados de una misma muestra es elaborar un proceso de muestreo adecuado. Esto con la finalidad de obtener una muestra representativa y homogénea con respecto a todo el lote de material en estudio.
- Es fundamental controlar rigurosamente todas las posibles variables dentro de los ensayos de caracterización. Principalmente debe preverse que un mismo ensayo sea realizado siempre por el mismo operador y que en general se tenga condiciones de laboratorio similares entre cada repetición de una misma prueba.
- A pesar de que se ha conseguido una similitud notable entre las tres probetas, todavía existen parámetros que no fueron controlados durante el proceso de preparación de la muestra, lo que en consecuencia generó relaciones de vacíos distintas. En futuras pruebas es recomendable considerar un control riguroso de la masa del slurry colocada dentro del anillo para el ensayo de consolidación.
- Los ensayos lograron determinar lecturas de presión de poros, sin embargo, estas fueron no confiables para los objetivos de la investigación. Por ende, es necesario un rediseño o diseño complementario del edómetro orientado a la presurización de esta con el objetivo de evitar o limitar posibles fugas de presión en la parte superior de la muestra. Un posible rediseño podría estar orientado a impermeabilizar el edómetro en la sección superior e inferior, provocando que el drenaje ocurra exclusivamente hacia la parte superior. La cámara puede ser complementada con una válvula de control de presión inicial que permita evidenciar la generación de esa presión en el fondo de la muestra para la posterior disipación de la presión interna.

## **8. BIBLIOGRAFÍA**

- ASTM 2435/D2435M-11. (2011). Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. *Annual Book of ASTM Standards*, *i*(Reapproved 2020), 1–10. <https://doi.org/10.1520/D2435>
- ASTM D427-04. (2004). Standard Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method. *ASTM International*, 1–4. <https://doi.org/10.1520/mnl10913m>
- ASTM D854-14. (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. *ASTM International*, 2458000(C), 1–7. <https://doi.org/10.1520/D0854-14>.
- ASTM D2216-19. (2019). Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. *ASTM International*, *January*, 1–5. <https://doi.org/10.1520/D2216-19>.
- ASTM D4221-18. (2018). Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double. *ASTM International*, 1–5. <https://doi.org/10.1520/D4221-18.2>
- ASTM D4318-17. (2017). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. *ASTM International*, 04(March 2010), 1–14. <https://doi.org/10.1520/D4318-17E01>.
- ASTM D6913-17. (2017). Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. *ASTM International*, 04(Reapproved 2009). <https://doi.org/10.1520/D6913>
- ASTM D7928-21. (2021). Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis. *ASTM International*, 1–25. <https://doi.org/10.1520/D7928-21E01>
- Barden, L. (1968). PRIMARY AND SECONDARY CONSOLIDATION OF CLAY AND PEAT. *Geotechnique*, 18, 1–24.
- Barnes, G. (2016). *Soil Mechanics: Principles and Practice* (Palgrave, Ed.; Fourth).
- Berry, P. L., & Poskitt, T. J. (1972). *l The consolidation of peat* (Vol. 22, Issue 1).
- Chow, J. K., Wang, Y. H., Lui, H. L., & Huang, E. (2020). Determination of consolidation parameters based on the excess pore water pressure measurement using a newly developed

- U-oedometer. *Acta Geotechnica*, 15(9), 2665–2680. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-00914-y>
- ComoFunciona. (2022). *Acrílico*. ACRÍLICO | Características, Propiedades y Usos. <https://como-funciona.co/acrilico/#>
- Das, B. M. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (CENGAGE Learning Editores S.A., Ed.; 4th ed., Issue 1).
- DAVICOM. (2022a). *Bronce dulce*. Categoría: Aleaciones de Cobre. <http://davicom.com.ec/productos/bronze-dulce/>
- DAVICOM. (2022b). *Duralón*. Categoría: Polímeros. <http://davicom.com.ec/productos/duralon/>
- ELE International. (2019). Product Catalogue. Civil & Environmental Test Equipment. *ELE International*, 13. <https://www.ele.com/page/product-catalogue>
- GILSON COMPANY INC. (2021). *Back Pressure Consolidometer*. HM-567 Back Pressure Consolidometer. <https://www.globalgilson.com/back-pressure-consolidometer>
- GILSON COMPANY INC. (2022). *4.000in Porous Stone, 0.25in Thick*. Porous Stones. <https://www.globalgilson.com/4in-porous-stone-14in-thickness>
- Gomez Sellados, J. (2022). *O-RING*. Productos. <https://www.tecnopeg.com/o-ring/>
- Head, K. H. (1994). Manual of soil laboratory testing, volume 2. Permeability, shear strength and compressibility tests. In *Manual of soil laboratory testing, volume 2. Permeability, shear strength and compressibility tests*. JOHN WILEY & SONS, INC. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(95\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)90001-2)
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). Mecánica de suelos, Tomo I: Fundamentos de la Mecánica de Suelos. In Editorial LIMUSA S.A. (Ed.), *Mecánica de Suelos* (Tercera). [https://suelos.milaulas.com/pluginfile.php/128/mod\\_resource/content/1/Mecanica de suelos - Juarez Badillo.pdf](https://suelos.milaulas.com/pluginfile.php/128/mod_resource/content/1/Mecanica%20de%20suelos%20-%20Juarez%20Badillo.pdf)
- Mocha, D. (2019). *Comparación de los tiempos de Consolidación  $t_{50}$ ,  $t_{90}$  y Coeficientes de Consolidación  $C_v$ , obtenidos por los métodos de Casagrande y Taylor en relación con los medidos por la disipación de la presión de poros*. Universidad Politécnica Salesiana.

- Nguyen, H. S., Tashiro, M., Inagaki, M., Yamada, S., & Noda, T. (2015). Simulation and evaluation of improvement effects by vertical drains/vacuum consolidation on peat ground under embankment loading based on a macro-element method with water absorption and discharge functions. *Soils and Foundations*, 55(5), 1044–1057. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.09.007>
- O’Kelly, B. C. (2017). Measurement, interpretation and recommended use of laboratory strength properties of fibrous peat. In *Geotechnical Research* (Vol. 4, Issue 3). <https://doi.org/10.1680/jgere.17.00006>
- Olek, B. S. (2020). Experimental insights into consolidation rates during one-dimensional loading with special reference to excess pore water pressure. *Acta Geotechnica*, 15(12), 3571–3591. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01042-3>
- Robinson, R. G., & Soundara, B. (2008). Coefficient of consolidation from mid-plane pore pressure measurements. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2(4), 419–425. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2008.02.04.419-425>
- Ruge, J. C., Palacios, X., Molina-Gómez, F., & Rojas Suárez, J. P. (2019). Mineralogical, microstructural and porosimetry analysis in three different clayey soils. *Journal of Physics: Conference Series*, 1388(1), 1–8. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1388/1/012014>
- Sachan, A., Vikash, G., & Prashant, A. (2013). Development of Intermediate Microfabric in Kaolin Clay and Its Consolidation Behaviour. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31(1), 23–34. <https://doi.org/10.1007/s10706-012-9557-7>
- Sowers B, G., & Sowers F, G. (1970). *Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones* (Editorial LIMUSA-WILEY S.A., Ed.; Primera).
- Whitlow, R. (1994). *Fundamentos de mecánica de suelos* (COMPAÑÍA EDITORIAL CONTINENTAL S.A DE C.V., Ed.; 2th ed.).

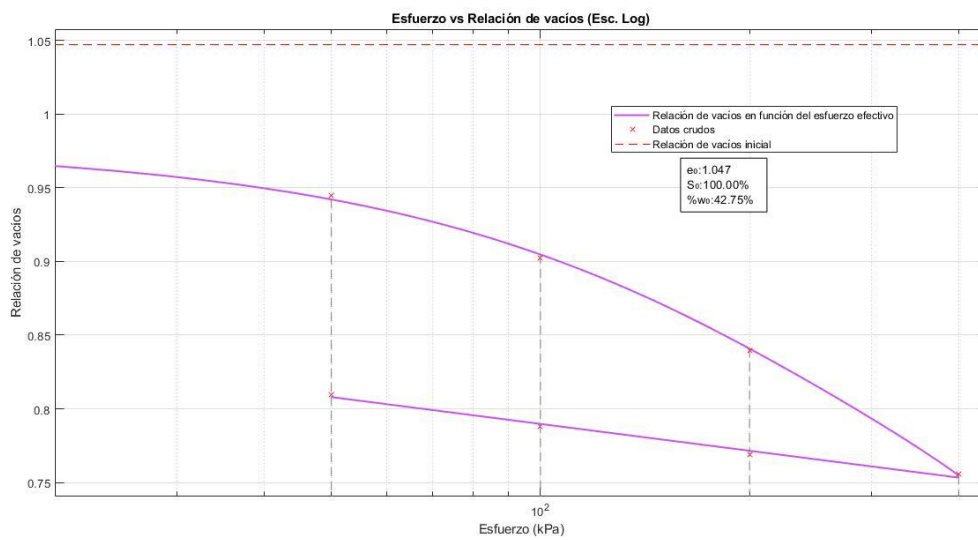
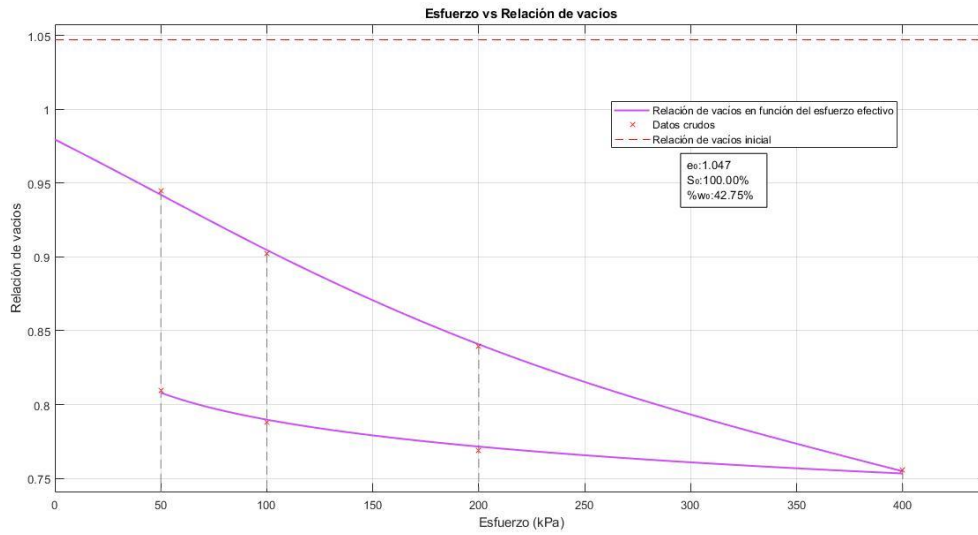
# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

## 9. ANEXOS

### 9.1. Curvas de compresibilidad

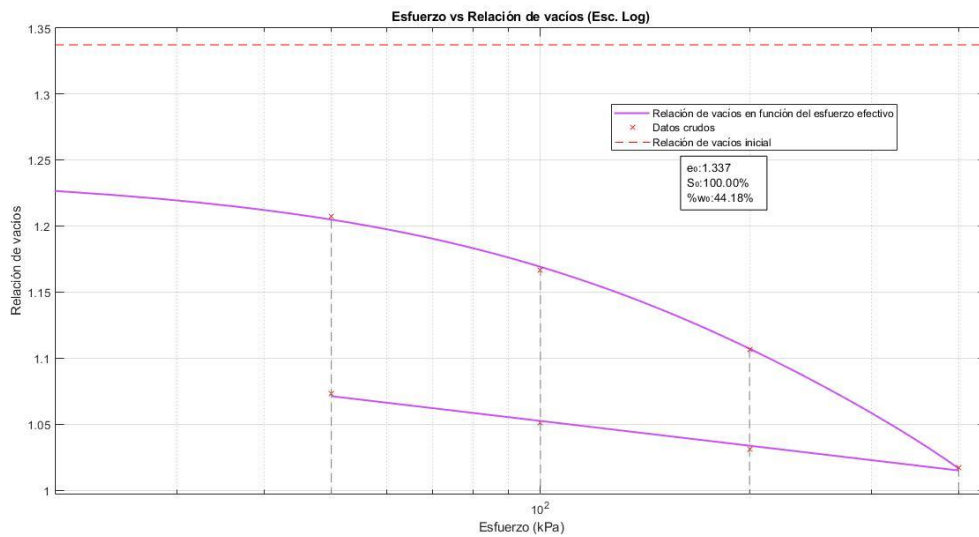
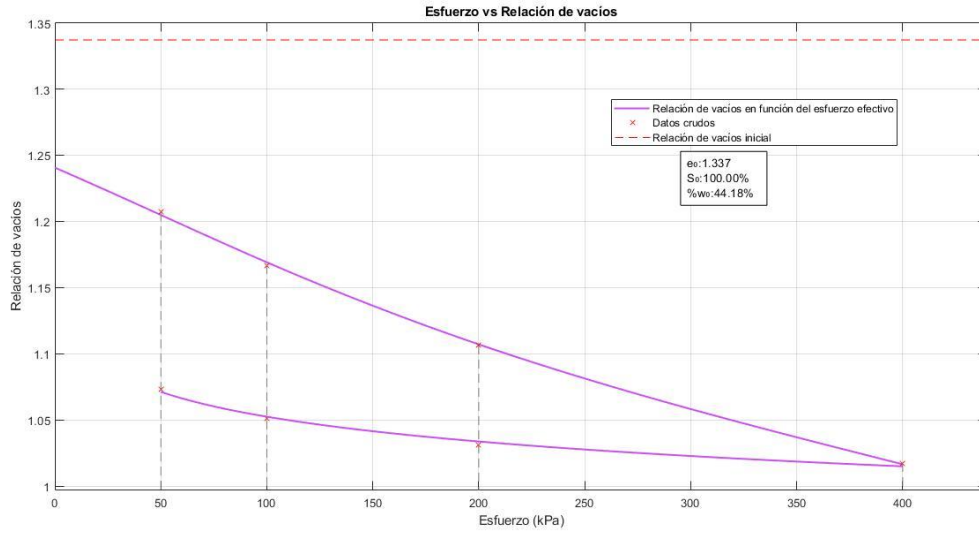
#### 9.1.1. *Probeta A*



# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

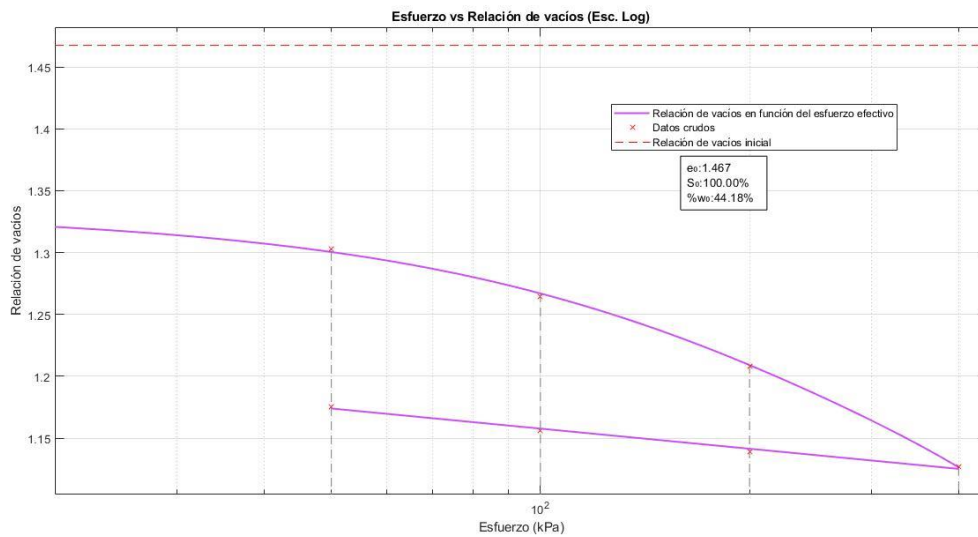
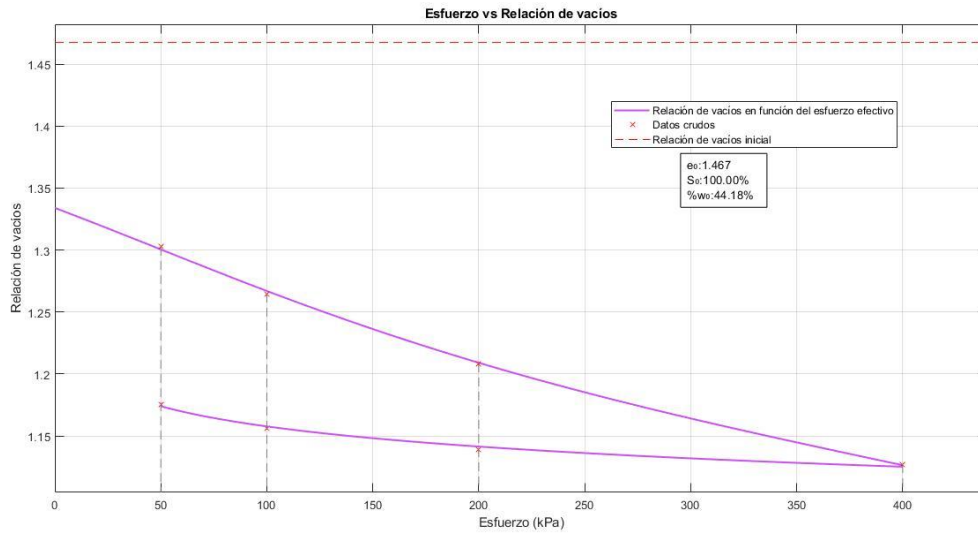
## 9.1.2. Probeta B



# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

## 9.1.3. Probeta C

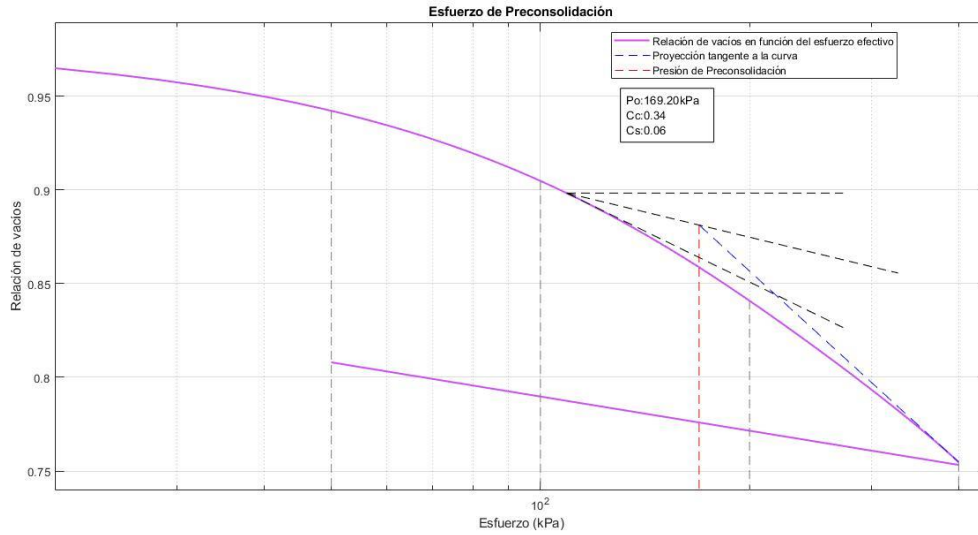


# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

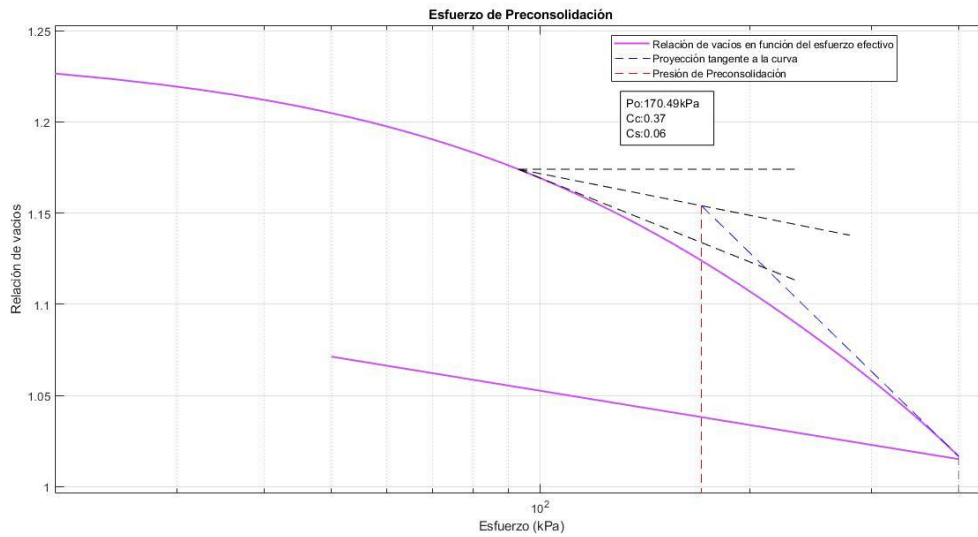
Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

## 9.2. Esfuerzos de preconsolidación

### 9.2.1. Probeta A



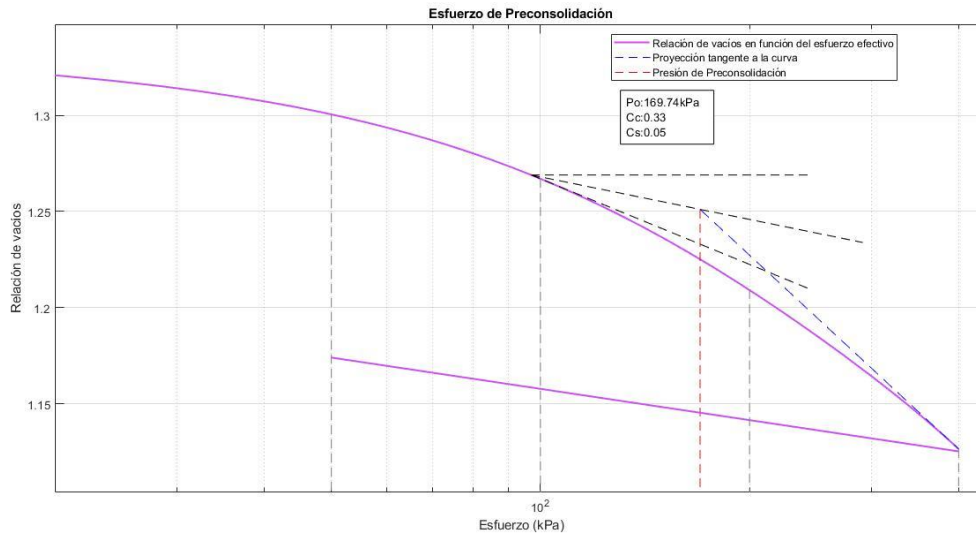
### 9.2.2. Probeta B



# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

## 9.2.3. Probeta C

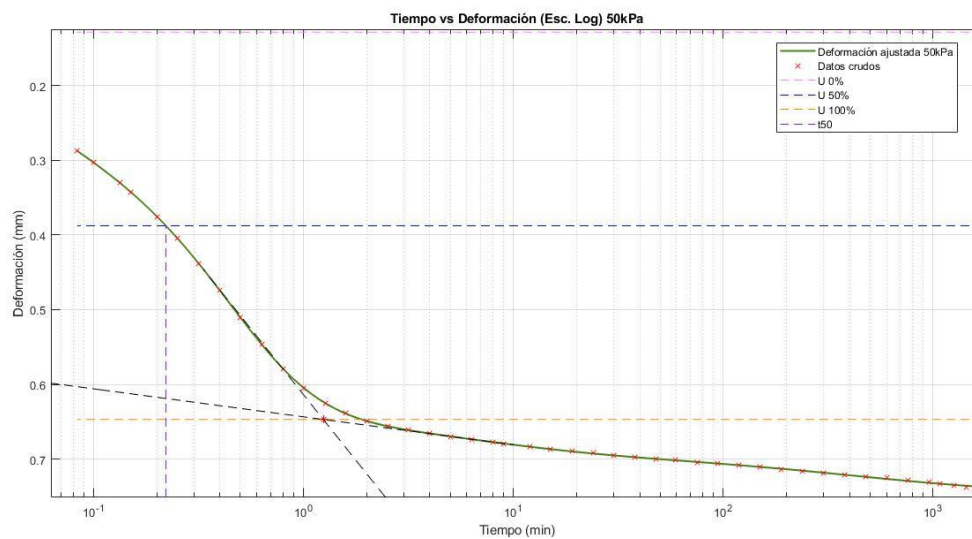


## 9.3. Curvas de consolidación

### 9.3.1. Método de Casagrande ( $t_{50}$ )

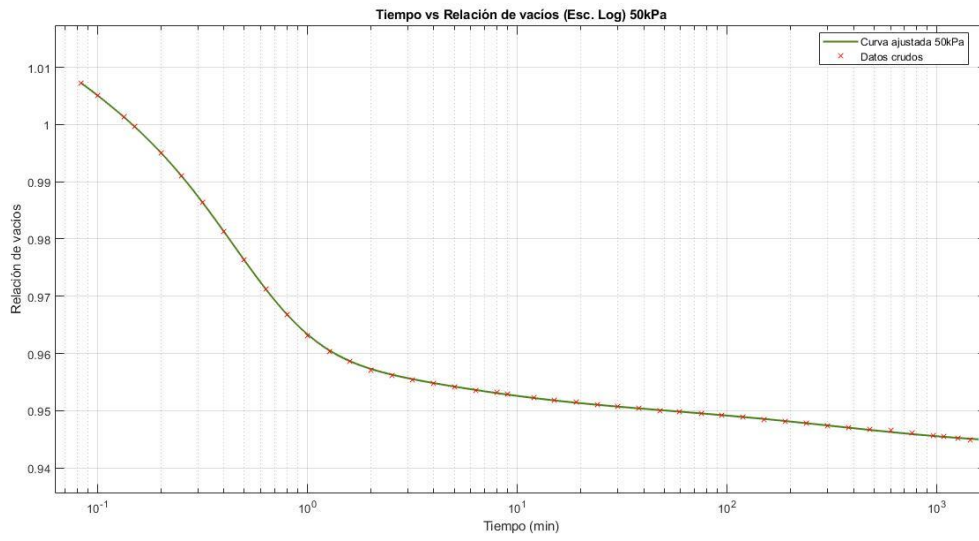
#### 9.3.1.1. Probeta A

a) 50 kPa

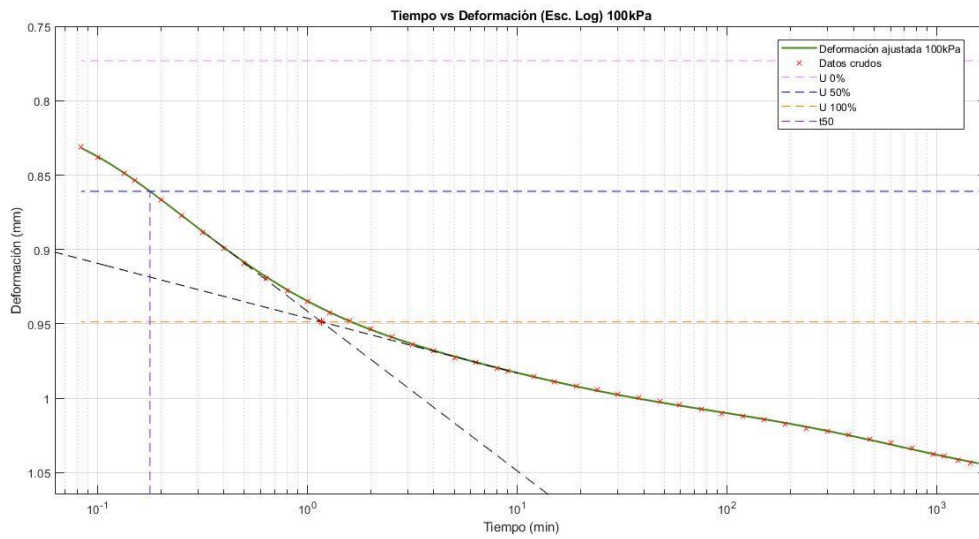


# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

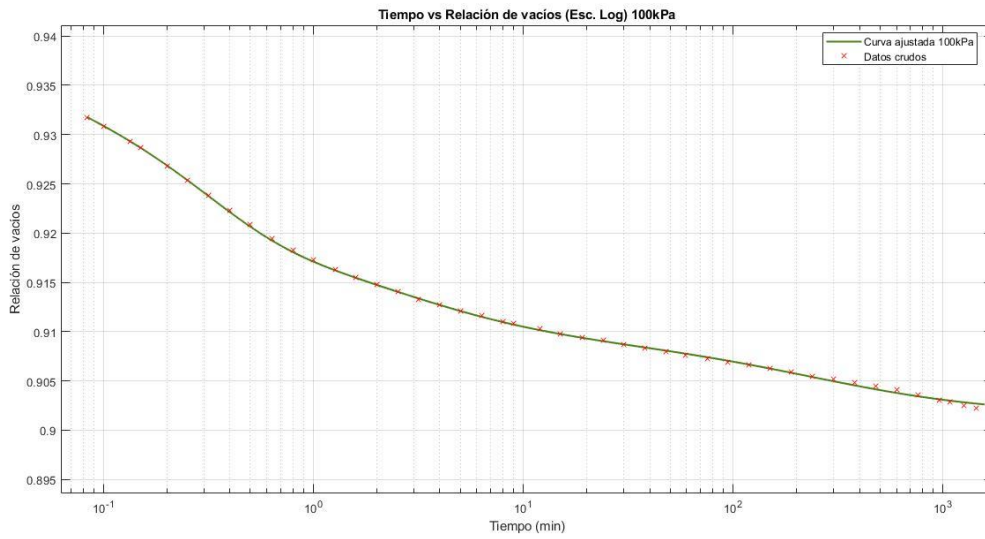


a) 100 kPa

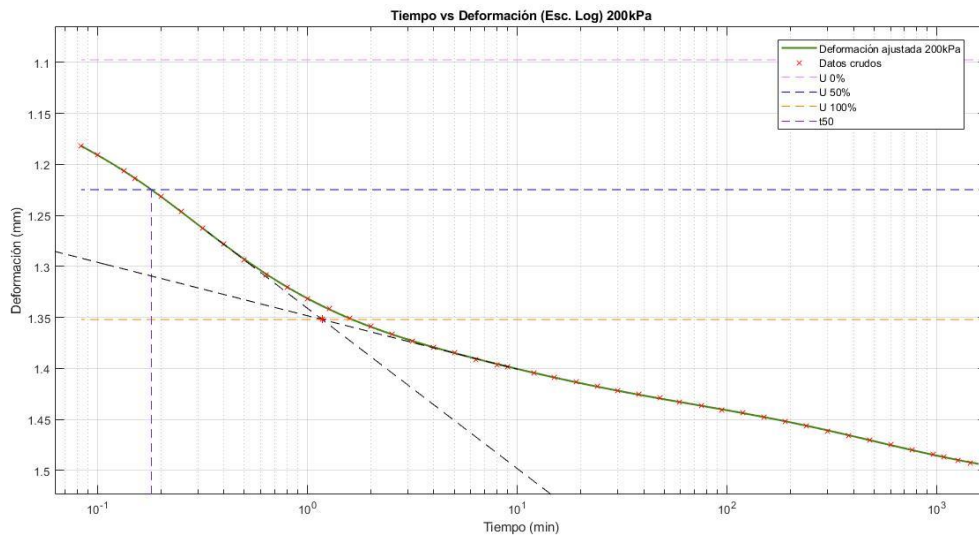


# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

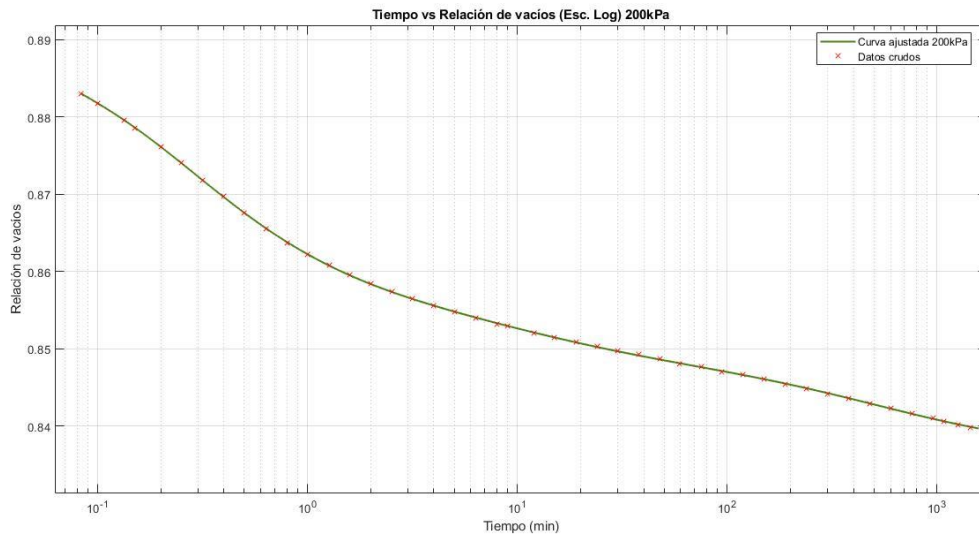


b) 200 kPa

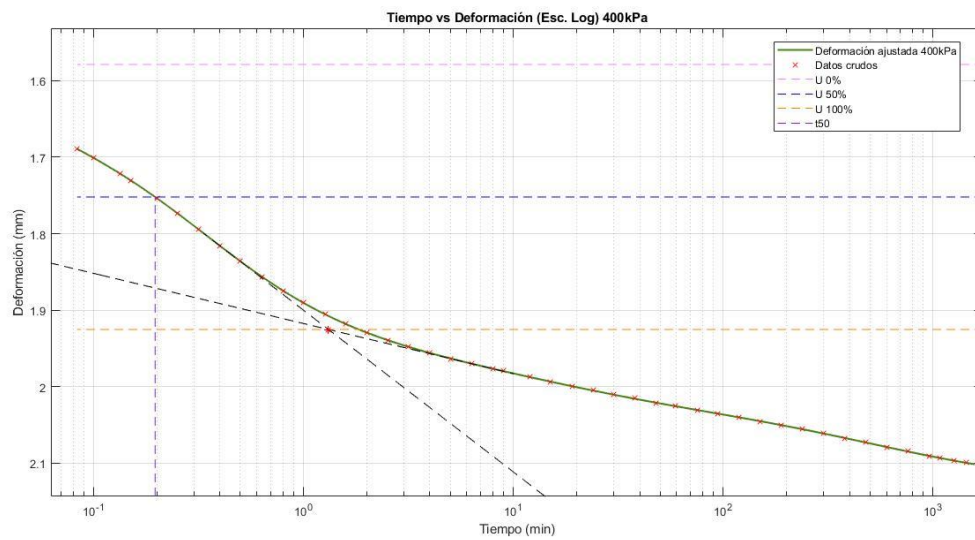


# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

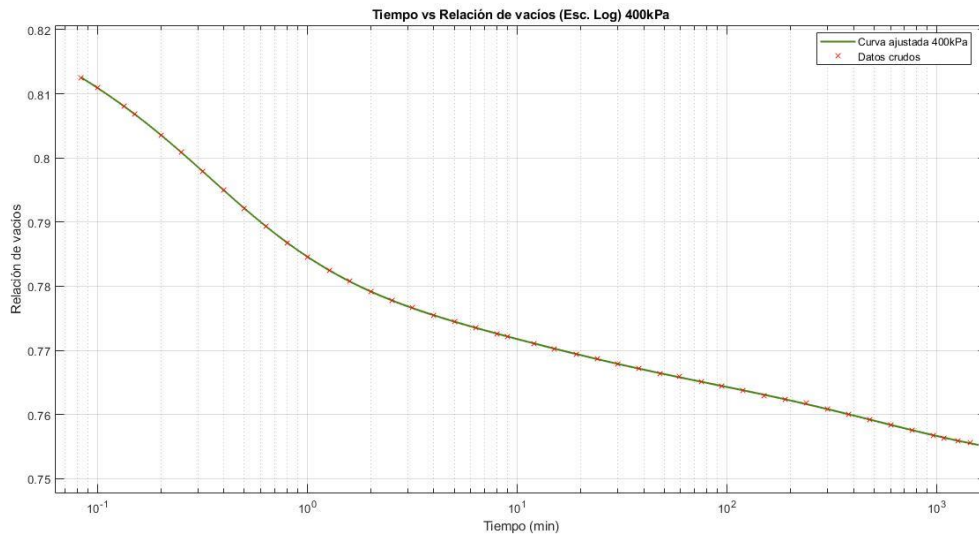


c) 400 kPa



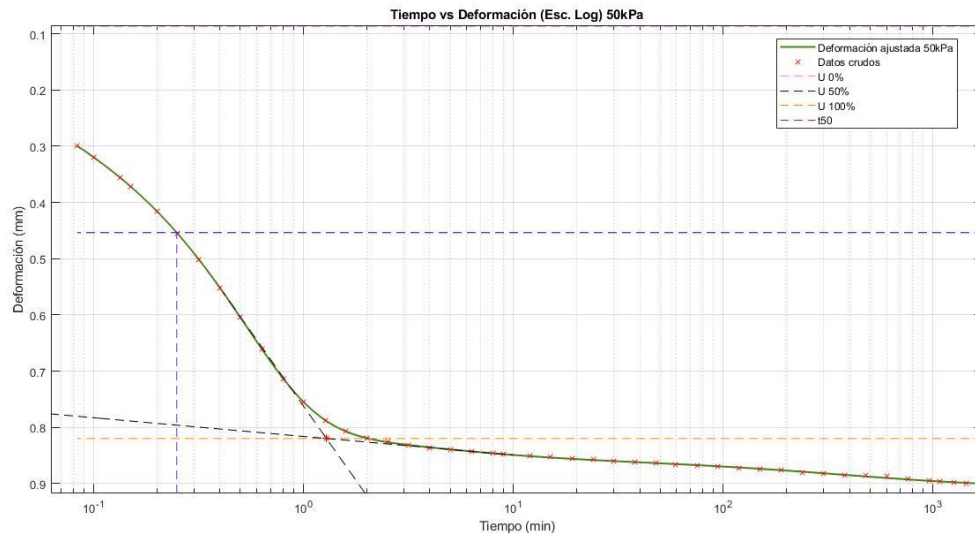
# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión



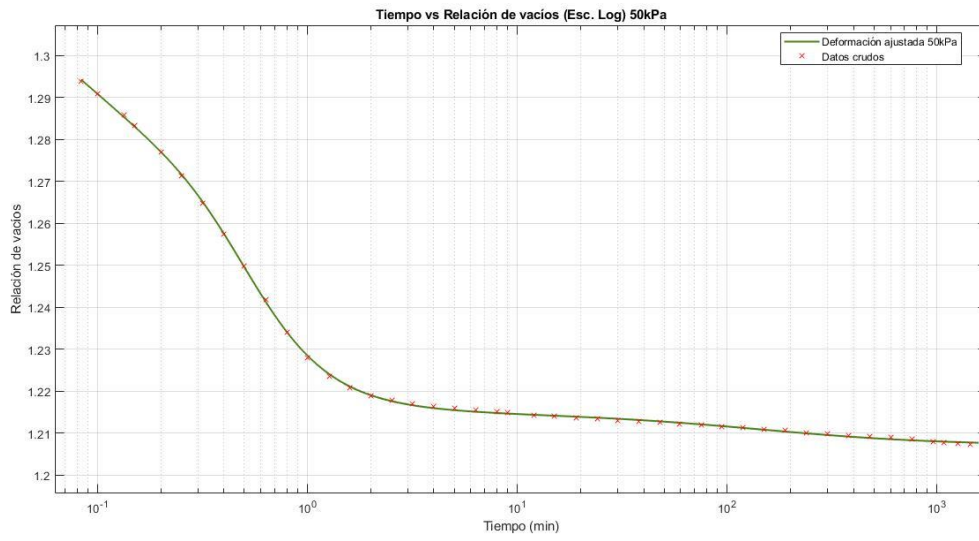
## 9.3.1.2. Probeta B

a) 50 kPa

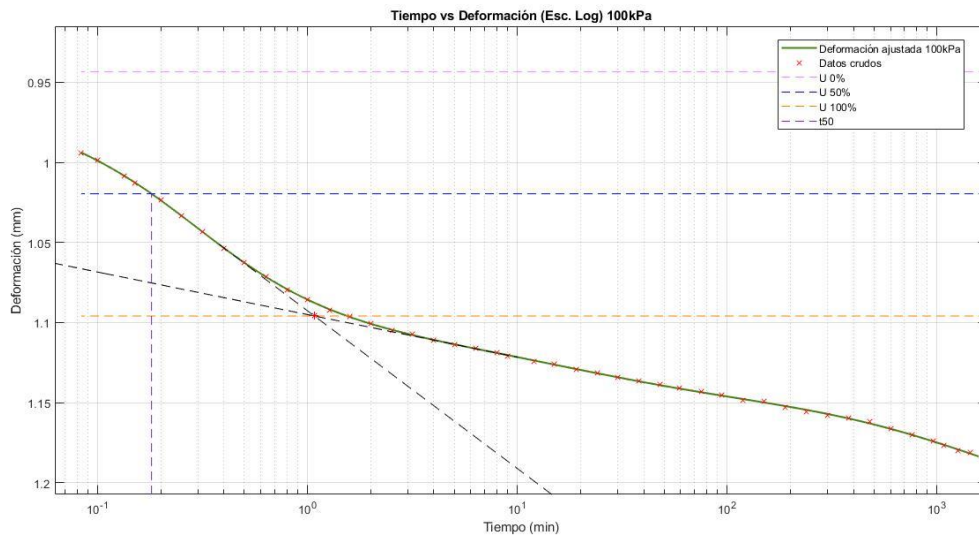


# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

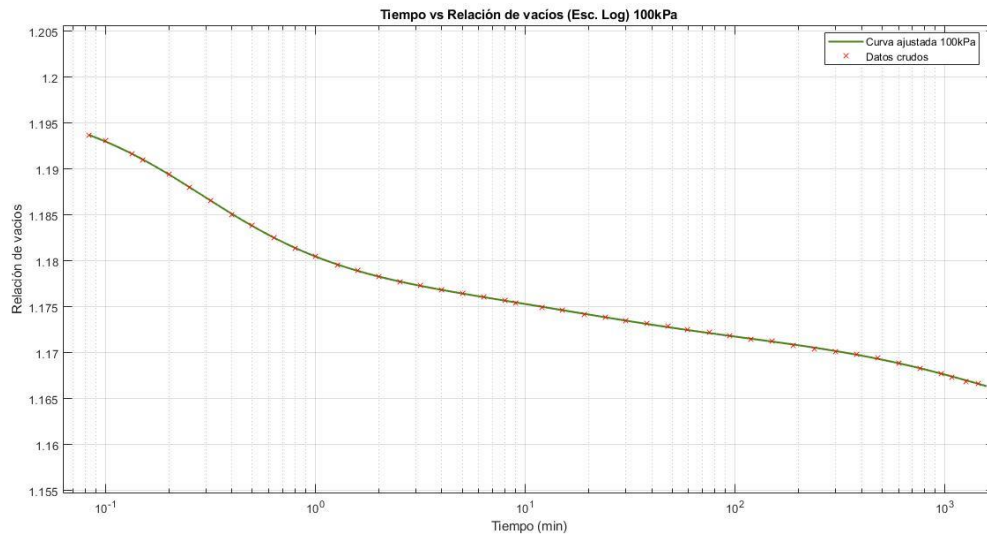


b) 100 kPa

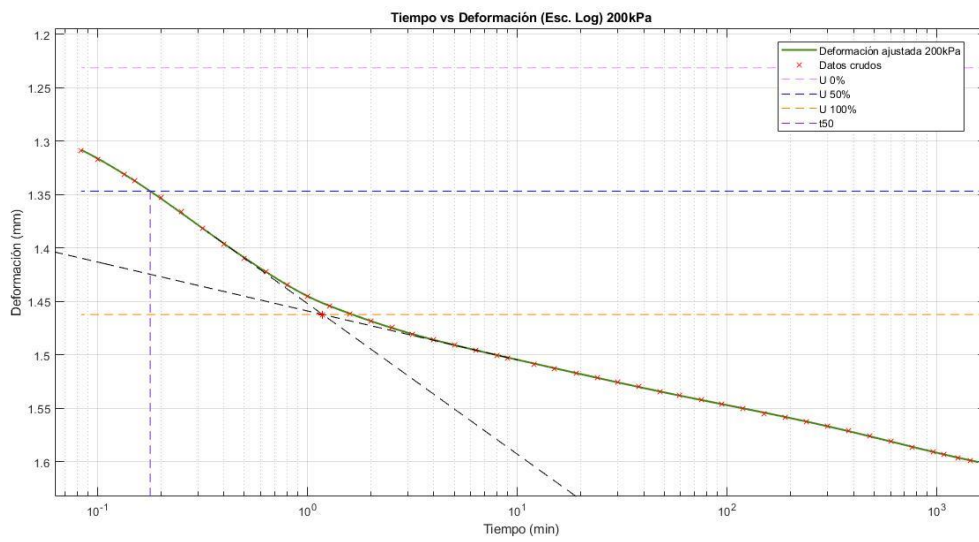


# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

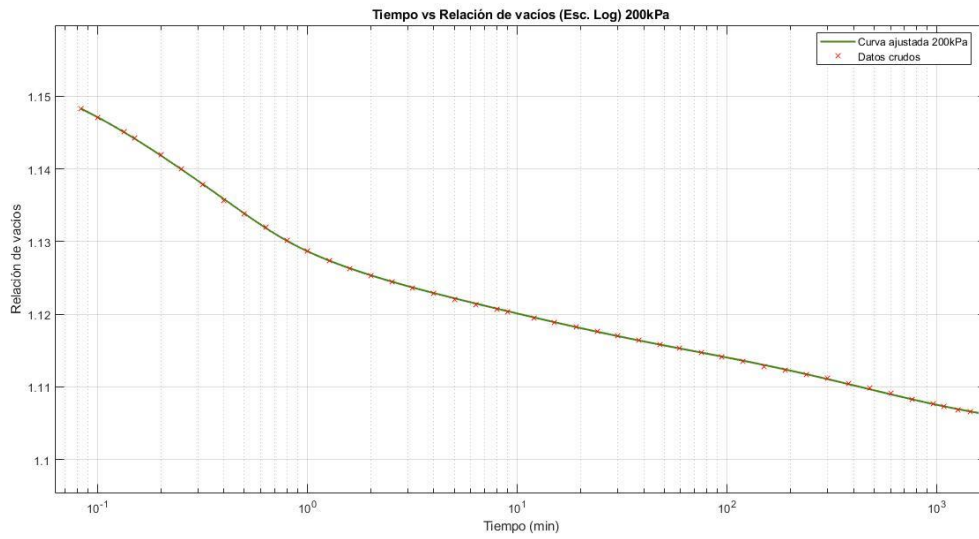


c) 200 kPa

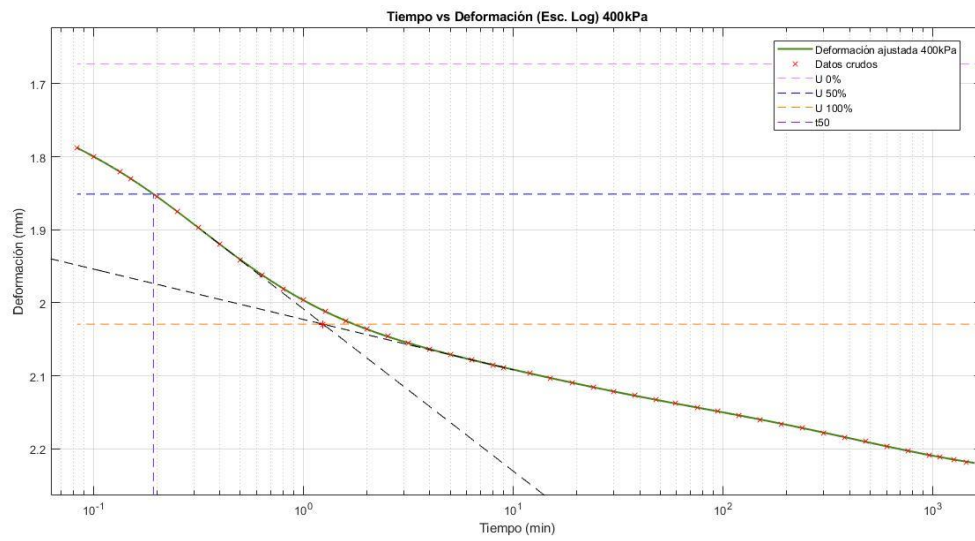


# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

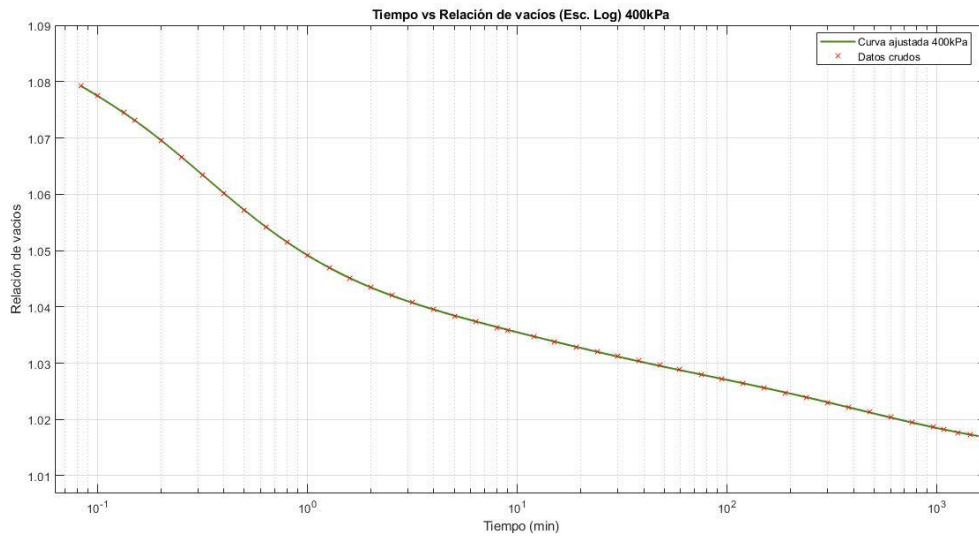


d) 400 kPa



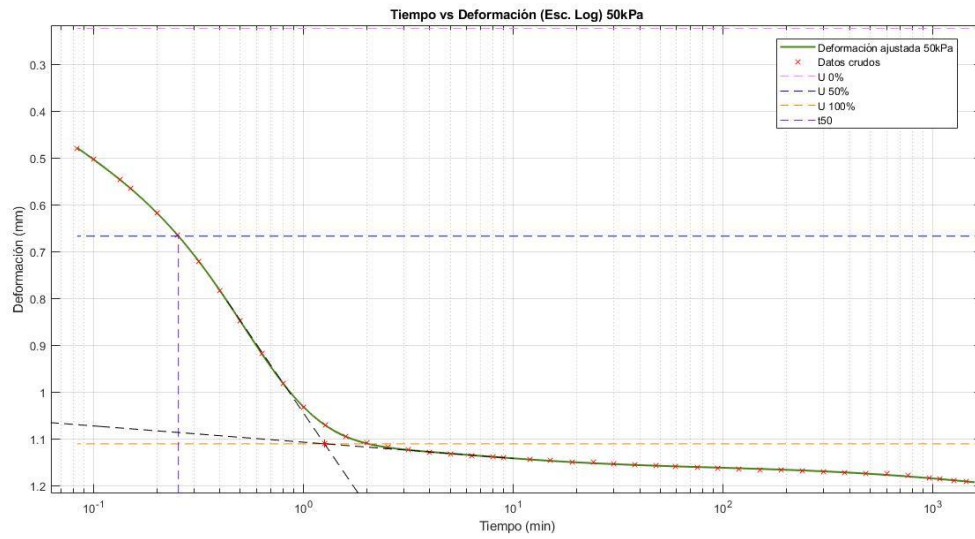
# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión



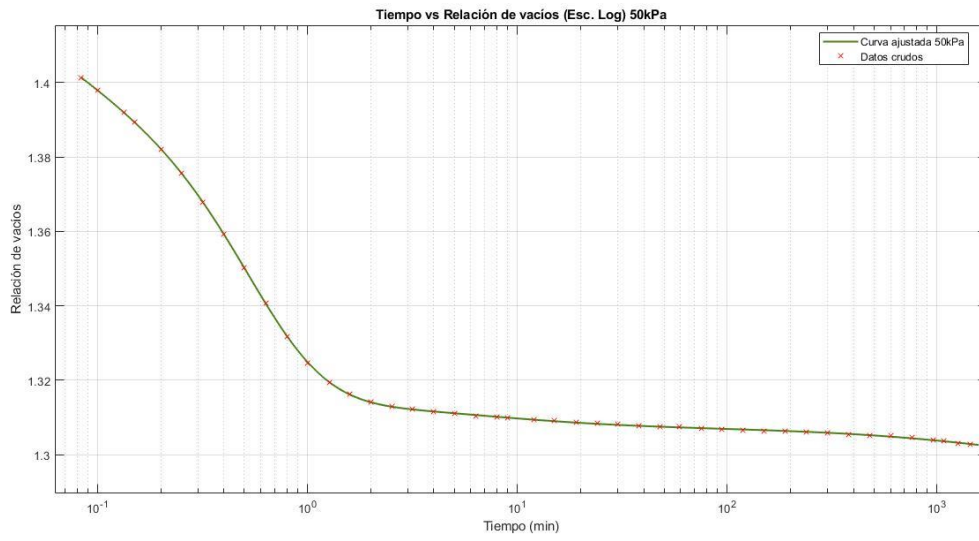
## 9.3.1.3. Probeta C

a) 50 kPa

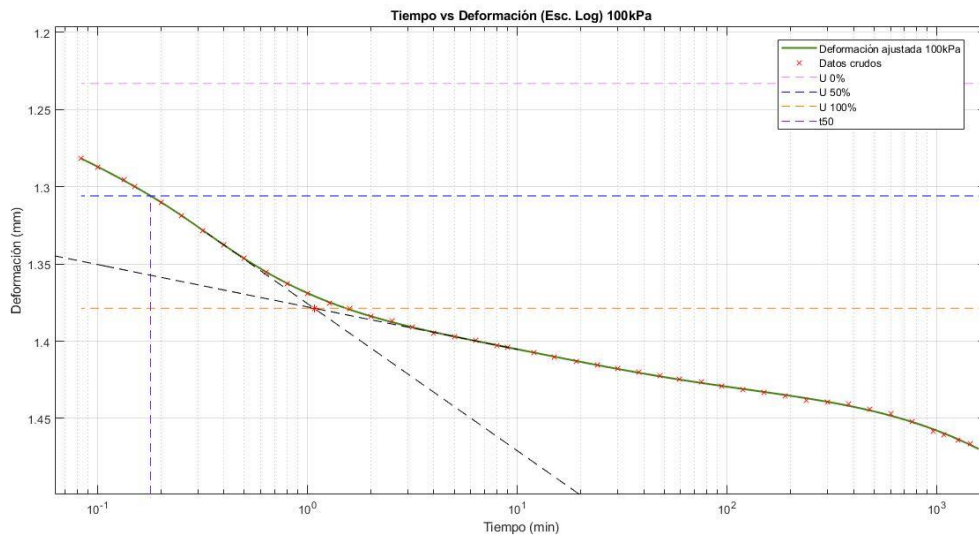


# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

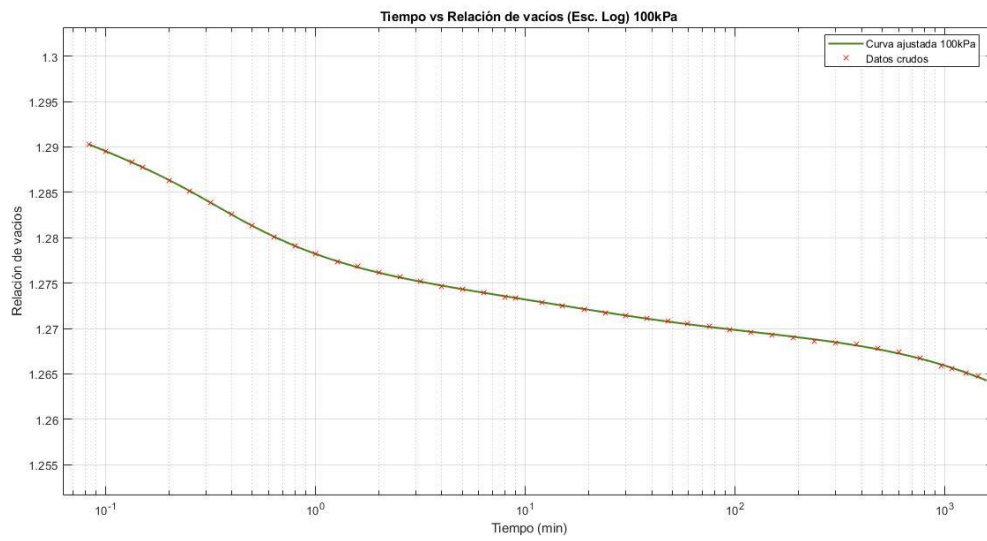


b) 100 kPa

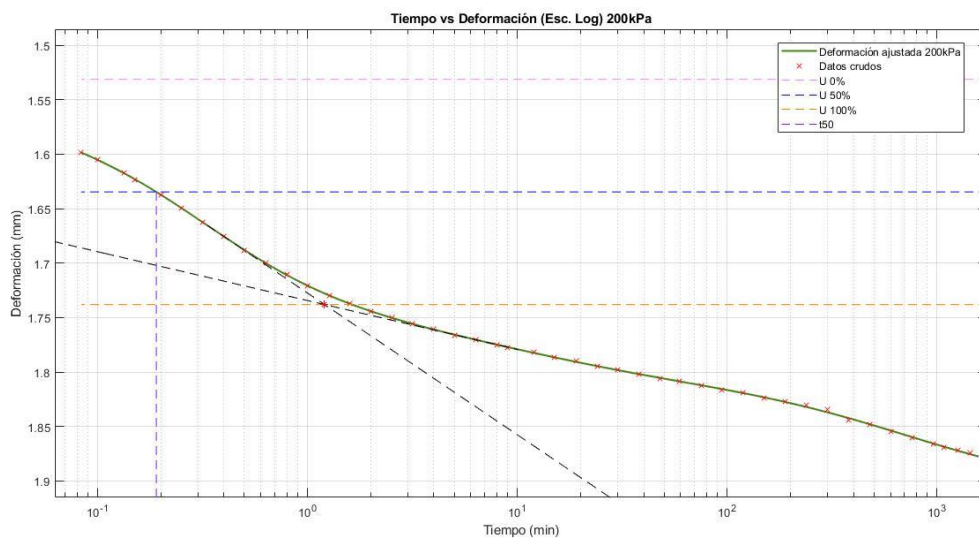


# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

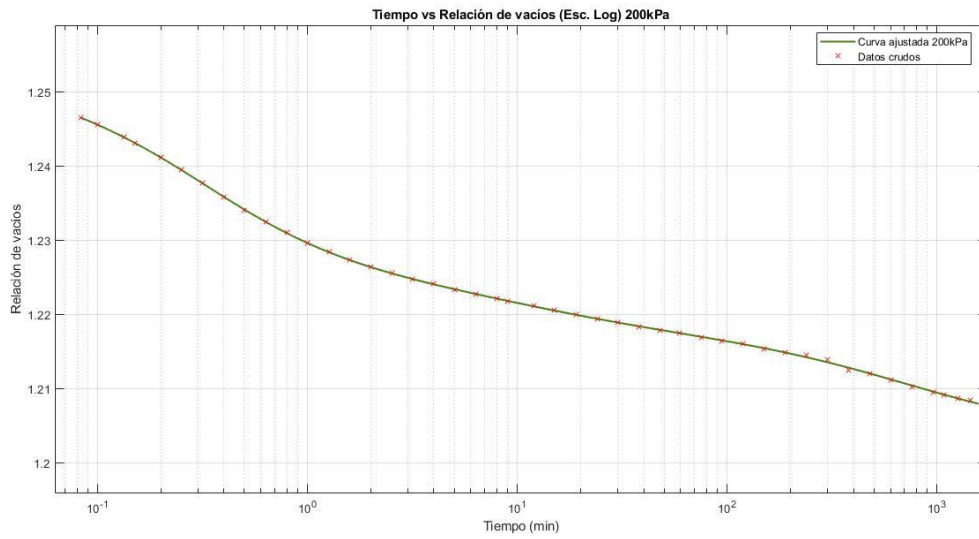


c) 200 kPa

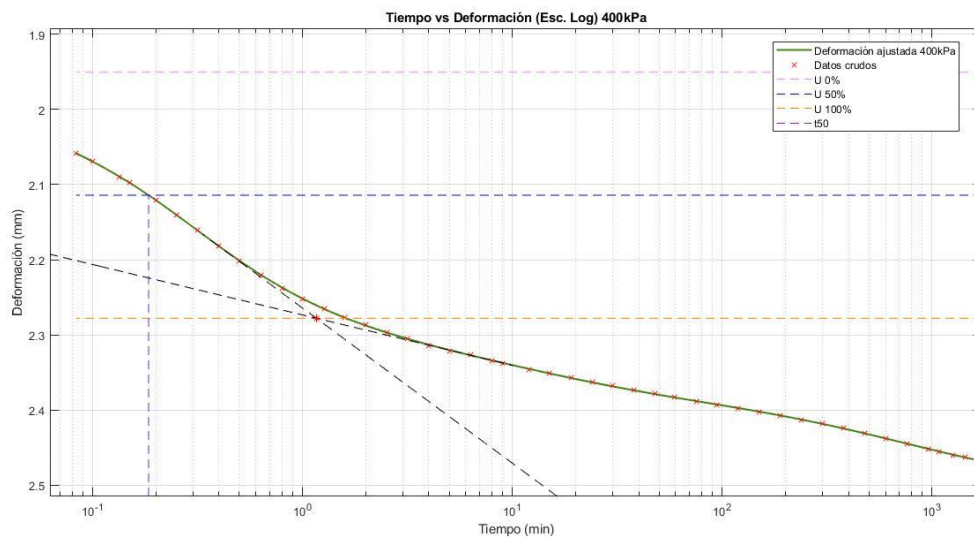


# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

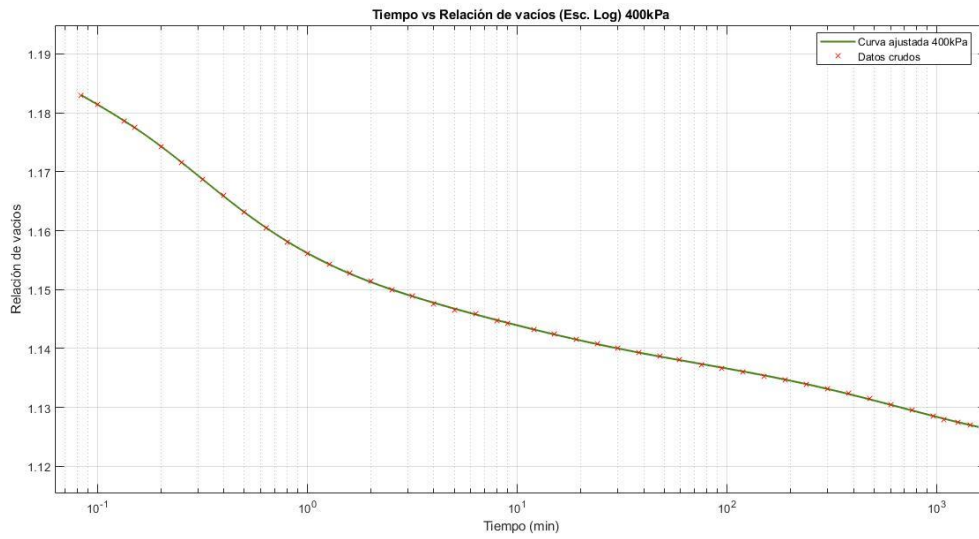


d) 400 kPa



# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

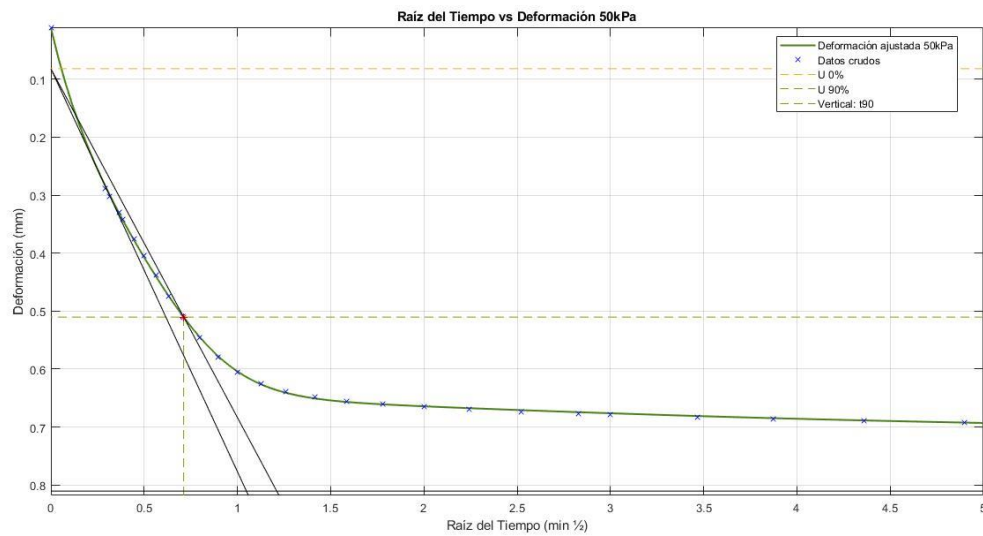
Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión



## 9.3.2. Método de Taylor ( $t_{90}$ )

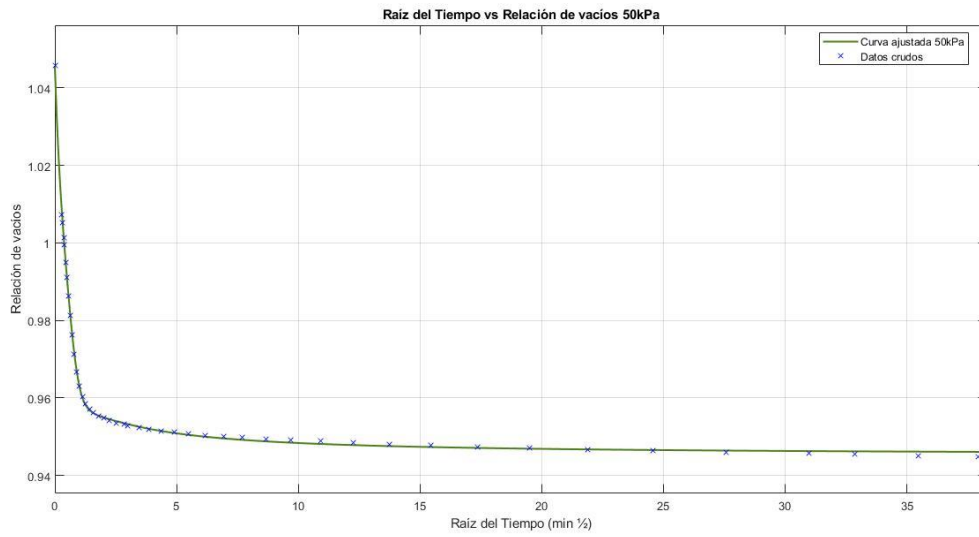
### 9.3.2.1. Probeta A

#### a) 50 kPa

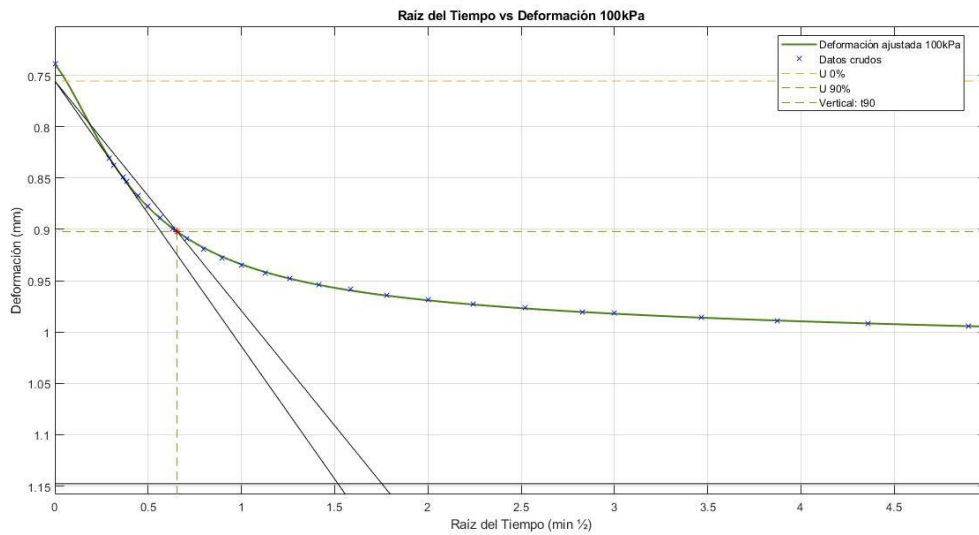


# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

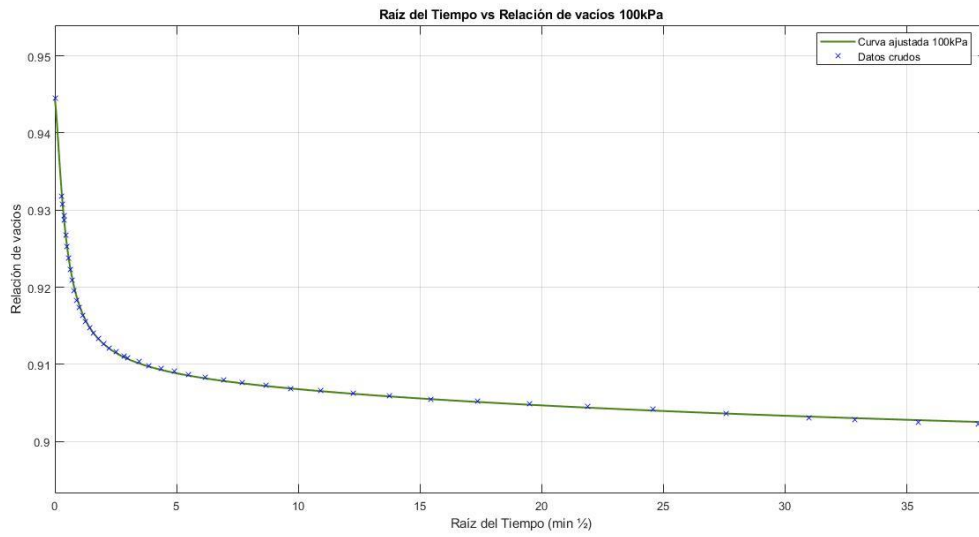


b) 100 kPa

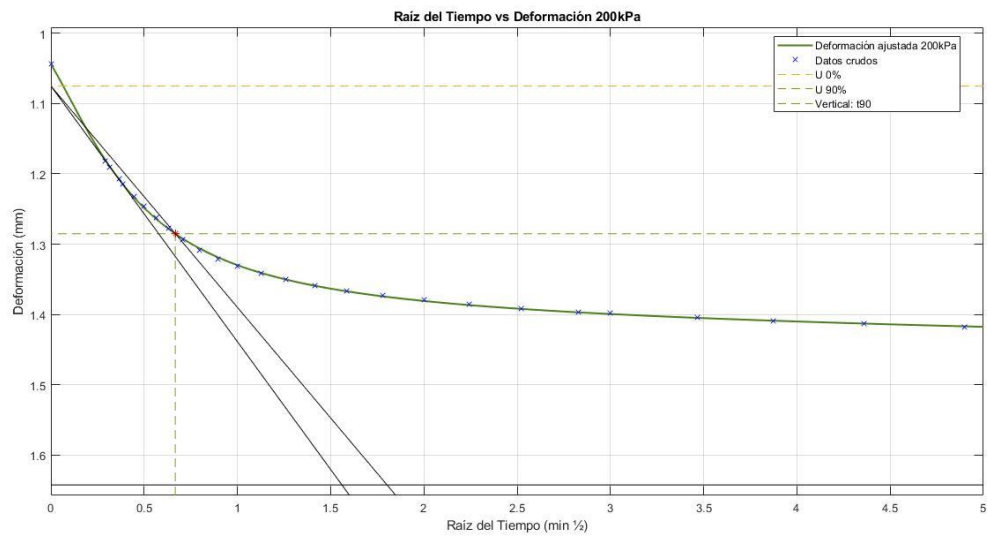


# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

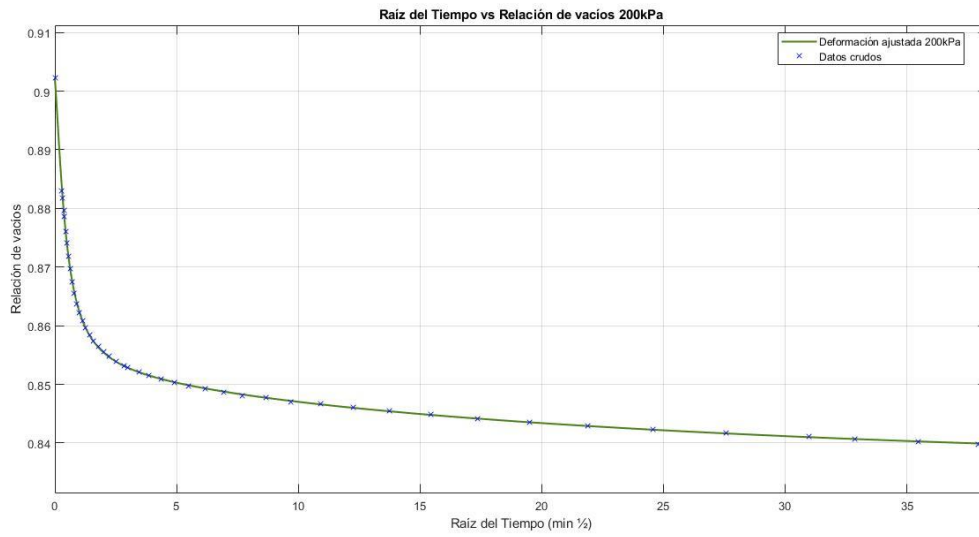


c) 200 kPa

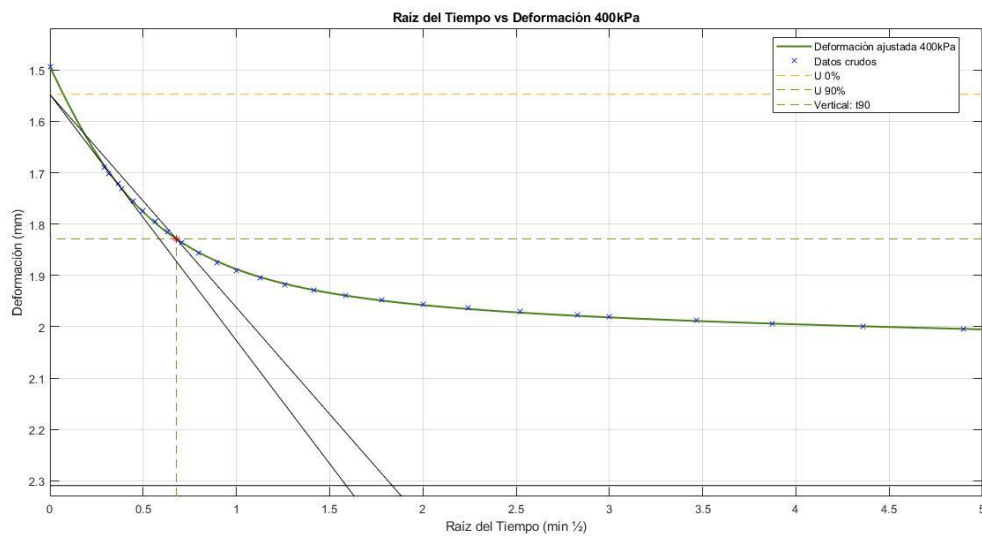


# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

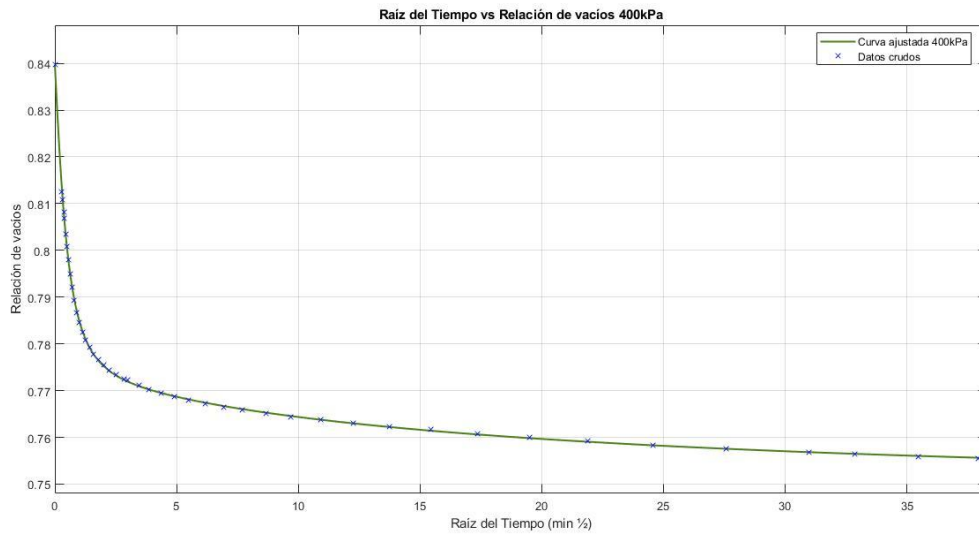


d) 400 kPa



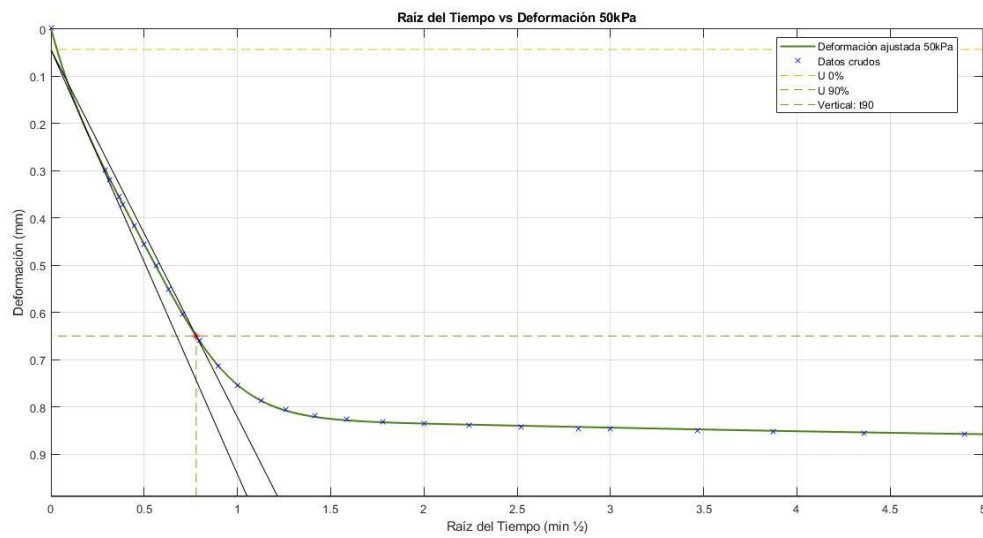
# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión



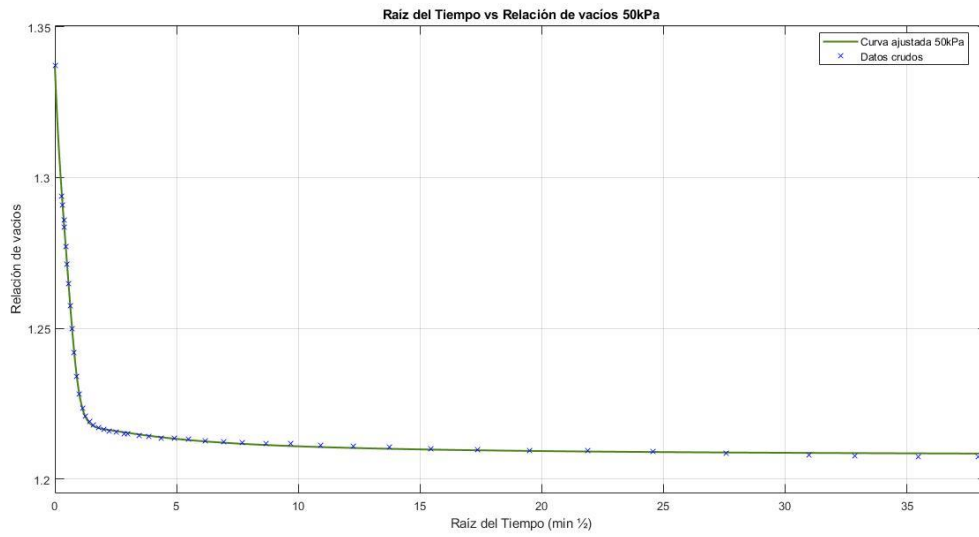
## 9.3.2.2. Probeta B

a) 50 kPa

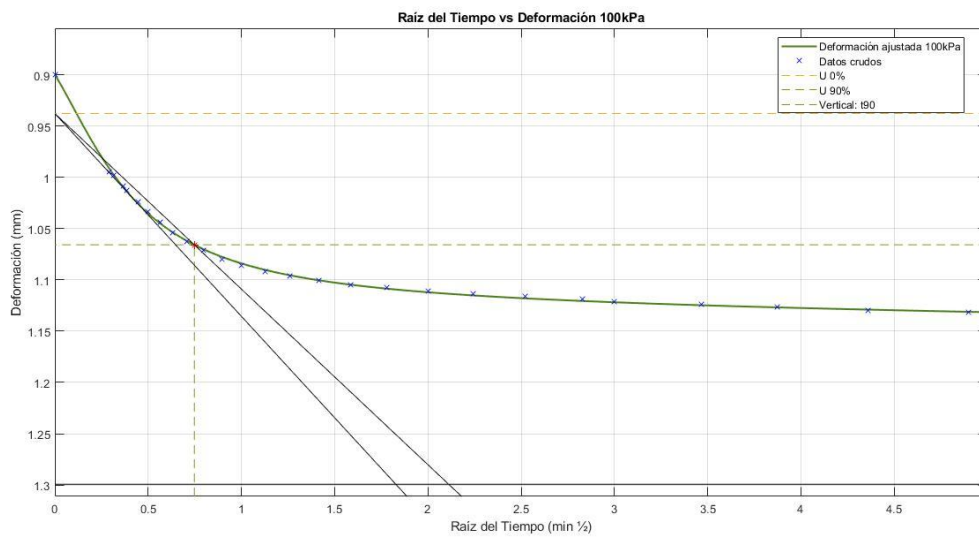


# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

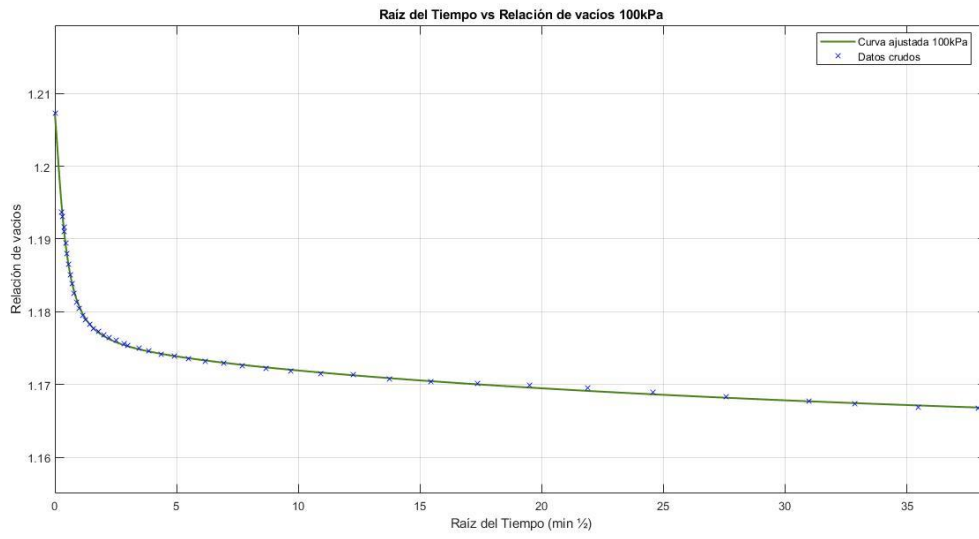


b) 100 kPa

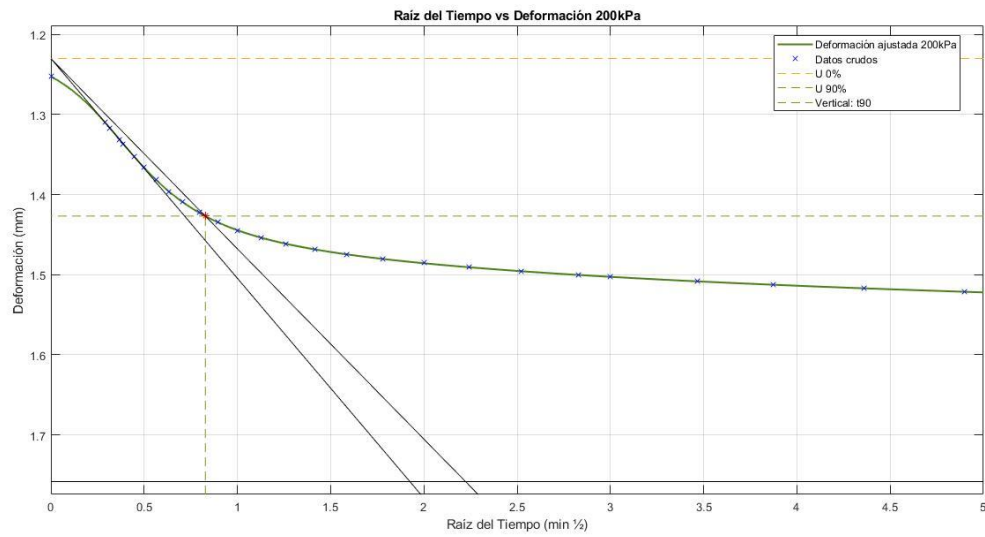


# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

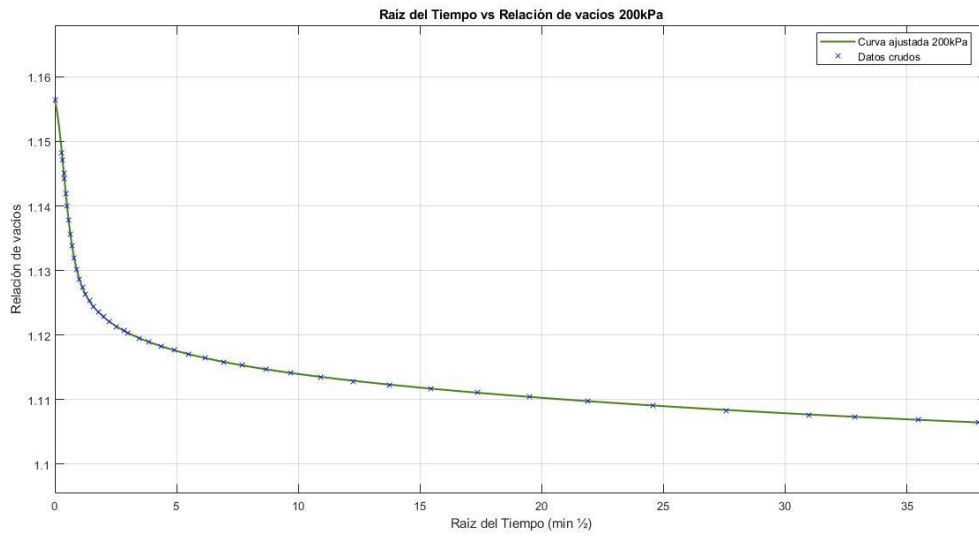


c) 200 kPa

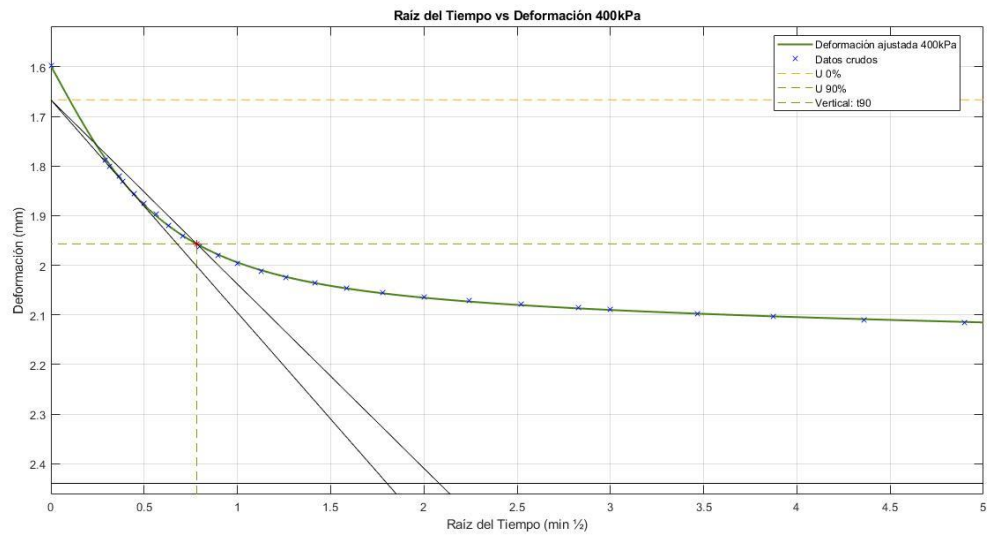


# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

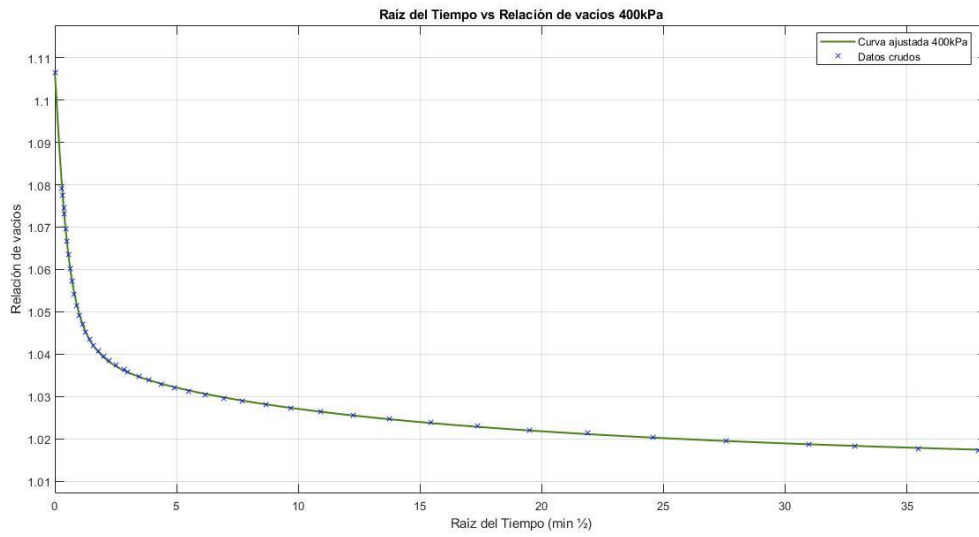


d) 400 kPa



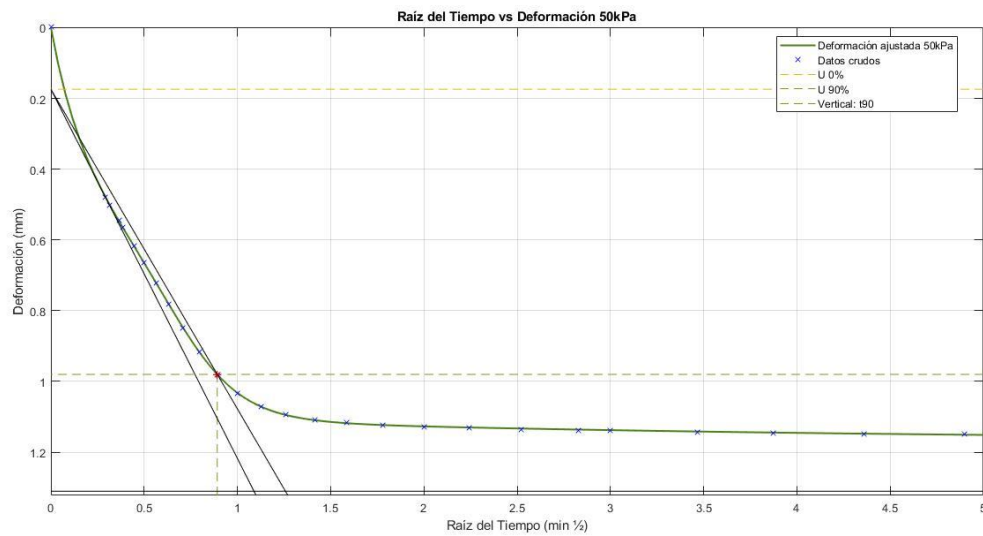
# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión



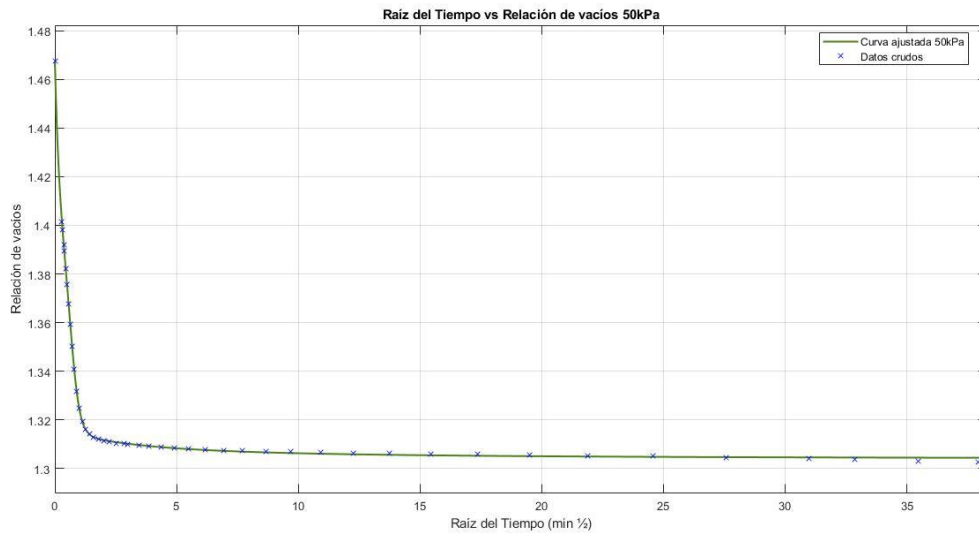
## 9.3.2.3. Probeta C

a) 50 kPa

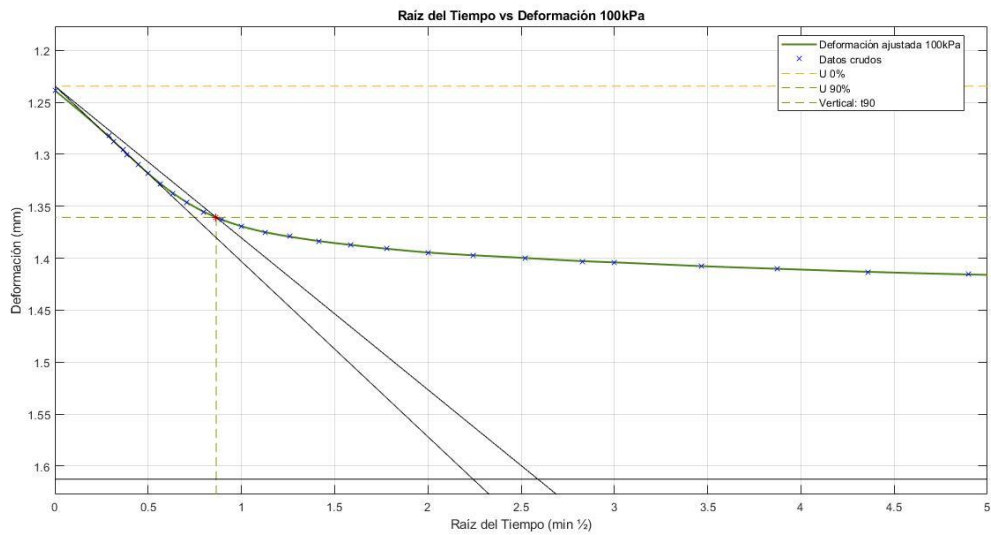


# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

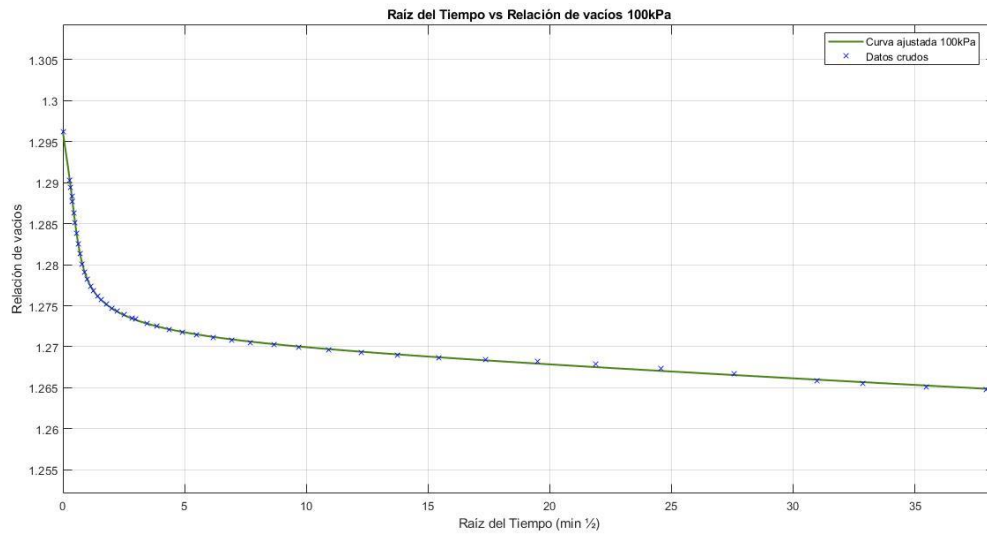


b) 100 kPa

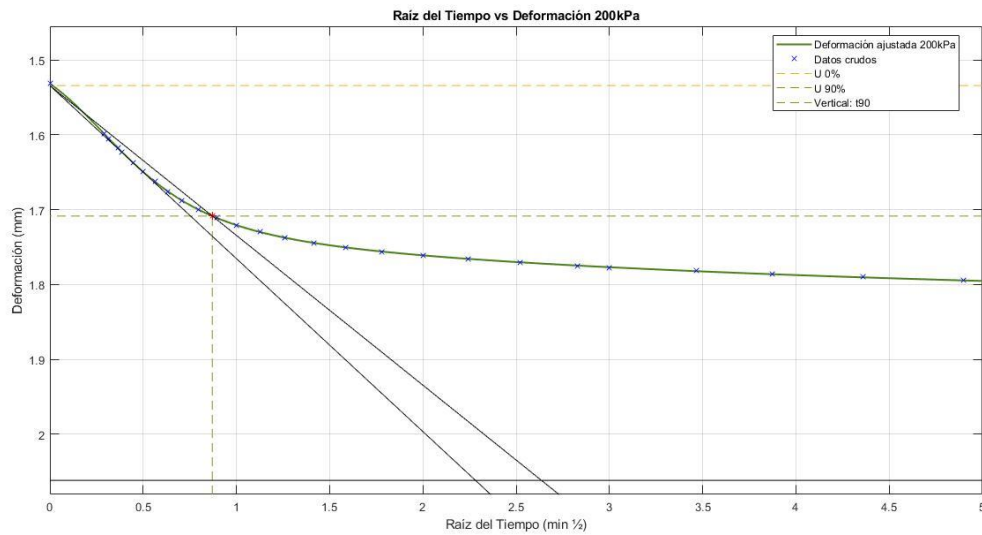


# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

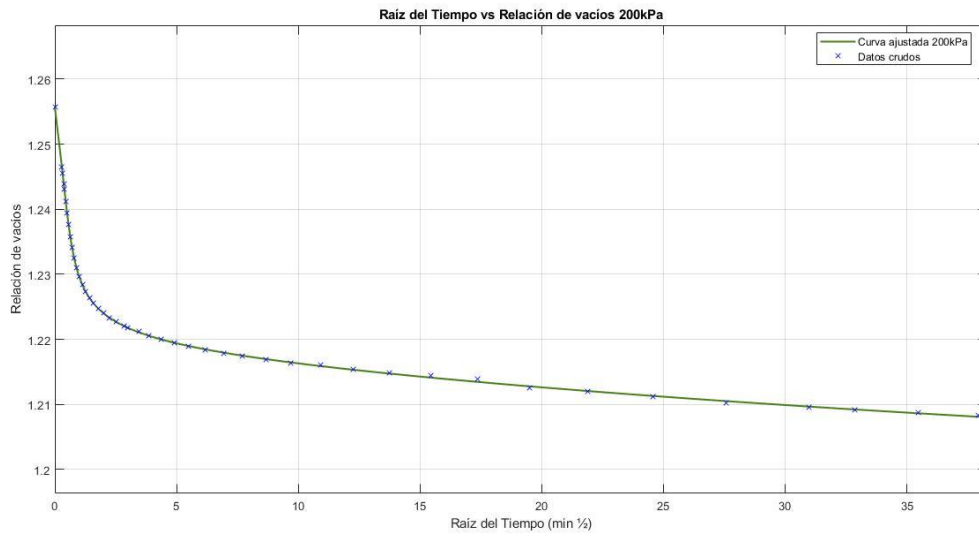


c) 200 kPa

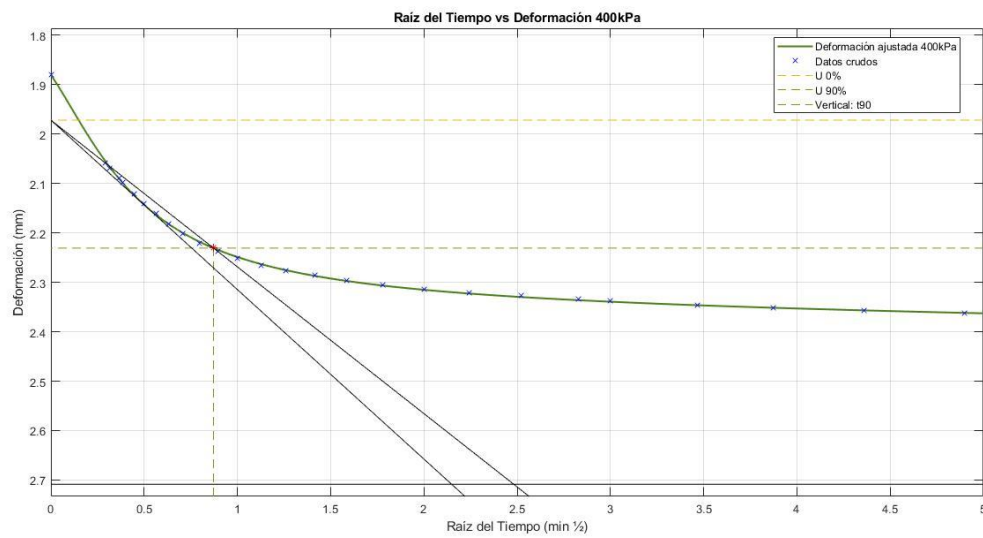


# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión



d) 400 kPa



# “Implementación de un equipo de medición de presión de poros en el ensayo de consolidación”

Mariela Alexandra Anaguano Marcillo – David Alejandro Arcos Carrión

