



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias

Deformación volumétrica en suelos no saturados

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Presenta:

Adda Olivia Alanís Araiza.

Dirigido por:

Dr. Eduardo Rojas González.

SINODALES

Dr. Eduardo Rojas González
Presidente

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Secretario

Dr. Alfredo Pérez García
Vocal

Dr. J. Jesús Alonso Mota
Suplente

Dr. Omar Chávez Alegría
Suplente


Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad de Ingeniería


Firma


Firma


Firma


Firma


Firma


Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Septiembre de 2012
México

RESUMEN

En este documento se propone una ecuación para determinar las deformaciones volumétricas en suelos no saturados basada en el principio de los esfuerzos efectivos. Se emplea la ecuación de Bishop para establecer el valor de los esfuerzos efectivos de los suelos no saturados y el parámetro χ se considera igual al grado de saturación del suelo. Se utiliza adicionalmente un modelo numérico para simular la curva característica del suelo incluyendo ciclos de secado-humedecimiento basado en la ecuación de Van Genuchten. Se establece entonces un marco elastoplástico similar al del Modelo de Barcelona por medio del cual es posible simular el fenómeno de colapso bajo humedecimiento. Para verificar el marco teórico propuesto se realizaron una serie de pruebas odométricas de humedecimiento bajo carga constante a diferentes grados de saturación. Inicialmente se mide el comportamiento volumétrico del suelo por aumento del esfuerzo neto y posteriormente se realiza el humedecimiento para producir el colapso. Finalmente se hace una comparación entre los resultados experimentales y los resultados teóricos en donde se muestra que la ecuación propuesta es adecuada para simular el comportamiento volumétrico de los suelos no saturados.

(Palabras clave: No Saturados, pruebas odométricas, succión, curva característica).

SUMMARY

This paper proposes an equation to determine the volumetric deformation of unsaturated soil based on the principle of effective stress. Equation is used to set the Bishop of the effective stress of unsaturated soils and the χ parameter is considered equal to the degree of soil saturation. Additionally it is used a numerical model to simulate the characteristic curve of soil including wetting-drying cycles based on the equation of Van Genuchten. It then establishes a frame elastoplastic similar to Model Barcelona whereby it is possible to simulate phenomena of collapse under wetting. To verify the theoretical framework proposed a series of tests conducted odometer units of wetting under constant load at different degrees of saturation. Initially measuring the volumetric behavior of the ground by increasing the net stress and subsequently made to produce wetting collapse. Finally, a comparison between experimental results and theoretical results showing that the proposed equation is adequate to simulate the volumetric behavior of the unsaturated soils.

(Key words: Unsaturated, odometer testing, suction, characteristic curve).

DEDICATORIA

A Dios, a mi madre Luz Olivia Araiza, a Pedro Armendáriz por estar en todos los momentos de mi maestría, mi hermana Olivia Alanís, mi padre Ramón Alanís, mi tío Miguel Domínguez , mi madrina Imelda Araiza, mis hermanos Alan y Adan, sobre todo a Luis Adrián Armendáriz por ser nuestro ángel y cuidarnos desde el cielo, a mi familia entera, a todos por creer en mí y apoyarme incondicionalmente.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios, por estar conmigo en cada paso que doy en la vida, por darme salud e iluminar mi mente y por haber puesto en mí camino a aquellas personas que me acompañaron durante todo el periodo de estudio.

Agradezco a mi madre Luz Olivia Araiza Ríos por enseñarme a tener fortaleza, por enseñarme a continuar siempre hacia adelante hasta alcanzar mis metas, a mi hermana Luz Olivia Alanís Araiza por creer en mí, su apoyo y cariño. Gracias Pedro Armendáriz Márquez por tu amor, cariño y comprensión. En todo momento los llevo conmigo.

A mi padre por enseñarme el camino en mi profesión y ser la inspiración para estudiar esta maestría, así como su apoyo total para realizar este sueño en mi vida. A mi tía Imelda y mi tío Miguel por ser quienes son conmigo y creer en mí, porque sin su apoyo no lo hubiera logrado.

Al Dr. Eduardo Rojas, director de esta tesis, por haber dedicado su valioso tiempo en esta investigación, fue un honor haber realizado este trabajo bajo su dirección. A los miembros del jurado de esta tesis por sus sugerencias y observaciones que contribuyeron al mejoramiento del presente trabajo.

Gracias a mis amigos empezando por Isabel, Daniel, Pablo, Eladio, Ricardo, Enrique, Hiram y Guillermo por todo su apoyo, así como al personal del laboratorio de Mecánica de suelos, Sr. Moya, Don Javier, Hugo, Félix, Carlos por su amistad y ayuda.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Y todas aquellas personas que de una u otra forma, colaboraron o participaron en la realización de esta tesis.

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| RESUMEN..... | II |
| SUMMARY | III |
| DEDICATORIA | IV |
| AGRADECIMIENTOS | V |
| ÍNDICE | VI |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | VIII |
| ÍNDICE DE FIGURAS | XII |
| 1. INTRODUCCION | 1 |
| 1.1 Justificación | 3 |
| 1.2 Descripción del problema..... | 3 |
| 1.3 Hipótesis..... | 4 |
| 1.4 Objetivo | 4 |
| 2. ESTADO DEL ARTE..... | 5 |
| 2.1 Los suelos no saturados | 5 |
| 2.2 Succión | 10 |
| 2.2.1 La Curva Característica | 13 |
| 2.3 Cambios Volumétricos en suelos no saturados..... | 21 |
| 2.3.1 Mecanismo de Colapso | 24 |
| 2.3.2 Ecuaciones Existentes..... | 28 |
| 2.4 Esfuerzos efectivos y esfuerzos equivalentes | 32 |
| 2.5 Ecuación de esfuerzos efectivos en los suelos no saturados | 32 |
| 3. METODOLOGIA | 39 |
| 3.1 Zona de estudio | 39 |
| 3.2 Caracterización y clasificación del suelo utilizado..... | 40 |
| 3.2.1 Propiedades índice de los suelos estudiados | 40 |
| 3.3 Succión | 41 |
| 3.3.1 Curva Característica del suelo | 43 |
| 3.4 Pruebas odométrica del suelo estudiado..... | 48 |
| 3.4.1 Remoldeo de pastilla con grado de saturación dado para labrado en anillo..... | 48 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.4.2 | Prueba Odométrica | 50 |
| 4. | ECUACIÓN PROPUESTA Y MARCO ELASTOPLÁSTICO..... | 52 |
| 4.1 | Introducción | 52 |
| 4.1.1 | Modelo de proporcionalidad natural | 52 |
| 4.2 | Ecuación Propuesta | 55 |
| 4.3 | Marco elastoplástico | 62 |
| 4.3.1 | Planteamiento general del modelo elastoplástico..... | 62 |
| 5. | RESULTADOS Y DISCUSION | 68 |
| 5.1 | Caracterización y clasificación del suelo utilizado..... | 68 |
| 5.2 | Succión | 70 |
| 5.2.1 | Curva característica del suelo en estudio y su simulación. | 70 |
| 5.3 | Pruebas odométrica del suelo estudiado y obtenidas de la bibliografía. | 71 |
| 5.3.1 | Curvas de compresibilidad del suelo en estudio..... | 71 |
| 5.3.2 | Verificación de la ecuación propuesta con el suelo reportado en la bibliografía (Sheng et. al, 2007). 75 | |
| 5.4 | Comparaciones teórico-experimentales | 80 |
| 5.4.1 | Comparación con resultados experimentales con material de esta tesis..... | 81 |
| 5.4.2 | Comparación con resultados procedentes de la bibliografía (Sheng,2007) | 87 |
| 6. | CONCLUSIONES | 97 |
| 7. | RECOMENDACIONES | 99 |
| | LITERATURA CITADA | 100 |
| | ANEXOS..... | 104 |

ÍNDICE DE TABLAS

| Tabla | | Página |
|--------------|---|---------------|
| 5.1 | Propiedades geotécnicas del suelo de Fraccionamiento Belén. | 69 |
| 5.2 | Cálculo de coeficientes para la ecuación de deformación volumétrica plástica y elástica. | 73 |
| 5.3 | Parámetros utilizados para la simulación de la curva en estado saturado. | 74 |
| 5.4 | Propiedades del material pearl arcilla, (Sheng et al, 2007) | 75 |
| 5.5 | Datos de deformación volumétrica colapso contra esfuerzo neto. | 79 |
| 5.6 | Parámetros utilizados para todas las simulaciones de deformación volumétrica del material de esta tesis. | 81 |
| 5.7 | Parámetros para muestra con un Gw=80% en secado. | 82 |
| 5.8 | Parámetros para muestra con un Gw=55% en secado | 83 |
| 5.9 | Parámetros para muestra con un Gw=30% en humedecimiento. | 84 |
| 5.10 | Parámetros para muestra con un Gw=40% en secado. | 85 |
| 5.11 | Parámetros para muestra con un Gw=48% en humedecimiento. | 86 |
| 5.12 | Parámetros utilizados en la aplicación de la ecuación de deformaciones volumétricas. | 87 |
| 5.13 | Parámetros utilizados en la aplicación de la ecuación de deformaciones volumétricas para la curva de eo=1.35. | 89 |
| 5.14 | Parámetros utilizados en la aplicación de la ecuación de deformaciones volumétricas para la curva de eo=1.39. | 90 |
| 5.15 | Parámetros utilizados en la aplicación de la ecuación de deformaciones volumétricas para la curva de eo=1.39. | 91 |
| 5.16 | Parámetros utilizados en la aplicación de la ecuación de deformaciones volumétricas para la curva de eo=1.26. | 92 |
| 5.17 | Parámetros utilizados en la aplicación de la ecuación de deformaciones volumétricas para la curva de eo=1.06. | 93 |
| 5.18 | Parámetros utilizados en la aplicación de la ecuación de deformaciones volumétricas para la curva de eo=1.17. | 94 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.19 | Parámetros utilizados en la aplicación de la ecuación de deformaciones volumétricas para la curva de $e_o=1.17$. | 95 |
| 5.20 | Cálculos de Succión experimental y teórico por medio de Huang et. al 2007, para el suelo MH de esta investigación. | 105 |
| 5.21 | Molalidad dependiendo las diferentes temperaturas | 105 |
| 5.22 | Calibración del papel filtro. | 105 |
| 5.23 | Succión obtenida para grafica de calibración | 105 |
| 5.24 | Datos experimentales para curva tramo de húmedo a seco. | 106 |
| 5.25 | Datos experimentales para curva tramo seco a húmedo | 107 |
| 5.26 | Cálculos para curvas teoricas primarias y secundarias. | 108 |
| 5.27 | Parámetros y cálculos Teóricos de Gw por medio de la ecuación de Van Genuchten, para simulación de curva característica del suelo en estudio (tramo secado-humedecimiento y humedecimiento-secado). | 108 |
| 5.28 | Parámetros y cálculos Teóricos de Gw por medio de la ecuación de Van Genuchten, para simulación de curvas característicad secundarias del suelo en estudio (tramo secado- humedecimiento y humedecimiento-secado). | 109 |
| 5.29 | Tabla 29. Deformación volumétrica-colapso (%) contra esfuerzo, experimental. Sheng, 2007. | 110 |
| 5.30 | Deformación volumétrica-colapso (%) contra esfuerzo, teórica para $e_o=1.36$. | 111 |
| 5.31 | Deformación volumétrica-colapso (%) contra esfuerzo, teórica para $e_o=1.28$. | 111 |
| 5.32 | Deformación volumétrica-colapso (%) contra esfuerzo, teórica para $e_o=1.17$. | 111 |
| 5.33 | Deformación volumétrica-colapso (%) contra esfuerzo, teórica para $e_o=1.05$. | 112 |
| 5.34 | Cálculos para curva característica de la bibliografía (Sheng, 2007) y su simulación con la ecuación de Van Genuchten mencionada en | 112 |

| | | |
|------|---|-----|
| | bibliografía de Huang,2005. | |
| 5.35 | Cálculos para curvas teoricas primarias y secundarias. | 113 |
| 5.36 | Parámetros y cálculos Teóricos de Gw por medio de la ecuación de Van Genuchten, para simulación de curva característica del suelo en estudio (tramo secado-humedecimiento y humedecimiento-secado). | 113 |
| 5.37 | Tabla 37. Datos para trazado de curvas de compresibilidad, bibliografía (Sheng, 2007) para $e_0=1.39$ con succión 147 Kpa. | 114 |
| 5.38 | Datos para trazado de curvas de compresibilidad, bibliografía (Sheng, 2007) para $e_0=1.28$ con succión 147 Kpa. | 115 |
| 5.39 | Datos para trazado de curvas de compresibilidad, bibliografía (Sheng, 2007) para $e_0=1.17$ con succión 147 Kpa. | 117 |
| 5.40 | Datos para trazado de curvas de compresibilidad, bibliografía (Sheng, 2007) para $e_0=1.05$ con succión 147 Kpa. | 118 |
| 5.41 | Parámetros utilizados con la ecuación propuesta para el cálculo de la deformación volumétrica con respecto a la relación de vacíos. | 119 |
| 5.42 | Resumen de resultados para obtención de grafica de consolidación, $G_w=80\%$, en secado. | 127 |
| 5.43 | Datos iniciales antes de prueba odométrica para muestra con $G_w=80\%$ | 127 |
| 5.44 | Curvas de compresibilidad para las diferentes cargas aplicadas en la prueba $G_w=80\%$ | 128 |
| 5.45 | Resumen de resultados para obtención de grafica de consolidación, $G_w=40\%$ en secado. | 135 |
| 5.46 | Datos iniciales antes de prueba odométrica para muestra con $G_w=40\%$ en secado. | 136 |
| 5.47 | Curvas de compresibilidad para las diferentes cargas aplicadas en la prueba $G_w=40\%$ en secado. | 136 |
| 5.48 | Resumen de resultados para obtención de grafica de consolidación, $G_w=55\%$ en secado. | 148 |

| | | |
|------|---|-----|
| 5.49 | Datos iniciales antes de prueba odométrica para muestra con Gw=55% en secado | 148 |
| 5.50 | Datos de compresibilidad para las diferentes cargas aplicadas en la prueba Gw=55% en secado. | 149 |
| 5.51 | Resumen de resultados para obtención de grafica de consolidación, Gw=30% en humedecimiento. | 155 |
| 5.52 | Datos iniciales antes de prueba odométrica para muestra con Gw=30% en humedecimiento. | 155 |
| 5.53 | Curvas de compresibilidad para las diferentes cargas aplicadas en la prueba Gw=30% en humedecimiento. | 156 |
| 5.54 | Resumen de resultados para obtención de grafica de consolidación, Gw=48% en humedecimiento. | 167 |
| 5.55 | Datos iniciales antes de prueba odométrica para muestra con Gw=48% en humedecimiento. | 167 |
| 5.56 | Curvas de compresibilidad para las diferentes cargas aplicadas en la prueba Gw=48% en humedecimiento. | 168 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura | | Página |
|---------------|---|---------------|
| 2.1 | Diagrama de tres fases para una muestra de suelo en condiciones no saturadas (Juárez y Rico, 1984) | 7 |
| 2.2 | Componentes principales de las fases de un suelo no saturado (Yoshimi y Osterberg, 1963) | 7 |
| 2.3 | Elemento de suelo no saturado con fase de aire continuo con burbujas de aire atrapadas (Fredlund y Rahardjo, 1993). | 8 |
| 2.4 | Representación rigurosa de un suelo no saturado por medio de un diagrama de cuatro fases (Fredlund y Rahardjo, 1993). | 9 |
| 2.5 | Curva característica de gneis granítico de Brasil por medio del modelo de Van Genuchten (1980) | 17 |
| 2.6 | Curvas dadas por la ecuación (2.16) con $\theta_{rd}=\theta_{sw}$, donde, (θ_2, S_2) y (θ_3, S_3) denotan los puntos de regresión. | 18 |
| 2.7 | Ilustración del concepto del fenómeno de histéresis en la curva característica (Pham, 2005). | 20 |
| 2.8 | Enlaces temporales entre partículas cuya desaparición puede provocar el colapso (Dadle (1970), Maswoswe (1985)). | 25 |
| 3.1 | Ubicación de la zona de estudio, Querétaro (Google Earth, 2012) | 39 |
| 3.2 | Pastilla con propiedades de muestra inalterada con su respectivo peso volumétrico de muestra γ_m . | 49 |
| 3.3 | Esquema de la muestra colocada en un consolidómetro. | 51 |
| 4.1 | Curva de compresibilidad saturada, de donde se obtienen los coeficientes κ y λ aplicados en la ecuación de deformación. | 56 |
| 4.2 | Curva de compresibilidad saturada, de donde se obtienen los coeficientes es esfuerzo de prefabricación. | 57 |
| 4.3 | Esfuerzo de Prefabricación. | 58 |
| 4.4 | Esfuerzos que actúan sobre el suelo | 61 |
| 4.5 | Modelo de comportamiento volumétrico bajo esfuerzos efectivos | 62 |
| 4.6 | Esfuerzo efectivo contra relación de vacíos. | 64 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.7 | Pendiente de la superficie de fluencia cuando tiende a 45°. | 65 |
| 4.8 | Comportamiento de las curvas de secado y humedecimiento en un plano de succión contra esfuerzo efectivo. | 65 |
| 5.1 | Carta de Plasticidad SUCS con la clasificación del suelo en estudio. | 69 |
| 5.2 | Segunda curva característica simulada con ecuación de Van Genuchten del suelos en estudio en términos del grado de saturación (Gw). | 71 |
| 5.3 | Curvas de consolidación para un Gw=80% y 55% carga-descarga, 48%,40% y 30% en carga-humedecimiento-descarga. | 72 |
| 5.4 | Gráfica donde se tomaron los valores para obtener κ y λ . | 73 |
| 5.5 | Curva de compresibilidad en estado saturado | 74 |
| 5.6 | Curvas de compresibilidad, Sheng (2007). | 78 |
| 5.7 | Colapso en diferentes cargas isotrópicas o esfuerzos netos | 79 |
| 5.8 | Curvas características del Suelo, Sheng (2007). | 80 |
| 5.9 | Gráfica de compresibilidad e vs. esfuerzo neto, para muestra con Gw=80% (en secado). | 82 |
| 5.10 | Gráfica de compresibilidad e vs. esfuerzo efectivo, para muestra con Gw=80% (en secado). | 82 |
| 5.11 | Gráfica de compresibilidad e vs. esfuerzo neto, para muestra con Gw=55% (en secado). | 83 |
| 5.12 | Gráfica de compresibilidad e vs. esfuerzo efectivo, para muestra con Gw=55% (en secado). | 83 |
| 5.13 | Gráfica de compresibilidad e vs. esfuerzo neto, para muestra con Gw=30% (en humedecimiento). | 84 |
| 5.14 | Gráfica de compresibilidad e vs. esfuerzo efectivo, para muestra con Gw=30% (en humedecimiento). | 84 |
| 5.15 | Gráfica de compresibilidad e vs. esfuerzo neto, para muestra con Gw=40% (en secado). | 85 |
| 5.16 | Gráfica de compresibilidad e vs. esfuerzo efectivo, para muestra con Gw=40% (en secado). | 85 |

| | | |
|------|--|----|
| 5.17 | Gráfica de compresibilidad e vs. esfuerzo neto, para muestra con $G_w=48\%$ (en humedecimiento). | 86 |
| 5.18 | Gráfica de compresibilidad e vs. esfuerzo efectivo, para muestra con $G_w=48\%$ (en humedecimiento). | 86 |
| 5.19 | Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo neto vs. relación de vacíos, $e_o=1.35$. | 88 |
| 5.20 | Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo efectivo vs. relación de vacíos, $e_o=1.35$. | 88 |
| 5.21 | Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo neto vs. relación de vacíos, $e_o=1.35$. | 89 |
| 5.22 | Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo efectivo vs. relación de vacíos, $e_o=1.35$. | 89 |
| 5.23 | Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo neto vs. relación de vacíos, $e_o=1.39$. | 90 |
| 5.24 | Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo efectivo vs. relación de vacíos, $e_o=1.39$. | 90 |
| 5.25 | Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo neto vs. relación de vacíos, $e_o=1.39$. | 91 |
| 5.26 | Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo efectivo vs. relación de vacíos, $e_o=1.39$. | 91 |
| 5.27 | Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo neto vs. relación de vacíos, | 92 |

| | | |
|------|--|-----|
| | eo=1.26. | |
| 5.28 | Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo efectivo vs. relación de vacíos, eo=1.26. | 92 |
| 5.29 | Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo neto vs. relación de vacíos, eo=1.06. | 93 |
| 5.30 | Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo efectivo vs. relación de vacíos, eo=1.06. | 93 |
| 5.31 | Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo neto vs. relación de vacíos, eo=1.17. | 94 |
| 5.32 | Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo efectivo vs. relación de vacíos, eo=1.18 | 94 |
| 5.33 | Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo neto vs. relación de vacíos, eo=1.17. | 95 |
| 5.34 | Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo efectivo vs. relación de vacíos, eo=1.18 | 95 |
| 5.35 | Colapso a diferentes esfuerzos isotrópicos para especímenes compactados con diferentes densidades iniciales, teórico - experimental | 96 |
| 5.36 | Simulación de curvas en secado de los materiales (Sheng, 2007) con modelo Van Genuchten. | 96 |
| 0.1 | Curva de calibración del papel filtro | 106 |
| 0.2 | Curva de compresibilidad, Gw=80%. | 126 |
| 0.3 | Curva de compresibilidad, Gw=40% en secado. | 135 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 0.4 | Curva de compresibilidad, Gw=55% en secado. | 148 |
| 0.5 | Curva de compresibilidad, Gw=30% en humedecimiento. | 155 |
| 0.6 | Curva de compresibilidad, Gw=48% en humedecimiento. | 167 |

1. INTRODUCCION

La Mecánica de Suelos se ha desarrollado, fundamentalmente, para el caso saturado o seco. El caso más general, el de suelos no saturados, ha sufrido un desarrollo notablemente más lento. Han sido citadas en diferentes ocasiones las razones por las que esto ha sido así (Fredlund (1979), Alonso y Lloret (1985)). Al hecho evidente de que por ser un estado más general, el caso no saturado plantea mayores problemas de tratamiento, se pueden añadir los siguientes factores como justificación del poco desarrollo en su estudio:

- a) Los suelos saturados son abundantes, sobre todo en los países desarrollados y de clima templado que mayor aportación han ofrecido a la Mecánica de Suelos.
- b) El estudio del suelo no saturado, respecto al suelo saturado, implica el tratamiento de nuevas variables de esfuerzo, como la succión, que pueden afectar considerablemente a su comportamiento, planteando además problemas de flujo no lineales y de compleja solución con tres fases, sólida, líquida y gaseosa.
- c) Existe controversia con el fenómeno de colapso ya que no se ha podido reproducir adecuadamente utilizando una sola variable de esfuerzo.

Se puede decir que no ha resultado rentable abordar el estudio del suelo no saturado desde un punto de vista general, ésto por la complejidad asociada a dicho estudio, la mayoría de las ocasiones es debido al temor por calcular lo requerido y llegar a un riesgo óptimo, y no con una holgura tan grande como diseñar para un comportamiento considerando al suelo únicamente en estado saturado, por quedar en sentido del lado de la seguridad.

Lo anterior ha originado una falta de base teórica que ha sido suplida, cuando ha sido necesario por estudios específicos. Por esta causa la Mecánica del Suelo no

saturado ha sido durante años el conjunto de conocimientos empíricos y casuísticos derivados de dichos estudios, que han sido los que se han aplicado en diseño y proyecto de estructuras.

Sin embargo, en ocasiones es también de interés el conocer las deformaciones que puede sufrir un suelo al verse sometido a estados de esfuerzo determinados. Si a ésto se le une el hecho de que gran parte de la superficie terrestre está en estado no saturado o puede estarlo, debido a las variaciones climáticas o por la actividad del hombre, existiendo incluso zonas en las que la condición de saturación no es ni siquiera previsible, resulta evidente el interés en llegar a ecuaciones y modelos generales que permitan el tratamiento sistemático de estos suelos.

Como datos significativos se puede decir que el 80% de la superficie terrestre emergida se ve sometida a procesos de desecación a causa de los estados climatológicos o de otro origen, como la vegetación, (Fredlund, 1985), de los cuales, en más del 50% de estos procesos la desecación pueden ser altamente significativa en su comportamiento mecánico Aitchison y Woodburn (1969).

Se han propuesto diversas ecuaciones para determinar el comportamiento volumétrico de los suelos no saturados. La mayor parte de ellas se han desarrollado bajo el principio de las variables independientes de esfuerzo, en especial la succión y el esfuerzo neto, y muy pocas bajo el principio de esfuerzos efectivos.

Una de las principales ventajas de utilizar el principio de esfuerzos efectivos es que el acoplamiento hidromecánico que se observa en los suelos no saturados queda implícito dentro de la formulación. Pero por otro lado, el proporcionar una explicación racional del fenómeno de colapso bajo humedecimiento ha sido uno de los mayores obstáculos para adoptar este tipo de modelos. En contraste, los modelos basados en el principio de las variables de esfuerzo independiente aparentemente proporcionan una explicación satisfactoria al fenómeno de colapso por humedecimiento, aunque la inclusión del acoplamiento hidromecánico no resulta tan evidente.

En el presente trabajo, se revisan las propuestas hechas por diversos investigadores y se realizó un trabajo experimental para estudiar algunos de los aspectos del comportamiento volumétrico de los suelos no saturados que aún son controversiales para finalmente proponer un marco teórico que explique dicho comportamiento, estableciendo así una ecuación, la cual se puede aplicar de manera práctica para determinar las deformaciones volumétricas de estos materiales.

1.1 Justificación

En el presente trabajo, se pretende mostrar los aspectos más relevantes de la mecánica de suelos no saturados, con la finalidad de incentivar su aplicación en la Geotecnia.

En la actualidad se realizan los análisis del comportamiento de los suelos solo para casos saturados, de los cuales nos dan rangos y valores sobreestimados del comportamiento real del suelo en estudio y se observa que en lugares donde el suelo es parcialmente saturado la mecánica de suelos tradicional no necesariamente puede ser la más adecuada y puede llevar a soluciones con diseños sobre-dimensionados (para satisfacer una condición crítica) de alto costo y no representativos del medio en que se encuentran e incluso no consideran fenómenos los cuales pueden suceder en suelos parcialmente no saturados.

Por lo anterior en este trabajo se pretende modelar el comportamiento volumétrico del suelo no saturado, bajo el criterio de esfuerzos efectivos.

1.2 Descripción del problema

Actualmente las técnicas y ecuaciones que se utilizan para estudiar el comportamiento del cambio volumétrico en suelos parcialmente saturados pueden funcionar como herramienta en la simulación y evaluación del suelo en estudio, pero realmente no reflejan el comportamiento que se puede tener en campo, y además, se

incluyen demasiados parámetros que se deben tomar en cuenta por lo que lo hacen un proceso muy complicado, y en muchas de las ocasiones dichos parámetros simplemente llegan a una aproximación, ya que para precisar estos valores o parámetros el proceso es muy lento, laborioso e inexacto. La intención de esta investigación es, por tanto, encontrar parámetros mas fáciles de obtener y generalizarlos en una ecuación para su aplicación a suelos no saturados, específicamente, así como encontrar todos los elementos que debe incluir la ecuación, para poder describir adecuadamente el suelo en este estado.

Aun cuando las pruebas y resultados gráficos son fundamentales para el análisis de la información, todas ellas dependen de modelos e interpretaciones, las cuales, a la hora de conjugar los diferentes resultados para generar un modelo que simule el comportamiento físico-mecánico del suelo, requiere de alta precisión y la utilidad de las mismas dependerá de qué tan bien se pueda representar el fenómeno físico que se pretende adaptar a la deformación volumétrica en el suelo no saturado.

1.3 Hipótesis

Se puede establecer una ecuación del comportamiento volumétrico de suelos no saturados a partir del principio de esfuerzos efectivos considerando válida la ecuación de Bishop sobre dichos esfuerzos, ya que esta ecuación arroja valores muy próximos a el comportamiento real de los materiales, recreando su comportamiento muy semejante al experimental.

1.4 Objetivo

El objetivo principal de este trabajo se centra en establecer una ecuación general del comportamiento volumétrico de suelos no saturados aplicable a cualquier tipo de suelo no saturado bajo el principio de esfuerzos efectivos.

2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presenta una revisión bibliográfica de aquellos temas más directamente relacionados con el trabajo desarrollado o que enmarcan los puntos fundamentales utilizados o expuestos en él en lo que se refiere a la descripción y comportamiento de suelos en estado no saturado.

2.1 Los suelos no saturados

Suelo es el producto de la desintegración mecánica o descomposición química de las rocas (Juárez y Rico, 1999).

El suelo podemos definirlo a través de sus propiedades, entendiendo como tal cualquier cantidad característica que describa y que permita analizar su sistema. Podemos definir a un sistema como la cantidad de materia o región en el espacio elegido para realizar un análisis.

Las sustancias puras y las mezclas que constituyen al suelo no saturado pueden encontrarse en tres estados o fases de agregación de la materia: sólido, líquido y gaseoso. Entendiendo por fase a la región de materia homogénea cuyas propiedades varían en forma continua en función de sus propiedades físicas, las cuales son aquellas que se pueden observar y medir sin provocar cambios en la naturaleza de la materia, es decir, sin inducir transformaciones químicas, y a la representación esquemática de las fases presentes bajo condiciones de equilibrio químico como diagrama.

El diagrama de fases de un suelo no saturado es un sistema heterogéneo debido a la variación de sus propiedades intensivas [en cada fase la sustancia puede existir a diferentes presiones y temperaturas (Van Wylen, Sonntag y Borgnakke; 2004) y extensivas (masa y volumen) entre su misma fase, interfase y sobretodo de una fase a otra (Figura 2.1).

Partiendo del concepto básico de materia, el suelo posee masa y ocupa un espacio. El volumen y la masa son medidas primarias de la cantidad de materia en un sistema. La masa es la cantidad de materia. El volumen es una propiedad extensiva y geométrica, que se define como el espacio ocupado por un cuerpo y cuyo valor se caracteriza por la longitud multiplicada por su ancho y altura, que se describe simplemente como “longitud al cubo” (Rolle, 2006). Las propiedades extensivas anteriores, nos ayudan a determinar las relaciones volumétricas y gravimétricas de los suelos.

Por otro lado, el suelo en condiciones no saturadas se encuentra constituido por tres estados o fases de agregación de la materia: la fase sólida, constituida por las partículas sólidas del suelo y el agua higroscópica contenida en la capa absorbida y en la doble capa difusa.

La fase líquida, compuesta por el agua libre (agua que se mueve por la acción de la fuerza gravitacional), el aire disuelto y las sales disueltas, ocupa el espacio de los poros del suelo no ocupados por la fase gaseosa. La materia en esta fase puede ser cualquier líquido miscible o inmiscible o la combinación de ambos o más líquidos (Lu y Likos, 2004).

Por último, la fase gaseosa, ocupa el espacio de los poros del suelo no ocupado por la fase líquida, integrada por el aire libre, el vapor de agua y otros gases (anhídridos sulfurosos y carbónicos).

Estas dos últimas fases ocupan el volumen de vacíos u oquedades (espacios existentes entre las partículas sólidas del suelo) de un suelo no saturado. A continuación se presenta el esquema trifásico tradicional de un suelo no saturado.

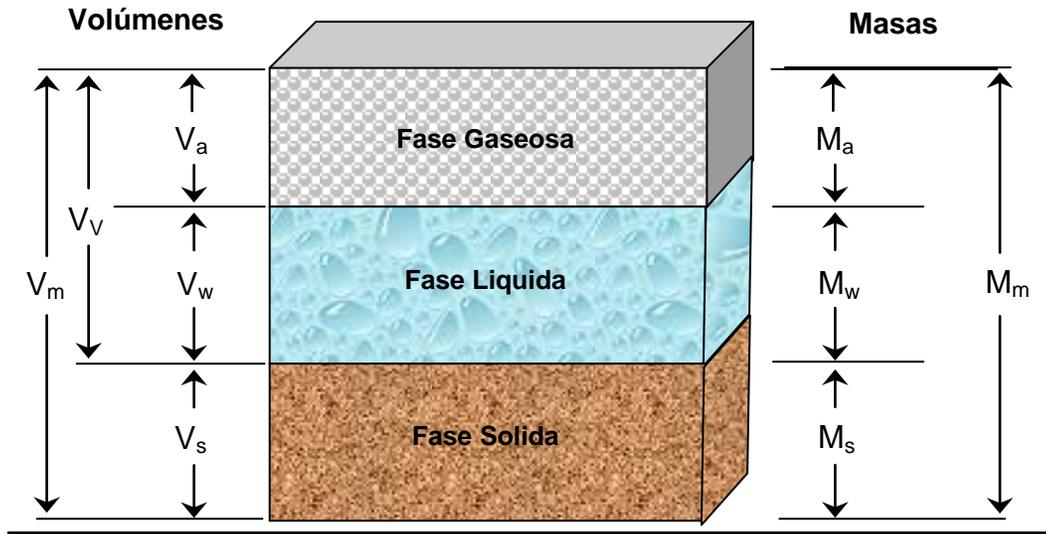


Figura 2.1 Diagrama de tres fases para una muestra de suelo en condiciones no saturadas (Juárez y Rico, 1984)

Yoshimi y Osterberg (1963) citados por Josa (1988), presentaron un esquema de las componentes principales de cada una de las fases para un suelo no saturado (Figura 2.2).

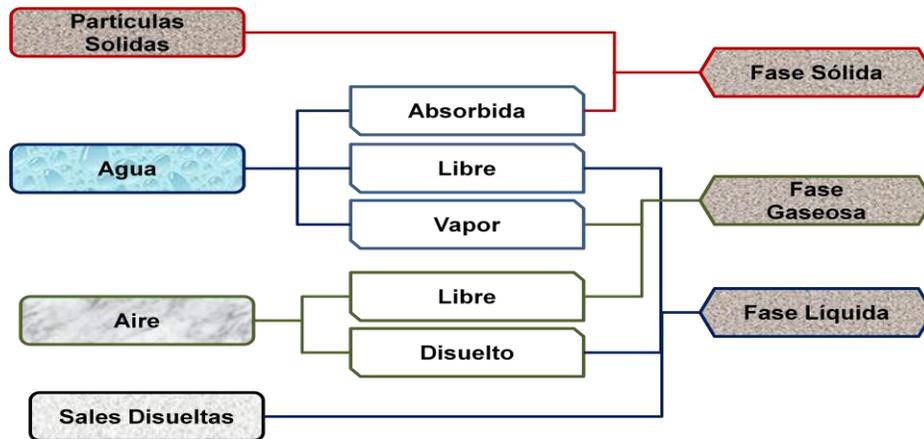


Figura 2.2 Componentes principales de las fases de un suelo no saturado (Yoshimi y Osterberg, 1963)

Por otro lado, Fredlund y Morgenstern (1977), presentaron un diagrama de cuatro fases para un suelo no saturado; a partir de las tres fases tradicionales ya

mencionadas (partículas sólidas, agua, aire), al considerar y resaltar la importancia que tiene la interfaz aire-agua como una fase adicional llamada “membrana contráctil” (Figuras 2.3 y 2.4). Esta última presenta dos características básicas que hacen posible considerarla como una fase adicional: 1) Presenta propiedades diferentes al de las fases contiguas, y 2) Define sus fronteras. Además, su propiedad más importante es la de comportarse como una membrana elástica que ejerce una fuerza a tensión ligada a la estructura del suelo (Fredlund y Rahardjo, 1993).

Fredlund y Rahardjo (1993) mencionan que la membrana contráctil presenta propiedades diferentes a la del agua, por ejemplo: su densidad se reduce, la conducción de calor se incrementa y su refracción es similar al del hielo.

El espesor de la membrana contráctil se considera del orden de algunas capas moleculares; por lo tanto, al obtener las relaciones volumétricas y gravimétricas su masa se considera como parte de la fase del agua. Cada fase de un suelo no saturado posee propiedades únicas. Por ejemplo, la densidad del aire es cercana a 1.0 kg/m^3 y la densidad del agua es aproximadamente 1 000 veces mayor. (Fredlund y Rahardjo, 1993).

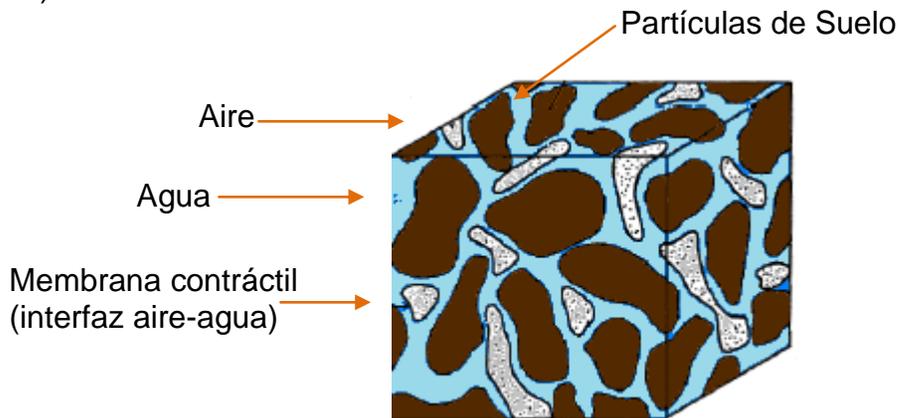


Figura 2.3 Elemento de suelo no saturado con fase de aire continuo con burbujas de aire atrapadas (Fredlund y Rahardjo, 1993).

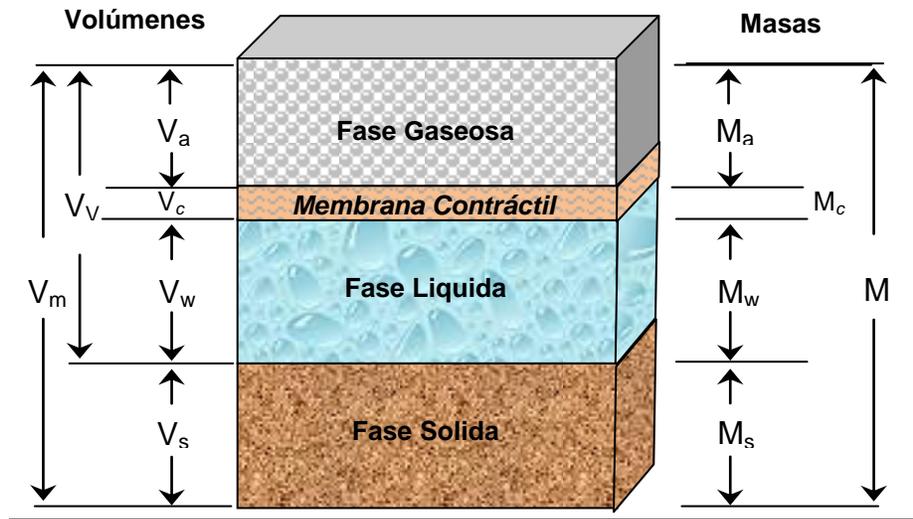


Figura 2.4 Representación rigurosa de un suelo no saturado por medio de un diagrama de cuatro fases (Fredlund y Rahardjo, 1993).

Muchas de las propiedades de los materiales que caracterizan a las fases de un suelo no saturado dependen de las variables de estado que gobiernan el sistema, dentro de las cuales se pueden incluir la temperatura, la presión, el contenido de agua, la humedad relativa y los esfuerzos aplicados al sistema.

Lu y Likos (2004) plantean que las propiedades de los materiales en un sentido más riguroso son conocidas como variables del material y pueden dividirse en dos tipos: 1) propiedades físicas y 2) funciones constitutivas. En los primeros podemos citar a la densidad y viscosidad, así como la tensión superficial del agua, la solubilidad del aire en el agua y la densidad del vapor de agua en el aire propia de los suelos no saturados. En las funciones constitutivas de los suelos no saturados podemos incluir a la curva característica suelo-agua (SWCC), la función de la conductividad hidráulica y la relación succión-esfuerzo, entre otros.

En el caso de los suelos no saturados, se ha podido observar experimentalmente que su respuesta elástica, así como su resistencia, se incrementan con la succión. Las deformaciones volumétricas de tipo irreversible, se presentan cuando tanto la succión como el esfuerzo medio neto son relativamente bajos; ya que

estas están relacionadas de forma directa con la succión inicial y en forma inversa con el esfuerzo medio neto aplicado y la relación de vacíos (Rojas et al., 2004).

Los cambios de volumen y el agrietamiento por desecación de los materiales están asociados directamente con las variaciones de humedad y por lo tanto con las variaciones de succión a las cuales está sometido el suelo. Las relaciones entre la succión y otras variables tales como el grado de saturación, la humedad o el contenido volumétrico de agua se pueden representar mediante las curvas de retención de agua, que constituyen una ley fenomenológica de cada tipo de suelo y brindan información esencial para analizar y modelar comportamientos (Ning y Likos, 2006).

Ya que sabemos la importancia de la relación del grado de saturación y la succión en el suelo. En esta tesis se toma en cuenta el comportamiento del suelo bajo diferentes grados de saturación por medio de la curva característica la cual nos indicara la succión a la que el suelo se encuentra sometida dependiendo su variación de G_w .

Utilizando la ecuación de esfuerzos efectivos dada por Bishop y tomando en cuenta su esfuerzo medio neto, la succión y su parámetro χ como en esta tesis es considerada como su grado de saturación, podremos llegar al esfuerzo efectivo al que el suelo se encuentra sometido.

2.2 Succión

Debido a la interacción entre las fases sólidas líquidas y gaseosas se presentan fuerzas adicionales en sistemas de poros no saturados. Un suelo no saturado tiene la tendencia a recibir agua y aumentar su grado de saturación, si el suelo tiene determinado grado de saturación se requiere cierta fuerza para remover el agua del espacio poroso y disminuir el grado de saturación del suelo, estos efectos se puede explicar mediante la succión, el cual consiste de dos partes, la capilar y la adsorbente. La parte capilar depende de la distribución y tamaño de poro, la parte adsorbente está en función de la composición mineralógica de la parte sólida así como también de la composición química del líquido. (Bönsch C., 2007).

El concepto de succión en los suelos no saturados surge a principios del siglo XX, de las investigaciones realizadas por Buckingham (1907). La importancia del tema en su momento fue el de explicar la interacción entre el sistema: suelo-agua-planta. Algunas de las definiciones que se han dado al término succión son las siguientes:

Buckingham (1907) definió la succión del suelo como: “la cantidad que mide la atracción entre el agua y el suelo en cualquier punto dado” (Nimmo y Landa, 2004).

Por su parte, la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo, define el potencial total del agua en el suelo ψ , como: “la cantidad de trabajo que debe realizarse por cantidad unitaria de agua pura, a fin de transportar reversible e isotérmicamente una cantidad infinitesimal de agua pura, a una elevación especificada, bajo presión atmosférica en el punto bajo consideración” (Zepeda y Pérez, 2004).

Aitchison (1967), definió la succión total del suelo o energía libre del agua en el suelo como: “La succión equivalente derivada de las mediciones de la presión parcial de vapor de agua en equilibrio con una solución idéntica en composición con el agua del suelo, en relación con la presión parcial de vapor de agua en equilibrio con el agua libre.

La succión del suelo se define como la habilidad de un suelo no saturado para atraer o retener agua.

El estado de referencia para cuantificar las componentes de la succión es la presión de vapor sobre una superficie horizontal de agua pura, sin sales o impurezas (Fredlund y Rahardjo, 1993).

Lu y Likos (2004) citan que la succión total del suelo cuantifica el potencial termodinámico del agua de los poros del suelo relativa a un potencial de agua libre, la cual no contiene solutos disueltos, ni interacciones con otras fases que determinan la

curvatura de la interfaz aire-agua, ni la presencia de fuerzas externas más que la de gravedad.

La succión mátrica ($u_a - u_w$) se define como la diferencia entre la presión de aire de poros y la presión de agua de poros. Ésta depende de los efectos capilares del agua (tensión superficial y el radio de curvatura del menisco) y de las fuerzas de adsorción (los campos de fuerzas eléctricas y las fuerzas de van der Waals). La succión mátrica es ejercida en las partículas sólidas que forman la estructura del suelo denominada “matriz” (Pousada, 1984).

Aitchison (1967) citado por Fredlund y Rahardjo (1993) definió a la succión mátrica o componente capilar de energía libre como: “La succión equivalente derivada de las mediciones de la presión parcial de vapor de agua en equilibrio con el agua del suelo, en relación con la presión parcial de vapor de agua en equilibrio con una solución idéntica en composición con el agua del suelo”.

La presión parcial del vapor de agua (humedad relativa) sobre el menisco \bar{u}_v , es menor que la presión parcial de vapor de agua (humedad relativa) sobre la superficie horizontal de la misma agua de suelo \bar{u}_v1 , ($\bar{u}_v < \bar{u}_v1$). La humedad relativa disminuye si el radio de curvatura del menisco disminuye. El radio de curvatura es inversamente proporcional a la diferencia de la presión de poros de aire y la presión de poros de agua a lo largo de la superficie, denominada succión mátrica del suelo ($u_a - u_w$).

La succión osmótica (π) se produce por los solutos disueltos (sales disueltas) en el agua de los poros del suelo. Los solutos disueltos provienen externamente, de la introducción de solutos (a través de procesos tales como la lixiviación), y naturales cuando los solutos son adsorbidos por la superficie de los minerales del suelo (cuando los cationes intercambiables son adsorbidos por las partículas de arcillas) (Lu y Likos, 2004).

Atchison (1967) definió a la succión osmótica o componente soluto de energía libre como: “la succión equivalente derivada de las mediciones de la presión parcial de vapor de agua en equilibrio con una solución idéntica en composición con el agua del suelo, en relación con la presión parcial de vapor de agua en equilibrio con el agua libre.

Entre todos los métodos de medición conocida de succión, la técnica del papel filtro es el único método donde la succión total y mátrica puede inferirse. Usando el método del papel filtro se llega a un equilibrio de la humedad del espécimen de suelo y el papel filtro en contacto (succión mátrica) y no en contacto directo (succión total) en un ambiente de temperatura constante.

El contacto directo entre el papel filtro y el suelo permite que el agua y materiales disueltos se intercambien libremente, la absorción del agua por parte del papel filtro por flujo capilar, permite la succión mátrica a través de la obtención de la humedad del papel. La medición de la succión total se realiza mediante la obtención de la humedad del papel que no está en contacto directo con el suelo ya que el flujo ocurre por la transferencia de vapor únicamente incorporando todas las fuerzas osmóticas y capilares que retienen a las moléculas de agua (Bulut, 2008).

2.2.1 La Curva Característica

La curva característica suelo-agua (SWCC), se define como la relación entre la succión del suelo y el contenido de agua (volumétrico o gravimétrico) o grado de saturación (Vanapalli et al., 1996). Esta relación también representa la capacidad de un suelo por retener agua bajo un cierto valor de succión aplicada (Pérez, 2006).

La curva característica también se le conoce como: curva de succión, relación succión-agua ó curva de retención de humedad del suelo. La preferencia de usar el término curva característica se debe a que este término describe a través de la curva las propiedades del comportamiento del suelo, determinando el contenido de agua. El

vocablo retención está más relacionado al agua retenida por las plantas en el área de la ciencia del suelo o la agricultura (Fredlund, 2004).

La curva característica surge en un principio para estimar la succión del suelo in situ a través de la medición del contenido de agua natural, lo cual fue inaceptable por el fenómeno de histéresis que se presenta entre las trayectorias de secado y humedecimiento en la curva característica, sin embargo, esta relación presentó un valor significativo para estimar las funciones de las propiedades del suelo no saturado (Fredlund, 1996).

La analogía consistía en suponer que el espesor de la zona no saturada (Zona vadosa, Bounwer 1978) era controlada por la variaciones climatológicas en la superficie de la tierra y por el nivel de aguas freáticas (NAF), produciendo diferentes zonas de secado entre ellas (variación del grado de saturación del suelo de 100 al 0%) y caracterizándose por la presión negativa del agua de poro (Croney et al, 1958; citado por Fredlund, 1996).

2.2.1.1 Modelo empírico de Van Genuchten utilizado para la simulación de la curva característica

Van Genuchten (1980) desarrolló una ecuación empírica para la curva característica, la cual es una función continua, con tres parámetros de ajuste. La expresión matemática del modelo se expresa de la siguiente forma:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha s)^\eta]^m} \quad (2.1)$$

Donde: α , η y m son parámetros de ajuste, s es la succión mátrica del suelo en el punto de interés, θ_s es el contenido volumétrico saturado del suelo y θ_r es el contenido de agua residual del suelo.

El modelo matemático de van Genuchten, cuenta con un punto de inflexión que permite mayor flexibilidad y define mejor la forma sigmoïdal o de “s” invertida de la curva característica. Por otra parte, también proporciona un excelente ajuste para los datos experimentales en todo el rango de succión.

El término succión aparece en la parte derecha de la ecuación 2.1, la cual se expresa en unidades de presión ($s= \text{kPa}$) o carga ($h= \text{m}$).

El desarrollo matemático de la ecuación de Van Genuchten se basa en la expresión de Mualem para el contenido de agua normalizada (Θ):

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.2)$$

Van Genuchten relacionó el contenido de agua normalizada con la succión mátrica por medio de la siguiente expresión:

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha S)^\eta} \right]^m \quad (2.3)$$

Si se aplica la propiedad de los exponentes, $\left(\frac{x}{y}\right)^m = \frac{x^m}{y^m}$, se logra:

$$\Theta = \frac{(1)^m}{[1 + (\alpha S)^\eta]^m}$$

Simplificando se obtiene:

$$\Theta = \frac{1}{[1 + (\alpha S)^\eta]^m} \quad (2.4)$$

La ecuación (2.5) se obtiene al igualar la ecuación (2.2) con la ecuación (2.4) de la siguiente manera:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (\alpha S)^\eta]^m}$$

Si pasamos el denominador del miembro izquierdo de la ecuación a la derecha, resulta:

$$\theta - \theta_r = (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{[1 + (\alpha S)^\eta]^m}$$

Simplificando y despejando el valor del contenido de agua volumétrico, se obtiene la ecuación (2.5):

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha S)^\eta]^m} \quad (2.5)$$

El parámetro “ α ” está relacionado con el valor de entrada de aire (el valor de “ α ” es aproximadamente el inverso de la presión de entrada de aire, Lu y Likos, 2004) y la forma de la curva característica cercana a la saturación. Al disminuir “ α ”, la presión de entrada de aire aumenta (Tinjum, 1995).

Por su parte, el parámetro “ η ” está relacionado con la distribución de tamaño de poro y es un índice de la pendiente de la curva característica (van Genuchten, 1980). Cuando el parámetro “ η ” aumenta define más eficazmente la parte plana cercana al valor de entrada de aire de la curva característica que el parámetro “ λ ” del modelo de Brooks y Corey (1964) y provoca que el valor de la succión residual disminuya (S_r) y cuando “ η ” disminuye la presión de entrada de aire de la curva característica aumenta.

Por último, el parámetro “ m ” está relacionado con la simetría total de la curva característica.

Los parámetros de ajustes “ m ” y “ n ” se relacionan por medio de las siguientes expresiones:

$$m = \begin{cases} 1 - \frac{1}{\eta} \\ 1 - \frac{1}{2\eta} \end{cases} \quad (2.5)$$

Las relaciones entre “m” y “η” simplifican el ajuste de la forma sigmoideal de la curva característica, optimizando el número de parámetros a cuatro: el contenido de agua saturado, el contenido de agua residual, α y η.

La Figura 2.5 presenta el ajuste de una curva característica por medio del modelo de Van Genuchten (1980) para el suelo usado en el modelo de Brooks y Corey (1964).

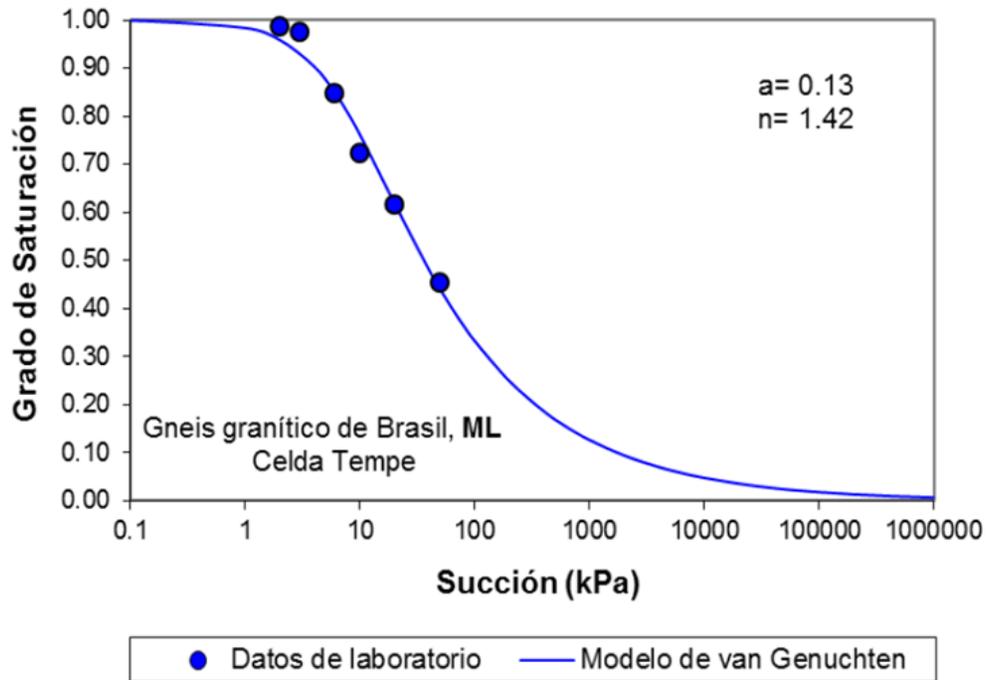


Figura 2.5 Curva característica de gneis granítico de Brasil por medio del modelo de Van Genuchten (1980)

Para esta curva característica, el parámetro “m” se simplifica de acuerdo a la ecuación (2.16) para el caso donde $m=1-(1/\eta)$.

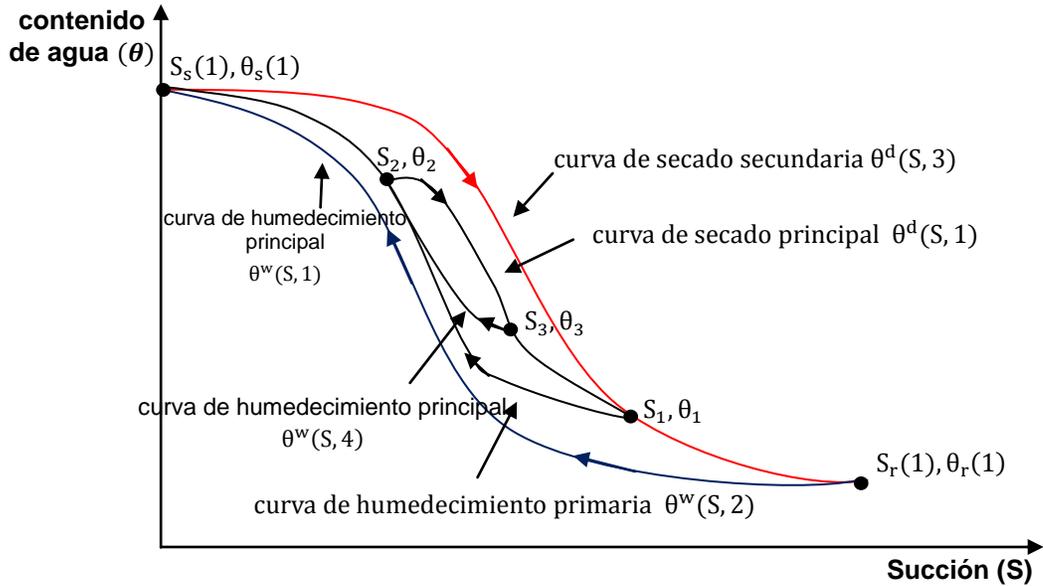


Figura 2.6 Curvas dadas por la ecuación (2.16) con $\theta_r^d = \theta_s^w$, donde (θ_2, S_2) y (θ_3, S_3) denotan los puntos de regresión.

Para generar las curvas secundarias Van Genuchten utiliza la misma ecuación pero con diferentes parámetros de inicio, (Huang et. al 2005).

Además, Van Genuchten (1980) describe un procedimiento gráfico para estimar α y η , y encontró que θ_s y θ_r son fáciles de determinar utilizando los datos experimentales de laboratorio. En la práctica, θ_s y θ_r pueden ser obtenidas a partir de datos recopilados en diferentes tipos de suelo (Van Genuchten y Nielsen, 1985). En el modelado de las curvas cíclicas en la relación entre $\theta - s$, cada miembro de la familia de curvas cíclicas se supone que se ha descrito por la ecuación (2.5) con los mismos parámetros de forma α y η . Las siguientes anotaciones que se utilizan son: para el secado principal de la curva $\theta(s)$ se denota por $\theta^d(s,1)$, la curva de humedecimiento principal se denota por $\theta^w(s,1)$, la curva de humedecimiento primaria se denota por $\theta^w(s,2)$, la curva de humedecimiento secundaria se denota por $\theta^d(s,3)$ y la curva de secado terciaria se denota por $\theta^w(s,4)$, así sucesivamente (Figura 2.6).

Los parámetros θ_s , θ_r , α y η en la ecuación (2.5) son incógnitas que se determinan de tal manera que la curva de humedecimiento principal $\theta^w(s,1)$ es descrita por los parámetros $[\theta_s^w(1), \theta_r^w(1), \alpha^w, \eta^w]$. Además, para eliminar el efecto bombeo, las relaciones de $\theta_r^d(1) = \theta_r^w(1) = \theta_r$ y $\theta_s(1) = \theta_s^w(1) = \theta_s$ se imponen para cerrar la curva de histéresis principal. Así, la descripción de las principales de humedecimiento y de secado $\theta^w(s,1)$ y $\theta^d(s,1)$ son revisadas de $[\theta_s, \theta_r, \alpha^w, \eta^w]$ y $[\theta_s, \theta_r, \alpha^d, \eta^d]$, respectivamente. Además, α^w, η^w y α^d, η^d se les asigna los mismos valores en la descripción de los ciclos de humedecimiento y secado.

El punto de inversión de $\theta^w(s,2)$, se produce en (θ_1, s_1) que requiere $\theta^w(s,2)$, para satisfacer:

$$\frac{\theta^w(s,2) - \theta_r^w(2)}{\theta_s^w(2) - \theta_r^w(2)} = (1 + |\alpha^w s| \eta^w)^{-m^w} \quad (2.6)$$

La curva primaria de humedecimiento $\theta^w(s,2)$, también pasa a través de los puntos de inversión en (θ_1, s_1) y (θ_s, s_s) . Sustituyendo (θ_1, s_1) y (θ_s, s_s) en los campos de la ecuación (2.7).

$$\frac{\theta_1 - \theta_r^w(2)}{\theta_s^w(2) - \theta_r^w(2)} = (1 + |\alpha^w S_1| \eta^w)^{-m^w} \quad (2.7)$$

$$\frac{\theta_s - \theta_r^w(2)}{\theta_s^w(2) - \theta_r^w(2)} = (1 + |\alpha^w S_s| \eta^w)^{-m^w} \quad (2.8)$$

Resolviendo $\theta_s^w(2)$ y $\theta_r^w(1)$ utilizando las ecuaciones (2.8) y (2.9) con α^w y η^w puede describir $\theta^w(s,2)$.

θ^d (s,3) puede obtenerse de manera similar. Así, la relación de θ -s de la curva de análisis i-ésimo orden, sin efecto de bombeo se puede obtener utilizando $\theta_s^w(i)$ y $\theta_r^w(i)$ o $\theta_s^d(i)$ y $\theta_r^d(i)$.

2.2.1.1.1 Histéresis en la curva característica

La curva característica presenta el fenómeno de histéresis, es decir, describe diversas trayectorias, tales como las trayectorias principales de secado y humedecimiento y una serie infinita de trayectorias secundarias (Figura 2.7). Al graficar la curva característica, uno espera que la curva de humedecimiento describa la misma trayectoria que la curva de secado; sin embargo, éstas no coinciden, para un cierto valor de succión, la trayectoria de humedecimiento presentará siempre un contenido de agua menor a la descrita por la trayectoria de secado.

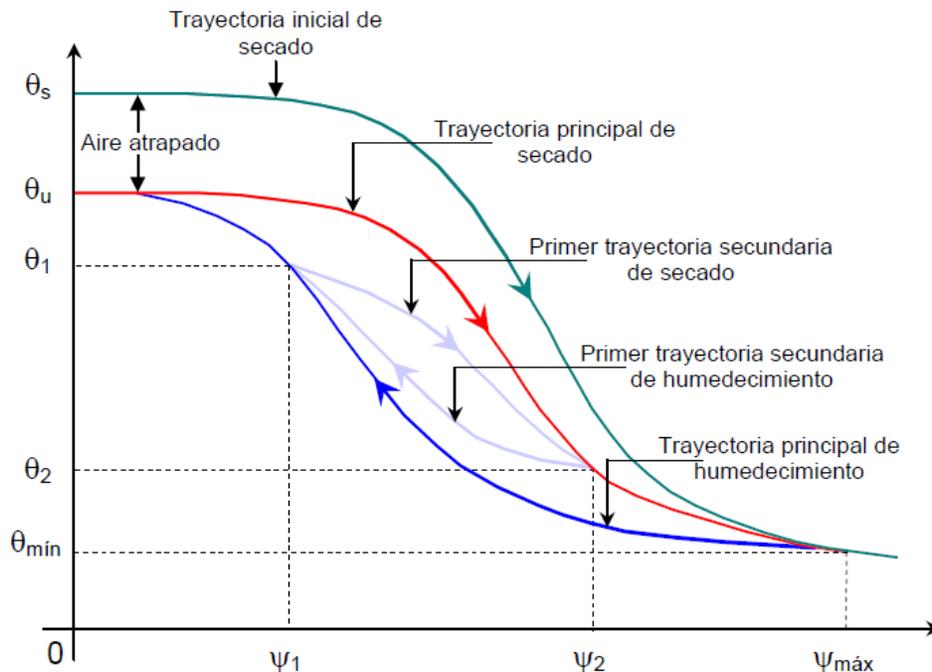


Figura 2.7 Ilustración del concepto del fenómeno de histéresis en la curva característica (Pham, 2005).

La curva característica exhibe la variación más grande de contenido de agua (trayectoria secado-humedecimiento) en la zona de transición donde el agua de poros es retenida por los mecanismos capilares; y su diferencia más pequeña en la zona de agua residual, donde el agua de poros está adsorbida en las partículas sólidas del suelo. Podemos observar además, que la saturación total no se alcanza durante la trayectoria de humedecimiento debido a las burbujas de aire que quedan atrapadas (Figura 2.7).

El fenómeno de histéresis se atribuye a diversos mecanismos que se presentan tanto a nivel microscópico (a nivel partícula) como a nivel macroscópico (conjunto de partículas). Estos mecanismos son, según Likos y Lu (2004):

1. Las irregularidades en la sección transversal del poro asociado con la distribución heterogénea de su tamaño o efecto de botella (Haines, 1948).

2. El ángulo de contacto, el cual es mayor en la trayectoria de secado que en el de humedecimiento.

3. El aire atrapado por la formación de burbujas de aire ocluidas, el cual avanza entre el menisco que se genera entre los sólidos durante la correspondiente presión o succión aplicada.

2.3 Cambios Volumétricos en suelos no saturados

La deformación de los suelos parcialmente saturados ha sido largamente estudiada, principalmente en los análisis del comportamiento de los suelos potencialmente colapsables y expansivos.

Algunos suelos pueden presentar un comportamiento expansivo o colapsable, o hasta combinar los dos fenómenos en un mismo proceso de humedecimiento si las tensiones exteriores son suficientemente bajas o altas. Las deformaciones

consideradas son globales del suelo, que concluyen tanto las componentes recuperables como irrecuperables. (Alonso et al., 1987) analizan las deformaciones volumétricas de los suelos colapsables y expansivos.

El comportamiento tensión-deformación ha sido analizado considerando el espacio de tensiones $p : s$, donde p es la tensión neta y s es la succión. Existe gran cantidad de ensayos publicados, con diferentes trayectorias de tensiones en dicho plano. De estos ensayos se pueden extraer los siguientes resultados:

1) El aumento de la succión contribuye a un aumento de la rigidez de los suelos, de modo que parece que la carga de preconsolidación aparente aumenta con la succión (Alonso et al., 1987).

Por otro lado, este aumento de la succión puede producir deformaciones plásticas irrecuperables, principalmente en suelos arcillosos (Josa, 1988). Sin embargo el aumento de la rigidez no puede ser indefinido, tal y como se observa en (Escario y Sáez, 1989) resultados experimentales, la relación entre la rigidez y la succión es no lineal, llegando a un valor máximo de la rigidez, para succiones que superen un cierto valor.

2) La carga aplicada controla, en gran medida, la cantidad de hinchamiento de los suelos cuando los sometemos a una disminución en la succión. Cuanto mayor es la carga aplicada, menor es el hinchamiento. En los suelos expansivos, los procesos cíclicos de humedecimiento y secado provocan una expansión irrecuperable (plástica) en el primer humedecimiento y a partir de él, el comportamiento es prácticamente elástico (Yuk, 1994).

3) La mayoría de los suelos pueden hinchar o colapsar dependiendo de la carga aplicada, cuando se disminuye la succión. Para cargas elevadas el suelo colapsa, pero hincha con cargas bajas. Sin embargo no es sencillo determinar el valor de la carga a partir del cual el suelo hincha o colapsa, dado que este comportamiento depende del

valor de la succión. Es decir, un suelo que inicialmente hincha al disminuir la succión, puede llegar a un valor de la succión para el cual empieza a colapsar, aunque el resultado global sea un hinchamiento.

En los suelos compactados, estos fenómenos están relacionados con el hecho de que aquellos que se compactan del lado seco del óptimo presentan una estructura de agregados. Inicialmente se produce un hinchamiento por el humedecimiento, pero la resistencia de los contactos entre los agregados disminuye con la succión de modo que al llegar a un valor crítico (que depende de la carga de forma inversa) la estructura colapsa.

4) Los suelos con una estructura abierta experimentan un colapso cuando se disminuye la succión.

A medida que se incrementa la carga aplicada, el colapso producido al saturar un suelo, aumenta hasta llegar a un valor máximo, después del cual el colapso disminuye. El valor de la carga para la cual se produce el colapso máximo depende, entre otros factores, del tipo de suelo, la humedad inicial y la densidad seca inicial.

5) Al cargar el suelo progresivamente se pueden producir deformaciones irreversibles, si se supera el valor de la presión de preconsolidación, de un modo similar a los suelos saturados. Sin embargo este valor aumenta con la succión, como se ha comentado en el primer punto.

6) El valor del hinchamiento alcanzado depende de la trayectoria de esfuerzos que se ha seguido, en el plano $p : s$, sobre todo cuando las trayectorias incluyen incrementos en la succión.

Entre otros, resultados de este tipo pueden encontrarse en (Maswoswe, 1985) (ensayos en una arcilla arenosa en muestras compactadas estáticamente) y Justo, et al, 1984) (ensayos en arcillas expansivas de muestras compactadas). En ensayos

odométricos con control de succión, han mostrado, sin embargo, que un comportamiento volumétrico inverso podría ocurrir durante el proceso de humedecimiento. De hecho microestructuras potencialmente colapsables sujetas a una reducción de la succión de un valor inicial relativamente alto se han reportado que primeramente experimentan un hinchamiento y después una deformación de compresión (Escario y Sáez, 1973; Cox, 1978; Alonso et al., 1987).

En el estudio del comportamiento deformacional de los suelos parcialmente saturados existen varios planteamientos que consideran el suelo como un material isótropo y elástico. (Fredlund y Morgenstern , 1976) refiriéndose a la fase sólida, utilizan distintos módulos elásticos respecto a las tensiones y a la succión. (Justo y Saettersdal, 1982) citado por (Yuk, 1994), donde presentan una revisión de los métodos elásticos y un análisis de los suelos expansivos y colapsables. (Richards, 1984) analizando el comportamiento tensión–deformación de los suelos expansivos, propone un modelo que incorpora el comportamiento no lineal, en función de la tensión aplicada y de la succión, histéresis en el comportamiento tensión deformación y las tensiones internas de tracción y corte.

2.3.1 Mecanismo de Colapso

El colapso se produce cuando un suelo, que es estable frente a las cargas exteriores que soporta debido a la existencia de enlaces suficientemente fuertes entre sus partículas, pierde la acción de estos enlaces al aumentar el grado de saturación.

El origen de estos enlaces temporales puede ser diverso. Se pueden destacar los siguientes enlaces de tipo capilar. El estado de esfuerzo provocado por los fenómenos de superficie en las interfaces entre el aire, el agua y las partículas sólidas, incrementa las tensiones interpartículas, rigidizando la estructura del suelo y haciéndola más resistente. Este fenómeno es especialmente claro en el caso de arenas, limos, o arenas con algunos enlaces de limos en los que las acciones capilares se producen entre partículas en los contactos arena-arena, limo-limo o arena-limo.

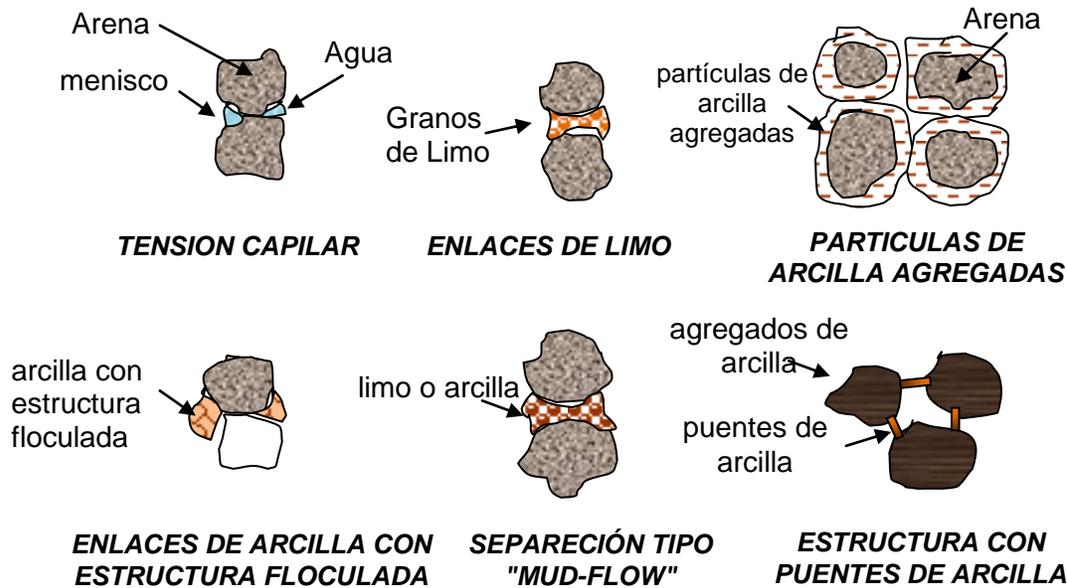


Figura 2.8 Enlaces temporales entre partículas cuya desaparición puede provocar el colapso (Dadle (1970), Maswoswe (1985)).

No ocurre así en el caso de arcillas en las que por su tamaño, forma y propiedades específicas (acciones de superficie) es poco clara la formación de meniscos y la acción de las fuerzas capilares, el aumento del grado de saturación, por ejemplo, al aumentar la humedad o al reducir la relación de vacíos sin drenaje (proceso de corte rápido) hace que se pierdan estos enlaces pudiendo provocar un colapso si las fuerzas exteriores son suficientemente grandes.

Enlaces por puentes de partículas arcillosas. En el caso de arenas y limos, la existencia de partículas arcillosas en estado desecado en los contactos puede contribuir a la estabilidad de la estructura del suelo. Estas partículas arcillosas pueden estar presentes desde la formación del suelo, haber sido transportadas o ser autogénicas, siendo producidas en este último caso, por ejemplo, por la reacción entre el agua intersticial o procedente de la lluvia, y feldespatos existentes en el suelo. La disposición de las partículas de arcilla puede ser paralela, cara contra cara, alrededor de las de arena o limo, aunque esta ordenación depende de la estructura cristalina original de las partículas. Sin embargo en general el ordenamiento es floculado, tal como indica Knight

(1962) citado por Dadle (1970). En el caso de ordenamientos paralelos, posibles humedecimientos sin lavado de las partículas arcillosas pueden llevar también a estructuras floculadas debido a que en el proceso de secado la concentración creciente de iones disueltos provocan este ordenamiento. En realidad la estructura final de las arcillas depende de muy diversos factores como son el propio origen de las partículas, la concentración de sales, el índice de poros dentro de la estructura de la arcilla, o la temperatura (López Corral, 1978a).

Estos puentes de arcilla que pueden aportar una resistencia adicional al suelo pueden perderse al humedecerse o ser lavados si aumenta el grado de saturación, produciéndose el colapso. Si las partículas arcillosas están aglomeradas su comportamiento puede asimilarse al de estos aglomerados adquiriendo entonces en ellos mayor importancia las fuerzas capilares.

Enlaces por cementación. Pueden existir entre las partículas agentes cementantes, en general de origen calcáreo, o soldaduras, que rigidicen y hagan más resistente al suelo. El proceso de cementación puede consistir, por ejemplo, en la precipitación en los huecos del esqueleto arenoso de sales disueltas en el agua de escorrentía procedente de regiones calcáreas. Si estos suelos se ven sometidos a una inundación o lavado continuo, las sales precipitadas pueden disolverse, perdiéndose los enlaces. La efectividad en la disolución de estos agentes cementantes dependerá de la propia naturaleza de estos últimos y de las sales o contaminantes que pueda contener el agua. Como es lógico, la pérdida de este tipo de enlaces es, en general, más lenta que la de puentes de arcilla o la producida por capilaridad.

Pueden existir otros factores que afecten al proceso de colapso, como la posible rotura de partículas al perder resistencia por humedecimiento (Delgado (1986)). También es importante considerar la naturaleza del agua que humedece al suelo, debido a que la existencia de sales o contaminantes, como ha sido ya indicado, pueden modificar el colapso. Así, Jiménez Salas et al (1973) encuentran que en suelos que no contienen sales solubles el sedimento se produce de una sola vez al inundarlos

mientras que si contienen sales solubles, cada vez que se añade agua puede producirse un colapso adicional. Reginatto y Ferrero (1973) muestran los efectos que los cambios en solutos y en sus concentraciones producen en el colapso, utilizando agua potable, agua residual doméstica y agua con pH ácido, para intentar reproducir casos reales (rotura de conducciones, agua de lluvia, etc.).

El efecto fundamental se produce en estos casos sobre posibles cementaciones, que son afectadas con mayor o menor intensidad dependiendo de las características químicas del agua, o sobre los puentes de arcilla en los que la concentración de iones puede ser importante en su comportamiento.

El fenómeno de colapso puede ser debido en casos específicos a otros mecanismos aparte de los indicados. Martin Viñas (1973b), por ejemplo, elabora un modelo físico-químico para explicar el colapso en el caso de rocas, señalando la inexistencia o desconocimiento de mecanismos exclusivamente mecánicos que lo puedan explicar en este caso. Según dicho autor, el efecto que produce el agua, a causa de su carácter molecular dipolar, es el debilitamiento de la cohesión de la roca al reducir la energía de los enlaces químicos de origen fundamentalmente eléctrico, provocándose fracturas por las zonas más débiles o ya microfisuradas.

Para comprobarlo utiliza líquidos diferentes para provocar el colapso, obteniendo una relación aparentemente lineal entre la magnitud del asiento y la constante dieléctrica del líquido utilizado.

Todos los mecanismos indicados producen en realidad el mismo efecto micro estructural: la reducción de la resistencia al corte en los contactos. Si esta resistencia llega a ser menor que la sollicitación producida por las acciones exteriores, la estructura del suelo se reordena para resistirla, provocando el colapso.

En este trabajo únicamente se considerara el colapso para efecto de la succión mátrica. Esto quiere decir que las partículas que se encuentran en un suelo

parcialmente saturado están unidas por meniscos de agua y la acción de la succión entre estos por la condición de presión de poro de aire, al saturarse estos enlaces se hacen frágiles y provocan un colapso por pérdida de succión, en este caso solo es porque en la prueba de succión que se realizó en laboratorio solo se tomó en cuenta esta.

2.3.2 Ecuaciones Existentes

Los cambios de volumen en suelos no saturados pueden ser asociados con las variables de estado de esfuerzo usando relaciones apropiadas.

Según Coleman (1962), los cambios de volumen total (V) y del agua (V_w) en un suelo sometido a cargas isotrópicas son dados por las expresiones siguientes:

$$-\frac{dV}{V} = -C_{21}(du_w - du_a) + C_{22}(d\sigma_m - du_a) + C_{23}(d\sigma_1 - d\sigma_3) \quad (2.9)$$

dV = Cambio volumétrico total del elemento de suelo

V = Volumen actual del elemento del suelo

u_a = Presión de poro de aire

u_w = Presión de poro de agua

σ_1 = Esfuerzo axial normal total (ej. esfuerzo principal mayor)

σ_3 = Presión total confinante (ej. esfuerzo principal menor)

σ_m = Esfuerzo medio normal total (ej. $1/3 (\sigma_1 + 2\sigma_3)$)

C_{21}, C_{22}, C_{23} = Parámetros de compresibilidad del suelo asociados con el cambio de volumen de la estructura del suelo.

Los parámetros de compresibilidad C_{21}, C_{22}, C_{23} , dependen únicamente de los valores de $(u_w - u_a)$, $(\sigma_m - u_a)$ y $(\sigma_1 - \sigma_3)$ y el historial de esfuerzo en el suelo.

La relación constitutiva para el cambio de volumen asociado con la fase líquida se escribió como:

$$-\frac{dV_w}{V} = -C_{11}(du_w - du_a) + C_{12}(d\sigma_m - du_a) + C_{13}(d\sigma_1 - d\sigma_3) \quad (2.10)$$

donde:

dV_w = Cambio de volumen de agua en el elemento de suelo

La formulación hecha por (Coleman, 1962) asume que los cambios en los esfuerzos desviadores también producen cambios en el volumen.

(Bishop y Blight , 1963) concluyeron que se debería de tomar en consideración los valores de esfuerzos de manera independiente, así propusieron que se grafique el cambio de volumen contra las variables de esfuerzo neto $(\sigma - u_a)$ y succión $(u_a - u_w)$ en una forma de tridimensional. En 1965, Burland reafirmó que los cambios de volumen en suelos no saturados deben de ser independientes a las variables de estado de esfuerzo .

(Aitchison, 1967) volvió a señalar la importancia de graficar los cambios de volumen con respecto a las variables de esfuerzo independientes. Después en 1969 Aitchison presentó curvas típicas de cambio de volumen obtenidas por caminos independientes de $(\sigma - u_a)$ y $(u_a - u_w)$ contra la deformación.

(Matyas y Radhakrishna, 1968) introdujeron el concepto de parámetros de estado para los suelos no saturados. Los parámetros de estado consisten en variables de esfuerzo (ej. $\sigma_m = \frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{3} - u_a$, $(\sigma_1 - \sigma_3)$, y $(u_a - u_w)$ para la compresión triaxial), junto con la relación de vacíos inicial y el grado de saturación (ej., e_0 y S_0). Se realizaron pruebas en muestras "idénticas" de suelo compactadas, con el mismo contenido de agua y el misma peso específico seco. Para la compresión isotrópica los parámetros de esfuerzo se redujeron a $(\sigma_3 - u_a)$ y $(u_a - u_w)$. La relación de vacíos y el grado de saturación fueron utilizados para representar el estado de deformación del suelo.

Superficies de estado tridimensionales se formaron con la relación de vacíos y el grado de saturación graficados contra los parámetros de estado independientes $(\sigma - u_a)$ y $(u_a - u_w)$. estas superficies de estado son en esencia superficies constitutivas. (Matyas y Radhakrishna , 1968) probaron experimentalmente la unicidad de las superficies constitutivas. Se realizaron pruebas de compresión isotrópicas y de K_0 en mezclas de 80% de polvo de flint powder y 20% de caolinita. Las presiones de aire y agua totales fueron controladas durante la prueba. las superficies constitutivas de la relación de vacios y el grado de saturación contra las variables de esfuerzo $(\sigma - u_a)$ y $(u_a - u_w)$ se definieron utilizando diferentes patrones de esfuerzo para probar su unicidad. Los resultados de la relación de vacios produjeron una sola superficie desfasada con la estructura del suelo siempre decreciente en volumen mientras que el esfuerzo neto $(u_a - u_w)$ decrece o el esfuerzo $(\sigma - u_a)$ incrementa.

Los resultados indican que el suelo tenía una estructura metaestable que colapso como resultado de una disminución gradual en la succión mátrica. Un suelo con estructura estable hubiera expandido con una disminución en la succión mátrica a pesar del fenómeno de colapso, los resultados muestran una única superficie constitutiva para la estructura del suelo dado que los patrones de deformación resultaron en un incremento del grado de saturación. Cuando se siguieron otros patrones donde se involucraron el humedecimiento y el secado, la superficie constitutiva, de la relación de vacíos contra el esfuerzo, no era completamente única.

Esta restricción en el patrón parecía estar relacionado a la histéresis asociada al humedecimiento y secado. Estos patrones introducen algunas características no únicas en las superficies constitutivas de la estructura del suelo. (Matyas y Radhakrishna , 1968). Se encontró que las superficies constitutivas no eran únicas para la fase liquida (representadas por el grado de saturación). Sin embargo una vez más hubo humedecimiento y secado antes de tender a la saturación.

En 1969, Barden et al., estudiaron las características del cambio de volumen en suelos no saturados bajo condiciones de carga K_0 cargados estas pruebas se

realizaron en muestras de arcilla illita de alta y baja plasticidad. La presión total de poro de aire y de poro de agua fue controlada mientras se investigaba el efecto de varios patrones de esfuerzo durante la carga K_0 .

En todos los casos el esfuerzo normal neto presentó un incremento subsecuente a las condiciones iniciales. En la mayoría de los casos la succión mátrica incremento, sin embargo en algunos casos la succión disminuyó. Los resultados indicaron que el cambio total del volumen en la muestra dependía de los patrones de esfuerzo, siendo función de la trayectoria de humedecimiento o el de secado.

La histéresis entre los procesos de saturación y de secado se consideró como la mayor causa de dependencia de los patrones de esfuerzo. Se concluye que el cambio volumétrico de un suelo no saturado debería de ser analizado en términos de cada uno de sus componentes de esfuerzo. $(\sigma - u_a)$ y $(u_a - u_w)$.

Fredlund (1979), formula una relación constitutiva con base en la superficie de estado formada al graficar el logaritmo de las variables de tensión versus los parámetros de volumen (e) o humedad (S_r, w) representados por las siguientes ecuaciones:

$$e = e_0 - Ct. \log \frac{(\sigma - u_a)}{(\sigma - u_a)_o} - Cm. \log \frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_o} \quad (2.11)$$

$$w = w_0 - Dt. \log \frac{(\sigma - u_a)}{(\sigma - u_a)_o} - Dm. \log \frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_o} \quad (2.12)$$

Donde:

e, e_0 : Índices de vacíos final y inicial respectivamente.

Ct : Índice de compresión.

Cm : Índice de succión en función en función del índice de vacíos y succión matricial.

Dt : Índice del contenido de humedad en función de la tensión efectiva del suelo saturado.

D_m: índice del contenido de humedad en función de la succión matricial.

$(\sigma - u_a)$ y $(\sigma - u_a)_0$: tensiones efectivas del suelo saturado final e inicial, respectivamente.

$(u_a - u_w)$ y $(u_a - u_w)_0$: succión matricial final y inicial respectivamente.

2.4 Esfuerzos efectivos y esfuerzos equivalentes

En 1923 Terzaghi utiliza por primera vez la noción de esfuerzos efectivos. Posteriormente en 1936, establece formalmente este principio de la siguiente manera: “Si los vacíos del suelo están saturados con agua sujeta a un esfuerzo u , el esfuerzo total (σ) está formado por dos partes. La primera actúa en el agua y alrededor de las partículas de suelo con intensidad u y se denomina esfuerzo neutro o presión de agua. El balance $\sigma'_1 = \sigma_1 - u$, $\sigma'_2 = \sigma_2 - u$, $\sigma'_3 = \sigma_3 - u$, representa un esfuerzo excedente del neutro que actúa exclusivamente en las partículas del suelo. Esta fracción del esfuerzo total se denominará esfuerzos efectivos principales. Un cambio en el esfuerzo u prácticamente no produce ningún cambio volumétrico y no tiene influencia en la condición de esfuerzos a la falla. Todos los esfuerzos mensurables debidos a un cambio de esfuerzo, tales como compresión, distorsión y resistencia al cortante son exclusivamente debidos a la acción de los esfuerzos efectivos σ'_1 , σ'_2 y σ'_3 .

El término “esfuerzo equivalente” se diferencia del de “esfuerzo efectivo” en que el primero toma en consideración únicamente la fuerza cortante del suelo y el segundo término considera, además, los cambios volumétricos.

2.5 Ecuación de esfuerzos efectivos en los suelos no saturados

En 1936 Terzaghi estableció el principio de esfuerzos efectivos para suelos saturados (Terzaghi, 1936). Este principio considera implícitamente las siguientes dos hipótesis:

- 1) Las partículas sólidas son incompresibles.

-
- 2) El área de contacto entre dos partículas es independiente de la presión de confinamiento y puede ser despreciada.

Si una de estas hipótesis no es aceptada, entonces pueden ser obtenidas diferentes ecuaciones. Por ejemplo, si se toma en cuenta el área de contacto entre partículas, el esfuerzo que regula el esfuerzo cortante de los suelos puede escribirse como

$$\sigma' = \sigma - ku_w \quad (2.13)$$

donde σ' y σ representan el esfuerzo efectivo y total, respectivamente; u_w = presión de agua en el poro; y $k = (1 - a \tan \psi / \tan \phi)$. En esta última ecuación a representa el área de contacto entre partículas por unidad de área; ψ = ángulo de fricción del material que comprende a las partículas de suelo; y ϕ = ángulo de fricción interna del medio granular. Por otro lado, de acuerdo con Lade y De Boer (1997), el valor del parámetro k para el comportamiento volumétrico de un medio con poros saturados debería ser $k = [1 - (1 - n)C_s/C_e]$, donde n representa la porosidad del suelo; C_s = compresibilidad del material sólido comprendido por las partículas sólidas; y C_e = compresibilidad de la estructura del suelo.

Las expresiones de arriba muestran que un esfuerzo efectivo no representa una cantidad física medible sino que es un esfuerzo artificial usado para simplificar las relaciones volumétricas y el comportamiento de los esfuerzos de materiales y puede incluir propiedades mecánicas de las variables de estado. Esto quiere decir, que representa una variable constitutiva. Sin embargo, para rangos de esfuerzos usados frecuentemente en la ingeniería geotécnica, la variación del parámetro k es tan pequeña que es muy difícil de determinar, incluso con equipo sofisticado. Por tanto, la ecuación de esfuerzos efectivos de Terzaghi representa una muy buena aproximación para el esfuerzo cortante y el comportamiento volumétrico de los suelos saturados.

Debido a esta simplificación, cuando los investigadores buscaban una ecuación de esfuerzos efectivos para suelos no saturados, suponían a ésta como una ecuación

que podría tomarse en cuenta para ambos, el esfuerzo y el comportamiento volumétrico del suelo y debería ser escrita como una función de las variables de esfuerzo únicamente y estas suposiciones dieron lugar a grandes confusiones.

A finales de la década de los 50's algunos investigadores se centraron en el comportamiento de los suelos no saturados y propusieron diferentes ecuaciones para los esfuerzos efectivos. Sin embargo, únicamente prevaleció la propuesta por Bishop (1959). Esta ecuación se escribe

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (2.14)$$

donde u_a = presión del aire; χ = parámetro relacionado al el grado de saturación (Gw). El término $(\sigma - u_a)$ es llamado el esfuerzo neto (también escrito como σ_{nt}), y $(u_a - u_w)$ la succión del suelo (también escrito como s).

La validez de la ecuación de Bishop fue cuestionada porque ésta no puede predecir el fenómeno de colapso ante el humedecimiento una vez que el suelo es secado y cargado con valores por arriba la presión de preconsolidación (Jennings and Burland 1962). Este comportamiento fue interpretado como el resultado del incremento del esfuerzo efectivo aplicado a una muestra de suelo, mientras que la ecuación de Bishop predice la reducción del esfuerzo efectivo ante el humedecimiento. Sin embargo, ahora se sabe que a causa de que el colapso representa una respuesta volumétrica plástica del suelo, éste puede ser explicado con base en un marco elastoplástico como lo propone Alonso et al (1990) y no por una sola variable constitutiva como representa la ecuación de esfuerzo efectivo de Bishop.

Los resultados experimentales muestran que el valor del parámetro χ es afectado por diferentes factores como son un historial de humedecimiento-secado, relación de vacíos, y la estructura del suelo (Jennings y Burland, 1962).

Basados en una evidencia experimental, Öberg y Sälfors (1995) proponen que para materiales granulares y grados de saturación por arriba del 50%, el parámetro χ puede adoptar el valor del grado de saturación (S_w), esto quiere decir que $\chi = S_w$. De esta forma, aparece la versión simplificada de la ecuación de Bishop. Algunos autores han propuesto otras expresiones empíricas para el parámetro χ basados en los resultados de pruebas hechas sobre arenas, limos y arcillas. Es interesante hacer notar que todas estas expresiones están relacionadas con la curva de retención suelo-agua, también llamada curva característica del suelo.

Algunos estudios teóricos realizados por Houlsby (1997) y Murray (2002) a partir de algunos principios de la termodinámica, han dejado entrever la posibilidad de que exista una ecuación de esfuerzos efectivos para suelos no saturados. Desafortunadamente estos planteamientos se han hecho de manera incompleta, dado que idealizan a estos materiales ya sea como un medio constituido por partículas ligadas entre sí por meniscos de agua o bien como un conjunto de glomérulos o paquetes que permanecen esencialmente saturados. Sin embargo, los suelos reales presentan ambas estructuras, es decir poseen una macroestructura y una microestructura integrada por glomérulos con poros muy pequeños.

Otra forma de atacar el problema es por medio de la aplicación de los principios termomecánicos y en especial al analizar la forma en que la energía se disipa cuando se aplica una carga a un medio multifásico. Se sabe que el comportamiento de un material refleja la manera en que la energía se almacena y/o disipa y dado que el comportamiento de los suelos está regido por los esfuerzos efectivos, entonces al escribir la ecuación de energía interna de un suelo no saturado es posible identificar la ecuación de los esfuerzos efectivos.

Este desarrollo ha sido realizado por Houlsby tanto para el caso de suelos saturados (1979) como no saturados (1997). En el caso de los suelos saturados, la ecuación que se obtiene es la ecuación de los esfuerzos efectivos de Terzaghi. Para el caso de suelos no saturados, la relación que obtiene es la ecuación simplificada de Bishop. Sin embargo, en este último caso, Houlsby considera al suelo como un conjunto

de partículas ligadas entre sí por una serie de meniscos, es decir, considera únicamente la fracción de suelo no saturada. Por lo tanto, para obtener la ecuación de esfuerzos efectivos de un suelo que presenta una estructura bimodal, se requiere acoplar ambas soluciones considerando la fracción de suelo correspondiente a cada caso.

Así para el caso de un suelo saturado, Houlsby (1979) obtiene la relación

$$L = (\sigma_{ij} - u_w \delta_{ij}) \dot{\epsilon}_{ij} - \frac{\partial u_w}{\partial x_i} (w_w)_i \quad (2.15)$$

en donde L representa la energía aplicada por unidad de volumen de suelo, $(w_w)_i$ es la velocidad de flujo del agua en la dirección i , $(\sigma_{ij} - u_w \delta_{ij})$ y $\dot{\epsilon}_{ij}$ representan el tensor de esfuerzos efectivos de Terzaghi y el tensor incremento de deformación, respectivamente, δ_{ij} es el delta de Kronecker. Esta ecuación establece que cuando un suelo se carga, la energía se disipa de dos maneras: por medio del flujo del agua y por medio de las deformaciones producidas por el incremento de los esfuerzos efectivos. Es decir, esta ecuación establece el principio de consolidación de los suelos. Si se realiza un ensaye triaxial no drenado, la velocidad de flujo de agua es nula y la disipación de energía se realiza únicamente por medio de las deformaciones generadas por el incremento de los esfuerzos efectivos.

Por otro lado, para el caso de suelos no saturados y considerando únicamente la fracción no saturada Houlsby (1997) obtiene la siguiente relación:

$$L = -\frac{\partial u_w}{\partial x_j} (w_w)_j - \frac{\partial u_a}{\partial x_j} (w_a)_j + n(1 - S_w) u_a \dot{V}_a - n s \dot{S}_w + [(\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij}) + s S_w \delta_{ij}] \dot{\epsilon}_{ij} \quad (2.16)$$

en donde, $(w_a)_j$ es la velocidad de flujo del aire en la dirección j , \dot{V}_a y \dot{S}_w representan la variación del volumen de aire y del grado de saturación con el tiempo. Esta ecuación establece que la disipación de energía en este material ocurre de la siguiente manera: por flujo de agua y aire (dos primeros elementos), por compresión de la fase gaseosa (tercer elemento), por variación del grado de saturación (cuarto elemento) y por deformación del esqueleto sólido (último elemento). El esfuerzo

asociado al tensor incremento de deformación, define entonces la ecuación de esfuerzos efectivos de este material que, como se puede observar, está representada por la ecuación simplificada de Bishop.

Si se considera que un suelo real presenta una estructura bimodal, entonces es posible obtener una ecuación global de esfuerzos equivalentes mediante el acoplamiento de ambas soluciones, Ec. 2.7 y Ec. 2.8, y considerando la fracción de suelo correspondiente a cada caso. De esta manera Rojas (2004) obtiene la ecuación.

$$\sigma'_{ij} = (\sigma_{ij} - u_w \delta_{ij}) f_s + [(\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij}) + s G w_w^u \delta_{ij}] (1 - f_s) \quad (2.17)$$

en donde $f_s = V^s/V$ representa la fracción de suelo que permanece saturada, siendo V^s y V el volumen de la fracción saturada y total del suelo, respectivamente. Por otro lado $G w_w^u$ representa el grado de saturación de la fracción no saturada. Esta ecuación representa el esfuerzo equivalente en un suelo no saturado que presenta una estructura bimodal.

La Ec. 8 también se puede escribir como:

$$\sigma'_{ij} = (\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij}) + s \delta_{ij} [f_s + S_w^u (1 - f_s)] \quad (2.18)$$

siendo esta última la ecuación de esfuerzos equivalentes de los suelos no saturados escrita en su forma tensorial y la cual queremos verificar.

La forma en que está escrita la ecuación 2.10 permite una interpretación sencilla: cuando el suelo se encuentra saturado ($f_s = 1$), la ecuación de esfuerzos efectivos de Terzaghi prevalece. Cuando no existe la fracción saturada ($f_s = 0$, $S_w^u = S_w$), entonces prevalece la ecuación simplificada de Bishop. Por lo tanto, en un suelo no saturado de estructura dual, la ecuación de esfuerzos equivalentes es la suma de las ecuaciones de Terzaghi y simplificada de Bishop aplicadas a la fracción de suelo correspondiente.

Finalmente, el parámetro χ de Bishop se puede escribir como:

$$\chi = f_s + S_w^u(1 - f_s) \quad (2.19)$$

Para el caso de suelos anisotrópicos es necesario considerar las diferencias que existen en la distribución de meniscos dentro de la estructura del suelo. Para ello es necesario escribir el parámetro χ en función de otras variables.

Para el caso de esta tesis se tomará el parámetro χ como el grado de saturación de la muestra, ya que se encuentra dentro de los parámetros y rangos en los cuales se puede suponer igual y no se realizó un análisis más a fondo de la poro simetría del suelo para aplicar otras teorías ya que la finalidad de esta tesis se enfoca al aspecto de deformación del suelo.

3. METODOLOGIA

3.1 Zona de estudio

La zona de estudio está ubicada en la ciudad de Santiago de Querétaro, (Querétaro, México), con las coordenadas geográficas de latitud igual a $20^{\circ}38'48''\text{N}$, longitud $100^{\circ}22'32''\text{W}$ y con una altitud media sobre el nivel del mar de 1820 m.



Figura 3.1 Ubicación de la zona de estudio, Querétaro (Google Earth, 2012)

Se realizaron sondeos del tipo pozo a cielo abierto a una profundidad de 1.35 metros en los meses de noviembre del 2010 y agosto del 2010, y obtener así muestras inalteradas y alteradas alrededor de 1 y 2 metros de profundidad.

3.2 Caracterización y clasificación del suelo utilizado

3.2.1 Propiedades índice de los suelos estudiados

3.2.1.1 Límites

La determinación de las fronteras entre estos estados se hace de forma convencional mediante lo que Atterberg llamó límites de consistencia. El límite líquido, es el límite entre los estados semilíquido, y plástico, y el límite plástico es el la frontera entre los estados plástico y semisólido.

3.2.1.2 Densidad de sólidos

Con base a la norma ASTM D-854-02 se determina la densidad de solido a cada profundidad de muestreo, necesario para determinar grado de saturación, relación de vacíos del material en estudio.

3.2.1.3 Granulometría

En la distribución cuantitativa de la distribución de los tamaños del material fino baso en la ley de Stokes, ley fundamental de que hace uso en el procedimiento del hidrómetro, en donde se proporciona una relación entre la velocidad de sedimentación de las partículas del suelo en el fluido y el tamaño de esas partículas, la cual se muestra en la norma ASTM D-2487-02 y 2974-87.

3.2.1.4 Superficie específica para suelos finos

La superficie específica (S_e) se define como la relación entre la superficie de una partícula A_p y su masa m . Su valor determina el balance entre fuerzas capilares, eléctricas y gravimétricas, actuantes sobre las partículas, afecta la estructura, la permeabilidad y controla la adsorción y retardación durante la difusión química (Santamarina et al., 2001).

3.3 Succión

La prueba de succión se realizo de acuerdo a la norma ASTM D5298-94.

Se seca el papel filtro seleccionado para un ensayo al menos 16 horas en el horno de secado por la noche. Luego se coloca el papel filtro en un desecador, después del secado para almacenarlo antes de usarlo.

La succión total se medirá si el papel filtro no está en contacto con el espécimen del suelo; la transferencia de la humedad se limitara a la transferencia de vapor a través del aire dentro del contenedor de especímenes.

Se removieron los dos papeles filtros apilados en contacto con el espécimen de suelo, luego se aislaron del suelo insertando o-rings o cualquier otro elemento inerte con una superficie mínima entre el papel filtro y el suelo.

Se coloca la tapa el contenedor de los especímenes y se sella con cinta plástica. Después se coloca el contenedor sellado en una caja de aislamiento y se coloca ésta en un lugar donde la variación de temperatura sea menor a 3°C. Una temperatura nominal típica es de 20 °C. La succión en el papel filtro y el espécimen en el contenedor debe llevarse a su equilibrio en un mínimo de 7 días.

En esta medición de succión debe evitarse la condensación por lo que puede ser necesario un control termostático. El control de la temperatura de la muestra durante el equilibrio asegura la minimización de los efectos de condensación.

Al final del periodo de equilibrio, se coloca cada uno de los dos papeles filtro en forma separada en contenedores metálicos. La masa del contenedor metálico es determinada con una aproximación de 0.0001 gr, designándola como Tc (Tara fría), posteriormente el contenedor de especímenes se retira de la caja de aislamiento, se

sugiere que la masa del contenedor del papel filtro sea pesado antes de la determinación de la masa total del papel filtro.

Utilizando un par de pinzas se transfiere cada papel filtro del contenedor de especímenes al contenedor metálico de masa conocida (T_c). Todo este procedimiento debe completarse a un tiempo de 3 a 5 seg. La clave para determinaciones exitosas del contenido de agua del papel filtro es minimizar la pérdida de agua durante la transferencias del papel filtro al contenedor de especímenes y durante la determinación de la masa antes de secarla al horno. Deben tomarse precauciones si se tiene una pérdida del 5 % o más de la masa debida a la evaporación durante los 5 o 10 seg. De exposición del papel filtro al ambiente con una humedad relativa, Rh de 30 a 50 %.

Se coloca las dos tapas sobre el contenedor metálico ya con el papel filtro del espécimen y se sella rápidamente después de cada transferencia.

Inmediatamente se determinará la masa de cada uno de los contenedores con el papel filtro M1 con una aproximación de 0.0001 g.

Se colocan los contenedores de metal con el papel filtro en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ con las tapas ligeramente selladas o sin sellar para permitir que la humedad se escape. Los contenedores deben permanecer en el horno al menos 2 horas. Después de este tiempo se sellan y se mantiene los contenedores en el horno y se dejan reposar por 15 minutos para equilibrar a temperatura. Se remueve el contenedor metálico con el papel filtro del horno y se determina la masa seca total M2 a 0.0001 g, inmediatamente se remueve y se quita el papel filtro y se toma la masa del contenedor que contenía el papel filtro o la masa caliente T_h a 0.0001 g, repitiendo este procedimiento para el resto de los contenedores.

Una vez que las masas M2 y T_h han sido determinadas, se desecha el papel filtro. Por lo tanto no debe ser usado de nuevo para el desarrollo de este método de ensayo.

3.3.1 Curva Característica del suelo

Para esta tesis se obtuvieron datos experimentales los cuales generaron una curva característica experimental, como adicional se realizaron la comprobación y realización de una curva característica teórica la cual simulará el comportamiento experimental pero ésto con la finalidad de obtener más datos de succión a diferentes grados de saturación requeridos, también se obtuvieron las curvas de humedecimiento y de secado secundarias siguiendo las diferentes metodologías que se explican a continuación.

3.3.1.1 Curva Característica Experimental

Se realizaron 20 muestras remoldeadas con la humedad natural de la muestra original inalterada relativamente regulares no agrietadas de 5 cm de diámetro, se generan a compresión estática, se obtienen los pesos y volúmenes de los recipientes donde van a estar situados las muestras. Figura 3.3.1.



Figura. 3.3.1 Anillo de acero inoxidable utilizado para el remoldeo de las muestras para obtener la curva característica.



Figura. 3.3.2 Recipiente hermético.

Para esta investigación se trabajo a diferentes humedades, partiendo de una humedad natural inicial (w) de 28.9%.

Primeramente se realizó el saturado de 10 y secado 10 de muestras. Para llegar a la saturación de las 10 muestras que se colocaran en secado se dejo el material en un recipiente con el agua requerida para su saturación por capilaridad, después de esto para generar los puntos de la curva de humedecimiento-secado se coloco una franela sobre las muestras en un cuarto de temperatura constante para no alterar el secado y estas no se agrietaran, dejándolas hasta que llegaran al grado de saturación deseado, después de esto se colocan selladas para la medición de la succión requerida.

En el caso de la curva de secado-humedecimiento se dejaron hasta que su grado de saturación fuera el mínimo y después se le agregó agua dependiendo los mililitros que requería para llegar al grado de saturación deseado, este paso fue por medio de capilaridad colocando el agua bajo el recipiente para su respectiva saturación, dejando homogenizar 16 a 24 horas esto para no perder humedad.

Entre los factores que influyen en la forma de la curva característica se encuentra principalmente la granulometría, la composición mineralógica y la estructura del suelo.

3.3.1.2 Curva característica Teórica

3.3.1.2.1 Curvas teóricas principales de Secado y humedecimiento

Se utiliza adicionalmente un modelo numérico con una ecuación de tipo empírica de Van Genuchten para simular la curva característica del suelo incluyendo trayectorias de secado-humedecimiento primarias y secundarias. Las curvas secundarias en trayectoria de secado y humedecimiento se obtuvieron siguiendo la metodología y análisis que se muestra con esta misma ecuación general pero modificada para dichos tramos cíclicos secundarios (Huang et. al, 2005).

Se realizó una única modificación en el modelo de Van Genuchten en lugar de utilizar el contenido volumétrico de agua, se utilizó el grado de saturación, como se muestra en la sección 2.2.1.1 así que a continuación se muestran solamente las ecuaciones que se utilizarán en esta investigación sin explicación de como se obtuvieron, ya que esta explicación ya se anexa en la sección comentada anteriormente.

Van Genuchten (1980) desarrolló una ecuación empírica para la curva característica, la cual es una función continua, con tres parámetros de ajuste. La expresión matemática del modelo se expresa de la siguiente forma:

$$GW = GW_r + \frac{GW_s - GW_r}{[1 + (\alpha s)^\eta]^m} \quad (3.1)$$

Donde: α , η y m son parámetros de ajuste, s es la succión mátrica del suelo en el punto de interés, θ_s es el contenido volumétrico saturado del suelo y θ_r es el contenido de agua residual del suelo.

El término succión aparece en la parte derecha de la ecuación 3.2, la cual se expresa en unidades de presión ($s = \text{kPa}$) o carga ($h = \text{m}$).

El desarrollo matemático de la ecuación de Van Genuchten se basa en la expresión de Mualem para el contenido de agua normalizada (Θ) y se utilizara con grado de saturación (Gw):

$$Gw = \frac{Gw - Gw_r}{Gw_s - Gw_r} \quad (3.2)$$

Se relacionó el contenido de agua normalizada con la succión mátrica por medio de la siguiente expresión:

$$Gw = \frac{1}{[1 + (\alpha s)^\eta]^m} \quad (3.3)$$

La ecuación 3.4 se obtiene al igualar la ecuación 3.2 con la ecuación 3.3 de la siguiente manera:

$$\frac{Gw - Gw_r}{Gw_s - Gw_r} = \frac{1}{[1 + (\alpha s)^\eta]^m}$$

obtiene la ecuación 3.4:

$$Gw = Gw_r + \frac{(Gw_s - Gw_r)}{[1 + (\alpha s)^\eta]^m} \quad (3.4)$$

El parámetro " α " está relacionado con el valor de entrada de aire, por su parte, el parámetro " η " está relacionado con la distribución de tamaño de poro y es un índice de la pendiente de la curva característica (van Genuchten, 1980).

Por último, el parámetro " m " está relacionado con la simetría total de la curva característica.

Los parámetros de ajustes " m " y " n " se relacionan por medio de la siguiente expresión:

$$m = 1 - \frac{1}{\eta} \quad (3.5)$$

Las relaciones entre “m” y “η” simplifican el ajuste de la forma sigmoideal de la curva característica, optimizando el número de parámetros a cuatro: el grado de saturación en su estado saturado, el grado de saturación residual, α y η .

3.3.1.2.2 Curvas teóricas secundarias de secado y humedecimiento

Las curvas secundarias en esta tesis se calcularon con las ecuaciones 3.8 y 3.9 (Huang, 2007) las cuales se explican en el apartado de las curvas secundarias de Van Genuchten solo que se utilizaron en relación a grado de saturación (G_w). Las ecuaciones que se muestran adelante muestran superíndices con w y d los cuales se atribuyen a la trayectoria de humedecimiento (wetting) y secado (drying) respectivamente, así como los subíndices que se indican como s y r se refieren a saturado y residual respectivamente.

La curva primaria de humedecimiento G_w^w (S,2), también pasa a través de los puntos de inversión en (G_{w_1}, S_1) y (G_{w_s}, S_s) . Sustituyendo (G_{w_1}, S_1) y (G_{w_s}, S_s) en los campos de la ecuación (3.5).

$$\frac{G_{w_1} - G_{w_r}^w(2)}{G_{w_s}^w(2) - G_{w_r}^w(2)} = (1 + |\alpha^w S_1| \eta^w)^{-m^w} \quad (3.6)$$

$$\frac{G_{w_s} - G_{w_r}^w(2)}{G_{w_s}^w(2) - G_{w_r}^w(2)} = (1 + |\alpha^w S_s| \eta^w)^{-m^w} \quad (3.7)$$

Resolviendo $G_{w_s}^w(2)$ y $G_{w_r}^w(1)$ utilizando las ecuaciones (3.7) y (3.5) con α^w y η^w puede describir G_w^w (S,2).

De la igualación de la ecuación (3.7) y (3.8) nos queda que:

$$Gw_r^w = \frac{Gw_1(1+|\alpha^w s_s|\eta^w)^{-m^w} - Gw_s(1+|\alpha^w s_1|\eta^w)^{-m^w}}{(1+|\alpha^w s_s|\eta^w)^{-m^w} - (1+|\alpha^w s_1|\eta^w)^{-m^w}} \quad (3.8)$$

y

$$Gw_s^w = \frac{Gw_s(1+|\alpha^w s_s|\eta^w)^{-m^w} + Gw_1(1+|\alpha^w s_1|\eta^w)^{-m^w} - 2Gw_s(1+|\alpha^w s_1|\eta^w)^{-m^w}}{(1+|\alpha^w s_s|\eta^w)^{-m^w} - (1+|\alpha^w s_1|\eta^w)^{-m^w}} \quad (3.9)$$

En donde:

Gw_r^w = Grado de saturación residual en la curva de humedecimiento.

Gw_s^w = Grado de saturación en el estado saturado en la curva de humedecimiento.

Gw_1 = Grado de saturación obtenido con la ecuación (3.5)

α^w y η^w = Parámetros de la forma sigmoideal de la curva de humedecimiento.

s_s = Succión en estado Saturado.

s_1 = Succión dada dentro de los rangos experimentales para obtener Gw_1 en toda su trayectoria, ya sea en humedecimiento o secado.

Gw^d (s,3) puede obtenerse de manera similar, únicamente será para valores dentro de la curva de secado. Así, la relación de Gw-s de la curva de análisis i-ésimo orden, sin efecto de bombeo se puede obtener utilizando $Gw_s^w(i)$ y $Gw_r^w(i)$ o $Gw_s^d(i)$ y $Gw_r^d(i)$.

3.4 Pruebas odométrica del suelo estudiado.

3.4.1 Remoldeo de pastilla con grado de saturación dado para labrado en anillo

Se remoldearon diferentes muestras a diferentes grados de saturación, cabe mencionar que se utilizaron muestras remodeladas por su contenido de humedad y su peso específico bajo. La muestra inalterada no se pudo labrar ya que al hacerlo los

huecos dentro del anillo de labrado eran muy significativos, así que se optó por reproducirlo a su humedad natural y su peso específico original lográndose una muestra uniforme dentro del anillo odométrico.

Se remoldeó una pastilla con dimensiones de 10cm de diámetro y 5 cm de altura con el peso específico de muestra (γ_m) del suelo en su estado natural o inalterado (Figura 3.2), esto con el fin de obtener el cambio de volumen antes del labrado final en el anillo del consolidómetro, esta reproducción de muestra se hizo en el molde proctor de las dimensiones ya antes mencionadas y se remoldeó con la altura deseada según los cálculos obtenidos, a una compresión estática para no alterar el reacomodo de las partículas.

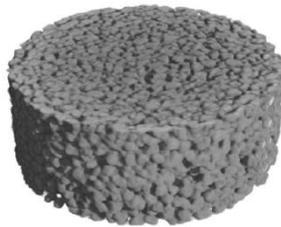


Figura 3.2 Pastilla con propiedades de muestra inalterada con su respectivo peso volumétrico de muestra γ_m .

Ya labrada la pastilla con un $\gamma_m=1.395 \text{ kg/cm}^2$, se procede a agregarle el agua que corresponde para obtener el grado de saturación (Gw) deseado, se saturó el material introduciendo agua en la base de la muestra para propiciar la saturación por capilaridad para el caso del tramo de secado-humedecimiento. En el caso de humedecimiento- secado, se secó con una franela a temperatura ambiente hasta obtener el grado de saturación deseado.

El fin de remoldear las muestras es que su variación volumétrica la realice en la pastilla y no ya dentro del consolidómetro, ya que deseamos observar su comportamiento partiendo de un grado de saturación dado y un volumen conocido inicial.

Ya que se tiene el Gw deseado se saca la pastilla del molde y se toman sus medidas, y se procede a labrar en el anillo respectivo para su colocación en la prueba odométrica, la cual explica su procedimiento en el siguiente subtema.

3.4.2 Prueba Odométrica

Se realizaron una serie de ensayos en el odómetro sobre suelos no saturados sujetos a diversas cargas y diversas succiones en trayectoria de secado y humedecimiento. Ésto con el objetivo de determinar la influencia que tiene la succión en el fenómeno de colapso y cambio volumétrico de los suelos. Se tomó en cuenta la curva de compresibilidad relativa a la humedad natural del suelo, ya que ésta es la que arroja los valores reales del comportamiento del suelo. Todas estas pruebas se llevaron a cabo en la cámara de temperatura constante ya que se requiere que la humedad deseada no se altere por factores ambientales externos.

Primero se compactaron una serie de pastillas, con el mismo peso volumétrico y humedad del suelo en estado natural. Posteriormente se humedecieron o secaron completamente para obtener su comportamiento tanto en trayectoria de humedecimiento como en secado. De ese estado se llevó al grado de saturación (Gw) deseado mediante secado o humedecimiento y después se labró la muestra dentro del anillo odométrico. Se explica con más claridad en el subtema anterior.

Una vez colocada la muestra en el anillo del consolidómetro se tomó el peso y la altura inicial de la muestra, se fijó el conjunto anillo-muestra en el consolidómetro, cubriendo totalmente la muestra y el anillo con una hoja de plástico de poca porosidad para que no sufriera ningún cambio de humedad. Este arreglo se muestra en la Figura 3.3.

Se aplicaron diversas cargas como fueron carga de sitio respectiva, 1, 2, 4 y 8 ton/m² a cada una de las muestras con diferentes grados de saturación por consecuente diferentes succiones. Se saturó al final de la aplicación de las cargas, de tal manera que la descarga se realiza en condiciones de saturación.

Se registraron las deformaciones hasta que las lecturas repitieran en un lapso de indeterminado ya que estas varían en tiempo dependiendo de su grado de saturación, después de que ya no existió ninguna deformación se aplicó el siguiente incremento de carga.

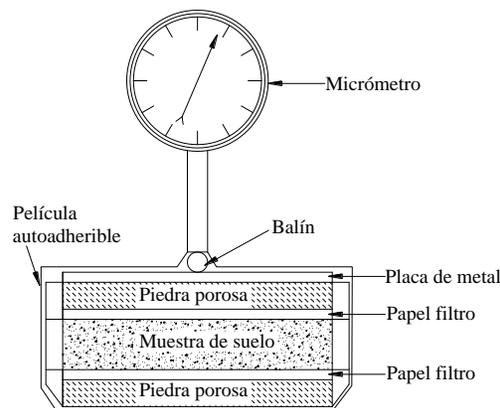


Figura 3.3 Esquema de la muestra colocada en un consolidómetro.

Después de aplicar las cargas verticales durante el tiempo requerido para el equilibrio, se saturó la muestra con agua desairada y destilada, se registraron las deformaciones de la muestra en intervalos de 0.1, 0.25, 0.50, 1, 2, 4, 8, 15 y 30 min, 1, 2, 4, 8, 24, etc. hasta que la muestra dejó de deformarse. Después de saturada la muestra se procedió a descargarla tomando lecturas de igual manera en tiempos que la carga. La prueba se dió por terminada cuando ya no existía deformación por las descargas realizadas.

4. ECUACIÓN PROPUESTA Y MARCO ELASTOPLÁSTICO

4.1 Introducción

Para la ecuación realizada en esta tesis se tomó en cuenta el modelo de proporcionalidad natural propuesta por Juárez Badillo en 1965, pero con ciertas variaciones aplicadas para el comportamiento de un suelo no saturado, así como términos y variables diferentes.

La presión ejercida " σ " puede variar de cero a infinito. Por su parte, el volumen de la masa del gas varía de tal manera que a cada presión le corresponde un cierto volumen (Juárez-Badillo, 1999).

A continuación se muestran 2 diferentes fenómenos aplicando este modelo de proporcionalidad natural, así como la aplicación de este para la ecuación utilizada en la predicción de la deformación volumétrica para suelos no saturados deducida en esta tesis.

4.1.1 **Modelo de proporcionalidad natural**

4.1.1.1 Predicción de la compresibilidad de una arcilla por medio del modelo de proporcionalidad natural.

Juárez-Badillo (1965) aplicó esta analogía al fenómeno de compresibilidad en las arcillas, aunque sustenta que en el universo no existe ningún punto donde la presión sea igual a cero, podrá existir un punto donde el calor de la presión sea muy pequeña. Por tanto, no podemos aplicar presiones infinitas, debido a que no podemos llegar a un volumen cero.

Para analizar el comportamiento del cambio de volumen en la investigación realizada por Juárez Badillo en la arcilla se realizaron pruebas triaxiales drenadas bajo

esfuerzos isotrópicos (de igual magnitud en las 3 direcciones) o pruebas de compresión unidimensional por medio de consolidómetros.

Sea el diferencial de volumen entre volumen igual al coeficiente de proporcionalidad por el diferencial de presión sobre presión:

$$\frac{dV}{V} = -\gamma \frac{d\sigma}{\sigma} \quad (4.1)$$

Integrando la ecuación (

$$\frac{dV}{V} = -\gamma \frac{d\sigma}{\sigma} \quad (4.1) \text{ entre un punto}$$

conocido (V_0, σ_0) y otro desconocido (V, σ) se obtiene:

$$\int_{v_0}^v \frac{dv}{v} = -\gamma \int_{\sigma_0}^{\sigma} \frac{d\sigma}{\sigma}$$

Evaluando la integral resulta:

$$\ln V - \ln V_0 = -\gamma (\ln \sigma - \ln \sigma_0)$$

Simplificando la integral por medio de la propiedad de los logaritmos naturales

$\ln u - \ln v = \ln \frac{u}{v}$ se consigue que:

$$\ln \frac{V}{V_0} = -\gamma \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)$$

Y posteriormente aplicando la propiedad $n \ln x = \ln x^n$ al miembro derecho de la ecuación resulta:

$$\ln \frac{v}{v_0} = \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-\gamma}$$

Empleando el concepto de base neperiana en ambos miembros de la ecuación, queda:

$$e^{\ln \frac{v}{v_0}} = e^{\ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-\gamma}}$$

Simplificando términos se logra que:

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-\gamma}$$

Despejando a “V” se obtiene:

$$V = V_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-\gamma} \tag{4.2}$$

Donde: σ_0 , V_0 es un estado conocido de la arcilla que nos ayuda a conocer el nuevo volumen “V ” a partir de la aplicación de un nuevo valor de la presión “ σ ”.

4.2 Ecuación Propuesta

Ecuación utilizada para la predicción de la compresibilidad de un suelo no saturado por medio del modelo de proporcionalidad natural (Juárez Badillo,1965).

Para analizar el comportamiento del suelo no saturado en esta tesis se tomaron diferentes consideraciones:

1. El modelo de proporcionalidad natural se utilizara no en términos de volumen específico si no en términos de la relación de vacíos $e = \frac{V_v}{V_s}$, ya que la relación de vacios está en función del volumen de vacíos y el volumen de sólidos no cambiara ya que ese espacio no puede desaparecer o variar, ya que siempre será el mismo.
2. Para tomar en cuenta el comportamiento elástico y plástico del material no saturado, se tomaran en cuenta los factores κ y λ los cuales serán tomados de la curva de compresibilidad del material saturado en su tramo virgen y de descarga respectivamente. El método para obtenerlas es gráfico, ya que mas adelante se especifica en que tramo de su curva de compresibilidad se toma como elástico o plástico, ya que cuando el material se somete a una fuerza de tensión uniaxial, se produce una deformación de este. Si el material vuelve a sus dimensiones originales cuando la fuerza cesa se dice que el material ha sufrido una deformación elástica. El número de deformaciones elásticas en un material es limitado ya que aquí los átomos del material son desplazados de su posición original, pero no hasta el extremo de que tomen nuevas posiciones fijas. Así cuando la fuerza cesa, los átomos vuelven a sus posiciones originales y el material adquiere su forma original.

Si el material es deformado hasta el punto que los átomos no pueden recuperar sus posiciones originales, se dice que ha experimentado una deformación plástica.

Para obtener los valores de κ y λ respectivamente de cada tramo correspondiente a su comportamiento elástico y plástico se utiliza la curva saturada Figura 4.1, así como también sobre la misma se utilizaron las ecuaciones de deformación volumétricas propuestas para simular la misma curva con sus respectivas propiedades, esto con las siguientes ecuaciones.

Para el cálculo del coeficiente κ y λ se utilizó la siguiente ecuación:

$$\kappa = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3}\right)} \quad (4.3)$$

$$\lambda = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3}\right)} \quad (4.4)$$

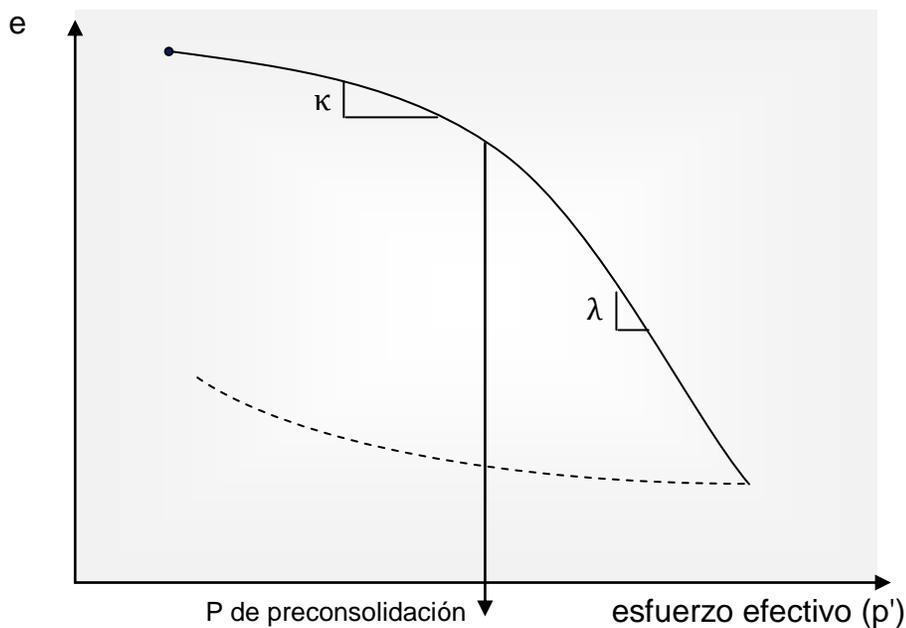


Figura 4.1 Curva de compresibilidad saturada, de donde se obtienen los coeficientes κ y λ aplicados en la ecuación de deformación.

3. Se tomara en cuenta la relación de vacios inicial, así como sus respectivas cargas y nuevas relaciones de vacios generadas por incrementos de esfuerzo.
4. Como la muestra fue compactada se tomará un esfuerzo de prefabricación p_{fab} el cual se añadirá para calcular los esfuerzos efectivos. Este esfuerzo de prefabricación se obtiene de la curva de compresibilidad saturada trazando dos líneas rectas en los cambios de pendiente en la zona virgen Figura 4.2.

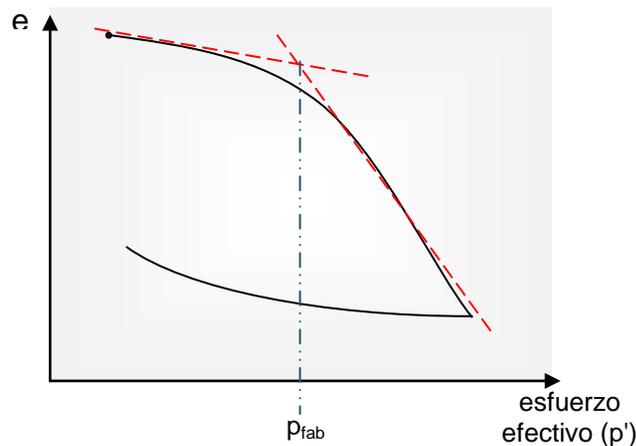


Figura 4.2 Curva de compresibilidad saturada, de donde se obtienen los coeficientes es esfuerzo de prefabricación.

El esfuerzo de prefabricación es aquel esfuerzo que se genera a la hora de remoldear o prefabricar una muestra tratando de simular sus propiedades naturales por medio de compresión o de aplicación de energías dinámicas o estáticas, en donde el momento de comprimir el suelo su parte solida sufre un reacomodo entre sus sólidos y llega un momento en que puede ser que sus partículas solidas se incrusten unas dentro de otras si son partículas semi-blandas o que puedan romper su estructura superficialmente ocasionando un esfuerzo adicional entre ellas, así que se debe de tomar en cuenta este nuevo fenómeno a la hora de remoldear o reconstruir cualquier tipo de muestra, se trata en esta tesis de implementar el análisis de dicho fenómeno, ya que se comprobó que el esfuerzo entre sólidos si se incrementa un poco más que en un suelo en estado natural o labrado de una muestra inalterada.

En la Figura 4.3 se observan las partículas antes de aplicar un esfuerzo para remodelar la muestra alterada y la muestra después de someterlo a una compresión axial, en este podemos ver como las partículas se implantan entre ellas generando un pequeño esfuerzo llamado de prefabricación.

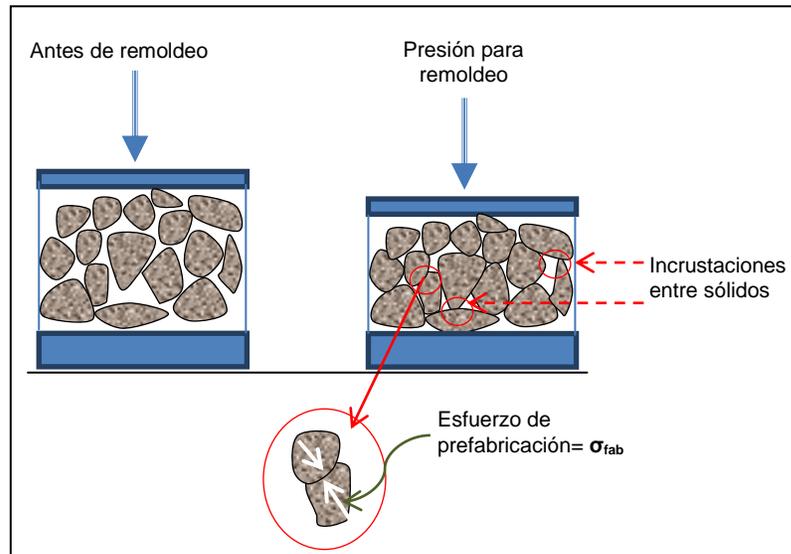


Figura 4.3 Esfuerzo de Prefabricación.

5. Los esfuerzos que se utilizarán en la ecuación serán esfuerzos efectivos los cuales se obtendrán por medio de la ecuación de Bishop 2.15, la cual se explico en el capítulo 2, y nos dice que $p' = \bar{p} + \chi s$.

El cambio de volumen en cualquier material no saturado se puede estudiar con pruebas triaxiales drenadas bajo esfuerzos isotrópicos (de igual magnitud en las 3 direcciones) o pruebas de compresión unidimensional por medio de consolidómetros.

En el caso de esta tesis se realizaron pruebas de compresión unidimensional por medio de consolidómetros, llamándola prueba odométrica por ser con una muestra no saturada y a diferentes grados de saturación.

De acuerdo a lo anterior la ecuación para el caso de descarga-recarga se escribe:

$$\frac{de}{e} = -\kappa \frac{dp}{p} \quad (4.5)$$

Integrando la ecuación 4.5 entre un punto conocido (e_0, P'_0) y otro desconocido (e, p') se obtiene:

$$\int_{e_0}^e \frac{de}{e} = -\kappa \int_{p'_0}^{p'} \frac{dp'}{p'}$$

Evaluando la integral resulta:

$$\ln e - \ln e_0 = -\kappa (\ln p' - \ln p'_0)$$

Simplificando la integral por medio de la propiedad de los logaritmos naturales $\ln u - \ln v = \ln \frac{u}{v}$ se consigue que:

$$\ln \frac{e}{e_0} = -\kappa \ln \left(\frac{p'}{p'_0} \right)$$

Y posteriormente aplicando la propiedad $n \ln x = \ln x^n$ al miembro derecho de la ecuación resulta:

$$\ln \frac{e}{e_0} = \ln \left(\frac{p'}{p'_0} \right)^{-\kappa}$$

Empleando el concepto de base neperiana en ambos miembros de la ecuación, queda:

$$e^{\ln \frac{e}{e_0}} = e^{\ln \left(\frac{p'}{p'_0} \right)^{-\kappa}}$$

Simplificando términos se logra que:

$$\frac{e}{e_0} = \left(\frac{p'}{p'_0}\right)^{-\kappa}$$

Despejando a “e” se obtiene:

$$e = e_0 \left(\frac{p'}{p'_0}\right)^{-\kappa} \quad (4.6)$$

Donde: p'_0 , e_0 es un estado conocido del material estudiado que nos ayuda a conocer la nueva relación de vacíos “e” a partir de la aplicación de un nuevo valor de la presión “ p'_0 ”.

Para obtener la ecuación de deformación unitaria en el suelo no saturado, en la etapa elastoplástica se utiliza el parámetro λ , y la ecuación para dicho comportamiento es con el mismo procedimiento para obtener la ecuación 4.6 solo que con el parámetro λ en lugar de κ ya que es dependiendo de la etapa de su comportamiento.

Entonces para la parte elastoplástica queda:

$$e = e_0 \left(\frac{p'}{p'_0}\right)^{-\lambda} \quad (4.7)$$

Después de obtener las ecuaciones para las deformaciones plásticas y elásticas, se calculan sus deformaciones utilizando y obteniend el esfuerzo medio utilizado para poder calcular el esfuerzo efectivo real aplicado a la muestra.

Así que podemos calcular el esfuerzo medio, utilizando esfuerzo vertical, el esfuerzo horizontal aplicado en la muestra y siguiendo la siguiente teoría, por medio de una prueba triaxial se obtuvo el ángulo de fricción del material en estudio el cual es de 30°.

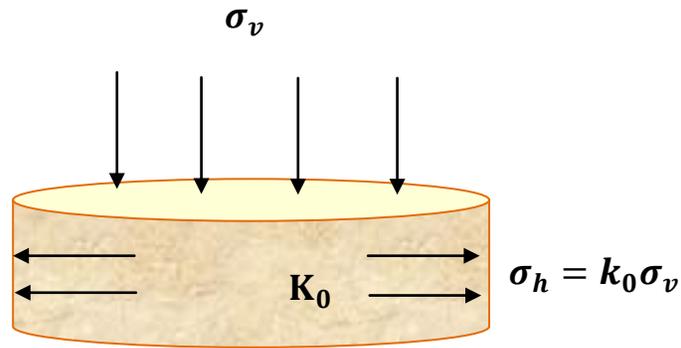


Figura 4.4 Esfuerzos que actúan sobre el suelo

Como observamos los esfuerzos que actúan sobre la muestra en la figura 4.3, podemos calcular nuestro K_0 de la siguiente manera:

$$K_0 = 1 - \text{sen } \phi \quad (4.8)$$

donde ϕ es el ángulo de fricción interna del material.

Después que obtenemos K_0 podemos calcular nuestro esfuerzo horizontal el cual se calcula con la siguiente ecuación, la cual nos dice:

$$\sigma_h = K_0 * \sigma_v \quad (4.9)$$

En donde σ_v es el esfuerzo vertical aplicado directamente, en la muestra directamente en el laboratorio.

Ya que obtenemos el σ_h y σ_v podemos calcular el esfuerzo medio neto con la ecuación 4.15 el cual convertiremos en efectivo con la ecuación de Bishop, tomando en cuenta el χ como el Gw tomado de la curva de retención obtenida para el tipo de material en estudio.

$$P = \frac{\sigma_v + 2\sigma_h}{3} \quad (4.10)$$

4.3 Marco elastoplástico

4.3.1 Planteamiento general del modelo elastoplástico.

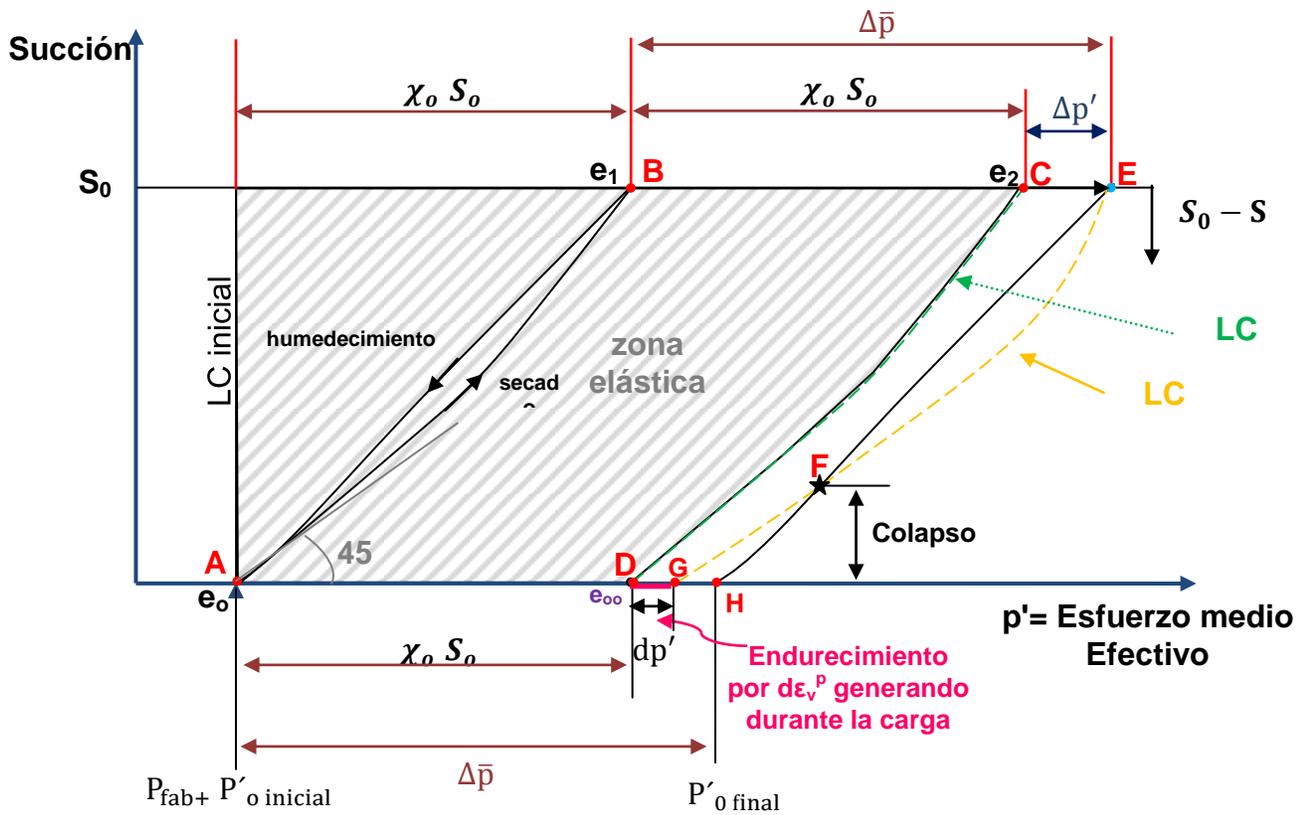


Figura 4.5 Modelo de comportamiento volumétrico bajo esfuerzos efectivos

Con el fin de elaborar y exponer el modelo elastoplástico propuesto en esta tesis se va a hacer uso en este apartado de los diferentes comportamientos y conclusiones que sobre suelos no saturados han sido descritos en capítulos anteriores.

El planteamiento a realizar, se expresara de acuerdo con el comportamiento que deben de tener los obtenidos, en términos de (p' - s.) .

El esfuerzo efectivo en este modelo será con la ecuación de Bishop la cual se indico en el capítulo 2 como ecuación 2.15, esta nos indica que:

$$p' = \sigma_n + \chi s$$

donde :

p' = esfuerzo efectivo

σ_n =esfuerzo neto

χ = parámetro que se toma igual al grado de saturación (ecuación de Bishop)

s = succión

El modelo que se explica a continuación es para determinar el comportamiento volumétrico de los suelos no saturados bajo principios de esfuerzos efectivos, tomando la ecuación de Bishop para calcularlos, utilizando diferentes situaciones sea de humedecimiento o secado para observar el comportamiento del suelo, Figura 4.5.

Este modelo considera que el suelo sujeto a cierta succión y cargado por incremento de esfuerzo efectivo o medio neto muestra un comportamiento volumétrico como se muestra en la Figura 4.6 y genera la zona elástica que se muestra en la Figura 4.5. En la Figura 4.6 λ representa la pendiente de la carga virgen del suelo saturado y κ es la pendiente de carga descarga como tanto para el suelo saturado como para él no saturado, esto en los ejes de logaritmo de esfuerzo efectivo contra la relación de vacíos.

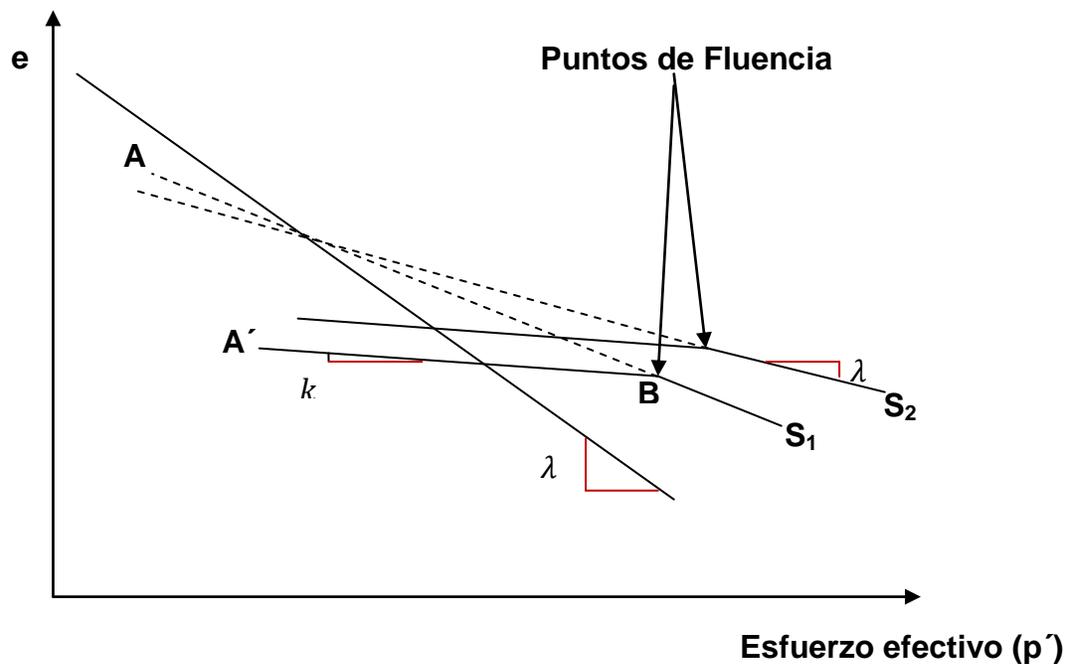


Figura 4.6 Esfuerzo efectivo contra relación de vacíos.

En este modelo llamaremos LC a la superficie de fluencia (loading-collapse), de carga y colapso, con la cual seguiremos la continuidad del comportamiento bajo carga, en humedecimiento y secado.

Observamos que la superficie de fluencia del tramo AB Figura 4.5 tiende en su comienzo a 45° , esto se debe a que suponemos en esta que χ es igual al grado de saturación (Figura 4.7), por lo tanto al tomar el valor de G_w lo hacemos de la curva característica del suelo la cual posee un valor de entrada de aire de ahí es el pequeño tramo recto de la curva AB de la Figura 4.5. Si observamos después va adquiriendo una curvatura esta es por el tramo en que se encuentre la superficie ya sea en secado o humedecimiento.

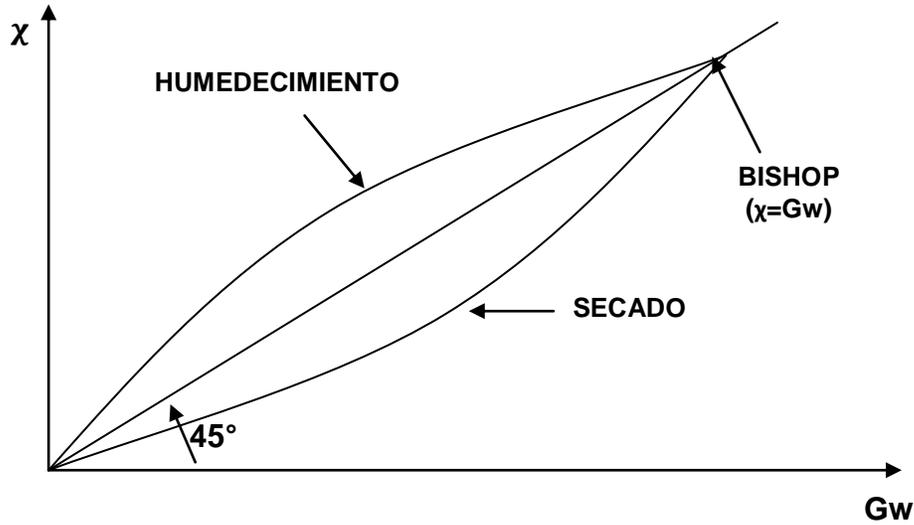


Figura 4.7. Pendiente de la superficie de fluencia cuando tiende a 45°.

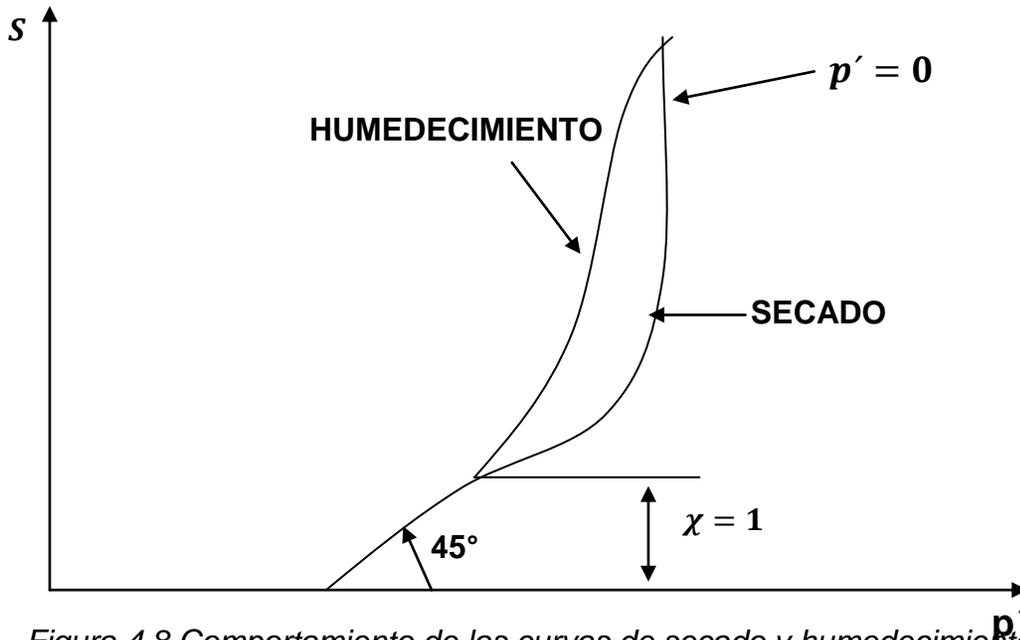


Figura 4.8 Comportamiento de las curvas de secado y humedecimiento en un plano de succión contra esfuerzo efectivo.

Observamos una LC inicial la cual comienza en el $p_{\text{fabricación}} + p'_o$ observaremos su comportamiento en la Figura 4.5 se muestra el tramo en secado la cual se presenta de A hasta B el suelo sujeto a una cierta succión inicial y cargado por incremento de esfuerzo efectivo a una succión inicial S_o por lo tanto teniendo una

relación de vacíos e_0 en el punto A la cual comienza agregando al esfuerzo efectivo inicial un esfuerzo adicional por fabricación y hasta B el cual tiene un nueva relación de vacíos e_1 .

En la superficie de fluencia BC del suelo después de secado se le agrega una carga mecánica. Esta ocasiona un desfase en la superficie de fluencia la cual continua teniendo el mismo comportamiento ya que no cambia su succión aun, así generando desde la superficie LC inicial hasta la superficie EH, pero antes de esto nosotros tenemos una zona elástica para el material la cual llega hasta la superficie CD, nosotros la conocemos ya que sabemos hasta cuándo estará en su zona elástica, por lo tanto sabemos que al pasar de esta superficie se generara un endurecimiento.

Cabe mencionar que el esfuerzo de pre consolidación es mayor en el tramo de secado que en saturado, así que la muestra o el suelo se rigidiza mas, al cargarlo, así que con esto observamos que el suelo se vuelve a secar después del tramo DC y al cargarlo se observa el comportamiento EG el cual cambia de comportamiento ya que en este punto el suelo sufre un endurecimiento por la carga aplicada esto ocasiona una deformación volumétrica plástica $d\varepsilon_v^p$ la cual nos indica una deformación no recuperable.

Podemos identificar el colapso en la intersección de las superficies de fluencia EG y GH, generando el punto F el cual nos indica el colapso del suelo por carga después de humedecido el suelo.

Sin dejar de lado que sabemos que en cada punto del trayecto se tendrán diferentes relaciones de vacíos para cada incremento de carga o tramo de secado o humedecimiento, vemos que para el punto A existe una relación de vacíos e_0 , para el punto B una relación de vacíos e_1 , para el punto C una relación de vacíos e_2 y para D una relación de vacíos e_{00} .

Para obtener el endurecimiento será en función de los esfuerzos efectivos y sus respectivas relaciones de vacíos como se muestra a continuación.

Sabemos que la deformación volumétrica plástica es:

$$d\varepsilon_v^p = \frac{de^p}{1+e_1}$$

despejando obtenemos:

$$de^p = (\lambda - \kappa) * e_2 * \frac{dp'}{p'} = (\lambda - \kappa) * e_2 * \frac{(\Delta\bar{p} - \chi_0 S_0)}{p_{fab} + 2\chi_0 S_0} \quad (4.11)$$

$$de^p = (\lambda - \kappa) * e_{00} * \frac{dp'}{p_{fab}} \quad (4.12)$$

igualando (1) y (2):

$$(\lambda - \kappa) * e_2 * \frac{(\Delta\bar{p} - \chi_0 S_0)}{p_{fab} + 2\chi_0 S_0} = (\lambda - \kappa) * e_{00} * \frac{dp'}{p_{fab}}$$

despejando nuestra dp' deformación efectiva la cual es igual a :

$$dp' = \left[\frac{(\lambda - \kappa) * e_2 * \frac{(\Delta\bar{p} - \chi_0 S_0)}{p_{fab} + 2\chi_0 S_0}}{(\lambda - \kappa) * e_{00}} \right] * p_{fab}$$

$$dp' = \left[\frac{e_2 * (\Delta\bar{p} - \chi_0 S_0)}{e_{00} * (p_{fab} + 2\chi_0 S_0)} \right] * p_{fab} \quad (4.13)$$

Obteniendo con la ecuación 4.13 el endurecimiento del punto DG en la Figura 4.5.

5. RESULTADOS Y DISCUSION

Este capítulo contiene los resultados experimentales de las diversas técnicas empleadas. La primera parte corresponde a la caracterización del suelo, objeto de este estudio, desde el punto de vista de la geotecnia, después se muestran las curvas características obtenidas y se indica la utilizada para obtener los valores de χ , así como también las curvas de compresibilidad seleccionadas con diferentes grados de saturación y una breve explicación de los valores obtenidos de los parámetros λ y κ .

5.1 Caracterización y clasificación del suelo utilizado

La caracterización del suelo de Querétaro, se inició con el muestreo in situ.

La profundidad de muestreo, en un estudio geotécnico convencional se elige de acuerdo al material requerido. En este caso fue a una profundidad entre 1.3 a 3 m dependiendo de la muestra ya que se obtuvieron varias. Para este trabajo se tomaron 3 muestras de suelo inalterado en el fraccionamiento Belén, en Querétaro, aproximadamente a 1.35 m de profundidad.

Las muestras obtenidas fueron tratadas con una cubierta de manta de cielo y recubiertas con una mezcla de brea y parafina en proporción 1:3 y se almacenaron en un cuarto con humedad controlada para su preservación, según lo recomienda la norma ASTM-D4220-95 "Standard practices for preserving and transporting soil samples", inciso 6.1.1, debidamente etiquetadas para su posterior identificación, según el inciso 8 de la misma norma.

Con estas muestras se realizaron pruebas de laboratorio para determinar sus propiedades geotécnicas e índice, las cuales son reportadas en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Propiedades geotécnicas del suelo de Fraccionamiento Belén.

| Propiedad | Magnitud |
|--|--------------------------|
| Límite líquido (LL) | 68.80% |
| Límite plástico (LP) | 47.60% |
| Índice plástico (IP) | 21.20% |
| Límite de contracción (LC) | 12.70% |
| Peso volumétrico húmedo (γ_m) | 1.395 gr/cm ³ |
| Densidad de sólidos (Ss) | 2.652 |
| Humedad in situ (%) | 28.89% |
| Arenas | 22.10% |
| Finos | 77.90% |
| Gravas | 0.00% |
| Grado de saturación (Gw) | 42.30% |
| Angulo de fricción interna | 30° |

Las propiedades índice (LL, LP, IP, LC y humedad in situ) reportadas en la Tabla 5.1 permiten a los ingenieros darse una idea muy buena del tipo de suelo con el que se trabaja.

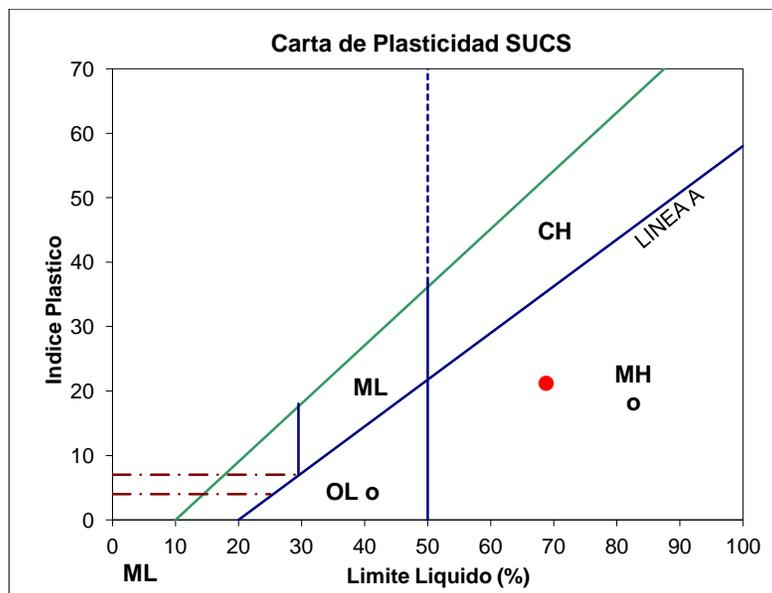


Figura 5.1 Carta de Plasticidad SUCS con la clasificación del suelo en estudio.

De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, el suelo estudiado se trata de un limo de alta compresibilidad (MH), debido a que su LL es mayor que 50%, esto significa que en condiciones extremas de humedad, puede retener enormes cantidades de agua por lo que se deduce que es un suelo que puede llegar a tener una gran porosidad. Este suelo se encuentra en estado parcialmente saturado y su grado de saturación es medio (42.3%).

5.2 Succión

5.2.1 Curva característica del suelo en estudio y su simulación.

La curva característica obtenida por medio de la prueba de papel filtro para medir la succión del suelo se realizó con el papel filtro Wathman No. 42 con el tamaño de 5.5 cm de diámetro indicado en la norma ASTM.

En este apartado se muestran las diferentes curvas de retención obtenidas para esta tesis, podemos observar a continuación en la Figura 5.2 la curva característica experimental obtenida en términos de succión contra grado de saturación en el suelo (Gw), y en esta misma se observa la curva simulada por las ecuaciones de Van Genuchten explicadas en el artículo de Huang et. al , 2005, en este caso la que se usara para tomar el parámetro χ será la de grado de saturación contra logaritmo de succión.

La figura 5.2 es la que se utilizara para el parámetro χ a la hora de calcular los esfuerzos efectivos con la ecuación de Bishop para complementar el comportamiento de la deformación volumétrica del suelo no saturado en estudio.

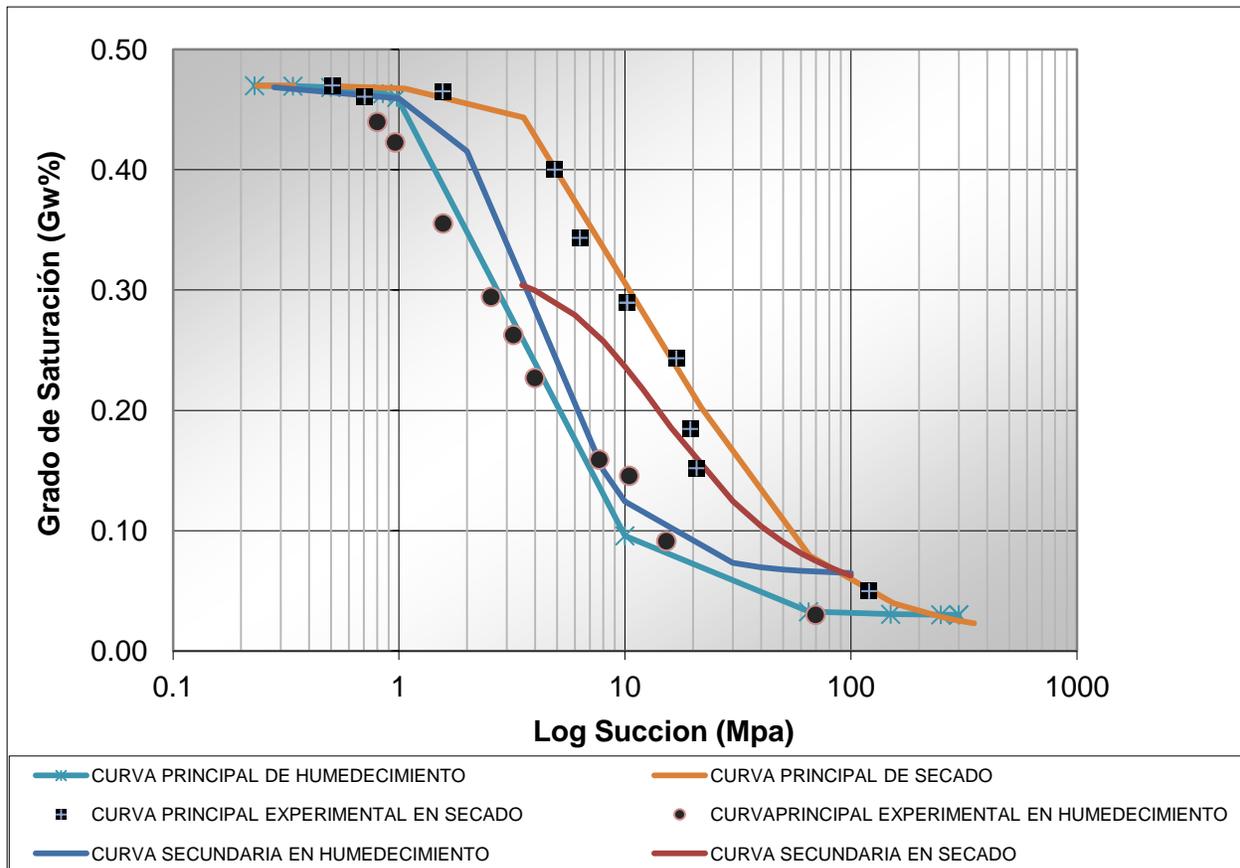


Figura 5.2 Segunda curva característica simulada con ecuación de Van Genuchten del suelos en estudio en términos del grado de saturación (Gw).

5.3 Pruebas odométrica del suelo estudiado y obtenidas de la bibliografía.

5.3.1 Curvas de compresibilidad del suelo en estudio.

En esta sección se muestran las curvas de compresibilidad obtenidas para el suelo clasificado como limo de alta compresibilidad, se realizaron 14 pruebas con el odómetro, de las cuales solo 6 fueron realizadas óptimamente, cabe mencionar que el motivo por el cual solo 6 fueron elegidas, es porque el equipo con el que se cuenta no es de succión controlada y la cámara de temperatura constante del lugar de prueba sufrió un averío y después las muestras que se colocaron secaron y variaron su

humedad, ya que no se mantenía dentro de un rango constante la temperatura, así que no se logró mantener el grado de saturación deseado.

Cabe mencionar que los parámetros λ y κ son constantes para todas las curvas ya que fueron tomadas para el mismo material en condición saturada como se explicara en el punto 5.3.1.1 mas adelante.

Para poder entender las tablas de solución se utilizo para obtener el esfuerzo medio neto las ecuaciones 4.13, 4.14 y 4.15.

A continuación en la Figura 5.3 se muestran las cinco curvas que se simularán con diferentes grados de saturación por medio de la ecuación para deformaciones volumétricas en suelos no saturado. De las seis que se mencionaban fue seleccionada 1 de ellas en estado saturado, así que sólo cinco fueron a diferentes grados de saturación.

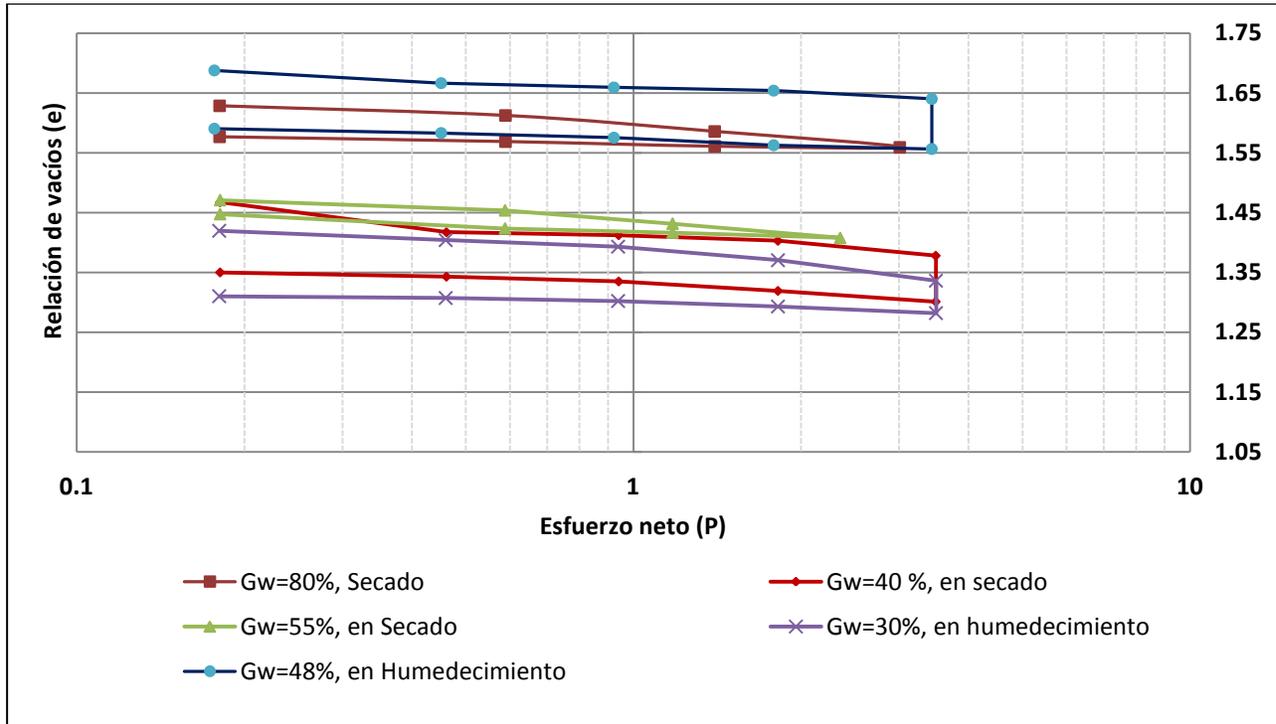


Figura 5.3 Curvas de consolidación para un Gw=80% y 55% carga-descarga, 48%,40% y 30% en carga-humedecimiento-descarga.

5.3.1.1 Curva del suelo saturado

Se realizó una prueba odométrica saturada para obtener los valores de κ y λ respectivamente de cada tramo correspondiente, así como también sobre la misma se utilizaron las ecuaciones de deformación volumétricas propuestas para simular la misma curva con sus respectivas propiedades, esto con las ecuaciones 4.6 y 4.7.

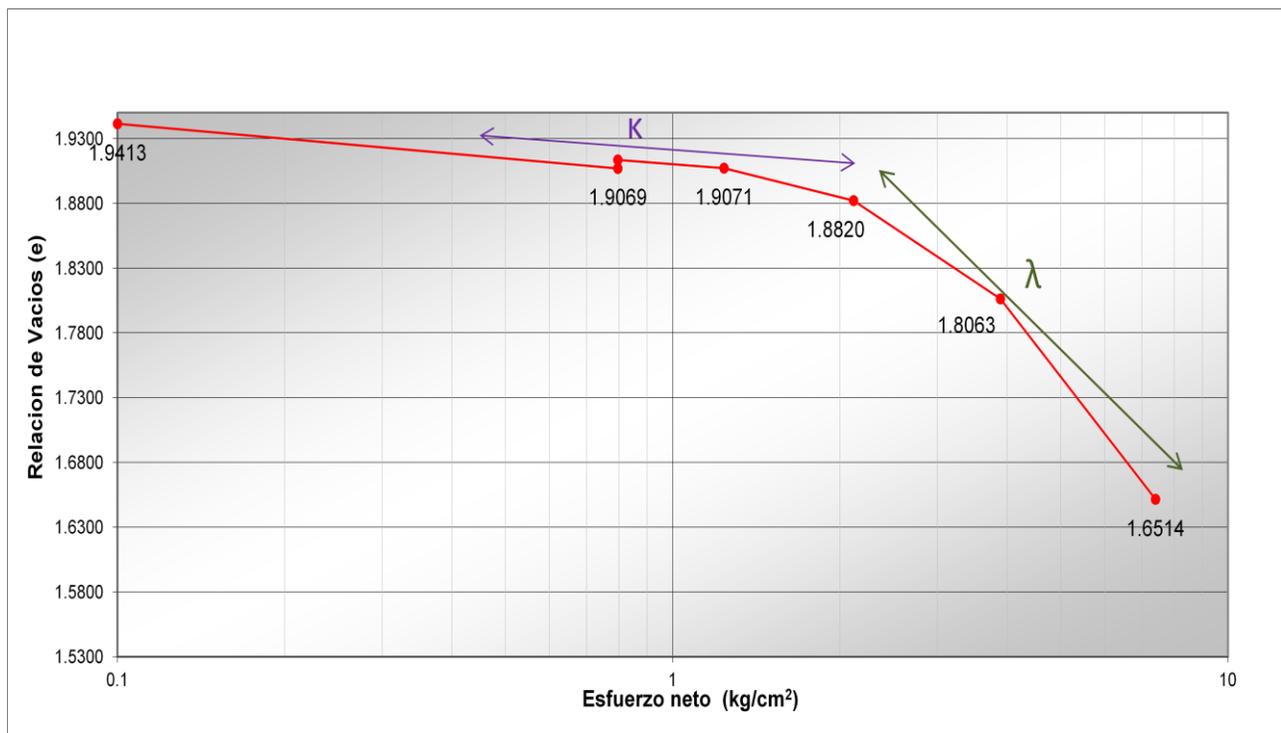


Figura 5.4 Gráfica donde se tomaron los valores para obtener κ y λ .

Para el cálculo del coeficiente κ y λ se utilizaron las ecuaciones 4.8 y 4.9.

Tabla 5.2 Cálculo de coeficientes para la ecuación de deformación volumétrica plástica y elástica.

| coeficiente | e_0 | e_1 | Δe | σ_1 | σ_2 | Valor del coeficiente |
|-------------|--------|-------|------------|------------|------------|-----------------------|
| κ | 1.9136 | 1.882 | 0.032 | 0.797 | 2.1178 | -0.0744 |
| λ | 1.882 | 1.651 | 0.231 | 2.118 | 7.4068 | -0.4431 |

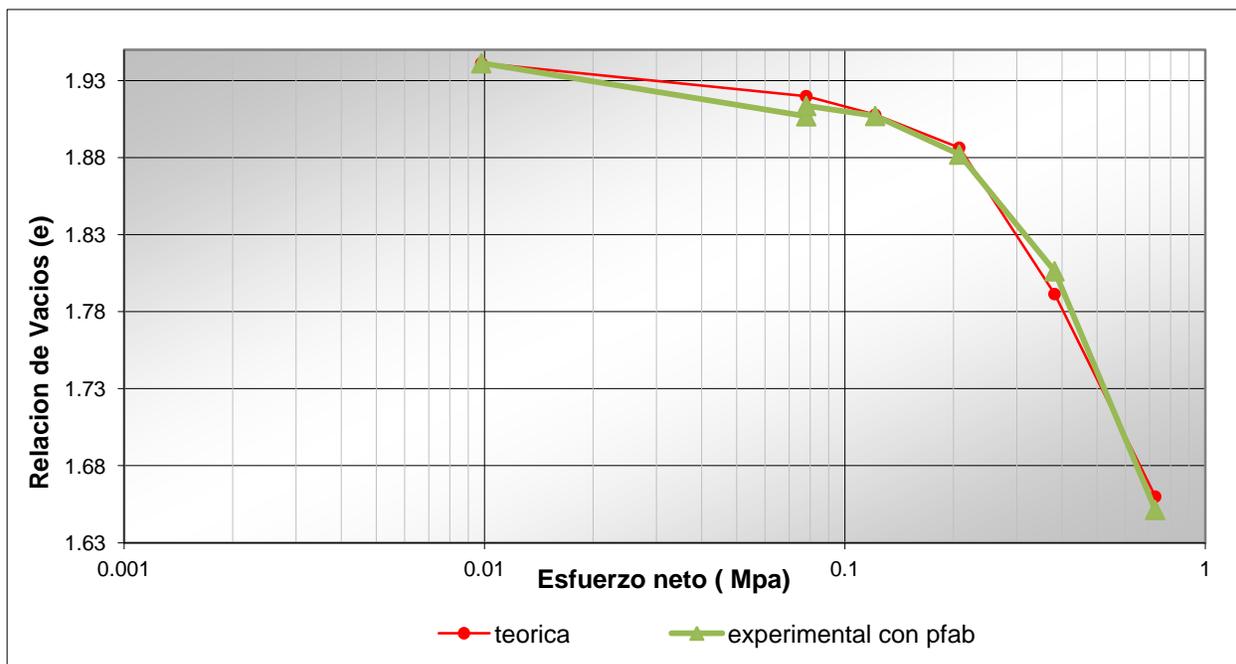


Figura 5.5 Curva de compresibilidad en estado saturado

En la tabla 5.2 se muestran los parámetros que fueron utilizados para simular o realizar la curva de compresibilidad teórica de este suelo mediante las ecuaciones propuestas en esta tesis para la deformación volumétrica, se supone un esfuerzo adicional de fabricación de 0.45, así que para las muestras a diferentes grados de saturación estará alrededor de este valor ± 0.01 .

Tabla 5.3 Parámetros utilizados para la simulación de la curva en estado saturado.

| Parámetros solo para la simulación del suelo saturado | | | |
|---|-----------|--------|-----|
| Zona elástica | κ | -0.08 | |
| Zona plástica | λ | -0.22 | |
| Aprox Gw | χ | 0.98 | |
| Succión | S | 0.0002 | Mpa |
| Rel.vac.inicial | e_o | 1.94 | |
| Vol. Esp. Inicial | V_o | 2.94 | |
| P adicional de fabricación | P_{fab} | 0.45 | Mpa |

$$e = e_o * \left(\frac{p'}{p'_o \text{ nueva}} \right)^\lambda \quad \text{zona plastica}$$

$$e = e_o * \left(\frac{p'}{p'_o \text{ nueva}} \right)^\kappa \quad \text{zona elastica}$$

5.3.2 Verificación de la ecuación propuesta con el suelo reportado en la bibliografía (Sheng et. al, 2007).

5.3.2.1 Descripción del material

El suelo utilizado en este estudio se llama Pearl arcilla y se le realizaron pruebas triaxiales.

En los resultados de una prueba de difracción de rayos X en el suelo, se puede observar que la arcilla es no expansiva, que contiene cuarzo, pirofilita y caolinita. Las partículas de suelo fueron secadas al aire y luego se mezclaron con la cantidad requerida de agua para alcanzar un grado de saturación específico. El suelo se envolvió luego en bolsas de polietileno y se almacenaron en una habitación con temperatura y humedad constantes varios días para que alcanzaran el equilibrio o homogenización.

Los especímenes para ensayos triaxiales, fueron de 35 mm de diámetro y 80 mm en altura, se prepararon mediante compactación en un molde en agua contenido de aproximadamente 26%.

Tabla 5.4 Propiedades del material pearl arcilla, (Sheng et al, 2007)

| Propiedad | Magnitud |
|--------------------------|-----------------|
| Límite líquido (LL) | 49.00% |
| Índice plástico (IP) | 22 |
| Densidad de sólidos (Ss) | 2.71 |
| Contenido de agua, w (%) | 26.00% |
| Material compactado | si |
| Succión | 90 a 600 Mpa |
| Relación de vacíos, e | 1.0-1.5 |
| Grado de saturación (Gw) | 40-65% |

5.3.2.2 Curvas de compresibilidad Sheng et. al , 2007.

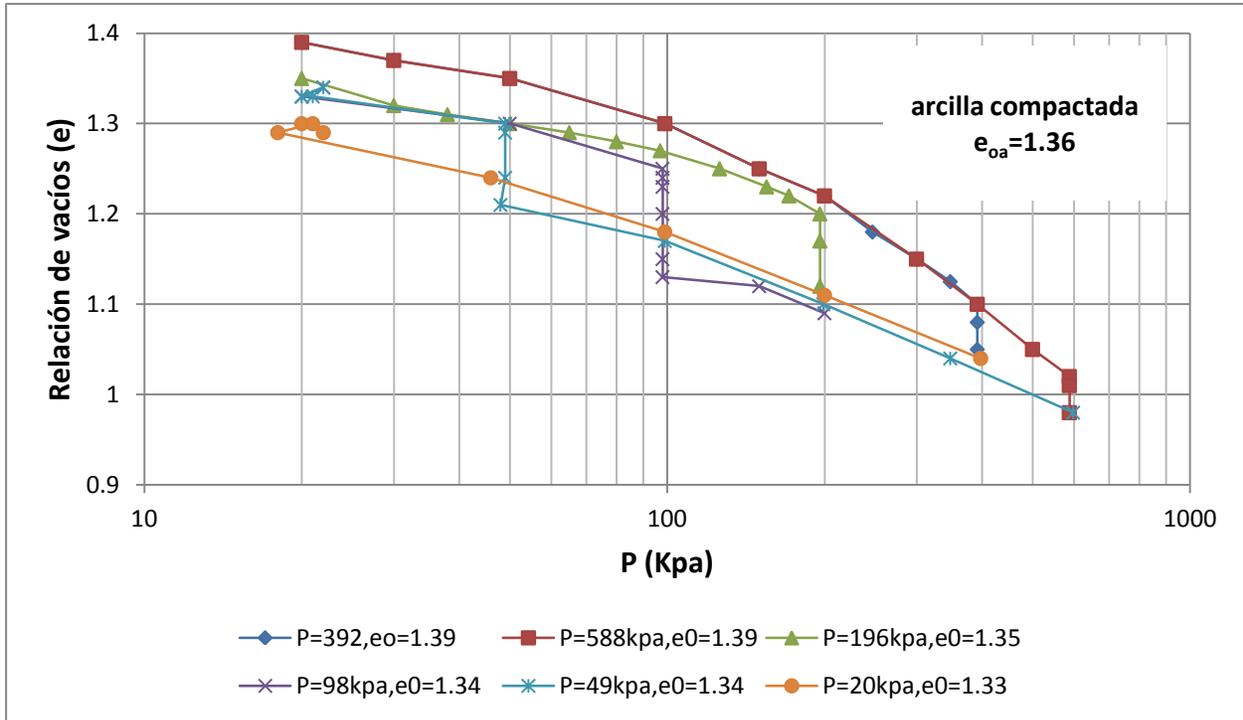
La curva de compresión para una suelo saturado y la curva correspondiente para el suelo no saturado convergen en un punto en el cual no hay colapso o la inflamación se presenta con cualquier aumento o disminución de la succión. Se puede ver que las curvas de compresión para suelos saturados (en donde la succión es igual a cero) ocasionan un colapso bajo carga.

Sin embargo, estas curvas son ligeramente diferentes con diferentes densidades iniciales, y la curva con una relación de vacíos inicial tiende a ser algo menor en el $e - \ln p$.

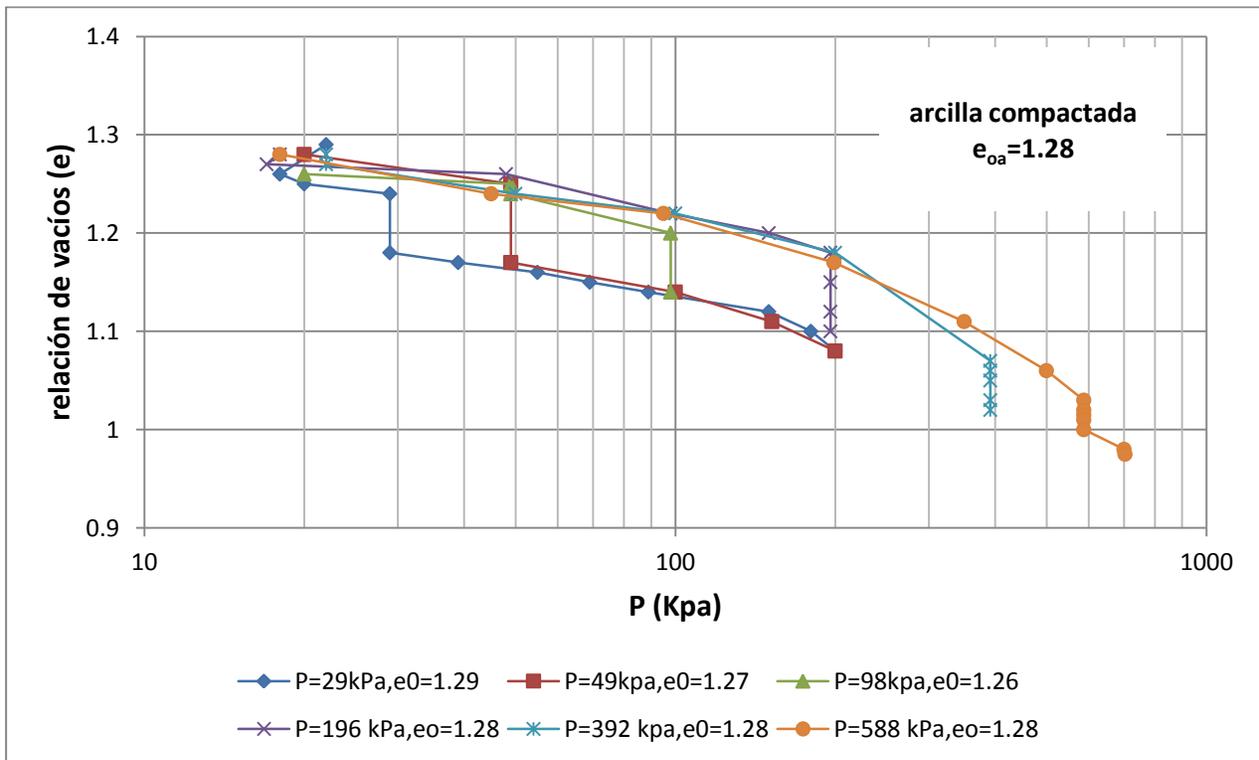
La Figura 5.7 muestra las tensiones de colapso en diferentes cargas isotrópicas o esfuerzos netos en el cual se redujo la succión de 147 kPa a 0 kPa. En esta Figura 5.7 se puede ver que unos resultados más grandes en densidad inicial corresponde a un colapso volumétrico menor.

De las Figura 5.6 y Figura 5.7, podemos ver que la magnitud del volumen de colapso es debido a una disminución en la succión la cual depende del esfuerzo medio neto y la relación de vacíos inicial ya que el colapso máximo para especímenes compactados se produce de forma idéntica por humedecimiento el cual tiene lugar a un esfuerzo neto medio cerca del esfuerzo de fluencia inicial. La tensión inicial para el suelo bajo succión de 147 kPa se puede deducir de la figura. 11 y es aproximadamente entre 100 y 200 kPa. El humedecer o saturar la muestra a una carga neta media mayor que la inicial, se producirá un colapso más pequeño.

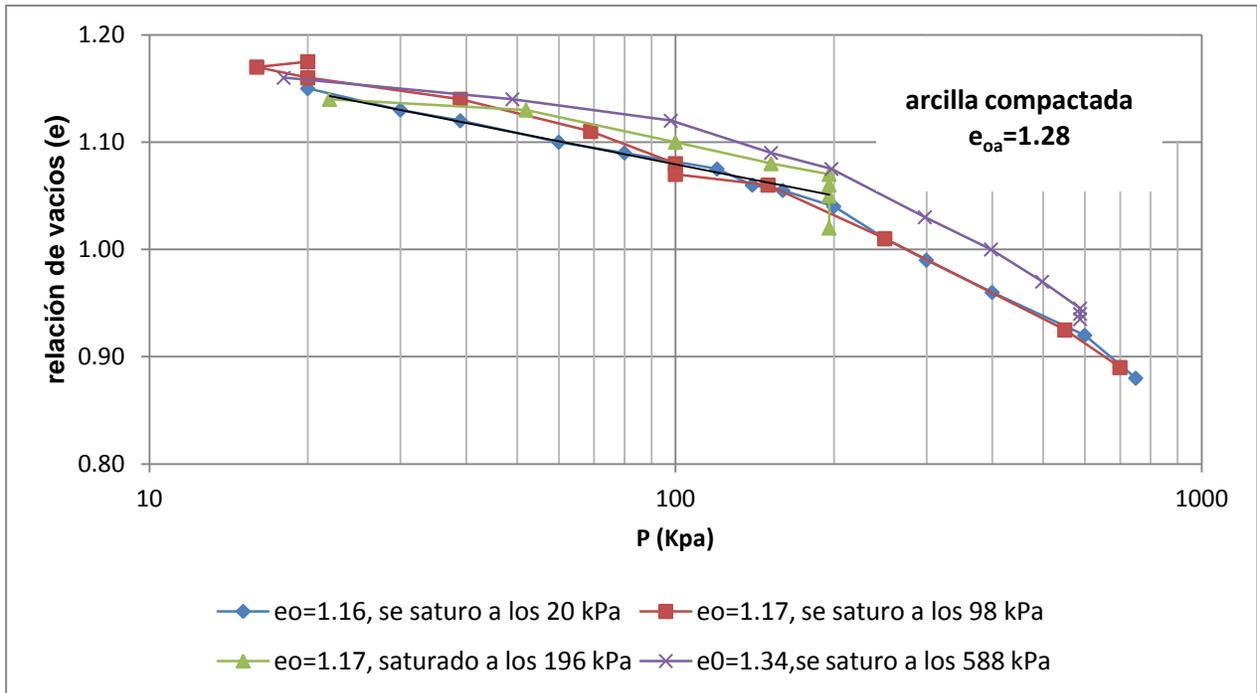
Este fenómeno puede explicarse por el hecho de que la estructura del suelo se comienza a degradar una vez que la tensión neta media es mayor que el inicial produciendo una diferencia de esfuerzos, llamada tensión . Una vez que la estructuración del suelo se lleva a cabo, la muestra se vuelve más densa, de ahí el colapso debido a la disminución de succión se vuelve más pequeño.



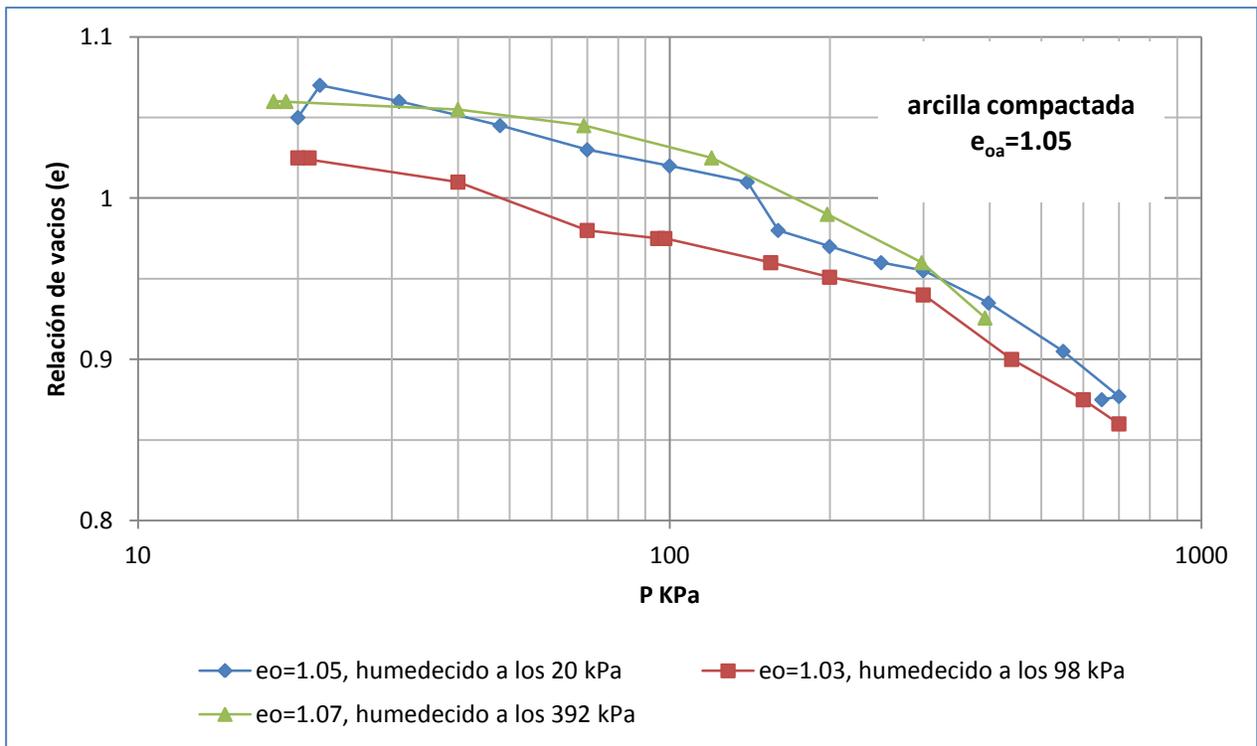
(a) arcilla con $e_0=1.36$



(b) arcilla con $e_0=1.28$



c) arcilla con $e_0=1.28$



d) arcilla con $e_0=1.05$

Figura 5.6 Curvas de compresibilidad, Sheng (2007).

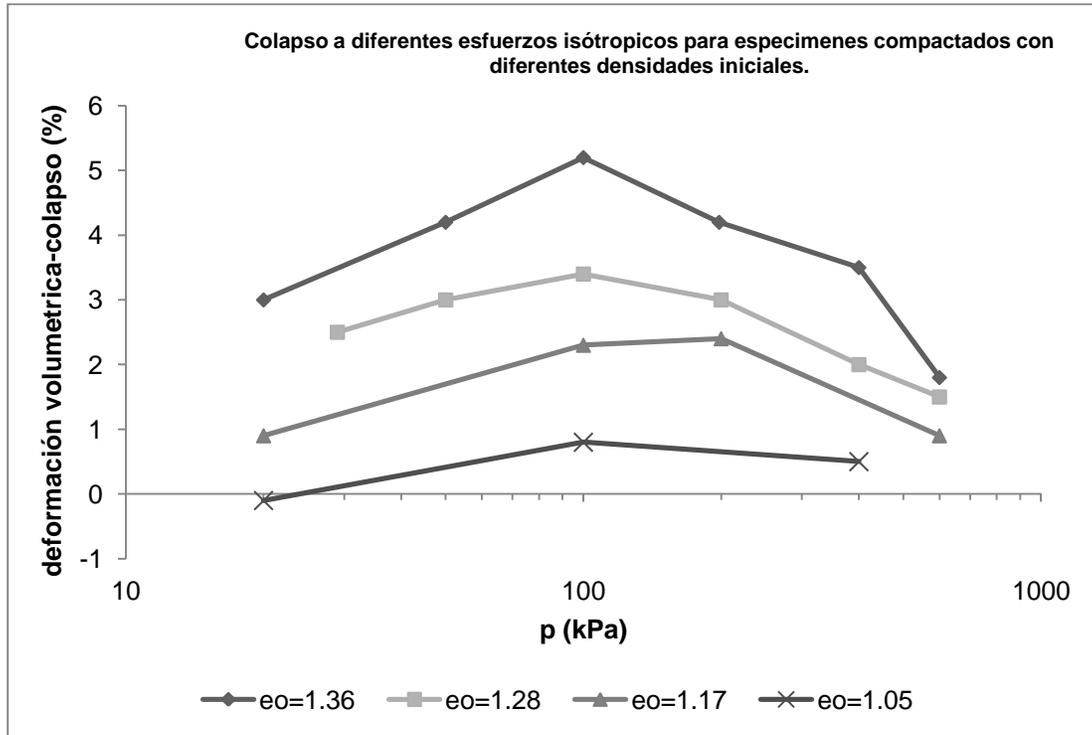


Figura 5.7 Colapso en diferentes cargas isotrópicas o esfuerzos netos

Tabla 5.5 Datos de deformación volumétrica colapso contra esfuerzo neto.

| $e_0 = 1.36$ | | $e_0 = 1.28$ | | $e_0 = 1.17$ | | $e_0 = 1.05$ | |
|---------------------------------------|---------|---------------------------------------|---------|---------------------------------------|---------|---------------------------------------|---------|
| Deformación Volumétrica - Colapso (%) | p (kPa) | Deformación Volumétrica - Colapso (%) | p (kPa) | Deformación Volumétrica - Colapso (%) | p (kPa) | Deformación Volumétrica - Colapso (%) | p (kPa) |
| 3 | 20 | 2.5 | 29 | 0.9 | 20 | -0.1 | 20 |
| 4.2 | 50 | 3 | 50 | 2.3 | 100 | 0.8 | 100 |
| 5.2 | 100 | 3.4 | 100 | 2.4 | 200 | 0.5 | 400 |
| 4.2 | 198 | 3 | 200 | 0.9 | 600 | | |
| 3.5 | 400 | 2 | 400 | | | | |
| 1.8 | 600 | 1.5 | 600 | | | | |

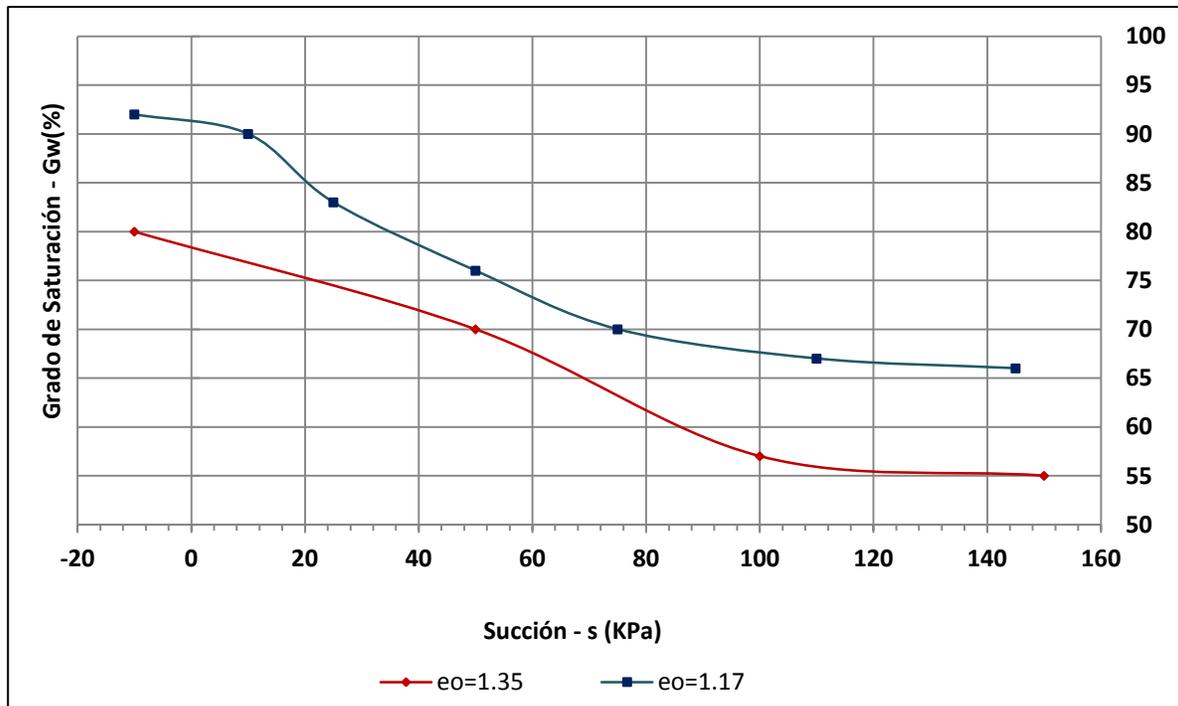


Figura 5.8 Curvas características del Suelo, Sheng (2007).

5.4 Comparaciones teórico-experimentales

En este capítulo se comparan algunos resultados experimentales obtenidos en esta tesis y otros procedentes de varias referencias con predicciones realizadas aplicando el modelo que se ha propuesto en el capítulo anterior. Para ello se han escogido, fundamentalmente, comportamientos del suelo de tipo esfuerzo-deformación, que son en los que se ha incidido de forma más específica a lo largo de esta tesis.

Como paso previo para la realización de estas comparaciones es necesario estimar para cada suelo los diferentes parámetros que intervienen en el modelo.

Por lo que respecta al limo de alta compresibilidad utilizado en esta tesis, estos parámetros han sido deducidos a partir de los resultados de los ensayos llevados a cabo tal y como más adelante se indica. En cuanto a los resultados procedentes de otras referencias se ha aprovechado para ello la información proporcionada en cada caso sobre el suelo correspondiente. En general, sin embargo, esta información no ha

sido suficiente para estimar los valores de todos los parámetros, por lo que ha sido preciso ajustarlos en parte teniendo en cuenta las predicciones realizadas.

Cabe indicar que no es necesario en cada caso determinar los valores de todos los parámetros del modelo, debido a que dependiendo de cuales sean las trayectorias deformacionales seguidas o de los aspectos específicos que se estudien, algunos de ellos son irrelevantes.

Tanto en lo que se refiere a los resultados experimentales obtenidos en esta tesis como a los procedentes de otras referencias, se han escogido, a efectos de ser presentados en este capítulo, varios ejemplos que sean representativos de algunos comportamientos característicos de suelos no saturados.

5.4.1 Comparación con resultados experimentales con material de esta tesis

Para la simulación de las curvas en secado y humedecimiento por medio de la ecuación de deformación volumétrica plástica y elástica se utilizaron los parámetros obtenidos anteriormente los cuales son, $\kappa = -0.0744$ y $\lambda = -0.443$.

Tabla 5.6 Parámetros utilizados para todas las simulaciones de deformación volumétrica del material de esta tesis.

| PARAMETROS GENERALES DE LA ECUACIÓN PARA TODAS LAS MUESTRAS (MH) | | | |
|--|-----------|--------|-----|
| <u>MUESTRA EN SECADO Y HUMEDECIMIENTO</u> | | | |
| Zona elástica | κ | -0.074 | |
| P adicional de fabricación | P_{fab} | 0.441 | Mpa |
| Ángulo de fricción interna | Φ | 0.300 | |
| | K_0 | 0.704 | |

Tabla 5.7 Parámetros para muestra con un $G_w=80\%$ en secado.

| PARAMETROS UTILIZADOS $G_w=80\%$ | | | |
|----------------------------------|--------------|-------|-----|
| MUESTRA EN SECADO | | | |
| Aprox G_w | χ | 0.800 | |
| Succión | S | 2.000 | Mpa |
| | $\chi_0 S_0$ | 1.600 | |

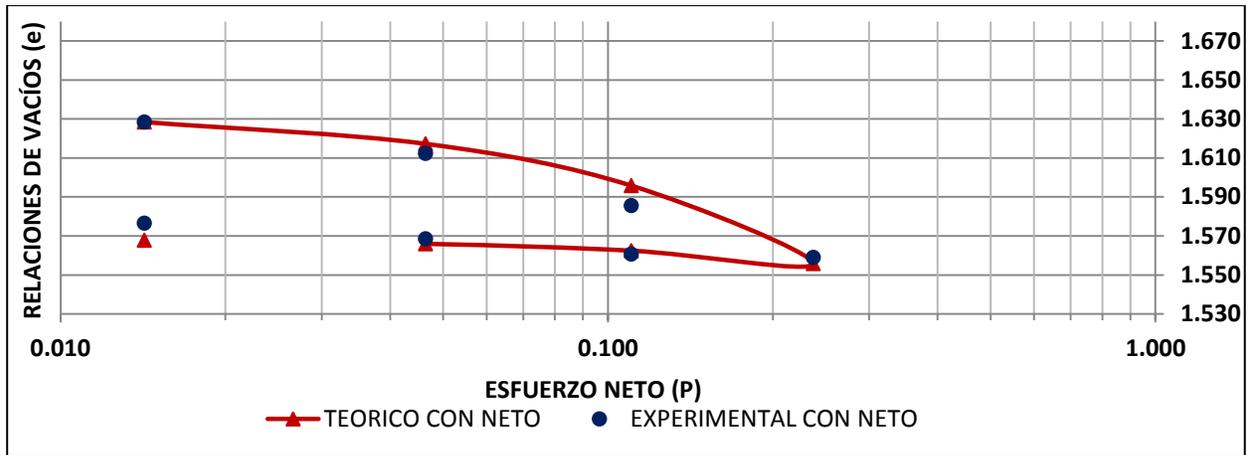


Figura 5.9 Gráfica de compresibilidad e vs. esfuerzo neto, para muestra con $G_w=80\%$ (en secado).

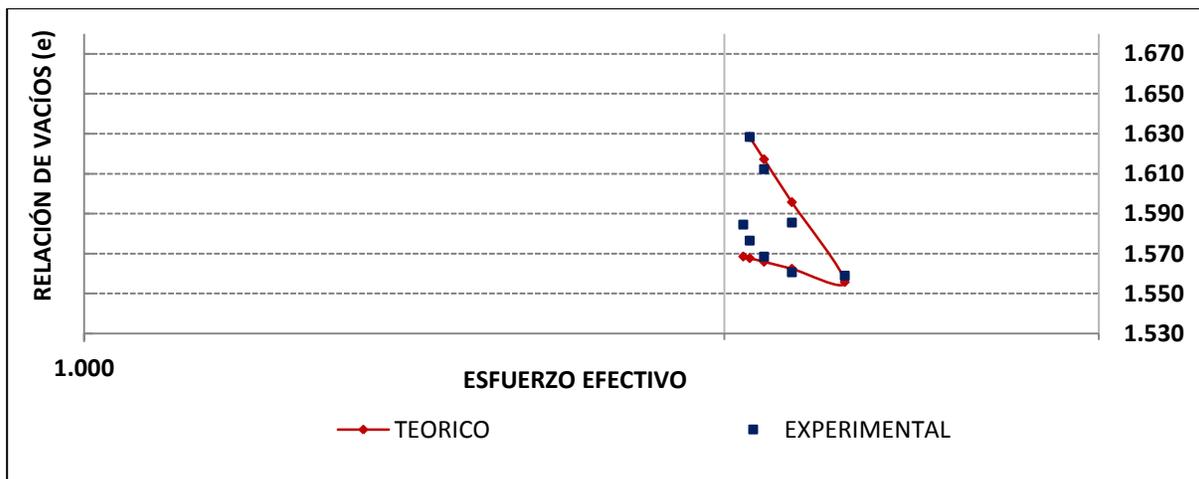


Figura 5.10 Gráfica de compresibilidad e vs. esfuerzo efectivo, para muestra con $G_w=80\%$ (en secado).

Tabla 5.8 Parámetros para muestra con un $G_w=55\%$ en secado

PARAMETROS UTILIZADOS $G_w=55\%$

MUESTRA EN SECADO

| | | | |
|-------------|--------------|-------|-----|
| Aprox G_w | χ | 0.550 | |
| Succión | S | 1.580 | Mpa |
| | $\chi_0 S_0$ | 0.869 | |

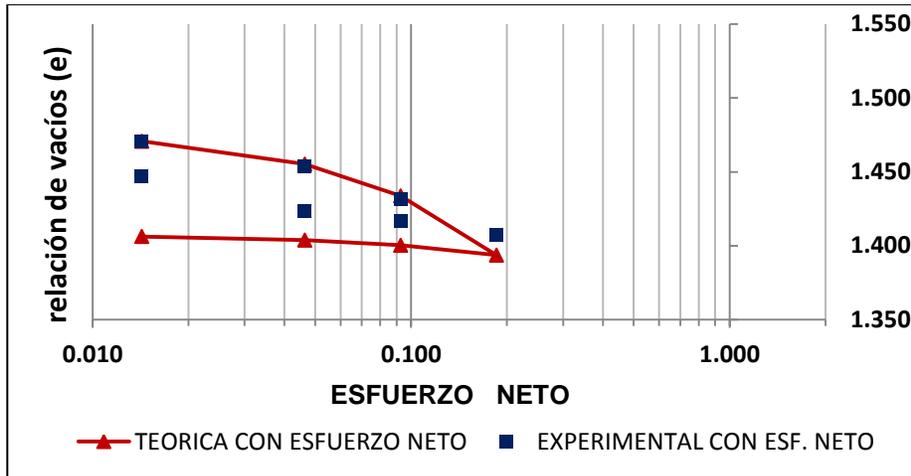


Figura 5.11 Gráfica de compresibilidad e vs. esfuerzo neto, para muestra con $G_w=55\%$ (en secado).

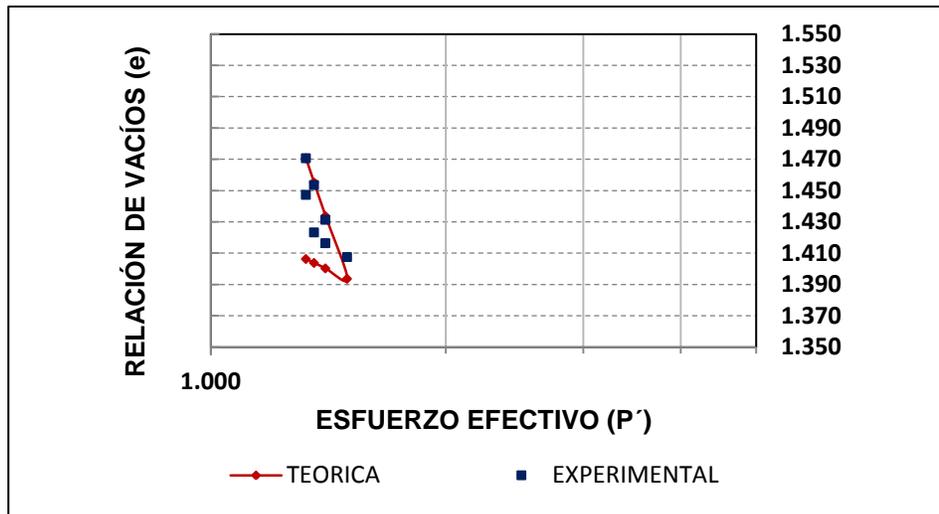


Figura 5.12 Gráfica de compresibilidad e vs. esfuerzo efectivo, para muestra con $G_w=55\%$ (en secado).

Tabla 5.9 Parámetros para muestra con un $G_w=30\%$ en humedecimiento.

PARAMETROS UTILIZADOS $G_w=30\%$

| MUESTRA EN HUMEDECIMIENTO | | | |
|----------------------------------|--------------|-------|-----|
| Aprox G_w | χ | 0.300 | |
| Succión | S | 2.890 | Mpa |
| | $\chi_0 S_0$ | 0.867 | |

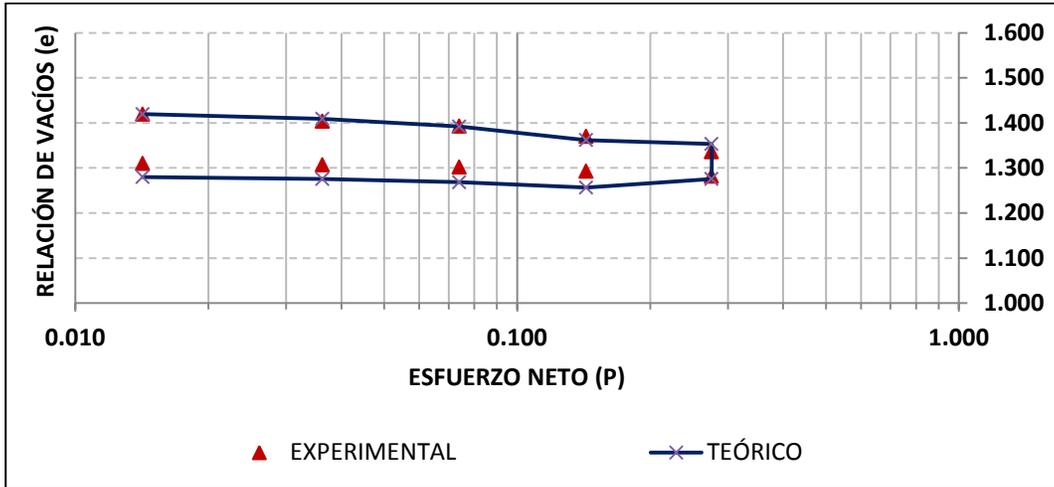


Figura 5.13 Gráfica de compresibilidad e vs. esfuerzo neto, para muestra con $G_w=30\%$ (en humedecimiento).

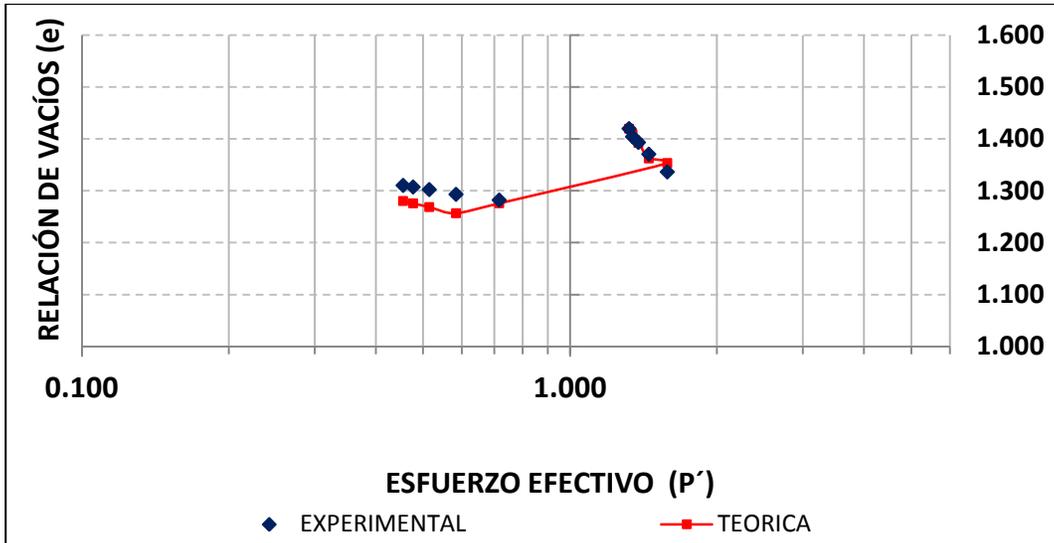


Figura 5.14 Gráfica de compresibilidad e vs. esfuerzo efectivo, para muestra con $G_w=30\%$ (en humedecimiento).

Tabla 5.10 Parámetros para muestra con un $G_w=40\%$ en secado.

PARAMETROS UTILIZADOS $G_w=40\%$

| MUESTRA EN SECADO | | | |
|--------------------------|--------------|-------|-----|
| Aprox G_w | χ | 0.400 | |
| Succión | S | 5.000 | Mpa |
| | $\chi_0 S_0$ | 2.000 | |

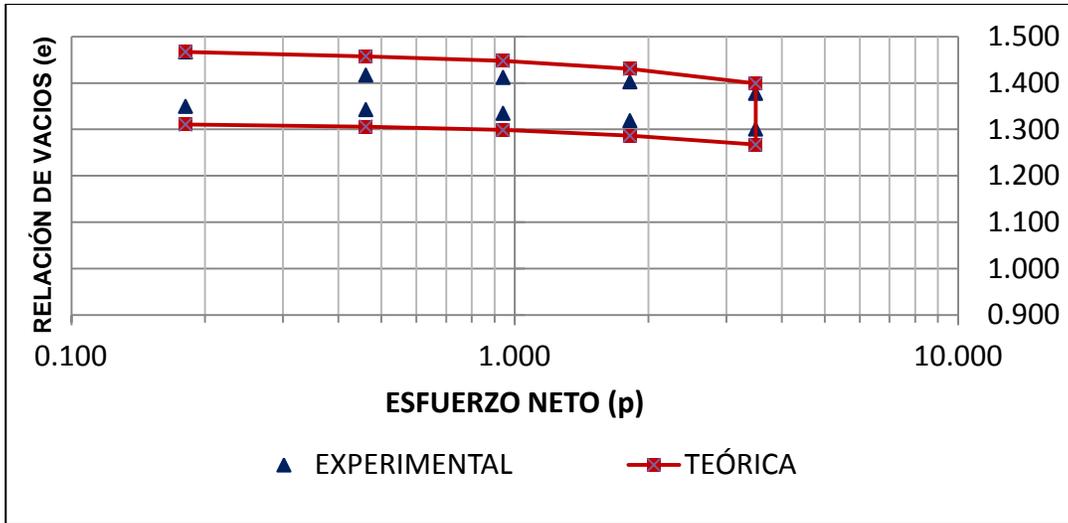


Figura 5.15 Gráfica de compresibilidad e vs. esfuerzo neto, para muestra con $G_w=40\%$ (en secado).

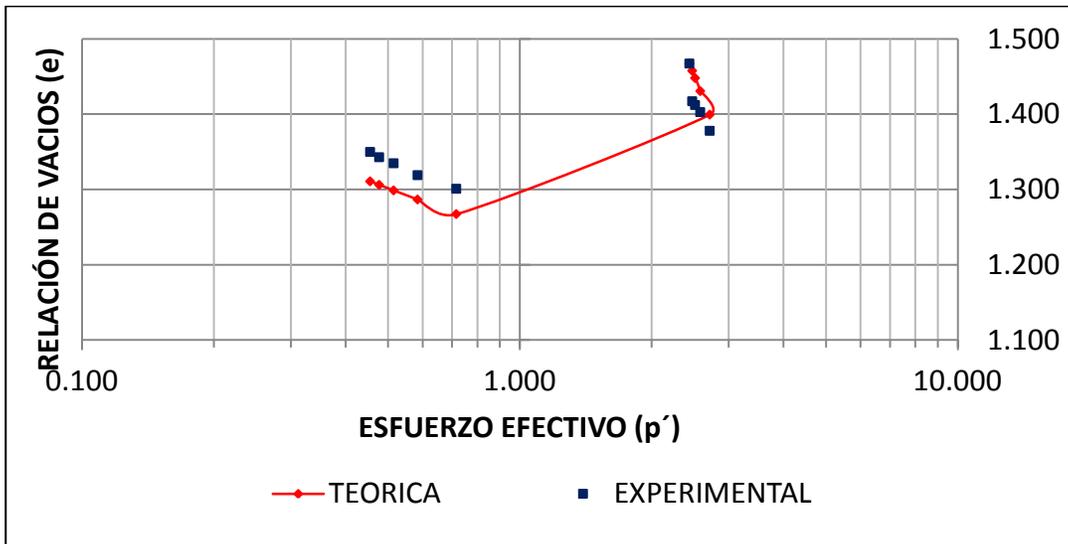


Figura 5.16 Gráfica de compresibilidad e vs. esfuerzo efectivo, para muestra con $G_w=40\%$ (en secado).

Tabla 5.11 Parámetros para muestra con un $G_w=48\%$ en humedecimiento.

PARAMETROS UTILIZADOS $G_w=48\%$

MUESTRA EN HUMEDECIMIENTO

| | | | |
|-------------|-----------|-------|-----|
| Aprox G_w | X | 0.480 | |
| Succión | S | 0.300 | Mpa |
| | $X_0 S_0$ | 0.144 | |

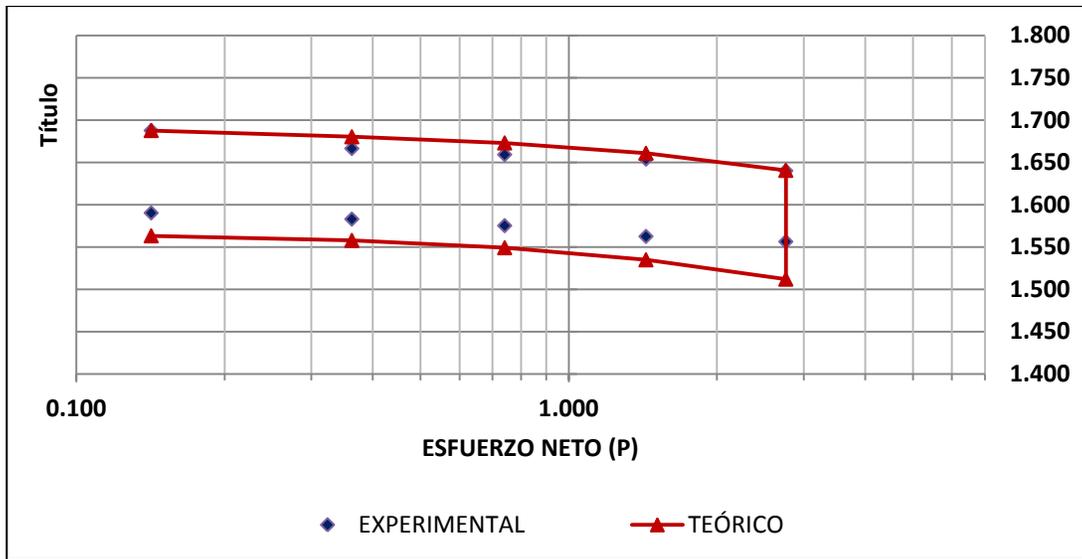


Figura 5.17 Gráfica de compresibilidad e vs. esfuerzo neto, para muestra con $G_w=48\%$ (en humedecimiento).

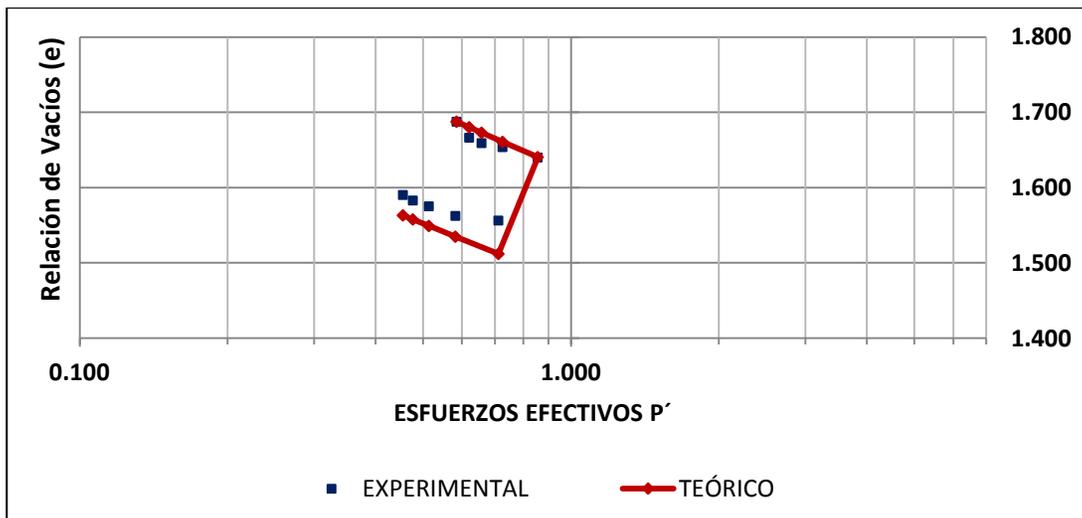


Figura 5.18 Gráfica de compresibilidad e vs. esfuerzo efectivo, para muestra con $G_w=48\%$ (en humedecimiento).

5.4.2 Comparación con resultados procedentes de la bibliografía (Sheng,2007)

A continuación se muestra la tabla de factores la cual nos indican los valores de los parámetros utilizados, para cada uno de los casos, así como las tablas de cálculo de esfuerzos efectivos, esfuerzos netos y relaciones de vacíos.

Para la simulación de las curvas en secado y humedecimiento por medio de la ecuación de deformación volumétrica plástica y elástica se utilizaron los parámetros, $\kappa = -0.03$ y $\lambda = -0.1956$.

La simulación que se presenta es de las curvas referidas en la Figura 5.6 (a, b, c y d).

Tabla 5.12 Parámetros utilizados en la aplicación de la ecuación de deformaciones volumétricas.

| DATOS Y PARÁMETROS | | | | |
|---------------------------|----|--------|-------|------------------|
| Muestra | Gw | χ | S | P _{fab} |
| e _o (promedio) | % | | Mpa | Mpa |
| 1.36 | 60 | 0.6 | 0.147 | 0.03 |
| 1.28 | 68 | 0.68 | 0.147 | 0.06 |
| 1.17 | 75 | 0.75 | 0.147 | 0.09 |
| 1.05 | 75 | 0.75 | 0.396 | 0.15 |

A continuación podemos ver los resultados obtenidos de la deformación volumétrica calculada con la ecuación propuesta y comparar con la realizada experimentalmente.

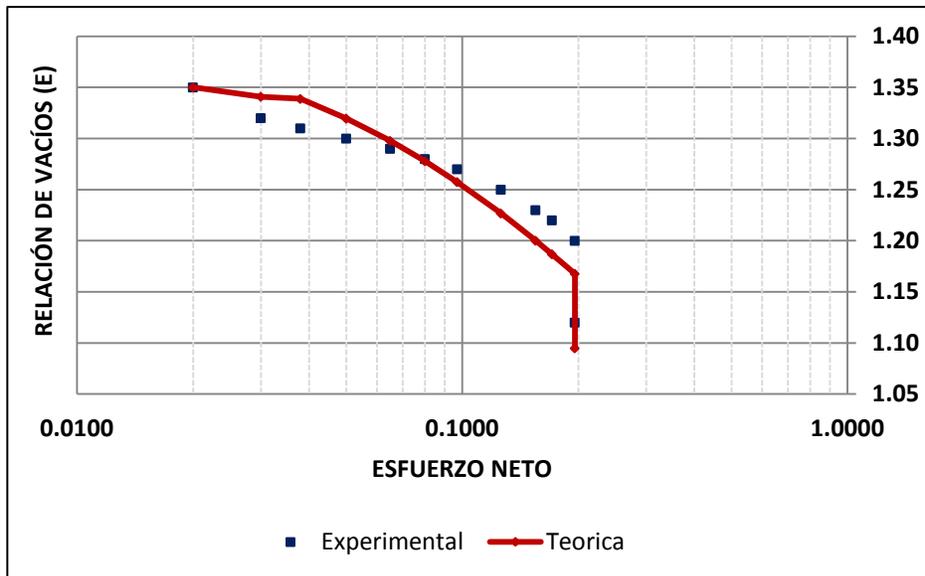


Figura 5.19 Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo neto vs. relación de vacíos, $e_0=1.35$.

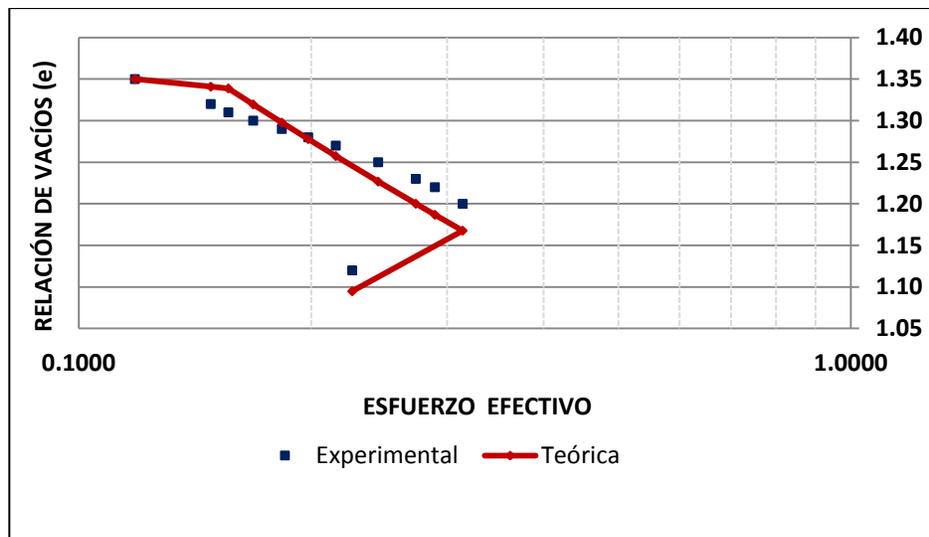


Figura 5.20 Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo efectivo vs. relación de vacíos, $e_0=1.35$.

La simulación que se presenta es de las curvas referidas en la Figura 5.6 (b), con las siguientes características:

Tabla 5.13 Parámetros utilizados en la aplicación de la ecuación de deformaciones volumétricas para la curva de $e_0=1.35$.

| DATOS Y PARAMETROS | | | |
|----------------------------|--------------|--------|-----|
| Aprox Gw | χ | 0.6 | |
| Succión | S | 0.147 | Mpa |
| P adicional de fabricación | P_{fab} | 0.03 | Mpa |
| | $\chi_0 S_0$ | 0.0882 | |

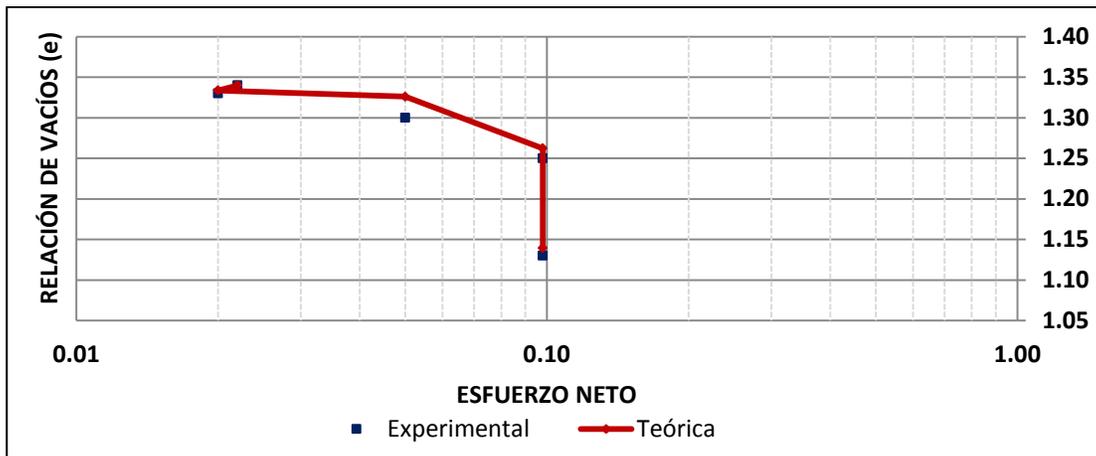


Figura 5.21 Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo neto vs. relación de vacíos, $e_0=1.35$.

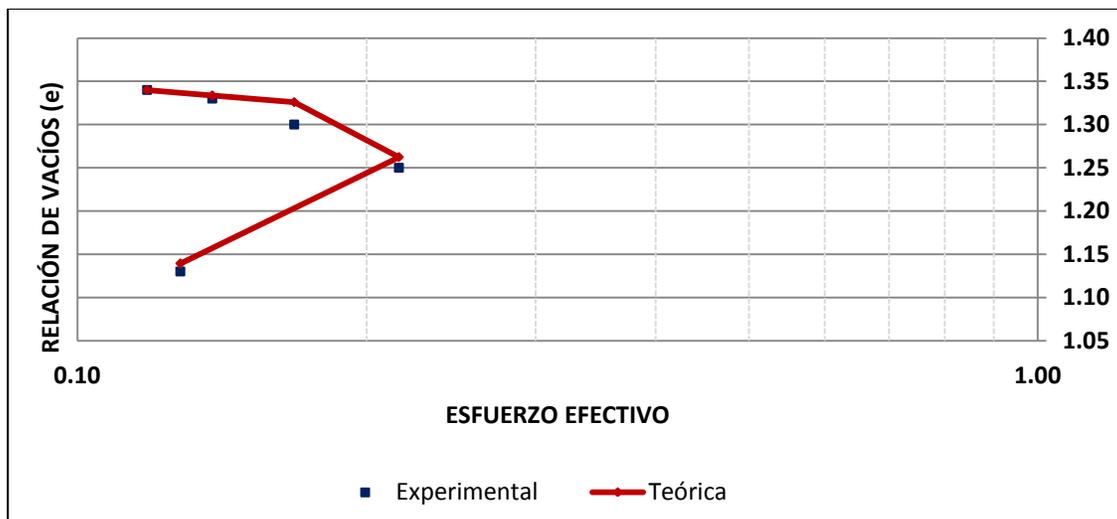


Figura 5.22 Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo efectivo vs. relación de vacíos, $e_0=1.35$.

Tabla 5.14 Parámetros utilizados en la aplicación de la ecuación de deformaciones volumétricas para la curva de $e_0=1.39$.

| DATOS Y PARAMETROS | | | |
|----------------------------|--------------|--------|-----|
| Aprox Gw | χ | 0.6 | |
| Succión | S | 0.147 | Mpa |
| Rel.vac.inicial | e_0 | 1.39 | |
| P adicional de fabricación | P_{fab} | 0.03 | Mpa |
| | $\chi_0 S_0$ | 0.0882 | |

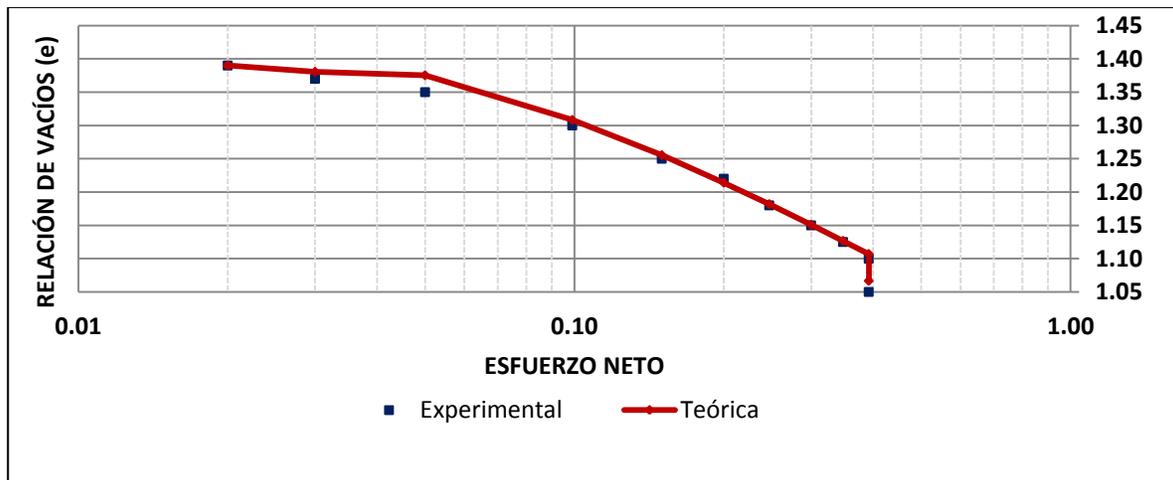


Figura 5.23 Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo neto vs. relación de vacíos, $e_0=1.39$.

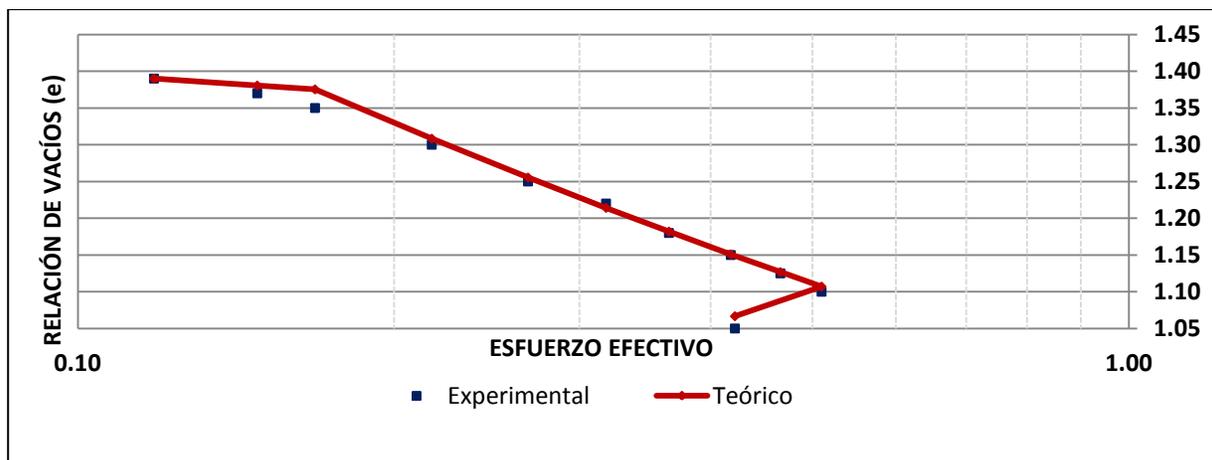


Figura 5.24 Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo efectivo vs. relación de vacíos, $e_0=1.39$.

Tabla 5.15 Parámetros utilizados en la aplicación de la ecuación de deformaciones volumétricas para la curva de $e_o=1.39$.

| DATOS Y PARAMETROS | | | |
|----------------------------|--------------|--------|-----|
| Aprox Gw | χ | 0.6 | |
| Succión | S | 0.147 | Mpa |
| Rel.vac.inicial | e_o | 1.39 | |
| P adicional de fabricación | P_{fab} | 0.03 | Mpa |
| | $\chi_o S_o$ | 0.0882 | |

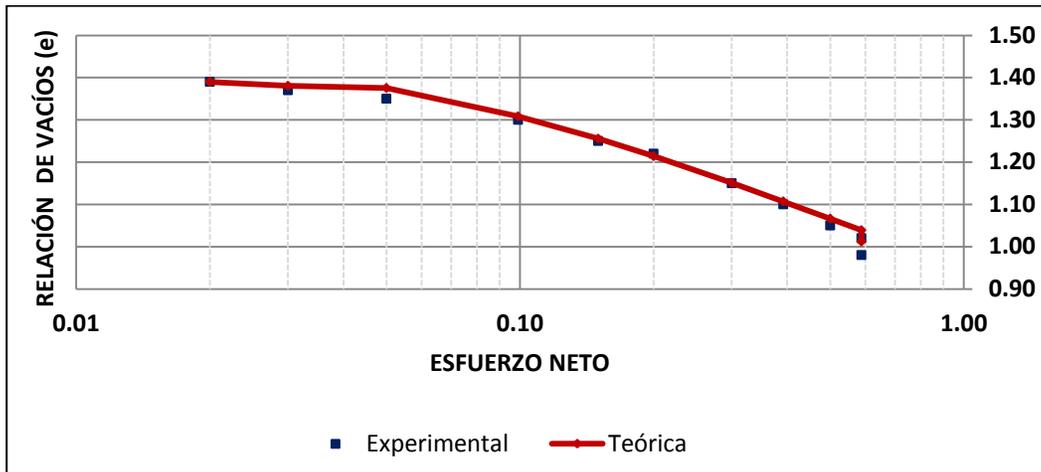


Figura 5.25 Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo neto vs. relación de vacíos, $e_o=1.39$.

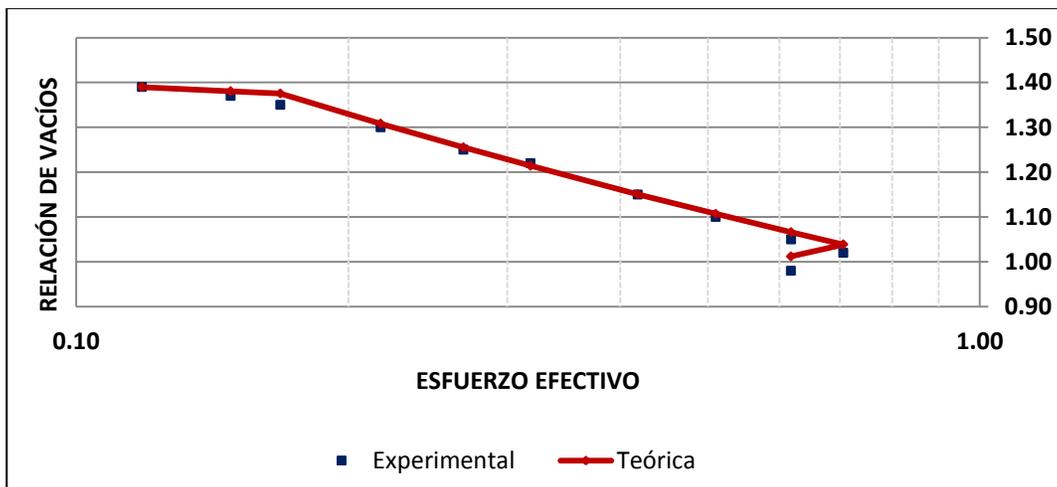


Figura 5.26 Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo efectivo vs. relación de vacíos, $e_o=1.39$.

Tabla 5.16 Parámetros utilizados en la aplicación de la ecuación de deformaciones volumétricas para la curva de $e_o=1.26$.

| DATOS Y PARAMETROS | | | |
|----------------------------|--------------|---------|-----|
| Aprox Gw | χ | 0.68 | |
| Succión | S | 0.147 | Mpa |
| Rel.vac.inicial | e_o | 1.26 | |
| P adicional de fabricación | P_{fab} | 0.06 | Mpa |
| | $\chi_o S_o$ | 0.09996 | |

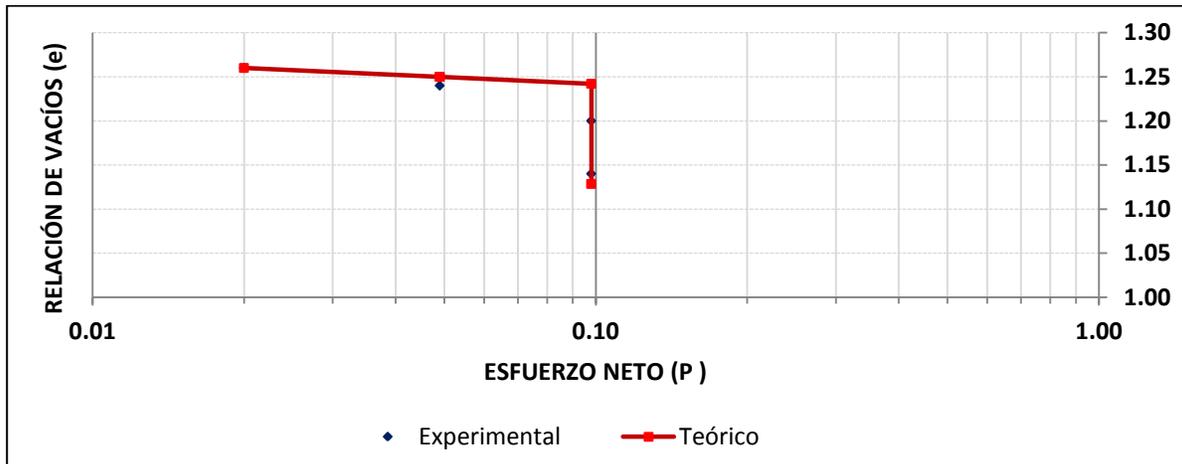


Figura 5.27 Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo neto vs. relación de vacíos, $e_o=1.26$.

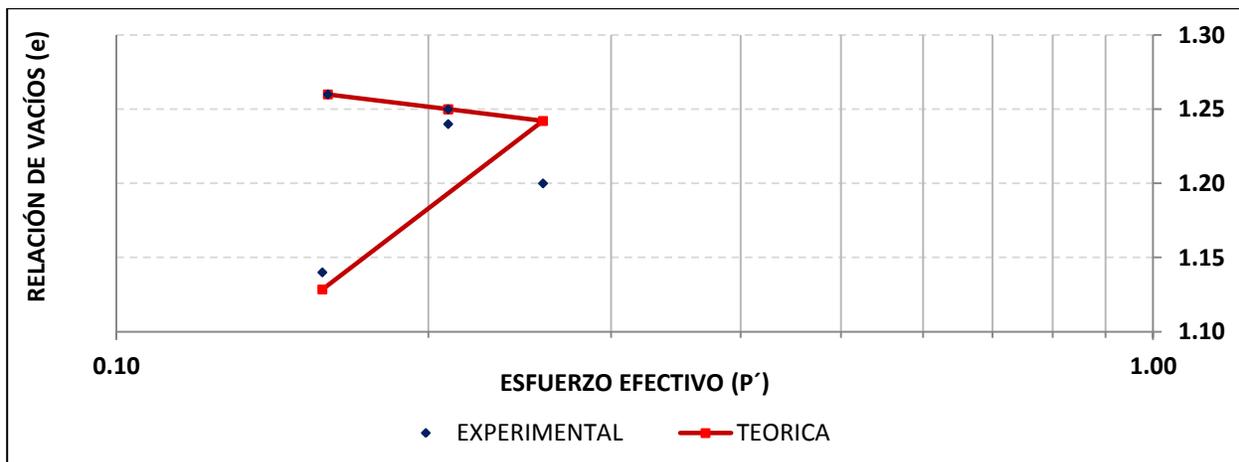


Figura 5.28 Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo efectivo vs. relación de vacíos, $e_o=1.26$.

Tabla 5.17 Parámetros utilizados en la aplicación de la ecuación de deformaciones volumétricas para la curva de $e_0=1.06$.

| DATOS Y PARAMETROS | | | |
|----------------------------|--------------|-------|-----|
| Aprox Gw | χ | 0.75 | |
| Succión | S | 0.396 | Mpa |
| Rel.vac.inicial | e_0 | 1.06 | |
| Vol. Esp. Inicial | V_0 | 2.06 | |
| P adicional de fabricación | P_{fab} | 0.15 | Mpa |
| | $\chi_0 S_0$ | 0.297 | |

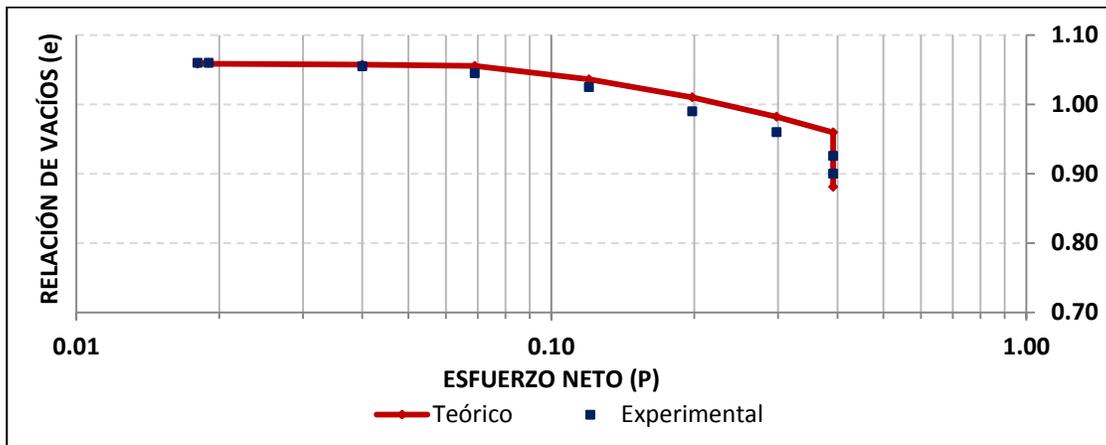


Figura 5.29 Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo neto vs. relación de vacíos, $e_0=1.06$.

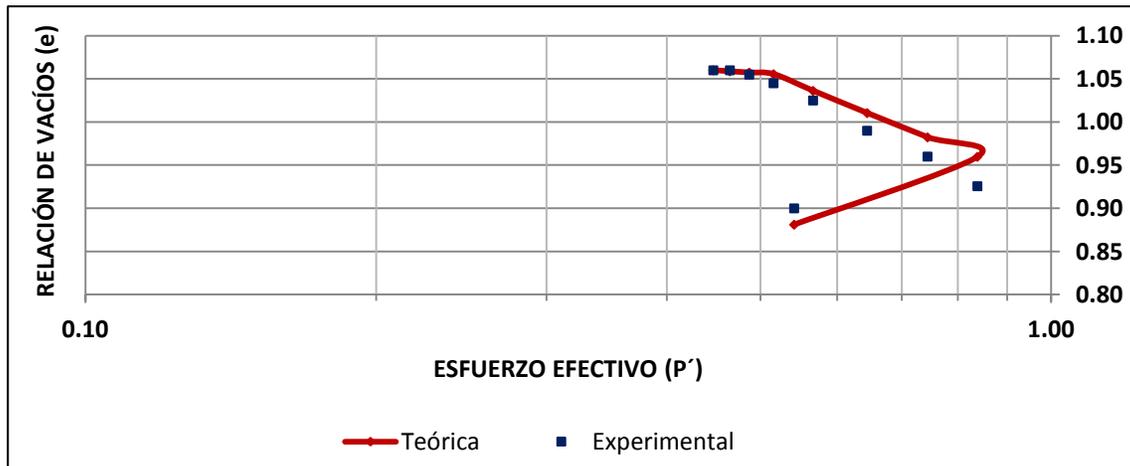


Figura 5.30 Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo efectivo vs. relación de vacíos, $e_0=1.06$.

Tabla 5.18 Parámetros utilizados en la aplicación de la ecuación de deformaciones volumétricas para la curva de $e_o=1.17$.

| DATOS Y PARAMETROS | | | |
|----------------------------|--------------|---------|-----|
| Aprox Gw | χ | 0.75 | |
| Succión | S | 0.147 | Mpa |
| Rel.vac.inicial | e_o | 1.17 | |
| Vol. Esp. Inicial | V_o | 2.17 | |
| P adicional de fabricación | P_{fab} | 0.09 | Mpa |
| | $\chi_o S_o$ | 0.11025 | |

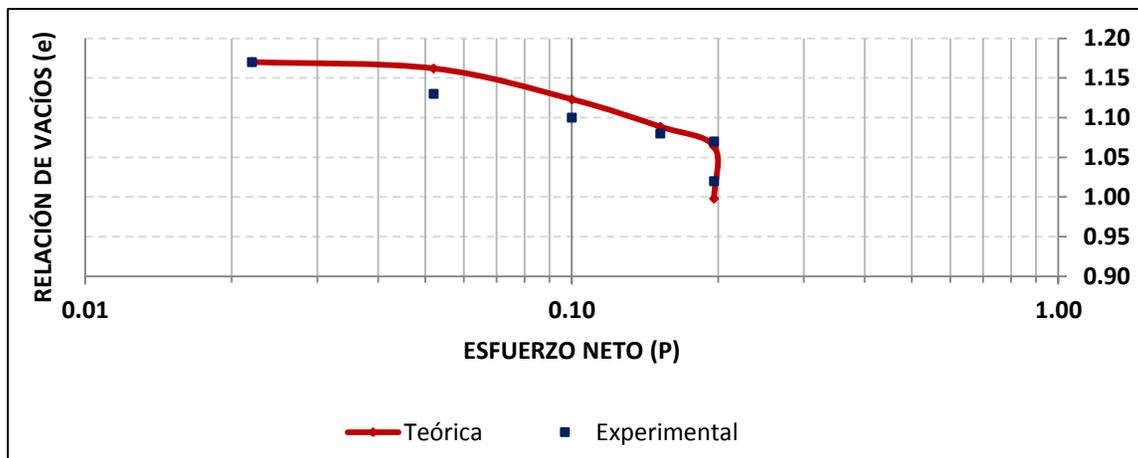


Figura 5.31 Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo neto vs. relación de vacíos, $e_o=1.17$.

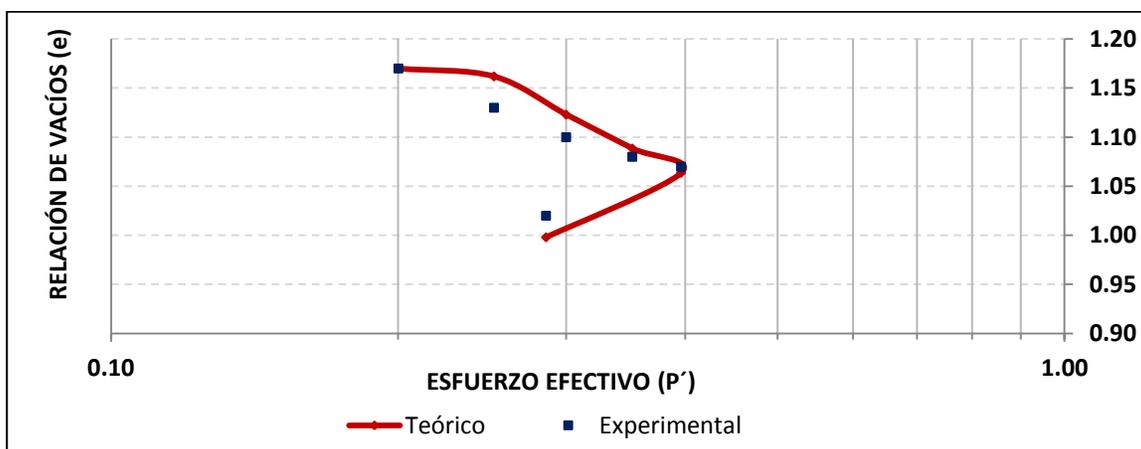


Figura 5.32 Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo efectivo vs. relación de vacíos, $e_o=1.17$

Tabla 5.19 Parámetros utilizados en la aplicación de la ecuación de deformaciones volumétricas para la curva de $e_o=1.17$.

| DATOS Y PARAMETROS | | | |
|----------------------------|--------------|---------|-----|
| Aprox Gw | χ | 0.75 | |
| Succión | S | 0.147 | Mpa |
| Rel.vac.inicial | e_o | 1.17 | |
| Vol. Esp. Inicial | V_o | 2.17 | |
| P adicional de fabricación | P_{fab} | 0.09 | Mpa |
| | $\chi_o S_o$ | 0.11025 | |

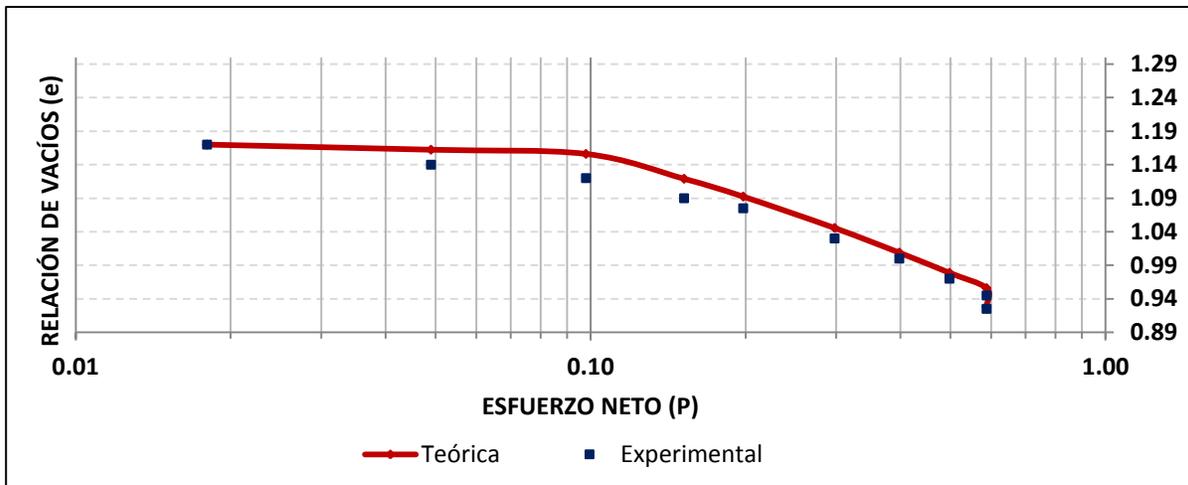


Figura 5.33 Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo neto vs. relación de vacíos, $e_o=1.17$.

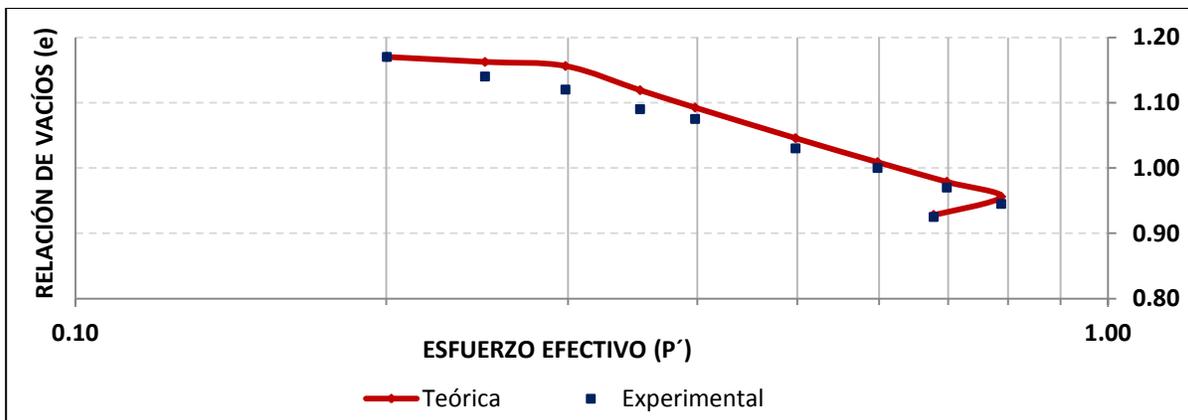


Figura 5.34 Comparación Teórico-experimental de los puntos obtenidos con la ecuación propuesta en esfuerzo efectivo vs. relación de vacíos, $e_o=1.17$

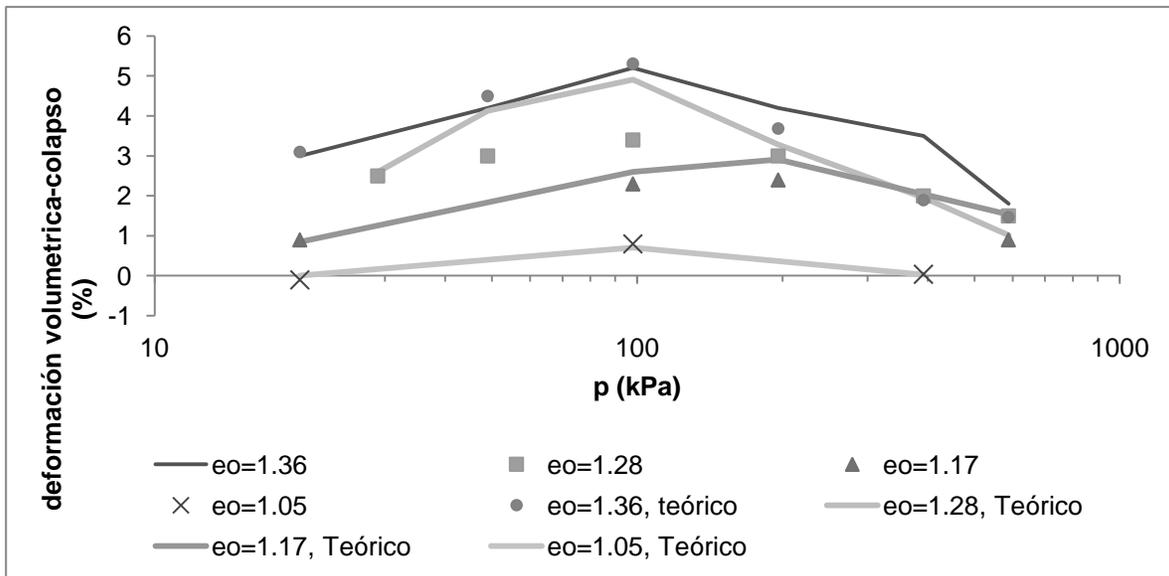


Figura 5.35 Colapso a diferentes esfuerzos isotrópicos para especímenes compactados con diferentes densidades iniciales, teórico -experimental

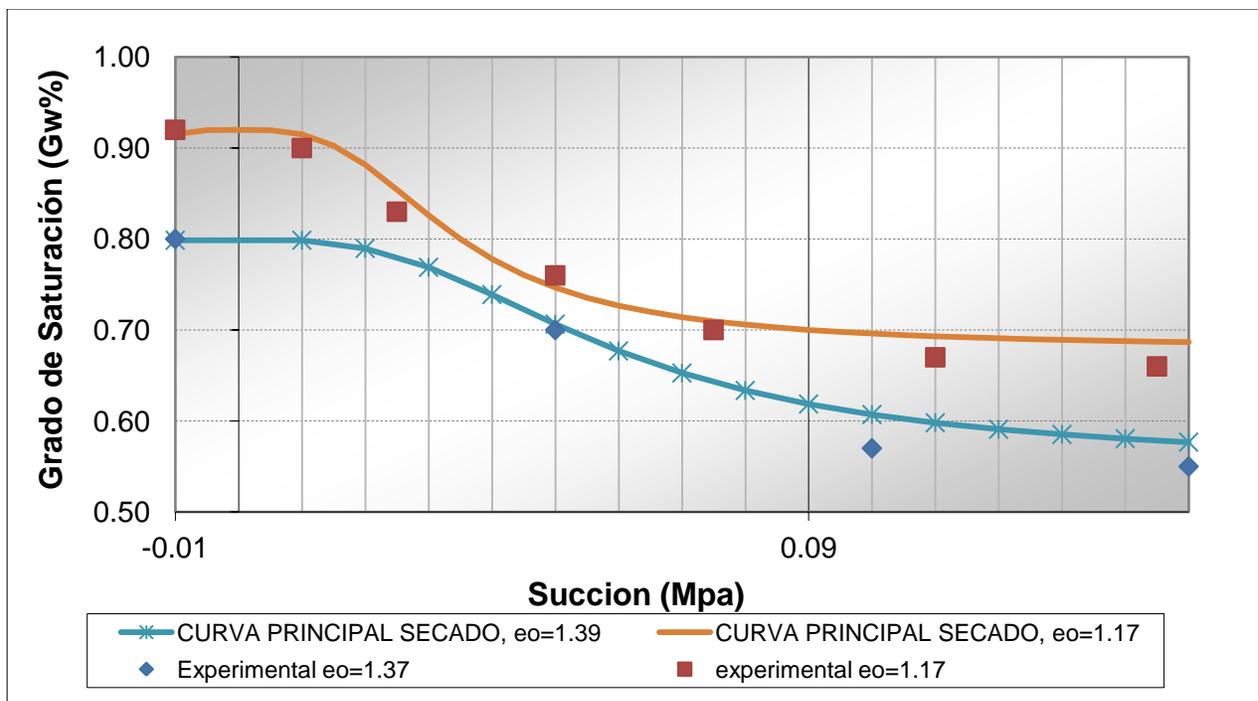


Figura 5.36 Simulación de curvas en secado de los materiales (Sheng, 2007) con modelo Van Genuchten.

6. CONCLUSIONES

Se llega a la conclusión general de que se puede establecer una ecuación del comportamiento volumétrico de suelos no saturados a partir del principio de esfuerzos efectivos y considerando el valor de $\chi=G_w$ para la obtención de dichos esfuerzos aplicados.

Así que se confirma que utilizar la consideración de que el grado de saturación es igual al parámetro χ es correcta, esto comprobado por medio de los resultados obtenidos en las graficas de deformación donde se utilizaron los esfuerzos efectivos por medio de la ecuación de Bishop en la cual se utiliza dicha teoría de igualación y nos arroja resultados de buen comportamiento y muy similar al comparar lo teórico y calculado con lo experimental.

Esta ecuación arroja valores muy próximos al comportamiento real de los materiales, así que con ésta se pueden modelar casi perfectamente, se observa que también podemos simular el colapso con la misma, así que esta ecuación se da como válida para la reproducción de deformaciones volumétricas para cualquier tipo de suelo parcialmente saturado.

Con respecto a la simulación de las curvas de compresibilidad se concluye que la ecuación para la deformación volumétrica obtenida es válida, ya que se corroboró el modelo utilizado con los resultados del trabajo de Sheng (2007) y este simuló las curvas de manera semejante a las experimentales. Sin embargo al utilizar la ecuación para el suelo en estudio de esta tesis se presenta cierta variación en las curvas obtenidas teóricamente con respecto a las obtenidas de forma experimental, esto adjudicándose a la variación de temperatura de la cámara y también debido a que no se realizó en un odómetro de succión controlada.

Hablando de la parte experimental se observaron algunas inconsistencias en cuanto a las succiones obtenidas por el método del papel filtro, esto debido a que la

temperatura en el cuarto tiene variaciones muy significativas desde $\pm 10^\circ$ y esto dificulta el poder equilibrar adecuadamente las muestras; otro aspecto que se debe mencionar es que estas variaciones no solo fueron motivo de falla en la succión si no también en los grados de saturación dada en las pastillas para labrar en el anillo para la prueba odométrica, así que de las 12 realizadas se tomaron solo 7, las cuales se hicieron cuando la cámara aun conservaba su temperatura constante. De las 7 muestras referidas anteriormente 2 sólo fueron de carga-descarga y el resto de carga-humedecimiento-descarga.

Se indica que también se pudo haber tenido un acarreo y arrastre de error representativo probablemente por el método de sellado de las cazuelas o platos para prueba de consolidación, ya que no fueron selladas en su totalidad con un cello hermético adecuado para la situación requerida.

El modelo y la ecuación realizadas en esta investigación es aplicable para cualquier tipo de suelo no saturado, facilitara la predicción de su comportamiento en la deformación volumétrica que pudiera llegar a tener. Aun así tiene la limitación de tener que hacer la prueba practica aun que se de succión para meter los datos de su grado de saturación como χ .

Se tendrá que tener algunos rangos de comportamiento de las curvas de compresibilidad, aun así cumple con un ajuste preciso de los valores de deformación volumétrica, en este caso del suelo elegido.

7. RECOMENDACIONES

Para poder utilizar esta ecuación de deformación volumétrica, basada en deformaciones elásticas y plásticas, se deberá de realizar para un mejor resultado pruebas odométricas con succión controlada y en un cuarto a temperatura constante.

Se puede realizar para deformaciones ante esfuerzo medio neto tanto como para efectivo, pero se recomienda calcular el parámetro χ a través del grado de saturación obtenido a partir de las curvas de retención adecuada para que tome el fenómeno de histéresis del material bajo diferentes saturaciones.

LITERATURA CITADA

- Aitchison G.D., 1969. Separate roles of site investigation, quantification of soil properties and selection of operational environment in the determination of foundation design on expansive soils. Proceeding of 3rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 3, pp. 72–77.
- Alfaro Soto, MA., 2004. Comparação entre métodos de imposição e de controle da sucção em ensaios com solos não saturados. Tese (Doctorado). Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos. pp. 206.
- Alfaro Soto, MA, Chang HK, 2007. Utilización de TDR en estudios de la dinámica del agua en suelo no saturado. 8º Iberoamerican Conference on Mechanic Engineering, Cuzco - Peru, pp. 123-256.
- Alonso, E.E., Gens, A. & Hight, D.W., 1987. Special Problems Soils. General report. Proc.9th European Conf. Soil Mech. Fdn Engng, Dublin,3 ,pp. 1087-1146.
- Alonso, E. E., Gens, A., and Josa, A., 1990. A constitutive model for partially saturated soils. *Geotechnique*, 40(3), 405-430.
- Barden, L., Madedor,A.O. & Sides, G.R., 1969. Volume change characteristics of unsaturated clays. *J. Soil Mech. Fdn Engng, Am. Soc. Civ. Engrs* 95, pp. 33-51.
- Bishop, A. W., 1959. The principle of effective stress. *Tek. Ukeblad*, Vol. 39, pp.859-863.
- Bishop, A. W. & Blight, G.E., 1963. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. *Geotechnique* 13,Vol. 3,pp. 177-197.
- Bönsch C. and Lempp C., 2007. Shear Strength Affected by Suction Tension in Unsaturated Fine Grained Soils. *Experimental Unsaturated Soil Mechanics*, Berlin, Springer Volume 112, Part III, pp. 145-152.
- Bulut R., Choon E., 2008. Indirect Measurement of Suction. *Geotechnical and Geological Engineering*, Springer Netherlands, vol. 26, pp. 633-644.
- Cengel. Y. A. and Oles, M. A., 2006. *Thermodynamics. An Engineering Approach*. Fifth Edition.
- Cervantes, A. J. R., 2002. Modelación del Flujo de Agua en Suelos Expansivos. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro. Santiago de Querétaro, Qro., México.
- Coleman, J.D., 1962. Stress Strain relations for partly saturated soil. *Correspondence to Geotechnique* 12, Vol. 4, pp. 348-350.

-
- Cox, D.W., 1978. Volume Change of compacted clay fill. Clay fills, London:ICE., pp.79-86
- Dadle, J .H. , 1970. Review of Collapsing Soils . Journal of Soil Mechanical. and Foundation. Division., A.S.C.E., Vol. 96, SM3 pp. 925-947.
- Escario, V. & Sáez, J., 1987. Shear strength of soils under high suction values. Written discussion. Sesion 5. Proc. 9th European Conf. Soil mech. Fdn Engng, Dublín,
- Escario & Saenz., 1973. Thermo-hydro-mechanical behavior of two heavily overconsolidated clays. Engineering Geology,81 (3),pp.255-268.
- Fredlund, D. G., Xing, A. And Huang S., 1994. Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soil Using the Soil-Water Characteristic Curve. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp. 533-546.
- Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R., 1976. Constitutive relations for Volume change in unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal, pp. 13, 261-276.
- Fredlund, D.G., 1979. Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. Can. Geotechnical Journal 16,pp.1121-139.
- Fredlud, D.G., Xing, A., Fredlud, M.D., and Barbour, S.L., 1996. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, 33: 440-448.
- Garven, E. A. and Vanapalli, S. K., 2006. Evaluation of empirical procedures for predicting the shear strength of unsaturated soils. Proc., 5th Int. Congress on Unsaturated Soil Mechanics, ASCE, Reston, Va.
- Houlsby, G.T., 1997. The work input to an unsaturated granular material. Geotechnique, 47(1), 193-196.
- Houlsby, G.T., 1979. The work input to a granular material. Geotechnique, 29(3), 354-358.
- Jeninngs, J.E.B. and Burland, J.B., 1962. Limitations to the use of effective stress in partly saturated soils. Geotechnique 12, No. 2.
- Josa, A., 1988. Un modelo elastoplástico para suelos no saturados. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Juárez E., y Rico A., 1999. Mecánica de Suelos Tomo 1. Editorial Limusa. México.
- Justo, J.L., Delgado, A. & Ruiz, J., 1984. The influence of stress-path in the collapse-swelling of soils at the laboratory. Proc. 5th Int. Conf. Expansive Soil, Adelaide, pp. 67-71.

-
- Knight, K., 1962. Collapsing of Partially Saturated Soils of South Africa. Unpublished Thesis, University of Witwatersrand, Johannesburg, South Africa.
- López Corral, A.M., 1978. Fenómenos de colapso: Descripción. Bol. Soc. Esp. de Mecánica de Suelos y Cimentaciones., No.32, pp. 3-17.
- Maswoswe, J., 1985. Stress path for a compacted soil during collapse due to wetting. PhD thesis, Imperial College, London.
- Matyas, E.L. & Radhakrishna, H.S., 1968. Volume change characteristics of partially saturated soils. Geotechnique 18, Vol.7, pp.432-448.
- Murray, E.J., 2002. An equation of state for unsaturated soils. Ca. Geotech. J., 39 (1), 125-140.
- Ning, L. y Likos, J. W., 2006. Suction stress characteristic curve for unsaturated soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 132, No. 2, 131-142. ASCE.
- Öberg, A.-L., and Sällfors, G., 1995. A rational approach to the determination of the shear strength parameters of unsaturated soils. Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Vol.1, Paris, E.E. Alonso and P. Delage, eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 151-158.
- Parreira, AB, Takeda, M. De C., Luz M.P., 2004. Avaliação da influência do período de imersão nos resultados do ensaio CBR de solos tropicais” V Simposio Brasileiro de Solos Não Saturados. São Carlos, v. 1, pp. 383-388.
- Pereira, EM, Pejon, OJ., 2004. Características de Materiais Não Saturados Expansivos mediante ensaios com soluções salinas. V Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 2004, São Carlos. V Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, São Carlos, v. 1, pp. 471-476.
- Pérez, N., 2006. Development of a protocol for the assessment of unsaturated soil properties. Thesis of Ph.D. Arizona State University, USA.
- Pousada, E., 1984. Deformabilidad de las arcillas expansivas bajo succión controlada. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX, Madrid, España.
- Richards, B.G., 1984. Finite element analysis of volume change in expansive clays. Proc. 5th I.C.E.S. Adelaide, Vol. 2: pp. 355-362.

-
- Rojas, E., Romo, M. P. y Garnica P., 2004. Flujo de agua en suelos expansivos en torno a una pantalla vertical impermeable: un método de análisis. Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.
- Santamarina C. J., Narsilio A. Guillermo. Clasificación de suelos: fundamento físico, prácticas actuales y recomendaciones. Georgia Institute of Technology. 790 Atlantic Dr., Atlanta, GA. 30332. USA.
- Santos, CRD, Vilar, OM., 2004. Análise paramétrica da estabilidade de taludes em solos não saturados: a influência do tipo de solo” In: V Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados, São Carlos. v.1, pp. 181-188.
- Sheng Daichao, De’an Sun y Yong Fu Xu., 2007. "Collapse behavior of unsaturated compacted soil with different initial densities, Can. Geotechnical, 673-686, Vol.44.
- Teixeira, RS, Belincanta, A, Lopes, FF, Gutierrez, NHM, Branco, CJMC., 2004. Avaliação do colapso do solo da camada superficial da cidade de Londrina/PR” In: V Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, São Carlos. v. 1, pp. 495-500.
- Terzaghi, K., 1936. The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear. Proc., 1st Int. Conf. on Soil Mechanics, International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, 54-56.
- Tinjum, J. M., 1995. Soil-water characteristic curves for compacted fine-grained soils. Thesis of Master of Science, University of Wisconsin-Madison. USA.
- Wolle, CM., 2004. Algumas considerações sobre a utilização dos novos conceitos de comportamento dos solos não saturados em projetos de engenharia. 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 25 a 27 de Agosto, São Carlos –SP, Brasil. v.1, pp. 635-641.
- Yuk Gehling, W.I., 1994. Suelos Expansivos: Estudio experimental y aplicación de un modelo teórico. Tesis Doctoral, Universidad politécnica de Catalunya.
- Zepeda, A. y Pérez, A. (2004). Mecánica de suelos no saturados, capítulo 3: succión y estado del agua en el suelo. Universidad Autónoma de Querétaro, UAQ, Querétaro, México.

ANEXOS

Tabla 20. Cálculos de Succión experimental y teórico por medio de Huang et. al 2007, para el suelo MH de esta investigación.

Tabla 21. Molalidad dependiendo las diferentes temperaturas

| Molalidad | Temperatura °C | | | | | | |
|-----------|----------------|------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.1 | 421 | 436 | 444 | 452 | 459 | 467 | 474 |
| 0.2 | 827 | 859 | 874 | 890 | 905 | 920 | 935 |
| 0.3 | 1229 | 1277 | 1300 | 1324 | 1347 | 1370 | 1392 |
| 0.4 | 1628 | 1693 | 1724 | 1757 | 1788 | 1819 | 1849 |
| 0.5 | 2025 | 2108 | 2148 | 2190 | 2230 | 2268 | 2306 |
| 0.6 | 2420 | 2523 | 2572 | 2623 | 2672 | 2719 | 2765 |
| 0.7 | 2814 | 2938 | 2996 | 3057 | 3116 | 3171 | 3226 |
| 0.8 | 3208 | 3353 | 3421 | 3492 | 3561 | 3625 | 3688 |
| 0.9 | 3601 | 3769 | 3846 | 3928 | 4007 | 4080 | 4153 |
| 1 | 3993 | 4185 | 4272 | 4366 | 4455 | 4538 | 4620 |

Tabla 22. Calibración del papel filtro.

| CALIBRACION DEL PAPEL FILTRO | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------------------|-----------------|---------------------------------------|---|---|---------------------------------------|--|---|----------------------|----------------|
| Concentracion (KCl o NaCl) | Solucion Salina | Papel Filtro | W _{if} T _c (g) | W _{pfn} +W _{if} M ₁ (g) | W _{pfs} +W _{tc} M ₂ (g) | W _{tc} T _h (g) | W _{pfs} M _f (g) | W _{agua} M _w (g) | Cont. Agua. Gw(%) | Log Succion |
| 150 ml agua 0.255 g KCl | 1 | Superior | 119.18 | 119.4748 | 119.3878 | 119.18 | 0.2078 | 0.0870 | 41.87 | 2.01 |
| | | Inferior | 120.72 | 121.0127 | 120.9267 | 120.72 | 0.2067 | 0.0860 | 41.61 | 2.01 |
| 150 ml agua 0.795 g KCl | 2 | Superior | 118.80 | 119.0947 | 119.0184 | 118.80 | 0.2184 | 0.0763 | 34.94 | 2.51 |
| | | Inferior | 129.35 | 129.6434 | 129.5684 | 129.35 | 0.2184 | 0.0750 | 34.34 | 2.51 |
| 150 ml agua 2.550 g KCl | 3 | Superior | 123.97 | 124.2597 | 124.2002 | 123.97 | 0.2302 | 0.0595 | 25.85 | 3.01 |
| | | Inferior | 114.89 | 115.1721 | 115.1148 | 114.89 | 0.2248 | 0.0573 | 25.49 | 3.01 |
| 150 ml agua 7.905 g KCl | 4 | Superior | 123.21 | 123.4756 | 123.4259 | 123.21 | 0.2159 | 0.0497 | 23.02 | 3.50 |
| | | Inferior | 119.11 | 119.3825 | 119.3321 | 119.11 | 0.2221 | 0.0504 | 22.69 | 3.50 |
| 150 ml agua 24.75 g KCl | 5 | Superior | 117.51 | 117.8089 | 117.7671 | 117.51 | 0.2571 | 0.0418 | 16.26 | 4.00 |
| | | Inferior | 116.29 | 116.6044 | 116.5610 | 116.29 | 0.2710 | 0.0434 | 16.01 | 4.00 |

Tabla 23. Succión obtenida para grafica de calibración

| SUCCION CONOCIDA | | | | | | | | |
|-------------------|---------------------|-----------------------|---------------|-----------|------------------------------|-----------|------------------|----------------|
| Solucion (No.) | KCl Usado (g) | Agua usada (ml) | Temp. (°C) | Molalidad | Peso Molecular del KCl | Molalidad | Succion (kPa) | Log Succion |
| 1 | 0.255 | 150 | 20.1 | 452 | 74.55 | 0.0228 | 103.072 | 2.013 |
| 2 | 0.795 | 150 | 20.1 | 452 | 74.55 | 0.0711 | 321.341 | 2.507 |
| 3 | 2.550 | 150 | 20.1 | 452 | 74.55 | 0.2280 | 1030.718 | 3.013 |
| 4 | 7.905 | 150 | 20.1 | 452 | 74.55 | 0.7069 | 3195.225 | 3.505 |
| 5 | 24.750 | 150 | 20.1 | 452 | 74.55 | 2.2133 | 10004.024 | 4.000 |

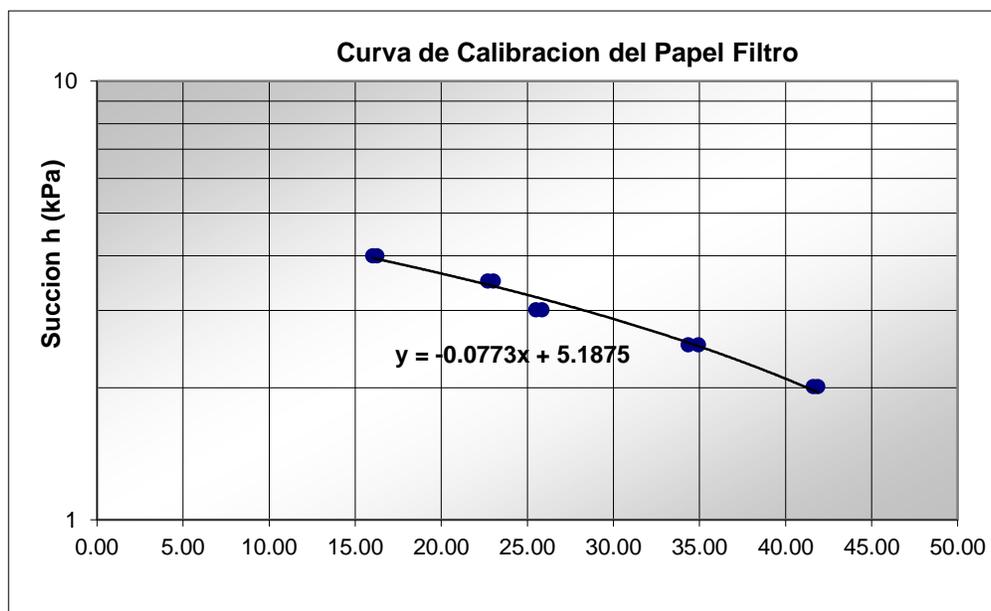


Figura 0.1 Curva de calibración del papel filtro

CURVAS EXPERIMENTALES

Tabla 24. Datos experimentales para curva tramo de húmedo a seco.

| húmedo a seco | | | |
|---------------|----------|-----------------------------|-----------------------------|
| Gw% | Gw | p.abajo Succión (Kpa) | p.abajo Succión (Mpa) |
| 47.0052 | 0.470052 | 508.186 | 0.508186 |
| 46.07 | 0.4607 | 706.064 | 0.706064 |
| 44.024 | 0.28956 | 926.678 | 10.2365 |
| 42.4271 | 0.4652 | 938.243 | 1.5632 |
| 40.0133 | 0.400133 | 1159.573 | 4.896 |
| 34.3439 | 0.343439 | 1553.281 | 6.3256 |
| 44.024 | 0.28956 | 926.678 | 10.2365 |
| 24.3443 | 0.243443 | 7392.08 | 16.89563 |
| 18.4712 | 0.184712 | 19493.852 | 19.493852 |
| 15.2068 | 0.152068 | 20770.186 | 20.770186 |
| 0.3657 | 0.05 | 120411.21 | 120.41121 |

Tabla 25. Datos experimentales para curva tramo seco a húmedo

| seco a húmedo | | | |
|----------------------|-----------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Gw% | Gw | p.abajo Succion (Kpa) | p.abajo Succion (Mpa) |
| 3.0229 | 0.030229 | 69821.638 | 69.821638 |
| 9.1416 | 0.091416 | 32560.525 | 15.2635 |
| 14.5743 | 0.145743 | 10911.403 | 10.45 |
| 15.916 | 0.15916 | 7591.385 | 7.6983 |
| 22.7062 | 0.227062 | 2451.976 | 3.998 |
| 26.281 | 0.26281 | 1538.115 | 3.213 |
| 29.4394 | 0.294394 | 1125.476 | 2.56 |
| 35.5378 | 0.355378 | 903.025 | 1.5698 |
| 42.2709 | 0.422709 | 829.104 | 0.96321 |
| 43.9713 | 0.439713 | 802.786 | 0.802786 |

CURVAS TEÓRICAS

Tabla 26. Cálculos para curvas teoricas primarias y secundarias.

$$Gw_1 = \left(1 + |\alpha * s_1|^{\eta}\right)^{-m} * (Gw_s - Gw_r) + Gw$$

Tabla 27. Parámetros y cálculos Teóricos de Gw por medio de la ecuación de Van Genuchten, para simulación de curva característica del suelo en estudio (tramo secado-humedecimiento y humedecimiento-secado).

| HUMEDECIMIENTO | | | | SECADO | | | |
|----------------|--------|-------|---------|------------|--------|---------|---------|
| α^w | 0.3000 | s_1 | Gw | α^d | 0.1000 | s_1 | Gw |
| η^w | 2.7000 | 1250 | 0.03002 | η^d | 2.0000 | 0.2356 | 0.46987 |
| w_r | 0.0300 | 1250 | 0.03002 | Gw_r | 0.0100 | 0.3428 | 0.46973 |
| w_s | 0.4700 | 500 | 0.03009 | Gw_s | 0.4700 | 0.5449 | 0.46932 |
| m | 0.6296 | 350 | 0.03016 | m | 0.5000 | 1.063 | 0.46742 |
| | | 300 | 0.03021 | | | 3.555 | 0.44343 |
| | | 300 | 0.03021 | | | 21.737 | 0.20225 |
| | | 250 | 0.03029 | | | 65.511 | 0.07941 |
| | | 150 | 0.03068 | | | 154.192 | 0.03977 |
| | | 65 | 0.03282 | | | 250.87 | 0.02832 |
| | | 10 | 0.09586 | | | 300 | 0.02532 |
| | | 0.98 | 0.46013 | | | 350 | 0.02314 |
| | | 0.85 | 0.46322 | | | 400 | 0.02150 |
| | | 0.5 | 0.46836 | | | 500 | 0.01920 |
| | | 0.34 | 0.46942 | | | 1250 | 0.01368 |
| | | 0.23 | 0.46980 | | | 1250 | 0.01368 |
| | | | | | | 1350 | 0.01341 |
| | | | | | | 1500 | 0.01307 |

FORMULAS UTILIZADAS PARA CALCULO DE CURVAS SECUNDARIAS EN SECADO Y HUMEDECIMIENTO:

$$Gw_r^w = \frac{Gw_1\Theta_s - W_s\Theta_1}{\Theta_s - \Theta_1} \quad y \quad Gw_s^w = \frac{Gw_s\Theta_s + Gw_1\Theta_1 - 2Gw_s\Theta_1}{\Theta_s - \Theta_1}$$

donde:

$$\Theta_1 = \left(1 + |\alpha^w s_1|^n\right)^{-m^w}$$

$$\Theta_s = \left(1 + |\alpha^w s_s|^n\right)^{-m^w}$$

CALCULOS PARA LAS CURVAS TEORICAS SECUNDARIA

Tabla 28. Parámetros y cálculos Teóricos de Gw por medio de la ecuación de Van Genuchten, para simulación de curvas característicad secundarias del suelo en estudio (tramo secado- humedecimiento y humedecimiento-secado).

| Secado-humedecimiento | | Humedecimiento-secado | |
|----------------------------------|-------------|----------------------------------|------------|
| α^w | 0.3000 | α^d | 0.1000 |
| n | 2.7000 | n | 2.0000 |
| S₁ | 100 | S₁ | 100 |
| S_s | 0.24 | S₂ | 4 |
| m | 0.62962963 | m | 0.5 |
| Θ_1 | 0.003082235 | Θ_1 | 0.09950372 |
| Θ_s | 0.999482879 | Θ_s | 0.92847669 |
| w₁ | 0.065 | w₁ | 0.065 |
| W_s | 0.47 | W₂ | 0.32 |
| W_r^w | 0.063747185 | W_r^w | 0.03439171 |
| W_s^w | 0.468747185 | W_s^w | 0.28939171 |

| humedecimiento (2) | | | | secado (3) | | | |
|--------------------|--------|--------|------------|------------|--------|--------|---------|
| PARAMETROS | | | | PARAMETROS | | | |
| α^w | 0.3000 | S_1 | w | α^d | 0.1000 | S_1 | w |
| η^w | 2.7000 | 100.00 | 0.064995 | η^d | 2.0000 | 1 | 0.31858 |
| w_r | 0.0637 | 60.00 | 0.066721 | w_r | 0.0344 | 1.5 | 0.31684 |
| w_s | 0.4687 | 55.00 | 0.067195 | w_s | 0.3200 | 3.50 | 0.30397 |
| S_s | 0.2400 | 50.00 | 0.067801 | S_2 | 4.0000 | 4.00 | 0.29957 |
| m | 0.6296 | 40.00 | 0.069670 | m | 0.5000 | 6.00 | 0.27930 |
| | | 30.00 | 0.073397 | | | 8.00 | 0.25741 |
| | | 10.00 | 0.124368 | | | 10.00 | 0.23635 |
| | | 8.00 | 0.150147 | | | 12.00 | 0.21723 |
| | | 4.00 | 0.283742 | | | 14.00 | 0.20040 |
| | | 2.00 | 0.415348 | | | 16.00 | 0.18576 |
| | | 1.00 | 0.459169 | | | 30.00 | 0.12471 |
| | | 0.28 | 0.468430 | | | 40.00 | 0.10366 |
| | | 0.15 | 0.46868828 | | | 50.00 | 0.09040 |
| | | 0.12 | 0.46871271 | | | 60.00 | 0.08135 |
| | | 0.056 | 0.46874307 | | | 70.00 | 0.07478 |
| | | | | | | 80.00 | 0.06982 |
| | | | | | | 90.00 | 0.06593 |
| | | | | | | 100.00 | 0.06281 |

Tabla 29. Deformación volumétrica-colapso (%) contra esfuerzo, experimental. Sheng, 2007.

| $e_o = 1.36$ | | $e_o = 1.28$ | | $e_o = 1.17$ | | $e_o = 1.05$ | |
|---------------------------------------|-----------|---------------------------------------|-----------|---------------------------------------|-----------|---------------------------------------|-----------|
| Deformación Volumétrica - Colapso (%) | p (kPa) | Deformación Volumétrica - Colapso (%) | p (kPa) | Deformación Volumétrica - Colapso (%) | p (kPa) | Deformación Volumétrica - Colapso (%) | p (kPa) |
| 3 | 20 | 2.5 | 29 | 0.9 | 20 | -0.1 | 20 |
| 4.2 | 49 | 3 | 49 | 2.3 | 98 | 0.8 | 98 |
| 5.2 | 98 | 3.4 | 98 | 2.4 | 196 | 0.04 | 392 |
| 4.2 | 196 | 3 | 196 | 0.9 | 588 | | |
| 3.5 | 392 | 2 | 392 | | | | |
| 1.8 | 588 | 1.5 | 588 | | | | |

Tabla 30. Deformación volumétrica-colapso (%) contra esfuerzo, teórica para $e_o=1.36$.

| TEÓRICA | | | | | |
|--------------|-------|-------|------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| $e_o = 1.36$ | | | | | |
| p (kPa) | e_o | e_f | Δe | Deformación Volumetrica - Colapso | Deformación Volumetrica - Colapso (%) |
| 20 | 1.36 | 1.3 | 0.06 | 0.03 | 3.1 |
| 49 | 1.24 | 1.16 | 0.08 | 0.04 | 4.5 |
| 98 | 1.26 | 1.14 | 0.12 | 0.05 | 5.31 |
| 196 | 1.17 | 1.09 | 0.08 | 0.04 | 3.69 |
| 392 | 1.11 | 1.07 | 0.04 | 0.02 | 1.90 |
| 588 | 1.04 | 1.01 | 0.03 | 0.01 | 1.47 |

Tabla 31. Deformación volumétrica-colapso (%) contra esfuerzo, teórica para $e_o=1.28$.

| TEÓRICA | | | | | |
|--------------|-------|-------|------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| $e_o = 1.28$ | | | | | |
| p (kPa) | e_o | e_f | Δe | Deformación Volumetrica - Colapso | Deformación Volumetrica - Colapso (%) |
| 29 | 1.19 | 1.13 | 0.06 | 0.03 | 2.6 |
| 49 | 1.18 | 1.09 | 0.09 | 0.04 | 4.13 |
| 98 | 1.24 | 1.13 | 0.11 | 0.05 | 4.91 |
| 196 | 1.13 | 1.06 | 0.07 | 0.03 | 3.29 |
| 392 | 1.05 | 1.01 | 0.04 | 0.02 | 1.95 |
| 588 | 0.97 | 0.95 | 0.02 | 0.01 | 1.02 |

Tabla 32. Deformación volumétrica-colapso (%) contra esfuerzo, teórica para $e_o=1.17$.

| TEÓRICA | | | | | |
|--------------|-------|-------|------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| $e_o = 1.17$ | | | | | |
| p (kPa) | e_o | e_f | Δe | Deformación Volumetrica - Colapso | Deformación Volumetrica - Colapso (%) |
| 20 | 1.16 | 0.98 | 0.18 | 0.08 | 0.85 |
| 98 | 1.17 | 1.11 | 0.057 | 0.03 | 2.6 |
| 196 | 1.06 | 1 | 0.06 | 0.03 | 2.91 |
| 588 | 0.96 | 0.93 | 0.03 | 0.02 | 1.53 |

Tabla 33. Deformación volumétrica-colapso (%) contra esfuerzo, teórica para $e_0=1.05$.

| TEÓRICA | | | | | |
|-------------|-------|-------|------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| $e_0= 1.05$ | | | | | |
| p (kPa) | e_0 | e_f | Δe | Deformación Volumetrica - Colapso | Deformación Volumetrica - Colapso (%) |
| 20 | 1.05 | 1.05 | 0 | 0.00 | 0 |
| 98 | 1.03 | 0.89 | 0.145 | 0.07 | 0.70 |
| 392 | 0.94 | 0.89 | 0.05 | 0.03 | 0.03 |

Tabla 34. Cálculos para curva característica de la bibliografía (Sheng, 2007) y su simulación con la ecuación de Van Genuchten mencionada en bibliografía de Huang,2005.

| $e_0=1.37$ | | $e_0=1.17$ | | $e_0=1.15$ | |
|------------|---------|------------|---------|------------|---------|
| Gw (%) | S (Kpa) | Gw (%) | S (Kpa) | Gw (%) | S (Kpa) |
| 80 | -10 | 92 | -10 | 92 | -10 |
| 70 | 50 | 90 | 10 | 90 | 10 |
| 57 | 100 | 83 | 25 | 83 | 25 |
| 55 | 150 | 76 | 50 | 76 | 50 |
| | | 70 | 75 | 70 | 75 |
| p=196 Kpa | | 67 | 110 | 67 | 110 |
| | | 66 | 145 | 66 | 145 |

p=196 Kpa p=196 Kpa

DATOS PARA CURVAS EXPERIMENTALES

| $e_0= 1.37$ | | | | $e_0=1.17$ | | | |
|-------------|-------|---------------|---------------|------------|------|---------------|---------------|
| p.abajo | | p.abajo | | p.abajo | | p.abajo | |
| Gw% | Gw | Succion (Kpa) | Succion (Mpa) | Gw% | Gw | Succion (Kpa) | Succion (Mpa) |
| 80 | 0.800 | -10 | -0.0100 | 92 | 0.92 | -10 | -0.01 |
| 70 | 0.700 | 50 | 0.0500 | 90 | 0.9 | 10 | 0.01 |
| 57 | 0.570 | 100 | 0.1000 | 83 | 0.83 | 25 | 0.025 |
| 55 | 0.550 | 150 | 0.1500 | 76 | 0.76 | 50 | 0.05 |
| | | | | 70 | 0.7 | 75 | 0.075 |
| | | | | 67 | 0.67 | 110 | 0.11 |
| | | | | 66 | 0.66 | 145 | 0.145 |

CURVAS TEÓRICAS

Tabla 35. CÁLCULOS PARA CURVAS TEORICAS PRIMARIAS y SECUNDARIAS.

$$Gw_1 = \left(1 + |\alpha * s_1|^\eta\right)^{-m} * (Gw_s - Gw_r) + Gw$$

Tabla 36. Parámetros y cálculos Teóricos de Gw por medio de la ecuación de Van Genuchten, para simulación de curva característica del suelo en estudio (tramo secado-humedecimiento y humedecimiento-secado).

| CALCULOS PARA CURVAS TEORICAS | | | | | | | | | |
|-------------------------------|----------------|--------------|--------------------|------------|----------------|--------------|-----------|---------------|---------|
| <u>PRIMARIAS</u> | | | | | | | | | |
| secado 1.39 | | | SECADO 1.17 | | | | | | |
| α^w | 20.1300 | s_1 | Gw | α^d | 34.0000 | s_1 | Gw | 0.025 | 0.85414 |
| η^w | 3.0000 | 0.15 | 0.57678 | η^d | 3.2000 | 0.15 | 0.68664 | 0.02 | 0.88134 |
| w_r | 0.5500 | 0.14 | 0.58057 | w_r | 0.6800 | 0.145 | 0.68715 | 0.015 | 0.90257 |
| w_s | 0.8000 | 0.13 | 0.58521 | w_s | 0.9200 | 0.14 | 0.68772 | 0.01 | 0.91491 |
| m | 0.6667 | 0.12 | 0.59093 | m | 0.6875 | 0.135 | 0.68836 | 0.005 | 0.91943 |
| | | 0.11 | 0.59808 | | | 0.13 | 0.68907 | 0 | 0.92000 |
| | | 0.1 | 0.60712 | | | 0.125 | 0.68988 | -0.005 | 0.91943 |
| | | 0.09 | 0.61867 | | | 0.12 | 0.69080 | -0.01 | 0.91491 |
| | | 0.08 | 0.63355 | | | 0.115 | 0.69185 | -0.015 | 0.90257 |
| | | 0.07 | 0.65270 | | | 0.11 | 0.69305 | -0.02 | 0.88134 |
| | | 0.06 | 0.67700 | | | 0.105 | 0.69443 | -0.025 | 0.85414 |
| | | 0.05 | 0.70647 | | | 0.1 | 0.69603 | | |
| | | 0.04 | 0.73894 | | | 0.095 | 0.69791 | | |
| | | 0.03 | 0.76893 | | | 0.09 | 0.70011 | | |
| | | 0.02 | 0.78968 | | | 0.085 | 0.70272 | | |
| | | 0.01 | 0.79865 | | | 0.08 | 0.70584 | | |
| | | -0.01 | 0.79865 | | | 0.075 | 0.70960 | | |
| | | | | | | 0.07 | 0.71417 | | |
| | | | | | | 0.065 | 0.71980 | | |
| | | | | | | 0.06 | 0.72677 | | |
| | | | | | | 0.055 | 0.73551 | | |
| | | | | | | 0.05 | 0.74653 | | |
| | | | | | | 0.045 | 0.76049 | | |
| | | | | | | 0.04 | 0.77808 | | |
| | | | | | | 0.035 | 0.79988 | | |

0.03 | 0.82576

Tabla 37. Datos para trazado de curvas de compresibilidad, bibliografía (Sheng, 2007) para $e_0=1.39$ con succión 147 Kpa.

| e_0 | succión (Kpa) | P sat |
|-------|---------------|-------|
| 1.39 | 147 | 392 |

| e_0 | succión (Kpa) | P sat |
|-------|---------------|-------|
| 1.39 | 147 | 588 |

| PUNTO | e | p (Kpa) |
|-------|-------|---------|
| 1 | 1.39 | 20 |
| 2 | 1.37 | 30 |
| 3 | 1.35 | 50 |
| 4 | 1.3 | 99 |
| 5 | 1.25 | 150 |
| 6 | 1.22 | 200 |
| 7 | 1.18 | 247 |
| 8 | 1.15 | 300 |
| 9 | 1.125 | 348 |
| 10 | 1.1 | 392 |
| 11 | 1.08 | 392 |
| 12 | 1.05 | 392 |

| PUNTO | e | p (Kpa) |
|-------|------|---------|
| 1 | 1.39 | 20 |
| 2 | 1.37 | 30 |
| 3 | 1.35 | 50 |
| 4 | 1.3 | 99 |
| 5 | 1.25 | 150 |
| 6 | 1.22 | 200 |
| 7 | 1.15 | 300 |
| 8 | 1.1 | 392 |
| 9 | 1.05 | 500 |
| 10 | 1.02 | 588 |
| 11 | 1.01 | 588 |
| 12 | 0.98 | 588 |

| e_0 | succión (Kpa) | P sat |
|-------|---------------|-------|
| 1.35 | 147 | 196 |

| e_0 | succión (Kpa) | P sat |
|-------------|---------------|-----------|
| 1.34 | 147 | 98 |

| PUNTO | e | p (Kpa) |
|-------|------|---------|
| 1 | 1.35 | 20 |
| 2 | 1.32 | 30 |
| 3 | 1.31 | 38 |
| 4 | 1.3 | 50 |
| 5 | 1.29 | 65 |
| 6 | 1.28 | 80 |
| 7 | 1.27 | 97 |
| 8 | 1.25 | 126 |
| 9 | 1.23 | 155 |
| 10 | 1.22 | 171 |
| 11 | 1.2 | 196 |
| 12 | 1.17 | 196 |

| PUNTO | e | p (Kpa) |
|-------|------|---------|
| 1 | 1.34 | 22 |
| 2 | 1.33 | 20 |
| 3 | 1.3 | 50 |
| 4 | 1.25 | 98 |
| 5 | 1.24 | 98 |
| 6 | 1.23 | 98 |
| 7 | 1.2 | 98 |
| 8 | 1.15 | 98 |
| 9 | 1.13 | 98 |
| 10 | 1.12 | 150 |
| 11 | 1.09 | 200 |

| | | |
|----|------|-----|
| 13 | 1.12 | 196 |
|----|------|-----|

| | | |
|----------------------|----------------------|--------------|
| e_o | succión (Kpa) | P sat |
| 1.34 | 147 | 49 |

| | | |
|----------------------|----------------------|--------------|
| e_o | succión (Kpa) | P sat |
| 1.33 | 147 | 20 |

| PUNTO | e | p (Kpa) |
|--------------|----------|----------------|
| 1 | 1.34 | 22 |
| 2 | 1.33 | 20 |
| 3 | 1.33 | 21 |
| 4 | 1.3 | 49 |
| 5 | 1.29 | 49 |
| 6 | 1.24 | 49 |
| 7 | 1.21 | 48 |
| 8 | 1.17 | 99 |
| 9 | 1.1 | 199 |
| 10 | 1.04 | 348 |
| 11 | 0.98 | 598 |

| PUNTO | e | p (Kpa) |
|--------------|----------|----------------|
| 1 | 1.29 | 22 |
| 2 | 1.3 | 20 |
| 3 | 1.3 | 21 |
| 4 | 1.29 | 18 |
| 5 | 1.24 | 46 |
| 6 | 1.18 | 99 |
| 7 | 1.11 | 200 |
| 8 | 1.04 | 398 |

Tabla 38. Datos para trazado de curvas de compresibilidad, bibliografía (Sheng, 2007) para e₀=1.28 con succión 147 Kpa.

| | | |
|----------------------|----------------------|--------------|
| e_o | succión (Kpa) | P sat |
| 1.29 | 147 | 29 |

| | | |
|----------------------|----------------------|--------------|
| e_o | succión (Kpa) | P sat |
| 1.27 | 147 | 49 |

| PUNTO | e | p (Kpa) |
|--------------|----------|----------------|
| 1 | 1.29 | 22 |
| 2 | 1.26 | 18 |
| 3 | 1.25 | 20 |
| 4 | 1.24 | 29 |
| 5 | 1.18 | 29 |
| 6 | 1.17 | 39 |
| 7 | 1.16 | 55 |
| 8 | 1.15 | 69 |
| 9 | 1.14 | 89 |
| 10 | 1.12 | 150 |

| PUNTO | e | p (Kpa) |
|--------------|----------|----------------|
| 1 | 1.28 | 20 |
| 2 | 1.25 | 49 |
| 3 | 1.17 | 49 |
| 4 | 1.14 | 100 |
| 5 | 1.11 | 152 |
| 6 | 1.08 | 200 |

| | | |
|----|------|-----|
| 11 | 1.1 | 180 |
| 12 | 1.08 | 200 |

| | | |
|----------------------|----------------------|--------------|
| e_o | succión (Kpa) | P sat |
| 1.26 | 147 | 98 |

| | | |
|--------------|----------|----------------|
| PUNTO | e | p (Kpa) |
| 1 | 1.26 | 20 |
| 2 | 1.25 | 49 |
| 3 | 1.24 | 49 |
| 4 | 1.2 | 98 |
| 5 | 1.14 | 98 |

| | | |
|----------------------|----------------------|--------------|
| e_o | succión (Kpa) | P sat |
| 1.28 | 147 | 392 |

| | | |
|--------------|----------|----------------|
| PUNTO | e | p (Kpa) |
| 1 | 1.28 | 22 |
| 2 | 1.27 | 22 |
| 3 | 1.24 | 50 |
| 4 | 1.22 | 100 |
| 5 | 1.18 | 200 |
| 6 | 1.07 | 392 |
| 7 | 1.06 | 392 |
| 8 | 1.05 | 392 |
| 9 | 1.03 | 392 |
| 10 | 1.02 | 392 |

| | | |
|----------------------|----------------------|--------------|
| e_o | succión (Kpa) | P sat |
| 1.28 | 147 | 196 |

| | | |
|--------------|----------|----------------|
| PUNTO | e | p (Kpa) |
| 1 | 1.28 | 18 |
| 2 | 1.27 | 17 |
| 3 | 1.26 | 48 |
| 4 | 1.22 | 98 |
| 5 | 1.20 | 150 |
| 6 | 1.18 | 196 |
| 7 | 1.15 | 196 |
| 8 | 1.12 | 196 |
| 9 | 1.10 | 196 |

| | | |
|----------------------|----------------------|--------------|
| e_o | succión (Kpa) | P sat |
| 1.28 | 147 | 588 |

| | | |
|--------------|----------|----------------|
| PUNTO | e | p (Kpa) |
| 1 | 1.28 | 18 |
| 2 | 1.24 | 45 |
| 3 | 1.22 | 95 |
| 4 | 1.17 | 199 |
| 5 | 1.11 | 350 |
| 6 | 1.06 | 500 |
| 7 | 1.03 | 588 |
| 8 | 1.02 | 588 |
| 9 | 1.015 | 588 |
| 10 | 1.01 | 588 |
| 11 | 1 | 588 |
| 12 | 0.98 | 700 |
| 13 | 0.975 | 703 |

Tabla 39. Datos para trazado de curvas de compresibilidad, bibliografía (Sheng, 2007) para $e_0=1.17$ con succión 147 Kpa.

| e_0 | succión (Kpa) | P sat |
|-------|---------------|-------|
| 1.16 | 147 | 20 |

| PUNTO | e | p (Kpa) |
|-------|------|---------|
| 1 | 1.15 | 20 |
| 2 | 1.13 | 30 |
| 3 | 1.12 | 39 |
| 4 | 1.10 | 60 |
| 5 | 1.09 | 80 |
| 6 | 1.08 | 120 |
| 7 | 1.06 | 140 |
| 8 | 1.06 | 160 |
| 9 | 1.04 | 200 |
| 10 | 1.01 | 250 |
| 11 | 0.99 | 300 |
| 12 | 0.96 | 400 |
| 13 | 0.92 | 600 |
| 14 | 0.88 | 750 |

| e_0 | succión (Kpa) | P sat |
|-------|---------------|-------|
| 1.17 | 147 | 98 |

| PUNTO | e | p (Kpa) |
|-------|------|---------|
| 1 | 1.18 | 20 |
| 2 | 1.17 | 16 |
| 3 | 1.16 | 20 |
| 4 | 1.14 | 39 |
| 5 | 1.11 | 69 |
| 6 | 1.08 | 100 |
| 7 | 1.07 | 100 |
| 8 | 1.06 | 150 |
| 9 | 1.01 | 250 |
| 10 | 0.93 | 550 |
| 11 | 0.89 | 700 |

| e_0 | succión (Kpa) | P sat |
|-------|---------------|-------|
| 1.17 | 147 | 196 |

| PUNTO | e | p (Kpa) |
|-------|------|---------|
| 1 | 1.14 | 22 |
| 2 | 1.13 | 52 |
| 3 | 1.10 | 100 |
| 4 | 1.08 | 152 |
| 5 | 1.07 | 196 |
| 6 | 1.06 | 196 |
| 7 | 1.05 | 196 |
| 8 | 1.02 | 196 |
| 9 | 0.98 | 300 |
| 10 | 0.93 | 500 |

| e_0 | succión (Kpa) | P sat |
|-------|---------------|-------|
| 1.17 | 147 | 588 |

| PUNTO | e | p (Kpa) |
|-------|------|---------|
| 1 | 1.16 | 18 |
| 2 | 1.14 | 49 |
| 3 | 1.12 | 98 |
| 4 | 1.09 | 152 |
| 5 | 1.08 | 198 |
| 6 | 1.03 | 298 |
| 7 | 1.00 | 398 |
| 8 | 0.97 | 498 |
| 9 | 0.95 | 588 |
| 10 | 0.94 | 588 |
| 11 | 0.94 | 588 |
| 12 | 0.93 | 588 |

Tabla 40. Datos para trazado de curvas de compresibilidad, bibliografía (Sheng, 2007) para $e_0=1.05$ con succión 147 Kpa.

| e_0 | succión (Kpa) | P sat |
|-------|---------------|-------|
| 1.05 | 147 | 20 |

| PUNTO | e | p (Kpa) |
|-------|-------|---------|
| 1 | 1.05 | 20 |
| 2 | 1.07 | 22 |
| 3 | 1.06 | 31 |
| 4 | 1.045 | 48 |
| 5 | 1.03 | 70 |
| 6 | 1.02 | 100 |
| 7 | 1.01 | 140 |
| 8 | 0.98 | 160 |
| 9 | 0.97 | 200 |
| 10 | 0.96 | 250 |
| 11 | 0.955 | 300 |
| 12 | 0.935 | 398 |
| 13 | 0.905 | 550 |
| 14 | 0.877 | 700 |
| 15 | 0.875 | 650 |

| e_0 | succión (Kpa) | P sat |
|-------|---------------|-------|
| 1.03 | 147 | 98 |

| PUNTO | e | p (Kpa) |
|-------|-------|---------|
| 1 | 1.025 | 21 |
| 2 | 1.025 | 20 |
| 3 | 1.01 | 40 |
| 4 | 0.98 | 70 |
| 5 | 0.975 | 95 |
| 6 | 0.975 | 98 |
| 7 | 0.96 | 155 |
| 8 | 0.951 | 200 |
| 9 | 0.94 | 300 |
| 10 | 0.9 | 440 |
| 11 | 0.875 | 600 |
| 12 | 0.86 | 700 |

| e_0 | succión (Kpa) | P sat |
|-------|---------------|-------|
| 1.07 | 147 | 392 |

| PUNTO | e | p (Kpa) |
|-------|--------|---------|
| 1 | 1.06 | 19 |
| 2 | 1.06 | 18 |
| 3 | 1.055 | 40 |
| 4 | 1.045 | 69 |
| 5 | 1.025 | 120 |
| 6 | 0.99 | 198 |
| 7 | 0.96 | 298 |
| 8 | 0.9257 | 392 |
| 9 | 0.9256 | 392 |
| 10 | 0.9255 | 392 |
| 11 | 0.925 | 392 |
| 12 | 0.9 | 540 |

Tabla 41. Parámetros utilizados con la ecuación propuesta para el cálculo de la deformación volumétrica con respecto a la relación de vacíos.

| DATOS Y PARAMETROS | | | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|-------|-----|--|--|
| Aprox Gw | X | 0.75 | | | |
| Succión | S | 0.396 | Mpa | | |
| Rel.vac.inicial | e_o | 1.06 | | | |
| Vol. Esp. Inicial | Vo | 2.06 | | | |
| P adicional de fabricacion | P_{fab} | 0.15 | Mpa | | |
| | X_oS_o | 0.297 | | | |

| DEFORMACIÓN VOLUMETRICA | | | | | |
|--------------------------------|---------------|----------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| P(Kpa) | P(Mpa) | P'(Mpa) | factor utilizado | e_{teórica} | e_{experimental} |
| 19 | 0.02 | 0.45 | κ | 1.06 | 1.06 |
| 18 | 0.02 | 0.47 | κ | 1.06 | 1.06 |
| 40 | 0.04 | 0.49 | κ | 1.06 | 1.06 |
| 69 | 0.07 | 0.52 | κ | 1.06 | 1.05 |
| 120 | 0.12 | 0.57 | λ | 1.04 | 1.03 |
| 198 | 0.20 | 0.65 | λ | 1.01 | 0.99 |
| 298 | 0.30 | 0.75 | λ | 0.98 | 0.96 |
| 392 | 0.39 | 0.84 | λ | 0.96 | 0.94 |
| 392 | 0.39 | 0.54 | λ | 0.88 | 0.89 |

| DATOS Y PARAMETROS | | | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|---------|-----|--|--|
| Aprox Gw | X | 0.75 | | | |
| Succión | S | 0.147 | Mpa | | |
| Rel.vac.inicial | e_o | 1.17 | | | |
| Vol. Esp. Inicial | Vo | 2.17 | | | |
| P adicional de fabricacion | P_{fab} | 0.09 | Mpa | | |
| | X_oS_o | 0.11025 | | | |

DEFORMACIÓN VOLUMETRICA

| P(Kpa) | P(Mpa) | P'(Mpa) | factor utilizado | e _{teórica} | e _{experimental} |
|--------|--------|---------|------------------|----------------------|---------------------------|
| 22 | 0.02 | 0.20 | | 1.17 | 1.17 |
| 52 | 0.05 | 0.25 | κ | 1.16 | 1.13 |
| 100 | 0.10 | 0.30 | λ | 1.12 | 1.10 |
| 152 | 0.15 | 0.35 | λ | 1.09 | 1.08 |
| 196 | 0.20 | 0.40 | λ | 1.06 | 1.07 |
| 196 | 0.20 | 0.29 | λ | 1.00 | 1.01 |

DATOS Y PARAMETROS

| | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|---------|-----|
| Aprox Gw | X | 0.75 | |
| Succión | S | 0.147 | Mpa |
| Rel.vac.inicial | e_o | 1.17 | |
| Vol. Esp. Inicial | Vo | 2.17 | |
| P adicional de fabricacion | P_{fab} | 0.09 | Mpa |
| | X_oS_o | 0.11025 | |

DEFORMACIÓN VOLUMETRICA

| P(Kpa) | P(Mpa) | P'(Mpa) | factor utilizado | e _{teórica} | e _{experimental} |
|--------|--------|---------|------------------|----------------------|---------------------------|
| 18 | 0.02 | 0.20 | | 1.17 | 1.17 |
| 49 | 0.05 | 0.25 | κ | 1.16 | 1.14 |
| 98 | 0.10 | 0.30 | κ | 1.16 | 1.12 |
| 152 | 0.15 | 0.35 | λ | 1.12 | 1.09 |
| 198 | 0.20 | 0.40 | λ | 1.09 | 1.08 |
| 298 | 0.30 | 0.50 | λ | 1.05 | 1.03 |
| 398 | 0.40 | 0.60 | λ | 1.01 | 1.00 |
| 498 | 0.50 | 0.70 | λ | 0.98 | 0.97 |
| 588 | 0.59 | 0.79 | λ | 0.96 | 0.95 |
| 588 | 0.59 | 0.68 | λ | 0.93 | 0.93 |

DATOS Y PARAMETROS

| | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|---------|-----|
| Zona elástica | κ | -0.03 | |
| Zona plástica | λ | -0.1956 | |
| Aprox Gw | χ | 0.6 | |
| Succión | S | 0.147 | Mpa |
| Rel.vac.inicial | e_o | 1.35 | |
| Vol. Esp. Inicial | Vo | 2.35 | |
| P adicional de fabricacion | P_{fab} | 0.03 | Mpa |
| | X_oS_o | 0.0882 | |

DEFORMACIÓN VOLUMETRICA

| P(Kpa) | P(Mpa) | P'(Mpa) | factor utilizado | e | e exper |
|--------|--------|---------|------------------|------|---------|
| 20 | 0.0200 | 0.1182 | κ | 1.35 | 1.35 |
| 30 | 0.0300 | 0.1482 | κ | 1.34 | 1.32 |
| 38 | 0.0380 | 0.1562 | κ | 1.34 | 1.31 |
| 50 | 0.0500 | 0.1682 | λ | 1.32 | 1.30 |
| 65 | 0.0650 | 0.1832 | λ | 1.30 | 1.29 |
| 80 | 0.0800 | 0.1982 | λ | 1.28 | 1.28 |
| 97 | 0.0970 | 0.2152 | λ | 1.26 | 1.27 |
| 126 | 0.1260 | 0.2442 | λ | 1.23 | 1.25 |
| 155 | 0.1550 | 0.2732 | λ | 1.20 | 1.23 |
| 171 | 0.1710 | 0.2892 | λ | 1.19 | 1.22 |
| 196 | 0.1960 | 0.3142 | λ | 1.17 | 1.20 |
| 196 | 0.1960 | 0.2260 | λ | 1.09 | 1.12 |

DATOS Y PARAMETROS

| | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|---------|-----|
| Zona elástica | κ | -0.03 | |
| Zona plástica | λ | -0.1956 | |
| Aprox Gw | χ | 0.6 | |
| Succión | S | 0.147 | Mpa |
| Rel.vac.inicial | e_o | 1.34 | |
| Vol. Esp. Inicial | Vo | 2.34 | |
| P adicional de fabricacion | P_{fab} | 0.03 | Mpa |
| | X_oS_o | 0.0882 | |

DEFORMACIÓN VOLUMETRICA

| P(Kpa) | P(Mpa) | P'(Mpa) | factor utilizado | e_{teórica} | e_{experimental} |
|---------------|---------------|----------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 22.00 | 0.02 | 0.12 | κ | 1.34 | 1.34 |
| 20.00 | 0.02 | 0.14 | κ | 1.33 | 1.33 |
| 50.00 | 0.05 | 0.17 | κ | 1.33 | 1.30 |
| 98.00 | 0.10 | 0.22 | λ | 1.26 | 1.25 |
| 98.00 | 0.10 | 0.13 | λ | 1.14 | 1.13 |

DATOS Y PARAMETROS

| | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|---------|-----|
| Zona elástica | κ | -0.03 | |
| Zona plástica | λ | -0.1956 | |
| Aprox Gw | χ | 0.6 | |
| Succión | S | 0.147 | Mpa |
| Rel.vac.inicial | e_o | 1.39 | |
| Vol. Esp. Inicial | Vo | 2.39 | |
| P adicional de fabricacion | P_{fab} | 0.03 | Mpa |
| | χ_oS_o | 0.0882 | |

DEFORMACIÓN VOLUMETRICA

| P(Kpa) | P(Mpa) | P'(Mpa) | factor utilizado | e_{teórica} | e_{experimental} |
|---------------|---------------|----------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 20 | 0.02 | 0.12 | κ | 1.39 | 1.39 |
| 30 | 0.03 | 0.15 | κ | 1.38 | 1.37 |
| 50 | 0.05 | 0.17 | κ | 1.38 | 1.35 |
| 99 | 0.10 | 0.22 | λ | 1.31 | 1.30 |
| 150 | 0.15 | 0.27 | λ | 1.26 | 1.25 |
| 200 | 0.20 | 0.32 | λ | 1.21 | 1.22 |
| 247 | 0.25 | 0.37 | λ | 1.18 | 1.18 |
| 300 | 0.30 | 0.42 | λ | 1.15 | 1.15 |
| 348 | 0.35 | 0.47 | λ | 1.13 | 1.13 |
| 392 | 0.39 | 0.51 | λ | 1.11 | 1.10 |
| 392 | 0.39 | 0.42 | λ | 1.07 | 1.05 |

DATOS Y PARAMETROS

| | | | |
|----------------------------|--------------------------------|---------|---------|
| Zona elástica | κ | -0.03 | |
| Zona plástica | λ | -0.1956 | |
| Aprox Gw | χ | 0.6 | |
| Succión | S | 0.147 | Mpa 147 |
| Rel.vac.inicial | e_o | 1.39 | |
| Vol. Esp. Inicial | Vo | 2.39 | |
| P adicional de fabricacion | P_{fab} | 0.03 | Mpa |
| | $\chi_o S_o$ | 0.0882 | |

DEFORMACIÓN VOLUMETRICA

| P(Kpa) | P(Mpa) | P'(Mpa) | factor utilizado | $e_{teórica}$ | $e_{experimental}$ |
|--------|--------|---------|------------------|---------------|--------------------|
| 20 | 0.02 | 0.12 | κ | 1.39 | 1.39 |
| 30 | 0.03 | 0.15 | κ | 1.38 | 1.37 |
| 50 | 0.05 | 0.17 | κ | 1.38 | 1.35 |
| 99 | 0.10 | 0.22 | λ | 1.31 | 1.30 |
| 150 | 0.15 | 0.27 | λ | 1.26 | 1.25 |
| 200 | 0.20 | 0.32 | λ | 1.21 | 1.22 |
| 300 | 0.30 | 0.42 | λ | 1.15 | 1.15 |
| 392 | 0.39 | 0.51 | λ | 1.11 | 1.10 |
| 500 | 0.50 | 0.62 | λ | 1.07 | 1.05 |
| 588 | 0.59 | 0.71 | λ | 1.04 | 1.02 |
| 588 | 0.59 | 0.62 | λ | 1.01 | 0.98 |

DATOS Y PARAMETROS

| | | | |
|----------------------------|--------------------------------|--------|-----|
| Zona elástica | κ | κ | |
| Zona plástica | λ | λ | |
| Aprox Gw | χ | 0.6 | |
| Succión | S | 0.147 | Mpa |
| Rel.vac.inicial | e_o | 1.39 | |
| Vol. Esp. Inicial | Vo | 2.39 | |
| P adicional de fabricacion | P_{fab} | 0.03 | Mpa |
| | $\chi_o S_o$ | 0.0882 | |

DEFORMACIÓN VOLUMETRICA

| P(Kpa) | P(Mpa) | P'(Mpa) | factor utilizado | $e_{teórica}$ | $e_{experimental}$ |
|--------|--------|---------|------------------|---------------|--------------------|
| 20 | 0.02 | 0.12 | κ | 1.39 | 1.39 |
| 30 | 0.03 | 0.15 | κ | 1.38 | 1.37 |
| 50 | 0.05 | 0.17 | κ | 1.38 | 1.35 |
| 99 | 0.10 | 0.22 | λ | 1.31 | 1.30 |
| 150 | 0.15 | 0.27 | λ | 1.26 | 1.25 |
| 200 | 0.20 | 0.32 | λ | 1.21 | 1.22 |
| 300 | 0.30 | 0.42 | λ | 1.15 | 1.15 |
| 392 | 0.39 | 0.51 | λ | 1.11 | 1.10 |
| 500 | 0.50 | 0.62 | λ | 1.07 | 1.05 |
| 588 | 0.59 | 0.71 | λ | 1.04 | 1.02 |
| 588 | 0.59 | 0.62 | λ | 1.01 | 0.98 |

DATOS Y PARAMETROS

| | | | |
|----------------------------|-----------------------------|---------|-----|
| Aprox Gw | X | 0.68 | |
| Succión | S | 0.147 | Mpa |
| Rel.vac.inicial | e_o | 1.28 | |
| Vol. Esp. Inicial | V_o | 2.28 | |
| P adicional de fabricacion | P_{fab} | 0.06 | Mpa |
| | $X_o S_o$ | 0.09996 | |

DEFORMACIÓN VOLUMETRICA

| P(Kpa) | P(Mpa) | P'(Mpa) | factor utilizado | $e_{teórica}$ | $e_{experimental}$ |
|--------|--------|---------|------------------|---------------|--------------------|
| 18 | 0.02 | 0.16 | κ | 1.27 | 1.27 |
| 20 | 0.02 | 0.18 | κ | 1.27 | 1.27 |
| 48 | 0.05 | 0.21 | κ | 1.26 | 1.26 |
| 98 | 0.10 | 0.26 | λ | 1.21 | 1.22 |
| 150 | 0.15 | 0.31 | λ | 1.17 | 1.20 |
| 196 | 0.20 | 0.36 | λ | 1.13 | 1.18 |
| 196 | 0.20 | 0.26 | λ | 1.06 | 1.15 |

DATOS Y PARAMETROS

| | | | |
|----------------------------|------------------------|-------|-----|
| Aprox Gw | X | 0.68 | |
| Succión | S | 0.147 | Mpa |
| Rel.vac.inicial | e_o | 1.28 | |
| Vol. Esp. Inicial | Vo | 2.28 | |
| P adicional de fabricacion | P_{fab} | 0.06 | Mpa |

DEFORMACIÓN VOLUMETRICA

| P(Kpa) | P(Mpa) | P'(Mpa) | factor utilizado | e_{teórica} | e_{experimental} |
|---------------|---------------|----------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 22 | 0.02 | 0.18 | | 1.28 | 1.28 |
| 22 | 0.02 | 0.18 | κ | 1.28 | 1.27 |
| 50 | 0.05 | 0.21 | κ | 1.27 | 1.24 |
| 100 | 0.10 | 0.26 | λ | 1.22 | 1.22 |
| 200 | 0.20 | 0.36 | λ | 1.15 | 1.18 |
| 392 | 0.39 | 0.55 | λ | 1.05 | 1.07 |
| 392 | 0.39 | 0.45 | λ | 1.01 | 1.02 |

DATOS Y PARAMETROS

| | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|---------|-----|
| Aprox Gw | X | 0.68 | |
| Succión | S | 0.147 | Mpa |
| Rel.vac.inicial | e_o | 1.24 | |
| Vol. Esp. Inicial | Vo | 2.24 | |
| P adicional de fabricacion | P_{fab} | 0.06 | Mpa |
| | X_oS_o | 0.09996 | |

DEFORMACIÓN VOLUMETRICA

| P(Kpa) | P(Mpa) | P'(Mpa) | factor utilizado | e_{teórica} | e_{experimental} |
|---------------|---------------|----------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 18 | 0.02 | 0.18 | | 1.28 | 1.28 |
| 45 | 0.05 | 0.20 | λ | 1.25 | 1.24 |
| 95 | 0.10 | 0.25 | λ | 1.19 | 1.22 |
| 199 | 0.20 | 0.36 | λ | 1.12 | 1.17 |
| 350 | 0.35 | 0.51 | λ | 1.04 | 1.11 |
| 500 | 0.50 | 0.66 | λ | 0.99 | 1.06 |
| 588 | 0.59 | 0.75 | λ | 0.97 | 1.03 |
| 588 | 0.59 | 0.69 | λ | 0.95 | 1.00 |

DATOS Y PARAMETROS

| | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|---------|-----|
| Aprox Gw | X | 0.68 | |
| Succión | S | 0.147 | Mpa |
| Rel.vac.inicial | e_o | 1.24 | |
| Vol. Esp. Inicial | V_o | 2.35 | |
| P adicional de fabricacion | P_{fab} | 0.06 | Mpa |
| | X_oS_o | 0.09996 | |

DEFORMACIÓN VOLUMETRICA

| P(Kpa) | P(Mpa) | P'(Mpa) | factor utilizado | e _{teórica} | e _{experimental} |
|--------|--------|---------|------------------|----------------------|---------------------------|
| 20 | 0.02 | 0.18 | | 1.27 | 1.27 |
| 49 | 0.05 | 0.21 | λ | 1.23 | 1.25 |
| 49 | 0.05 | 0.11 | λ | 1.09 | 1.08 |

CÁLCULOS DE LABORATORIO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE COMPRESIBILIDAD PARA EL SUELO DE ESTA TESIS CLASIFICADO COMO MH.

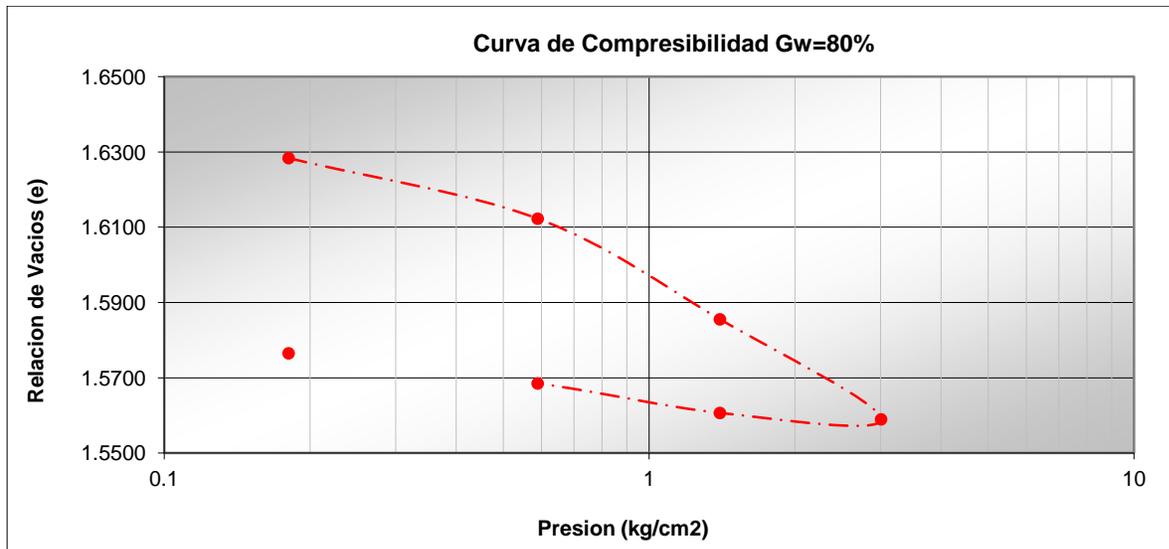


Figura 0.2 Curva de compresibilidad, Gw=80%.

Tabla 42. Resumen de resultados para obtención de grafica de consolidación, $G_w=80\%$, en secado.

| RESUMEN DE LA PRUEBA | | | | | | | | | |
|----------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|----------|--------------|---------|--------------|------------|--------------------------------|
| carga | carga aplicada (Kg) | Incremento de presión | Presión Total (kg) | dh | altura final | de | e (al final) | Δp | σ (Kg/cm ²) |
| insitu | 0.794 | 0.794 | 0.794 | 9.97E-02 | 1.9303 | 0.0841 | 1.6284 | 0.794 | 0.18069 |
| dp1 | 1.797 | 1.797 | 2.591 | 1.91E-02 | 1.9112 | 0.0161 | 1.6123 | 2.591 | 0.58962 |
| dp2 | 3.565 | 3.5652 | 6.156 | 0.0317 | 1.8795 | 0.0267 | 1.5855 | 6.1562 | 1.40094 |
| dp3 | 7.080 | 7.0802 | 13.236 | 0.0315 | 1.8480 | 0.0266 | 1.5590 | 13.2364 | 3.01215 |
| desc1 | -7.080 | -7.08 | 6.156 | -0.0020 | 1.8500 | -0.0017 | 1.5606 | 6.1562 | 1.40094 |
| desc2 | -3.565 | -3.565 | 2.591 | -0.0093 | 1.8593 | -0.0078 | 1.5685 | 2.591 | 0.58962 |
| desc3 | -1.797 | -1.797 | 0.794 | -0.0095 | 1.8688 | -0.0080 | 1.5765 | 0.794 | 0.18069 |
| des insitu | -0.794 | -0.794 | 0.000 | -0.0095 | 1.8783 | -0.0080 | 1.5845 | 0 | 0 |

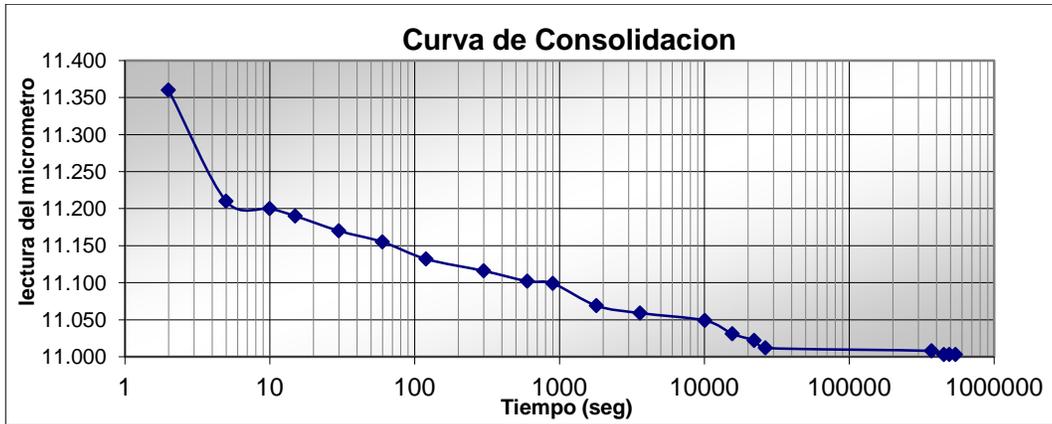
Tabla 43. Datos iniciales antes de prueba odométrica para muestra con $G_w=80\%$

| Testigo de Humedad | | | | | |
|--------------------|--------|----------|--------|--------------|-------|
| Flanera | b2 | W_{mh} | 139.66 | W_w (g) | 39.82 |
| $W_{flanera}$ | 116.66 | W_{ms} | 99.84 | W_s (g) | 99.84 |
| W_{fl+mh} | 256.32 | W_w | 39.82 | ω (%) | 39.9 |
| W_{fla+ms} | 216.5 | ω | 39.88 | S_s | 2.65 |

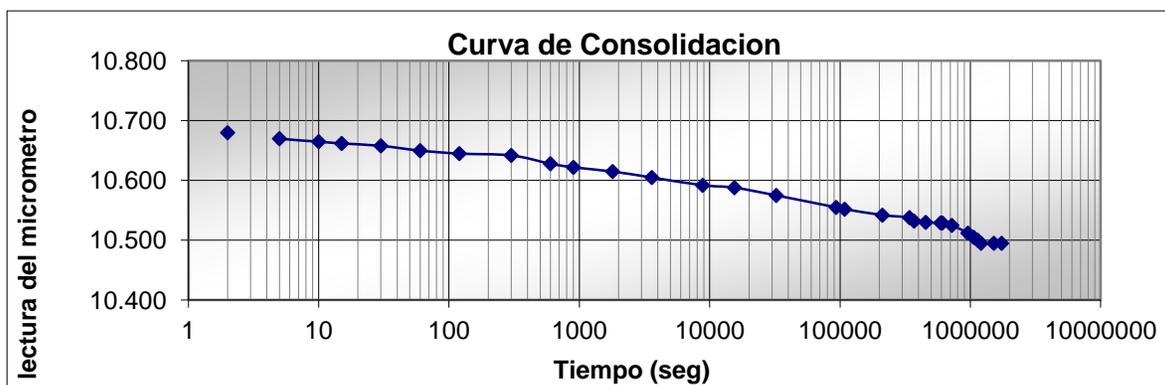
| Datos Iniciales | | | |
|------------------------------------|--------|-------------------------|-------|
| Anillo No. | 5 | Relacion Brazo | 10 |
| Peso Anillo (g) | 103.17 | | |
| Peso Anillo + Muestra (g) | 209.48 | Altura Anillo (cm) | 2.03 |
| Peso Anillo + Muestra Saturado (g) | 330.35 | Diametro (cm) | 7.48 |
| | | Area (cm ²) | 43.94 |

| Antes de la Consolidacion | | | |
|---------------------------|--------|--|-------|
| Peso Muestra W_m (g) | 139.66 | Volumen Muestra V_m (cm ³) | 89.20 |
| Peso Solidos W_s (g) | 99.84 | Volumen Solidos V_s (cm ³) | 37.68 |
| Peso Agua W_w (g) | 39.82 | Volumen Vacios V_v (cm ³) | 51.53 |
| | | Contenido Agua ω (%) | 39.88 |
| | | Relacion Vacios e_o | 1.628 |
| | | Grado Saturacion G_w (%) | 77.28 |

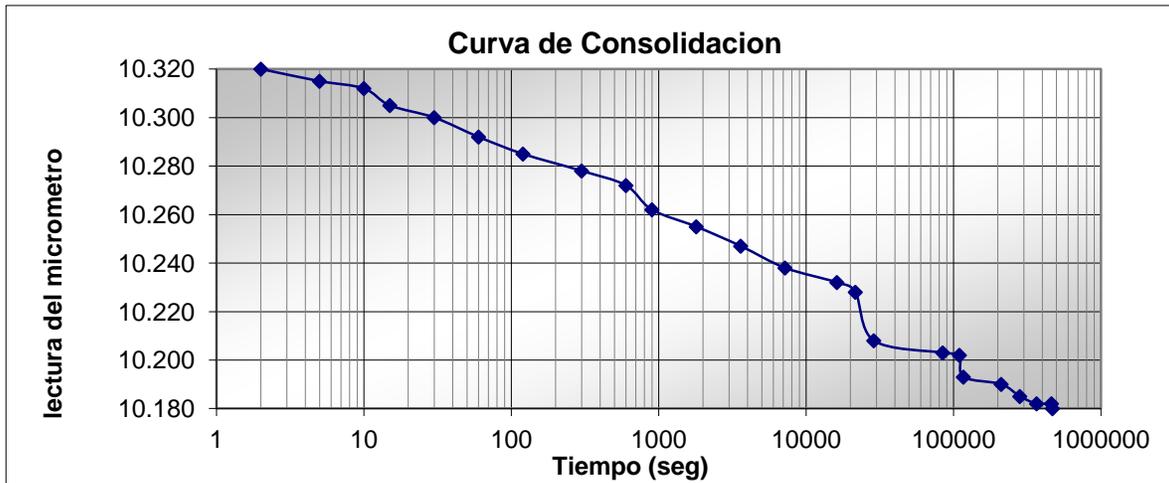
Tabla 44. Curvas de compresibilidad para las diferentes cargas aplicadas en la prueba
Gw=80%



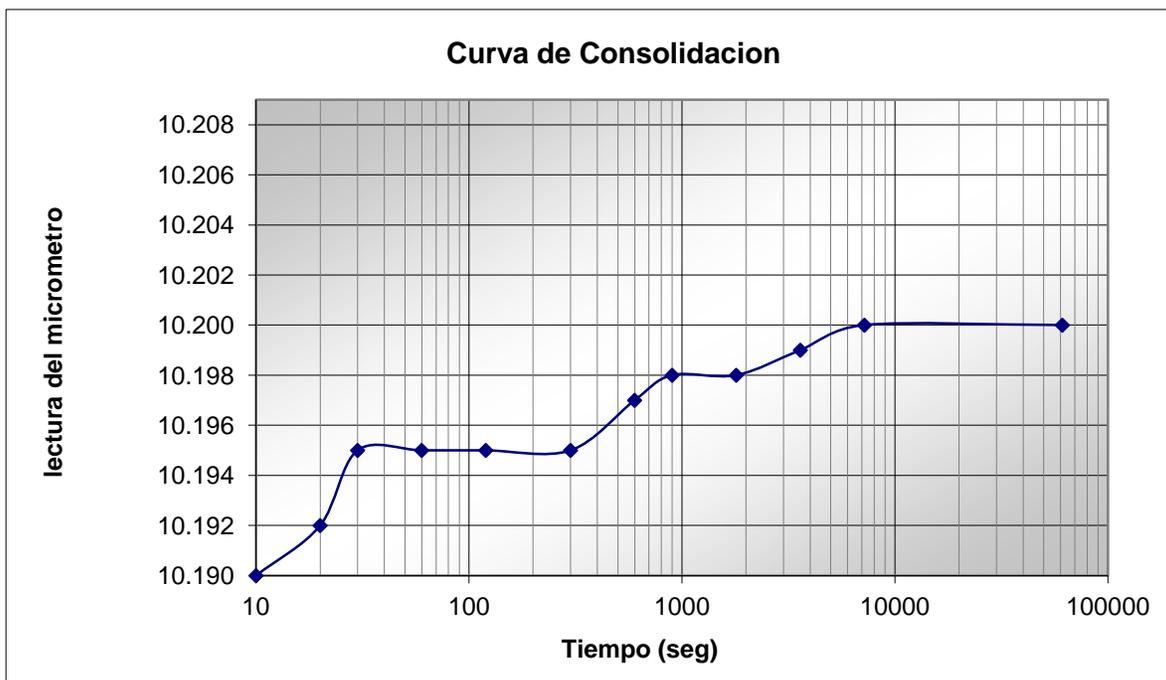
| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | | |
|---|--------|---------|-----|---------------------|--------------|---------------|-----------------------------|-------------------|----------|
| Carga 1 | | 1003 gr | | SUMA | | 1797 gr | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (ton/m ²) | | 7.8966 | | L _o (mm) | | 19.303 | | | |
| | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | $\delta_{\text{corregida}}$ | Dism. Altura (cm) | |
| | Horas | Minutos | Seg | | | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 11.003 | 19.303 | 19.303 | 0.00E+00 |
| | | | | 2 | 2 | 10.940 | 19.240 | 19.240 | 6.30E-03 |
| | | | | 5 | 5 | 10.920 | 19.220 | 19.220 | 8.30E-03 |
| | | | | 10 | 10 | 10.920 | 19.220 | 19.220 | 8.30E-03 |
| | | | | 15 | 15 | 10.912 | 19.212 | 19.212 | 9.10E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 10.912 | 19.212 | 19.212 | 9.10E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 10.912 | 19.212 | 19.212 | 9.10E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 10.910 | 19.210 | 19.210 | 9.30E-03 |
| | | | 5 | | 300 | 10.905 | 19.205 | 19.205 | 9.80E-03 |
| | | | 11 | | 660 | 10.898 | 19.198 | 19.198 | 1.05E-02 |
| | | | 15 | | 900 | 10.898 | 19.198 | 19.198 | 1.05E-02 |
| | | | 30 | | 1800 | 10.889 | 19.189 | 19.189 | 1.14E-02 |
| | | 1 | 9 | | 4140 | 10.880 | 19.180 | 19.180 | 1.23E-02 |
| | | 2 | | | 7200 | 10.872 | 19.172 | 19.172 | 1.31E-02 |
| | | 4 | 8 | | 14880 | 10.862 | 19.162 | 19.162 | 1.41E-02 |
| | | 6 | 30 | | 23400 | 10.855 | 19.155 | 19.155 | 1.48E-02 |
| | | 9 | 51 | | 35460 | 10.850 | 19.150 | 19.150 | 1.53E-02 |
| | | 12 | 33 | | 45180 | 10.850 | 19.150 | 19.150 | 1.53E-02 |
| | | 15 | 20 | | 55200 | 10.840 | 19.140 | 19.140 | 1.63E-02 |
| | | 37 | 8 | | 133680 | 10.830 | 19.130 | 19.130 | 1.73E-02 |
| | | 58 | 11 | | 209460 | 10.826 | 19.126 | 19.126 | 1.77E-02 |
| | | 80 | 42 | | 290520 | 10.822 | 19.122 | 19.122 | 1.81E-02 |
| | | 82 | 56 | | 298560 | 10.821 | 19.121 | 19.121 | 1.82E-02 |
| | | 100 | 45 | | 362700 | 10.819 | 19.119 | 19.119 | 1.84E-02 |
| | | 104 | 25 | | 375900 | 10.819 | 19.119 | 19.119 | 1.84E-02 |
| | | 125 | 10 | | 450600 | 10.818 | 19.118 | 19.118 | 1.85E-02 |
| | | 220 | 2 | | 792120 | 10.812 | 19.112 | 19.112 | 1.91E-02 |
| | | 235 | 50 | | 849000 | 10.812 | 19.112 | 19.112 | 1.91E-02 |
| | | 298 | 24 | | 1074240 | 10.812 | 19.112 | 19.112 | 1.91E-02 |
| | | 316 | 13 | | 1138380 | 10.812 | 19.112 | 19.112 | 1.91E-02 |
| | | 350 | 6 | | 1260360 | 10.812 | 19.112 | 19.112 | 1.91E-02 |



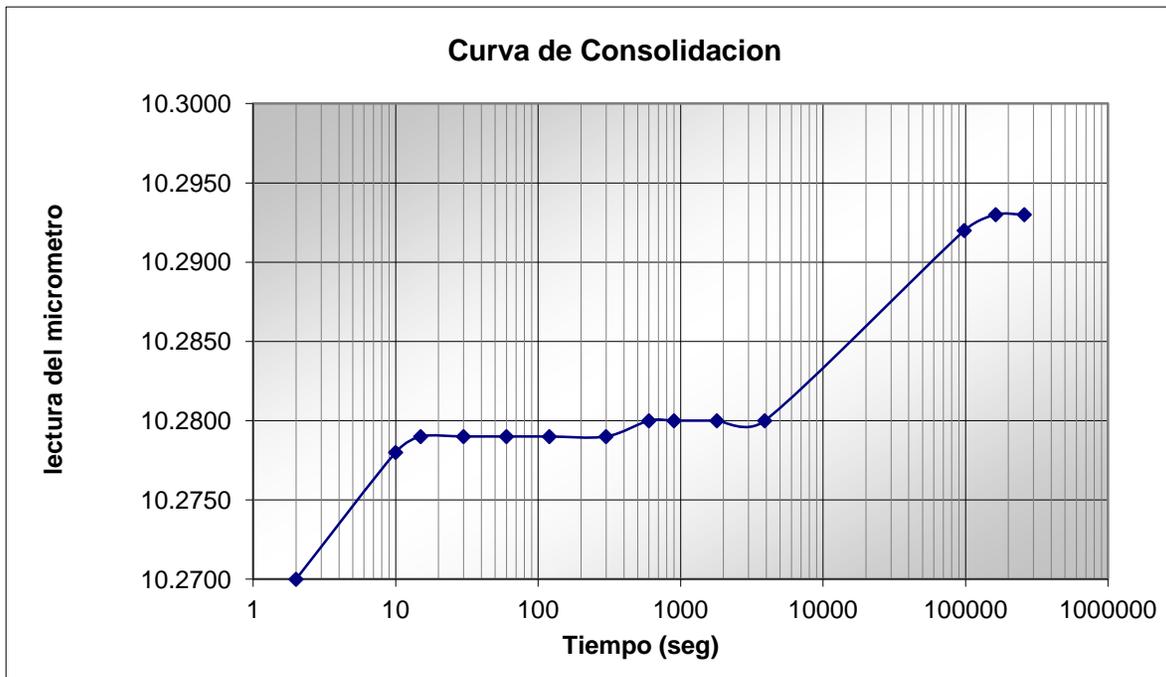
| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|------|------------------|---------|---------------------|--------------|------------------|---------------|-----------------------|-------------------|
| Carga 2 | | 1768.2 gr | | SUMA | | 3565.2 gr | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg/cm2) | | 0.0811 | | L _o (cm) | | 19.112 | | | |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | $\delta_{correctada}$ | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 10.812 | 19.112 | 19.112 | 0.00E+00 |
| | | | | 2 | 2 | 10.680 | 18.980 | 18.980 | 1.32E-02 |
| | | | | 5 | 5 | 10.670 | 18.970 | 18.970 | 1.42E-02 |
| | | | | 10 | 10 | 10.665 | 18.965 | 18.965 | 1.47E-02 |
| | | | | 15 | 15 | 10.662 | 18.962 | 18.962 | 1.50E-02 |
| | | | | 30 | 30 | 10.658 | 18.958 | 18.958 | 1.54E-02 |
| | | | 1 | | 60 | 10.650 | 18.950 | 18.950 | 1.62E-02 |
| | | | 2 | | 120 | 10.645 | 18.945 | 18.945 | 1.67E-02 |
| | | | 5 | | 300 | 10.642 | 18.942 | 18.942 | 1.70E-02 |
| | | | 10 | | 600 | 10.628 | 18.928 | 18.928 | 1.84E-02 |
| | | | 15 | | 900 | 10.622 | 18.922 | 18.922 | 1.90E-02 |
| | | | 30 | | 1800 | 10.615 | 18.915 | 18.915 | 1.97E-02 |
| | | 1 | | | 3600 | 10.605 | 18.905 | 18.905 | 2.07E-02 |
| | | 2 | 27 | | 8820 | 10.592 | 18.892 | 18.892 | 2.20E-02 |
| | | 4 | 18 | | 15480 | 10.588 | 18.888 | 18.888 | 2.24E-02 |
| | | 9 | | | 32400 | 10.575 | 18.875 | 18.875 | 2.37E-02 |
| | | 25 | 55 | | 93300 | 10.555 | 18.855 | 18.855 | 2.57E-02 |
| | | 30 | 7 | | 108420 | 10.552 | 18.852 | 18.852 | 2.60E-02 |
| | | 58 | 42 | | 211320 | 10.542 | 18.842 | 18.842 | 2.70E-02 |
| | | 94 | 36 | | 340560 | 10.538 | 18.838 | 18.838 | 2.74E-02 |
| | | 102 | 52 | | 370320 | 10.532 | 18.832 | 18.832 | 2.80E-02 |
| | | 126 | 10 | | 454200 | 10.530 | 18.830 | 18.830 | 2.82E-02 |
| | | 164 | 20 | | 591600 | 10.529 | 18.829 | 18.829 | 2.83E-02 |
| | | 169 | 20 | | 609600 | 10.529 | 18.829 | 18.829 | 2.83E-02 |
| | | 200 | 12 | | 720720 | 10.525 | 18.825 | 18.825 | 2.87E-02 |
| | | 266 | 3 | | 957780 | 10.512 | 18.812 | 18.812 | 3.00E-02 |
| | | 294 | 30 | | 1060200 | 10.505 | 18.805 | 18.805 | 3.07E-02 |
| | | 316 | 34 | | 1139640 | 10.500 | 18.800 | 18.800 | 3.12E-02 |
| | | 335 | 6 | | 1206360 | 10.495 | 18.795 | 18.795 | 3.17E-02 |
| | | 420 | 45 | | 1514700 | 10.495 | 18.795 | 18.795 | 3.17E-02 |
| | | 482 | 15 | | 1736100 | 10.495 | 18.795 | 18.795 | 3.17E-02 |



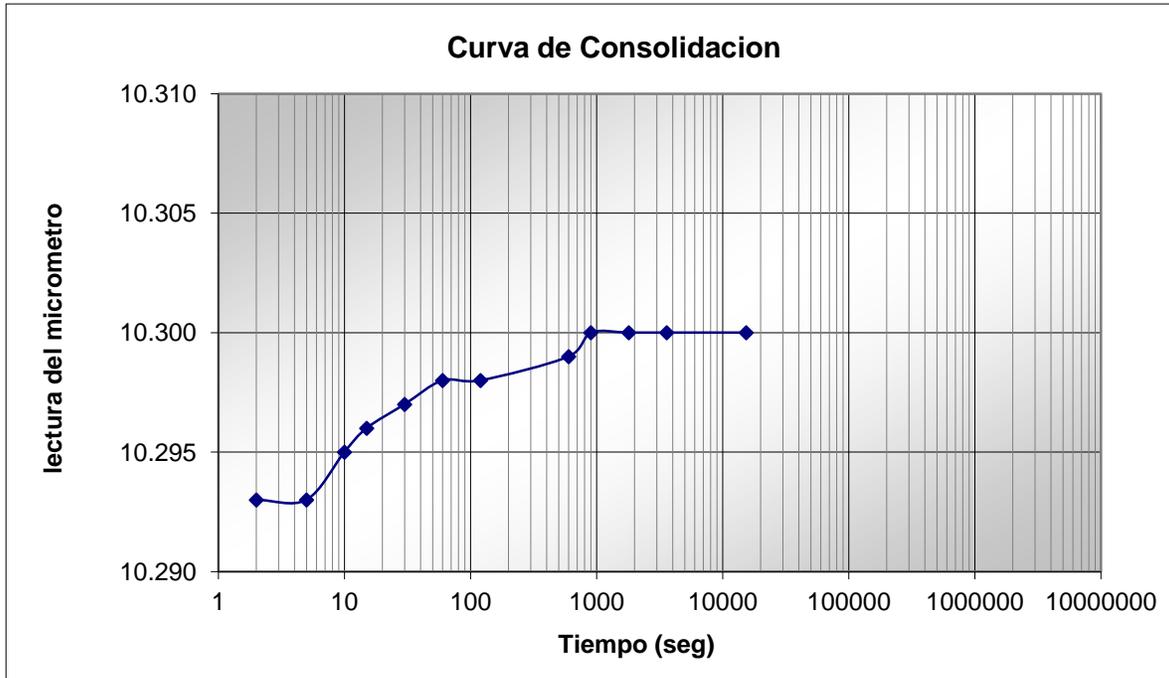
| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | | |
|---|------|--------|---------|-----|---------------------|--------------|-----------|------------------------|-------------------|
| Carga 3 | | | 3515 gr | | SUMA | | 7080.2 gr | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg/cm ²) | | | 0.161 | | L _o (cm) | | 18.795 | | |
| Relacion de Vacios Inicial e _o | | | | | | | | | |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | δ _{corregida} | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 10.495 | 18.795 | 18.795 | 0.000 |
| | | | | 2 | 2 | 10.320 | 18.620 | 18.620 | 1.75E-02 |
| | | | | 5 | 5 | 10.315 | 18.615 | 18.615 | 1.80E-02 |
| | | | | 10 | 10 | 10.312 | 18.612 | 18.612 | 1.83E-02 |
| | | | | 15 | 15 | 10.305 | 18.605 | 18.605 | 1.90E-02 |
| | | | | 30 | 30 | 10.300 | 18.600 | 18.600 | 1.95E-02 |
| | | | 1 | | 60 | 10.292 | 18.592 | 18.592 | 2.03E-02 |
| | | | 2 | | 120 | 10.285 | 18.585 | 18.585 | 2.10E-02 |
| | | | 5 | | 300 | 10.278 | 18.578 | 18.578 | 2.17E-02 |
| | | | 10 | | 600 | 10.272 | 18.572 | 18.572 | 2.23E-02 |
| | | | 15 | | 900 | 10.262 | 18.562 | 18.562 | 2.33E-02 |
| | | | 30 | | 1800 | 10.255 | 18.555 | 18.555 | 2.40E-02 |
| | | 1 | | | 3600 | 10.247 | 18.547 | 18.547 | 2.48E-02 |
| | | 2 | | | 7200 | 10.238 | 18.538 | 18.538 | 2.57E-02 |
| | | 4 | 30 | | 16200 | 10.232 | 18.532 | 18.532 | 2.63E-02 |
| | | 6 | | | 21600 | 10.228 | 18.528 | 18.528 | 2.67E-02 |
| | | 8 | | | 28800 | 10.208 | 18.508 | 18.508 | 2.87E-02 |
| | | 23 | 30 | | 84600 | 10.203 | 18.503 | 18.503 | 2.92E-02 |
| | | 30 | 30 | | 109800 | 10.202 | 18.502 | 18.502 | 2.93E-02 |
| | | 32 | 28 | | 116880 | 10.193 | 18.493 | 18.493 | 3.02E-02 |
| | | 58 | 35 | | 210900 | 10.190 | 18.490 | 18.490 | 3.05E-02 |
| | | 78 | 21 | | 282060 | 10.185 | 18.485 | 18.485 | 3.10E-02 |
| | | 101 | 56 | | 366960 | 10.182 | 18.482 | 18.482 | 3.13E-02 |
| | | 128 | 28 | | 462480 | 10.182 | 18.482 | 18.482 | 3.13E-02 |
| | | 130 | 31 | | 469860 | 10.180 | 18.480 | 18.480 | 3.15E-02 |



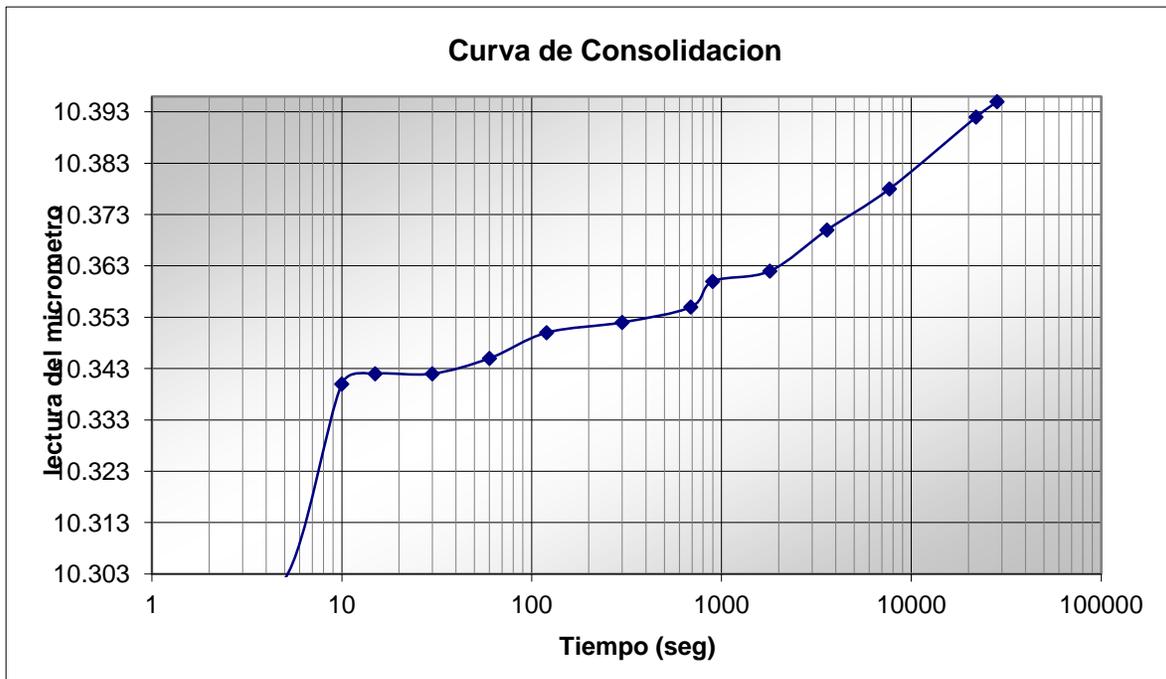
| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|--|------|--------|---------|--------|---------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| DESCARGA (Carga de Sitio + Carga1 + Carga2 + Carga3) | | | | | | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg/cm ²) | | | | 0.1611 | L _o (cm) | 18.480 | A _o (cm ²) | 43.94 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 10.180 | 18.480 | 0.000 |
| | | | | 10 | 10 | 10.190 | 18.490 | -1.00E-03 |
| | | | | 20 | 20 | 10.192 | 18.492 | -1.20E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 10.195 | 18.495 | -1.50E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 10.195 | 18.495 | -1.50E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 10.195 | 18.495 | -1.50E-03 |
| | | | 5 | | 300 | 10.195 | 18.495 | -1.50E-03 |
| | | | 10 | | 600 | 10.197 | 18.497 | -1.70E-03 |
| | | | 15 | | 900 | 10.198 | 18.498 | -1.80E-03 |
| | | | 30 | | 1800 | 10.198 | 18.498 | -1.80E-03 |
| | | 1 | | | 3600 | 10.199 | 18.499 | -1.90E-03 |
| | | 2 | | | 7200 | 10.200 | 18.500 | -2.00E-03 |
| | | 17 | | | 61200 | 10.200 | 18.500 | -2.00E-03 |



| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|---|------|--------|---------|---------|---------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| DESCARGA (Carga de Sitio + Carga1 + Carga2) | | | | | | 7080.2 | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg) | | | | 0.16112 | L _o (mm) | 18.500 | A _o (cm ²) | 43.94 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 10.200 | 18.500 | 0.00E+00 |
| | | | | 2 | 2 | 10.2700 | 18.570 | -7.00E-03 |
| | | | | 10 | 10 | 10.2780 | 18.578 | -7.80E-03 |
| | | | | 15 | 15 | 10.2790 | 18.579 | -7.90E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 10.2790 | 18.579 | -7.90E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 10.2790 | 18.579 | -7.90E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 10.2790 | 18.579 | -7.90E-03 |
| | | | 5 | | 300 | 10.2790 | 18.579 | -7.90E-03 |
| | | | 10 | | 600 | 10.2800 | 18.580 | -8.00E-03 |
| | | | 15 | | 900 | 10.2800 | 18.580 | -8.00E-03 |
| | | | 30 | | 1800 | 10.2800 | 18.580 | -8.00E-03 |
| | | 1 | 5 | | 3900 | 10.2800 | 18.580 | -8.00E-03 |
| | | 27 | 16 | | 98160 | 10.2920 | 18.592 | -9.20E-03 |
| | | 45 | 20 | | 163200 | 10.2930 | 18.593 | -9.30E-03 |
| | | 72 | | | 259200 | 10.2930 | 18.593 | -9.30E-03 |



| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|------------------------------------|------|--------|---------|-------|---------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| DESCARGA (Carga de Sitio + Carga1) | | | | | | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg) | | | | 999.6 | L _o (mm) | 18.593 | A _o (cm ²) | 43.94 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 10.293 | 18.593 | 0.000 |
| | | | | 2 | 2 | 10.293 | 18.593 | 0.00E+00 |
| | | | | 5 | 5 | 10.293 | 18.593 | 0.00E+00 |
| | | | | 10 | 10 | 10.295 | 18.595 | -2.00E-04 |
| | | | | 15 | 15 | 10.296 | 18.596 | -3.00E-04 |
| | | | | 30 | 30 | 10.297 | 18.597 | -4.00E-04 |
| | | | 1 | | 60 | 10.298 | 18.598 | -5.00E-04 |
| | | | 2 | | 120 | 10.298 | 18.598 | -5.00E-04 |
| | | | 10 | | 600 | 10.299 | 18.599 | -6.00E-04 |
| | | | 15 | | 900 | 10.300 | 18.600 | -7.00E-04 |
| | | | 30 | | 1800 | 10.300 | 18.600 | -7.00E-04 |
| | | 1 | | | 3600 | 10.300 | 18.600 | -7.00E-04 |
| | | 4 | 16 | | 15360 | 10.300 | 18.600 | -7.00E-04 |



| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|----------------------------------|------|--------|---------|-------|---------------------|--------------|-----------------------------------|--------------|
| DESCARGA (Carga de Sitio) | | | | | | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg) | | | | 799.9 | L _o (mm) | 18.600 | A _o (cm ²) | 43.94 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | dism. Altura |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 10.300 | 18.600 | 0.00E+00 |
| | | | | 2 | 2 | 10.302 | 18.602 | -2.00E-04 |
| | | | | 5 | 5 | 10.302 | 18.602 | -2.00E-04 |
| | | | | 10 | 10 | 10.340 | 18.640 | -4.00E-03 |
| | | | | 15 | 15 | 10.342 | 18.642 | -4.20E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 10.342 | 18.642 | -4.20E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 10.345 | 18.645 | -4.50E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 10.350 | 18.650 | -5.00E-03 |
| | | | 5 | | 300 | 10.352 | 18.652 | -5.20E-03 |
| | | | 11 | 30 | 690 | 10.355 | 18.655 | -5.50E-03 |
| | | | 15 | | 900 | 10.360 | 18.660 | -6.00E-03 |
| | | | 30 | | 1800 | 10.362 | 18.662 | -6.20E-03 |
| | | 1 | | | 3600 | 10.370 | 18.670 | -7.00E-03 |
| | | 2 | 8 | | 7680 | 10.378 | 18.678 | -7.80E-03 |
| | | 6 | 6 | | 21960 | 10.392 | 18.692 | -9.20E-03 |
| | | 7 | 52 | | 28320 | 10.395 | 18.695 | -9.50E-03 |
| | | 16 | 29 | | 59340 | 10.395 | 18.695 | -9.50E-03 |
| | | 25 | 29 | | 91740 | 10.395 | 18.695 | -9.50E-03 |

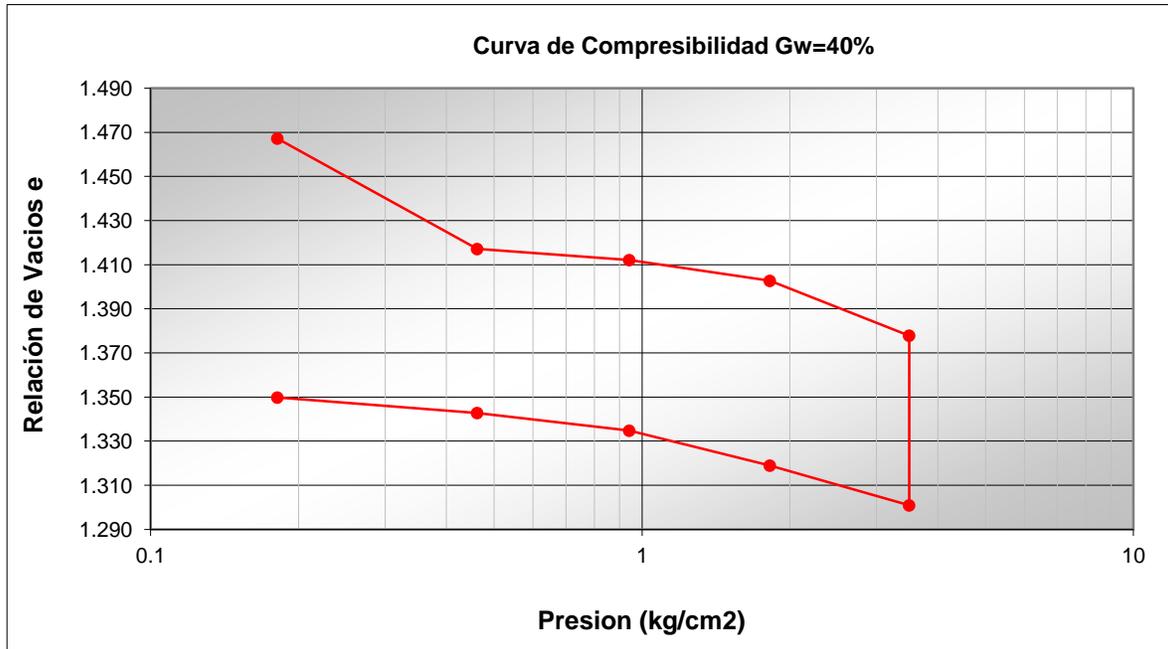


Figura 0.3. Curva de compresibilidad, Gw=40% en secado.

Tabla 45. Resumen de resultados para obtención de grafica de consolidación, Gw=40% en secado.

| carga | carga aplicada (Kg/cm2) | Incremento de presión | Presión Total (kg/cm2) | dh | altura final | de | e (al final) | Δp | σ (Kg/cm ²) |
|------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|-----------|--------------|---------|--------------|------------|--------------------------------|
| | | | 0.1 | | | | 1.5774 | 0.1 | 0.02264 |
| insitu | 0.7998 | 0.7998 | 0.7998 | 1.40E-01 | 1.8603 | 0.1102 | 1.4672 | 0.7998 | 0.18104 |
| dp1 | 1.24 | 1.24 | 2.0398 | 6.35E-02 | 1.7968 | 0.0501 | 1.4171 | 2.0398 | 0.46172 |
| dp2 | 2.120 | 2.12039 | 4.160 | 6.35E-03 | 1.79045 | 0.0050 | 1.4121 | 4.16019 | 0.94167 |
| dp3 | 3.878 | 3.87809 | 8.038 | 1.19E-02 | 1.778512 | 0.0094 | 1.4027 | 8.03828 | 1.81949 |
| dp4 | 7.402 | 7.40239 | 15.441 | 3.15E-02 | 1.747016 | 0.0248 | 1.3778 | 15.44067 | 3.49505 |
| SAT | 7.402 | 7.40239 | 15.441 | 9.75E-02 | 1.64948 | 0.0769 | 1.3009 | 15.44067 | 3.49505 |
| desc1 | -7.402 | -7.4024 | 8.038 | -2.29E-02 | 1.67234 | -0.0180 | 1.3189 | 8.03828 | 1.81949 |
| desc2 | -3.878 | -3.8781 | 4.160 | -2.01E-02 | 1.692406 | -0.0158 | 1.3348 | 4.16019 | 0.94167 |
| desc3 | -2.120 | -2.1204 | 2.040 | -1.02E-02 | 1.702566 | -0.0080 | 1.3428 | 2.0398 | 0.46172 |
| desc4 | -1.240 | -1.24 | 0.800 | -8.89E-03 | 1.711456 | -0.0070 | 1.3498 | 0.7998 | 0.18104 |
| des insitu | -0.800 | -0.7998 | 0.000 | -1.78E-01 | 1.889256 | -0.1402 | 1.4900 | 0 | 0 |

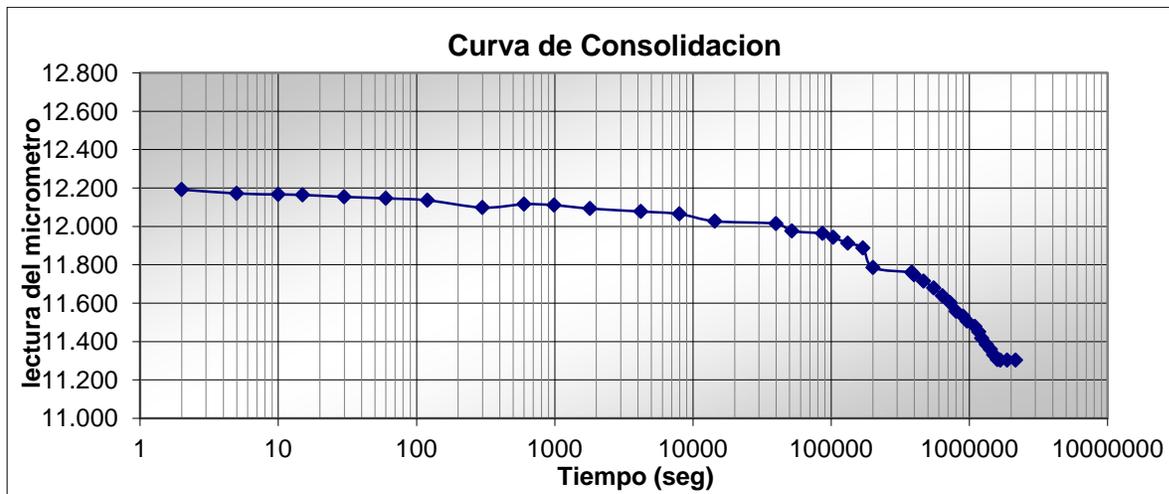
Tabla 46. Datos iniciales antes de prueba odométrica para muestra con $G_w=40\%$ en secado.

| Testigo de Humedad | | | | | |
|--------------------|----------|----------|--------|--------------|----------|
| Flanera | b2 | W_{mh} | 120.49 | W_w (g) | 20.3598 |
| $W_{flanera}$ | 86.8827 | W_{ms} | 100.13 | W_s (g) | 100.1273 |
| W_{fl+mh} | 207.3698 | W_w | 20.36 | ω (%) | 20.3 |
| W_{fla+ms} | 187.01 | ω | 20.33 | S_s | 2.65 |

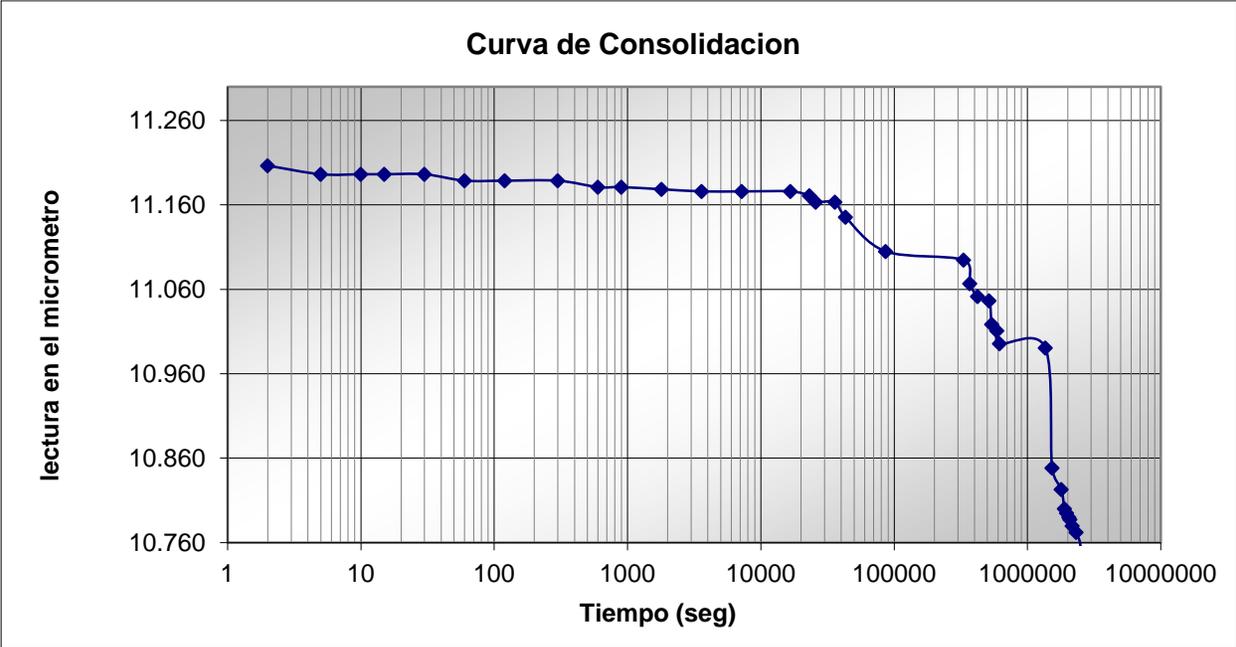
| Datos Iniciales | | | |
|------------------------------------|----------|-------------------------|-------|
| Anillo No. | 3 | Relacion Brazo | 10 |
| Peso Anillo (g) | 86.8827 | | |
| Peso Anillo + Muestra (g) | 207.3698 | Altura Anillo (cm) | 2 |
| Peso Anillo + Muestra Saturado (g) | 229.18 | Diametro (cm) | 7.5 |
| | | Area (cm ²) | 44.18 |

| Antes de la Consolidacion | | | | | |
|---------------------------|---------|--|-------|-----------------------------|-------|
| Peso Muestra W_m (g) | 120.49 | Volumen Muestra V_m (cm ³) | 88.36 | Contenido Agua ω (%) | 20.33 |
| Peso Solidos W_s (g) | 100.13 | Volumen Solidos V_s (cm ³) | 37.78 | Relacion Vacios e_o | 1.34 |
| Peso Agua W_w (g) | 20.3598 | Volumen Vacios V_v (cm ³) | 50.57 | Grado Saturacion G_w (%) | 40.26 |

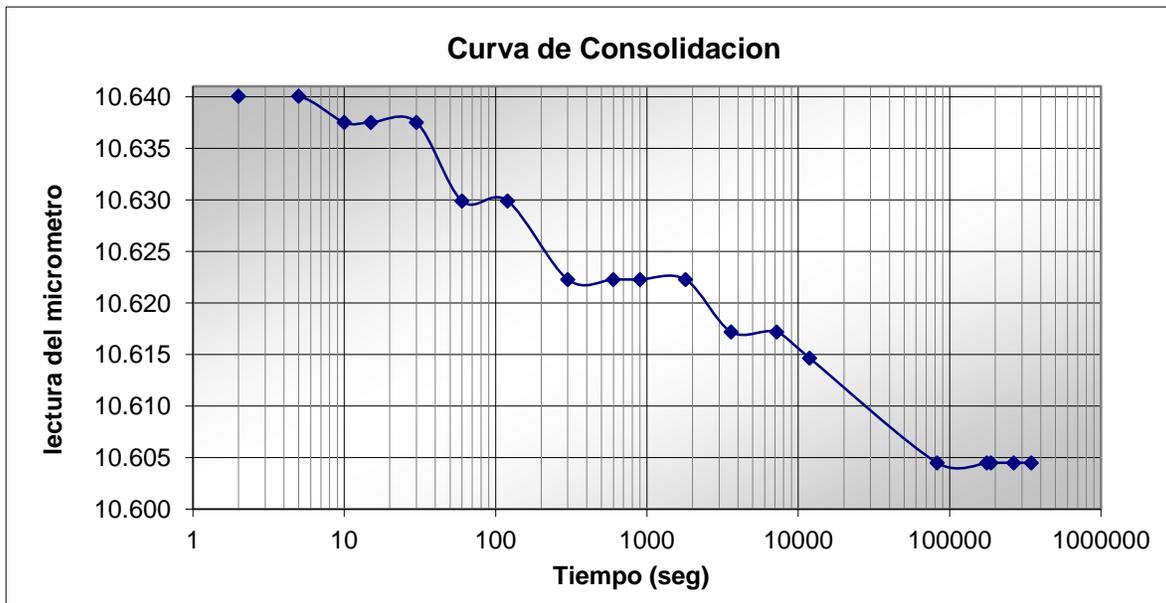
Tabla 47. Curvas de compresibilidad para las diferentes cargas aplicadas en la prueba $G_w=40\%$ en secado.



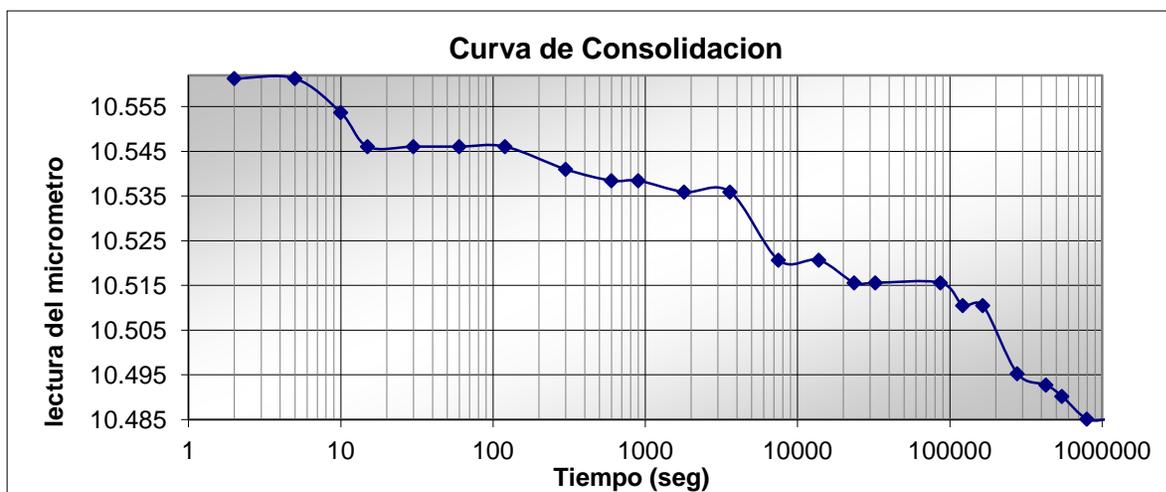
| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------|--------|---------|---------------------|--------------|-----------------------------------|--------|-------------------|----------|--------|
| Carga de Sitio | | | | | 799.8 | gr | | | | |
| bre la Pastilla (kg/cm2) | | | 0.0181 | L _o (mm) | 20 | A _o (cm ²) | 44.179 | | | |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) | pulgadas | 25.4 |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 12.700 | 20.000 | 0.00E+00 | 0.50 | 12.700 |
| | | | | 2 | 2 | 12.192 | 19.492 | 5.08E-02 | 0.48 | 12.192 |
| | | | | 5 | 5 | 12.172 | 19.472 | 5.28E-02 | 0.48 | 12.172 |
| | | | | 10 | 10 | 12.167 | 19.467 | 5.33E-02 | 0.48 | 12.167 |
| | | | | 15 | 15 | 12.164 | 19.464 | 5.36E-02 | 0.48 | 12.164 |
| | | | | 30 | 30 | 12.154 | 19.454 | 5.46E-02 | 0.48 | 12.154 |
| | | | 1 | | 60 | 12.146 | 19.446 | 5.54E-02 | 0.48 | 12.146 |
| | | | 2 | | 120 | 12.136 | 19.436 | 5.64E-02 | 0.48 | 12.136 |
| | | | 5 | | 300 | 12.098 | 19.398 | 6.02E-02 | 0.48 | 12.098 |
| | | | 10 | | 600 | 12.116 | 19.416 | 5.84E-02 | 0.48 | 12.116 |
| | | | 16 | 30 | 990 | 12.111 | 19.411 | 5.89E-02 | 0.48 | 12.111 |
| | | | 30 | | 1800 | 12.093 | 19.393 | 6.07E-02 | 0.48 | 12.093 |
| | | 1 | 10 | | 4200 | 12.078 | 19.378 | 6.22E-02 | 0.48 | 12.078 |
| | | 2 | 13 | | 7980 | 12.065 | 19.365 | 6.35E-02 | 0.48 | 12.065 |
| | | 4 | | | 14400 | 12.027 | 19.327 | 6.73E-02 | 0.47 | 12.027 |
| | | 11 | 5 | | 39900 | 12.014 | 19.314 | 6.86E-02 | 0.47 | 12.014 |
| | | 14 | 27 | | 52020 | 11.976 | 19.276 | 7.24E-02 | 0.47 | 11.976 |
| | | 24 | 5 | | 86700 | 11.963 | 19.263 | 7.37E-02 | 0.47 | 11.963 |
| | | 28 | 47 | | 103620 | 11.943 | 19.243 | 7.57E-02 | 0.47 | 11.943 |
| | | 36 | 40 | | 132000 | 11.913 | 19.213 | 7.87E-02 | 0.47 | 11.913 |
| | | 47 | 9 | | 169740 | 11.887 | 19.187 | 8.13E-02 | 0.47 | 11.887 |
| | | 55 | 50 | | 201000 | 11.786 | 19.086 | 9.14E-02 | 0.46 | 11.786 |
| | | 106 | 28 | | 383280 | 11.760 | 19.060 | 9.40E-02 | 0.46 | 11.760 |
| | | 110 | 40 | | 398400 | 11.748 | 19.048 | 9.53E-02 | 0.46 | 11.748 |
| | | 129 | 42 | | 466920 | 11.714 | 19.014 | 9.86E-02 | 0.46 | 11.714 |
| | | 153 | 31 | | 552660 | 11.679 | 18.979 | 1.02E-01 | 0.46 | 11.679 |
| | | 177 | 27 | | 638820 | 11.638 | 18.938 | 1.06E-01 | 0.46 | 11.638 |
| | | 201 | 17 | | 724620 | 11.603 | 18.903 | 1.10E-01 | 0.46 | 11.603 |
| | | 223 | 17 | | 803820 | 11.557 | 18.857 | 1.14E-01 | 0.46 | 11.557 |
| | | 250 | 37 | | 902220 | 11.532 | 18.832 | 1.17E-01 | 0.45 | 11.532 |
| | | 267 | 36 | | 963360 | 11.506 | 18.806 | 1.19E-01 | 0.45 | 11.506 |
| | | 304 | 54 | | 1097640 | 11.478 | 18.778 | 1.22E-01 | 0.45 | 11.478 |
| | | 325 | 12 | | 1170720 | 11.450 | 18.750 | 1.25E-01 | 0.45 | 11.450 |
| | | 341 | 24 | | 1229040 | 11.417 | 18.717 | 1.28E-01 | 0.45 | 11.417 |
| | | 369 | 15 | | 1329300 | 11.384 | 18.684 | 1.32E-01 | 0.45 | 11.384 |
| | | 394 | 45 | | 1421100 | 11.359 | 18.659 | 1.34E-01 | 0.45 | 11.359 |
| | | 416 | 42 | | 1500120 | 11.331 | 18.631 | 1.37E-01 | 0.45 | 11.331 |
| | | 443 | 29 | | 1596540 | 11.306 | 18.606 | 1.39E-01 | 0.45 | 11.306 |
| | | 465 | 33 | | 1675980 | 11.303 | 18.603 | 1.40E-01 | 0.45 | 11.303 |
| | | 521 | 21 | | 1876860 | 11.303 | 18.603 | 1.40E-01 | 0.45 | 11.303 |
| | | 600 | 14 | | 2160840 | 11.303 | 18.603 | 1.40E-01 | 0.45 | 11.303 |



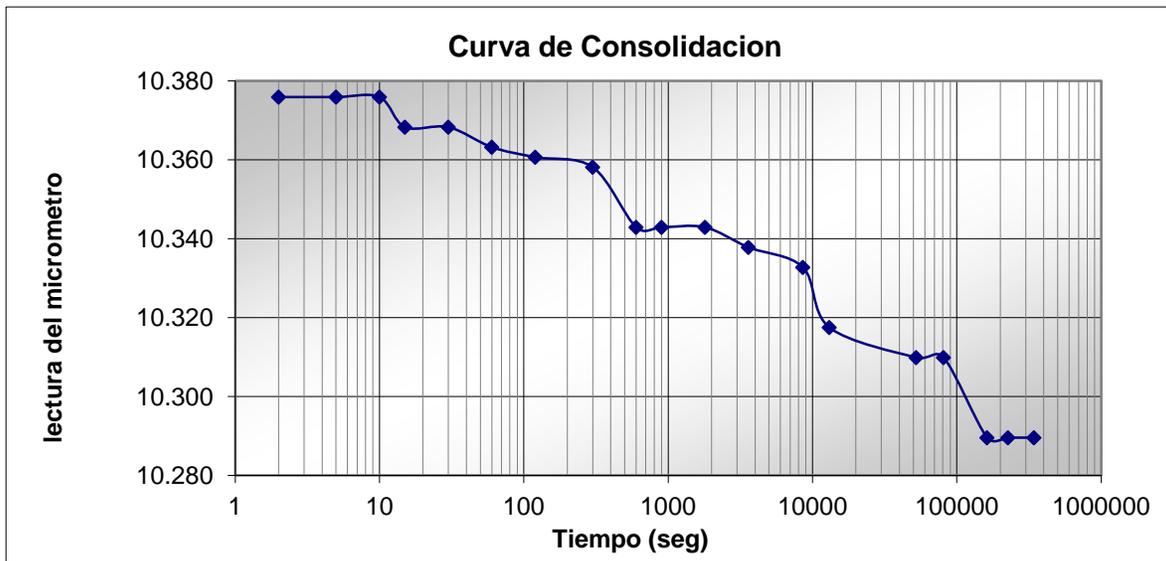
| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | | | |
|---|------|--------|----------|-----|---------------------|--------------|--------|-------------------|---|-------|
| Carga 1 | | | 440.2 gr | | SUMA | | 1240 | | | |
| Peso de la Pastilla (ton/m ²) | | | 5.47815 | | L _o (mm) | | 18.603 | | A _o (cm ²) 44.18 | |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) | pulgadas | 25.4 |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | | | |
| 15-12-12 | 7:09 | | | 0 | 0 | 11.303 | 18.603 | 0.00E+00 | | |
| | | | | 2 | 2 | 11.206 | 18.506 | 9.65E-03 | 0.4412 | 11.21 |
| | | | | 5 | 5 | 11.196 | 18.496 | 1.07E-02 | 0.4408 | 11.20 |
| | | | | 10 | 10 | 11.196 | 18.496 | 1.07E-02 | 0.4408 | 11.20 |
| | | | | 15 | 15 | 11.196 | 18.496 | 1.07E-02 | 0.4408 | 11.20 |
| | | | | 30 | 30 | 11.196 | 18.496 | 1.07E-02 | 0.4408 | 11.20 |
| | | | 1 | | 60 | 11.189 | 18.489 | 1.14E-02 | 0.4405 | 11.19 |
| | | | 2 | | 120 | 11.189 | 18.489 | 1.14E-02 | 0.4405 | 11.19 |
| | | | 5 | | 300 | 11.189 | 18.489 | 1.14E-02 | 0.4405 | 11.19 |
| | | | 10 | | 600 | 11.181 | 18.481 | 1.22E-02 | 0.4402 | 11.18 |
| | | | 15 | | 900 | 11.181 | 18.481 | 1.22E-02 | 0.4402 | 11.18 |
| | | | 30 | | 1800 | 11.179 | 18.479 | 1.24E-02 | 0.4401 | 11.18 |
| | | | 1 | | 3600 | 11.176 | 18.476 | 1.27E-02 | 0.4400 | 11.18 |
| | | | 2 | | 7200 | 11.176 | 18.476 | 1.27E-02 | 0.4400 | 11.18 |
| | | | 4 | 38 | 16680 | 11.176 | 18.476 | 1.27E-02 | 0.4400 | 11.18 |
| | | | 6 | 26 | 23160 | 11.171 | 18.471 | 1.32E-02 | 0.4398 | 11.17 |
| | | | 7 | 10 | 25800 | 11.163 | 18.463 | 1.40E-02 | 0.4395 | 11.16 |
| | | | 10 | | 36000 | 11.163 | 18.463 | 1.40E-02 | 0.4395 | 11.16 |
| | | | 12 | | 43200 | 11.146 | 18.446 | 1.57E-02 | 0.4388 | 11.15 |
| | | | 24 | | 86400 | 11.105 | 18.405 | 1.98E-02 | 0.4372 | 11.10 |
| | | | 92 | 12 | 331920 | 11.095 | 18.395 | 2.08E-02 | 0.4368 | 11.09 |
| | | | 102 | 38 | 369480 | 11.067 | 18.367 | 2.36E-02 | 0.4357 | 11.07 |
| | | | 117 | 27 | 422820 | 11.052 | 18.352 | 2.51E-02 | 0.4351 | 11.05 |
| | | | 143 | 12 | 515520 | 11.046 | 18.346 | 2.57E-02 | 0.4349 | 11.05 |
| | | | 149 | 55 | 539700 | 11.019 | 18.319 | 2.84E-02 | 0.4338 | 11.02 |
| | | | 163 | 55 | 590100 | 11.011 | 18.311 | 2.92E-02 | 0.4335 | 11.01 |
| | | | 171 | 40 | 618000 | 10.996 | 18.296 | 3.07E-02 | 0.4329 | 11.00 |
| | | | 378 | 36 | 1362960 | 10.991 | 18.291 | 3.12E-02 | 0.4327 | 10.99 |
| | | | 425 | 14 | 1530840 | 10.848 | 18.148 | 4.55E-02 | 0.4271 | 10.85 |
| | | | 498 | 20 | 1794000 | 10.823 | 18.123 | 4.80E-02 | 0.4261 | 10.82 |
| | | | 526 | 42 | 1896120 | 10.800 | 18.100 | 5.03E-02 | 0.4252 | 10.80 |
| | | | 546 | 23 | 1966980 | 10.795 | 18.095 | 5.08E-02 | 0.4250 | 10.80 |
| | | | 568 | 41 | 2047260 | 10.790 | 18.090 | 5.13E-02 | 0.4248 | 10.79 |
| | | | 578 | 51 | 2083860 | 10.787 | 18.087 | 5.16E-02 | 0.4247 | 10.79 |
| | | | 602 | 13 | 2167980 | 10.780 | 18.080 | 5.23E-02 | 0.4244 | 10.78 |
| | | | 644 | 16 | 2319360 | 10.772 | 18.072 | 5.31E-02 | 0.4241 | 10.77 |
| | | | 689 | 51 | 2483460 | 10.759 | 18.059 | 5.44E-02 | 0.4236 | 10.76 |
| | | | 696 | 40 | 2508000 | 10.744 | 18.044 | 5.59E-02 | 0.4230 | 10.74 |
| | | | 719 | 55 | 2591700 | 10.739 | 18.039 | 5.64E-02 | 0.4228 | 10.74 |
| | | | 769 | | 2768400 | 10.724 | 18.024 | 5.79E-02 | 0.4222 | 10.72 |
| | | | 841 | | 3027600 | 10.719 | 18.019 | 5.84E-02 | 0.4220 | 10.72 |
| | | | 859 | | 3092400 | 10.719 | 18.019 | 5.84E-02 | 0.4220 | 10.72 |
| | | | 911 | | 3279600 | 10.706 | 18.006 | 5.97E-02 | 0.4215 | 10.71 |
| | | | 935 | | 3366000 | 10.698 | 17.998 | 6.05E-02 | 0.4212 | 10.70 |
| | | | 964 | | 3470400 | 10.698 | 17.998 | 6.05E-02 | 0.4212 | 10.70 |
| | | | 1003 | | 3610800 | 10.683 | 17.983 | 6.20E-02 | 0.4206 | 10.68 |
| | | | 1009 | | 3632400 | 10.683 | 17.983 | 6.20E-02 | 0.4206 | 10.68 |
| | | | 1034 | | 3722400 | 10.683 | 17.983 | 6.20E-02 | 0.4206 | 10.68 |
| | | | 1056 | | 3801600 | 10.668 | 17.968 | 6.35E-02 | 0.4200 | 10.67 |
| | | | 1062 | | 3823200 | 10.668 | 17.968 | 6.35E-02 | 0.4200 | 10.67 |
| | | | 1110 | | 3996000 | 10.668 | 17.968 | 6.35E-02 | 0.4200 | 10.67 |

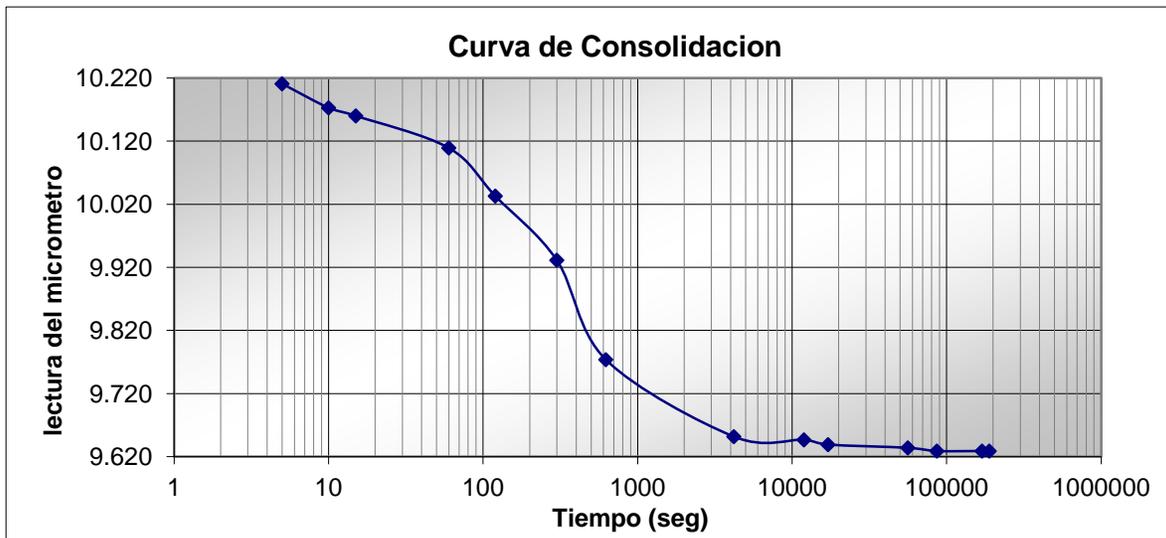


| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|------|-----------|---------|---------------------|--------------|--------------|--------|-----------------------------------|---------|-------|
| Carga 2 | | 880.39 gr | | SUMA | | 2120.39 | | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg/cm2) | | 0.0480 | | L _o (cm) | | 18.019 | | A _o (cm ²) | | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) | pulg | 25.4 |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 10.668 | 18.019 | 0.00E+00 | | |
| | | | | 2 | 2 | 10.640 | 17.991 | 2.79E-03 | 0.41890 | 10.64 |
| | | | | 5 | 5 | 10.640 | 17.991 | 2.79E-03 | 0.41890 | 10.64 |
| | | | | 10 | 10 | 10.638 | 17.988 | 3.05E-03 | 0.41880 | 10.64 |
| | | | | 15 | 15 | 10.638 | 17.988 | 3.05E-03 | 0.41880 | 10.64 |
| | | | | 30 | 30 | 10.638 | 17.988 | 3.05E-03 | 0.41880 | 10.64 |
| | | | 1 | | 60 | 10.630 | 17.981 | 3.81E-03 | 0.41850 | 10.63 |
| | | | 2 | | 120 | 10.630 | 17.981 | 3.81E-03 | 0.41850 | 10.63 |
| | | | 5 | | 300 | 10.622 | 17.973 | 4.57E-03 | 0.41820 | 10.62 |
| | | | 10 | | 600 | 10.622 | 17.973 | 4.57E-03 | 0.41820 | 10.62 |
| | | | 15 | | 900 | 10.622 | 17.973 | 4.57E-03 | 0.41820 | 10.62 |
| | | | 30 | | 1800 | 10.622 | 17.973 | 4.57E-03 | 0.41820 | 10.62 |
| | | 1 | | | 3600 | 10.617 | 17.968 | 5.08E-03 | 0.41800 | 10.62 |
| | | 2 | | | 7200 | 10.617 | 17.968 | 5.08E-03 | 0.41800 | 10.62 |
| | | 3 | 18 | | 11880 | 10.615 | 17.965 | 5.33E-03 | 0.41790 | 10.61 |
| | | 23 | | | 82800 | 10.605 | 17.955 | 6.35E-03 | 0.41750 | 10.60 |
| | | 48 | 55 | | 176100 | 10.605 | 17.955 | 6.35E-03 | 0.41750 | 10.60 |
| | | 52 | 7 | | 187620 | 10.605 | 17.955 | 6.35E-03 | 0.41750 | 10.60 |
| | | 73 | 42 | | 265320 | 10.605 | 17.955 | 6.35E-03 | 0.41750 | 10.60 |
| | | 96 | 15 | | 346500 | 10.605 | 17.955 | 6.35E-03 | 0.41750 | 10.60 |

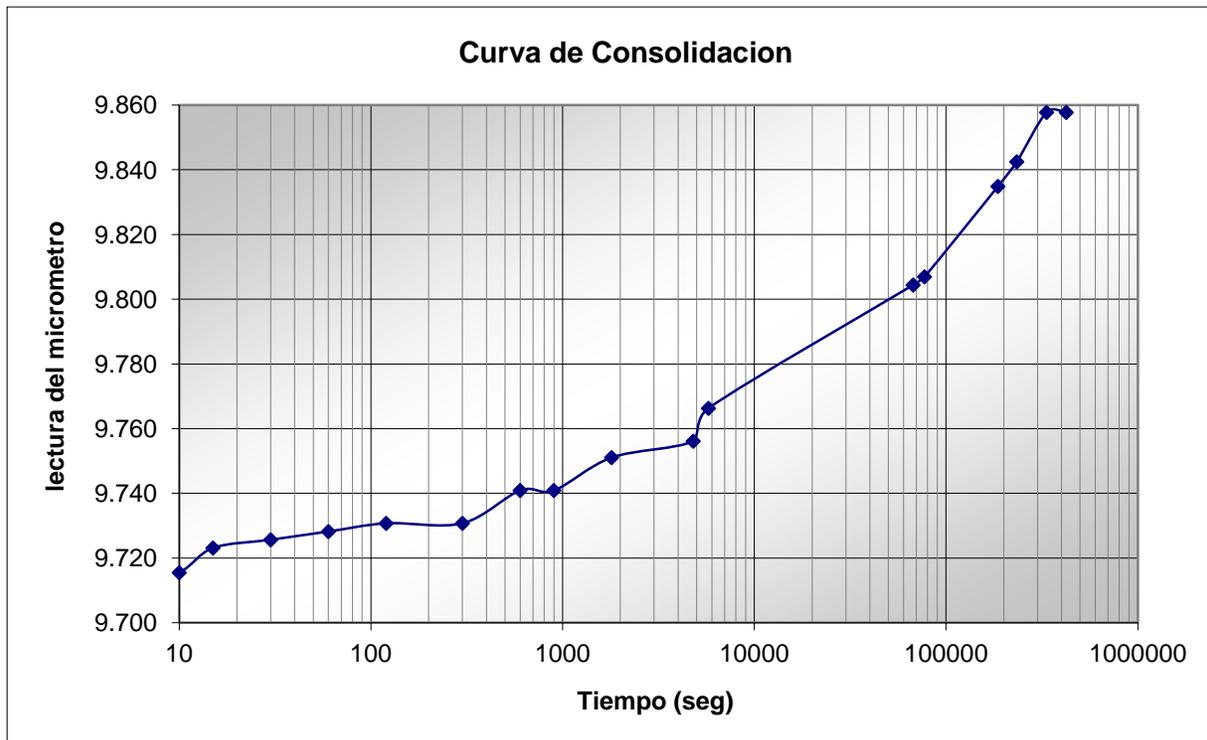


| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | | | |
|---|------|--------|-----------|-----|---------------------|--------------|---------|-------------------|-----------------------------------|-------|
| Carga 3 | | | 1757.7 gr | | SUMA | | 3878.09 | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg/cm ²) | | | 0.088 | | L _o (cm) | | 17.955 | | A _o (cm ²) | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) | pulg= | 25.4 |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 10.605 | 17.955 | 0.000 | | |
| | | | | 2 | 2 | 10.561 | 17.912 | 4.32E-03 | 0.4158 | 10.56 |
| | | | | 5 | 5 | 10.561 | 17.912 | 4.32E-03 | 0.4158 | 10.56 |
| | | | | 10 | 10 | 10.554 | 17.905 | 5.08E-03 | 0.4155 | 10.55 |
| | | | | 15 | 15 | 10.546 | 17.897 | 5.84E-03 | 0.4152 | 10.55 |
| | | | | 30 | 30 | 10.546 | 17.897 | 5.84E-03 | 0.4152 | 10.55 |
| | | | 1 | | 60 | 10.546 | 17.897 | 5.84E-03 | 0.4152 | 10.55 |
| | | | 2 | | 120 | 10.546 | 17.897 | 5.84E-03 | 0.4152 | 10.55 |
| | | | 5 | | 300 | 10.541 | 17.892 | 6.35E-03 | 0.4150 | 10.54 |
| | | | 10 | | 600 | 10.538 | 17.889 | 6.60E-03 | 0.4149 | 10.54 |
| | | | 15 | | 900 | 10.538 | 17.889 | 6.60E-03 | 0.4149 | 10.54 |
| | | | 30 | | 1800 | 10.536 | 17.887 | 6.86E-03 | 0.4148 | 10.54 |
| | | 1 | | | 3600 | 10.536 | 17.887 | 6.86E-03 | 0.4148 | 10.54 |
| | | 2 | 5 | | 7500 | 10.521 | 17.871 | 8.38E-03 | 0.4142 | 10.52 |
| | | 3 | 50 | | 13800 | 10.521 | 17.871 | 8.38E-03 | 0.4142 | 10.52 |
| | | 6 | 33 | | 23580 | 10.516 | 17.866 | 8.89E-03 | 0.4140 | 10.52 |
| | | 9 | 1 | | 32460 | 10.516 | 17.866 | 8.89E-03 | 0.4140 | 10.52 |
| | | 24 | 8 | | 86880 | 10.516 | 17.866 | 8.89E-03 | 0.4140 | 10.52 |
| | | 33 | 49 | | 121740 | 10.511 | 17.861 | 9.40E-03 | 0.4138 | 10.51 |
| | | 45 | 47 | | 164820 | 10.511 | 17.861 | 9.40E-03 | 0.4138 | 10.51 |
| | | 77 | 4 | | 277440 | 10.495 | 17.846 | 1.09E-02 | 0.4132 | 10.50 |
| | | 119 | 2 | | 428520 | 10.493 | 17.844 | 1.12E-02 | 0.4131 | 10.49 |
| | | 151 | 31 | | 545460 | 10.490 | 17.841 | 1.14E-02 | 0.4130 | 10.49 |
| | | 220 | 56 | | 795360 | 10.485 | 17.836 | 1.19E-02 | 0.4128 | 10.49 |
| | | 320 | 43 | | 1154580 | 10.485 | 17.836 | 1.19E-02 | 0.4128 | 10.49 |

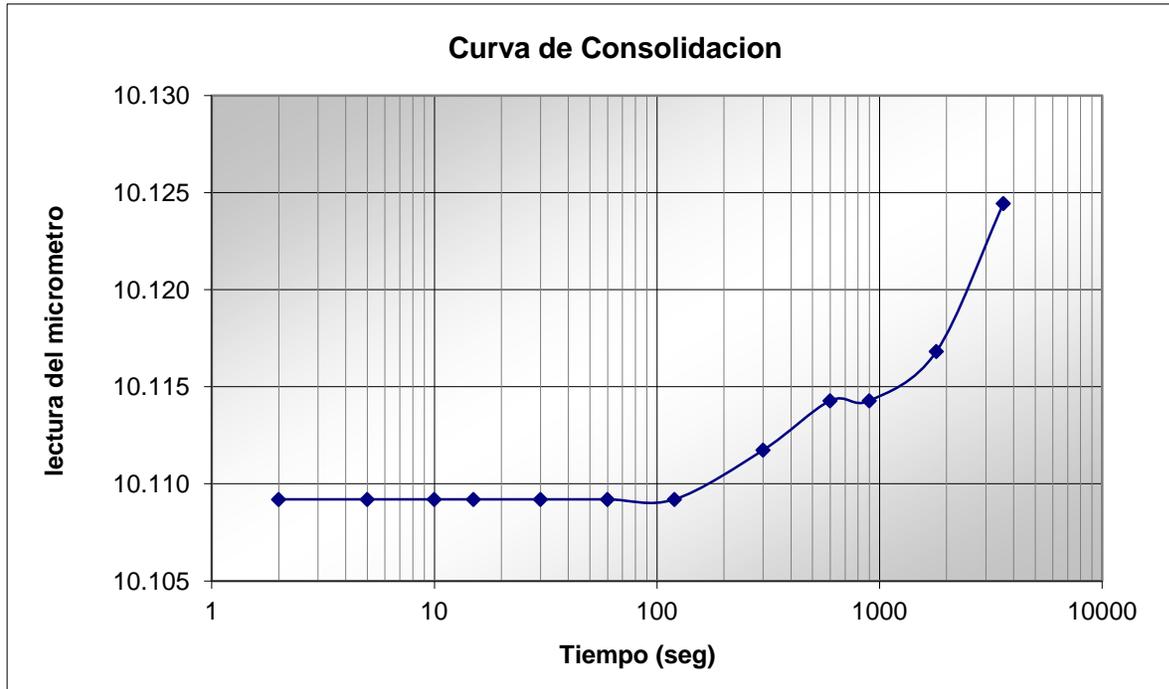




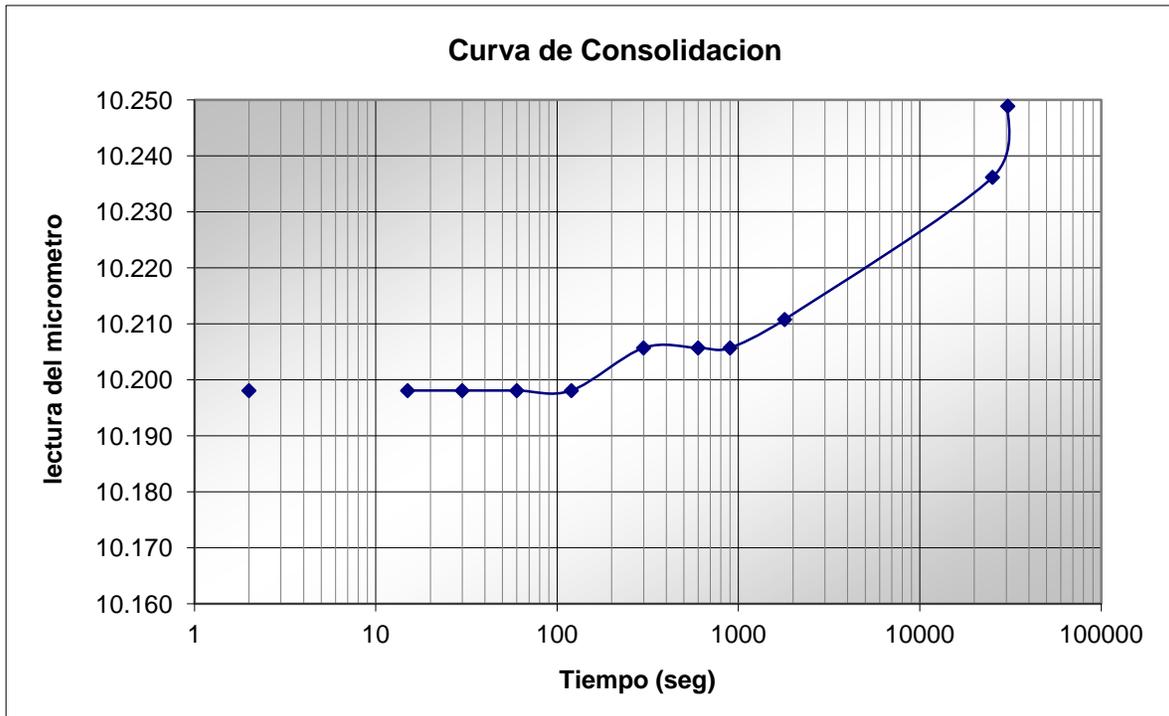
| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|------|--------|---------|-----|---------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|--------|-------|
| SAT | | | 0 gr | | SUMA | 7402.39 | | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg/cm2) | | | 0.168 | | L _o (cm) | 17.640 | A _o (cm ²) | 44.18 | | |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) | 25.4 | |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 10.290 | 17.640 | 0.000 | | |
| | | | | 5 | 5 | 10.211 | 17.562 | 3.94E-02 | 0.4020 | 10.21 |
| | | | | 10 | 10 | 10.173 | 17.524 | 4.32E-02 | 0.4005 | 10.17 |
| | | | | 15 | 15 | 10.160 | 17.511 | 4.44E-02 | 0.4000 | 10.16 |
| | | | 1 | | 60 | 10.109 | 17.460 | 4.95E-02 | 0.3980 | 10.11 |
| | | | 2 | | 120 | 10.033 | 17.384 | 5.71E-02 | 0.3950 | 10.03 |
| | | | 5 | | 300 | 9.931 | 17.282 | 6.73E-02 | 0.3910 | 9.93 |
| | | | 10 | 23 | 623 | 9.774 | 17.125 | 8.31E-02 | 0.3848 | 9.77 |
| | | 1 | 10 | | 4200 | 9.652 | 17.003 | 9.52E-02 | 0.3800 | 9.65 |
| | | 3 | 19 | | 11940 | 9.647 | 16.998 | 9.58E-02 | 0.3798 | 9.65 |
| | | 4 | 45 | | 17100 | 9.639 | 16.990 | 9.65E-02 | 0.3795 | 9.64 |
| | | 15 | 36 | | 56160 | 9.634 | 16.985 | 9.70E-02 | 0.3793 | 9.63 |
| | | 24 | 3 | | 86580 | 9.629 | 16.980 | 9.75E-02 | 0.3791 | 9.63 |
| | | 47 | 9 | | 169740 | 9.629 | 16.980 | 9.75E-02 | 0.3791 | 9.63 |
| | | 52 | 30 | | 189000 | 9.629 | 16.980 | 9.75E-02 | 0.3791 | 9.63 |



| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | | | | |
|---|------|--------|---------|---------|---------------------|--------------|--------|-------------------|--------|-----------------------------------|-------|
| DESCARGA (Carga de Sitio + Carga1 + Carga2) | | | | | | | | | | 3878.1 | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg) | | | | 0.08778 | L _o (mm) | | 18.014 | | | A _o (cm ²) | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) | PULG | mm | |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 9.858 | 18.014 | 0.00E+00 | | | |
| | | | | 2 | 2 | 9.9187 | 18.075 | -6.10E-03 | 0.3905 | 9.9187 | |
| | | | | 5 | 5 | 9.9187 | 18.075 | -6.10E-03 | 0.3905 | 9.9187 | |
| | | | | 10 | 10 | 9.9263 | 18.082 | -6.86E-03 | 0.3908 | 9.9263 | |
| | | | | 15 | 15 | 9.9263 | 18.082 | -6.86E-03 | 0.3908 | 9.9263 | |
| | | | | 30 | 30 | 9.9289 | 18.085 | -7.11E-03 | 0.3909 | 9.9289 | |
| | | | 1 | | 60 | 9.9314 | 18.087 | -7.37E-03 | 0.3910 | 9.9314 | |
| | | | 2 | | 120 | 9.9339 | 18.090 | -7.62E-03 | 0.3911 | 9.9339 | |
| | | | 5 | | 300 | 9.9339 | 18.090 | -7.62E-03 | 0.3911 | 9.9339 | |
| | | | 10 | | 600 | 9.9365 | 18.092 | -7.87E-03 | 0.3912 | 9.9365 | |
| | | | 15 | | 900 | 9.9517 | 18.108 | -9.40E-03 | 0.3918 | 9.9517 | |
| | | | 30 | | 1800 | 9.9568 | 18.113 | -9.91E-03 | 0.3920 | 9.9568 | |
| | | 1 | 17 | | 4620 | 9.9568 | 18.113 | -9.91E-03 | 0.3920 | 9.9568 | |
| | | 2 | 42 | | 9720 | 9.9619 | 18.118 | -1.04E-02 | 0.3922 | 9.9619 | |
| | | 3 | 50 | | 13800 | 9.9695 | 18.125 | -1.12E-02 | 0.3925 | 9.9695 | |
| | | 4 | 45 | | 17100 | 9.9695 | 18.125 | -1.12E-02 | 0.3925 | 9.9695 | |
| | | 64 | 28 | | 232080 | 10.0584 | 18.214 | -2.01E-02 | 0.3960 | 10.0584 | |



| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|------|--------|---------|-------|---------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|---------|--------|
| DESCARGA (Carga de Sitio + Carga1) | | | | | | | | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg) | | | | 999.6 | L _o (mm) | 18.214 | A _o (cm ²) | 44.18 | | |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) | 25.4 | |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 10.0584 | 18.214 | 0.000 | | |
| | | | | 2 | 2 | 10.109 | 18.265 | -5.08E-03 | 0.39800 | 10.109 |
| | | | | 5 | 5 | 10.109 | 18.265 | -5.08E-03 | 0.39800 | 10.109 |
| | | | | 10 | 10 | 10.109 | 18.265 | -5.08E-03 | 0.39800 | 10.109 |
| | | | | 15 | 15 | 10.109 | 18.265 | -5.08E-03 | 0.39800 | 10.109 |
| | | | | 30 | 30 | 10.109 | 18.265 | -5.08E-03 | 0.39800 | 10.109 |
| | | | 1 | | 60 | 10.109 | 18.265 | -5.08E-03 | 0.39800 | 10.109 |
| | | | 2 | | 120 | 10.109 | 18.265 | -5.08E-03 | 0.39800 | 10.109 |
| | | | 5 | | 300 | 10.112 | 18.268 | -5.33E-03 | 0.39810 | 10.112 |
| | | | 10 | | 600 | 10.114 | 18.270 | -5.59E-03 | 0.39820 | 10.114 |
| | | | 15 | | 900 | 10.114 | 18.270 | -5.59E-03 | 0.39820 | 10.114 |
| | | | 30 | | 1800 | 10.117 | 18.273 | -5.84E-03 | 0.39830 | 10.117 |
| | | 1 | | | 3600 | 10.124 | 18.280 | -6.60E-03 | 0.39860 | 10.124 |
| | | 1 | 39 | | 5940 | 10.130 | 18.286 | -7.11E-03 | 0.39880 | 10.130 |
| | | 17 | 26 | | 62760 | 10.160 | 18.316 | -1.02E-02 | 0.40000 | 10.160 |



| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|------|--------|---------|-------|---------------------|--------------|--------|--------------|---------|-----------------------------------|-------|
| DESCARGA (Carga de Sitio) | | | | | | | | | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg) | | | | 799.9 | L _o (mm) | 18.316 | | | | A _o (cm ²) | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | dism. Altura | | | |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | | 25.4 | | |
| | | | | 0 | 0 | 10.160 | 18.316 | 0.00E+00 | | | |
| | | | | 2 | 2 | 10.198 | 18.354 | -3.81E-03 | 0.40150 | 10.20 | |
| | | | | 15 | 15 | 10.198 | 18.354 | -3.81E-03 | 0.40150 | 10.20 | |
| | | | | 30 | 30 | 10.198 | 18.354 | -3.81E-03 | 0.40150 | 10.20 | |
| | | | 1 | | 60 | 10.198 | 18.354 | -3.81E-03 | 0.40150 | 10.20 | |
| | | | 2 | | 120 | 10.198 | 18.354 | -3.81E-03 | 0.40150 | 10.20 | |
| | | | 5 | | 300 | 10.206 | 18.362 | -4.57E-03 | 0.40180 | 10.21 | |
| | | | 10 | | 600 | 10.206 | 18.362 | -4.57E-03 | 0.40180 | 10.21 | |
| | | | 15 | | 900 | 10.206 | 18.362 | -4.57E-03 | 0.40180 | 10.21 | |
| | | | 30 | | 1800 | 10.211 | 18.367 | -5.08E-03 | 0.40200 | 10.21 | |
| | | 7 | | | 25200 | 10.236 | 18.392 | -7.62E-03 | 0.40300 | 10.24 | |
| | | 8 | 30 | | 30600 | 10.249 | 18.405 | -8.89E-03 | 0.40350 | 10.25 | |

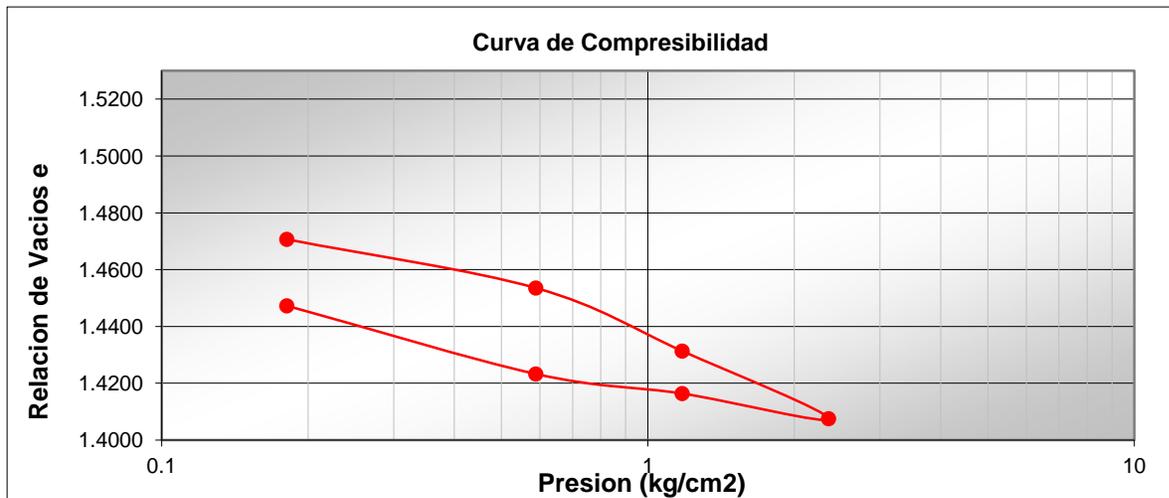


Figura 0.4. Curva de compresibilidad, $G_w=55\%$ en secado.

Tabla 48. Resumen de resultados para obtención de grafica de consolidación, $G_w=55\%$ en secado.

| carga | carga aplicada (Kg/cm ²) | Incremento de presión | Presión Total (kg/cm ²) | dh | altura final | de | e (al final) | Δp | σ (Kg/cm ²) |
|------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|----------|--------------|---------|--------------|------------|--------------------------------|
| insitu | 0.79989 | 0.79989 | 0.79989 | 7.09E-02 | 1.89913 | 0.0549 | 1.4707 | 0.79989 | 0.18106 |
| dp1 | 1.8 | 1.8 | 2.59989 | 2.21E-02 | 1.877 | 0.0171 | 1.4535 | 2.59989 | 0.58849 |
| dp2 | 2.600 | 2.59989 | 5.200 | 0.0287 | 1.8483 | 0.0222 | 1.4313 | 5.19978 | 1.17699 |
| dp3 | 5.200 | 5.19978 | 10.400 | 0.0307 | 1.8176 | 0.0238 | 1.4075 | 10.39956 | 2.35398 |
| desc1 | -5.200 | -5.19978 | 5.200 | -0.0114 | 1.8290 | -0.0089 | 1.4164 | 5.19978 | 1.17699 |
| desc2 | -2.600 | -2.59989 | 2.600 | -0.0089 | 1.8379 | -0.0069 | 1.4233 | 2.59989 | 0.58849 |
| desc3 | -1.800 | -1.8 | 0.800 | -0.0310 | 1.8689 | -0.0240 | 1.4473 | 0.79989 | 0.18106 |
| des insitu | -0.800 | -0.79989 | 0.000 | 0.0000 | 1.8689 | 0.0000 | 1.4473 | 0 | 0 |

Tabla 49. Datos iniciales antes de prueba odométrica para muestra con $G_w=55\%$ en secado

| Testigo de Humedad | | | | | |
|--------------------|--------|----------|--------|--------------|-------|
| Flanera | b2 | W_{mh} | 118.99 | W_w (g) | 29.53 |
| $W_{flanera}$ | 116.66 | W_{ms} | 89.46 | W_s (g) | 89.46 |
| W_{fl+mh} | 235.65 | W_w | 29.53 | ω (%) | 33.0 |
| W_{fla+ms} | 206.12 | ω | 33.01 | S_s | 2.65 |

| Datos Iniciales | | | |
|------------------------------------|--------|-------------------------|-------|
| Anillo No. | 3 | Relacion Brazo | 10 |
| Peso Anillo (g) | 103.17 | | |
| Peso Anillo + Muestra (g) | 209.48 | Altura Anillo (cm) | 1.97 |
| Peso Anillo + Muestra Saturado (g) | 227.53 | Diametro (cm) | 7.5 |
| | | Area (cm ²) | 44.18 |

| Antes de la Consolidacion | | | | | |
|---------------------------------|--------|---|-------|-------------------------------------|-------|
| Peso Muestra W _m (g) | 118.99 | Volumen Muestra V _m (cm ³) | 87.03 | Contenido Agua ω (%) | 33.01 |
| Peso Solidos W _s (g) | 89.46 | Volumen Solidos V _s (cm ³) | 33.76 | Relacion Vacios e _o | 1.58 |
| Peso Agua W _w (g) | 29.53 | Volumen Vacios V _v (cm ³) | 53.27 | Grado Saturacion G _w (%) | 55.43 |

Tabla 50. Datos de compresibilidad para las diferentes cargas aplicadas en la prueba G_w=55% en secado.

| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|---|------|--------|---------|---------------------|--------------|-----------------------------------|--------|-------------------|
| Carga de Sitio | | | | | | 799.89 | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg/cm ²) | | | 0.01811 | L _o (mm) | 19.7 | A _o (cm ²) | 44.179 | |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 10.160 | 19.700 | 0.00E+00 |
| | | | | 2 | 2 | 9.627 | 19.167 | 5.33E-02 |
| | | | | 5 | 5 | 9.624 | 19.164 | 5.36E-02 |
| | | | | 10 | 10 | 9.606 | 19.146 | 5.54E-02 |
| | | | | 15 | 15 | 9.604 | 19.144 | 5.56E-02 |
| | | | | 30 | 30 | 9.599 | 19.139 | 5.61E-02 |
| | | | 1 | | 60 | 9.589 | 19.129 | 5.72E-02 |
| | | | 2 | | 120 | 9.586 | 19.126 | 5.74E-02 |
| | | | 5 | | 300 | 9.571 | 19.111 | 5.89E-02 |
| | | | 10 | | 600 | 9.563 | 19.103 | 5.97E-02 |
| | | | 15 | | 900 | 9.553 | 19.093 | 6.07E-02 |
| | | | 30 | | 1800 | 9.548 | 19.088 | 6.12E-02 |
| | | 1 | | | 3600 | 9.530 | 19.070 | 6.30E-02 |
| | | 2 | 40 | | 9600 | 9.530 | 19.070 | 6.30E-02 |
| | | 4 | 12 | | 15120 | 9.522 | 19.062 | 6.38E-02 |
| | | 26 | | | 93600 | 9.500 | 19.040 | 6.60E-02 |
| | | 71 | 12 | | 256320 | 9.477 | 19.017 | 6.83E-02 |
| | | 102 | 40 | | 369600 | 9.474 | 19.014 | 6.86E-02 |
| | | 108 | 23 | | 390180 | 9.474 | 19.014 | 6.86E-02 |
| | | 117 | 11 | | 421860 | 9.474 | 19.014 | 6.86E-02 |
| | | 136 | 31 | | 491460 | 9.451 | 18.991 | 7.09E-02 |
| | | 160 | 43 | | 578580 | 9.451 | 18.991 | 7.09E-02 |

| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|---|------|--------|---------|---------|---------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| Carga 1 | | | | | | 1800 | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg/cm ²) | | | | 0.04074 | L _o (mm) | 18.991 | A _o (cm ²) | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| 30/09/11 | 9:00 | | | 0 | 0 | 9.451 | 18.991 | 0.00E+00 |
| | | | | 2 | 2 | 9.393 | 18.933 | 5.84E-03 |
| | | | | 5 | 5 | 9.378 | 18.918 | 7.37E-03 |
| | | | | 10 | 10 | 9.378 | 18.918 | 7.37E-03 |
| | | | | 15 | 15 | 9.375 | 18.915 | 7.62E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 9.375 | 18.915 | 7.62E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 9.373 | 18.913 | 7.87E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 9.368 | 18.908 | 8.38E-03 |
| | | | 5 | | 300 | 9.362 | 18.902 | 8.89E-03 |
| | | | 10 | | 600 | 9.357 | 18.897 | 9.40E-03 |
| | | | 15 | | 900 | 9.352 | 18.892 | 9.91E-03 |
| | | | 30 | | 1800 | 9.350 | 18.890 | 1.02E-02 |
| | | 1 | 3 | | 3780 | 9.345 | 18.885 | 1.07E-02 |
| | | 2 | | | 7200 | 9.327 | 18.867 | 1.24E-02 |
| | | 4 | 2 | | 14520 | 9.327 | 18.867 | 1.24E-02 |
| | | 6 | 30 | | 23400 | 9.317 | 18.857 | 1.35E-02 |
| | | 9 | 45 | | 35100 | 9.317 | 18.857 | 1.35E-02 |
| | | 12 | 6 | | 43560 | 9.317 | 18.857 | 1.35E-02 |
| | | 15 | 18 | | 55080 | 9.309 | 18.849 | 1.42E-02 |
| | | 37 | | | 133200 | 9.294 | 18.834 | 1.57E-02 |
| | | 58 | 5 | | 209100 | 9.289 | 18.829 | 1.63E-02 |
| | | 80 | 36 | | 290160 | 9.276 | 18.816 | 1.75E-02 |
| | | 82 | 50 | | 298200 | 9.276 | 18.816 | 1.75E-02 |
| | | 100 | 40 | | 362400 | 9.271 | 18.811 | 1.80E-02 |
| | | 104 | 40 | | 376800 | 9.271 | 18.811 | 1.80E-02 |
| | | 124 | 45 | | 449100 | 9.266 | 18.806 | 1.85E-02 |
| | | 227 | | | 817200 | 9.230 | 18.770 | 2.21E-02 |

| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|--------|---------|--------|---------------------|----------------|-----------------------------------|-------------------|--|
| | | | | | | Carga 2 | 2599.9 | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg/cm2) | | | | 0.0588 | L _o (cm) | 18.770 | A _o (cm ²) | 44.18 | |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) | |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | | |
| 13/10/11 | 13:05 | | | 0 | 0 | 9.230 | 18.770 | 0.00E+00 | |
| | | | | 2 | 2 | 9.144 | 18.684 | 8.60E-03 | |
| | | | | 5 | 5 | 9.144 | 18.684 | 8.60E-03 | |
| | | | | 10 | 10 | 9.144 | 18.684 | 8.60E-03 | |
| | | | | 15 | 15 | 9.141 | 18.681 | 8.85E-03 | |
| | | | | 30 | 30 | 9.139 | 18.679 | 9.11E-03 | |
| | | | 1 | | 60 | 9.131 | 18.671 | 9.87E-03 | |
| | | | 2 | | 120 | 9.126 | 18.666 | 1.04E-02 | |
| | | | 5 | | 300 | 9.119 | 18.659 | 1.11E-02 | |
| | | | 10 | | 600 | 9.116 | 18.656 | 1.14E-02 | |
| | | | 15 | | 900 | 9.116 | 18.656 | 1.14E-02 | |
| | | | 30 | | 1800 | 9.106 | 18.646 | 1.24E-02 | |
| | | 1 | | | 3600 | 9.101 | 18.641 | 1.29E-02 | |
| | | 2 | 35 | | 9300 | 9.093 | 18.633 | 1.37E-02 | |
| | | 4 | 31 | | 16260 | 9.088 | 18.628 | 1.42E-02 | |
| | | 6 | | | 21600 | 9.081 | 18.621 | 1.49E-02 | |
| | | 9 | 7 | | 32820 | 9.068 | 18.608 | 1.62E-02 | |
| | | 26 | | | 93600 | 9.058 | 18.598 | 1.72E-02 | |
| | | 30 | 13 | | 108780 | 9.042 | 18.582 | 1.88E-02 | |
| | | 58 | 49 | | 211740 | 9.037 | 18.577 | 1.93E-02 | |
| | | 94 | | | 338400 | 9.022 | 18.562 | 2.08E-02 | |
| | | 102 | 58 | | 370680 | 9.017 | 18.557 | 2.13E-02 | |
| | | 126 | 16 | | 454560 | 9.017 | 18.557 | 2.13E-02 | |
| | | 165 | 3 | | 594180 | 9.004 | 18.544 | 2.26E-02 | |
| | | 169 | 27 | | 610020 | 8.989 | 18.529 | 2.41E-02 | |
| | | 200 | 18 | | 721080 | 8.969 | 18.509 | 2.61E-02 | |
| | | 266 | 10 | | 958200 | 8.964 | 18.504 | 2.66E-02 | |
| | | 294 | 37 | | 1060620 | 8.961 | 18.501 | 2.69E-02 | |
| | | 316 | 41 | | 1140060 | 8.943 | 18.483 | 2.87E-02 | |
| | | 336 | 9 | | 1210140 | 8.943 | 18.483 | 2.87E-02 | |

| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|---|------|--------|---------|-------|---------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| Carga 3 | | | | | | 5199.8 | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg/cm ²) | | | | 0.118 | L _o (cm) | 18.483 | A _o (cm ²) | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 8.943 | 18.483 | 0.000 |
| | | | | 2 | 2 | 8.839 | 18.379 | 1.04E-02 |
| | | | | 5 | 5 | 8.839 | 18.379 | 1.04E-02 |
| | | | | 10 | 10 | 8.834 | 18.374 | 1.09E-02 |
| | | | | 15 | 15 | 8.834 | 18.374 | 1.09E-02 |
| | | | | 30 | 30 | 8.827 | 18.367 | 1.17E-02 |
| | | | 1 | | 60 | 8.816 | 18.356 | 1.27E-02 |
| | | | 2 | | 120 | 8.809 | 18.349 | 1.35E-02 |
| | | | 5 | | 300 | 8.806 | 18.346 | 1.37E-02 |
| | | | 10 | | 600 | 8.793 | 18.333 | 1.50E-02 |
| | | | 15 | | 900 | 8.791 | 18.331 | 1.52E-02 |
| | | | 30 | | 1800 | 8.783 | 18.323 | 1.60E-02 |
| | | 1 | | | 3600 | 8.776 | 18.316 | 1.68E-02 |
| | | 2 | | | 7200 | 8.763 | 18.303 | 1.80E-02 |
| | | 4 | 30 | | 16200 | 8.748 | 18.288 | 1.96E-02 |
| | | 6 | | | 21600 | 8.745 | 18.285 | 1.98E-02 |
| | | 8 | | | 28800 | 8.740 | 18.280 | 2.03E-02 |
| | | 23 | 30 | | 84600 | 8.717 | 18.257 | 2.26E-02 |
| | | 30 | 30 | | 109800 | 8.712 | 18.252 | 2.31E-02 |
| | | 32 | 28 | | 116880 | 8.712 | 18.252 | 2.31E-02 |
| | | 58 | 35 | | 210900 | 8.689 | 18.229 | 2.54E-02 |
| | | 78 | 21 | | 282060 | 8.687 | 18.227 | 2.57E-02 |
| | | 101 | 56 | | 366960 | 8.674 | 18.214 | 2.69E-02 |
| | | 128 | 28 | | 462480 | 8.666 | 18.206 | 2.77E-02 |
| | | 130 | 31 | | 469860 | 8.666 | 18.206 | 2.77E-02 |
| | | 148 | 18 | | 533880 | 8.661 | 18.201 | 2.82E-02 |
| | | 166 | 56 | | 600960 | 8.661 | 18.201 | 2.82E-02 |
| | | 194 | 4 | | 698640 | 8.656 | 18.196 | 2.87E-02 |
| | | 198 | 53 | | 715980 | 8.656 | 18.196 | 2.87E-02 |
| | | 227 | 27 | | 818820 | 8.656 | 18.196 | 2.87E-02 |
| | | 238 | 54 | | 860040 | 8.641 | 18.181 | 3.02E-02 |
| | | 268 | 59 | | 968340 | 8.636 | 18.176 | 3.07E-02 |

| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|--|------|--------|---------|--------|---------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| DESCARGA (Carga de Sitio + Carga1 + Carga2 + Carga3) | | | | | | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg/cm2) | | | | 0.1177 | L _o (cm) | 18.176 | A _o (cm ²) | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 8.636 | 18.176 | 0.000 |
| | | | | 2 | 2 | 8.687 | 18.227 | -5.08E-03 |
| | | | | 5 | 5 | 8.707 | 18.247 | -7.11E-03 |
| | | | | 10 | 10 | 8.710 | 18.250 | -7.37E-03 |
| | | | | 15 | 15 | 8.710 | 18.250 | -7.37E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 8.712 | 18.252 | -7.62E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 8.712 | 18.252 | -7.62E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 8.715 | 18.255 | -7.87E-03 |
| | | | 5 | | 300 | 8.717 | 18.257 | -8.13E-03 |
| | | | 10 | | 600 | 8.717 | 18.257 | -8.13E-03 |
| | | | 15 | | 900 | 8.717 | 18.257 | -8.13E-03 |
| | | | 30 | | 1800 | 8.725 | 18.265 | -8.89E-03 |
| | | 1 | 7 | | 4020 | 8.733 | 18.273 | -9.65E-03 |
| | | 27 | 3 | | 97380 | 8.750 | 18.290 | -1.14E-02 |
| | | 45 | 20 | | 163200 | 8.750 | 18.290 | -1.14E-02 |

| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|---|------|--------|---------|---------|---------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| DESCARGA (Carga de Sitio + Carga1 + Carga2) | | | | | | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg) | | | | 0.03985 | L _o (mm) | 18.290 | A _o (cm ²) | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 8.750 | 18.290 | 0.00E+00 |
| | | | | 2 | 2 | 8.7884 | 18.328 | -3.81E-03 |
| | | | | 10 | 10 | 8.8011 | 18.341 | -5.08E-03 |
| | | | | 15 | 15 | 8.8062 | 18.346 | -5.59E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 8.8087 | 18.349 | -5.84E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 8.8113 | 18.351 | -6.10E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 8.8138 | 18.354 | -6.35E-03 |
| | | | 5 | | 300 | 8.8163 | 18.356 | -6.60E-03 |
| | | | 10 | | 600 | 8.8214 | 18.361 | -7.11E-03 |
| | | | 15 | | 900 | 8.8265 | 18.367 | -7.62E-03 |
| | | | 30 | | 1800 | 8.8316 | 18.372 | -8.13E-03 |
| | | 1 | 5 | | 3900 | 8.8392 | 18.379 | -8.89E-03 |
| | | 4 | 21 | | 15660 | 8.8392 | 18.379 | -8.89E-03 |
| | | 24 | 46 | | 89160 | 8.8392 | 18.379 | -8.89E-03 |
| | | 75 | 44 | | 272640 | 8.8392 | 18.379 | -8.89E-03 |

| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|------------------------------------|------|--------|---------|-------|---------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| DESCARGA (Carga de Sitio + Carga1) | | | | | | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg) | | | | 999.6 | L _o (mm) | 18.379 | A _o (cm ²) | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 8.839 | 18.379 | 0.000 |
| | | | | 2 | 2 | 8.890 | 18.430 | -5.08E-03 |
| | | | | 5 | 5 | 8.890 | 18.430 | -5.08E-03 |
| | | | | 10 | 10 | 8.890 | 18.430 | -5.08E-03 |
| | | | | 15 | 15 | 8.890 | 18.430 | -5.08E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 8.890 | 18.430 | -5.08E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 8.893 | 18.433 | -5.33E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 8.898 | 18.438 | -5.84E-03 |
| | | | 10 | | 600 | 8.903 | 18.443 | -6.35E-03 |
| | | | 15 | | 900 | 8.908 | 18.448 | -6.86E-03 |
| | | | 30 | | 1800 | 8.910 | 18.450 | -7.11E-03 |
| | | 1 | | | 3600 | 8.915 | 18.455 | -7.62E-03 |
| | | 2 | 11 | | 7860 | 8.928 | 18.468 | -8.89E-03 |
| | | 6 | 32 | | 23520 | 8.928 | 18.468 | -8.89E-03 |
| | | 25 | 32 | | 91920 | 8.931 | 18.471 | -9.14E-03 |
| | | 39 | 9 | | 140940 | 8.931 | 18.471 | -9.14E-03 |

| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|----------------------------------|------|--------|---------|-------|---------------------|--------------|-----------------------------------|--------------|
| DESCARGA (Carga de Sitio) | | | | | | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg) | | | | 799.9 | L _o (mm) | 18.471 | A _o (cm ²) | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | dism. Altura |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 8.931 | 18.471 | 0.00E+00 |
| | | | | 2 | 2 | 9.093 | 18.633 | -1.63E-02 |
| | | | | 5 | 5 | 9.114 | 18.654 | -1.83E-02 |
| | | | | 10 | 10 | 9.119 | 18.659 | -1.88E-02 |
| | | | | 15 | 15 | 9.121 | 18.661 | -1.91E-02 |
| | | | | 30 | 30 | 9.126 | 18.666 | -1.96E-02 |
| | | | 1 | | 60 | 9.134 | 18.674 | -2.03E-02 |
| | | | 2 | | 120 | 9.144 | 18.684 | -2.13E-02 |
| | | | 5 | | 300 | 9.152 | 18.692 | -2.21E-02 |
| | | | 10 | | 600 | 9.164 | 18.704 | -2.34E-02 |
| | | | 15 | | 900 | 9.169 | 18.709 | -2.39E-02 |
| | | | 30 | | 1800 | 9.177 | 18.717 | -2.46E-02 |
| | | 1 | | | 3600 | 9.195 | 18.735 | -2.64E-02 |
| | | 2 | 14 | | 8040 | 9.197 | 18.737 | -2.67E-02 |
| | | 4 | 4 | | 14640 | 9.238 | 18.778 | -3.07E-02 |
| | | 11 | | | 39600 | 9.241 | 18.781 | -3.10E-02 |

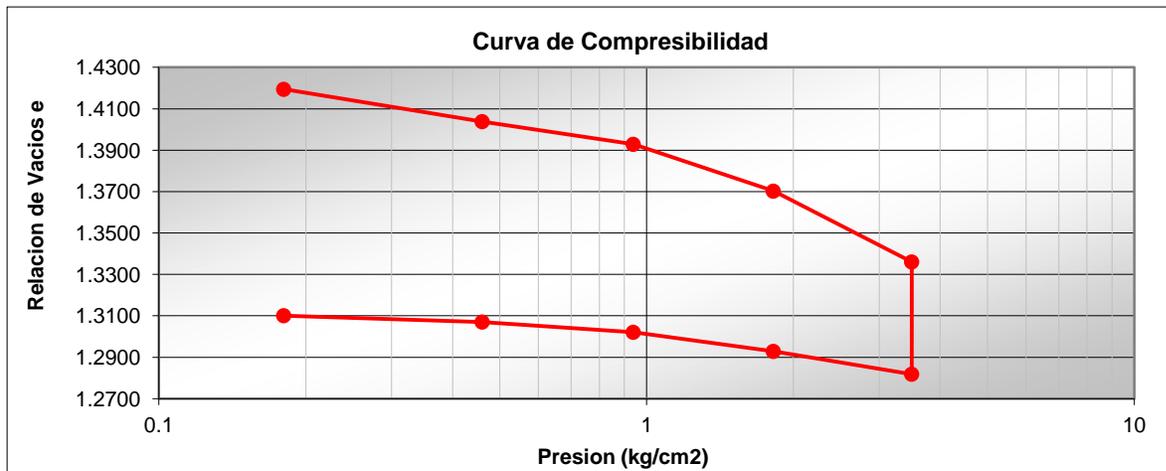


Figura 0.5. Curva de compresibilidad, $G_w=30\%$ en humedecimiento.

Tabla 51. Resumen de resultados para obtención de grafica de consolidación, $G_w=30\%$ en humedecimiento.

| carga | carga aplicada (Kg) | p | Presión Total (kg/cm ²) | dh | altura final | de | e (al final) | Δp | σ |
|------------|---------------------|--------|-------------------------------------|-----------|--------------|---------|--------------|------------|----------|
| insitu | 0.79683 | 0.7968 | 0.79683 | 8.00E-02 | 1.84 | 0.0617 | 1.4195 | 0.79683 | 0.1804 |
| dp1 | 1.23683 | 1.2368 | 2.03366 | 2.11E-02 | 1.8189 | 0.0156 | 1.4039 | 2.03366 | 0.4603 |
| dp2 | 2.117 | 2.1168 | 4.150 | 1.50E-02 | 1.8039 | 0.0110 | 1.3929 | 4.15049 | 0.9395 |
| dp3 | 3.891 | 3.8905 | 8.041 | 3.12E-02 | 1.7727 | 0.0226 | 1.3703 | 8.04102 | 1.8201 |
| dp4 | 7.415 | 7.4148 | 15.456 | 4.79E-02 | 1.7248 | 0.0342 | 1.3361 | 15.45585 | 3.4985 |
| SAT | 7.415 | 7.4148 | 15.456 | 7.79E-02 | 1.6469 | 0.0542 | 1.2819 | 15.45585 | 3.4985 |
| desc1 | -7.415 | -7.415 | 8.041 | -1.65E-02 | 1.6634 | -0.0110 | 1.2929 | 8.04102 | 1.8201 |
| desc2 | -3.891 | -3.891 | 4.150 | -1.37E-02 | 1.6771 | -0.0092 | 1.3021 | 4.15049 | 0.9395 |
| desc3 | -2.117 | -2.117 | 2.034 | -7.30E-03 | 1.6844 | -0.0050 | 1.3071 | 2.03366 | 0.4603 |
| desc4 | -1.237 | -1.237 | 0.797 | -4.50E-03 | 1.6889 | -0.0031 | 1.3101 | 0.79683 | 0.1804 |
| des insitu | -0.797 | -0.797 | 0.000 | 0.00E+00 | 1.6889 | 0.0000 | 1.3101 | 0 | 0 |

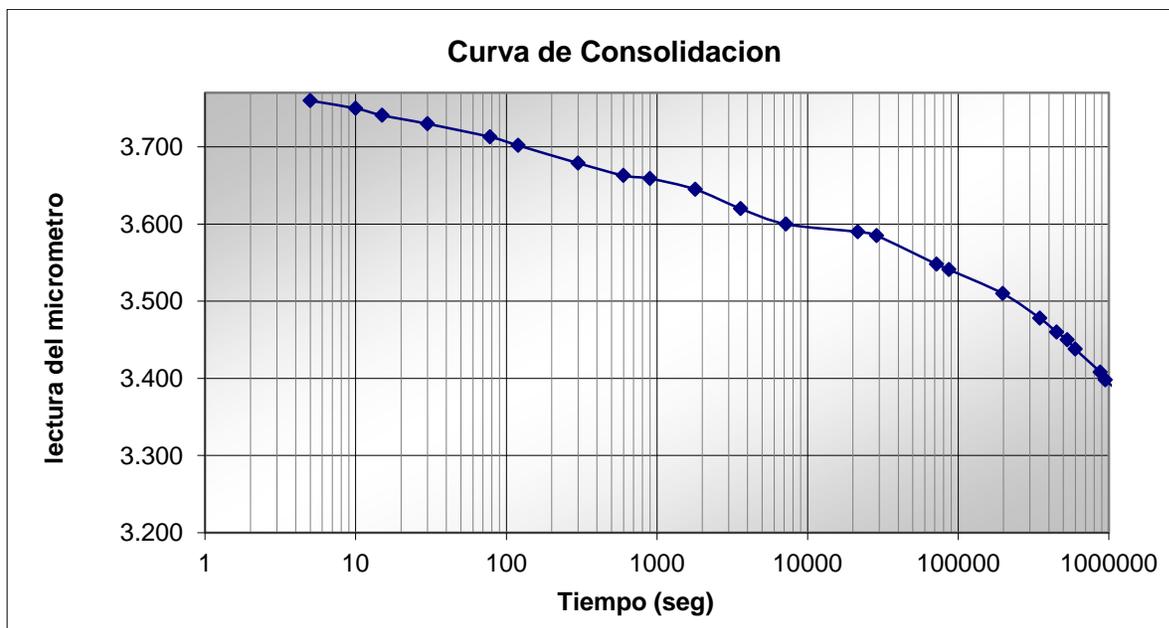
Tabla 52. Datos iniciales antes de prueba odométrica para muestra con $G_w=30\%$ en humedecimiento.

| Testigo de Humedad | | | | | |
|--------------------|----------------|----------|--------|--------------|----------|
| Flanera | b2 | W_{mh} | 115.39 | W_w (g) | 14.06 |
| $W_{flanera}$ | 60.2253 | W_{ms} | 101.33 | W_s (g) | 101.3347 |
| W_{fl+mh} | 175.62 | W_w | 14.06 | ω (%) | 13.9 |
| W_{fla+ms} | 161.56 | ω | 13.87 | S_s | 2.65 |

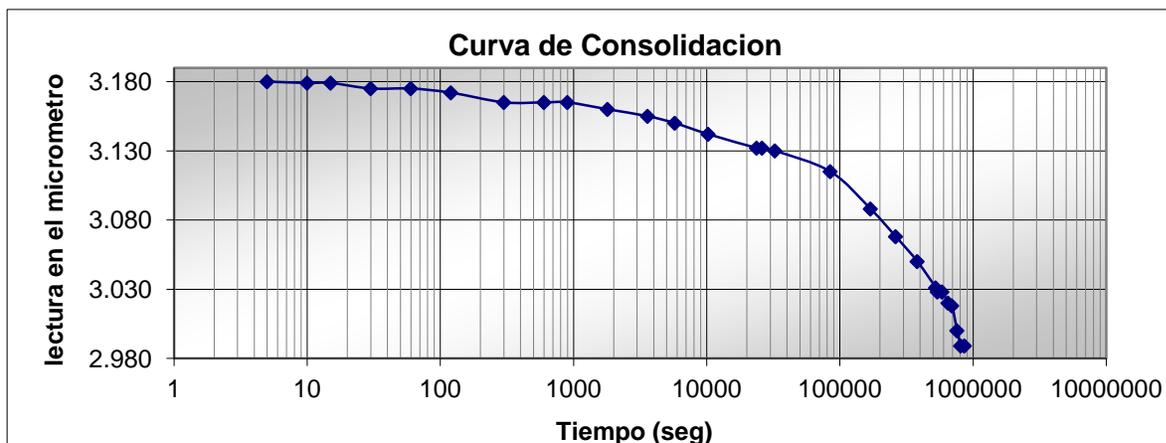
| Datos Iniciales | | | |
|---------------------------|---------|--------------------|------|
| Anillo No. | A1 | Relacion Brazo | 10 |
| Peso Anillo (g) | 60.2253 | | |
| Peso Anillo + Muestra (g) | 177.243 | Altura Anillo (cm) | 1.92 |
| Area (cm ²) | 44.18 | Diametro (cm) | 7.5 |

| Antes de la Consolidacion | | | | | |
|---------------------------|--------|--|-------|-----------------------------|-------|
| Peso Muestra W_m (g) | 115.39 | Volumen Muestra V_m (cm ³) | 84.82 | Contenido Agua ω (%) | 13.87 |
| Peso Solidos W_s (g) | 101.33 | Volumen Solidos V_s (cm ³) | 38.24 | Relacion Vacios e_o | 1.41 |
| Peso Agua W_w (g) | 14.06 | Volumen Vacios V_v (cm ³) | 46.58 | Grado Saturacion G_w (%) | 30.18 |

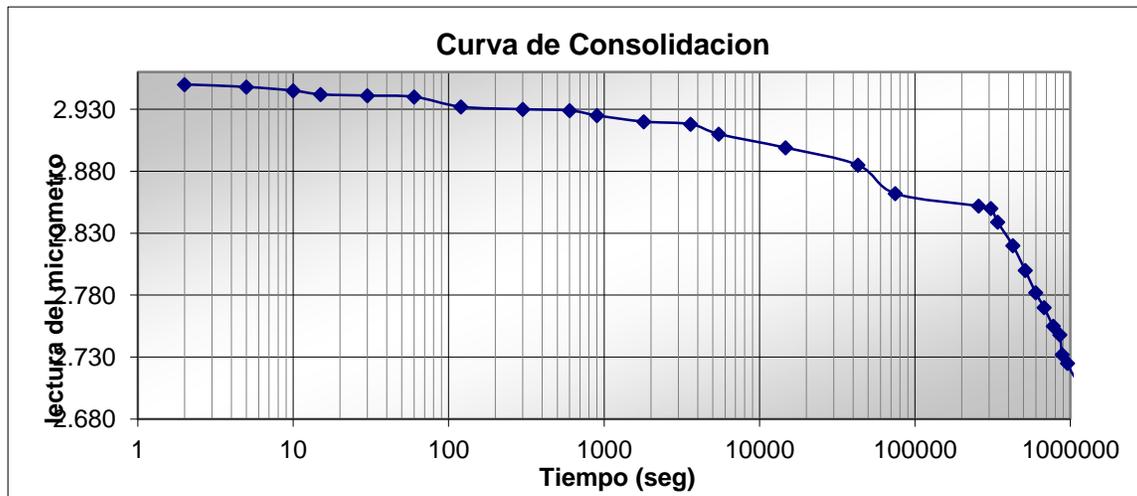
Tabla 53. Curvas de compresibilidad para las diferentes cargas aplicadas en la prueba $G_w=30\%$ en humedecimiento.



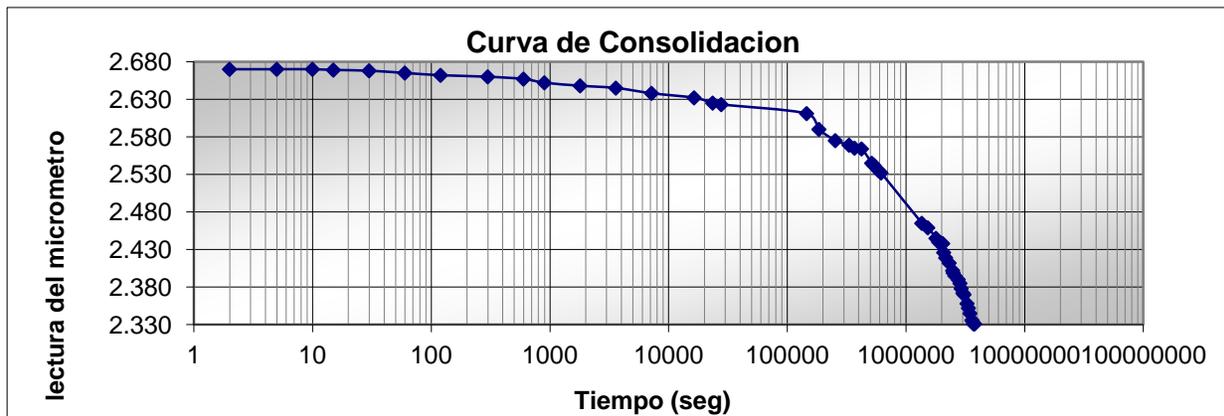
| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------|--------|---------|-------------|---------------------|--------------|-----------------------------------|-------------|--|
| Carga de Sitio | | | | | | 796.83 | gr | | |
| sobre la Pastilla (kg/cm2) | | | | 1.803654163 | L _o (mm) | 19.2 | A _o (cm ²) | 44.179 | |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo | Lect. Micro. | δ | Dism. | |
| | | Horas | Minutos | Seg | (min) | | (mm) | Altura (cm) | |
| | | | | 0 | 0 | 4.000 | 19.200 | 0.00E+00 | |
| | | | | 5 | 5 | 3.760 | 18.960 | 2.40E-02 | |
| | | | | 10 | 10 | 3.750 | 18.950 | 2.50E-02 | |
| | | | | 15 | 15 | 3.741 | 18.941 | 2.59E-02 | |
| | | | | 30 | 30 | 3.730 | 18.930 | 2.70E-02 | |
| | | | 1 | 18 | 78 | 3.713 | 18.913 | 2.87E-02 | |
| | | | 2 | | 120 | 3.702 | 18.902 | 2.98E-02 | |
| | | | 5 | | 300 | 3.679 | 18.879 | 3.21E-02 | |
| | | | 10 | | 600 | 3.663 | 18.863 | 3.37E-02 | |
| | | | 15 | | 900 | 3.659 | 18.859 | 3.41E-02 | |
| | | | 30 | | 1800 | 3.645 | 18.845 | 3.55E-02 | |
| | | 1 | | | 3600 | 3.620 | 18.820 | 3.80E-02 | |
| | | 2 | | | 7200 | 3.600 | 18.800 | 4.00E-02 | |
| | | 6 | | | 21600 | 3.590 | 18.790 | 4.10E-02 | |
| | | 8 | | | 28800 | 3.585 | 18.785 | 4.15E-02 | |
| | | 20 | | | 72000 | 3.548 | 18.748 | 4.52E-02 | |
| | | 24 | 10 | | 87000 | 3.541 | 18.741 | 4.59E-02 | |
| | | 55 | 1 | | 198060 | 3.510 | 18.710 | 4.90E-02 | |
| | | 96 | 57 | | 349020 | 3.478 | 18.678 | 5.22E-02 | |
| | | 125 | 21 | | 451260 | 3.460 | 18.660 | 5.40E-02 | |
| | | 147 | 26 | | 530760 | 3.450 | 18.650 | 5.50E-02 | |
| | | 166 | 38 | | 599880 | 3.438 | 18.638 | 5.62E-02 | |
| | | 244 | 15 | | 879300 | 3.408 | 18.608 | 5.92E-02 | |
| | | 263 | 51 | | 949860 | 3.398 | 18.598 | 6.02E-02 | |
| | | 294 | 24 | | 1059840 | 3.390 | 18.590 | 6.10E-02 | |
| | | 296 | 27 | | 1067220 | 3.389 | 18.589 | 6.11E-02 | |
| | | 314 | 11 | | 1131060 | 3.371 | 18.571 | 6.29E-02 | |
| | | 332 | 50 | | 1198200 | 3.368 | 18.568 | 6.32E-02 | |
| | | 360 | | | 1296000 | 3.350 | 18.550 | 6.50E-02 | |
| | | 364 | 47 | | 1313220 | 3.345 | 18.545 | 6.55E-02 | |
| | | 394 | 22 | | 1419720 | 3.340 | 18.540 | 6.60E-02 | |
| | | 404 | 51 | | 1457460 | 3.312 | 18.512 | 6.88E-02 | |
| | | 434 | 55 | | 1565700 | 3.290 | 18.490 | 7.10E-02 | |
| | | 462 | 18 | | 1664280 | 3.270 | 18.470 | 7.30E-02 | |
| | | 480 | 37 | | 1730220 | 3.252 | 18.452 | 7.48E-02 | |
| | | 508 | 36 | | 1830960 | 3.250 | 18.450 | 7.50E-02 | |
| | | 580 | 28 | | 2089680 | 3.230 | 18.430 | 7.70E-02 | |
| | | 606 | 12 | | 2182320 | 3.215 | 18.415 | 7.85E-02 | |
| | | 619 | 49 | | 2231340 | 3.215 | 18.415 | 7.85E-02 | |
| | | 624 | 1 | | 2246460 | 3.200 | 18.400 | 8.00E-02 | |
| | | 712 | 16 | | 2564160 | 3.200 | 18.400 | 8.00E-02 | |



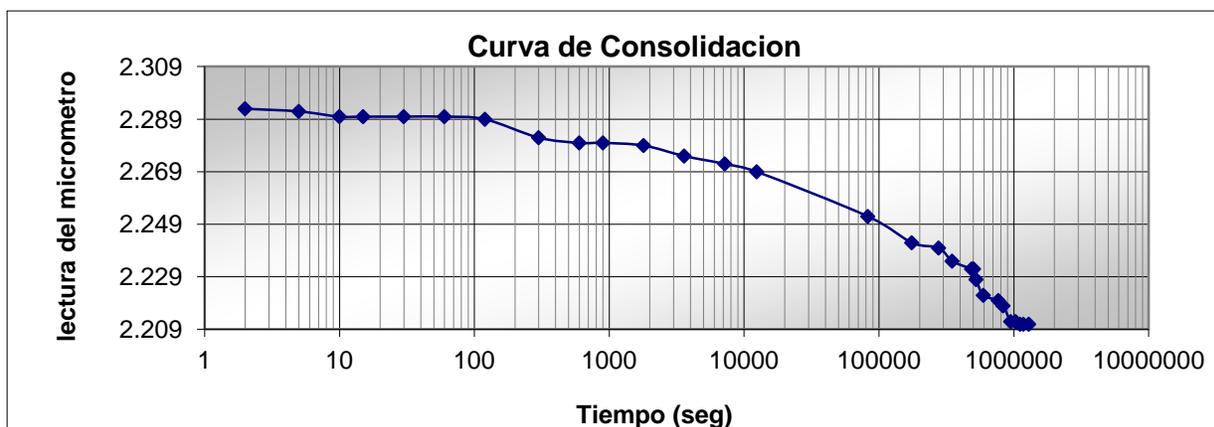
| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|---|------|--------|---------|--------|---------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| Carga 1 | | | | 440 gr | SUMA | 1236.83 | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (ton/m ²) | | | | 1.0 | L _o (mm) | 18.400 | A _o (cm ²) | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 3.200 | 18.400 | 0.00E+00 |
| | | | | 5 | 5 | 3.180 | 18.380 | 2.00E-03 |
| | | | | 10 | 10 | 3.179 | 18.379 | 2.10E-03 |
| | | | | 15 | 15 | 3.179 | 18.379 | 2.10E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 3.175 | 18.375 | 2.50E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 3.175 | 18.375 | 2.50E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 3.172 | 18.372 | 2.80E-03 |
| | | | 5 | | 300 | 3.165 | 18.365 | 3.50E-03 |
| | | | 10 | | 600 | 3.165 | 18.365 | 3.50E-03 |
| | | | 15 | | 900 | 3.165 | 18.365 | 3.50E-03 |
| | | | 30 | | 1800 | 3.160 | 18.360 | 4.00E-03 |
| | | 1 | | | 3600 | 3.155 | 18.355 | 4.50E-03 |
| | | 1 | 36 | | 5760 | 3.150 | 18.350 | 5.00E-03 |
| | | 2 | 51 | | 10260 | 3.142 | 18.342 | 5.80E-03 |
| | | 6 | 35 | | 23700 | 3.132 | 18.332 | 6.80E-03 |
| | | 7 | 14 | | 26040 | 3.132 | 18.332 | 6.80E-03 |
| | | 9 | 2 | | 32520 | 3.130 | 18.330 | 7.00E-03 |
| | | 23 | 31 | | 84660 | 3.115 | 18.315 | 8.50E-03 |
| | | 47 | 7 | | 169620 | 3.088 | 18.288 | 1.12E-02 |
| | | 72 | 51 | | 262260 | 3.068 | 18.268 | 1.32E-02 |
| | | 105 | 47 | | 380820 | 3.050 | 18.250 | 1.50E-02 |
| | | 145 | 30 | | 523800 | 3.031 | 18.231 | 1.69E-02 |
| | | 150 | | | 540000 | 3.028 | 18.228 | 1.72E-02 |
| | | 162 | 29 | | 584940 | 3.028 | 18.228 | 1.72E-02 |
| | | 180 | 15 | | 648900 | 3.020 | 18.220 | 1.80E-02 |
| | | 192 | 21 | | 692460 | 3.018 | 18.218 | 1.82E-02 |
| | | 210 | 16 | | 756960 | 3.000 | 18.200 | 2.00E-02 |
| | | 224 | 14 | | 807240 | 2.989 | 18.189 | 2.11E-02 |
| | | 239 | 12 | | 861120 | 2.989 | 18.189 | 2.11E-02 |



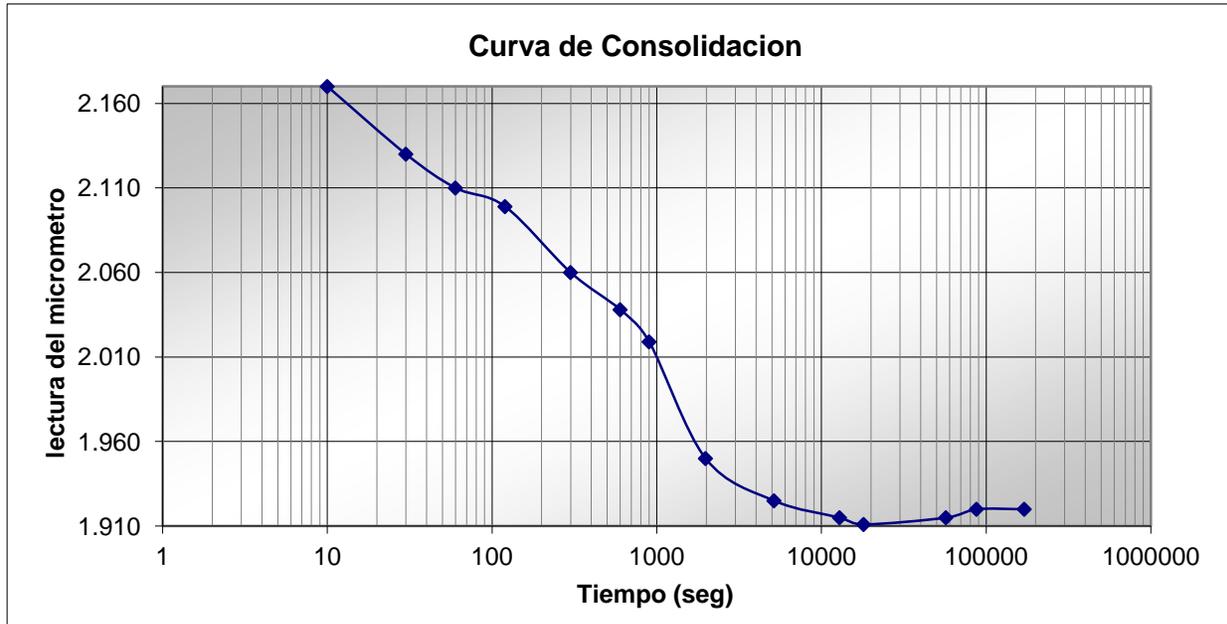
| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|---|-------|--------|---------|---------------------|--------------|-----------------------------------|--------|-------------------|
| Carga 2 | | | 880 gr | SUMA | 2116.83 | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg/cm ²) | | | 2.0 | L _o (cm) | 18.189 | A _o (cm ²) | 44.18 | |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| 07-12-12 | 13:05 | | | 0 | 0 | 2.989 | 18.189 | 0.00E+00 |
| | | | | 2 | 2 | 2.950 | 18.150 | 3.90E-03 |
| | | | | 5 | 5 | 2.948 | 18.148 | 4.10E-03 |
| | | | | 10 | 10 | 2.945 | 18.145 | 4.40E-03 |
| | | | | 15 | 15 | 2.942 | 18.142 | 4.70E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 2.941 | 18.141 | 4.80E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 2.940 | 18.140 | 4.90E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 2.932 | 18.132 | 5.70E-03 |
| | | | 5 | | 300 | 2.930 | 18.130 | 5.90E-03 |
| | | | 10 | | 600 | 2.929 | 18.129 | 6.00E-03 |
| | | | 15 | | 900 | 2.925 | 18.125 | 6.40E-03 |
| | | | 30 | | 1800 | 2.920 | 18.120 | 6.90E-03 |
| | | | 1 | | 3600 | 2.918 | 18.118 | 7.10E-03 |
| | | | 1 | 31 | 5460 | 2.910 | 18.110 | 7.90E-03 |
| | | | 4 | 5 | 14700 | 2.899 | 18.099 | 9.00E-03 |
| | | | 11 | 56 | 42960 | 2.885 | 18.085 | 1.04E-02 |
| | | | 20 | 43 | 74580 | 2.862 | 18.062 | 1.27E-02 |
| | | | 71 | 19 | 256740 | 2.852 | 18.052 | 1.37E-02 |
| | | | 85 | 30 | 307800 | 2.850 | 18.050 | 1.39E-02 |
| | | | 94 | 33 | 340380 | 2.839 | 18.039 | 1.50E-02 |
| | | | 118 | 23 | 426180 | 2.820 | 18.020 | 1.69E-02 |
| | | | 142 | 18 | 512280 | 2.800 | 18.000 | 1.89E-02 |
| | | | 166 | 4 | 597840 | 2.782 | 17.982 | 2.07E-02 |
| | | | 188 | 9 | 677340 | 2.770 | 17.970 | 2.19E-02 |
| | | | 215 | 29 | 775740 | 2.755 | 17.955 | 2.34E-02 |
| | | | 237 | 27 | 854820 | 2.748 | 17.948 | 2.41E-02 |
| | | | 245 | 45 | 884700 | 2.732 | 17.932 | 2.57E-02 |
| | | | 266 | 3 | 957780 | 2.725 | 17.925 | 2.64E-02 |
| | | | 282 | 16 | 1016160 | 2.718 | 17.918 | 2.71E-02 |
| | | | 310 | 6 | 1116360 | 2.710 | 17.910 | 2.79E-02 |
| | | | 335 | 37 | 1208220 | 2.702 | 17.902 | 2.87E-02 |
| | | | 357 | 33 | 1287180 | 2.700 | 17.900 | 2.89E-02 |
| | | | 360 | 20 | 1297200 | 2.690 | 17.890 | 2.99E-02 |
| | | | 406 | 25 | 1463100 | 2.690 | 17.890 | 2.99E-02 |



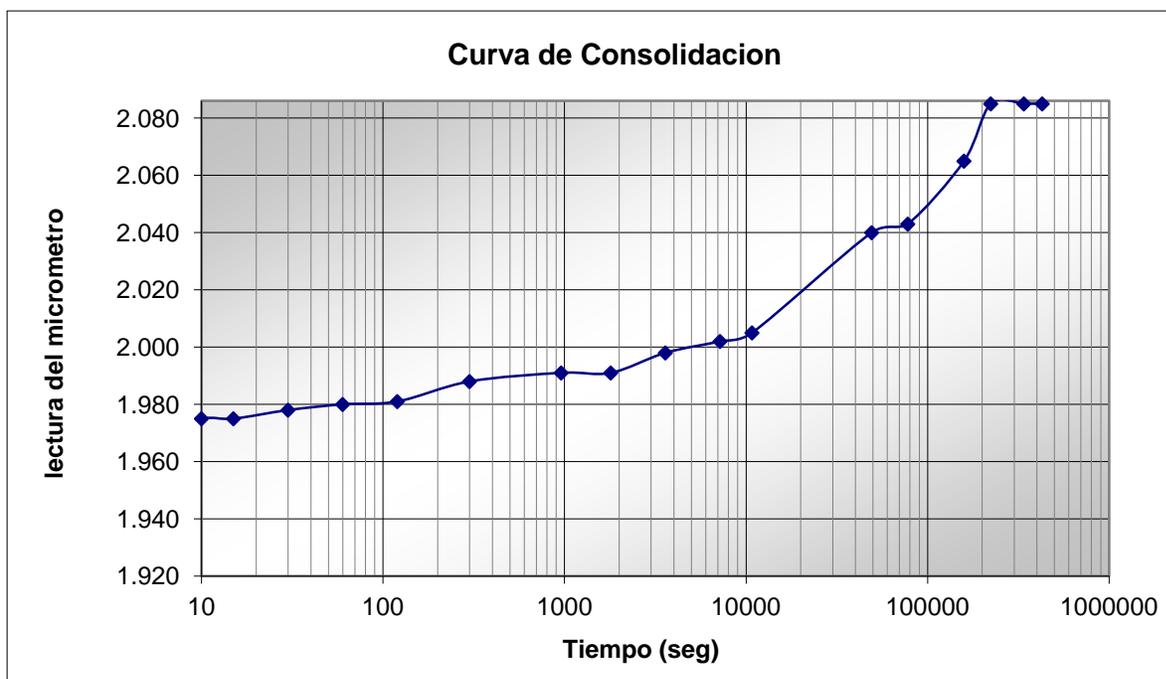
| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|--------|---------|-----------|---------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| Carga 3 | | | | 1773.7 gr | SUMA | 3890.53 | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg/cm2) | | | | 4.0 | L _o (cm) | 17.890 | A _o (cm ²) | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| 27/10/11 | 12:15 | | | 0 | 0 | 2.690 | 17.890 | 0.000 |
| | | | | 2 | 2 | 2.670 | 17.870 | 2.00E-03 |
| | | | | 5 | 5 | 2.670 | 17.870 | 2.00E-03 |
| | | | | 10 | 10 | 2.670 | 17.870 | 2.00E-03 |
| | | | | 15 | 15 | 2.669 | 17.869 | 2.10E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 2.668 | 17.868 | 2.20E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 2.665 | 17.865 | 2.50E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 2.662 | 17.862 | 2.80E-03 |
| | | | 5 | | 300 | 2.660 | 17.860 | 3.00E-03 |
| | | | 10 | | 600 | 2.657 | 17.857 | 3.30E-03 |
| | | | 15 | | 900 | 2.652 | 17.852 | 3.80E-03 |
| | | | 30 | | 1800 | 2.648 | 17.848 | 4.20E-03 |
| | | 1 | | | 3600 | 2.645 | 17.845 | 4.50E-03 |
| | | 2 | | | 7200 | 2.638 | 17.838 | 5.20E-03 |
| | | 4 | 34 | | 16440 | 2.632 | 17.832 | 5.80E-03 |
| | | 6 | 33 | | 23580 | 2.625 | 17.825 | 6.50E-03 |
| | | 7 | 44 | | 27840 | 2.623 | 17.823 | 6.70E-03 |
| | | 40 | 32 | | 145920 | 2.611 | 17.811 | 7.90E-03 |
| | | 51 | 28 | | 185280 | 2.590 | 17.790 | 1.00E-02 |
| | | 70 | 45 | | 254700 | 2.575 | 17.775 | 1.15E-02 |
| | | 92 | 20 | | 332400 | 2.569 | 17.769 | 1.21E-02 |
| | | 102 | 46 | | 369960 | 2.565 | 17.765 | 1.25E-02 |
| | | 117 | 35 | | 423300 | 2.564 | 17.764 | 1.26E-02 |
| | | 143 | 20 | | 516000 | 2.545 | 17.745 | 1.45E-02 |
| | | 150 | 3 | | 540180 | 2.542 | 17.742 | 1.48E-02 |
| | | 164 | 3 | | 590580 | 2.535 | 17.735 | 1.55E-02 |
| | | 171 | 49 | | 618540 | 2.532 | 17.732 | 1.58E-02 |
| | | 378 | 42 | | 1363320 | 2.465 | 17.665 | 2.25E-02 |
| | | 425 | 22 | | 1531320 | 2.459 | 17.659 | 2.31E-02 |
| | | 498 | 27 | | 1794420 | 2.445 | 17.645 | 2.45E-02 |
| | | 524 | 50 | | 1889400 | 2.440 | 17.640 | 2.50E-02 |
| | | 546 | 30 | | 1967400 | 2.439 | 17.639 | 2.51E-02 |
| | | 568 | 48 | | 2047680 | 2.438 | 17.638 | 2.52E-02 |
| | | 579 | | | 2084400 | 2.426 | 17.626 | 2.64E-02 |
| | | 602 | 20 | | 2168400 | 2.419 | 17.619 | 2.71E-02 |
| | | 644 | 25 | | 2319900 | 2.412 | 17.612 | 2.78E-02 |
| | | 689 | 59 | | 2483940 | 2.402 | 17.602 | 2.88E-02 |
| | | 696 | 48 | | 2508480 | 2.399 | 17.599 | 2.91E-02 |
| | | 720 | 2 | | 2592120 | 2.395 | 17.595 | 2.95E-02 |
| | | 769 | 32 | | 2770320 | 2.390 | 17.590 | 3.00E-02 |
| | | 794 | 15 | | 2859300 | 2.385 | 17.585 | 3.05E-02 |
| | | 813 | 48 | | 2929680 | 2.378 | 17.578 | 3.12E-02 |
| | | 841 | 25 | | 3029100 | 2.372 | 17.572 | 3.18E-02 |
| | | 859 | 43 | | 3094980 | 2.370 | 17.570 | 3.20E-02 |
| | | 911 | 40 | | 3282000 | 2.358 | 17.558 | 3.32E-02 |
| | | 935 | 58 | | 3369480 | 2.352 | 17.552 | 3.38E-02 |
| | | 964 | 26 | | 3471960 | 2.345 | 17.545 | 3.45E-02 |
| | | 1003 | 48 | | 3613680 | 2.336 | 17.536 | 3.54E-02 |
| | | 1009 | 40 | | 3634800 | 2.335 | 17.535 | 3.55E-02 |
| | | 1034 | 13 | | 3723180 | 2.331 | 17.531 | 3.59E-02 |
| | | 1056 | 10 | | 3802200 | 2.331 | 17.531 | 3.59E-02 |



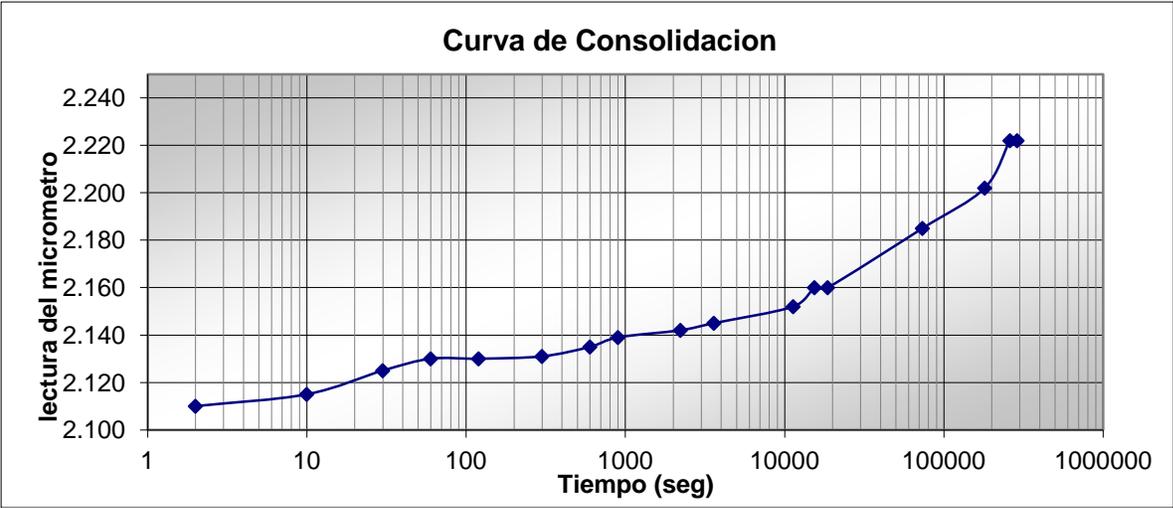
| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|---|-------|--------|---------|-----------|---------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| CARGA 4 | | | | 3524.3 gr | SUMA | 7414.83 | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg/cm ²) | | | | 0.168 | L _o (cm) | 17.531 | A _o (cm ²) | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| 12-01-12 | 12:15 | | | 0 | 0 | 2.331 | 17.531 | 0.000 |
| | | | | 2 | 2 | 2.293 | 17.493 | 3.97E-02 |
| | | | | 5 | 5 | 2.292 | 17.492 | 3.98E-02 |
| | | | | 10 | 10 | 2.290 | 17.490 | 4.00E-02 |
| | | | | 15 | 15 | 2.290 | 17.490 | 4.00E-02 |
| | | | | 30 | 30 | 2.290 | 17.490 | 4.00E-02 |
| | | | 1 | | 60 | 2.290 | 17.490 | 4.00E-02 |
| | | | 2 | | 120 | 2.289 | 17.489 | 4.01E-02 |
| | | | 5 | | 300 | 2.282 | 17.482 | 4.08E-02 |
| | | | 10 | | 600 | 2.280 | 17.480 | 4.10E-02 |
| | | | 15 | | 900 | 2.280 | 17.480 | 4.10E-02 |
| | | | 30 | | 1800 | 2.279 | 17.479 | 4.11E-02 |
| | | 1 | | | 3600 | 2.275 | 17.475 | 4.15E-02 |
| | | 2 | | | 7200 | 2.272 | 17.472 | 4.18E-02 |
| | | 3 | 27 | | 12420 | 2.269 | 17.469 | 4.21E-02 |
| | | 23 | | | 82800 | 2.252 | 17.452 | 4.38E-02 |
| | | 48 | 39 | | 175140 | 2.242 | 17.442 | 4.48E-02 |
| | | 77 | | | 277200 | 2.240 | 17.440 | 4.50E-02 |
| | | 96 | 56 | | 348960 | 2.235 | 17.435 | 4.55E-02 |
| | | 135 | 18 | | 487080 | 2.232 | 17.432 | 4.58E-02 |
| | | 138 | 10 | | 497400 | 2.232 | 17.432 | 4.58E-02 |
| | | 139 | 59 | | 503940 | 2.232 | 17.432 | 4.58E-02 |
| | | 145 | 56 | | 525360 | 2.228 | 17.428 | 4.62E-02 |
| | | 165 | 16 | | 594960 | 2.222 | 17.422 | 4.68E-02 |
| | | 213 | 20 | | 768000 | 2.220 | 17.420 | 4.70E-02 |
| | | 231 | 11 | | 832260 | 2.218 | 17.418 | 4.72E-02 |
| | | 263 | 46 | | 949560 | 2.212 | 17.412 | 4.78E-02 |
| | | 286 | 38 | | 1031880 | 2.212 | 17.412 | 4.78E-02 |
| | | 309 | 6 | | 1112760 | 2.211 | 17.411 | 4.79E-02 |
| | | 326 | 59 | | 1177140 | 2.211 | 17.411 | 4.79E-02 |
| | | 359 | 15 | | 1293300 | 2.211 | 17.411 | 4.79E-02 |



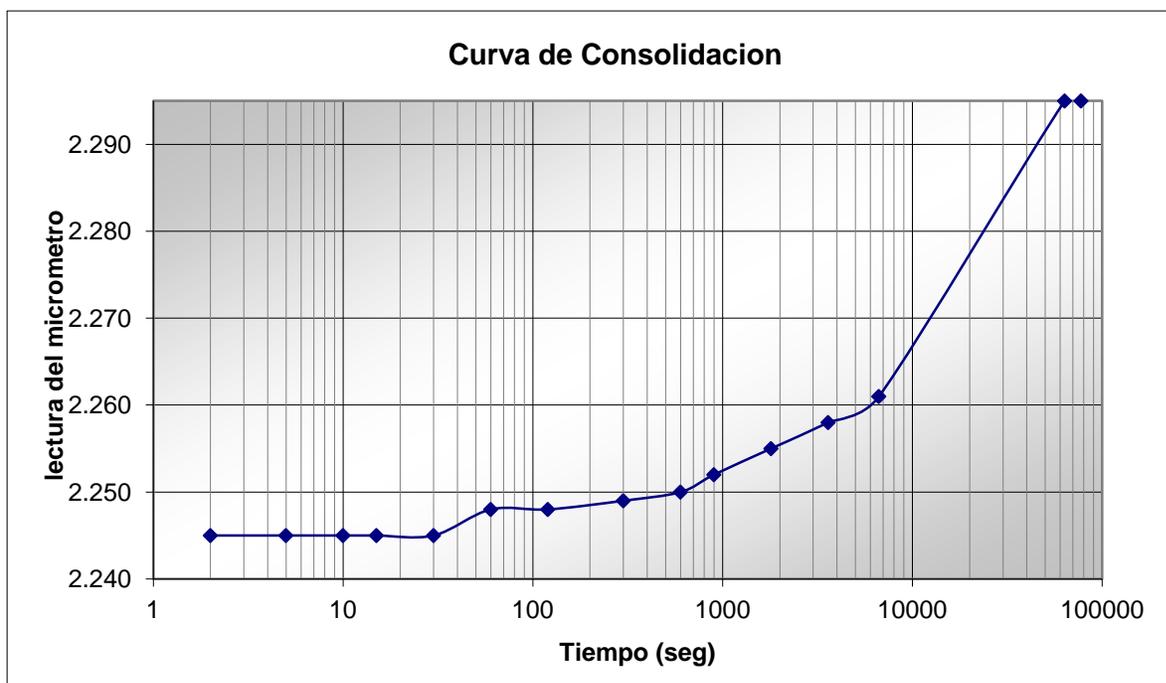
| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|--------------------------------------|------|--------|---------|---------------------|--------------|-----------------------------------|--------|-------------------|
| SAT | | | 0 gr | | SUMA | 7414.83 | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg/cm2) | | | 0.168 | L _o (cm) | 17.411 | A _o (cm ²) | | |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 2.211 | 17.411 | 0.000 |
| | | | | 10 | 10 | 2.170 | 17.370 | 5.20E-02 |
| | | | | 30 | 30 | 2.130 | 17.330 | 5.60E-02 |
| | | | 1 | | 60 | 2.110 | 17.310 | 5.80E-02 |
| | | | 2 | | 120 | 2.099 | 17.299 | 5.91E-02 |
| | | | 5 | | 300 | 2.060 | 17.260 | 6.30E-02 |
| | | | 10 | | 600 | 2.038 | 17.238 | 6.52E-02 |
| | | | 15 | | 900 | 2.019 | 17.219 | 6.71E-02 |
| | | | 33 | | 1980 | 1.950 | 17.150 | 7.40E-02 |
| | | 1 | 26 | | 5160 | 1.925 | 17.125 | 7.65E-02 |
| | | 3 | 35 | | 12900 | 1.915 | 17.115 | 7.75E-02 |
| | | 5 | 1 | | 18060 | 1.911 | 17.111 | 7.79E-02 |
| | | 15 | 51 | | 57060 | 1.915 | 17.115 | 7.75E-02 |
| | | 24 | 19 | | 87540 | 1.920 | 17.120 | 7.70E-02 |
| | | 47 | 24 | | 170640 | 1.920 | 17.120 | 7.70E-02 |



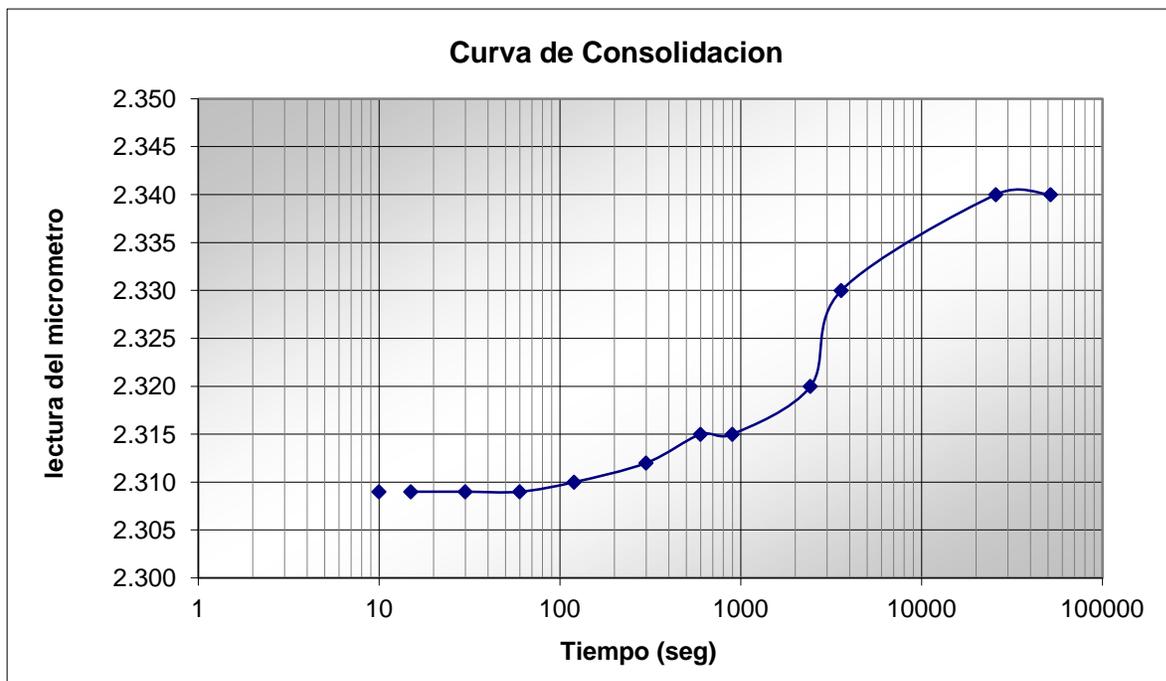
| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|--|------|--------|---------|-----|---------------------|--------------|--------|-------------------|
| DESCARGA (Carga de Sitio + Carga1 + Carga2 + Carga3) | | | | | | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (ton/m ²) | | | | 8.0 | L _o (cm) | 17.578 | | |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 1.920 | 17.578 | 0.000 |
| | | | | 2 | 2 | 1.925 | 17.583 | -5.00E-04 |
| | | | | 5 | 5 | 1.970 | 17.628 | -5.00E-03 |
| | | | | 10 | 10 | 1.975 | 17.633 | -5.50E-03 |
| | | | | 15 | 15 | 1.975 | 17.633 | -5.50E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 1.978 | 17.636 | -5.80E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 1.980 | 17.638 | -6.00E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 1.981 | 17.639 | -6.10E-03 |
| | | | 5 | | 300 | 1.988 | 17.646 | -6.80E-03 |
| | | | 16 | | 960 | 1.991 | 17.649 | -7.10E-03 |
| | | | 30 | | 1800 | 1.991 | 17.649 | -7.10E-03 |
| | | 1 | | | 3600 | 1.998 | 17.656 | -7.80E-03 |
| | | 2 | | | 7200 | 2.002 | 17.660 | -8.20E-03 |
| | | 3 | | | 10800 | 2.005 | 17.663 | -8.50E-03 |
| | | 13 | 42 | | 49320 | 2.040 | 17.698 | -1.20E-02 |
| | | 21 | 39 | | 77940 | 2.043 | 17.701 | -1.23E-02 |
| | | 44 | 11 | | 159060 | 2.065 | 17.723 | -1.45E-02 |
| | | 62 | 3 | | 223380 | 2.085 | 17.743 | -1.65E-02 |
| | | 94 | 26 | | 339960 | 2.085 | 17.743 | -1.65E-02 |
| | | 119 | 13 | | 429180 | 2.085 | 17.743 | -1.65E-02 |



| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|---|------|--------|---------|---------|---------------------|--------------|--------|-------------------|
| DESCARGA (Carga de Sitio + Carga1 + Carga2) | | | | | | 3890.5 | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg) | | | | 0.08806 | L _o (mm) | | 17.698 | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 2.085 | 17.698 | 0.00E+00 |
| | | | | 2 | 2 | 2.110 | 17.723 | -2.50E-03 |
| | | | | 10 | 10 | 2.115 | 17.728 | -3.00E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 2.125 | 17.738 | -4.00E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 2.130 | 17.743 | -4.50E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 2.130 | 17.743 | -4.50E-03 |
| | | | 5 | | 300 | 2.131 | 17.744 | -4.60E-03 |
| | | | 10 | | 600 | 2.135 | 17.748 | -5.00E-03 |
| | | | 15 | | 900 | 2.139 | 17.752 | -5.40E-03 |
| | | | 37 | | 2220 | 2.142 | 17.755 | -5.70E-03 |
| | | 1 | | | 3600 | 2.145 | 17.758 | -6.00E-03 |
| | | 3 | 9 | | 11340 | 2.152 | 17.765 | -6.70E-03 |
| | | 4 | 17 | | 15420 | 2.160 | 17.773 | -7.50E-03 |
| | | 5 | 11 | | 18660 | 2.160 | 17.773 | -7.50E-03 |
| | | 20 | 24 | | 73440 | 2.185 | 17.798 | -1.00E-02 |
| | | 50 | 13 | | 180780 | 2.202 | 17.815 | -1.17E-02 |
| | | 72 | 23 | | 260580 | 2.222 | 17.835 | -1.37E-02 |
| | | 80 | 15 | | 288900 | 2.222 | 17.835 | -1.37E-02 |



| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|------------------------------------|------|--------|---------|-------|---------------------|--------------|--------|-------------------|
| DESCARGA (Carga de Sitio + Carga1) | | | | | | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg) | | | | 999.6 | L _o (mm) | 17.835 | | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 2.222 | 17.835 | 0.000 |
| | | | | 2 | 2 | 2.245 | 17.858 | -2.30E-03 |
| | | | | 5 | 5 | 2.245 | 17.858 | -2.30E-03 |
| | | | | 10 | 10 | 2.245 | 17.858 | -2.30E-03 |
| | | | | 15 | 15 | 2.245 | 17.858 | -2.30E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 2.245 | 17.858 | -2.30E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 2.248 | 17.861 | -2.60E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 2.248 | 17.861 | -2.60E-03 |
| | | | 5 | | 300 | 2.249 | 17.862 | -2.70E-03 |
| | | | 10 | | 600 | 2.250 | 17.863 | -2.80E-03 |
| | | | 15 | | 900 | 2.252 | 17.865 | -3.00E-03 |
| | | | 30 | | 1800 | 2.255 | 17.868 | -3.30E-03 |
| | | 1 | | | 3600 | 2.258 | 17.871 | -3.60E-03 |
| | | 1 | 51 | | 6660 | 2.261 | 17.874 | -3.90E-03 |
| | | 17 | 38 | | 63480 | 2.295 | 17.908 | -7.30E-03 |
| | | 21 | 30 | | 77400 | 2.295 | 17.908 | -7.30E-03 |



| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|----------------------------------|------|--------|---------|---------------------|--------------|-----------------------------------|--------|--------------|
| DESCARGA (Carga de Sitio) | | | | | | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg) | | | 799.9 | L _o (mm) | 17.908 | A _o (cm ²) | 44.18 | |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | dism. Altura |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 2.295 | 17.908 | 0.00E+00 |
| | | | | 10 | 10 | 2.309 | 17.922 | -1.40E-03 |
| | | | | 15 | 15 | 2.309 | 17.922 | -1.40E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 2.309 | 17.922 | -1.40E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 2.309 | 17.922 | -1.40E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 2.310 | 17.923 | -1.50E-03 |
| | | | 5 | | 300 | 2.312 | 17.925 | -1.70E-03 |
| | | | 10 | | 600 | 2.315 | 17.928 | -2.00E-03 |
| | | | 15 | | 900 | 2.315 | 17.928 | -2.00E-03 |
| | | | 40 | 30 | 2430 | 2.320 | 17.933 | -2.50E-03 |
| | | 1 | | | 3600 | 2.330 | 17.943 | -3.50E-03 |
| | | 7 | 10 | | 25800 | 2.340 | 17.953 | -4.50E-03 |
| | | 14 | 24 | | 51840 | 2.340 | 17.953 | -4.50E-03 |

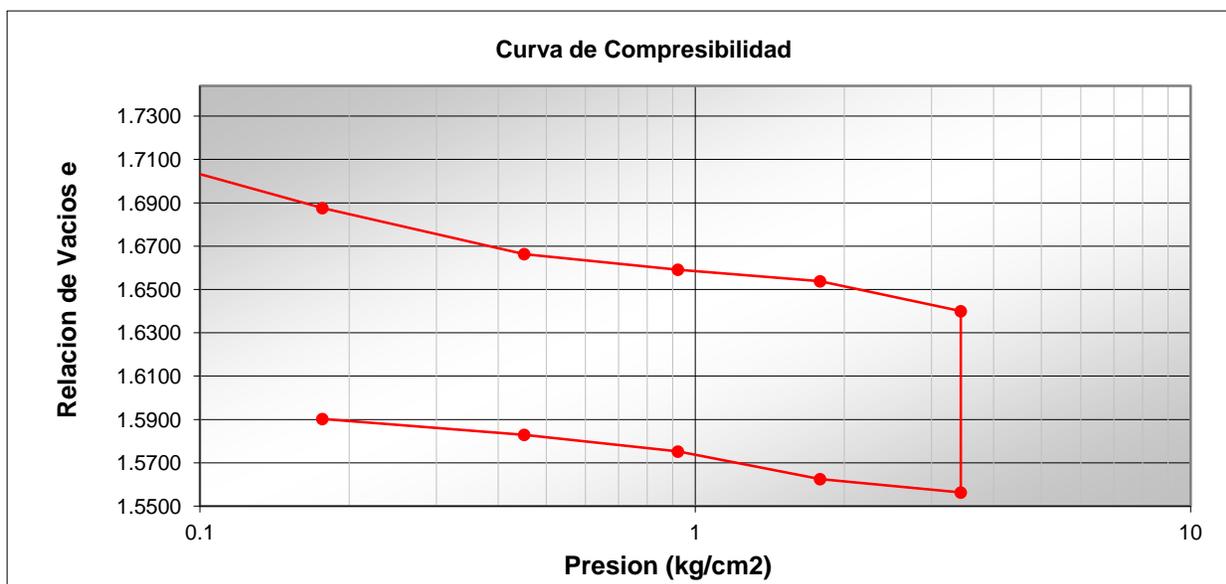


Figura 0.6. Curva de compresibilidad, $G_w=48\%$ en humedecimiento.

Tabla 54. Resumen de resultados para obtención de grafica de consolidación, $G_w=48\%$ en humedecimiento.

| carga | carga aplicada (Kg) | | Presión Total (kg/cm2) | dh | altura final | de | e (al final) | Δp | σ |
|------------|---------------------|--------|------------------------|-----------|--------------|---------|--------------|------------|----------|
| insitu | 0.781 | 0.781 | 0.781 | 6.58E-02 | 1.9642 | 0.0565 | 1.6876 | 0.781 | 0.1768 |
| dp1 | 1.215 | 1.215 | 1.996 | 2.47E-02 | 1.9395 | 0.0212 | 1.6664 | 1.996 | 0.4518 |
| dp2 | 2.083 | 2.0826 | 4.079 | 8.40E-03 | 1.9311 | 0.0072 | 1.6591 | 4.0786 | 0.9232 |
| dp3 | 3.819 | 3.8189 | 7.898 | 6.20E-03 | 1.9249 | 0.0053 | 1.6538 | 7.8975 | 1.7876 |
| dp4 | 7.293 | 7.2932 | 15.191 | 1.61E-02 | 1.9088 | 0.0138 | 1.6400 | 15.1907 | 3.4385 |
| SAT | 7.293 | 7.2932 | 15.191 | 9.74E-02 | 1.8114 | 0.0837 | 1.5563 | 15.1907 | 3.4385 |
| desc1 | -7.293 | -7.293 | 7.898 | -7.20E-03 | 1.8186 | -0.0062 | 1.5625 | 7.8975 | 1.7876 |
| desc2 | -3.819 | -3.819 | 4.079 | -1.48E-02 | 1.8334 | -0.0127 | 1.5752 | 4.0786 | 0.9232 |
| desc3 | -2.083 | -2.083 | 1.996 | -9.00E-03 | 1.8424 | -0.0077 | 1.5829 | 1.996 | 0.4518 |
| desc4 | -1.215 | -1.215 | 0.781 | -8.50E-03 | 1.8509 | -0.0073 | 1.5902 | 0.781 | 0.1768 |
| des insitu | -0.781 | -0.781 | 0.000 | 0.00E+00 | 1.8509 | 0.0000 | 1.5902 | 0 | 0 |

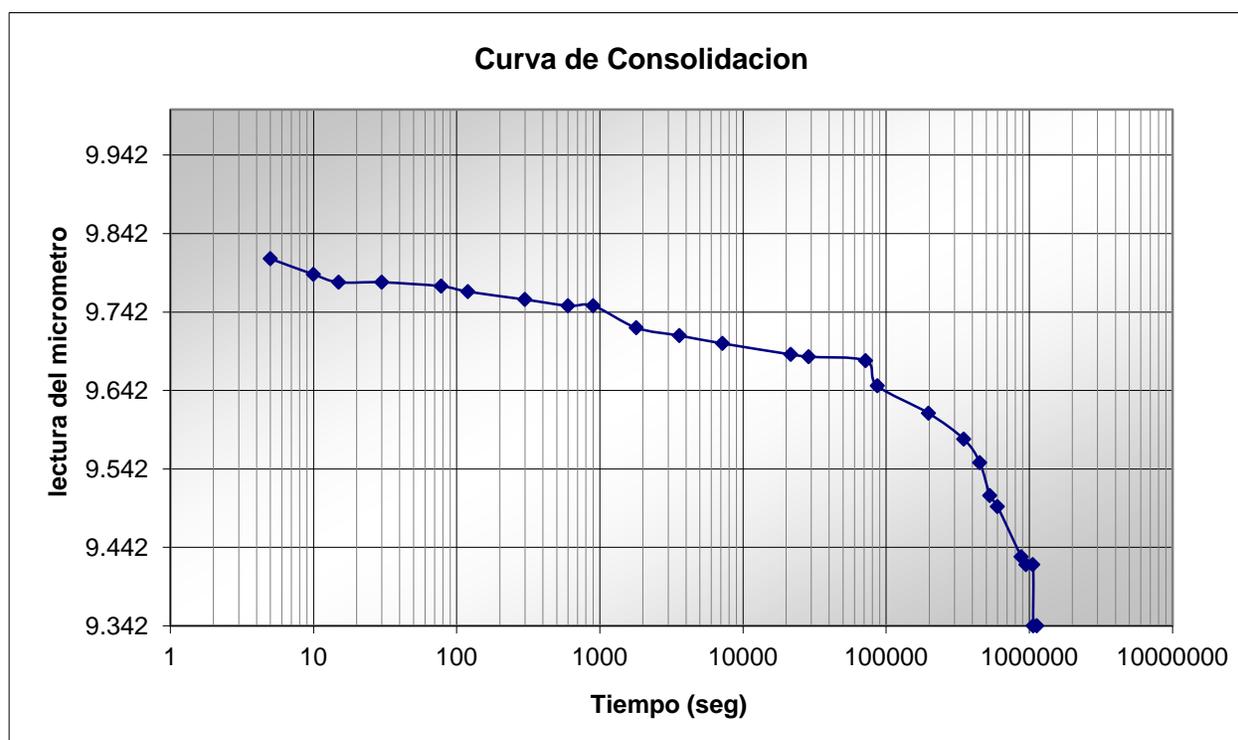
Tabla 55. Datos iniciales antes de prueba odométrica para muestra con $G_w=48\%$ en humedecimiento.

| Testigo de Humedad | | | | | |
|--------------------|----------|----------|--------|--------------|---------|
| Flanera | 14 | W_{mh} | 110.17 | W_w (g) | 28.493 |
| $W_{flanera}$ | 118.3229 | W_{ms} | 81.68 | W_s (g) | 81.6751 |
| W_{fl+mh} | 228.491 | W_w | 28.49 | ω (%) | 34.9 |
| W_{fla+ms} | 199.998 | ω | 34.89 | S_s | 2.65 |

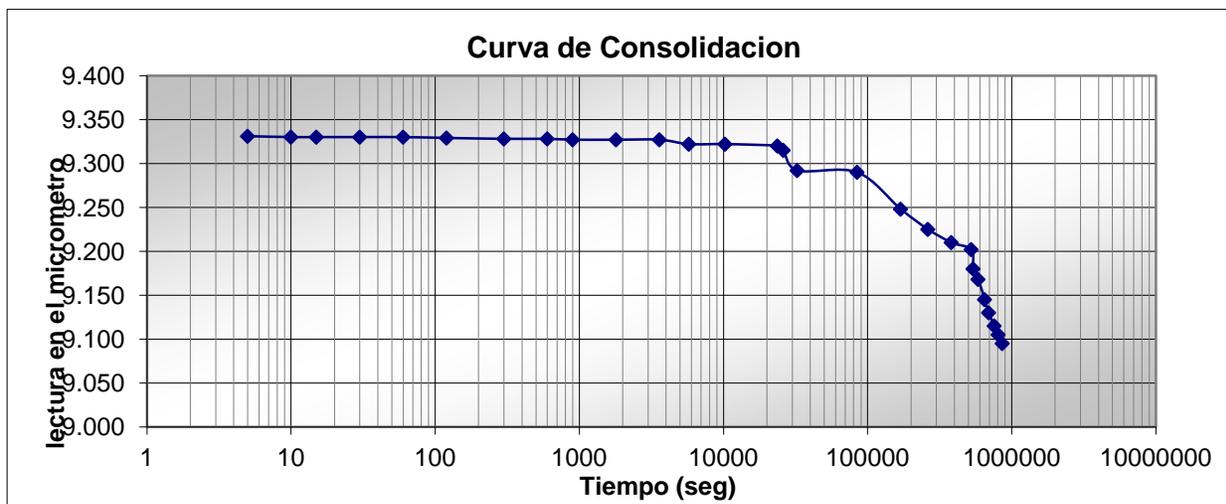
| Datos Iniciales | | | |
|---------------------------|---------|--------------------|------|
| Anillo No. | B | Relacion Brazo | 10 |
| Peso Anillo (g) | 63.8872 | | |
| Peso Anillo + Muestra (g) | 180.018 | Altura Anillo (cm) | 2.03 |
| Area (cm ²) | 44.18 | Diametro (cm) | 7.5 |

| Antes de la Consolidacion | | | | | |
|---------------------------|--------|--|-------|-----------------------------|-------|
| Peso Muestra W_m (g) | 110.17 | Volumen Muestra V_m (cm ³) | 89.68 | Contenido Agua ω (%) | 34.89 |
| Peso Solidos W_s (g) | 81.68 | Volumen Solidos V_s (cm ³) | 30.82 | Relacion Vacios e_o | 1.687 |
| Peso Agua W_w (g) | 28.493 | Volumen Vacios V_v (cm ³) | 58.86 | Grado Saturacion G_w (%) | 48.41 |

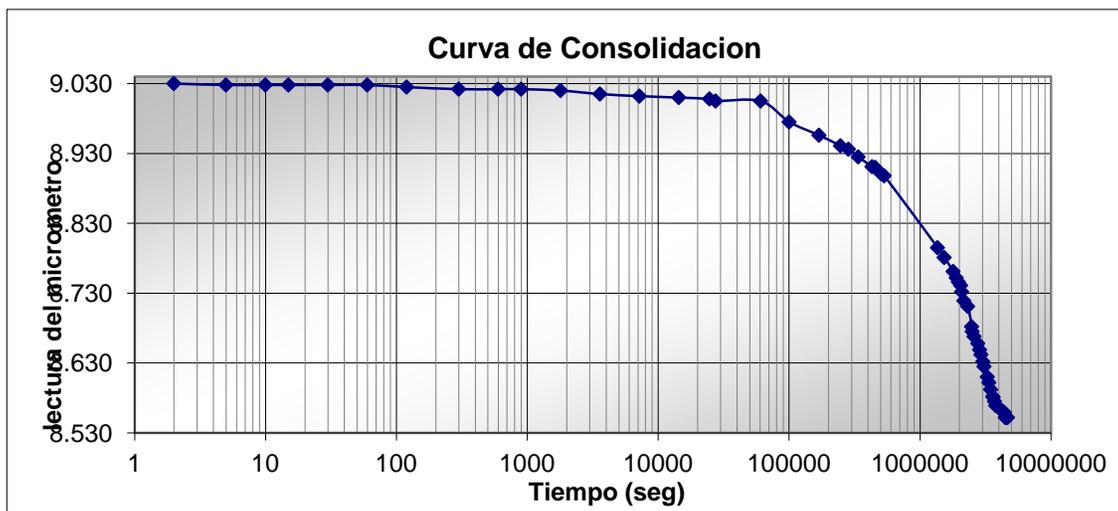
Tabla 56. Curvas de compresibilidad para las diferentes cargas aplicadas en la prueba $G_w=48\%$ en humedecimiento.



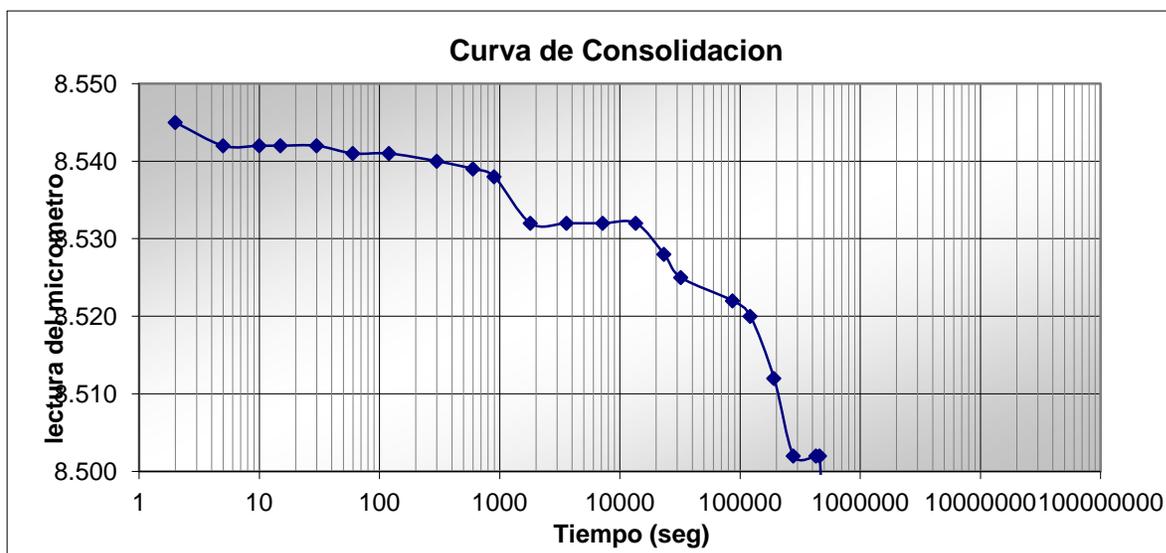
| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|--------------------------------------|------|--------|---------|-------------|---------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| Carga de Sitio | | | | | | | 781 | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg/cm2) | | | | 1.767822372 | L _o (mm) | 20.3 | A _o (cm ²) | 44.179 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | Seg | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 10.000 | 20.300 | 0.00E+00 |
| | | | | 5 | 5 | 9.810 | 20.110 | 1.90E-02 |
| | | | | 10 | 10 | 9.790 | 20.090 | 2.10E-02 |
| | | | | 15 | 15 | 9.780 | 20.080 | 2.20E-02 |
| | | | | 30 | 30 | 9.780 | 20.080 | 2.20E-02 |
| | | | 1 | 18 | 78 | 9.775 | 20.075 | 2.25E-02 |
| | | | 2 | | 120 | 9.768 | 20.068 | 2.32E-02 |
| | | | 5 | | 300 | 9.758 | 20.058 | 2.42E-02 |
| | | | 10 | | 600 | 9.750 | 20.050 | 2.50E-02 |
| | | | 15 | | 900 | 9.750 | 20.050 | 2.50E-02 |
| | | | 30 | | 1800 | 9.722 | 20.022 | 2.78E-02 |
| | | 1 | | | 3600 | 9.712 | 20.012 | 2.88E-02 |
| | | 2 | | | 7200 | 9.702 | 20.002 | 2.98E-02 |
| | | 6 | | | 21600 | 9.688 | 19.988 | 3.12E-02 |
| | | 8 | | | 28800 | 9.685 | 19.985 | 3.15E-02 |
| | | 20 | | | 72000 | 9.680 | 19.980 | 3.20E-02 |
| | | 24 | 10 | | 87000 | 9.648 | 19.948 | 3.52E-02 |
| | | 55 | 1 | | 198060 | 9.613 | 19.913 | 3.87E-02 |
| | | 96 | 57 | | 349020 | 9.580 | 19.880 | 4.20E-02 |
| | | 125 | 21 | | 451260 | 9.550 | 19.850 | 4.50E-02 |
| | | 147 | 26 | | 530760 | 9.508 | 19.808 | 4.92E-02 |
| | | 166 | 38 | | 599880 | 9.494 | 19.794 | 5.06E-02 |
| | | 244 | 15 | | 879300 | 9.430 | 19.730 | 5.70E-02 |
| | | 263 | 51 | | 949860 | 9.420 | 19.720 | 5.80E-02 |
| | | 294 | 24 | | 1059840 | 9.420 | 19.720 | 5.80E-02 |
| | | 296 | 27 | | 1067220 | 9.342 | 19.642 | 6.58E-02 |
| | | 314 | 11 | | 1131060 | 9.342 | 19.642 | 6.58E-02 |



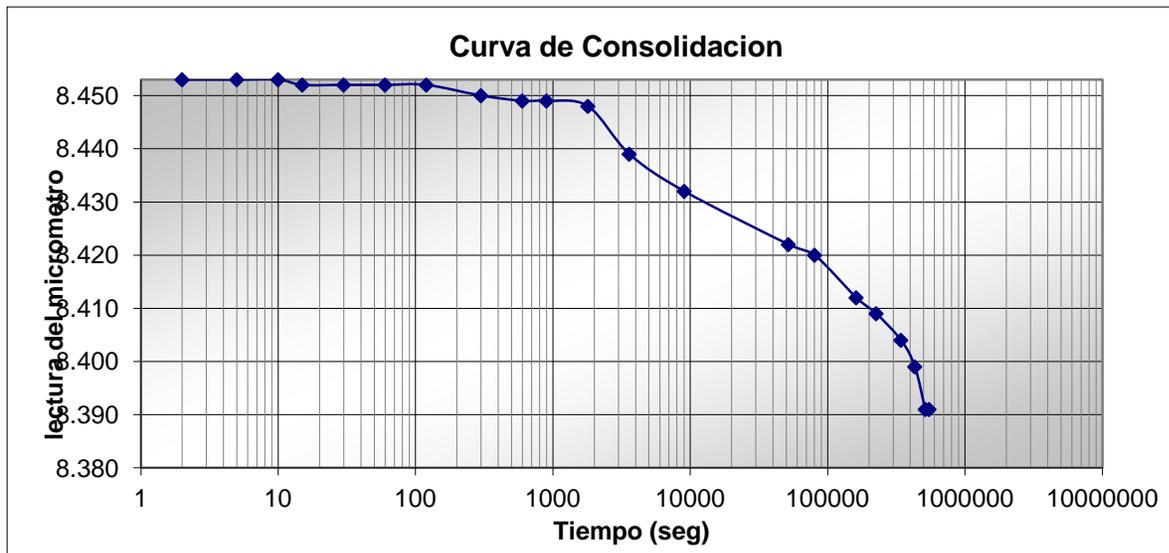
| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|--------------------------------------|------|--------|---------|--------|---------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| Carga 1 | | | | 434 gr | | SUMA | 1215 | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (ton/m2) | | | | 1.0 | L _o (mm) | 19.642 | A _o (cm ²) | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 9.342 | 19.642 | 0.00E+00 |
| | | | | 5 | 5 | 9.331 | 19.631 | 1.10E-03 |
| | | | | 10 | 10 | 9.330 | 19.630 | 1.20E-03 |
| | | | | 15 | 15 | 9.330 | 19.630 | 1.20E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 9.330 | 19.630 | 1.20E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 9.330 | 19.630 | 1.20E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 9.329 | 19.629 | 1.30E-03 |
| | | | 5 | | 300 | 9.328 | 19.628 | 1.40E-03 |
| | | | 10 | | 600 | 9.328 | 19.628 | 1.40E-03 |
| | | | 15 | | 900 | 9.327 | 19.627 | 1.50E-03 |
| | | | 30 | | 1800 | 9.327 | 19.627 | 1.50E-03 |
| | | 1 | | | 3600 | 9.327 | 19.627 | 1.50E-03 |
| | | 1 | 36 | | 5760 | 9.322 | 19.622 | 2.00E-03 |
| | | 2 | 51 | | 10260 | 9.322 | 19.622 | 2.00E-03 |
| | | 6 | 35 | | 23700 | 9.320 | 19.620 | 2.20E-03 |
| | | 7 | 14 | | 26040 | 9.315 | 19.615 | 2.70E-03 |
| | | 9 | 2 | | 32520 | 9.292 | 19.592 | 5.00E-03 |
| | | 23 | 31 | | 84660 | 9.290 | 19.590 | 5.20E-03 |
| | | 47 | 7 | | 169620 | 9.248 | 19.548 | 9.40E-03 |
| | | 72 | 51 | | 262260 | 9.225 | 19.525 | 1.17E-02 |
| | | 105 | 47 | | 380820 | 9.210 | 19.510 | 1.32E-02 |
| | | 145 | 30 | | 523800 | 9.202 | 19.502 | 1.40E-02 |
| | | 150 | | | 540000 | 9.180 | 19.480 | 1.62E-02 |
| | | 162 | 29 | | 584940 | 9.168 | 19.468 | 1.74E-02 |
| | | 180 | 15 | | 648900 | 9.145 | 19.445 | 1.97E-02 |
| | | 192 | 21 | | 692460 | 9.130 | 19.430 | 2.12E-02 |
| | | 210 | 16 | | 756960 | 9.115 | 19.415 | 2.27E-02 |
| | | 224 | 14 | | 807240 | 9.105 | 19.405 | 2.37E-02 |
| | | 239 | 12 | | 861120 | 9.095 | 19.395 | 2.47E-02 |

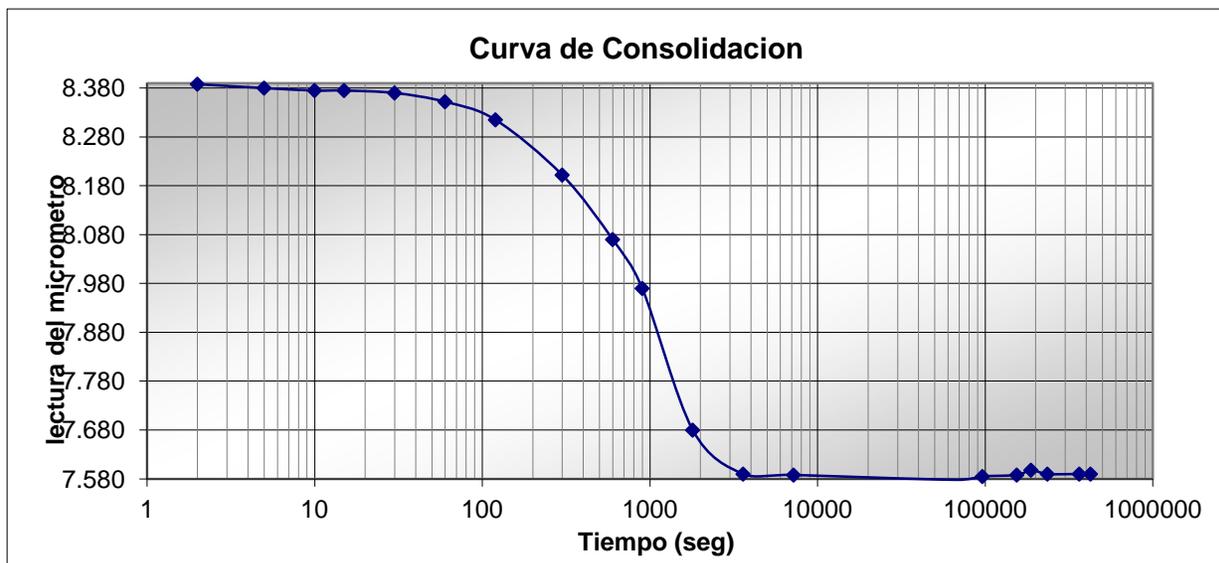


| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|--------|---------|----------|---------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| Carga 2 | | | | 867.6 gr | | SUMA | 2082.6 | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg/cm2) | | | | 2.0 | L ₀ (cm) | 19.395 | A ₀ (cm ²) | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| 07-12-12 | 13:05 | | | 0 | 0 | 9.040 | 19.395 | 0.00E+00 |
| | | | | 2 | 2 | 9.030 | 19.385 | 1.00E-03 |
| | | | | 5 | 5 | 9.028 | 19.383 | 1.20E-03 |
| | | | | 10 | 10 | 9.028 | 19.383 | 1.20E-03 |
| | | | | 15 | 15 | 9.028 | 19.383 | 1.20E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 9.028 | 19.383 | 1.20E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 9.028 | 19.383 | 1.20E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 9.025 | 19.380 | 1.50E-03 |
| | | | 5 | | 300 | 9.022 | 19.377 | 1.80E-03 |
| | | | 10 | | 600 | 9.022 | 19.377 | 1.80E-03 |
| | | | 15 | | 900 | 9.022 | 19.377 | 1.80E-03 |
| | | | 30 | | 1800 | 9.020 | 19.375 | 2.00E-03 |
| | | 1 | | | 3600 | 9.015 | 19.370 | 2.50E-03 |
| | | 2 | | | 7200 | 9.012 | 19.367 | 2.80E-03 |
| | | 4 | | | 14400 | 9.010 | 19.365 | 3.00E-03 |
| | | 6 | 52 | | 24720 | 9.008 | 19.363 | 3.20E-03 |
| | | 7 | 39 | | 27540 | 9.005 | 19.360 | 3.50E-03 |
| | | 16 | 51 | | 60660 | 9.005 | 19.360 | 3.50E-03 |
| | | 27 | 52 | | 100320 | 8.975 | 19.330 | 6.50E-03 |
| | | 47 | 6 | | 169560 | 8.956 | 19.311 | 8.40E-03 |
| | | 68 | 42 | | 247320 | 8.941 | 19.296 | 9.90E-03 |
| | | 79 | 7 | | 284820 | 8.936 | 19.291 | 1.04E-02 |
| | | 93 | 56 | | 338160 | 8.925 | 19.280 | 1.15E-02 |
| | | 119 | 42 | | 430920 | 8.911 | 19.266 | 1.29E-02 |
| | | 126 | 24 | | 455040 | 8.910 | 19.265 | 1.30E-02 |
| | | 140 | 24 | | 505440 | 8.901 | 19.256 | 1.39E-02 |
| | | 148 | 10 | | 533400 | 8.898 | 19.253 | 1.42E-02 |
| | | 379 | 4 | | 1364640 | 8.795 | 19.150 | 2.45E-02 |
| | | 425 | 44 | | 1532640 | 8.781 | 19.136 | 2.59E-02 |
| | | 498 | 49 | | 1795740 | 8.761 | 19.116 | 2.79E-02 |
| | | 527 | 11 | | 1897860 | 8.752 | 19.107 | 2.88E-02 |
| | | 546 | 58 | | 1969080 | 8.746 | 19.101 | 2.94E-02 |
| | | 569 | 11 | | 2049060 | 8.741 | 19.096 | 2.99E-02 |
| | | 579 | 25 | | 2085900 | 8.732 | 19.087 | 3.08E-02 |
| | | 602 | 43 | | 2169780 | 8.719 | 19.074 | 3.21E-02 |
| | | 644 | 45 | | 2321100 | 8.711 | 19.066 | 3.29E-02 |
| | | 690 | 20 | | 2485200 | 8.682 | 19.037 | 3.58E-02 |
| | | 697 | 8 | | 2509680 | 8.675 | 19.030 | 3.65E-02 |
| | | 720 | 21 | | 2593260 | 8.668 | 19.023 | 3.72E-02 |
| | | 769 | 52 | | 2771520 | 8.658 | 19.013 | 3.82E-02 |
| | | 794 | 34 | | 2860440 | 8.649 | 19.004 | 3.91E-02 |
| | | 813 | 37 | | 2929020 | 8.642 | 18.997 | 3.98E-02 |
| | | 841 | 45 | | 3030300 | 8.632 | 18.987 | 4.08E-02 |
| | | 859 | 2 | | 3092520 | 8.625 | 18.980 | 4.15E-02 |
| | | 911 | | | 3279600 | 8.610 | 18.965 | 4.30E-02 |
| | | 935 | 17 | | 3367020 | 8.602 | 18.957 | 4.38E-02 |
| | | 964 | 45 | | 3473100 | 8.592 | 18.947 | 4.48E-02 |
| | | 1003 | 4 | | 3611040 | 8.582 | 18.937 | 4.58E-02 |
| | | 1009 | 59 | | 3635940 | 8.581 | 18.936 | 4.59E-02 |
| | | 1034 | 33 | | 3724380 | 8.575 | 18.930 | 4.65E-02 |
| | | 1056 | 30 | | 3803400 | 8.569 | 18.924 | 4.71E-02 |
| | | 1175 | 57 | | 4233420 | 8.562 | 18.917 | 4.78E-02 |
| | | 1201 | 27 | | 4325220 | 8.560 | 18.915 | 4.80E-02 |
| | | 1229 | 48 | | 4427280 | 8.559 | 18.914 | 4.81E-02 |
| | | 1249 | 44 | | 4499040 | 8.552 | 18.907 | 4.88E-02 |
| | | 1288 | 6 | | 4637160 | 8.552 | 18.907 | 4.88E-02 |
| | | 1296 | 6 | | 4665960 | 8.552 | 18.907 | 4.88E-02 |

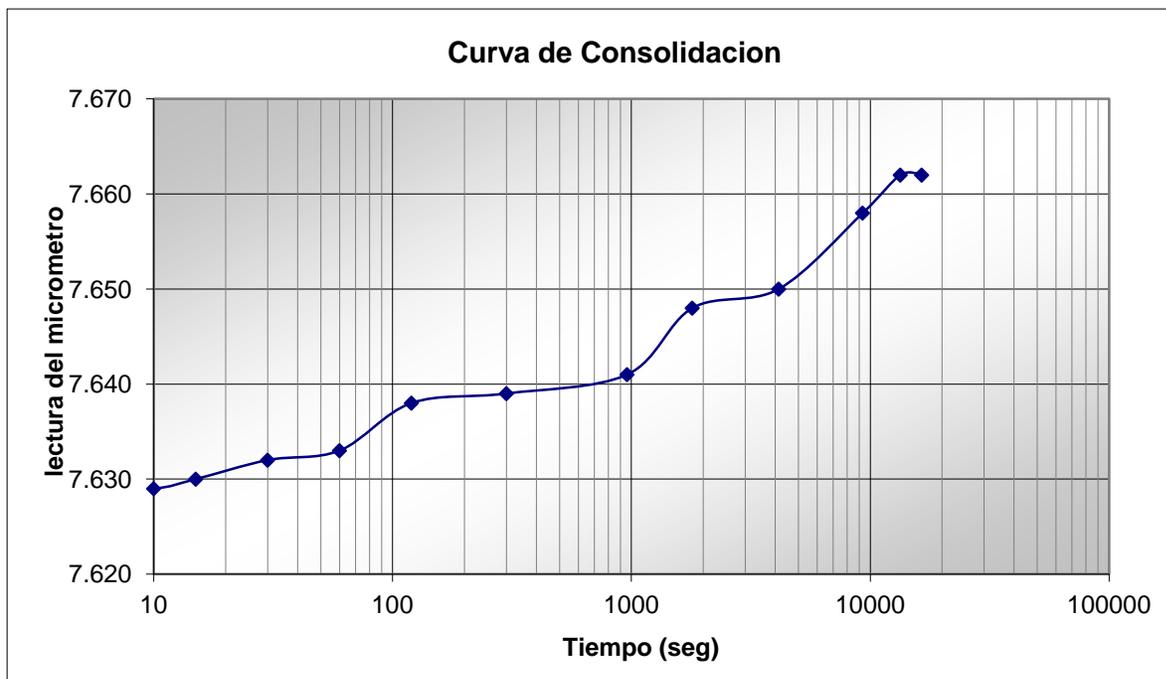


| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|--------|---------|--------|---------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| Carga 3 | | | | 1736.3 | gr | SUMA | 3818.9 | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg/cm2) | | | | 3.9 | L _o (cm) | 18.907 | A _o (cm ²) | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| 27/10/11 | 12:15 | | | 0 | 0 | 8.552 | 18.907 | 0.000 |
| | | | | 2 | 2 | 8.545 | 18.900 | 7.00E-04 |
| | | | | 5 | 5 | 8.542 | 18.897 | 1.00E-03 |
| | | | | 10 | 10 | 8.542 | 18.897 | 1.00E-03 |
| | | | | 15 | 15 | 8.542 | 18.897 | 1.00E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 8.542 | 18.897 | 1.00E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 8.541 | 18.896 | 1.10E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 8.541 | 18.896 | 1.10E-03 |
| | | | 5 | | 300 | 8.540 | 18.895 | 1.20E-03 |
| | | | 10 | | 600 | 8.539 | 18.894 | 1.30E-03 |
| | | | 15 | | 900 | 8.538 | 18.893 | 1.40E-03 |
| | | | 30 | | 1800 | 8.532 | 18.887 | 2.00E-03 |
| | | 1 | | | 3600 | 8.532 | 18.887 | 2.00E-03 |
| | | 2 | | | 7200 | 8.532 | 18.887 | 2.00E-03 |
| | | 3 | 46 | | 13560 | 8.532 | 18.887 | 2.00E-03 |
| | | 6 | 28 | | 23280 | 8.528 | 18.883 | 2.40E-03 |
| | | 8 | 56 | | 32160 | 8.525 | 18.880 | 2.70E-03 |
| | | 24 | 4 | | 86640 | 8.522 | 18.877 | 3.00E-03 |
| | | 33 | 45 | | 121500 | 8.520 | 18.875 | 3.20E-03 |
| | | 53 | 5 | | 191100 | 8.512 | 18.867 | 4.00E-03 |
| | | 77 | 9 | | 277740 | 8.502 | 18.857 | 5.00E-03 |
| | | 119 | 1 | | 428460 | 8.502 | 18.857 | 5.00E-03 |
| | | 127 | 30 | | 459000 | 8.502 | 18.857 | 5.00E-03 |
| | | 135 | 20 | | 487200 | 8.490 | 18.845 | 6.20E-03 |
| | | 141 | 15 | | 508500 | 8.490 | 18.845 | 6.20E-03 |

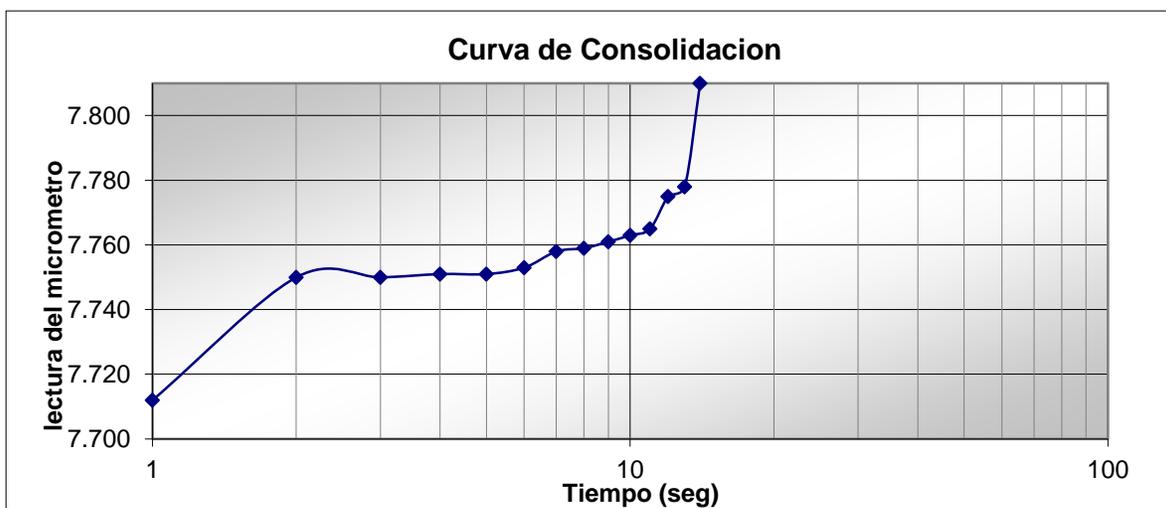




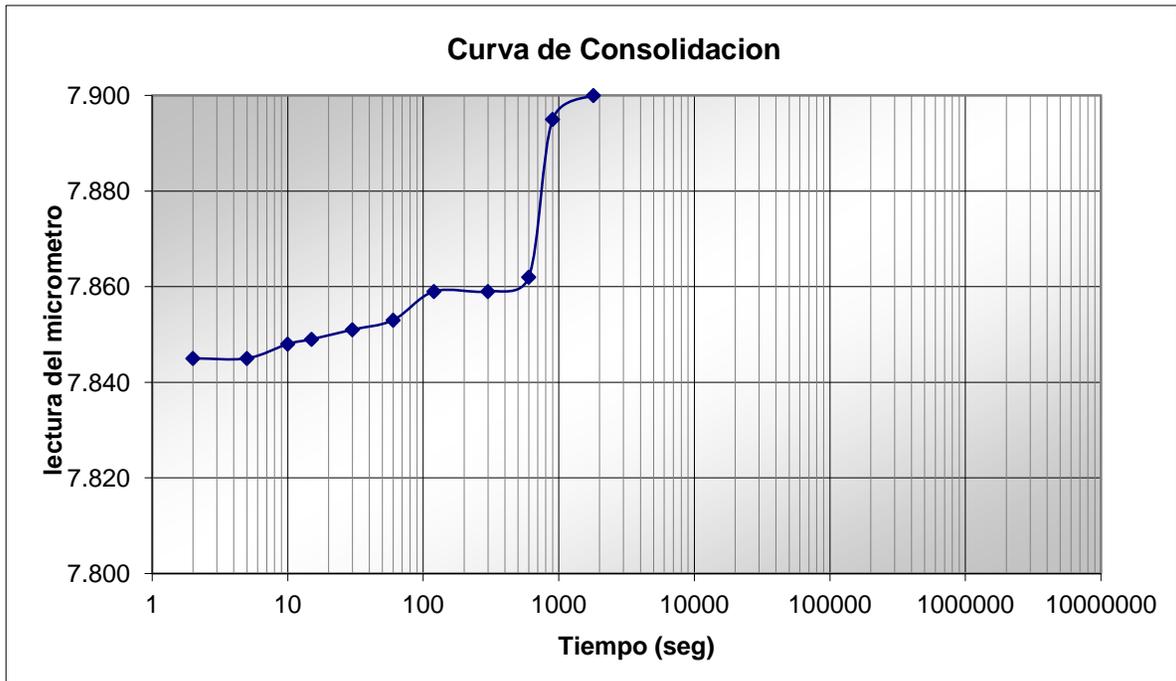
| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|--------------------------------------|------|--------|---------|---------------------|--------------|-----------------------------------|--------|-------------------|
| SAT | | | 0 gr | | SUMA | 7293.2 | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg/cm2) | | | 0.165 | L _o (cm) | 18.746 | A _o (cm ²) | 44.18 | |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| 06-02-12 | | | | 0 | 0 | 8.391 | 18.746 | 0.000 |
| | | | | 2 | 2 | 8.388 | 18.743 | 1.64E-02 |
| | | | | 5 | 5 | 8.380 | 18.735 | 1.72E-02 |
| | | | | 10 | 10 | 8.375 | 18.730 | 1.77E-02 |
| | | | | 15 | 15 | 8.375 | 18.730 | 1.77E-02 |
| | | | | 30 | 30 | 8.370 | 18.725 | 1.82E-02 |
| | | | 1 | | 60 | 8.352 | 18.707 | 2.00E-02 |
| | | | 2 | | 120 | 8.315 | 18.670 | 2.37E-02 |
| | | | 5 | | 300 | 8.202 | 18.557 | 3.50E-02 |
| | | | 10 | | 600 | 8.070 | 18.425 | 4.82E-02 |
| | | | 15 | | 900 | 7.970 | 18.325 | 5.82E-02 |
| | | | 30 | | 1800 | 7.680 | 18.035 | 8.72E-02 |
| | | 1 | | | 3600 | 7.590 | 17.945 | 9.62E-02 |
| | | 2 | | | 7200 | 7.588 | 17.943 | 9.64E-02 |
| | | 18 | 51 | | 67860 | 7.578 | 17.933 | 9.74E-02 |
| | | 26 | 45 | | 96300 | 7.585 | 17.940 | 9.67E-02 |
| | | 42 | 54 | | 154440 | 7.588 | 17.943 | 9.64E-02 |
| | | 52 | 7 | | 187620 | 7.598 | 17.953 | 9.54E-02 |
| | | 65 | 19 | | 235140 | 7.590 | 17.945 | 9.62E-02 |
| | | 101 | 12 | | 364320 | 7.590 | 17.945 | 9.62E-02 |
| | | 118 | 7 | | 425220 | 7.590 | 17.945 | 9.62E-02 |



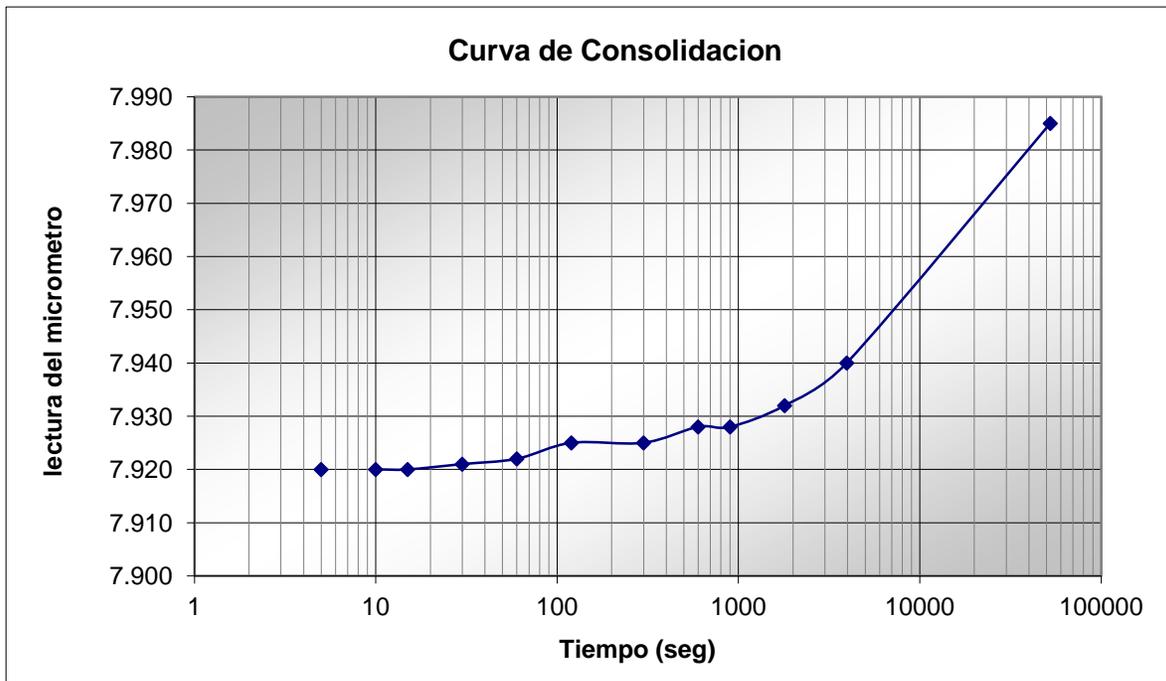
| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|--|------|--------|---------|-----|---------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| DESCARGA (Carga de Sitio + Carga1 + Carga2 + Carga3) | | | | | | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (ton/m ²) | | | | 0.0 | L _o (cm) | 18.845 | A _o (cm ²) | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 7.590 | 18.845 | 0.000 |
| | | | | 2 | 2 | 7.629 | 18.884 | -3.90E-03 |
| | | | | 5 | 5 | 7.629 | 18.884 | -3.90E-03 |
| | | | | 10 | 10 | 7.629 | 18.884 | -3.90E-03 |
| | | | | 15 | 15 | 7.630 | 18.885 | -4.00E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 7.632 | 18.887 | -4.20E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 7.633 | 18.888 | -4.30E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 7.638 | 18.893 | -4.80E-03 |
| | | | 5 | | 300 | 7.639 | 18.894 | -4.90E-03 |
| | | | 16 | | 960 | 7.641 | 18.896 | -5.10E-03 |
| | | | 30 | | 1800 | 7.648 | 18.903 | -5.80E-03 |
| | | 1 | 9 | | 4140 | 7.650 | 18.905 | -6.00E-03 |
| | | 2 | 35 | | 9300 | 7.658 | 18.913 | -6.80E-03 |
| | | 3 | 43 | | 13380 | 7.662 | 18.917 | -7.20E-03 |
| | | 4 | 34 | | 16440 | 7.662 | 18.917 | -7.20E-03 |



| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | | | |
|---|------|--------|---------|---------|---------------------|--------------|--------|-----------------------------------|--|-------|
| DESCARGA (Carga de Sitio + Carga1 + Carga2) | | | | | | 3818.9 | | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg) | | | | 0.08644 | L _o (mm) | | 18.917 | A _o (cm ²) | | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) | | |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | | | |
| 11-10-11 | | | | 0 | 0 | 7.662 | 18.917 | 0.00E+00 | | |
| | | | | 5 | 5 | 7.712 | 18.967 | -5.00E-03 | | |
| | | | | 10 | 10 | 7.750 | 19.005 | -8.80E-03 | | |
| | | | | 15 | 15 | 7.750 | 19.005 | -8.80E-03 | | |
| | | | | 20 | 20 | 7.751 | 19.006 | -8.90E-03 | | |
| | | | | 30 | 30 | 7.751 | 19.006 | -8.90E-03 | | |
| | | | 1 | | 60 | 7.753 | 19.008 | -9.10E-03 | | |
| | | | 2 | | 120 | 7.758 | 19.013 | -9.60E-03 | | |
| | | | 5 | | 300 | 7.759 | 19.014 | -9.70E-03 | | |
| | | | 10 | | 600 | 7.761 | 19.016 | -9.90E-03 | | |
| | | | 15 | | 900 | 7.763 | 19.018 | -1.01E-02 | | |
| | | | 30 | | 1800 | 7.765 | 19.020 | -1.03E-02 | | |
| | | 1 | 15 | | 4500 | 7.775 | 19.030 | -1.13E-02 | | |
| | | 2 | 1 | | 7260 | 7.778 | 19.033 | -1.16E-02 | | |
| | | 17 | 46 | | 63960 | 7.810 | 19.065 | -1.48E-02 | | |



| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|---|------|--------|---------|-------|---------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| DESCARGA (Carga de Sitio + Carga1) | | | | | | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg) | | | | 999.6 | L _o (mm) | 19.065 | A _o (cm ²) | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | Dism. Altura (cm) |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 7.810 | 19.065 | 0.000 |
| | | | | 5 | 5 | 7.845 | 19.100 | -3.50E-03 |
| | | | | 10 | 10 | 7.845 | 19.100 | -3.50E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 7.848 | 19.103 | -3.80E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 7.849 | 19.104 | -3.90E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 7.851 | 19.106 | -4.10E-03 |
| | | | 5 | | 300 | 7.853 | 19.108 | -4.30E-03 |
| | | | 10 | | 600 | 7.859 | 19.114 | -4.90E-03 |
| | | | 15 | | 900 | 7.859 | 19.114 | -4.90E-03 |
| | | | 30 | | 1800 | 7.862 | 19.117 | -5.20E-03 |
| | | 7 | 19 | | 26340 | 7.895 | 19.150 | -8.50E-03 |
| | | 8 | 30 | | 30600 | 7.900 | 19.155 | -9.00E-03 |



| DATOS PRUEBA DE CONSOLIDACION | | | | | | | | |
|----------------------------------|------|--------|---------|-------|--------------|--------------|--------------------------|--------------|
| DESCARGA (Carga de Sitio) | | | | | | | | |
| Carga (P) sobre la Pastilla (kg) | | | | 799.9 | L_0 (mm) | 19.155 | A_0 (cm ²) | 44.18 |
| Fecha | Hora | Tiempo | | | Tiempo (min) | Lect. Micro. | δ (mm) | dism. Altura |
| | | Horas | Minutos | Seg | | | | |
| | | | | 0 | 0 | 7.900 | 19.155 | 0.00E+00 |
| | | | | 5 | 5 | 7.920 | 19.175 | -2.00E-03 |
| | | | | 10 | 10 | 7.920 | 19.175 | -2.00E-03 |
| | | | | 15 | 15 | 7.920 | 19.175 | -2.00E-03 |
| | | | | 30 | 30 | 7.921 | 19.176 | -2.10E-03 |
| | | | 1 | | 60 | 7.922 | 19.177 | -2.20E-03 |
| | | | 2 | | 120 | 7.925 | 19.180 | -2.50E-03 |
| | | | 5 | | 300 | 7.925 | 19.180 | -2.50E-03 |
| | | | 10 | | 600 | 7.928 | 19.183 | -2.80E-03 |
| | | | 15 | | 900 | 7.928 | 19.183 | -2.80E-03 |
| | | | 30 | | 1800 | 7.932 | 19.187 | -3.20E-03 |
| | | 1 | 6 | | 3960 | 7.940 | 19.195 | -4.00E-03 |
| | | 14 | 35 | | 52500 | 7.985 | 19.240 | -8.50E-03 |