



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN  
NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

“ANÁLISIS DEL  $E_{LWDLAB}$  DE UNA ARENA LIMOSA  
CON LWD ZORN INCREMENTANDO LAS  
DIMENSIONES DEL MOLDE DE COMPACTACIÓN  
AASHTO ”

Tesis para obtener el grado de:

MAESTRA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA  
RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES

Presenta:

ING. JESSICA PAOLA NÁJERA ENCINAS

Asesor:

DR. CARLOS CHÁVEZ NEGRETE

Co-asesor:

M.I OMAR VIVEROS CARRERA

MORELIA, MICHOACÁN, AGOSTO DE 2023

---

## AGRADECIMIENTOS

A mi madre Rosa siempre has estado para mí, gracias por todo tu cariño, por escucharme siempre, eres mi mejor amiga, mi consejera, mi guía, mi pilar, en resumen, mi todo. Gracias por tanto, sin ti nada sería posible.

A mi padre Jesús Armando, gracias por hacerme creer que puedo lograr todo lo que me proponga, eres mi maestro de vida, me has tenido una paciencia enorme y me has apoyado hasta en mi idea más loca. Gracias por el esfuerzo que haces por mí.

A mis amigos de la maestría, en especial a Carla y Misael, me divertí muchísimo gracias a ustedes, gracias por todo el apoyo cuando lo necesitaba y por sacarme una sonrisa cuando sentía que ya no podía más. Al fin lo logramos.

Al Dr. Carlos Chávez y M.I Omar Viveros, quien fueron pieza clave para concretar este trabajo, gracias por el apoyo, la orientación y la ayuda que brindaron para la redacción de esta tesis.

A José Edel, por sacarme una sonrisa cuando más lo necesitaba, animarme para realizar este trabajo, por todo tu amor, tu paciencia y tu apoyo.

A Wendy, siempre me diste ánimos para terminar este trabajo, gracias por brindarme tu ayuda y tu apoyo.

## DEDICATORIA

A mi abuelita Micha, eres el pilar de todos nosotros. Sabiduría, compasión y amor puro es lo que se me viene a la mente cuando pienso en ti.

---

## RESUMEN.

El control de calidad de la compactación de las capas de una estructura vial basada en módulos está ganando popularidad. Debido a que los módulos son un dato de entrada para el diseño de pavimentos, basado en el método empírico-mecanicista. Asimismo, conocer los módulos es útil para determinar la respuesta de la estructura inferior al esfuerzo aplicado.

El Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD) tomó auge en el mercado como una alternativa innovadora para medir la calidad de compactación en campo, ya que, mide el Módulo de Rigidez del suelo. Un inconveniente con el equipo LWD, es que se hay discrepancias entre las lecturas medidas en campo y laboratorio, debido a esto el equipo no puede brindar información directa sobre el grado de compactación alcanzado en campo, sino a través de una relación de rigideces obtenidas.

En esta investigación se incrementaron las dimensiones del molde AASHTO a 1.5 y 2.0 veces replicando el molde con material de Policloruro de Vinilo (PVC), ensayando una arena limosa y aplicando el equipo LWD de la marca ZORN a distintas alturas de caída, distintos grados de compactación e intercambiando el plato de carga del equipo, con el fin de estudiar e incrementar el Módulo de Rigidez de laboratorio para que sea más apegado al resultado obtenido en campo.

Como resultado se obtuvo el análisis del efecto que tuvo el incrementar las dimensiones del molde y por ende de los especímenes en el grado de compactación, el contenido de agua, el plato de carga y la superficie de contacto.

Se concluye que, el molde de compactación 1.5 AASHTO tuvo resultados menores que el molde convencional AASHTO, lo que indica que, con estas dimensiones, no se consigue incrementar el Módulo de rigidez, sin embargo, con el molde 2.0 si se consiguió un incremento en el módulo y un resultado más cercano al módulo de rigidez medido en campo.

Palabras clave: Deflectómetro de Impacto Ligero, Módulo de Rigidez, Compactación, molde AASHTO.

---

## ABSTRACT

Modulus-based compaction quality assurance in a roadway infrastructure is gaining popularity because it's an alternative that give us input data for the mechanistic-empirical pavement design. Likewise, knowing the moduli is useful for determining the response of the structure under the applied stress.

Light Weight Deflectometer is taking over the market as an innovative alternative to measure the quality of compaction on field, since it determines the stiffness soil modulus directly in field. A drawback with LWD equipment is that there are discrepancies between the readings measured in the field and the laboratory, because of this the equipment cannot provide direct information on the degree of compaction achieved in the field, but only through a ratio of the stiffnesses.

In this research, the AASHTO mold dimensions were increased 1.5 and 2.0 times by replicating the mold with Polyvinyl Chloride (PVC), testing a silty sand with the LWD ZORN at different drop heights, different percent compaction and exchanging the load plate of the equipment, in order to study and increase the LWD Modulus to get closer to field measurements.

Result findings were summarized in different analysis effects, the effect of increasing the dimensions on the degree of compaction, water content, load plate and contact surface effect.

It is concluded that the 1.5 AASHTO compaction mold had lower results than the conventional AASHTO mold, which indicates that, with these dimensions, it is not possible to increase the stiffness modulus; however, with the 2.0 mold, an increase in the modulus was achieved, therefore a result closer to field modulus was achieved.

Key words: Ligh Weight Deflectometer, Stiffness Modulus, Compaction, AASHTO mold.

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS

DEDICATORIA

RESUMEN

ABSTRACT

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Planteamiento del problema.....	8
1.3 Objetivos.....	9
1.3.1 Objetivo General.....	9
1.3.2 Objetivos Específicos.....	9
1.4 Hipótesis.....	9
1.5 Justificación.....	9
1.6 Delimitación.....	9
2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 Compactación.....	11
2.2 Equipos de campo para medición de compactación.....	12
2.2.1 Densímetro Nuclear.....	12
2.2.2 Ensayo de Cono de Arena.....	15
2.2.3 Método de Globo de Goma.....	17
2.2.4 Geogauge.....	18
2.2.5 Penetrómetro de Impacto Ligero (PANDA).....	21
2.2.6 Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD).....	22

---

3.	METODOLOGÍA.....	39
3.1	Parámetros geotécnicos.....	39
3.1.1	Granulometría.....	39
3.1.2	Límites de consistencia.....	40
3.1.3	Densidad relativa de los sólidos.....	41
3.1.4	Triaxial.....	41
3.1.5	Masa Volumétrica Seca Máxima y Contenido de Agua.....	41
3.1.6	Cálculo de Módulo de Rigidez con LWD.....	43
3.2	Programa experimental de compactación, comparación de los diferentes Módulos de LWD con incremento en las dimensiones de molde de compactación AASHTO.....	44
3.2.1	Elaboró de moldes de compactación.....	45
3.2.2	Compactador.....	48
3.2.3	Cálculo de material requerido.....	50
3.2.4	Equipo LWD.....	51
3.2.5	Variación de altura de caída.....	51
3.2.6	Contenido de agua y porcentaje de compactación.....	52
3.2.7	Procedimiento de ensayo para obtener Módulo de Rigidez de laboratorio con LWD en moldes de compactación fabricados.....	52
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	57
4.1	Pruebas de caracterización de suelo.....	57
4.2	Pruebas con el LWD en molde AASHTO con dimensiones incrementadas.....	58
4.2.1	Resultados del efecto del porcentaje de compactación.....	59
4.2.2	Efecto contenido del agua.....	66
4.2.3	Efecto del plato de carga.....	69
4.2.4	Efecto de superficie de contacto.....	71

---

4.2.5	Efecto de incremento de dimensiones de molde .....	74
4.3	Modelación de elementos finitos incrementando dimensiones del molde .....	74
4.3.1	Factor de corrección .....	79
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	83
5.1	Conclusiones .....	83
5.1.1	Conclusiones referentes a la metodología. ....	84
5.1.2	Conclusiones referentes al efecto del porcentaje de compactación. ....	85
5.1.3	Conclusiones referentes al efecto del contenido del agua. ....	86
5.1.4	Conclusiones referentes al plato de carga.....	87
5.1.5	Conclusiones referentes a la superficie de contacto. ....	87
5.1.6	Conclusiones referentes al incremento en las dimensiones del molde AASHTO. 88	
5.1.7	Conclusiones referentes a la modelación numérica.....	88
5.2	Recomendaciones .....	89
6.	Anexos .....	91
6.1	Pruebas de caracterización de suelo.....	91
6.1.1	Granulometría.....	91
6.1.2	Límites de consistencia.....	93
6.1.3	Proctor Estándar .....	95
6.1.4	Proctor Modificada .....	96
6.1.5	Prueba Triaxial UU.....	98
6.1.6	Densidad de sólidos .....	103
6.2	Resultados compactaciones con LWD.....	104
6.2.1	Módulos Objetivos Molde AASHTO.....	104
6.2.2	Cálculos LWD en moldes con dimensiones incrementadas. ....	114

---

7. Bibliografía.....	117
----------------------	-----

## CONTENIDO DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Densímetro Nuclear (Humboldt, 2023).....	13
Figura 2. Diagrama representando las partes principales de un NDG. (Bretreger, 2015)...	14
Figura 3. Operación del densímetro nuclear. A) Manera indirecta B) Modo Directo.....	15
Figura 4. Cono de Arena con sus accesorios. (SICT, 2008).....	16
Figura 5. Voluvessel utilizado en el método de globo de goma (Grainer, 2023). .....	18
Figura 6. Geogauge. (Humboldt, 2023).....	19
Figura 7. Partes del Geogauge (Alshibli et al., 2005).....	20
Figura 8. Penetrómetro Dinámico (Sol Solution, 2018).....	21
Figura 9. Esquema del LWD con sus componentes (Flemming, Frost y Lambert, 2007). ..	24
Figura 10. Esquema del funcionamiento del equipo LWD con celda de carga. (Schwartz et al. 2017).....	25
Figura 11. Esquema simplificado del movimiento LWD-Suelo con un grado de libertad como un sistema masa-amortiguador (Schwartz et al. 2017).....	26
Figura 12. Trabajo realizado sobre una fuerza en un resorte funcionando de manera ideal. (Academia Khan, 2020).....	28
Figura 13. Principio de operación del LWD. (Casteñeda, 2020). .....	30
Figura 14. Equipo LWD sobre molde AASHTO con collarín (Schwartz et al. 2017). .....	31
Figura 15. Gráfica para obtener el módulo de rigidez objetivo ( $E_{Obj}$ ) mediante la curva de compactación AASHTO.....	34
Figura 16. Material retenido en cada malla de la prueba de granulometría. ....	40
Figura 17. Prototipos previos al molde final y sus irregularidades. ....	46

---

Figura 18. Esquema de Molde de Compactación utilizado en todos los tamaños de molde. .....	47
Figura 19. Moldes de compactación: (A) 12 in de diámetro y altura de 23.60 cm y (B) 10 in de diámetro y altura de 19.55 cm. ....	48
Figura 20. Prueba piloto en molde de 10 in con pisón de 4.54 kg. ....	49
Figura 21. Compactador diseñado y construido para ensayo con rotomartillo BOSH de 10 kg y placa de Ø de 15 cm. ....	50
Figura 22. Procedimiento de compactación en el ensayo: (A) Homogenización del material. (B) Compactación en molde de 10 in. (C) Verificación del espesor de las capas. (D) Desmolde de collarín y enrase del suelo. (E) Medición de la masa del suelo con el molde.	54
Figura 23. Pruebas con el LWD en moldes de distintos tamaños; (A) colocación de molde en superficie de concreto con plato de carga de 150 mm y LWD colocado en la parte superior del molde para realizar los impactos (B) colocación de molde en superficie de concreto con plato de carga de 300 mm en molde de 12 in de diámetro y LWD colocado en la parte superior del molde para realizar los impactos (C) colocación de molde en superficie de suelo sin compactar con plato de carga de 300 mm en molde de 12 in de diámetro y LWD colocado en la parte superior del molde para realizar los impactos. ....	56
Figura 24. Resumen de resultados obtenidos con el molde 1.5 AASHTO con placa de 150 mm. ....	60
Figura 25. Comparativa de resultados obtenidos con el molde 2.0 AASHTO con placa de carga de 150 mm. ....	61
Figura 26. Resumen resultados molde 2.0 con placa de carga de 300 mm. ....	63
Figura 27. Efecto del contenido de agua en el molde 1.5 AASHTO compactado al 90%. ..	67
Figura 28. Efecto del contenido de agua en el molde 2.0 AASHTO compactado al 90% con placa de 150 mm. ....	68
Figura 29. Efecto del contenido de agua en el molde 2.0 AASHTO compactado al 90% con placa de 300 mm. ....	68
Figura 30. Comparativa de Módulos de Rigidez en placa de 150 mm y 300 mm .....	70

---

Figura 31. Efecto de la superficie de contacto en molde 2.0 AASHTO con placa de 300 mm con compactación al 90%.....	71
Figura 32. Efecto de la superficie de contacto en molde 2.0 AASHTO con placa de 300 mm con compactación al 95%.....	72
Figura 33. Efecto de la superficie de contacto en molde 2.0 AASHTO con placa de 300 mm con compactación al 100%.....	72
Figura 34. Modelo numérico molde 2.0 AASHTO.....	76
Figura 35. Fuerza distribuida en el modelo, molde 2.0 AASHTO.....	77
Figura 36. Modelos numéricos: A) 1.0 AASHTO (ACERO), B) 1.0 AASHTO (PVC).....	77
Figura 37. Modelos numéricos: A) 1.5 AASHTO (ACERO), B) 2.0 AASHTO (ACERO).	78
Figura 38. Comparativa de resultados de la modelación numérica con distintas dimensiones de molde.....	79
Figura 39. Comparativa de resultados en molde 1.5 ASHTO y 2.0 AASHTO aplicando el factor de corrección.....	82
Figura 40. Curva Granulométrica.....	92
Figura 41. Límite Líquido.....	93
Figura 42. Carta de Plasticidad.....	94
Figura 43. Curva de compactación proctor estándar.....	96
Figura 44. Curva de compactación proctor modificada.....	97
Figura 45. Deformación vs. Esfuerzo Sigma 3 0.3.....	98
Figura 46. Deformación vs. Esfuerzo Sigma 3 0.6.....	100
Figura 47. Deformación vs. Esfuerzo Sigma 3 0.9.....	102
Figura 48. Envolvente de falla.....	103
Figura 49. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.1 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 100%.....	104

---

Figura 50. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.14 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 100%. .....	105
Figura 51. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.20 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 100%. .....	105
Figura 52. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.283 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 100%. .....	106
Figura 53. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.40 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 100%. .....	107
Figura 54. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.1 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 95%. .....	107
Figura 55. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.14 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 95%. .....	108
Figura 56. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.2 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 95%. .....	109
Figura 57. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.283 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 95%. .....	110
Figura 58. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.40 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 95%. .....	110
Figura 59. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.10 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 90%. .....	111
Figura 60. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.14 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 90%. .....	112
Figura 61. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.19 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 90%. .....	113
Figura 62. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.283 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 90%. .....	113

---

Figura 63. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.40 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 90%. .....	114
--	-----

## CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplo de valores de referencia del módulo de rigidez del LWD y DCP de material granular (Siekmeier et al., 2009). .....	3
Tabla 2. Contenidos de agua, densidad y espesor de capas utilizadas en tramos de prueba (Afsharikia y Khosravifar , 2017). .....	5
Tabla 3. Valores típicos del coeficiente de Poisson según el tipo de suelo (SICT, 2020). ..	33
Tabla 4. Valores generales de módulo de rigidez LWD en campo (SICT, 2021). .....	38
Tabla 5. Energías utilizadas en Prueba de compactación AASHTO. ....	43
Tabla 6. Diámetros y Alturas de los moldes de PVC Sanitario. ....	45
Tabla 7. Altura de caída, fuerza y esfuerzo definido para las pruebas con LWD. ....	52
Tabla 8. Resumen de las pruebas de parámetros del Suelo. ....	57
Tabla 9. Resumen de compactaciones con molde AASHTO incrementado. ....	58
Tabla 10. Porcentaje de Variación en los Módulos de Rigidez en el esfuerzo 0.1 MPa del molde 1.5 AASHTO con respecto al molde 1.0 AASHTO. ....	61
Tabla 11. Porcentaje de incremento en los Módulos de Rigidez en el esfuerzo 0.1 MPa del molde 2.0 con respecto al molde 1.0 AASHTO con placa de carga de 150 mm. ....	62
Tabla 12. Comparación de resultados de porcentaje de compactación de LWD con placa de 150 mm colocado en superficie de concreto. ....	64
Tabla 13. Comparación de resultados de porcentaje de compactación en molde 2.0 AASHTO LWD con placa de 300 mm colocado en superficie de concreto y suelo. ....	65
Tabla 14. Resumen pruebas de efecto de contenido de agua. ....	66
Tabla 15. Diferencia en porcentaje de los de Módulos de Rigidez entre placa de 150 mm y 300 mm en molde 2.0 AASHTO. ....	69

---

Tabla 16. Datos de entrada utilizados en los modelos numéricos. ....	75
Tabla 17. Desplazamiento vertical máximo presentado con distintos moldes en modelación numérica. ....	79
Tabla 18. Módulos de Rigidez obtenidos con resultados de modelación numérica. ....	80
Tabla 19. Ajuste de resultados con FC. ....	81
Tabla 20. Granulometría. ....	91
Tabla 21. Ensayos de límite líquido ....	93
Tabla 22. Ensayos de límite plástico. ....	94
Tabla 23. Contracción Volumétrica ....	94
Tabla 24. Pesos contracción volumétrica ....	95
Tabla 25. Contracción Lineal ....	95
Tabla 26. Resumen resultados de límites de consistencia ....	95
Tabla 27. Datos de compactación proctor estándar ....	95
Tabla 28. Datos proctor modificada. ....	96
Tabla 29. Resultados Sigma 3 0.3 ....	98
Tabla 30. Resultados prueba triaxial sigma 3 0.3 ....	99
Tabla 31. Resultados Sigma 3 0.3 ....	99
Tabla 32. Resultados Sigma 3 0.6 ....	100
Tabla 33. Resultados Sigma 3 0.9 ....	101
Tabla 34. Resultados Sigma 3 0.9 ....	102
Tabla 35. Pruebas Densidad de Solidos ....	103
Tabla 36. Cálculo $E_{LWDLab}$ molde 1.5 AASHTO con 90% de compactación. ....	114
Tabla 37. Cálculo $E_{LWDLab}$ molde 1.5 AASHTO con 95% de compactación. ....	114
Tabla 38. Cálculo $E_{LWDLab}$ molde 1.5 AASHTO con 100% de compactación. ....	114

---

Tabla 39. Cálculo $E_{LWDLab}$ molde 1.5 AASHTO con 90% de compactación con menor contenido de agua. ....	115
Tabla 40. Cálculo $E_{LWDLab}$ molde 2.0 AASHTO con 90% de compactación placa 150 mm. ....	115
Tabla 41. Cálculo $E_{LWDLab}$ molde 2.0 AASHTO con 95% de compactación placa 150 mm. ....	115
Tabla 42. Cálculo $E_{LWDLab}$ molde 2.0 AASHTO con 100% de compactación placa 150 mm. ....	115
Tabla 43. Cálculo $E_{LWDLab}$ molde 2.0 AASHTO con 90% de compactación con menor contenido de agua placa 150 mm. ....	115
Tabla 44. Cálculo $E_{LWDLab}$ molde 2.0 AASHTO con 90% de compactación placa 300 mm en concreto. ....	115
Tabla 45. Cálculo $E_{LWDLab}$ molde 2.0 AASHTO con 95% de compactación placa 300 mm en concreto. ....	115
Tabla 46. Cálculo $E_{LWDLab}$ molde 2.0 AASHTO con 100% de compactación placa 300 mm en concreto. ....	116
Tabla 47. Cálculo $E_{LWDLab}$ molde 2.0 AASHTO con 90% de compactación con menor contenido de agua placa 300 mm en concreto. ....	116
Tabla 48. Cálculo $E_{LWDLab}$ molde 2.0 AASHTO con 90% de compactación placa 300 mm en jardín. ....	116
Tabla 49. Cálculo $E_{LWDLab}$ molde 2.0 AASHTO con 95% de compactación placa 300 mm en jardín. ....	116
Tabla 50. Cálculo $E_{LWDLab}$ molde 2.0 AASHTO con 100% de compactación placa 300 mm en jardín. ....	116
Tabla 51. Cálculo $E_{LWDLab}$ molde 2.0 AASHTO con 90% de compactación con menor contenido de agua placa 300 mm en jardín. ....	116

## 1. INTRODUCCIÓN

La compactación es un proceso mecánico que tiene como finalidad mejorar las características de comportamiento de suelos que conforman la sección estructural de las carreteras (Rico & del Castillo, 1992).

La eficiencia del control de la calidad de la compactación, generalmente se realiza determinando el grado de compactación (%), realizando una relación entre la masa volumétrica seca natural o compactado en obra ( $Y_d$ ), respecto a su masa volumétrica seca máxima determinada con la prueba de compactación AASHTO en laboratorio ( $Y_{dmax}$ ) (SICT, 2019).

Algunos equipos o métodos utilizados convencionalmente para la determinación de  $Y_d$  pueden llegar a implicar un riesgo para el usuario, un consumo elevado de tiempo en la ejecución de la prueba y complicaciones en la utilización del equipo. Ya que, no pueden ser utilizados en cualquier zona, y en algunos casos las mediciones no reflejan todas las propiedades geotécnicas que gobiernan el comportamiento del suelo.

El control de calidad de la compactación de las capas de una estructura vial basada en módulos está ganando popularidad. Debido a que los módulos son un dato de entrada para el diseño de pavimentos (Afsharikia, & Schwartz, 2018), basado en el método empírico-mecanicista. Asimismo, conocer los módulos es útil para determinar la respuesta de la estructura inferior al esfuerzo aplicado.

Como solución a suplir estos equipos convencionales basados en densidades, se optó por la innovación y desarrollo de un dispositivo que fuera seguro, simple y rápido de utilizar para la garantía de la calidad de la compactación en campo. Es así como el Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD) tomó auge en el mercado como una alternativa innovadora para medir la calidad de compactación en campo, ya que, mide el Módulo de Rigidez del suelo.

Hay varios desafíos en establecer el uso estándar del LWD, como lo son las diferencias en los componentes de varios dispositivos comerciales, la no linealidad del módulo de suelo bajo diferentes condiciones de contenido de agua y las condiciones de esfuerzos,

discrepancias entre las lecturas medidas en campo y laboratorio debido a las condiciones de frontera que hay en las pruebas (Shwartz, Afsharikia , & Khosravifar, 2017). Debido a esta última el equipo no puede brindar información directa sobre el grado de compactación alcanzado en campo, sino a través de una relación de rigideces obtenidas.

## 1.1 Antecedentes.

En el presente apartado, se revisaron distintas investigaciones relacionadas con el estudio del Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD) y se recapitularon los estudios más relevantes que puedan ayudar a ubicar y entender la problemática de la variación de Módulos entre campo y laboratorio.

En el 2005, Alshibli, Abu-Farsakh y Seyman ejecutaron una evaluación de laboratorio, en donde compactaron distintos tipos de suelo: arcilla limosa, limo arcilloso, arcilla tratada con cemento, arena, grava, pavimento reciclado con RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) y agregados de piedra caliza, con el fin de comparar los resultados obtenidos con distintos dispositivos utilizados para el control de calidad de compactación, estos fueron el equipo Geogauge, el LWD, la placa de carga (PLT) y el cono de penetración dinámico (DCP). Como resultado obtuvieron una correlación del módulo elástico del Geogauge y el módulo de rigidez del LWD con los módulos elásticos iniciales y de recarga PLT y con las tasas de penetración del DCP. Se demostró que el geogauge y el LWD pueden utilizarse para calcular las características de módulo elástico/rigidez de las capas compactadas.

Siekmeier, Pinta, Merth, Jensen, Davich, Camargo y Beyer en 2009, efectuaron una investigación sobre el uso del LWD y el DCP para asegurar la calidad de la compactación en la construcción, realizando pruebas en distintos materiales granulares y finos utilizados en construcciones en el Estado de Minnesota. Con el propósito de estandarizar las pruebas de ambos equipos y así poder utilizarlos para asegurar el control de la calidad de la compactación de las capas de una estructura vial.

El producto de esta investigación fue una tabla con valores de referencia de deflexión y módulo de rigidez con el LWD y el DCP dependiendo del tipo de material utilizado (ver Tabla 1). Si el material es granular, se clasifica con un número obtenido con la granulometría del material mediante la suma de los porcentajes de partículas que pasan por cada tamiz y su

contenido de agua. En el caso de que el material sea fino, se utiliza su límite plástico y su contenido de agua para obtener la clasificación.

Al tener establecido el número de su clasificación según su granulometría, se escoge el porcentaje del contenido de agua que tiene el material (entre 5 y 11%). Recordando que en el mercado existen distintas opciones de LWD gracias a que varias empresas manufacturaron y desarrollaron diferentes modelos que cuentan con estructuras y componentes diversos, y que debido a esto existen variaciones en el Módulo de Rigidez al momento de realizar ensayos con el equipo, se estableció un Módulo de Rigidez Objetivo para el equipo LWD marca DYNATEST y ZORN y con el dispositivo DCP según los mm/impacto.

Por ejemplo, un material con un número de clasificación 3.8 con un 10% de contenido de agua tiene un módulo de rigidez con LWD DYNATEST de 63 MPa, y con LWD ZORN de 42 MPa.

En esta investigación también se recomienda utilizar los resultados del LWD ZORN para evitar variaciones por componentes de masa de impacto, altura de caída, tamaño del plato de carga, rigidez del plato y rigidez del buffer, ya que este equipo utiliza estos componentes constantes.

Tabla 1. *Ejemplo de valores de referencia del módulo de rigidez del LWD y DCP de material granular (Siekmeier et al., 2009).*

Número de Clasificación	Contenido de agua	Objetivo DCP	Objetivo DCP. Módulo CSIR	Objetivo LWD Módulo DYNATEST	Objetivo LWD Módulo ZORN	Objetivo LWD Deflexión ZORN
NC	%	mm/impacto	MPa	MPa	MPa	mm
3.1-3.5	5-7	10	97	120	80	0.38
	7-9	12	80	100	67	0.45
	9-11	16	59	75	50	0.60
3.6-4.0	5-7	10	97	120	80	0.38
	7-9	15	63	80	53	0.56
	9-11	19	49	63	42	0.71
4.1-4.5	5-7	13	79	92	62	0.49
	7-9	17	55	71	47	0.64

	9-11	21	44	57	38	0.79
<b>4.6.-5.0</b>	5-7	15	63	80	53	0.56
	7-9	19	49	63	42	0.71
	9-11	23	60	52	35	0.86
<b>5.1-5.5</b>	5-7	17	55	71	47	0.64
	7-9	21	44	57	38	0.79
	9-11	25	37	48	32	0.94
<b>5.6-6.0</b>	5-7	19	49	63	42	0.71
	7-9	24	38	50	33	0.90
	9-11	28	32	43	29	1.05

Schwartz, Afsharikia y Khosravifar (2017), ejecutaron una investigación en conjunto con el Departamento de Transporte de Administración de Carreteras de Maryland, con el fin de evaluar la compactación de materiales no consolidados en condiciones no saturadas, y reemplazar los equipos convencionales con los que se rectifica la calidad de compactación en campo por el equipo LWD.

Estudiaron tres distintos modelos de LWD (Zorn ZFG 3000 LWD, Dynatest 3031 LWD y Olson LWD-1), estos se seleccionaron debido a que representaban una gama de configuraciones y componentes diversos que se encuentran disponibles en el mercado. Se valoraron distintos factores de cada dispositivo: Rango de fuerza, sistema de amortiguamiento, diámetro de plato de carga, tecnología de fuerza máxima, tecnología de determinación de fuerza vs tiempo, de deflexión máxima y de deflexión vs tiempo, número de sensores, sistema de adquisición de datos, precisión y exactitud y por último facilidad de uso.

Para la comparación del equipo con otros métodos convencionales se utilizaron equipos que midieran el contenido de agua y la densidad del suelo en campo. Los factores de comparación fueron los siguientes: conveniencia y comodidad de uso, rapidez en la obtención de los resultados, adquisición de datos, sistema de precisión y exactitud y facilidad de uso.

Para probar los equipos, se hicieron pruebas controladas mediante tres tramos de prueba de aproximadamente 4.6 m de ancho por 4.6 m de largo con una profundidad de 2.4 m ubicados

en el Turner Fairbank Highway Research Center (TFHRC) construidos con tres materiales distintos: (1) Base agregada bien calificada comúnmente utilizada en el estado de Virginia designada como piedra VA21a; (2) un suelo de arena limosa no cohesiva, que era el suelo de subbase local utilizado en la instalación de carga acelerada (ALF) del TFHRC; y (3) una arcilla plástica cohesiva alta importada (HPC). Para cada suelo se designaron distintos contenidos de agua (Más seco que el óptimo, más húmedo que el óptimo, y óptimo (CAO)), distintos espesores y números de capa (Tabla 2 ).

Tabla 2. *Contenidos de agua, densidad y espesor de capas utilizadas en tramos de prueba (Afsharikia y Khosravifar , 2017).*

Tramo de prueba	Capa	Material	Contenido de Agua	Objetivo de contenido de agua	Objetivo de Porcentaje de Compactación	Objetivo de espesor de capa [cm(in)]	Sub Capa	
1	Subrasante	ALF	Más seco que CAO	10	-10% X CAO	≤90	508.0 (20.0)	3
	Base	-	-	-	-	-	-	-
2	Subrasante	ALF	Más húmedo que CAO	15	+30% X CAO	≥95	609.6 (24.0)	6
	Base	VA21a	En el CAO	4.5	OMC	≥95	203.2) 8.0 (	2
3	Subrasante	HPC	Más húmedo que CAO	29	+20% X CAO	≥95	508.0 (20.0)	5
	Base	VA21a	En el CAO	4.5	CAO	≥95	101.6) 4.0	1

Estos tramos fueron compactados meticulosamente para probarlos con un LWD y un Densímetro Nuclear. Las pruebas con el LWD se realizaron con tres distintos tipos de LWD

y se realizaron en nueve puntos distintos a lo largo del tramo de prueba (distancia de 1.7 m entre cada locación). Todas las pruebas se hicieron con el plato de carga de 300 mm. Se realizaron pruebas con distintas alturas de caída para evaluar la dependencia del esfuerzo del material en campo. Se realizaron seis impactos en cada medición.

La ecuación de Boussinesq se utilizó para realizar el cálculo del Módulo de Rigidez de Superficie LWD en campo ( $E_{LWD_{campo}}$ ), se tomó la fuerza y la deflexión pico, se utilizaron distintos factores de distribución según el tipo de suelo.

También se realizaron pruebas en el molde AASHTO, se consiguieron muestras del material suelto y se efectuaron las pruebas de compactación según la normativa AASHTO T-248. Posteriormente, se hicieron las mediciones con los distintos LWD con el plato de carga de 150 mm, se compactaron especímenes de tres a seis contenidos de agua distintos, para obtener la curva de compactación y conocer el contenido de agua óptimo y la masa volumétrica seca máxima (M.V.S.M) de cada suelo. Se realizaron seis impactos por prueba con distintas alturas de caída. Posteriormente, se realizó el cálculo del módulo objetivo de laboratorio tomando en cuenta la fuerza y deflexión pico.

Para validar la calidad de la compactación se utilizó el criterio de  $E_{LWD_{campo}}/E_{LWD_{obj}} \geq 1$ , si el material tenía un valor menor a uno, no contaba con una buena compactación. Se compararon estos resultados con el porcentaje de compactación (PC) obtenido con el Densímetro Nuclear.

Como resultado de la investigación se obtuvo un manual para unificar el procedimiento de las pruebas realizadas con el LWD en formato AASHTO.

Se concluyó que el contenido de agua es crítico en las mediciones del módulo, y que el número propuesto de impactos de LWD en los moldes AASHTO compactados a diferentes contenidos de humedad puede cuantificar el efecto del contenido de agua (CA) en el módulo. Y, erradica la necesidad de tener en cuenta las diferencias en las mediciones de LWD, si el mismo tipo/ marca de dispositivo utilizado para la determinación del objetivo en el laboratorio también se utiliza para la medición de módulos en el campo.

Los equipos OLSON y DYNATEST tuvieron más variabilidad en los resultados, así mismo, los tramos que pasaron el control de calidad con porcentaje de compactación, tuvieron un criterio de  $ELWD_{campo}/ELWD_{obj} \geq 1$ , lo cual ratificó la aplicabilidad de la metodología.

Afsharikia y Schwartz en el 2018, realizaron una investigación en colaboración con el Departamento de Transporte de la Administración de Carreteras de Maryland en donde validó el estudio TPF-5(285): Estandarización de Módulo del Deflectómetro de Impacto Ligerero para el control de calidad en la compactación, al aplicarlo en materiales no consolidados del estado de Maryland.

Además, elaboraron un catálogo con valores de referencia de materiales no consolidados, donde establecieron el número mínimo de pruebas necesarias con el LWD para la recolección de datos en el campo, y determinó los criterios de aceptación apropiados, definió cuales eran los límites más bajos que se pueden tener el control de por medio de un porcentaje que delimita este criterio.

Para lograr esto, efectuaron pruebas con el LWD Dynatest 301 en nueve suelos catalogados como base hidráulica en distintos proyectos de construcción del estado de Maryland. Los sitios de prueba contaban con una longitud mínima de 100 pies. Marcó de 10 a 20 puntos con un promedio de 10 pies de separación entre ellos. Con los platos de carga de 300 mm y de 200 mm. tomó medidas, también con el densímetro nuclear en los mismos puntos para comparar los resultados.

También realizaron pruebas con los materiales en el molde AASHTO siguiendo la norma AASHTO T-180 con el método D, reprodujo especímenes con cinco contenidos de agua diferentes. Al terminar colocaba el molde en una superficie de concreto y realizaba seis impactos con el LWD con cinco alturas distintas (3,4,5,6 Y 8 pulgadas), teniendo un total de 30 golpes por molde.

Para su análisis utilizaron el criterio de  $ELWD_{campo}/ELWD_{obj}$ . Como resultado obtuvo gráficas comparativas entre el porcentaje de compactación obtenido con el densímetro nuclear contra  $ELWD_{campo}/ELWD_{obj}$  para los nueve sitios de estudio. Los resultados que cumplían la calidad de compactación con el densímetro nuclear excedían

---

$ELWD_{campo}/ELWD_{obj} \geq 1$ . Lo cual valida el procedimiento y el uso del LWD para el control de la calidad de compactación.

Establecieron que para que un tramo tenga una buena compactación es necesario realizar una relación de la resta de la media y el valor límite mínimo especificado (80%) entre la desviación estándar de los valores de la prueba.

Afsharikia y Schwartz no encontraron correlación entre el plato de carga y la deflexión, determinó que más bien, depende de los factores como el porcentaje de compactación, el contenido de agua, el tipo de suelo y las circunstancias de construcción. Sin embargo, concluye que es recomendable replicar las condiciones de campo en laboratorio.

## 1.2 Planteamiento del problema

El uso del LWD ya se encuentra estandarizado, sin embargo, en el mercado existen una variedad de opciones las cuales cuentan con estructuras y componentes diversos, gracias a que varias empresas manufacturaron y desarrollaron diferentes modelos de LWD. Debido a esto existen variaciones en la lectura del Módulo de Rigidez al realizar los ensayos en laboratorio y en campo con el equipo.

A pesar de que el LWD realiza una prueba dinámica en el suelo, aún no hay correlaciones confiables disponibles en la literatura entre los resultados de estas pruebas y los parámetros físicos y mecánicos del suelo que puedan ayudar en el diseño de pavimentos.

Es necesario dar exploración y enfoque a las pruebas con LWD en laboratorio ya que, la mayoría de los estudios disponibles dirigen la investigación del equipo a campo y aún hay discrepancias entre ambos resultados. El contar con un resultado similar entre ambas lecturas, pudiera permitir que las agencias carreteras determinen el grado de compactación de capas no consolidadas en campo con el LWD.

De acuerdo con lo anterior, se planteó la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué efecto tendrá el incremento del diámetro del molde Proctor en el resultado del Módulo de Rigidez empleando Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD) ZORN?

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo General

Analizar los Módulos de Rigidez de laboratorio ( $E_{LWDLab}$ ) de una arena limosa, de acuerdo con el manual M•MMP•1•16/20 con LWD ZORN, incrementando las dimensiones del molde de compactación AASHTO modificado.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar los parámetros geotécnicos del suelo a emplear.
- Estimar la masa volumétrica seca máxima y el contenido de agua óptimo del suelo mediante la prueba de compactación AASHTO.
- Calcular los Módulos de Rigidez Objetivos ( $E_{Obj}$ ) derivados de la prueba de compactación AASHTO con Deflectómetro de Impacto Ligero.
- Cuantificar y analizar los Módulos de Rigidez de Laboratorio ( $E_{LWDLab}$ ) incrementando las dimensiones del molde de compactación.

## 1.4 Hipótesis

El  $E_{LWDLab}$  aumentará al incrementar las dimensiones del molde AASHTO Modificado y tendrá un resultado más cercano al de campo.

## 1.5 Justificación

Debido al estado confinado del material dentro de un molde de compactación AASHTO, la suposición estándar de espacio semi-infinito comúnmente utilizado para calcular los valores de módulo durante las pruebas de LWD en campo es inválida y se encuentran discrepancias entre las lecturas de los Módulos de Rigidez en campo y de laboratorio; por lo que no es posible determinar un grado de compactación de forma directa con este equipo.

Al incrementar el diámetro del molde se busca que las condiciones en laboratorio sean más cercanas a las de campo y de esta manera eliminar las discrepancias entre módulos.

## 1.6 Delimitación

La presente investigación se desarrolló en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en el laboratorio de Materiales localizada en la ciudad de Morelia, Michoacán en el

periodo comprendido de junio del 2022 a agosto de 2023. Para el análisis del  $E_{LWD,Lab}$  de una arena limosa con LWD ZORN, incrementando las dimensiones del molde AASHTO de compactación.

## 2. MARCO TEÓRICO

En este apartado se presentan las definiciones y conceptos que se tomarán como base esencial para lograr el objetivo del proyecto. El propósito que tiene el marco teórico es el situar el problema a investigar dentro de un conjunto de conocimientos que permita orientar la búsqueda y ofrezca una conceptualización adecuada para los términos que se utilizarán más adelante.

### 2.1 Compactación.

Según Del Castillo y Rico (1992), la compactación es un proceso mecánico predestinado a la mejora de las características del comportamiento de los suelos que constituyen la sección estructural de las carreteras, los ferrocarriles o las aeropistas. En las vías terrestres, hay tres beneficios en la conducta de los suelos que se buscan con la compactación que son los siguientes:

- Reducir la compresibilidad e incrementar la estabilidad volumétrica, sobre todo, cuando se presenta absorción y pérdida de agua.
- Aumento en la capacidad de carga, sobre todo la resistencia al esfuerzo cortante.
- Garantizar un balance en el comportamiento mediante una buena relación esfuerzo-deformación.

Del castillo y Rico (1992), también señalaron que la compactación puede llegar a tener múltiples propósitos, sin embargo, algunas veces puede llegar a ser un proceso contraproducente. Por ejemplo, una sobre-compactación puede llegar a hacer un material más resistente, pero exponiéndolo al agrietamiento y a tener poca permeabilidad.

En el 2013, Das estableció que la compactación en la construcción de estructuras como terraplenes para carreteras, presas de tierra, etc. Se utiliza para aumentar el peso unitario de los suelos sueltos, aumentar propiedades del material como su resistencia y de esta forma incrementar la capacidad de carga de las cimentaciones que se construyen en estos suelos.

La compactación se define como la consolidación del suelo por la eliminación de aire al aplicar energía mecánica. Al agregar agua al suelo durante la compactación, esta opera como agente suavizante sobre las partículas de tierra, éstas se deslizan una sobre la otra y se mueven en una posición densamente empaquetadas (Das, 2013).

Das (2013), determinó que después de compactar, el peso unitario seco inicialmente crece cuando se incrementa el contenido de agua. Superior a cierto contenido de agua, cualquier aumento de ésta disminuirá el peso unitario seco. Esto se debe a que el agua obstruye los espacios que han sido ocupados por las partículas sólidas. El contenido de agua en el que se alcanza el peso unitario seco máximo se nombra contenido de agua óptimo. La prueba de laboratorio usada para obtener el peso unitario seco máximo de compactación y el contenido óptimo de agua se denomina prueba Proctor de compactación.

## **2.2 Equipos de campo para medición de compactación.**

En el manual M•MMP•1•10 de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT), se describe el procedimiento para verificar la calidad de la compactación en campo de las cimentaciones de un pavimento, que consiste en realizar una relación de porcentaje entre la masa volumétrica seca de campo después de haber sido compactada contra la masa volumétrica seca máxima obtenida en el laboratorio

Las pruebas y equipos para realizar la medición de la masa volumétrica seca en campo se mencionan a continuación.

### **2.2.1 Densímetro Nuclear.**

El densímetro nuclear (NDG, por sus siglas en inglés) es utilizado para determinar si los trabajos de compactación en los suelos son aceptables. Las técnicas de construcción de carreteras deben lograr una compactación apropiada del material colocado en la construcción, para evadir problemas cuando se encuentre en servicio; como lo son la densificación, asentamientos, baches, etc. También deben de inhibir el movimiento de agua dentro y fuera de la carretera. El nivel de compactación se conoce comúnmente como grado de compactación y se expresa en porcentaje. Por lo general, este se determina mediante pruebas de densidad en campo utilizando un NDG (Bretreger, 2015).

Según Aguirre et al. (2010), el densímetro nuclear (Figura 1) es un equipo de medición electrónico idóneo para calcular de manera precisa el contenido de agua y la densidad de un suelo, material agregado y asfalto *in situ*, sin necesidad de recurrir a pruebas en laboratorio. Es un dispositivo con resultados fiables, pero altamente radioactivo, ya que guarda Celsio 137 y Americio-241/Berilio, por lo que su manejo puede llegar a ser riesgoso.



Figura 1. *Densímetro Nuclear* (Humboldt, 2023)

Bretreger (2015), establece que el NDG funciona de manera que las fuentes radioactivas que contiene están produciendo radiación constantemente. Cuando el densímetro no está tomando lecturas, la fuente siempre tiene que estar retraída en una posición segura, con la fuente dentro del bloque de protección de tungsteno (Figura 2).

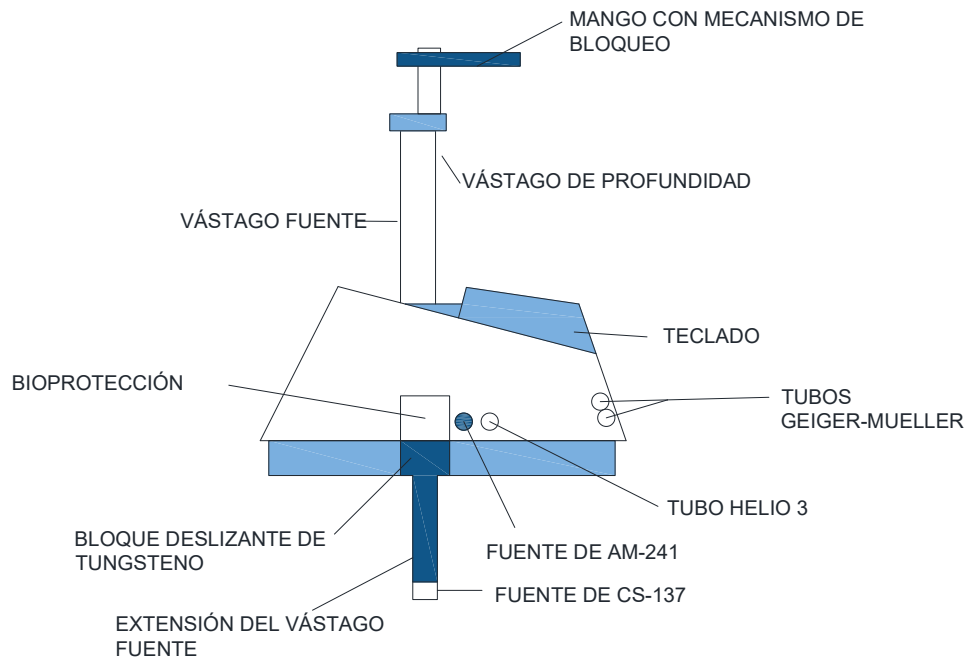


Figura 2. Diagrama representando las partes principales de un NDG. (Bretreger, 2015)

Para medir la masa volumétrica húmeda se usa Cesio 137 (Cs-137) que es una fuente de radiación gamma, es un balín del tamaño de un chicharro ubicado en el fondo de la varilla fuente y los dos tubos gamma detectores Geiger-Muller en la parte trasera del medidor. Hay dos modos de medición con este equipo, transmisión directa e indirecta (Bretreger, 2015).

En el modo de transmisión directa (ver Figura 3 B)), el vástago, fuente gamma de Cesio, se baja soltándolo con el mango en el terreno hasta la profundidad donde se desea realizar el ensayo. Cuando se inicia la prueba, los detectores Geiger-Muller en el medidor, registran la tasa de recuento de la radiación transmitida por la varilla fuente directamente a través de la capa de suelo, donde colisiona con los electrones ahí presentes, el resultado son lecturas de densidad húmeda en la pantalla (Aguirre, 2010; Bretreger, 2015).

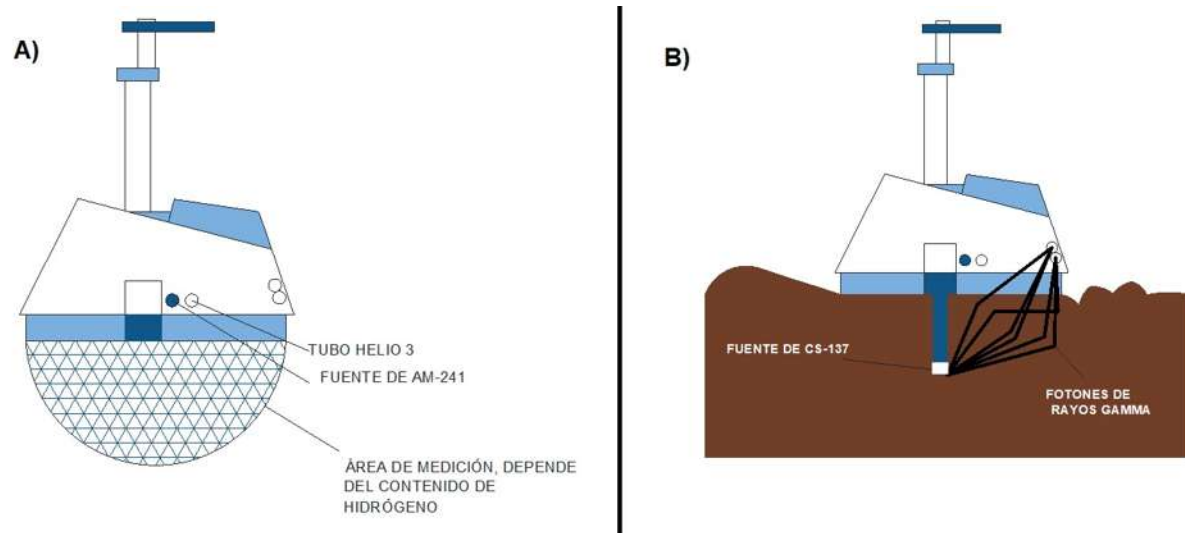


Figura 3. Operación del densímetro nuclear. A) Manera indirecta B) Modo Directo.

El método de transmisión indirecta ( Figura 3 A)) es no destructivo y veloz. La fuente de emisiones gamma y los tubos Geiger-Muller persisten internamente en el equipo. Este se sitúa en sobre el suelo, las transmisiones de radiación gamma se introducen en el material, de igual manera las emisiones tomadas por los detectores son calculadas. Este modo solo se utiliza para determinar densidades en capas delgadas, comúnmente de material asfáltico o de concreto (Zeta, 2019).

Bretreger (2015), explica que contenido de humedad con el densímetro se calcula por medio del Americio-241 (Am-241/Be), fuente de radiación de neutrones de alta energía. Estos neutrones “rápidos” son alentados con la interacción de los átomos de hidrógeno. Una “nube” de neutrones lentos se forma alrededor del medidor, pasando a través de los tubos detectores de Helio. Esto detecta la tasa de recuento de los neutrones "lentos". La fuente de neutrones se fija dentro de la base del medidor, con el detector Helio 3 al lado. El contenido de agua determinado con el NDG puede ser utilizado como una guía, pero no es adecuado y no debe ser utilizado para cálculos futuros o reportes posteriores.

### 2.2.2 Ensayo de Cono de Arena.

Es un método funcional aplicado en suelos in situ, se fundamenta en el principio teórico de la relación peso-volumen, para la obtención de la masa volumétrica del suelo seco. Este cono

de arena emplea una arena específica calibrada, conocida como arena de Ottawa, un elemento metálico en forma de cono y herramienta complementaria como espátula, báscula, etc. (Sierra y Varela, 2012).

Sierra y Varela (2012) dictaron que este método se puede emplear en todo tipo de suelo siempre y cuando su textura consienta que pueda ser excavado, y con la condición de que sus porosidades sean más chicas que el tamaño más pequeño de la arena de Ottawa. Esto con el propósito de que las partículas de la arena no permanezcan dentro de los vacíos del suelo. Tampoco es viable realizar este método en suelos blandos, saturados o que sean sencillos de pulverizar.

La SICT (2003), en el manual M•MMP•1•08/03, señala que el cono y el frasco consisten en una sección desmontable compuesta por dos conos metálicos truncados de diferentes tamaños, incorporados entre sí por sus partes de menor diámetro mediante una válvula cilíndrica con un orificio de 13 mm de diámetro. La parte con diámetro más grande del cono de menor tamaño está provisto de rosca para poder ensamblarlo a la boca de un frasco de aproximadamente de 4 Litros de capacidad (el que contiene la arena de Ottawa). Mientras que el cono de tamaño mayor tiene libre su extremo de mayor diámetro, lo que permite ser conectado en una base metálica cuadrada o sobre una lona con perforación en el centro provista de un anillo metálico de acoplamiento (Figura 4).

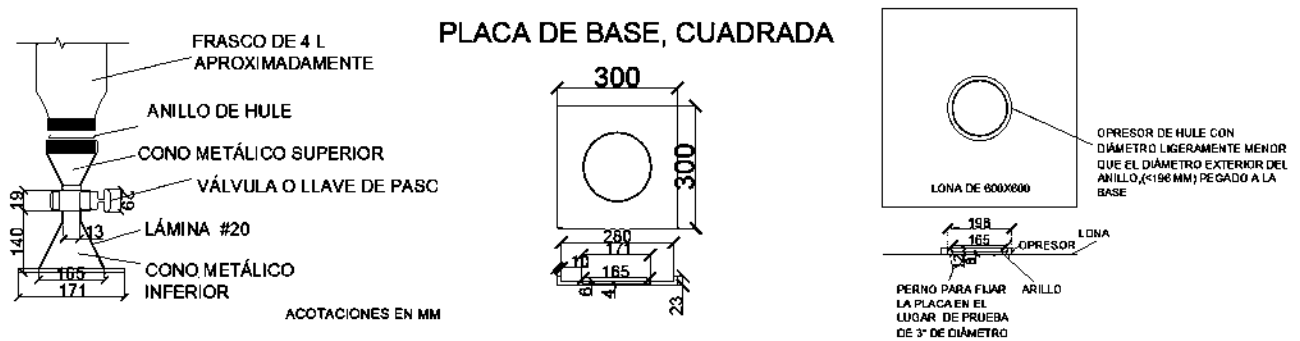


Figura 4. *Cono de Arena con sus accesorios.* (SICT, 2008).

La metodología por seguir para determinar de la masa volumétrica seca del material en estado natural o en estado compactado, por el método del cono y arena está establecida en la sección K del manual M•MMP•1•08/03. Consiste en realizar una cala en el suelo donde se efectúa el ensayo y se conserva el material extraído. La cala se rellena con arena de Ottawa o con una

arena con densidad conocida, posteriormente se calcula el volumen por diferencia de masas. Se determina la masa volumétrica del material húmedo con la relación de la masa extraída entre el volumen de la cala, y finalmente con la prueba de contenido de agua se puede deducir la masa volumétrica seca.

### 2.2.3 Método de Globo de Goma.

El dispositivo que se utiliza en el ensayo se llama “voluessel” se compone de un recipiente de vidrio graduado con forma cilíndrica (ver Figura 5). En la parte inferior, se le coloca un globo de hule estabilizado mediante una placa metálica. El procedimiento para realizar este ensayo se encuentra establecido en la norma ASTM D 2167.

Das (2013), define que la técnica del globo de goma es parecida al método del cono y arena. Se realiza un orificio de ensayo y se calcula el peso húmedo del suelo sacado del agujero y su contenido de agua. No obstante, el volumen del orificio se mide por medio de un globo de goma repleto de agua de un contenedor calibrado del que se puede leer directamente el volumen, dentro del agujero. El peso unitario seco de la tierra compactada se puede determinar mediante el uso de la *Ecuación 1*:

$$\gamma_d = \frac{W}{1 + \frac{w(\%)}{100}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$\gamma_d$ = Peso unitario seco de la tierra compactada ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

W= Peso seco del suelo excavado del agujero (gr)

w= Contenido de agua del suelo en %.



Figura 5. *Voluvel* utilizado en el método de globo de goma (Grainer, 2023).

#### 2.2.4 Geogauge.

El dispositivo Geogauge puede ser utilizado en diferentes situaciones en el control de la calidad de la compactación de suelos *in situ*. Una vez terminada la compactación o tiempo después de finalizada ésta, le proporciona al usuario valores de rigidez y módulo de elasticidad del suelo, estos datos son importantes para conocer el comportamiento mecánico del material (Narvaez, 2017).

De acuerdo con Alshibli, Abu-Farsakh y Sayman (2005), el Geogauge (también conocido como indicador de rigidez), es un dispositivo portátil, capaz de realizar mediciones sencillas y completas *in situ* de rigidez y de módulos elásticos de los suelos. Fue fabricado por la compañía Humboldt y tiene un peso aproximado de 10 kg. Su tamaño es compacto de 28 cm y 25.4 cm de diámetro (ver Figura 6) . El equipo se coloca en la superficie del suelo mediante un pie en forma de anillo, que tiene un diámetro exterior de 114 mm y un diámetro interior de 89 mm. El pie se apoya directamente en el suelo y soporta el peso del Geogauge a través de varios aisladores de goma.



Figura 6. *Geogauge*. (Humboldt, 2023).

El Geogauge es un instrumento que funciona por peso propio, al instante en el que vibra, causa diferenciaciones de carga, estas provocan deflexiones pequeñas. Un agitador mecánico (Figura 7), unido al pie, sacude el Geogauge de 100 a 196 Hz en incrementos de 4 Hz, produciendo 25 frecuencias diferentes y generando una fuerza aproximada de 9 N. El Geogauge tiene unos sensores que miden la fuerza (F) y un Deflectómetro en el pie. La magnitud del desplazamiento vertical que se induce en la interfaz anillo-suelo es comúnmente menos de  $1.27 \times 10^{-6}$  m. Es medido usando los sensores de velocidad y un microprocesador calcula la rigidez HSG para cada una de las 25 frecuencias, después el valor promedio de las 25 mediciones es presentado junto con la desviación estándar (Alshibli et. Al., 2005; Narvaez, 2007).

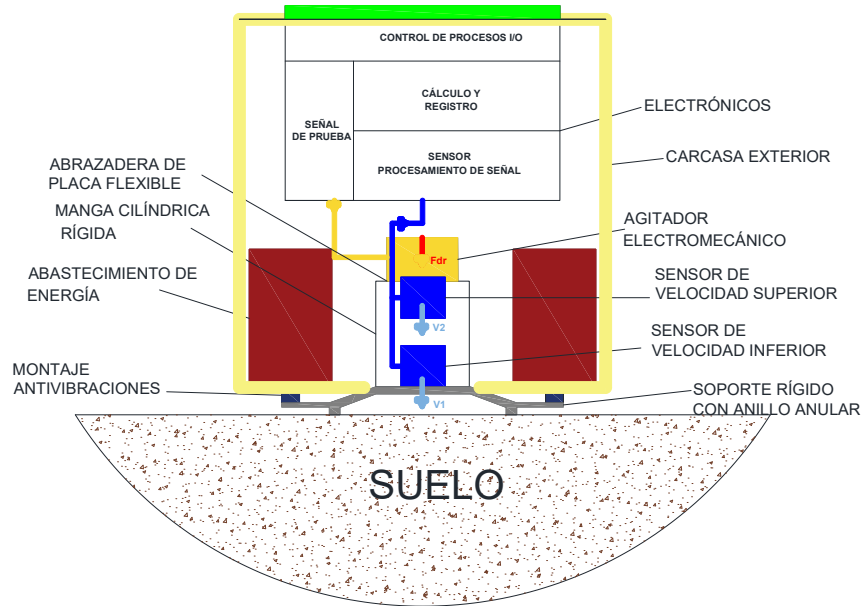


Figura 7. Partes del Geogauge (Alshibli et al., 2005)

Según Alshibli et.al (2005) la rigidez tomada con el Geogauge puede ser convertida a el módulo elástico del suelo ( $E_G$ ), con la Ecuación 2 y cuando se tiene una Relación de Poisson de 0.35, se puede utilizar un factor de conversión de 8.67 para convertir la rigidez tomada con el Geogauge (MN/m) a el módulo elástico (MPa).

$$E_G = H_{SG} \frac{(1-\nu^2)}{(1.77R)} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$E_G$  = Módulo elástico del suelo (MPa)

$H_{SG}$  = Lectura del Geogauge

$\nu$  = Relación de Poisson

$R$ =Radio del pie del Geogauge (57.15 mm)

### 2.2.5 Penetrómetro de Impacto Ligero (PANDA).

PANDA (Ver Figura 8), es un penetrómetro dinámico ligero de energía versátil utilizado en el control de la compactación y el reconocimiento de suelos desarrollado por la compañía Sol Solution, este equipo permite ejecutar sondeos horizontales e inclinados, así como también realizar muestreos en lugares de difícil acceso. El dispositivo realiza un cálculo de la resistencia del suelo (en MPa) en función de la profundidad. Ya se encuentran correlaciones en la literatura con otros parámetros geotécnicos como el CBR, CPT, SPT y  $C_u$  con los que se puede realizar una optimización de los ensayos del suelo y dictámenes geotécnicos (Sol Solution, 2008).



Figura 8. Penetrómetro Dinámico (Sol Solution, 2018).

Según Villavicencio, Breul, Espinace y Valenzuela (2011), el principio de funcionamiento se basa en clavar en el suelo, mediante el impacto de un martillo con 2 kg de masa, un conjunto de barras de 14 mm de diámetro en el extremo de su punta cónica metálica de  $2\text{ cm}^2$

de diámetro. Este impacto crea una onda de esfuerzo en la cabeza de golpeo, la cual se esparce hacia la punta del penetrómetro forjando la penetración. Para cada impacto del martillo se anota la penetración conseguida ( $e$ ) y la resistencia de la punta del suelo ( $q_d$ ), se consigue con el ajuste de la siguiente fórmula holandesa:

$$q_d = \frac{1}{A_c} \times \frac{E}{e} \times \frac{M}{M+P}$$

Ecuación 3

En donde:

M= masa del martillo

E= Energía aplicada

e= Penetración de la punta del suelo por cada impacto del martillo

$A_c$ = Área de la punta

P= la masa del conjunto de barras y de la cabeza del golpeo.

Al terminar la prueba, es posible observar en el momento, la señal penetrométrica conseguida y las capas del suelo identificadas, en función de la resistencia  $q_d$ . El control de compactación se encuentra bajo la normativa NFP 94-105.

### 2.2.6 Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD).

Elhakim, Elbaz y Amer (2014), definen el Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD), es un dispositivo portátil con una masa de caída creado en 1981 en Alemania, se desarrolló como un equipo para pruebas de campo in situ para el control de calidad de compactación por el Instituto Federal de Investigación Carretero y la compañía HMP.

El LWD ganó popularidad y aceptación en diferentes países, principalmente en Estados Unidos, el interés principal del uso de este equipo fue para utilizarlo en campo como prueba de control y garantía de la calidad de la compactación. Este uso se introdujo por primera vez en Egipto en el año 2008, en donde se probó una subrasante sin compactar y con la compactación realizada en campo.

Según la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM,2011) y Siekmeier et al. (2009), hay diferentes tipos de LWD alrededor del mundo, pero todos tienen un principio de funcionamiento similar y la mayoría consta principalmente con los siguientes elementos (ver Figura 9):

- *Masa de Impacto:* Está diseñado para operar con una fricción insignificante.
- *Plato de carga:* Capaz de distribuir uniformemente la fuerza de impacto en la superficie. El dispositivo deberá estar construido adecuadamente para permitir tomar las medidas de las deflexiones del material en el centro del punto de impacto, a través de un hoyo en el centro del plato de carga.
- *Sensores de deflexión:* Debe ser capaz de medir el máximo movimiento vertical y debe estar montado de tal manera que minimice la rotación angular con respecto al plano de medición. Los sensores pueden ser de distintos tipos.
- *Procesador de datos y Sistema de almacenamiento.* La fuerza, la deflexión y los módulos deben poder verse y registrarse.
- *Celda de carga.* En algunos casos el dispositivo incluye una celda de carga para medir la fuerza de cada impacto.
- *Amortiguadores:* Se encargan de atrapar la masa de caída y transferir la fuerza de impacto al plato de carga, pueden ser resortes de metal o almohadillas de goma, estas pueden tener forma cilíndrica o de cono.

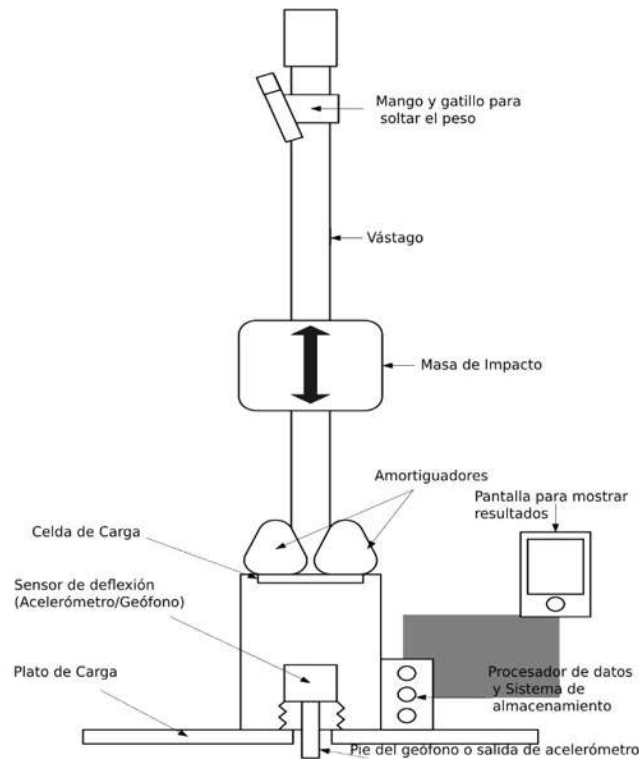


Figura 9. Esquema del LWD con sus componentes (Flemming, Frost y Lambert, 2007).

### 2.2.6.1 Principio de Funcionamiento del LWD.

El LWD es un dispositivo dinámico de carga para la determinación del módulo de rigidez ( $E_{pi}$ ) de suelos y materiales de relleno para compactación en campo.

El funcionamiento básico del equipo LWD se lleva a cabo mediante el principio de caída libre y rebote de una masa sobre un sistema de amortiguamiento.

La prueba consiste en someter el suelo a un impacto mediante el plato de carga. El mecanismo del LWD consiste en soltar la masa de impacto desde una altura de caída, ésta cae a lo largo de una varilla (vástago) hasta que golpea el amortiguador. El amortiguador se ensambla con el plato de carga y este está en contacto con el suelo. Una vez que la masa cae sobre el amortiguador, el equipo y el suelo se desplazan juntos de modo interconectado. El sistema LWD-suelo es un sistema con dos grados de libertad (ver Figura 10), en el transcurso del impacto y el rebote, hasta el instante en que la fuerza se vuelve cero, el sistema se desacopla (Schwartz, Afsharikia y Khosravifar, 2017; SICT, 2020).

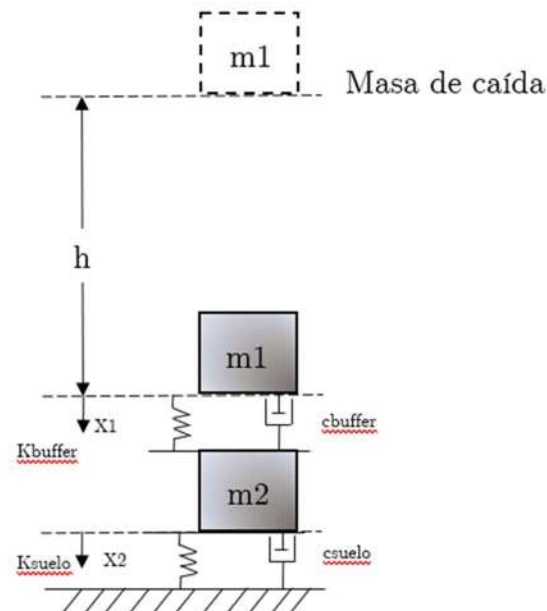


Figura 10. Esquema del funcionamiento del equipo LWD con celda de carga. (Schwartz et al. 2017)

El sensor de deflexión puede ser un geófono o un acelerómetro, éste almacena la velocidad o la aceleración del plato de carga o del suelo dependiendo del lugar donde sea colocado. El tipo de deflexión y el posicionamiento del sensor varía según el tipo de modelo de LWD. Después de haber concluido el ensayo, el desplazamiento máximo es obtenido a través del cálculo de la doble o simple integración de las aceleraciones/velocidades.

El historial de la fuerza y la fuerza máxima es medida por la celda de carga, los equipos que no cuentan con una celda de carga asumen una fuerza máxima de 7.07 kN, independientemente del tipo de suelo y su rigidez. Se puede variar la altura de caída máxima según el modelo de LWD. La fuerza o altura máxima se calcula en base a un modelo mecánico con un solo grado de libertad como se muestra en la Figura 11.

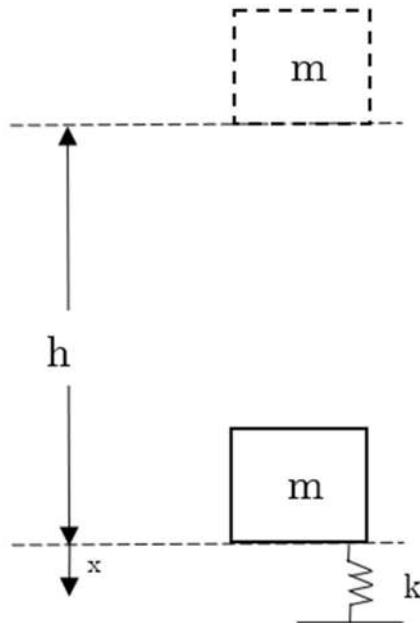


Figura 11. *Esquema simplificado del movimiento LWD-Suelo con un grado de libertad como un sistema masa-amortiguador (Schwartz et al. 2017).*

Según la ley de la conservación de la energía descubierta a mediados del siglo XIX, la energía total de un sistema es constante, esto significa que la cantidad de energía no puede crearse ni destruirse, sólo convertirse de una forma de energía a otra, pero siempre debe tener la misma cantidad de energía. (Moneef, 2015)

Robert Hooke estudió en el siglo XVII los resortes y la elasticidad y descubrió que la deformación elástica a la que se somete un cuerpo es proporcional a la fuerza que produce tal alteración, siempre y cuando no se sobrepase el límite de elasticidad. La ley de Hooke entonces afirma que: “La Fuerza que devuelve un resorte a su posición de equilibrio es proporcional al valor de la distancia que se desplaza de esa posición” (Academia Khan, 2020; Mabel, S, 2007). Esto se expresa de la siguiente manera:

$$F = k \cdot \Delta x$$

Ecuación 4

En donde:

$k$  = Es una constante de proporcionalidad de cada resorte (N/m).

$\Delta x$  = Deflexión (variación de longitud) de cada resorte(m).

Según la Academia Khan (2020), la definición trabajo se conoce que el área bajo una gráfica de fuerza vs. desplazamiento da como resultado el trabajo ejercido por esa fuerza. Debido a que el área bajo la curva de un resorte es un triángulo (Figura 12), no hay pérdida de energía en un resorte ideal, podemos deducir entonces que la energía potencial elástica es la siguiente:

$$U = \frac{1}{2}(\Delta x) \cdot k(\Delta x) \qquad \text{Ecuación 5}$$

En donde:

U= Energía potencial elástica

$\Delta x$  = Deflexión (variación de longitud) de cada resorte(m).

$k$  = Es una constante de proporcionalidad de cada resorte (N/m).

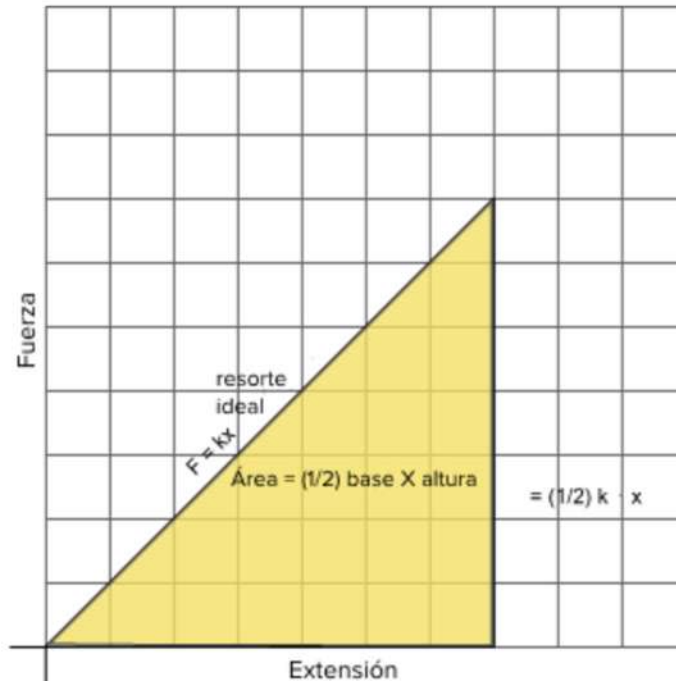


Figura 12. Trabajo realizado sobre una fuerza en un resorte funcionando de manera ideal. (Academia Khan, 2020)

Debido a que no cuenta con celda de carga, el dispositivo ZORN opera de acuerdo al modelo supuesto de fuerza contra peso (Shwartz et al., 2017) y la ley de la conservación de la energía, la energía potencial gravitacional que hay antes de producir el impacto se transforma en energía cinética al caer la masa por el vástago y esta a su vez se convierte en energía potencial elástica al momento de golpear el amortiguador ( $E = m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} k \cdot \Delta x^2$

Ecuación 6) que es un resorte de acero en este equipo.

$$E = m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} k \cdot \Delta x^2 \quad \text{Ecuación 6}$$

En donde:

E= Energía potencial (J)

m= masa de impacto (kg)

$g$ = gravedad de la tierra ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

$k$ = Constante de rigidez del amortiguador (N/m).

$\Delta x$ = Deflexión (m).

Realizando una equivalencia de la  $E = m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} k \cdot \Delta x^2$  Ecuación 6

al multiplicar ambos por  $k$  y recordando la Ley de Hooke ( $F = k \cdot \Delta x$

Ecuación 4) tenemos que:

$$\frac{1}{2} F^2 = m \cdot g \cdot h \cdot k \quad \text{Ecuación 7}$$

Despejando la fuerza obtenemos la siguiente Ecuación:

$$F = \sqrt{2 \cdot m \cdot g \cdot h \cdot k} \quad \text{Ecuación 8}$$

Realizando la sustitución de la Ecuación 6 con los datos del LWD ZORN obtenemos que:

$$F = \sqrt{2 \cdot (10 \text{ kg}) \cdot (9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) (0.724 \text{ m}) (351885.4084 \frac{\text{N}}{\text{mm}})}$$

$$F = 7070 \text{ N o } 7.07 \text{ kN}$$

Esta fuerza de 7.07 kN aplicada en el plato de carga con un diámetro de 300 mm representa un esfuerzo de  $0.1 \text{ MN/m}^2$  o  $10 \text{ ton/m}^2$  (ver Figura 13). Este esfuerzo es equivalente al esfuerzo que aplica el paso un camión de un eje cargado con 10 toneladas a 80 km/h. Por lo tanto, el suelo será evaluado en las condiciones más comunes en las que está sometido en la vida real.



Figura 13. Principio de operación del LWD. (Casteñeda, 2020).

## 2.2.6.2 Obtención de Módulo de Rigidez con el LWD.

### 2.2.6.2.1 Cálculo del Módulo de Rigidez Objetivo obtenido en laboratorio:

La SICT (2020), en el manual M•MMP•1•16/20, señala que para obtener el módulo de rigidez objetivo  $E_{obj}$  (módulo obtenido en laboratorio) primero se preparan los especímenes empleando el método señalado en el manual M•MMP•1•09/06, dependiendo de la granulometría que tenga el material, se escoge la variante B o D.

Antes de utilizar el LWD en laboratorio, se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Adaptar el equipo con la placa de 150 mm de diámetro y ajustar la altura si es que este no cuenta con celda de carga con el fin de alcanzar la fuerza de impacto de laboratorio que es de 1,7675 kN.
- Colocar el LWD con la placa de carga sobre el material después de haber sido compactado en el molde AASHTO. Realizando movimientos circulares hacia adelante y hacia atrás con la placa de carga, aproximadamente de 45° para que se apoye firmemente, cuidando no tocar el borde del molde. Es válido emplear un

collarín si los componentes del equipo lo permiten o bien si se adapta uno a la medida (Figura 14).

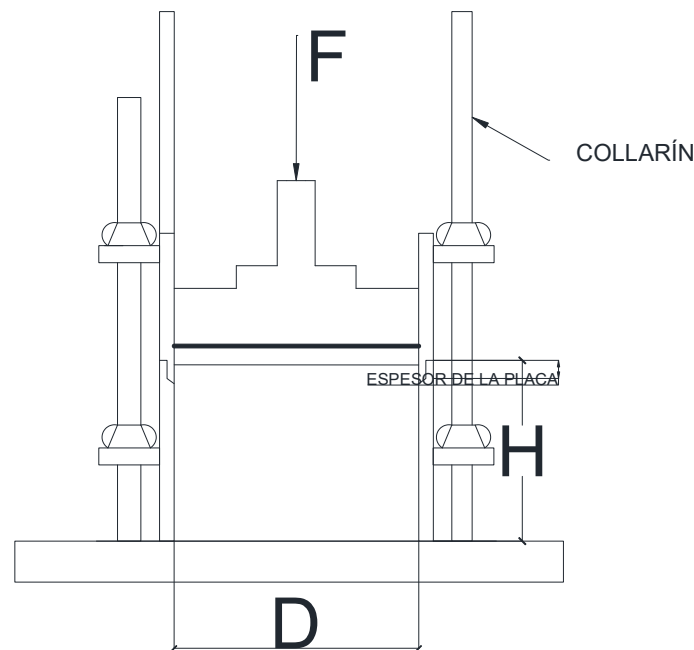


Figura 14. *Equipo LWD sobre molde AASHTO con collarín* (Schwartz et al. 2017).

- c) Después de colocar correctamente el equipo en la muestra, aplicar 3 impactos de acondicionamiento y 3 más para obtener la deflexión. Después registrar los módulos calculados con los equipos LWD obteniendo una base de datos.
- d) Calcular el coeficiente de variación de las deflexiones en cada punto de prueba empleando la Ecuación 9:

$$C.V = \frac{s}{x} 100 \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

C.V= Coeficiente de variación (%)

s = Desviación estándar

$x$  = Media aritmética de las mediciones

Si el coeficiente es mayor de 0.10 se repite la prueba desde el inciso c), si es menor de 0.10 se continúa con lo siguiente.

e) Obtener el valor de la rigidez  $k$ . Los equipos que cuentan con celda de carga, realizan el cálculo automáticamente, para los equipos que no cuentan con una celda de carga

( $F = \sqrt{2 \cdot m \cdot g \cdot h \cdot k}$  Ecuación 8), es necesario calcularlo de

manera manual. El cálculo de  $k$  se obtiene con la

Ecuación 10:

$$k = \frac{F}{\delta} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

F= Fuerza promedio máxima de los últimos 3 impactos generados por el equipo LWD (es constante para equipos sin celda de carga). (N)

$\delta$ =Deformación promedio máxima, obtenida como producto de los últimos impactos generados por el equipo. (mm)

Para los equipos que tengan una celda de carga, este valor se calcula a través del programa de procesamiento de datos incluido en el equipo, basado en la misma ecuación anterior.

f) Para conocer el valor del módulo de rigidez  $E_{LWDLab}$ , en los equipos que posean una celda de carga este valor se obtiene mediante el programa de procesamiento de datos del equipo

basado en la  $E_{LWDLab} = \left[ \left( 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \frac{4H}{\pi D^2} k \right) \right]$  Ecuación 11,

derivada de la teoría de elasticidad para el caso de un cilindro de material elástico con el movimiento lateral condicionado:

$$E_{LWDLab} = \left[ \left( 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \frac{4H}{\pi D^2} k \right) \right] \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

$E_{LWDLab}$ =Módulo de rigidez de laboratorio obtenido del espécimen del suelo con el equipo LWD (MPa).

$\nu$ = Coeficiente de Poisson según el tipo de suelo de acuerdo con la Tabla 3 (este coeficiente puede variar entre 0 a 0.5).

H= Altura del molde (mm).

D= Diámetro de la placa de carga (mm).

$k$  = Rigidez del suelo obtenida en el inciso e). (N/mm).

Para los equipos que no cuentan con una celda de carga, será necesario calcular el Módulo manualmente con la Ecuación 10.

Tabla 3. *Valores típicos del coeficiente de Poisson según el tipo de suelo (SICT, 2020).*

Suelo	Rango de Valores	Valor típico
Suelo granular sin tratar	0.30 a 0.40	0.35
Suelos granulares tratados con cemento	0.10 a 0.20	0.15
Suelos finos tratados con cal	0.20 a 0.35	0.30
Suelos finos tratados con cemento	0.15 a 35	0.25
Limos estabilizados	0.10 a 0.25	0.20
Arena suelta o limosa	0.20 a 0.40	0.30
Arena densa	0.30 a 0.45	0.35
Arcillas Saturadas	0.40 a 0.50	0.45
Limos	0.30 a 0.35	0.32
Arcillas no saturadas	0.10 a 0.30	0.20
Arcilla Limosa	0.20 a 0.30	0.25
Arena de grano grueso	0.15	0.15

Arena de grano fino	0.25	0.25
---------------------	------	------

- g) Al finalizar las pruebas de laboratorio se procede a graficar la curva de compactación del suelo junto con los módulos de rigidez de laboratorio en función de su contenido de agua (Figura 15). En el eje de las abscisas se colocan los datos de contenido de agua y en el eje de las ordenadas se sitúa el módulo de rigidez (MPa) de lado derecho y de lado izquierdo, la Masa Volumétrica Seca en ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ ).

Para obtener el Módulo de Rigidez Objetivo primero se obtiene el contenido óptimo de agua y la Masa Volumétrica Seca Máxima en el punto más alto en la curva de compactación, ahí se traza una línea perpendicular que pasa por estos dos puntos hasta que intercepta con la curva de módulo de rigidez). En este punto se traza una nueva línea horizontal, que choca con el eje de las ordenadas el módulo de rigidez, así se determina  $E_{Obj}$ .

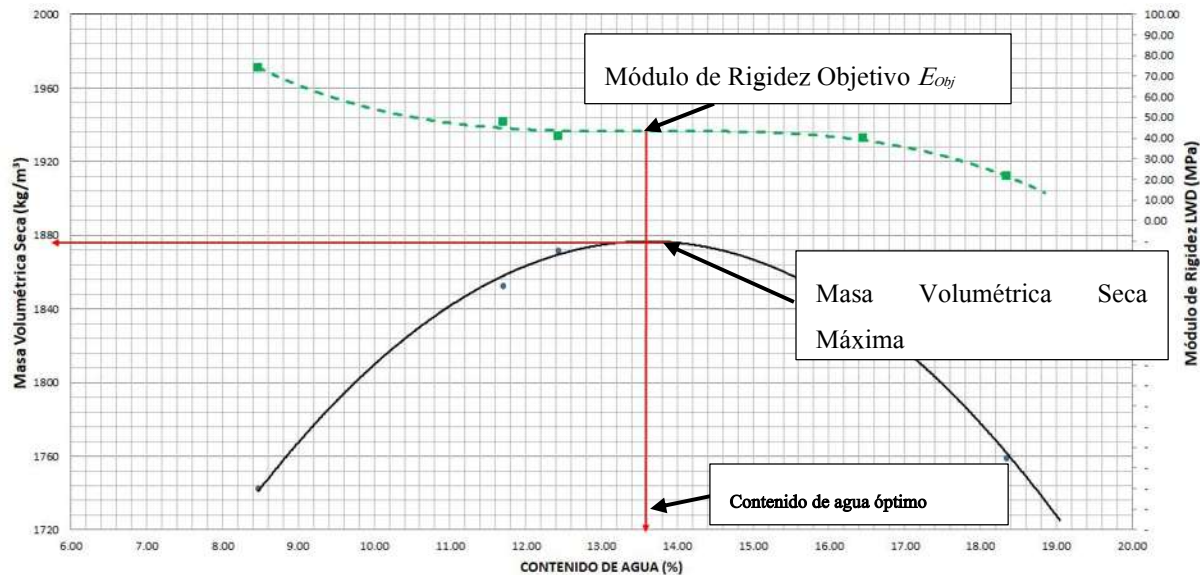


Figura 15. Gráfica para obtener el módulo de rigidez objetivo ( $E_{Obj}$ ) mediante la curva de compactación AASHTO.

### 2.2.6.2.2 *Cálculo del Módulo de Rigidez de Superficie LWD en Campo ( $E_{LWD\text{campo}}$ )*

Antes de comenzar con la prueba se sugiere determinar los lugares de sondeo de acuerdo con lo estipulado en la norma M•CAL•1•02/01

Una vez determinados y marcados los puntos donde se va a realizar la prueba con el equipo LWD, se sigue el siguiente procedimiento:

- a) Sustituir la placa de carga de 150 mm utilizada en laboratorio por la placa de 300 mm de diámetro. Se considera que por norma la fuerza de impacto que se debe obtener en campo es de 7,070 kN, en el caso de que el equipo no cuente con celda de carga, se siguen las recomendaciones de uso del fabricante.
- b) Posteriormente, colocar el equipo LWD sobre el punto determinado de acuerdo con el criterio estadístico señalado en la norma M•CAL•1•02/01. Se verifica que la superficie se encuentre uniforme y sin partículas granulares sueltas para lograr un mejor contacto suelo-equipos. Si la superficie de prueba compete a una capa de base o subbase compuesta por material granular con una superficie irregular, se recomienda emplear una capa delgada de arena fina, para nivelar y lograr un contacto uniforme entre la placa de carga del equipo y la superficie de la capa compactada.
- c) Colocar la placa de carga y el sensor, con un movimiento oscilatorio de 45° aproximadamente, hacia atrás y hacia adelante, para asegurar un contacto fijo y estable sobre la superficie de prueba.
- d) Después, se eleva la masa del equipo a la altura de prueba, impactando 3 veces como acondicionamiento y consecutivamente dando 3 impactos más para obtener resultados (Módulo de Rigidez de campo y deflexiones), los cuales se promediaron para obtener el Módulo para cada punto de interés. anotando y exportando los resultados a una base de datos. Además, se verificará el coeficiente de variación de las deflexiones como se menciona en el inciso c) del apartado previo. Consecutivamente, continuar con los siguientes puntos en forma sucesiva hasta finalizar con todos los espacios considerados.

- e) Determinar el contenido de agua del sitio, conforme lo indicado en el manual M•MMP•1•04, al momento de realizar el tendido y la compactación de la capa. El valor del contenido de agua tendrá que estar dentro del siguiente intervalo:

$$w_o - 3.0\% \leq w_{campo} \leq w_o + 2.0\%$$

En donde:

$w_o$  = Contenido de agua óptimo conforme con lo instituido en el M•MMP•1•04,  
Contenido de Agua, (%)

$w_{campo}$  = Contenido de agua en campo del suelo compactado en %.

Se deberán extraer 3 muestras representativas del tramo para la obtención del contenido de agua en campo ( $w_{campo}$ ). Se realizarán en forma aleatoria en los lugares de muestreo indicados en el inciso a), ejecutando la prueba rápida que se señala en la Cláusula F del Manual M•MMP•1•04, una durante el tendido y conformación de la capa y dos más en seguida de la compactación: Las últimas 2 muestras no deberán variar en más del 2,0% respecto de la primera. El contenido de agua del tramo será el promedio de las 3 muestras.

- f) En los equipos LWD que no tengan una celda de carga, se utiliza una fuerza constante de 7.07 kN (7 070 N) derivada de la  $F = \sqrt{2 \cdot m \cdot g \cdot h \cdot k}$   
Ecuación 8 utilizando su altura máxima de caída con la placa de carga de 300 mm de diámetro, como ya se mencionó anteriormente, con lo cual se genera un esfuerzo constante y al aplicar la siguiente Ecuación se puede obtener su Módulo de Rigidez de Superficie ( $E_{LWDCampo}$ ):

$$E_{LWDCampo} = \frac{1.5R\sigma}{\delta} = \frac{22.5}{\delta} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

$E_{LWDCampo}$  = Módulo de Rigidez de Superficie (MPa)

R= Radio de la placa de carga (mm)

$\sigma$ = Esfuerzo constante de 0.1 N/mm<sup>2</sup> o MPa

d= Deflexión máxima promedio (mm)

R,  $\sigma$  y d se convierten en constantes (22.5) con la placa de carga de 300 mm de radio, siendo esta fórmula que se empleará en el procesamiento de datos para los equipos que no cuentan con una celda de carga. Con esta ecuación no se requiere el valor de la rigidez, no obstante, es posible calcularla con la Ecuación señalada en la sección anterior en el inciso e).

g) La siguiente ecuación indica como determinar el  $E_{LWDCampo}$  con los parámetros oportunos. Esta Ecuación es la que utilizan los equipos que tienen añadida la celda de carga, esta implica un mayor número de variables.

$$E_{LWDCampo} = \left[ \frac{2k(1-\nu^2)}{AR} \right] \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

$E_{LWDCampo}$ = Módulo de rigidez de superficie de la capa compactada medida en campo (MPa).

k= Coeficiente de rigidez calculado con la ecuación de la sección anterior en la sección e). (N/mm).

$\nu$ = Coeficiente de Poisson según el tipo de suelo de acuerdo con la Tabla 1 (adimensional desde 0 a 0.5)

A= Factor de distribución de esfuerzo, 1 para suelos mixtos, 8/3 para suelos granulares o  $\pi/2$  para suelos cohesivos (adimensional).

R= Radio de la placa de carga (mm).

En la Tabla 4, se pueden observar los valores comunes de módulos de rigidez LWD de campo para distintos tipos de suelos.

Tabla 4. *Valores generales de módulo de rigidez LWD en campo* (SICT, 2021).

Tipo de suelo	Módulo $E_{LWD}$ (campo)
Base granular/subbase	100-550
Subrasante	30-275
Suelo estabilizado con cal	50-350
Suelo estabilizado mecánicamente	140-690
Suelo tratado con cemento	690-1700
Base tratada con cemento	1050-2750

## 3. METODOLOGÍA

Este capítulo describe la metodología utilizada para realizar este estudio. Eso incluye los equipos seleccionados para el estudio, ensayos para obtener parámetros geotécnicos del suelo, el procedimiento para crear los moldes, el equipo utilizado para la compactación en las pruebas, la metodología para ejecutar los ensayos de laboratorio con el LWD, con los nuevos moldes, y el cálculo del módulo de laboratorio.

### 3.1 Parámetros geotécnicos.

Se obtuvo una muestra representativa de un suelo recolectado del derecho de vía de la carretera federal 120 en el trayecto Pátzcuaro-Apatzingán ubicado en el estado de Michoacán.

A este suelo se le realizaron ensayos de laboratorio básicos para su caracterización y conocimiento de sus parámetros geotécnicos, siguiendo la metodología de los Manuales de la SICT y ASTM.

#### 3.1.1 Granulometría.

Se realizó la prueba de acuerdo con el manual M•MMP•1•06/03. El ensayo consiste en determinar la granulometría de las partículas que componen el suelo de muestreo, por medio del paso del material por una serie de tamices con aperturas determinadas, partiendo de la malla con abertura más grande, hasta la más pequeña.

Posteriormente, se obtiene la masa que se retuvo en cada malla (ver Figura 16), y se calcula su porcentaje con respecto al total de la muestra. Con estos resultados se dibuja una curva granulométrica que se emplea en la clasificación del suelo mediante el Sistema Unificado de Clasificación Suelos (SUCS).



Figura 16. *Material retenido en cada malla de la prueba de granulometría.*

### 3.1.2 Límites de consistencia.

Estas pruebas se realizaron de acuerdo con el manual M•MMP•1•07/07. Proporcionan las características plásticas del material que pasa la malla No.40, se determinó el Límite Líquido (LL) que es el contenido de agua con el cuál el suelo obtiene una resistencia al corte mediante la copa de Casagrande.

Se criba una fracción del material por la malla No.40 y de la porción que pasa se retiran 200 gramos aproximadamente, se satura el material y se deja en reposo durante un día. Se coloca una fracción de la pasta de suelo en la copa de manera cuidadosa y sin realizar mucha presión, posteriormente se realiza un surco en el centro con el ranurador y se opera la manivela de la copa para dejarse caer, anotando el número de golpes necesarios en los que se consigue que los costados inferiores del surco se unan. Se toma una muestra del centro para determinar su contenido de agua.

Por último, se le adiciona agua al material restante y de homogeniza para repetir el procedimiento hasta conseguir dos valores por encima y dos valores por debajo de los 25 golpes. Esto debido a que Casagrande concluyó que cada golpe en la copa corresponde a una resistencia cortante del suelo aproximada de  $1 \text{ g/cm}^2$ , por lo tanto, el límite líquido del suelo da el contenido de agua para el cual la resistencia cortante del suelo es aproximadamente  $25 \text{ g/cm}^2$  (Das, 2013).

El Límite Plástico (LP) se adquirió con el contenido de agua para el cual un rollito con la muestra de suelo se rompe en 3 partes al momento de lograr que tenga un diámetro de 3 mm y el Índice Plástico se calculó con la diferencia que hay entre estos dos límites.

Estos resultados se utilizaron para la identificación y clasificación del material.

### 3.1.3 Densidad relativa de los sólidos.

Se siguió el procedimiento del manual de la SICT M•MMP•1•05/03, con esta prueba es posible conocer la relación masa-volumen del suelo de muestreo respecto a la relación masa-volumen del agua. Con esto se estima los volúmenes ocupados por el suelo con distintos contenidos de agua y el cambio en la masa que tiene debido al agua llenando los vacíos del material, con relación a su fase seca.

### 3.1.4 Triaxial

Se realizó acorde la Norma ASTM D 2805, con este ensaye se determinó la resistencia a la compresión no drenada y no consolidada y la relación Esfuerzo-Deformación de un espécimen cilíndrico remoldeado o inalterado de suelo cohesivo. El espécimen se sometió a una presión de confinamiento de un fluido en la cámara triaxial. La prueba se llevó a cabo con 3 presiones de confinamiento diferentes que son: 0.3, 0.6 y 0.9 kg/cm<sup>2</sup>. Usando la Masa Volumétrica Seca Máxima y Contenido de Agua Óptimo para la elaboración de los especímenes utilizados.

### 3.1.5 Masa Volumétrica Seca Máxima y Contenido de Agua.

Para determinar la Masa Volumétrica Seca Máxima del material ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) y su Contenido de Agua Óptimo ( $w_o$ ), se siguió la metodología de compactación AASHTO del manual M•MMP•1•09/06, que reside en determinar las masas volumétricas secas del suelo compactado con variaciones en su contenido de agua, a través de la aplicación de la misma energía de compactación en prueba dinámica y se grafican los puntos correspondientes obtenidos para trazar la curva de compactación del material. La ordenada en el punto más alto de esta curva representa la Masa Volumétrica Seca Máxima ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) y la abscisa de ese punto, el contenido de agua óptimo ( $w_o$ ).

La prueba se clasifica en 4 variantes (A, B, C y D) dependiendo si el suelo pasa la malla No.4 o la malla  $\frac{3}{4}$  in. Debido a que el equipo LWD cuenta con una placa de 15 cm para realizar mediciones en laboratorio, se tiene que optar por una variante B o D para poder realizar la compactación en el molde de 154.4 mm de diámetro. En este caso al tener una Arena limosa (SM) y que más de la mitad de la fracción gruesa pasa la malla No.4 se eligió una variante B, por lo tanto, para la prueba se compactaron 5 capas de suelo con el pisón de 4.54 kg, dando 56 golpes por capa.

La energía de compactación es una variable del proceso que tiene una gran influencia sobre el resultado. al tener una energía mayor, la Masa Volumétrica Seca Máxima aumenta y el Contenido de Humedad Óptimo disminuye, el tener diferenciaciones en la energía implica la solución de problemas de campo, con el fin de obtener un estudio más completo, se realizó la prueba AASHTO de compactación con 3 distintas energías (Estándar, Modificada y una energía intermedia).

Al realizarse todas las pruebas en el molde compactación AASHTO Modificado, se realizó una equivalencia de la energía Estándar con la siguiente ecuación:

$$Ee = \frac{NnWh}{V} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

Ee= Energía específica

N= Número de golpes del pisón compactador que se da en cada capa.

n= número de capas que se dispone para llegar al molde.

h= altura de caída del pisón.

V= Volumen total del suelo compactado.

En la Tabla 5, se observan los pisones utilizados, el número de capas y los golpes calculados para alcanzar las energías de compactación.

Tabla 5. *Energías utilizadas en Prueba de compactación AASHTO.*

Energía kg.cm/cm <sup>3</sup>	Número de capas	Número de golpes	Masa del pisón	Altura de caída del pisón
<b>AASHTO Modificada 27.42</b>	5	56	4.54	45.7
<b>AASHTO Estándar 6.03</b>	4	42	2.5	30.5
<b>Energía Intermedia 16.725</b>	5	34	4.54	45.7

### 3.1.6 Cálculo de Módulo de Rigidez con LWD.

Antes de realizar los ensayos con los moldes incrementados, se definió  $E_{LWDobj}$  según el procedimiento escrito en la sección 2.2.6.2.1 en el inciso g. El resultado puede observarse en la Figura 42 del apartado 6.2.1 del capítulo de Anexos.

Una vez determinada la masa del molde con la fracción de suelo en la prueba de compactación AASHTO, antes de extraer el espécimen, se ejecutan las pruebas con el LWD y se obtiene el Módulo de Rigidez de Laboratorio ( $E_{LWDLab}$ ).

Para esto se siguió la metodología de laboratorio del manual M.MMP.1.16/20 explicada en la sección 2.5.2. Consiste en colocar el LWD sobre la placa de carga de 150 mm que se monta en la parte superior de la muestra en el molde AASHTO, en donde se sostiene el equipo de manera vertical y se aplican 6 impactos sobre la placa de carga (3 son de acondicionamiento) con la altura de caída de laboratorio (para obtener las deflexiones y la carga aplicada, esto en caso de ser un equipo con celda de carga; si no cuenta con esta, la fuerza se considera constante).

Se utilizaron 5 alturas de caída diferentes con el propósito de monitorear la dependencia de los esfuerzos e interpolarlos y/o extrapolarlos para igualar las presiones obtenidas en el plato de campo. Se hizo la toma de medidas con el LWD ZORN con las alturas de 45.25 mm, 90.5

mm, 181 mm, 362 mm y 724 mm, para alcanzar las fuerzas de 1.76 kN, 2.5 kN, 3.5 kN, 5 kN y 7.07 kN.

Como el equipo ZORN no cuenta con celda de carga, se calculó manualmente el Módulo de Rigidez con la siguiente fórmula, derivada de la teoría de elasticidad para un cilindro de material elástico con el movimiento lateral restringido:

$$E_{LWDLab} = \left[ \left( 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \frac{4H}{\pi D^2} k \right) \right] \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

$E_{LWDLab}$  = Módulo de rigidez de laboratorio obtenido del espécimen del suelo con el equipo LWD (MPa).

$\nu$  = Coeficiente de Poisson según el tipo de suelo de acuerdo con la Tabla 3 (este coeficiente puede variar entre 0 a 0.5).

H = Altura del molde (mm).

D = Diámetro de la placa de carga (mm).

K = Rigidez del suelo obtenida en el inciso e). (N/mm).

Posteriormente, se obtuvo el Módulo de Rigidez Objetivo para cada prueba de compactación, graficando los puntos del Módulo de Rigidez de Laboratorio contra el contenido de agua (%) para cada prueba. En el eje de las ordenadas se grafica el Módulo de Rigidez (MPa) y la Masa Volumétrica Seca Máxima ( $\text{kg/m}^3$ ) simultáneamente para realizar la curva de compactación. Se dibujó una línea vertical que pasa por  $\Upsilon_{dMáx}$  y  $W_o$  hasta que intercepta con la curva del Módulo de Rigidez, a partir de este punto, se trazó una línea horizontal que intercepta a la ordenada de Módulo de Rigidez, ahí se localiza el Módulo de Rigidez Objetivo de Laboratorio ( $E_{Obj}$ ).

### **3.2 Programa experimental de compactación, comparación de los diferentes Módulos de LWD con incremento en las dimensiones de molde de compactación AASHTO.**

En los trabajos de investigación relacionados con el uso del LWD, se estudia poco los resultados de laboratorio y se encuentran discrepancias con las lecturas de campo, por lo que

no ha sido posible encontrar directamente un grado de compactación con el LWD para el apoyo en la verificación de la calidad de la compactación en campo.

En las pruebas de laboratorio con el LWD, la suposición estándar de espacio semi-infinito comúnmente utilizado para calcular los valores de módulo durante las pruebas de LWD en campo es inválida. Se utiliza una ecuación basada en la teoría de elasticidad para un cilindro con material elástico con movimiento lateral restringido; impuesto por la rigidez del molde de compactación.

Al incrementar las dimensiones del molde de compactación, se busca asemejar las condiciones de campo a las de laboratorio, y poder contar con una mejor relación entre resultados. Por lo que se tomó como base el molde utilizado en compactación AASHTO, y se optó por incrementar las dimensiones del molde AASHTO y estudiar los resultados obtenidos.

Las dimensiones del molde (Tabla 6) fueron seleccionadas de tal manera que se mantuviera la misma relación diámetro-altura que tiene el molde original ( $D/H=1.2$ ).

Por cuestión de disponibilidad y tiempo, el material utilizado para la construcción de los moldes fue PVC Sanitario, ya que este es más rígido que un PVC convencional y ayudaría a que no haya deformación en el molde al momento de realizar la compactación.

Tabla 6. *Diámetros y Alturas de los moldes de PVC Sanitario.*

Diámetro (in)	Altura (cm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )
6	11.64	2, 123.31
10	19.55	8,715.70
12	23.60	16,515.45

### 3.2.1 Elaboración de moldes de compactación.

Para replicar el molde de compactación AASHTO, se elaboró una base con madera de pino por su resistencia a la humedad. Los tubos de PVC se cortaron con las dimensiones mencionadas anteriormente, para enrasar el material como lo indica la normativa de

compactación AASHTO, se elaboró una extensión o collarín para el molde de 10 cm de alto con diámetro interior igual al del cilindro. Para lograrlo se desgastó una pequeña parte de ambos tubos para que pudieran embonar, y de esta manera conseguir que la extensión pudiera ser desmontable.

El molde AASHTO cuenta con pasadores soldados en el collarín y en el cilindro para sujetarse a la base e impedir el movimiento al momento de realizar el ensayo.

Se tuvieron dificultades al momento de construir el molde, debido a que el material utilizado para su elaboración es PVC y no se podían soldar los pasadores como en el modelo original. Se realizaron distintas pruebas y prototipos para lograr la estructura del molde final (Figura 17), al no estar sujeto el cilindro completamente se obtenía un espécimen con un volumen irregular, debido a que existía movimiento vertical y horizontal al momento de realizar la compactación.



Figura 17. *Prototipos previos al molde final y sus irregularidades.*

En el molde final utilizado, para evitar el movimiento del molde al momento de realizar la compactación se idearon dos pasadores con solera de 3/8 in removibles (ver Figura 18) y se colocaron a los lados de la parte superior del collarín para ayudar a sujetar el molde a la base. Los pasadores cuentan con dos agujeros que logran el ensamblaje con dos espárragos de 3/8

in que se atornillaron y se fijaron a la base de madera con tuercas. Para ejercer presión y frenar el movimiento se colocó una mariposa en la parte superior de la solera (ver Figura 19), de esta manera, se aseguró completamente que el molde no se desplazara al momento de generar vibración con el compactador y poder obtener un cilindro regular al momento de realizar las pruebas.

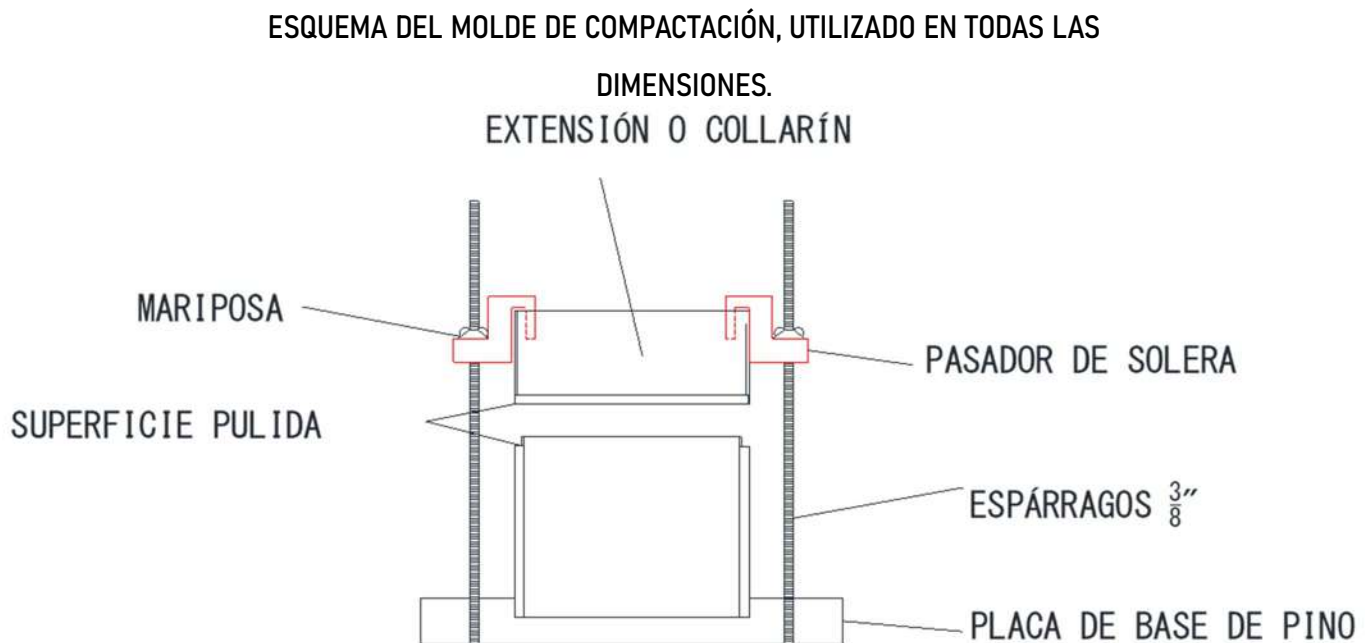


Figura 18. *Esquema de Molde de Compactación utilizado en todos los tamaños de molde.*



Figura 19. Moldes de compactación: (A) 12 in de diámetro y altura de 23.60 cm y (B) 10 in de diámetro y altura de 19.55 cm.

### 3.2.2 Compactador.

Recordando que, en las pruebas de compactación realizadas para determinar la masa volumétrica seca máxima y el contenido de agua, se realizó la compactación conforme al manual de compactación AASHTO M•MMP•1•09/06, se utilizó el molde con variante B y el pisón más grande de 4.54 kg.

Para los moldes con dimensiones incrementadas se realizaron pruebas piloto ejecutando la compactación con el mismo pisón utilizado previamente de 4.54 kg (Figura 20). Pero al tener volúmenes más grandes, la compactación se dificultó y resultó complicada y tardada ya que, el pisón no cuenta con suficiente área de contacto y la energía producida no era suficiente para lograr una compactación idónea. Debido a que la compactación era difícil y tardada, se decidió diseñar y elaborar un compactador especial para realizar los ensayos de los moldes más grandes.



Figura 20. *Prueba piloto en molde de 10 in con pisón de 4.54 kg.*

Para incrementar la energía de compactación y replicar la compactación realizada en campo, se optó por compactar de manera vibratoria utilizando un rotomartillo demoledor de 10 kg marca BOSH GSH 11. Su energía de impacto es de 16.8 J y cuenta con una broca universal SDS MAX, esta broca es más resistente y es utilizada en trabajos pesados lo cual asegura la resistencia en la compactación. Este tipo de compactación hace alusión a la que se utiliza para compactar especímenes para correr la prueba de módulo de resiliencia especificada en la normas AASHTO T 307-99 (2017).

Con el fin de incrementar el área de contacto y que la compactación pudiera ser uniforme, se utilizó una placa de acero de 15 cm de diámetro de 1 in de espesor. La cual se soldó con pestañas de acero al cincel SD MAX del rotomartillo y se pintó para evitar la corrosión del acero al contacto con el suelo húmedo (Figura 21).



Figura 21. *Compactador diseñado y construido para ensayo con rotomartillo BOSH de 10 kg y placa de  $\varnothing$  de 15 cm.*

### 3.2.3 Cálculo de material requerido.

En las pruebas de compactación realizadas en los moldes aumentados a 1.5 veces AASHTO y 2.0 veces AASHTO, se buscó lograr un grado de compactación de 90, 95 y 100%. Por lo que se necesitaba alcanzar valores objetivos de  $\Upsilon_{dMÁX}$  y  $w_o$ . Para esto se realizó un cálculo previo de cuánto material y cuánta agua se necesitaría en las pruebas para conseguir estos grados de compactación.

Se realizó el cálculo del material requerido, basándose en cálculos de relaciones gravimétricas del suelo, también se tomó en cuenta el contenido de agua que tenía el suelo en ese momento. Las fórmulas utilizadas fueron las siguientes:

$$W_{Ym} = (V)(Y_{dMAX})(\% \text{ de Compactación}) \left( \frac{W_o - W}{100} + 1 \right) \quad \text{Ecuación 16}$$

$$W_{Yd} = \frac{W_{Ym}}{(W_o - W)} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

$W_{Ym}$  = Peso del material húmedo (gr)

$Y_{dMAX}$  = Masa Volumétrica Seca Máxima (gr/cm<sup>3</sup>)

$W_o$  = Contenido Óptimo de agua (%)

$W_a$  = Contenido de agua actual (%)

$V$  = Volumen (cm<sup>3</sup>)

$W_{Yd}$  = Peso del material seco requerido para el ensayo (gr)

### 3.2.4 Equipo LWD.

Hay una variedad de equipos LWD disponibles, por cuestión de disponibilidad y evitar variabilidad en los resultados para este estudio se decidió utilizar el equipo ZORN 3000. Además, de ser el equipo disponible para esta investigación.

### 3.2.5 Variación de altura de caída.

El equipo LWD no cuenta con un dispositivo ajustable para variar la altura de impacto, por lo que se colocó un bastón de madera entre la masa de caída y el resorte del LWD, para reducir la altura de caída y poder incrementar los esfuerzos. En la Tabla 7 se muestran las alturas de caída con su correspondiente fuerza aplicada en cada impacto y esfuerzo para el caso de la placa de 30 cm de diámetro.

Variar la altura de caída, ayuda a conocer la dependencia de los esfuerzos del módulo del LWD y poder igualar los módulos obtenidos en las pruebas de campo.

Tabla 7. *Altura de caída, fuerza y esfuerzo definido para las pruebas con LWD.*

Altura de caída (mm)	Fuerza (kN)	Esfuerzo (MPa)
45.25	1.77	0.025
90.5	2.5	0.035
181	3.54	0.050
362	5.0	0.071
724	7.07	0.1

### 3.2.6 Contenido de agua y porcentaje de compactación.

Se determinó la cantidad de agua necesaria en cada prueba una, vez que se realizó el cálculo del material requerido de la manera siguiente:

$$w = W_{\gamma d} - W_{\gamma m} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

w= Contenido de agua en gr o ml de agua necesaria para el ensayo. (gr)

$W_{\gamma d}$ = Peso del material seco requerido para el ensayo (gr)

$W_{\gamma m}$ = Peso del material húmedo (gr)

El contenido de agua elegido fue el apropiado para que las pruebas alcanzaran un porcentaje de compactación del 90, 95 y 100%. Adicionalmente, se realizó una prueba con menor cantidad de agua para estudiar el efecto que ésta tendría.

### 3.2.7 Procedimiento de ensayo para obtener Módulo de Rigidez de laboratorio con LWD en moldes de compactación fabricados.

Una vez calculada la cantidad de material seco, con el procedimiento explicado en la sección 3.2.3, se incorpora la cantidad de agua necesaria para alcanzar el contenido de agua óptimo,

necesario para conseguir el porcentaje de compactación deseado. Posteriormente, se mezcló el material y se deshicieron los grumos hasta que el suelo se encontró totalmente homogeneizado.

Se dividió la mezcla en 5 partes iguales para el molde de 10 in y en 10 partes equivalentes para el molde de 12 in. Al realizar las pruebas era difícil compactar con este número de capas, ya que la energía de compactación producida con el rotomartillo no era suficiente para lograr el objetivo.

Al no tener otro compactador disponible para aumentar la presión ejercida en la compactación, se decidió por incrementar el número de capas para disminuir el espesor de éstas y la compactación fuera más simple. Las pruebas posteriores se realizaron con 7 capas en el molde de 10 in y 12 capas en el molde de 12 in. Se marcó el molde con la altura a la que tenía que llegar la capa compactada.

Se colocó la muestra preparada en el molde evitando el derrame de material. Posteriormente, se insertó el rotomartillo con el aditamento del compactador en el molde, cuidando que se encontrara de manera vertical al momento de realizar la compactación. El material se compactó por medio de la vibración provocada por el rotomartillo y se repartieron uniformemente los impactos en la capa. Esto requirió retirar y colocar el compactador varias veces para dominar técnica y tener un tiempo de compactación adecuado.

La compactación se realizó hasta llegar a la marca en el tubo con la altura de cada capa. En el proceso se verificaba el espesor de cada capa (ver Figura 22 inciso c) para evitar la sobrecompactación y poder alcanzar la masa volumétrica deseada.

Antes de continuar la compactación en una nueva capa, se escarificó ligeramente la parte superior de la capa anterior y se repitió el procedimiento en las capas posteriores.

Al terminar la compactación de todas las capas se retiraba el collarín o extensión del molde y se verificaba que el material no sobresaliera del tubo en un grosor de 1.5 cm como límite, como lo indica el manual M.MMP.1.09. De no ser así, la prueba tendría que haberse repetido. Al no sobrepasarse ese espesor en los ensayos, se procedió a enrasar el material ya que, la última capa debe tener una superficie horizontal plana para colocar el LWD y poder realizar las pruebas.

En seguida se determinó la masa del molde con el espécimen de suelo compactado.

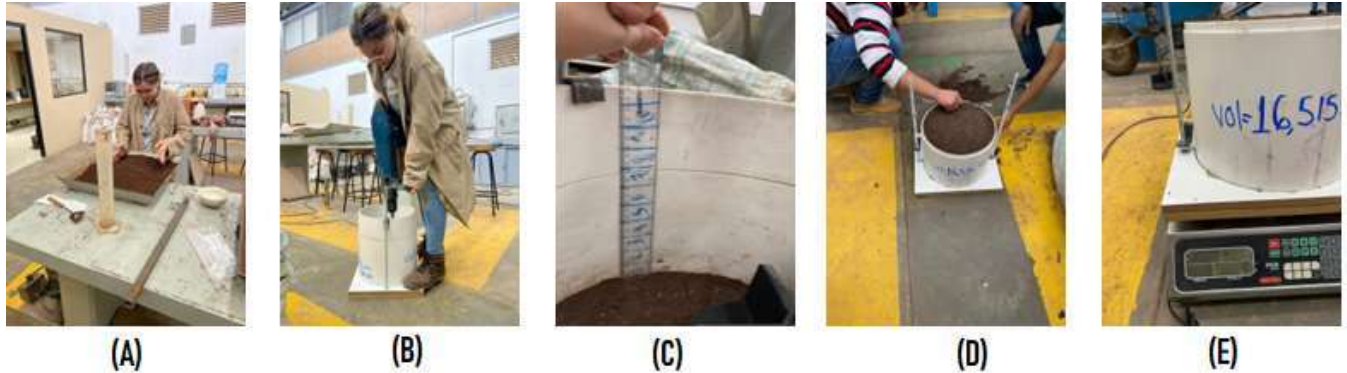


Figura 22. Procedimiento de compactación en el ensayo: (A) Homogenización del material. (B) Compactación en molde de 10 in. (C) Verificación del espesor de las capas. (D) Desmolde de collarín y enrase del suelo. (E) Medición de la masa del suelo con el molde.

Inmediatamente se colocó el molde en el piso de concreto hidráulico y se colocó la placa de carga de 150 mm del LWD en el centro del espécimen. Como la placa no era del mismo tamaño del molde, se colocaron 4 trozos de madera (ver Figura 23 inciso A), con largo suficiente para restringir el desplazamiento lateral que pudiera darse en la placa con los impactos del equipo.

Para asegurar que la placa estuviera asentada en la muestra se realizaron movimientos circulares hacia adelante y hacia atrás con la placa de carga, de aproximadamente de 45°.

Después de asegurar que el vástago del LWD se encontrara totalmente vertical con la burbuja de nivel con la que cuenta el equipo ZORN, se aplicaron 6 golpes de impacto para cada altura de caída (Tabla 7). Comenzando desde la menor altura/esfuerzo e incrementando las elevaciones de caída.

Se aplicaron tres golpes de acondicionamiento, seguidos de 3 golpes de medición de la deflexión soltando el bastón de madera que se colocó entre la masa de caída y el buffer del LWD con la altura de caída reducida, permitiendo que la masa de impacto caiga con libertad sin movimientos laterales hasta llegar al buffer. Los últimos 6 impactos se realizaron con la altura de caída completa del LWD.

Se efectuaron 30 golpes en total para cada espécimen, para evaluar la dependencia de los esfuerzos del material y poder interpolar o extrapolar los valores de Módulo de Rigidez tomados en laboratorio ( $E_{LWDLab}$ ) para igualarlos con el Módulo de Rigidez que se toma en campo.

Durante la prueba, se comprobaba que el resultado de cada impacto fuera un impulso de carga semi sinusoidal o en forma de Haversiana, con un tiempo de carga de entre 20 y 40 ms, esto se verificaba imprimiendo los resultados. También se inspeccionaba que los resultados de la deflexión no variaran entre sí  $\pm$  del 3%, de ser así se repetían los 6 impactos como lo indica la norma ASTM E2583.

Las deflexiones en el equipo ZORN se guardan en una memoria SD, también se imprimían los resultados de los ensayos para su registro. Los resultados se exportaban a una hoja de Excel para calcular  $E_{LWDLab}$  y para futuro procesamiento.

Al finalizar las pruebas se retiraba el suelo del molde y se tomaban muestras representativas del centro. Estas se pesaban y se introducían en un horno eléctrico con la temperatura constante de 105° para calcular su contenido de agua. El material sobrante era desechado.

Para el molde de 12 in se repitió el mismo procedimiento, pero adicionalmente se realizaron pruebas con la placa de 300 mm de diámetro realizando las pruebas sobre superficie de concreto ( Figura 23 inciso b) y sobre suelo sin compactar; para estudiar el efecto de las capas subsecuentes (Figura 23 inciso c). Se efectuaron 6 golpes para cada altura de caída con esta placa, teniendo un total de 30 impactos, sumando 60 impactos con ambas placas de carga.

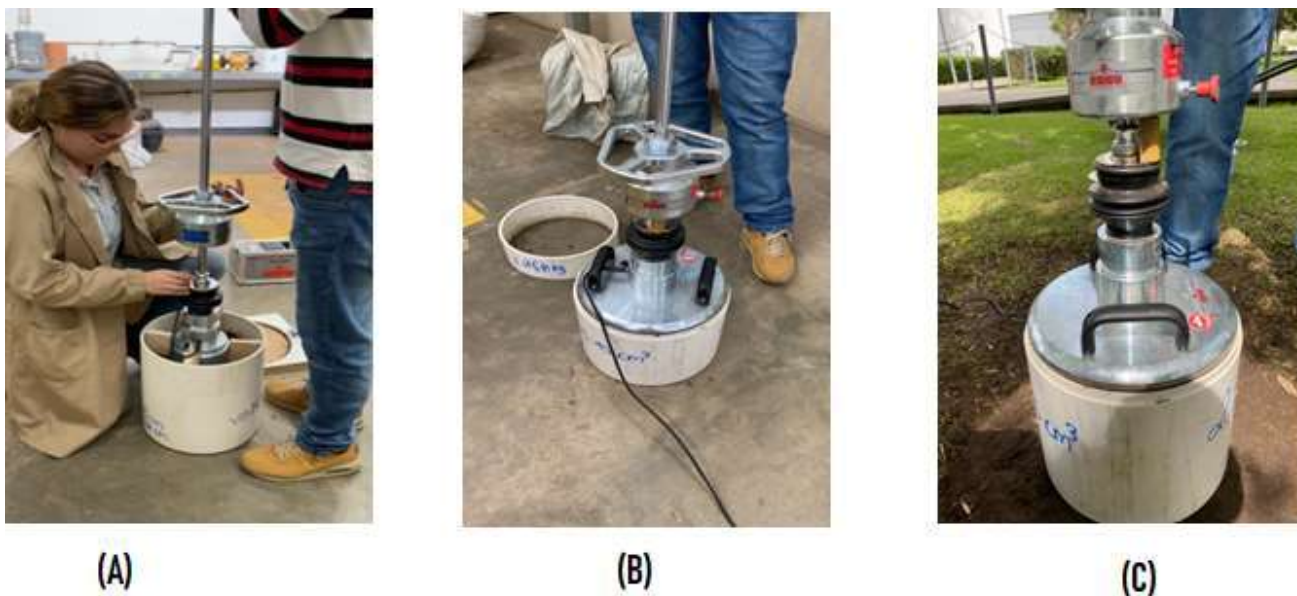


Figura 23. Pruebas con el LWD en moldes de distintos tamaños; (A) colocación de molde en superficie de concreto con plato de carga de 150 mm y LWD colocado en la parte superior del molde para realizar los impactos (B) colocación de molde en superficie de concreto con plato de carga de 300 mm en molde de 12 in de diámetro y LWD colocado en la parte superior del molde para realizar los impactos (C) colocación de molde en superficie de suelo sin compactar con plato de carga de 300 mm en molde de 12 in de diámetro y LWD colocado en la parte superior del molde para realizar los impactos.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 Pruebas de caracterización de suelo.

Recordando que el tipo de suelo es un factor que afecta directamente los resultados de las mediciones del LWD, por lo que la identificación es de gran importancia.

La estructura de un pavimento se compone de diferentes capas: La superficie de rodamiento, una capa de base y una capa de subbase. Estas dos generalmente están compuestas de suelo granular, estas capas reposan sobre una capa de suelo compactado llamada subrasante. Antes de la capa subrasante existen los terraplenes, que son estructuras que se montan para alcanzar el nivel de la rasante.

Conocer la caracterización del suelo y los parámetros físicos del material también sirve para establecer según la Normativa para la Infraestructura del Transporte (NIT), en que capa que conforma el pavimento podemos utilizar el suelo.

En la Tabla 8 se muestra el resumen de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas de la caracterización física y mecánica. En el Anexo se pueden encontrar los gráficos y cálculos realizados en cada ensayo.

Tabla 8. Resumen de las pruebas de parámetros del Suelo.

Parámetros del Suelo Estudiado	
Clasificación del Suelo S.U.C.S	SM, Arena limosa (Mezcla de arenas y limo)
Límite Líquido, LL (%)	42
Límite Plástico, LP (%)	27
Contracción Lineal, CL (%)	9.26
Contracción Volumétrica, CV (%)	2.6

Masa Volumétrica Seca Máxima, $\gamma_{d_{máx}}$ Estándar(g/cm <sup>3</sup> )	1.69
Contenido de agua óptimo, energía Estándar (%):	17.60
Masa Volumétrica Seca Máxima, $\gamma_{d_{máx}}$ . Energía Modificada (g/cm <sup>3</sup> )	1.86
Contenido de agua óptimo Modificado (%):	13.60
Densidad de Sólidos, S <sub>s</sub>	2.81
Ángulo de Fricción, $\phi$ (°)	29
Cohesión, c (kg/cm <sup>2</sup> )	0.30

De acuerdo con la Tabla 1 referente a requisitos de calidad para terraplén de la normativa N.CMT.1.01/21, este material cumple para ser utilizado como un terraplén

#### 4.2 Pruebas con el LWD en molde AASHTO con dimensiones incrementadas.

En la Tabla 9, se muestra un resumen de los resultados obtenidos en las pruebas de compactación con el molde 1.5 AASHTO (10 in) y el molde 2.0 AASHTO (12 in) comparándolos con el resultado obtenido de la prueba de compactación AASHTO.

Tabla 9. Resumen de compactaciones con molde AASHTO incrementado.

MOLDE	MATERIAL	$\gamma_a$ (g/m <sup>3</sup> )	W (%)	Grado de compactación (%)
1.0 AASHTO	ACERO	1.696	17.60	100
1.5 AASHTO	PVC	1.535	16.57	90.52
		1.641	16.69	96.77
		1.69	16.70	99.66

2.0 AASHTO	PVC	1.576	17.9	92.9
		1.602	17.2	94.48
		1.69	16.8	99.51

Para un análisis más completo de los resultados, estos se dividieron en distintos efectos: efecto de porcentaje de compactación, de contenido de agua, de la placa de carga y de superficie de contacto.

#### 4.2.1 Resultados del efecto del porcentaje de compactación.

Se compactó con tres distintos porcentajes de compactación en relación con su M.V.S.M. y su contenido de agua óptimo: 90%, 95% y 100% del porcentaje de compactación con una tolerancia del  $\pm 2\%$ .

En la Figura 24 se observa una comparativa de los resultados de las compactaciones con el molde 1.5 AASHTO en relación con el molde 1.0 AASHTO al 100% de su compactación. En la ordenada se tiene el esfuerzo en (MPa) vs.  $E_{LWDLab}$  (MPa) obtenido con la placa de carga de 150 mm.

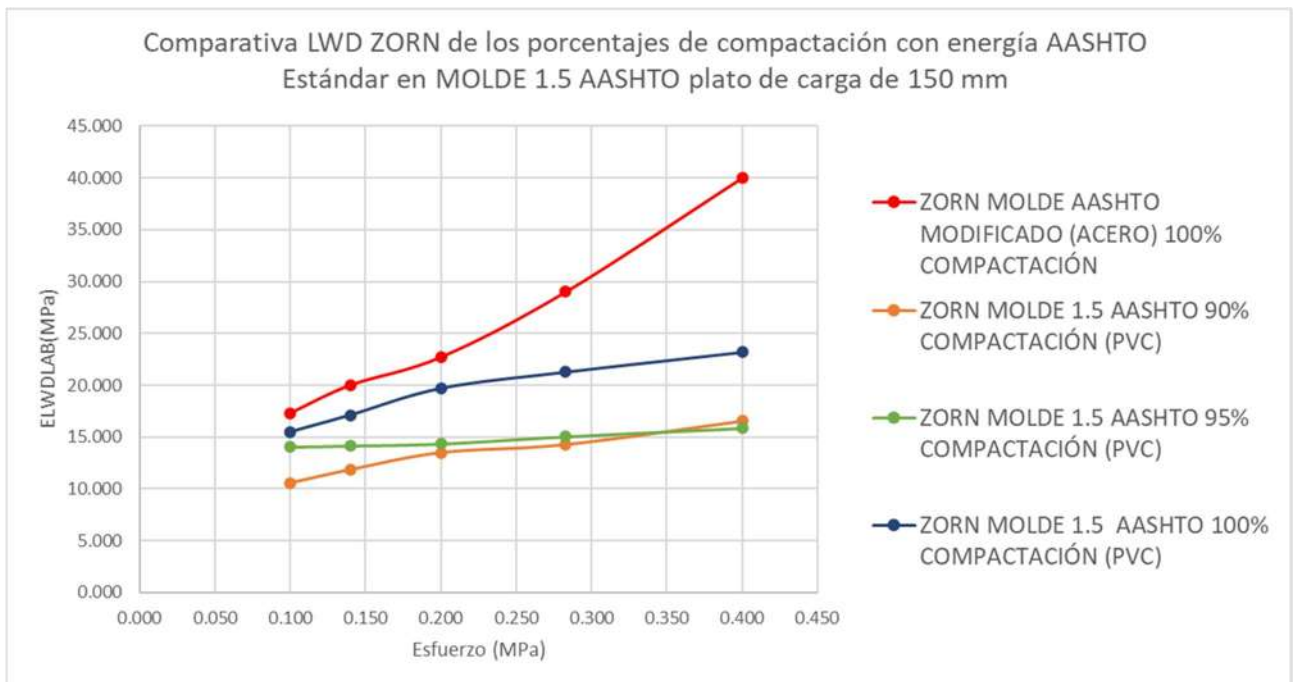


Figura 24. Resumen de resultados obtenidos con el molde 1.5 AASHTO con placa de 150 mm.

En las tres compactaciones se puede observar un comportamiento similar, conforme el esfuerzo va incrementando, el módulo de rigidez también incrementa. Y entre menor es el porcentaje de compactación, menor es el módulo de rigidez.

En los tres porcentajes de compactación (90, 95 y 100), los módulos de rigidez calculados con el molde fabricado de 1.5 AASHTO con el LWD fueron menores que los módulos obtenidos con el molde 1.0 AASHTO al 100% de compactación. En la Tabla 10 se presentan los porcentajes de variación entre módulos cuando el esfuerzo es de 0.1 MPa (esfuerzo alcanzado en campo con el LWD).

El resultado más cercano entre moldes fue el de la compactación al 100% con una diferencia del 5.90%. Sin embargo, en todos los casos se obtuvo un módulo más alto con el molde utilizado convencionalmente y no se cumplió la hipótesis planteada. Lo que llevó a la conclusión que se necesitaba realizar ensayos en un molde con dimensiones más grandes, pudiendo tener un resultado más bajo debido a la diferencia de material entre moldes y el confinamiento que se genera en éstos ya que, se esperaba un resultado más alto en el molde 1.5 AASHTO, se explicará esto con más detalle en la sección 4.2.5.

Tabla 10. Porcentaje de Variación en los Módulos de Rigidez en el esfuerzo 0.1 MPa del molde 1.5 AASHTO con respecto al molde 1.0 AASHTO

Grado de compactación (%)	Porcentaje de Variación (%)
90	55.24
95	16.74
100	5.90

En la Figura 25, se tiene la comparativa de los resultados de las compactaciones con el molde 2.0 AASHTO en relación con el molde 1.0 AASHTO al 100% de su compactación, en la ordenada se tiene el esfuerzo en (MPa) vs.  $E_{LWDLab}$  (MPa) con la placa de carga de 150 mm.

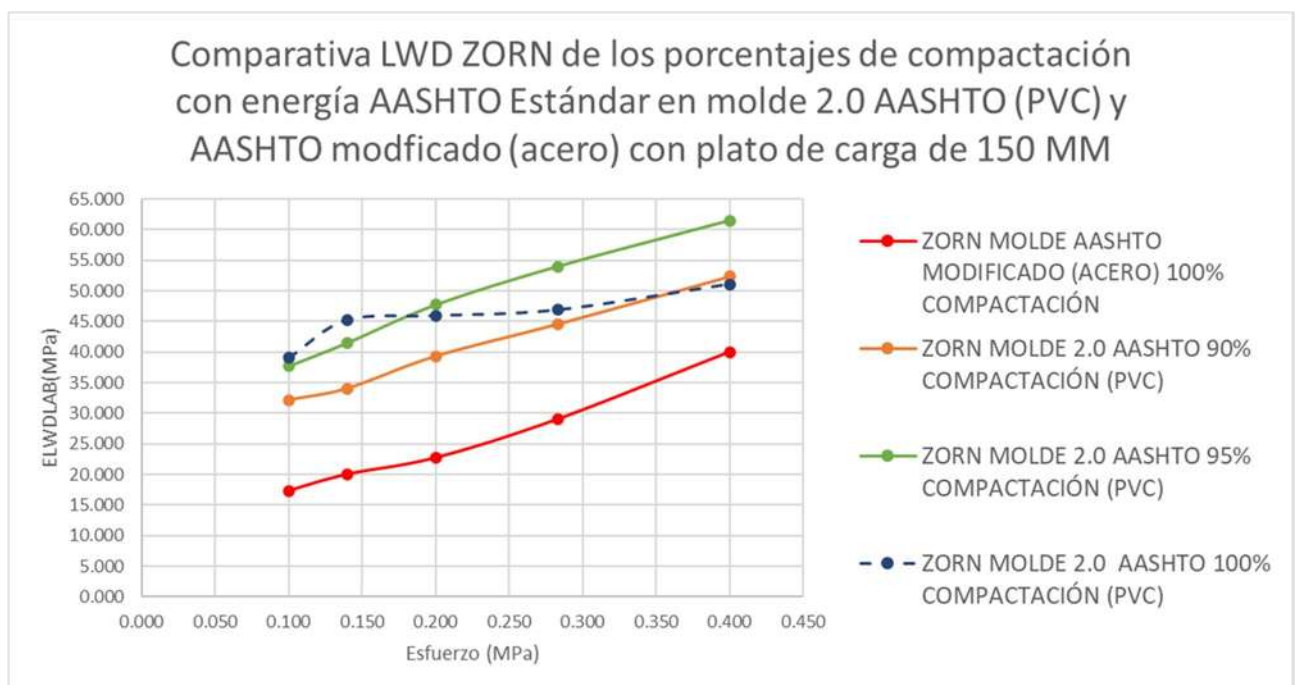


Figura 25. Comparativa de resultados obtenidos con el molde 2.0 AASHTO con placa de carga de 150 mm.

De manera contraria a lo ocurrido con el molde 1.5 AASHTO, en los tres grados de compactación el módulo de rigidez es más alto que el módulo de rigidez del molde 1.0 AASHTO. Con lo que podemos asumir que incrementar dos veces las dimensiones del molde de compactación en laboratorio permite acercarse al resultado de la suposición estándar de

espacio semi-infinito comúnmente utilizado para calcular los valores de módulo durante las pruebas de LWD en campo. La diferencia entre resultados es más pequeña conforme se va incrementando el esfuerzo.

En la Tabla 11 se observa el incremento de manera porcentual en los módulos con respecto al molde de compactación tradicional con la placa de carga de 150 mm, se aprecia que conforme aumenta el grado de compactación, el porcentaje de incremento es mayor.

Tabla 11. Porcentaje de incremento en los Módulos de Rigidez en el esfuerzo 0.1 MPa del molde 2.0 con respecto al molde 1.0 AASHTO con placa de carga de 150 mm.

Grado de compactación (%)	Porcentaje de Incremento (%)
90	185.64
95	221.82
100	275.93

Al ser tan pequeña la diferencia entre módulos de la compactación del 95 y 100 %, en ambos moldes se puede concluir que el equipo no tiene la sensibilidad suficiente para detectar la diferencia entre estas dos compactaciones. De igual manera, lograr especímenes con porcentaje de compactación arriba del 90% es complicado, debido a que es necesario compactar más de 10 capas con el rotomartillo y el tiempo de compactación es arriba de dos horas. Según normativa N.CMT.1.01/21 *de la SICT*, un material para terraplén debe conseguir una compactación de 90% ±2. Por lo que conseguir una compactación a este grado es suficiente.

Este molde es lo suficientemente grande para realizar ensayos con la placa de carga con 300 mm de diámetro. Una de las razones por las cuales se buscó incrementar las dimensiones del molde AASHTO era para poder probar la placa de 300 mm (placa utilizada en campo) en laboratorio y poder usar la  $E_{LWDCampo} = \frac{1.5R\sigma}{\delta} = \frac{22.5}{\delta}$

Ecuación 12 en ambos resultados, pero, aunque el molde era lo suficientemente grande para realizar ensayos con esta placa, aún no contaba con las dimensiones adecuadas para poder utilizar la suposición estándar de espacio semi-infinito, por lo que se decidió utilizar la

Ecuación 11) para los resultados de esta prueba.

En la Figura 24 podemos observar los resultados obtenidos con esta placa recargada sobre una superficie de concreto.

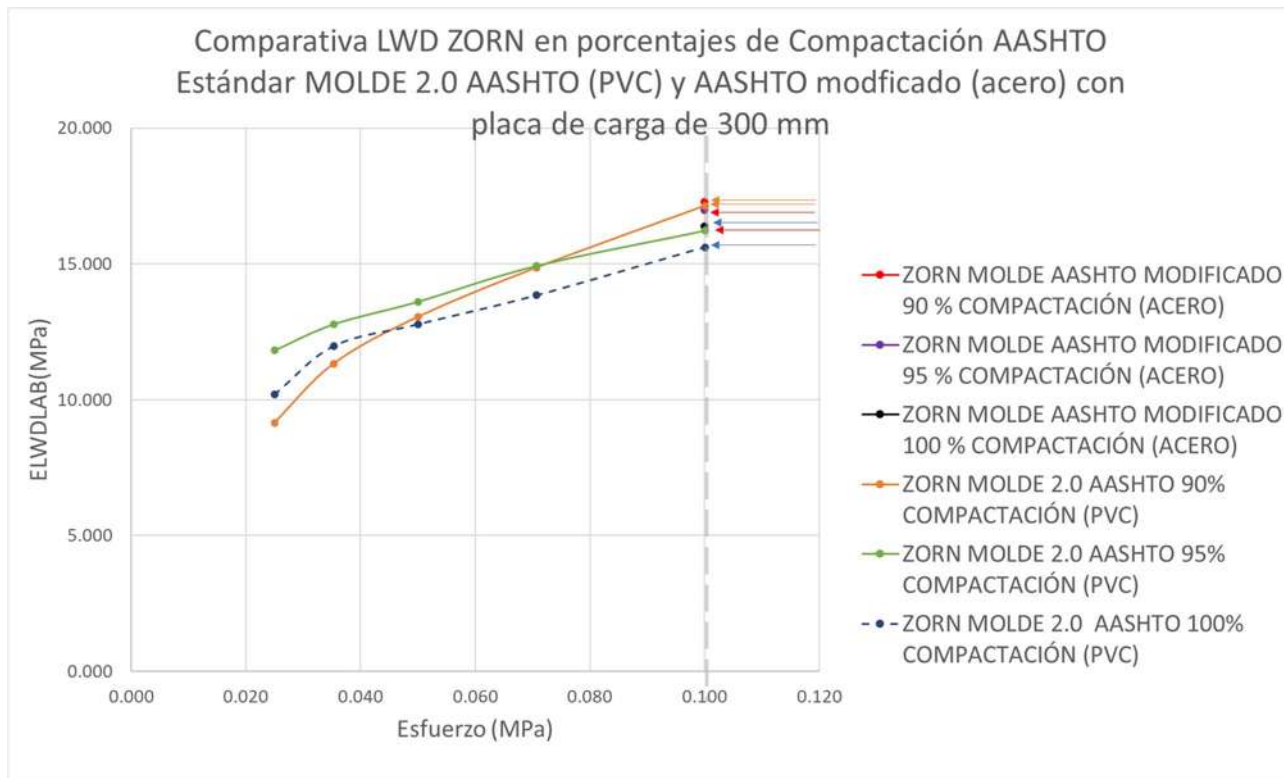


Figura 26. Resumen resultados molde 2.0 con placa de carga de 300 mm.

Como se incrementó el área de contacto al tener un diámetro más grande, los esfuerzos se tornan mucho más pequeños con la misma altura de caída utilizada. El esfuerzo máximo de 0.1 MPa se logra utilizando la altura de caída completa del LWD. El efecto que tiene realizar el ensayo con una placa de carga más grande se explicará más adelante en este capítulo.

Para realizar una comparativa con los resultados del molde 1.0 AASHTO, se tomaron solo los puntos obtenidos con el esfuerzo de 0.1 MPa, que es el único esfuerzo que comparten ambas placas de carga (Figura 26).

Podemos observar en la misma gráfica, que los resultados de 2.0 AASHTO van disminuyendo conforme se incrementa el grado de compactación. Si realizamos la comparativa de los resultados con el molde convencional (1.0 AASHTO), el módulo de rigidez del LWD está por debajo en las compactaciones de 95% y 100% (línea verde y azul

punteada) y la diferencia con el módulo objetivo va siendo más grande conforme incrementa el grado de compactación, por el lado contrario resultados obtenidos con la placa de 150 mm.

La diferencia entre módulos del molde 1.0 y 2.0 cuando el grado de compactación es del 95% es de 4.21%, cuando se tiene un grado de 100% de compactación es de un 0.98% y por último al 90% hay un incremento de un 104.51%.

En la Tabla 12, se tiene un resumen de los resultados obtenidos con la placa de carga de 150 mm con ambos moldes y en la Tabla 13 tenemos los resultados con la placa de carga de 300 mm recargada sobre concreto hidráulico y sobre suelo (jardín).

Tabla 12. *Comparación de resultados de porcentaje de compactación de LWD con placa de 150 mm colocado en superficie de concreto.*

Porcentaje de compactación (%)	Esfuerzo (MPa)	Módulo	Módulo
		$E_{LWDLab}$ MOLDE 1.5 AASHTO (MPa)	$E_{LWDLab}$ MOLDE 2.0 AASHTO (MPa)
90	0.1	10.56	32.12
	0.14	11.85	34.02
	0.20	13.51	39.27
	0.283	14.29	44.52
	0.4	14.05	37.71
95	0.1	14.16	41.54
	0.14	14.35	47.71
	0.20	15.04	53.97
	0.283	15.85	61.47
	0.4	14.05	68.96
100	0.1	15.49	43.81
	0.14	17.12	50.76
	0.20	19.70	51.25

	0.283	21.27	52.62
	0.4	23.18	57.31

Tabla 13. Comparación de resultados de porcentaje de compactación en molde 2.0 AASHTO LWD con placa de 300 mm colocado en superficie de concreto y suelo.

Porcentaje de compactación (%)	Esfuerzo (MPa)	Módulo $E_{LWDLab}$	Módulo $E_{LWDLab}$
		MOLDE 2.0 AASHTO concreto (MPa)	MOLDE 2.0 AASHTO suelo (MPa)
90	0.025	9.15	4.24
	0.035	11.33	4.27
	0.050	13.05	4.33
	0.071	14.87	4.54
	0.100	17.14	4.78
95	0.025	11.82	4.11
	0.035	12.78	4.00
	0.050	13.61	4.03
	0.071	14.94	4.11
	0.100	16.24	4.53
100	0.025	10.19	4.73
	0.035	11.98	4.54
	0.050	12.78	4.24
	0.071	13.85	3.84
	0.100	15.61	3.68

A pesar de que el molde 1.5 dio resultados más bajos que el molde convencional de acero, se puede confirmar la afirmación de Elhakim et al. (2014), que conforme aumenta el porcentaje de compactación, aumenta el módulo de rigidez medido con el LWD con la placa de 150 mm.

Según Duddu & Chennarapu (2022), el valor promedio del módulo de rigidez LWD de una arena limosa de 38.5 MPa, por lo tanto, los resultados obtenidos con el molde 2.0 AASHTO son cercanos al resultado que se obtendría en campo.

#### 4.2.2 Efecto contenido del agua.

Se realizaron ensayos al 90% de compactación con un contenido de agua más bajo que el necesario para llegar al contenido óptimo de agua. En la Tabla 14, se tiene un resumen de las masas volumétricas secas alcanzadas y el contenido de agua de cada espécimen, la prueba número uno es el espécimen con contenido de agua óptimo al 90% de compactación.

Tabla 14. *Resumen pruebas de efecto de contenido de agua.*

Prueba	MOLDE 1.5 AASHTO		MOLDE 2.0 AASHTO	
	1	2	1	2
Masa volumétrica seca (g/m <sup>3</sup> )	1.535	1.521	1.576	1.574
Contenido de agua (%)	16.57	13.491	17.92	14.159
Grado de compactación (%)	90.52	89.66	92.90	92.83

La Figura 27 muestra los resultados con el molde 1.5 AASHTO con la placa de carga de 150 mm, en la ordenada se tiene el esfuerzo en (MPa) vs.  $E_{LWD,lab}$  MPa. La gráfica es una comparativa entre la compactación al 90% con contenido de agua óptimo (roja) y con una menor cantidad de agua (azul). Se observa como el módulo de rigidez va en incremento conforme aumenta el esfuerzo, hay un aumento de un 297.62% en el módulo de rigidez con la disminución del contenido de agua.

En la Figura 28 se tiene la comparativa con el molde 2.0 AASHTO con placa de 150 mm. Se tiene un incremento en el módulo del 121.88%. Por último, en la Figura 29 se muestra la diferencia de módulos con el molde 2.0 AASHTO con placa de 300 mm, teniendo una ampliación en el módulo del 136.86 %.

Se puede notar, además, que la diferencia entre módulos fue más pequeña conforme aumentó la dimensión del molde. Sin embargo, en los tres casos se observa la tendencia al crecimiento del módulo cuando el espécimen tiene menos contenido de agua debido a que el material se vuelve más rígido.

**El contenido de agua en el espécimen es un elemento crucial que afecta directamente al módulo de rigidez medido con el LWD.** Por lo que tiene que ser tomado en cuenta al momento de realizar las pruebas tanto de laboratorio como en campo.

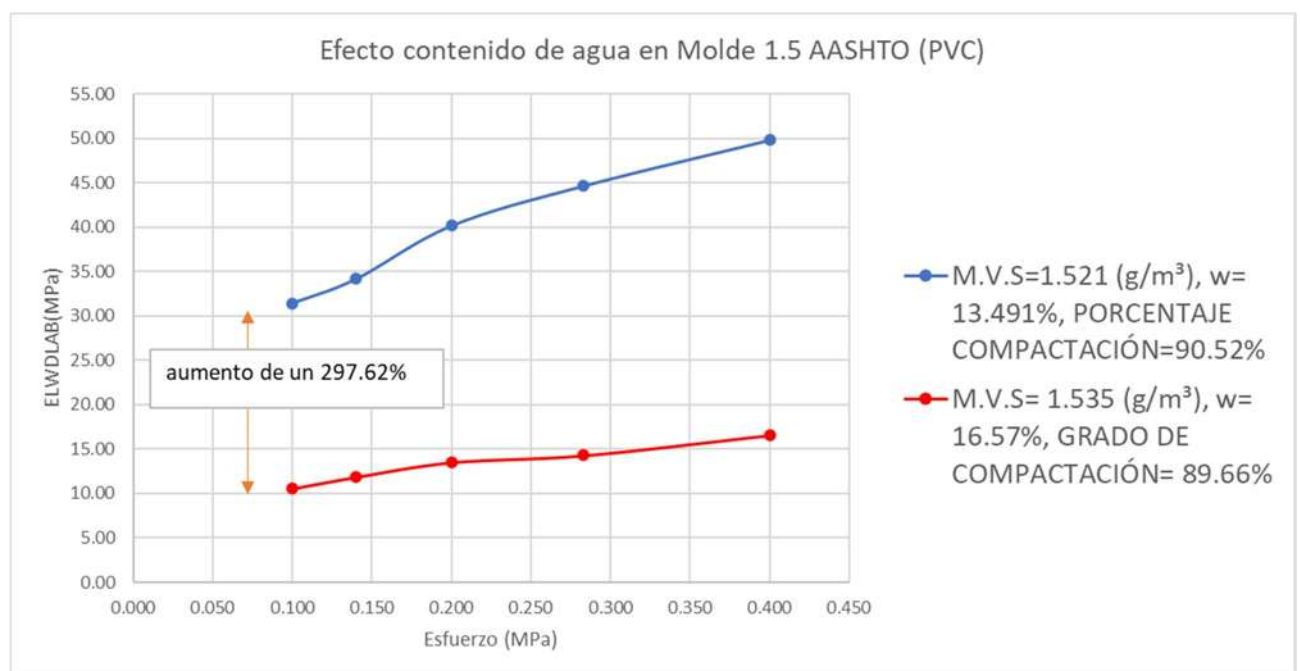


Figura 27. Efecto del contenido de agua en el molde 1.5 AASHTO compactado al 90%.

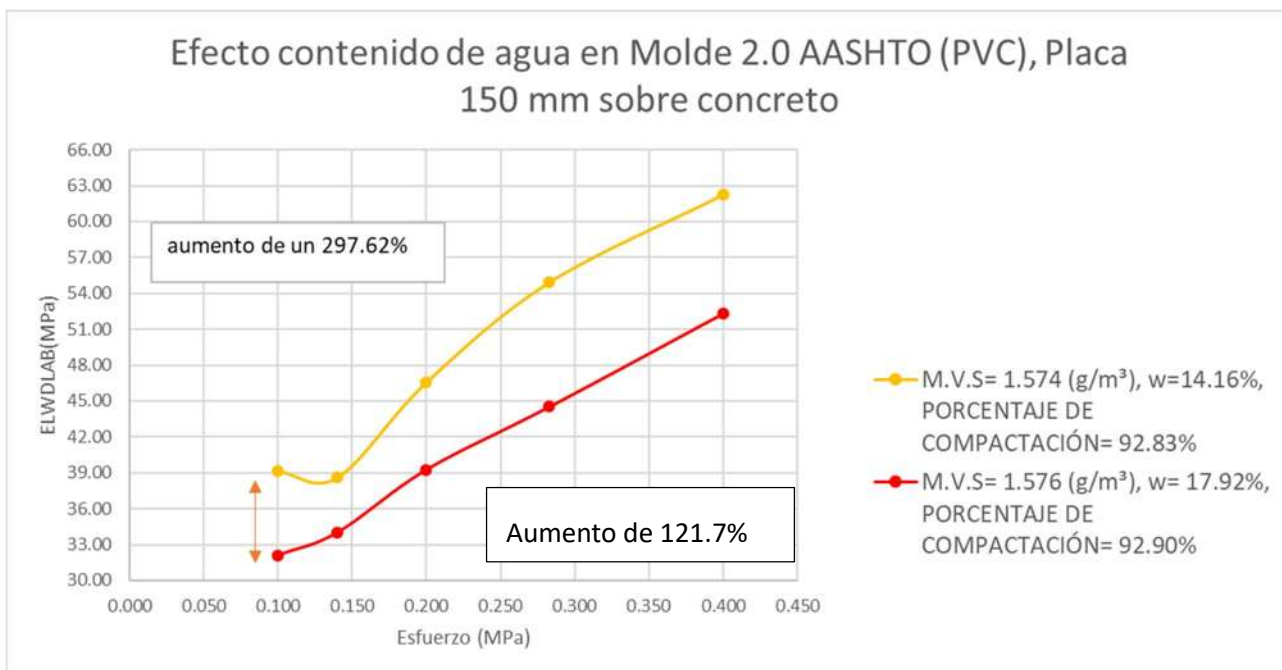


Figura 28. Efecto del contenido de agua en el molde 2.0 AASHTO compactado al 90% con placa de 150 mm.

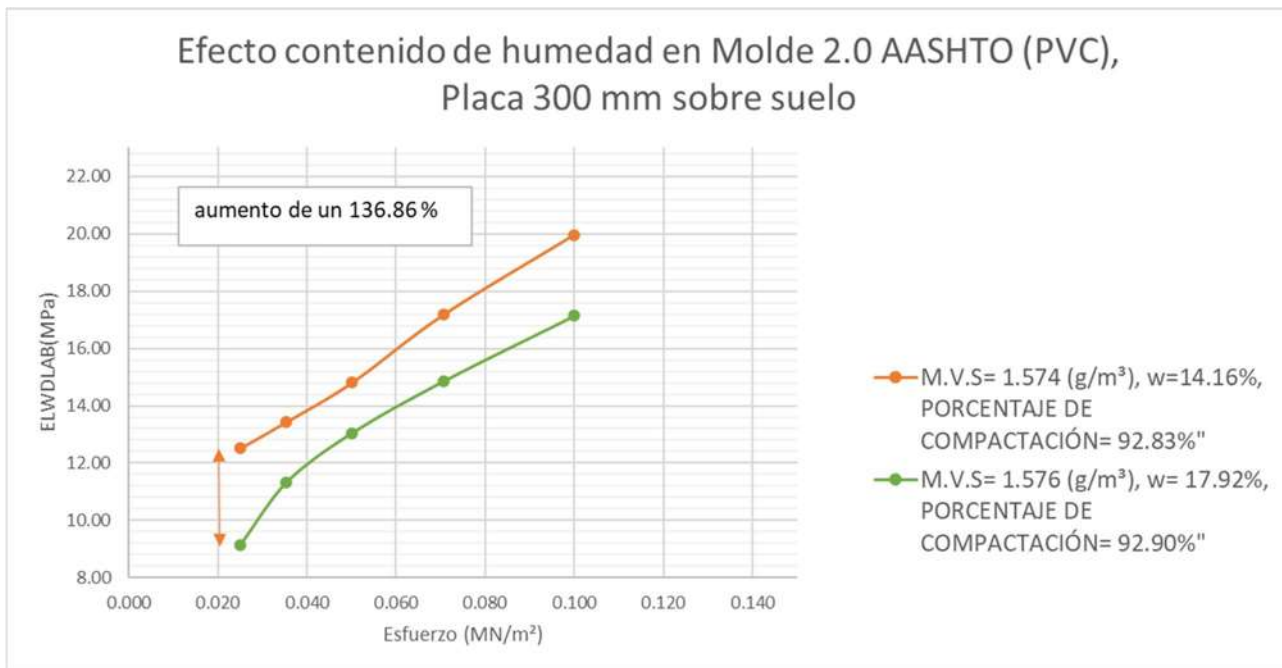


Figura 29. Efecto del contenido de agua en el molde 2.0 AASHTO compactado al 90% con placa de 300 mm.

### 4.2.3 Efecto del plato de carga.

Una variación que tiene el LWD es el plato de carga. Para evaluar el efecto que tiene el tamaño del plato de carga en las mediciones del dispositivo LWD, se midió el módulo en el molde 2.0 AASHTO con la placa de 150 mm y la placa de 300 mm con las distintas alturas de caída.

Al tener un área de contacto más grande en la placa de 300 mm, los esfuerzos se tornaron más pequeños que con la placa de 150 mm siendo el esfuerzo más grande 0.1 MPa, en comparación de la placa de 150 mm, que el esfuerzo más pequeño era el de 0.1 MPa. Por lo tanto, para tener el mismo punto de comparación, solo se tomaron los resultados del esfuerzo de 0.1 MPa en cada placa de carga.

En la Tabla 15 se tiene una comparativa de los resultados tomados con los tres distintos grados de compactación. En el eje de las ordenadas se observan los módulos de rigidez obtenidos con el LWD y en el eje de las abscisas el porcentaje de compactación, la barra amarilla es el resultado obtenido con la placa de 150 mm mientras la azul el resultado con la placa de 300 mm.

Los módulos más altos se obtuvieron con la placa de 150 mm en los tres casos, en la Tabla 15 se tienen las diferencias en porcentajes de cada grado de compactación. Con la placa de carga de 150 mm, el módulo de rigidez incrementa conforme incrementa el módulo de compactación, de manera contraria pasa con el plato de 300 mm conforme aumenta el grado de compactación el módulo disminuye.

Tabla 15. Diferencia en porcentaje de los de Módulos de Rigidez entre placa de 150 mm y 300 mm en molde 2.0 AASHTO.

Grado de compactación (%)	Diferencia de Módulos (%)
90	87.40
95	132.20
100	150

A comparación de la investigación de Afsharikia (2018), donde no encontró correlación entre el plato de carga utilizando la fórmula  $E_{LWDCampo} = \left[ \frac{2k(1-\nu^2)}{AR} \right]$  Ecuación

13, en esta investigación puede concluirse que, si tiene efecto en las mediciones cuando son

f

o

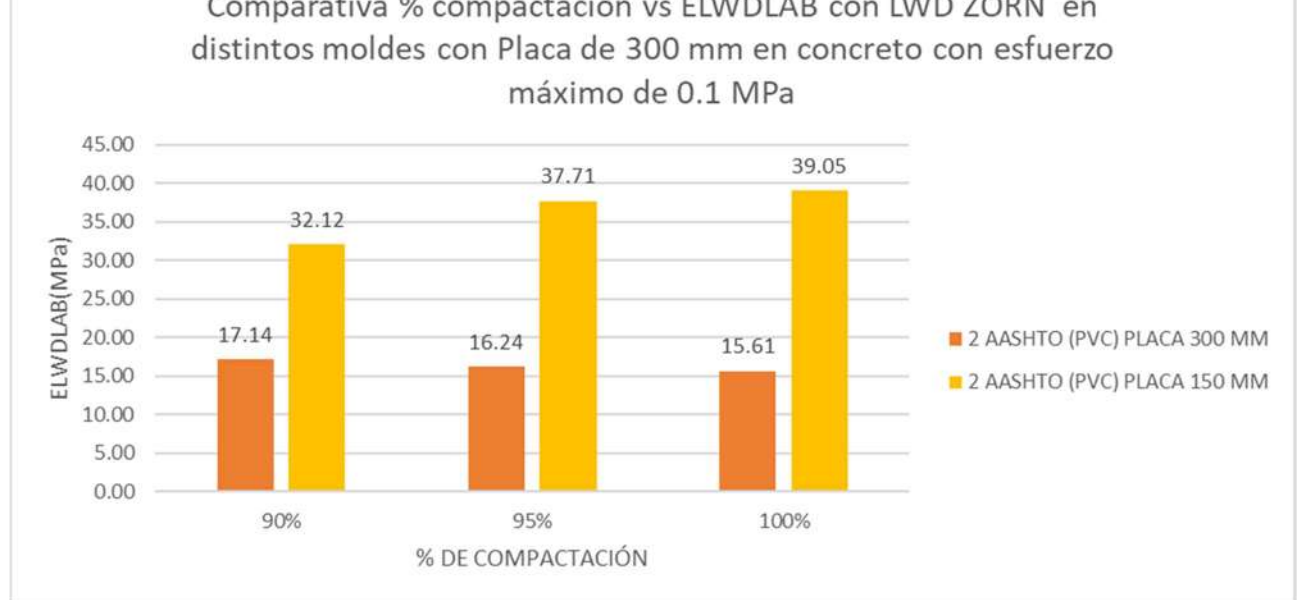


Figura 30. Comparativa de Módulos de Rigidez en placa de 150 mm y 300 mm

a

**El diámetro del plato de carga es un factor que, si tiene influencia, debido a que afecta la profundidad de influencia de la medición.** Entre más pequeño sea el diámetro de placa de carga mayor será el módulo de rigidez ya que, hay un incremento de esfuerzos debido al área de contacto del impacto del equipo.

F

Un punto por considerar es que el plato de carga de 300 mm llegaba al límite del molde. Por lo que a veces se podía despegarse de la superficie. Para esto es necesario realizar más pruebas en un molde con dimensiones más grandes, para poder utilizar los trozos de madera como restricción, tal y como se hizo con la placa de 150 mm para evitar su movimiento.

e

f

1

#### 4.2.4 Efecto de superficie de contacto.

El efecto de la superficie de contacto se investigó realizando ensayos del LWD con el molde 2.0 AASHTO, sobre una superficie de concreto rígida y colocado sobre suelo sin compactar, con la placa de 300 mm.

En la Figura 31, Figura 32 y Figura 33 se observa el efecto de la superficie de contacto con los grados de compactación de 90, 95 y 100% respectivamente.

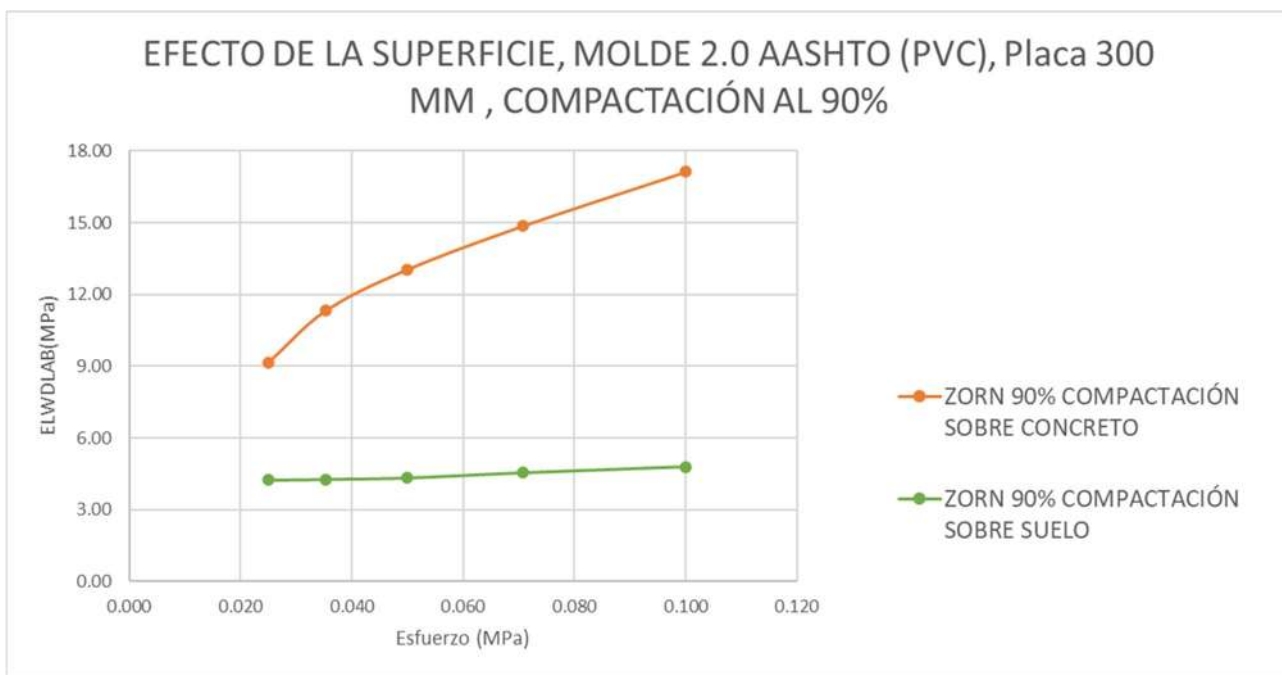


Figura 31. Efecto de la superficie de contacto en molde 2.0 AASHTO con placa de 300 mm con compactación al 90%.

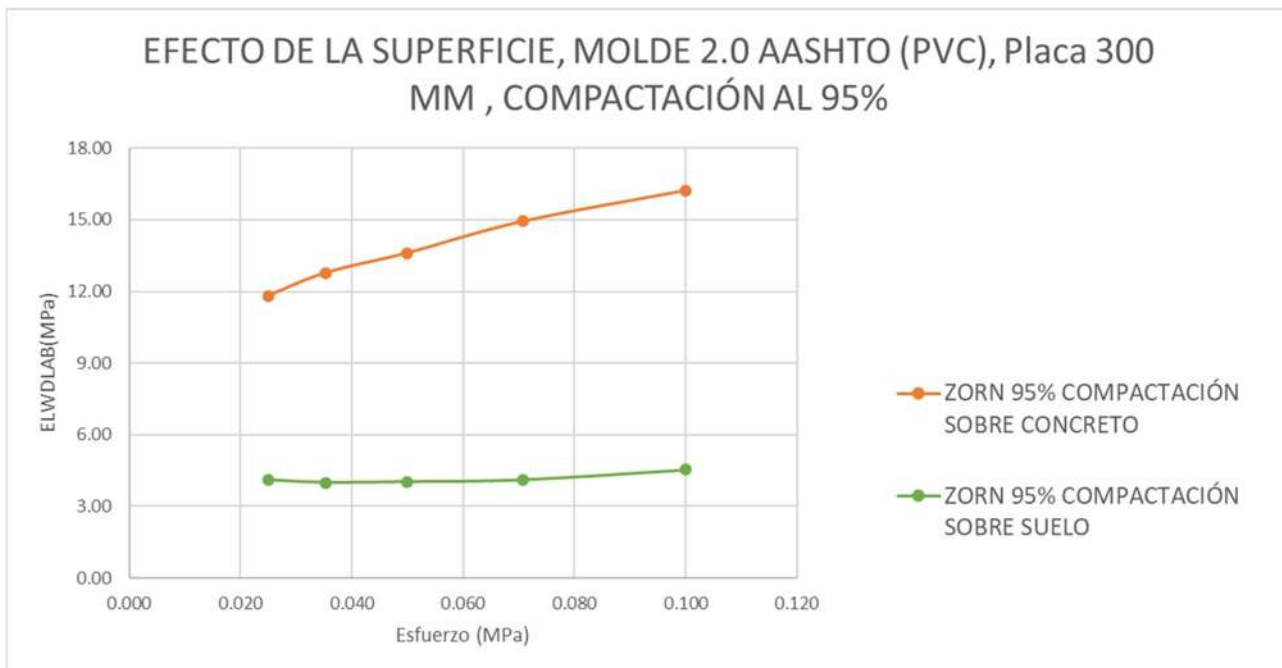


Figura 32. Efecto de la superficie de contacto en molde 2.0 AASHTO con placa de 300 mm con compactación al 95%.

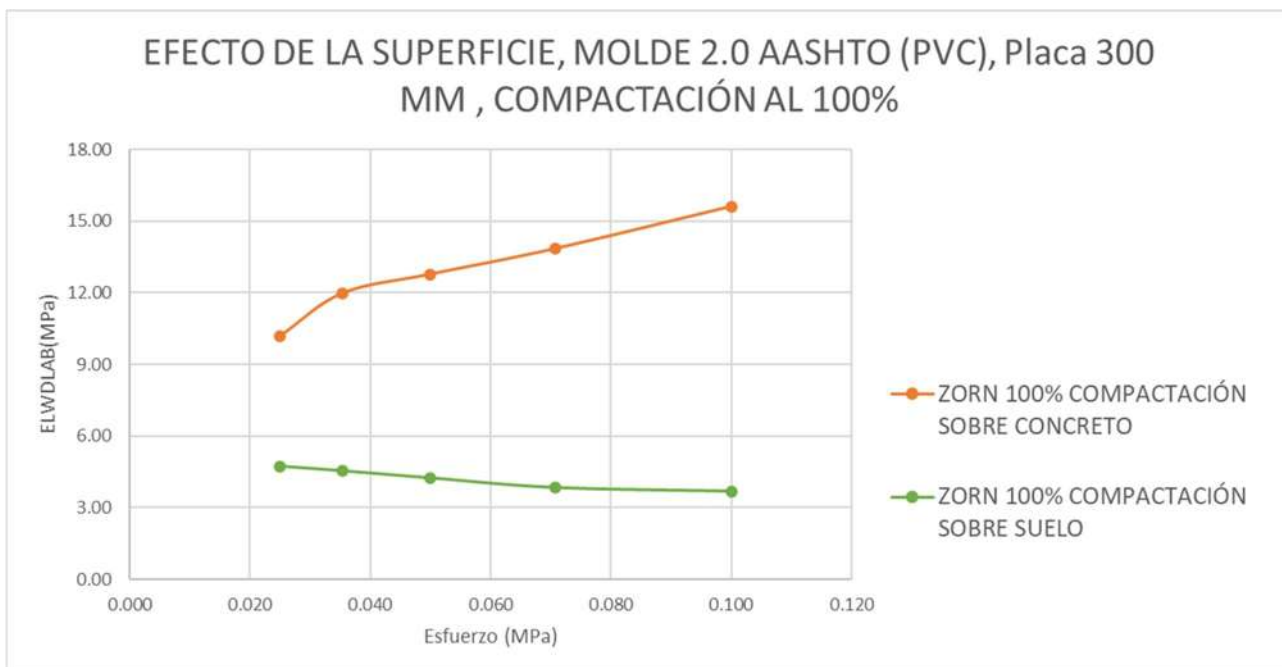


Figura 33. Efecto de la superficie de contacto en molde 2.0 AASHTO con placa de 300 mm con compactación al 100%.

Los resultados en todos los casos muestran que el módulo del LWD es más alto cuando está colocado sobre el piso de concreto (línea naranja), lo que indica que el módulo es afectado por la capa rígida de apoyo.

El módulo es más bajo cuando está recargado sobre la superficie de suelo, ya que, es un suelo blando, sin compactar y, por lo tanto, el módulo es pequeño por no tener mucha rigidez.

Estos resultados muestran que la superficie de contacto donde se coloque la base del LWD tiene influencia en el módulo como lo indica la literatura existente. Según Duddu & Chennarapu (2022), para desprejar el efecto de la capa inferior a la base del LWD es necesario que el diámetro del molde sea 1.5 a 2.0 veces del diámetro de la placa de carga.

Por lo tanto, las dimensiones que el molde debería tener para respetar la misma relación  $D/H=1.2$  del molde 1.0 AASHTO de acero y para desprejar el efecto de la superficie de contacto son las siguientes:

$D= 22$  pulgadas (55.88 cm)

$H= 17.81$  pulgadas (45 cm)

#### 4.2.5 Efecto de incremento de dimensiones de molde

En este apartado se analizará el efecto que se tuvo al incrementar las dimensiones del molde AASHTO 1.5 veces y 2.0 veces.

Se hace notar un comportamiento interesante al incrementar las dimensiones del molde en un 50% ya que, de acuerdo con los resultados esperados los módulos tendrían que aumentar en principio por el cambio en el efecto del confinamiento entre la placa de carga y la longitud hacia la parte inferior del molde. No obstante, se encontró que los módulos de rigidez tendían a ser menores respecto de los obtenidos en el molde AASHTO original (ver Tabla 12).

Para el caso del incremento de las dimensiones del molde en un 100% o sea el doble, los módulos obtenidos si fueron mayores y se piensa que más cercanos al módulo de rigidez de superficie que se pudiera dar de ese suelo compactado en campo.

El obtener módulos menores del molde 1.5 AASHTO, lleva a pensar el porqué de tal efecto, a manera de explicación, se piensa que el hecho de existir un espacio reducido ocupado por material compactado entre el plato de carga de 150 mm y la cara interior del molde (8.3 cm), esto puede originar que no se consiga generar un confinamiento suficiente con el mismo material, lo que causa inestabilidad y mayor vibración a la hora de someter el espécimen a los impactos dados por el equipo, causando un nuevo efecto en el que la masa de suelo se deforma más y por ende los módulos resultan menores.

Caso contrario pasa con el molde 2.0 AASHTO, donde el espacio ocupado con material compactado entre la placa de carga y la cara interior del molde es mayor (14.08 cm), generando a su vez una mayor estabilidad, ya que, le brinda un efecto de confinamiento formado por el mismo material, tal como suele pasar en una capa compactada en campo en un punto específico de ésta. Esto lleva a obtener deformaciones más pequeñas y a la obtención de módulos mayores posiblemente más cercanos a los encontrados en campo.

#### 4.3 Modelación de elementos finitos incrementando dimensiones del molde

Para un mejor entendimiento de los resultados y debido a que la  $E_{LWDLab} = \left[ \left( 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \frac{4H}{\pi D^2} k \right) \right]$  Ecuación 11 está adaptada de la teoría de elasticidad para el caso de un cilindro de material elástico con el movimiento lateral

condicionado con las dimensiones del molde 1.0 AASHTO y el plato de carga de 150 mm. se decidió realizar una modelación numérica, para ello se utilizó el software RS2 que se utiliza comúnmente en el análisis numérico de estructuras geotécnicas para obras civiles, mediante el Método de Elementos Finitos (MEF), ayudando de esta forma a conocer el comportamiento esfuerzo deformación del modelo. Se eligió este software ya que, permite realizar variaciones de cargas en el tiempo, aplicar condiciones de frontera, deformaciones en la geometría referenciada, etc.

Se realizaron cuatro modelos numéricos, en donde se replicaron las condiciones de laboratorio para realizar una comparativa de los desplazamientos obtenidos cuando se aplica la carga uniforme del LWD de 0.1 MPa a los distintos moldes empelados en esta investigación (Tabla 6), adicionando la modelación del molde convencional cambiando el material de acero por PVC.

Antes de comenzar la modelación, es necesario alimentar el programa con los datos de entrada básicos correspondientes a los parámetros de la arena limosa utilizada en el estudio obtenidos de la caracterización del suelo (Tabla 8) y adicionando los materiales de PVC y acero de los moldes.

Los datos de entrada utilizados para cada material, se resumen en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Tabla 16. *Datos de entrada utilizados en los modelos numéricos.*

Propiedades	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	Módulo de Elasticidad E (kPa)	Relación de Poisson
<b>Arena Limosa</b>	16.63	40000	0.3
<b>PVC</b>	14.12	1.9e06	0.38
<b>Acero</b>	79	2.1e08	0.28

La geometría empleada para los distintos modelos fueron las dimensiones del molde AASHTO convencional (1.0 AASHTO), indicadas en el manual M•MMP•1•09/06 y las dimensiones de los moldes incrementados construidos para esta investigación (Tabla 6).

Se aplicaron condiciones de frontera para evitar el movimiento en el molde al momento de aplicar la fuerza de impacto del LWD, restringiendo el material en x y y, en los límites del molde y en su base, se restringió en y en la parte media, recordando que el análisis realizado es axisimétrico (Figura 34).

Se operaron tres etapas en los modelos, la primera era equivalente al molde con el material compactado, en la segunda se agrega el impacto del LWD y la última etapa representa el molde una vez que se realiza el impacto,

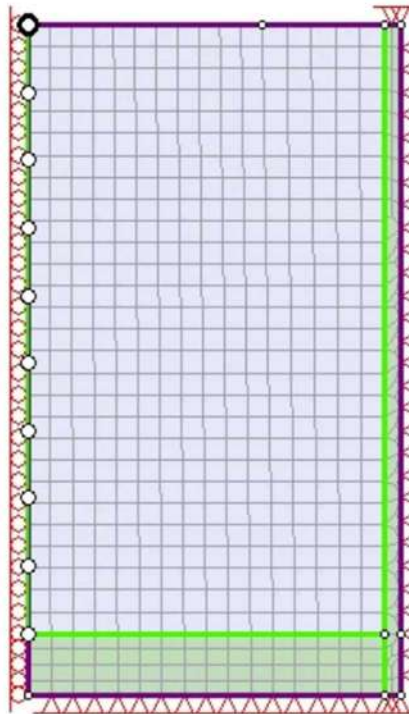


Figura 34. *Modelo numérico molde 2.0 AASHTO.*

Para simular el impacto realizado por el equipo, se aplicó una carga de pulso distribuida uniformemente en el plato de carga de 150 mm equivalente a 0.1 MPa, en la etapa 2 (Figura 35)

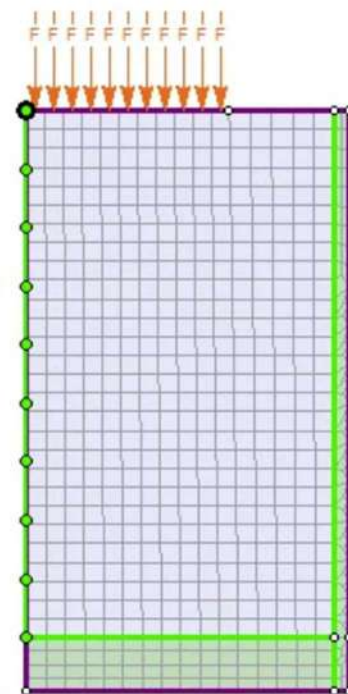


Figura 35. Fuerza distribuida en el modelo, molde 2.0 AASHTO.

Como resultado, al culminar la simulación (Figura 36 y Figura 37), se obtuvieron gráficas del desplazamiento vertical en la parte superior del molde en respuesta al impacto producido por la masa del LWD.

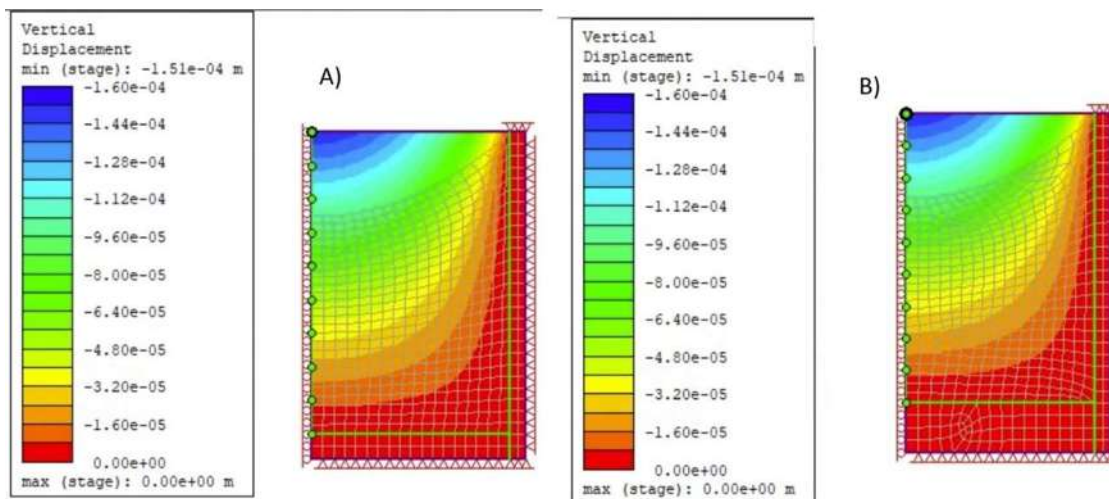


Figura 36. Modelos numéricos: A) 1.0 AASHTO (ACERO), B) 1.0 AASHTO (PVC)

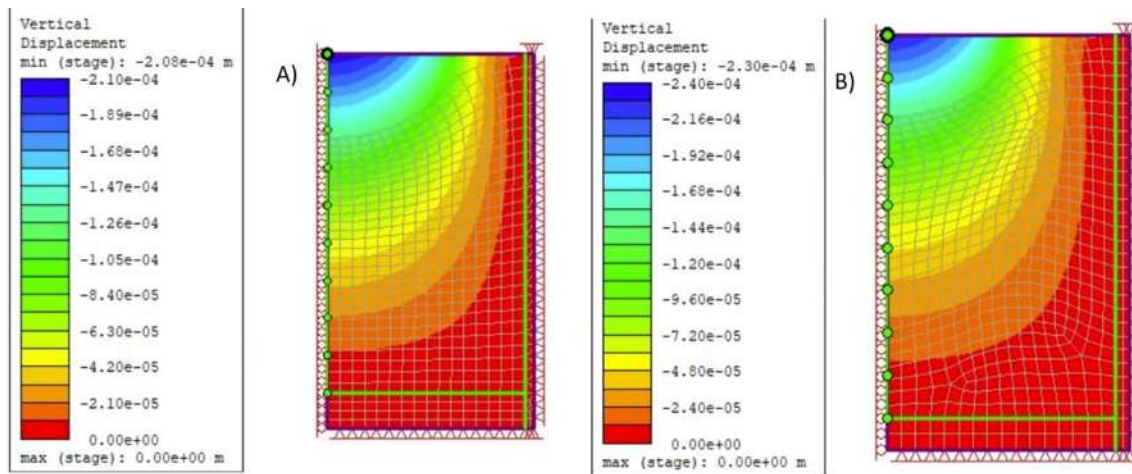


Figura 37. Modelos numéricos: A) 1.5 AASHTO (ACERO), B) 2.0 AASHTO (ACERO)

En la Figura 38, tenemos la gráfica de la distancia (radio del molde por análisis axisimétrico) y el desplazamiento vertical que tuvo el material con el plato de carga de 150 mm.

En donde se observa que entre más grande es el molde, mayor es el desplazamiento que presenta, esto significa que los módulos de rigidez serán más grandes conforme vaya incrementando la dimensión del molde.

Por lo que se puede concluir que entre más grande sean las dimensiones del molde AASHTO, mayores serán los módulos de rigidez medidos con el dispositivo LWD.

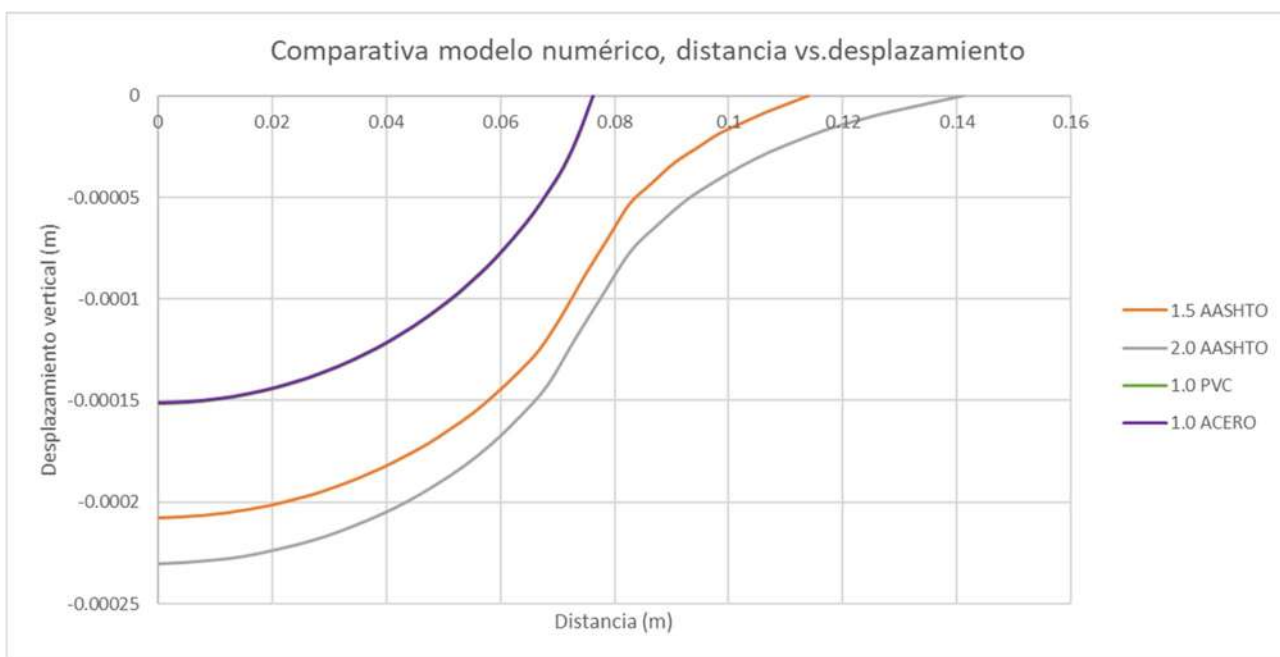


Figura 38. Comparativa de resultados de la modelación numérica con distintas dimensiones de molde.

Tabla 17. Desplazamiento vertical máximo presentado con distintos moldes en modelación numérica.

Molde	Desplazamiento máximo vertical (m)
1.0 AASHTO (ACERO)	-0.00015095
1.0 AASHTO (PVC)	-0.00015145
1.5 AASHTO (PVC)	-0.00020778
2.0 AASHTO (PVC)	-0.00023013

El molde 1.0 AASHTO de acero (línea morada) y el molde 1.0 AASHTO de PVC (línea verde), presentaron deformaciones muy similares, sobreponiéndose en la gráfica sin poderse apreciar la diferencia entre los resultados de ambas en la figura, por lo tanto, podemos concluir que alguna variación en los resultados debido al tipo de material de molde es despreciable.

#### 4.3.1 Factor de corrección

Ecuación 11 y los resultados logrados en la modelación, se concluyó que era incorrecto utilizar esta ecuación con las dimensiones del molde incrementado, debido a que esta fórmula está adaptada de la teoría de elasticidad para el caso de un cilindro de material elástico con el movimiento lateral condicionado con las dimensiones del molde 1.0 AASHTO y el plato de carga de 150 mm.

Como propuesta para ajustar la secuela que tienen los resultados por la utilización de la fórmula, se propone utilizar un factor de corrección (FC).

Para conocer el valor que será utilizado como factor de corrección, se emplearon los resultados de los desplazamientos máximos de las modelaciones (Tabla 17) y con éstos se calculó el módulo de rigidez con la Ecuación 11 (Tabla 18).

Tabla 18. Módulos de Rigidez obtenidos con resultados de modelación numérica.

Molde	Módulo de Rigidez ( $E_{LWDLAB}$ ) en modelación numérica
1.0 AASHTO (ACERO)	48.06
1.5 AASHTO (PVC)	58.64
2.0 AASHTO (PVC)	63.91

Tomando de referencia el molde 1.0 AASHTO, se realizaron las siguientes relaciones para obtener el  $FC_{1.5AASHTO}$  y  $FC_{2.0AASHTO}$ .

$$FC_{1.5AASHTO} = \frac{E_{LWDLAB\ 1.0\ AASHTO}}{E_{LWDLAB\ 1.5\ AASHTO}} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$FC_{1.5AASHTO} = \frac{48.06}{58.64}$$

$$FC_{1.5AASHTO} = 0.82$$

$$FC_{2.0AASH} = \frac{E_{LWDLAB\ 1.0\ AASHTO}}{E_{LWDLAB\ 2.0\ AASHTO}} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$FC_{2.0AASHTO} = \frac{48.06}{63.91}$$

$$FC_{2.0AASHTO} = 0.75$$

Una vez obtenidos estos factores, se multiplica por toda la serie de datos obtenidos en los resultados para realizar el arreglo en ellos.

Para conocer el producto de usar estos factores de corrección en los resultados obtenidos, se tomaron como ejemplo los resultados del 90% de compactación del molde 1.5 AASHTO y 2.0 AASHTO del molde con la placa de 150 mm y se realizó el ajuste en los módulos (Tabla 19)

Tabla 19. Ajuste de resultados con FC.

Molde	Factor de corrección	Esfuerzo (MPa)	Módulo de rigidez antes de aplicar el ajuste (MPa)	Módulo de Rigidez ajustado (MPa)
1.5 AASHTO	0.82	0.1	10.56	8.66
		0.14	11.85	9.72
		0.20	13.51	11.07
		0.28	14.29	11.71
		0.40	16.56	13.58
2.0 AASHTO	0.75	0.1	32.12	24.09
		0.14	34.02	25.51
		0.20	39.27	29.45
		0.28	44.52	33.39
		0.40	52.30	39.23

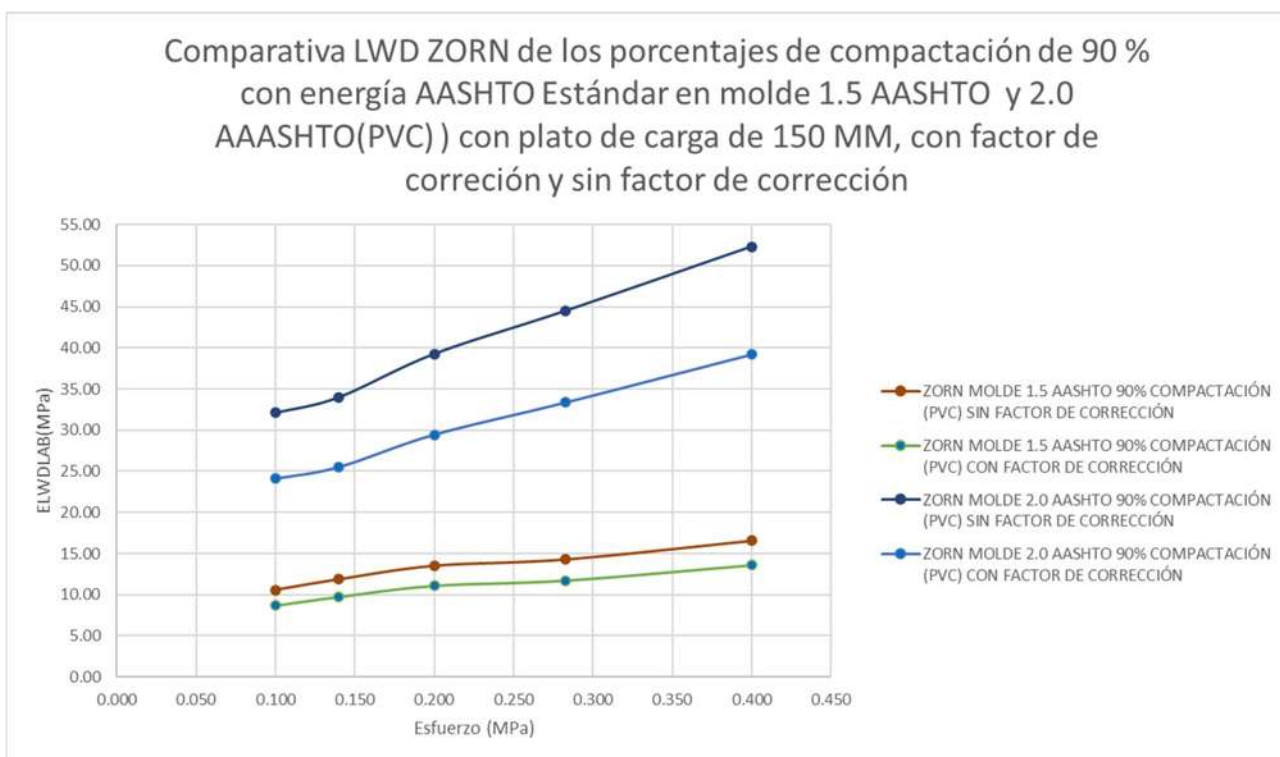


Figura 39. Comparativa de resultados en molde 1.5 ASHTO y 2.0 AASHTO aplicando el factor de corrección.

En la Figura 39, se observa la comparativa de los resultados agregando el factor de corrección en ambos moldes (1.5 color guinda y verde, 2.0 azul oscuro y azul claro), el módulo disminuye en un 18% con el molde 1.5 AASHTO y en un 25% en el molde 2.0 AASHTO, sin embargo, el resultado aún es más alto en el molde 2.0 AASHTO con el esfuerzo de 0.1 MPa, que es el utilizado en campo y laboratorio, que el Módulo de Rigidez Objetivo (16.4 MPa).

La disminución solo daría una mejor idea del rendimiento que tendría el material en campo.

---

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para terminar este trabajo de tesis, este capítulo se dedicará a recoger los resultados más primordiales y los logros obtenidos en la investigación, que consintieron en llegar a las conclusiones que se presentarán a continuación. Las conclusiones se escribieron de manera secuencial siguiendo el orden de los resultados obtenidos. Finalmente, se termina con las recomendaciones pertinentes para complementar el trabajo y poder dar continuidad para líneas futuras de investigación.

### 5.1 Conclusiones

En esta parte del capítulo, se presentan las primordiales conclusiones y conocimientos adquiridos en esta investigación. Haciendo referencia a la metodología empleada y a los efectos estudiados en el capítulo anterior.

La eficiencia del control de la calidad de la compactación, generalmente se realiza determinando el grado de compactación (%), realizando una relación entre la masa volumétrica seca natural o compactado en obra ( $Y_d$ ), respecto a su masa volumétrica seca máxima determinada con la prueba de compactación AASHTO en laboratorio ( $Y_{dmax}$ ).

Algunos equipos o métodos utilizados convencionalmente para la determinación de  $Y_d$  pueden llegar a implicar un riesgo para el usuario, un consumo elevado de tiempo en la ejecución de la prueba y complicaciones en la utilización del equipo. Ya que, no pueden ser utilizados en cualquier zona, y en algunos casos las mediciones no reflejan todas las propiedades geotécnicas que gobiernan el comportamiento del suelo.

El control de calidad de la compactación basada en módulos está ganando popularidad. Debido a que los módulos son un dato de entrada para el diseño de pavimentos, basado en el método empírico-mecanicista. Asimismo, conocer los módulos permiten realizar el análisis, útil para determinar la respuesta de la estructura inferior al esfuerzo aplicado.

Como solución a suplir estos equipos, se optó por la innovación y desarrollo de un dispositivo que fuera seguro, simple y rápido de utilizar para la garantía de la calidad de la compactación en campo. Es así como el Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD) tomó auge en el mercado como una alternativa innovadora para medir la calidad de compactación en campo con el

Módulo de Rigidez de Superficie ( $E_{LWD\text{Campo}}$ ) obtenido de la medición directa en la capa compactada respecto al Módulo de Rigidez objetivo ( $E_{LWD\text{Obj}}$ ), determinado en el laboratorio. Un inconveniente con el equipo LWD es que el equipo no brinda información directa sobre el grado de compactación alcanzado en campo, sino más bien una relación de rigideces que es una referencia que termina siendo útil por la cercanía a este parámetro, pero a final de cuentas es una aproximación y se tienen que realizar calas para estimar el grado de compactación, aunque se utilice el equipo LWD, cuando menos en lo que se obtiene mayor experiencia de su uso a nivel nacional.

La mayoría de los estudios disponibles enfocados en el uso del LWD enfocan la investigación del equipo a su empleo en campo, por lo que es necesario priorizar su investigación en laboratorio ya que, aún hay discrepancias entre resultados de campo y laboratorio. El contar con un resultado similar entre ambas mediciones, pudiera permitir que las agencias carreteras determinen el grado de compactación de capas no consolidadas en campo con el LWD.

Normalmente, el Módulo de Rigidez obtenido en laboratorio es mucho más bajo que el Módulo de campo. Por lo que el objetivo principal de esta investigación fue analizar los Módulos de Rigideces de una arena limosa, de acuerdo con el manual M•MMP•1•16/20 (LWD) ZORN, incrementando las dimensiones del molde de compactación AASHTO modificado para aumentar el Módulo de Rigidez del LWD en laboratorio ( $E_{LWD\text{Lab}}$ ).

Las pruebas en laboratorio con el LWD son realizadas en el molde de compactación AASHTO como una prueba adicional a la prueba de compactación y definen un módulo de rigidez objetivo para ser tomado como referencia en campo y realizar un criterio de aceptación ( $E_{LWD\text{Campo}}/E_{LWD\text{Obj}}$ ). Al aumentar las dimensiones del molde convencional y realizar con tres distintos porcentajes de compactación en relación con su M.V.S.M y su contenido de agua óptimo: 90%, 95% y 100% del porcentaje de compactación con una tolerancia de +- 2%. se obtuvieron los siguientes conocimientos.

#### 5.1.1 Conclusiones referentes a la metodología.

- El material que se utilizó para los moldes es PVC Sanitario, se eligió por su rigidez, no obstante, para evitar algún pandeo, deformación en el molde o discrepancia el material de los moldes es necesario hacer un estudio construyendo los moldes con acero.

- A pesar de que se incrementó el número de capas para hacer más sencilla la compactación con los moldes. El esfuerzo físico implicado y el tiempo de compactación para cada ensayo continuo siendo muy alto, por lo que es necesario buscar alternativas de equipos con mayor potencia para compactar.
- Reposar el equipo para compactación en algún punto del ensayo y entre ensayos en caso de que se vayan a hacer de manera continua. Ya que uno de los problemas que se tuvo al momento de la compactación es que la placa de acero se desoldó por la fatiga generada al momento de compactar.
- Al ser tan pequeña la diferencia entre módulos de la compactación del 95 y 100 % en ambos moldes. Se puede concluir que el equipo no tiene la sensibilidad suficiente para detectar la diferencia entre estos dos grados de compactación.
- Para calcular un grado de compactación es necesario realizar un tramo de prueba en campo con el mismo material que se utilice en las pruebas de laboratorio.
- El coeficiente de Poisson es un factor que tiene mucha importancia en los resultados, se recomienda escoger un valor adecuado para obtener resultados coherentes según el tipo de material que sea medido.

#### **5.1.2 Conclusiones referentes al efecto del porcentaje de compactación.**

- Conforme se aumentó el esfuerzo controlando las alturas de caída del LWD, el Módulo de Rigidez también fue incrementándose.
- En ambos moldes se tuvo el mismo comportamiento a menor porcentaje de compactación, más bajo es el Módulo de Rigidez.
- El molde de compactación 1.5 AASHTO tuvo resultados más bajos que el molde convencional AASHTO.
- El molde de compactación 2.0 AASHTO si logró tener un confinamiento suficiente, el módulo de rigidez fue más alto que en el molde tradicional en las 3 compactaciones 90%, 95% y 100%, incrementando en un 185.64%, 221.82% y 104.51% respectivamente.
- Incrementar dos veces las dimensiones del molde de compactación AASHTO en laboratorio, permite acercarse al resultado de la suposición estándar de espacio semi-infinito comúnmente utilizado para calcular los valores de módulo durante las

pruebas de LWD en campo, por lo que se cumple la hipótesis planteada en el capítulo 1.

- Los esfuerzos se tornan mucho más pequeños en el molde 2.0 al utilizar la placa de carga de 300 mm con la misma altura de caída utilizada, esto se debe al incremento del área de contacto.
- Aún con la placa de 300 mm, en el molde 2.0 AASHTO los esfuerzos son más altos que con el molde tradicional, aunque la diferencia entre módulos es muy pequeña en comparación con el molde de 150 mm.
- Al ser tan pequeña la diferencia entre módulos de la compactación del 95 y 100 %, en ambos moldes se puede concluir que el equipo no tiene la sensibilidad suficiente para detectar la diferencia entre estas dos compactaciones (al menos para este tipo de suelo).
- Lograr una compactación arriba del 90% es complicado, el tiempo de compactación supera las 2 horas, por lo que es necesario humedecer el material con un rociador para que el material no pierda contenido de agua. A su vez es necesario un número de capas mayor a 10 para lograr un porcentaje de compactación de 95 y 100 %.
- A pesar de que el molde 1.5 dio resultados más bajos que el molde convencional de acero, se puede confirmar la afirmación de Elhakim et al. (2014), que conforme aumenta el porcentaje de compactación, aumenta el módulo de rigidez medido con el LWD.

### 5.1.3 Conclusiones referentes al efecto del contenido del agua.

Se realizaron dos especímenes al 90% de compactación con un contenido de agua más bajo que el necesario para llegar al contenido óptimo de agua. Uno con el molde de compactación 1.5 AASHTO y el otro con el molde 2.0 AASHTO con placa de 150 mm y 300 mm, se obtuvieron los siguientes conocimientos:

- El módulo de rigidez aumentó considerablemente en los tres ensayos, hubo un crecimiento del módulo cuando el espécimen tiene menos cantidad de agua debido a que el material se vuelve más rígido.
- El contenido de agua es un factor crucial en las pruebas de medición del LWD, ya que el resultado puede variar mucho si se modifica el valor del contenido de agua

óptimo. Se debe tener control del contenido de agua tanto en campo como en laboratorio para asegurar una medición buena y confiable con el equipo.

#### 5.1.4 Conclusiones referentes al plato de carga.

- Las pruebas realizadas con el plato de carga de 150 mm tuvieron valores de módulo más alto. Por lo que se puede concluir que incrementar el diámetro del plato de carga implica una disminución en el módulo de rigidez medido con el LWD.
- En los ensayos realizados con el plato de carga de 150 mm, el módulo de rigidez incrementa conforme aumenta el porcentaje de compactación. De manera contraria pasa con el plato de 300 mm conforme aumenta el grado de compactación el módulo disminuye.
- El diámetro del plato de carga si es un factor de influencia en el resultado de las mediciones del LWD. Debido a que afecta la profundidad de influencia de la medición, entre más pequeño sea el diámetro de placa de carga mayor será el módulo de rigidez ya que hay un incremento de esfuerzos debido al área de contacto del impacto del equipo, por lo que las fórmulas ajustan este parámetro

#### 5.1.5 Conclusiones referentes a la superficie de contacto.

- El módulo tomado con el LWD es más alto cuando está colocado sobre el piso de concreto hidráulico, que cuando es colocado sobre la superficie de suelo blando sin compactar, lo que indica que el módulo es afectado por la capa rígida de concreto ya que para cierto diámetros de placa la influencia de la profundidad puede tomar más allá del espesor del espécimen a medir
- La superficie de contacto donde se coloque la base del LWD tiene influencia en el módulo como lo indica la literatura existente. Según Duddu & Chennarapu (2022), para desprestigiar el efecto de la capa inferior a la base del LWD es necesario que el diámetro del molde sea 1.5 a 2.0 veces del diámetro de la placa de carga.
- Para desprestigiar el efecto de la profundidad de influencia de la capa inferior donde sea colocado el molde y que respete la misma relación D/H que el molde de compactación AASHTO modificado, es necesario construir un molde con las siguientes dimensiones: D= 22 pulgadas (55.88 cm), H= 17.81 pulgadas (45 cm), lo cual se torna impráctico por la cantidad de materia que habría de compactar y manipular.

### 5.1.6 Conclusiones referentes al incremento en las dimensiones del molde AASHTO.

En esta sección se resumirán las conclusiones que se tuvieron con respecto al efecto que se tuvo al incrementar las dimensiones del molde AASHTO 1.5 veces y 2.0 veces.

- se encontró que los módulos de rigidez tendían a ser menores respecto de los obtenidos en el molde AASHTO original cuando se incrementaron las dimensiones del molde en un 50%, al contrario de los resultados que se esperaban.
- Para el caso del incremento de las dimensiones del molde en un 100% o sea el doble, los módulos obtenidos si fueron mayores que los del molde convencional y se piensa que son más cercanos al módulo de rigidez de superficie que se pudiera dar de ese suelo compactado en campo.
- Se piensa que el efecto de obtener módulos menores en el molde 1.5, es debido a que el espacio reducido ocupado por material compactado entre el plato de carga de 150 mm y la cara interior del molde (8.3 cm), origina que no se consiga generar un confinamiento suficiente con el mismo material, lo que causa inestabilidad y mayor vibración a la hora de someter el espécimen a los impactos dados por el equipo, causando un nuevo efecto en el que la masa de suelo se deforma más y por ende los módulos resultan menores.
- En el molde 2.0 AASHTO, el espacio ocupado con material compactado entre la placa de carga y la cara interior del molde es mayor (14.08 cm), generando a su vez una mayor estabilidad, ya que, le brinda un efecto de confinamiento formado por el mismo material, tal como suele pasar en una capa compactada en campo en un punto específico de ésta. Esto lleva a obtener deformaciones más pequeñas y a la obtención de módulos mayores posiblemente más cercanos a los encontrados en campo.

### 5.1.7 Conclusiones referentes a la modelación numérica.

Con las simulaciones realizadas se llegó a las siguientes conclusiones:

- Entre más grande sean las dimensiones del molde AASHTO, mayor es el desplazamiento que presenta, por lo que se puede concluir que entre más grande sean las dimensiones del molde AASHTO, mayores serán los módulos de rigidez medidos con el dispositivo LWD.

- El molde 1.0 AASHTO de acero y el molde 1.0 AASHTO de PVC, presentaron deformaciones muy similares, por lo tanto, podemos concluir que alguna variación en los resultados debido al tipo de material de molde es despreciable.
- Es necesario utilizar un factor de corrección a los resultados, debido a que la ecuación con la que se realizan los cálculos normalmente (Ecuación 11) está ajustada de la teoría de elasticidad para el caso de un cilindro de material elástico con el movimiento lateral condicionado con las dimensiones del molde 1.0 AASHTO y no sería del todo correcta utilizarla en los moldes construidos con dimensiones más grandes.
- El Factor de corrección que se debe utilizar en el molde 1.5.

## 5.2 Recomendaciones

Con la experiencia obtenida en este estudio, se puede recomendar lo siguiente:

- Se recomienda adicionar más pruebas con distintos tipos de suelo para tener un mayor entendimiento del efecto que tiene sobre el módulo el incrementar las dimensiones del molde.
- A pesar de que el rotomartillo facilitó la compactación, sería ideal utilizar un rotomartillo con más potencia para simplificar el proceso de la compactación y reducir los tiempos de ensaye.
- Se sugiere realizar un tramo de prueba en campo a la par de realizar las pruebas en laboratorio, para tener una comparativa con los resultados obtenidos en laboratorio y poder buscar un grado de compactación.
- Soldar el compactador con soldadura 7018 para evitar la rotura del compactador con la presión ejercida al momento de realizar la compactación en el molde.
- Hacer ensayos con la masa volumétrica seca máxima y contenido de agua óptimo de las demás energías de compactación realizadas (Energía intermedia entre AASHTO estándar y AASHTO modificada, energía AASHTO modificada ver Tabla 5).



## 6. Anexos

### 6.1 Pruebas de caracterización de suelo

#### 6.1.1 Granulometría

Tabla 20. Granulometría.

Malla		Peso Retenido Parcial	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
Denominación	Abertura (mm)	gr	%	%	%
3"	78.2	0	0	0	1
2"	50.8	0	0		1
1 1/2"	38.1	0	0.00%	0.00%	100.00%
1"	25.4	0	0.00%	0.00%	100.00%
3/4"	19.1	0	0.00%	0.00%	100.00%
1/2"	12.7	26.6	1.33%	1.33%	98.67%
3/8"	9.52	36	1.80%	3.13%	96.87%
1/4"	6.35	117.2	5.86%	8.99%	91.01%
No 4	4.76	145.2	7.26%	16.25%	83.75%
<b>Pasa 4</b>		<b>1675</b>	<b>83.75%</b>	<b>100.00%</b>	<b>0.00%</b>
<b>Suma</b>		<b>2000</b>	<b>100.00%</b>	<b>--</b>	<b>--</b>
<b>Del Total que pasa la Malla No. 4 Se tomaron 200 gr y se realizó un lavado por la Malla No. 200, posteriormente se realizó el análisis granulométrico y se obtuvieron los siguientes datos.</b>					
Malla		Peso Retenido Parcial	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
Denominación	Abertura (mm)	gr	%	%	%
No 10	2	17.4	7.29%	23.54%	76.46%
No 20	0.84	10.8	4.52%	28.06%	71.94%
No 40	0.42	13.6	5.70%	33.75%	66.25%
No 60	0.25	9	3.77%	37.52%	62.48%
No 100	0.149	10	4.19%	41.71%	58.29%
No 200	0.074	24.6	10.30%	52.01%	47.99%
<b>Pasa 200</b>		<b>114.6</b>	<b>47.99%</b>	<b>100.00%</b>	<b>0.00%</b>
<b>Suma</b>		<b>200</b>		<b>--</b>	

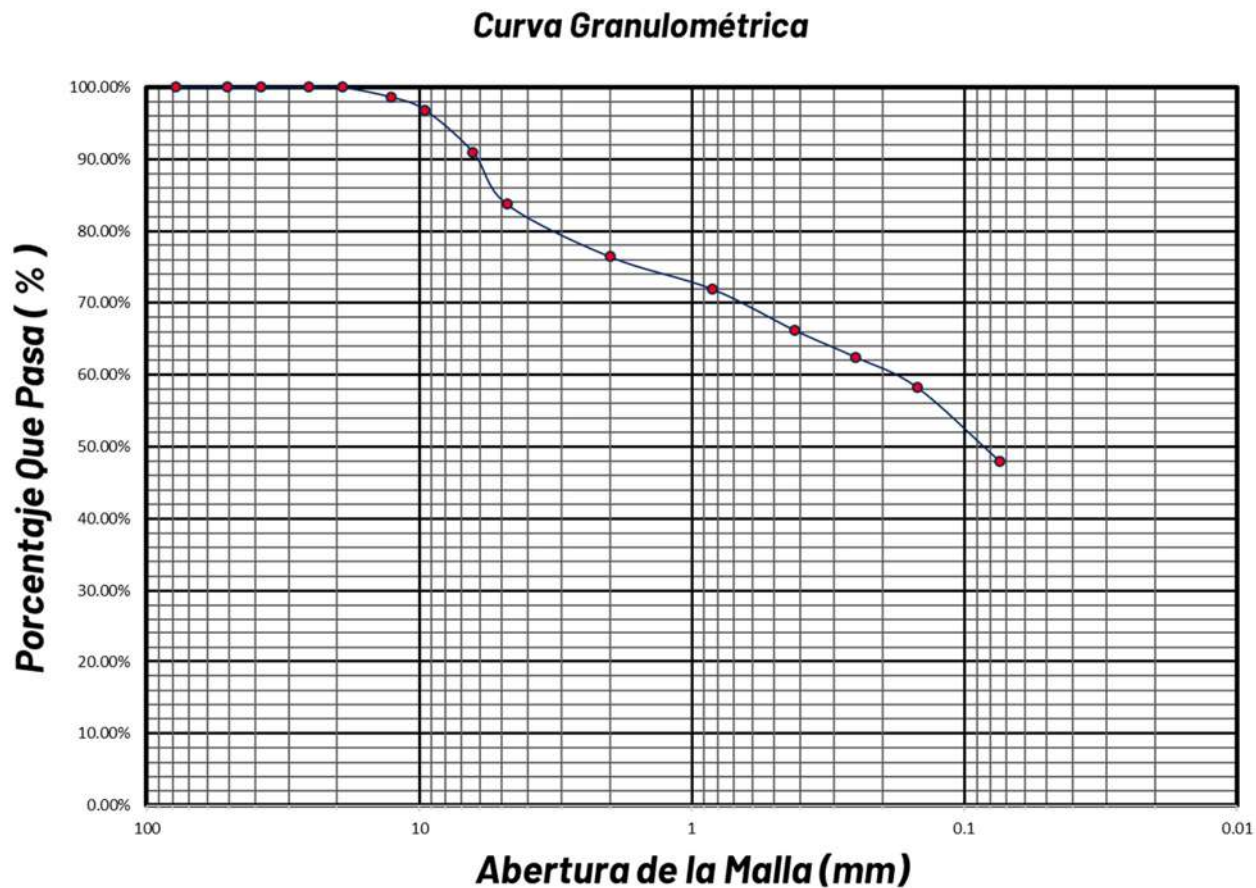


Figura 40. Curva Granulométrica.

CLASIFICACIÓN SEGÚN SUCS:

MÁS DE LA MITAD DEL MATERIAL ES RETENIDO EN LA MALLA NO.200, MÁS DE LA MITAD DE LA FRACCIÓN GRUESA PASA LA MALLA NO.4

Sin CC, Sin Cu, IP Mayor a 7 (15), Límite de plasticidad debajo de la línea A

**MATERIAL ES : SM ARENA LIMOSA, MEZCLA DE ARENAS Y LIMO.**

### 6.1.2 Límites de consistencia

Tabla 21. Ensayos de límite líquido

PRUEBA No.	CÁPSULA No.	NÚMERO DE GOLPES			PESO CÁPSULA + SUELO HÚMEDO	PESO CÁPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CÁPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA(W)
		-	-	-	gr	gr	gr	gr	gr	(%)
2	39	5	<b>5</b>	10	23	18.6	4.4	8.4	10.2	43.14
	45	5	<b>8</b>	10	27.6	21.6	6	8.2	13.4	44.78
	16	10	<b>14</b>	15	23.2	18.8	4.4	8.4	10.4	42.31
	33	15	<b>18</b>	20	25.6	20.2	5.4	8.4	11.8	45.76
	7	20	<b>24</b>	25	27.2	21.8	5.4	8.6	13.2	40.91
	30	25	<b>29</b>	30	27.2	21.6	5.6	8.4	13.2	42.42
	69	30	<b>34</b>	35	26.8	21.6	5.2	8.4	13.2	39.39

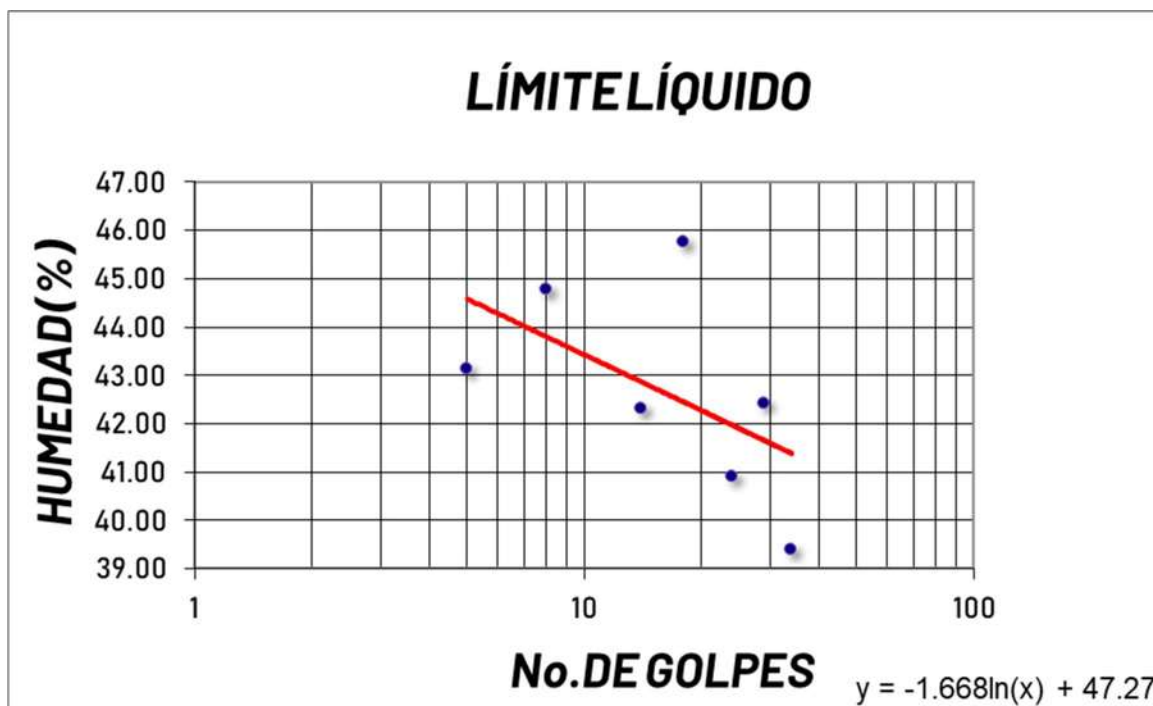


Figura 41. Límite Líquido.

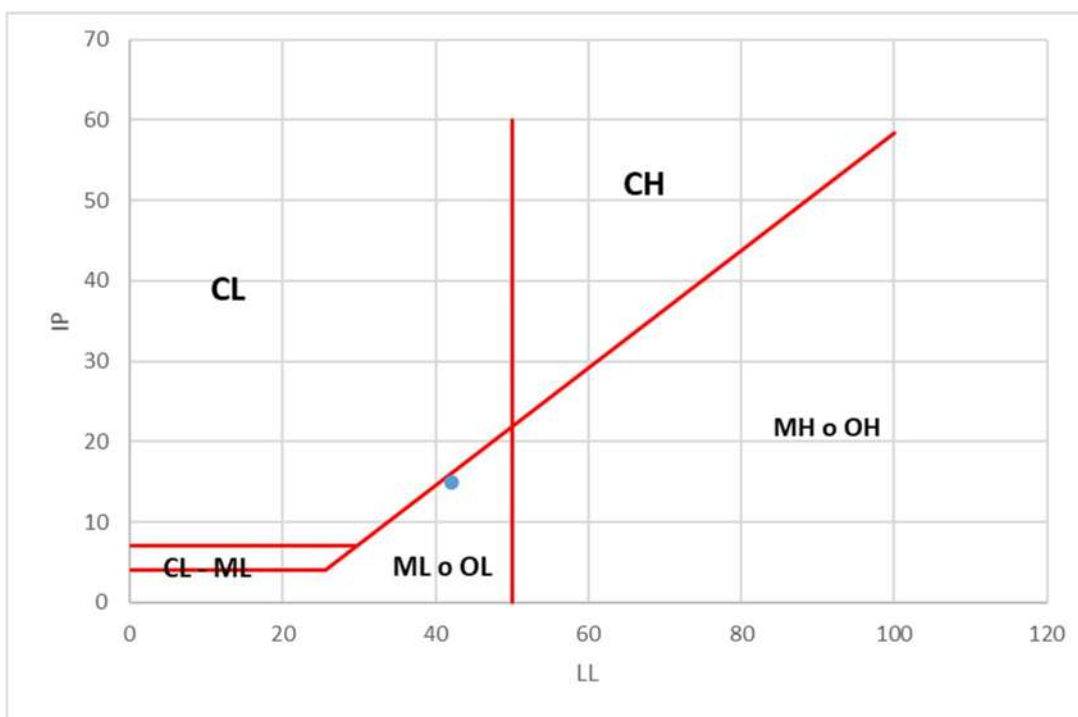


Figura 42. Carta de Plasticidad

Tabla 22. Ensayos de límite plástico.

PRUEBA No.	CÁPSULA No.	PESO CÁPSULA + SUELO HÚMEDO	PESO CÁPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CÁPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA(W)
-	-	gr	gr	gr	gr	gr	(%)
1	50	20.4	19.20	1.20	16.4	2.80	42.86
2	21	11.2	10.40	0.80	8.4	2.00	40.00
3	31	11.2	10.60	0.60	8.4	2.20	27.27
4	26	14.6	13.80	0.80	10.6	3.20	25.00
5	24	11.2	10.60	0.60	8.4	2.20	27.27

Tabla 23. Contracción Volumétrica

PRUEBA No.	CÁPSULA No.	VOLÚMENES			PESO CÁPSULA + SUELO HÚMEDO	PESO CÁPSULA + SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DE LA CÁPSULA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA(W)
		Vi	Vf	CV						
-	-	Cm3	Cm3	%	gr	gr	gr	gr	gr	(%)
-	11	9.04	5.29	2.60	38.8	34.8	4	25	9.8	40.82

Tabla 24. Pesos contracción volumétrica

Peso DesalojadoHg	Densidad Hg
<i>gr</i>	<i>g/cm<sup>3</sup></i>
57.4	13.56

Tabla 25. Contracción Lineal

Lf	Li	CL
<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>%</i>
9.02	9.94	9.26

Tabla 26. Resumen resultados de límites de consistencia

LL	42
LP	27
Ip	15
Fw	-
Tw	-
CL	9.26
CV	2.60

### 6.1.3 Proctor Estándar

Tabla 27. Datos de compactación proctor estándar

% DE AGUA	1	2	3.0	4	5	6
CANTIDAD DE AGUA (cm <sup>3</sup> ).	350	400	590	800	1000	1200
PESO MOLDE + SUELO HÚMEDO (g)	21176	21161	21425	21764	21948	21820
PESO DEL MOLDE (g)	17625	17625	17625	17625	17625	17625
PESO DEL SUELO HÚMEDO (g)	3551	3536	3800	4139	4323	4195
PESO ESPECÍFICO HÚMEDO (Kg/m <sup>3</sup> )	1680	1673	1798	1958	2045	1984
CÁPSULA NÚMERO	2	2	35	35	548	
PESO DE LA CÁPSULA (g)	129	146.6	135	129	146.6	135
PESO DE LA CÁPSULA + SUELO HÚMEDO (g)	283.8	268.6	262.4	353.4	453.0	466.8
PESO SUELO HÚMEDO (g)	154.8	122.0	127.4	224.4	306.4	331.8
PESO DE CÁPSULA + SUELO SECO (g)	271.0	257.6	248.2	323.2	404.0	404.4
PESO SUELO SECO (g)	142.0	111.0	113.2	194.2	257.4	269.4
CONTENIDO DE AGUA (%)	9.01	9.91	12.54	15.55	19.04	23.16
PESO VOLUMÉTRICO SECO (kg/m <sup>3</sup> )	1541	1522	1597	1694	1718	1611

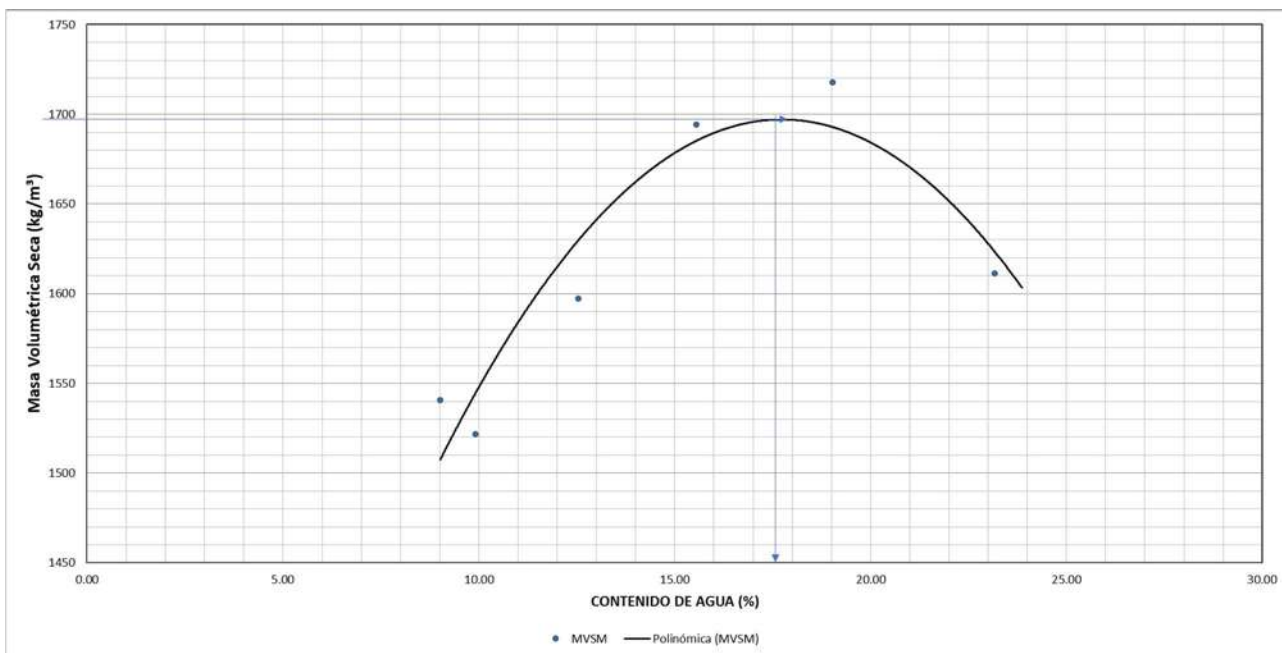


Figura 43. Curva de compactación proctor estándar.

$Y_{dmax} = 1.696$

$W_o = 17.6\%$

#### 6.1.4 Proctor Modificada

Tabla 28. Datos proctor modificada.

Prueba No.	1	2	3	4	5	6
Molde + Suelo Húmedo (gr)	21832.00	21960.00	22130.00	22202.00	22129.00	21991.00
Peso del Molde	17634.00	17634.00	17634.00	17634.00	17634.00	17634.00
Peso del Suelo Húmedo (gr)	4198.00	4326.00	4496.00	4568.00	4495.00	4357.00
Peso Especifico Húmedo (gr/cm <sup>3</sup> )	1.98	2.04	2.12	2.16	2.12	2.06
Capsula No.	1	2	3	4	5	6
Peso Cápsula + Suelo Húmedo (gr)	628.60	608.60	633.00	560.00	614.20	553.40
Peso Cápsula + Suelo Seco (gr)	594.00	567.40	585.60	517.00	560.40	498.80
Peso del Agua (gr)	34.60	41.20	47.40	43.00	53.80	54.60
Peso Cápsula	246.60	221.00	246.80	247.00	246.80	221.20
Peso Suelo Seco (gr)	347.40	346.40	338.80	270.00	313.60	277.60
Contenido de agua (%)	9.96	11.89	13.99	15.93	17.16	19.67
Peso especifico seco (g/cm <sup>3</sup> )	1.80	1.83	1.86	1.86	1.81	1.72

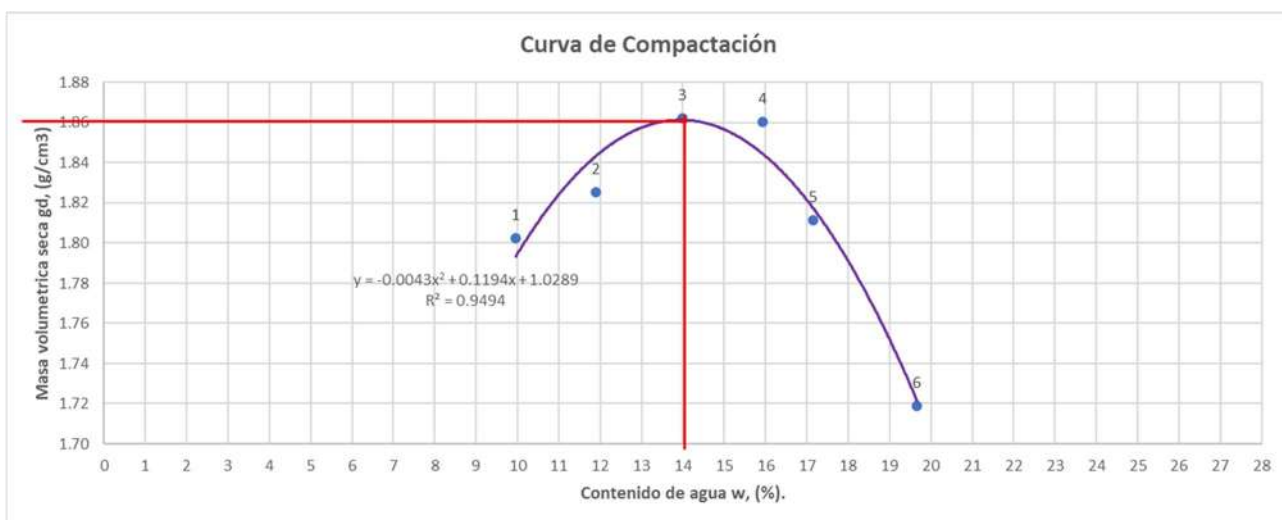


Figura 44. Curva de compactación proctor modificada.

$Y_{dmax} = 1.89$

$W_o = 14\%$

## 6.1.5 Prueba Triaxial UU

### 6.1.5.1 Sigma 3 0.3

Tabla 29. Resultados Sigma 3 0.3

Lectura del micrómetro de deformación	Lectura del micrómetro de carga	Carga	Deformación Total	Deformación Unitaria	1-Deformación Unitaria	Área Corregida	Esfuerzo
mm	mm	Kg	mm	-	-	cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	11.14	0.00
5.00	3.00	1.80	0.13	0.00	1.00	11.16	0.16
10.00	5.00	3.00	0.25	0.00	1.00	11.18	0.27
15.00	7.00	4.20	0.38	0.00	1.00	11.19	0.38
20.00	9.50	5.70	0.51	0.01	0.99	11.21	0.51
25.00	13.00	7.80	0.64	0.01	0.99	11.22	0.70
30.00	14.50	8.70	0.76	0.01	0.99	11.24	0.77
35.00	16.50	9.90	0.89	0.01	0.99	11.25	0.88
40.00	18.50	11.10	1.02	0.01	0.99	11.27	0.99
45.00	20.50	12.30	1.14	0.01	0.99	11.28	1.09
50.00	21.50	12.90	1.27	0.01	0.99	11.30	1.14
55.00	24.50	14.70	1.40	0.02	0.98	11.32	1.30
60.00	25.00	15.00	1.52	0.02	0.98	11.33	1.32
65.00	26.00	15.60	1.65	0.02	0.98	11.35	1.37
70.00	27.00	16.20	1.78	0.02	0.98	11.36	1.43
75.00	28.00	16.80	1.91	0.02	0.98	11.38	1.48
80.00	28.50	17.10	2.03	0.02	0.98	11.39	1.50
85.00	29.50	17.70	2.16	0.02	0.98	11.41	1.55
90.00	30.00	18.00	2.29	0.02	0.98	11.43	1.58
95.00	30.00	18.00	2.41	0.03	0.97	11.44	1.57
100.00	30.00	18.00	2.54	0.03	0.97	11.46	1.57
105.00	30.00	18.00	2.67	0.03	0.97	11.48	1.57

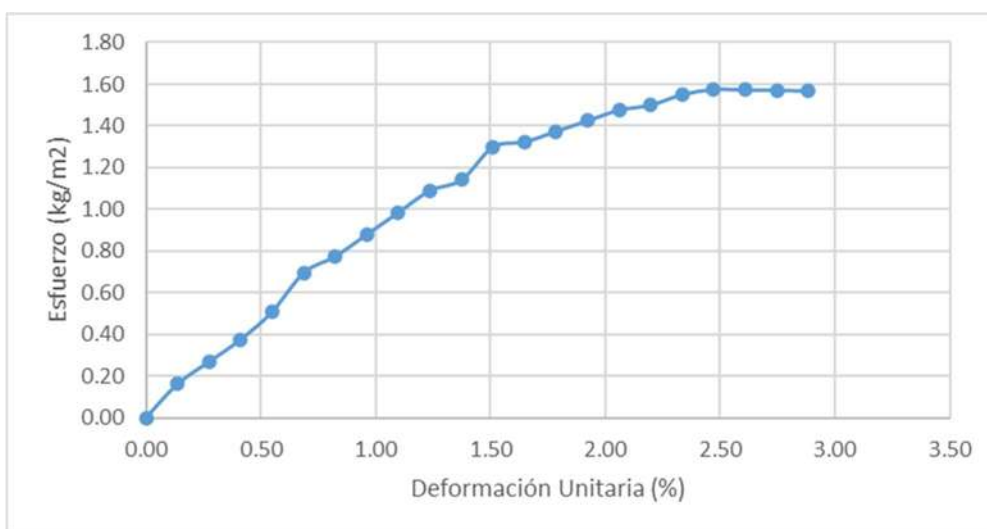


Figura 45. Deformación vs. Esfuerzo Sigma 3 0.3

Tabla 30. Resultados prueba triaxial sigma 3 0.3

<b>Esfuerzo máx (kg/cm2)</b>
1.58
<b>Centro círculo</b>
1.09
<b>Radio Círculo</b>
0.79

### 6.1.5.2 Sigma 3 0.6

Tabla 31. Resultados Sigma 3 0.3

Lectura del micrómetro de deformación	Lectura del micrómetro de carga	Carga	Deformación Total	Deformación Unitaria	1-Deformación Unitaria	Área Corregida	Esfuerzo
mm	mm	Kg	mm	-	-	cm2	Kg/cm2
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	9.85	0.00
5.00	1.50	0.90	0.13	0.00	1.00	9.87	0.09
10.00	3.00	1.80	0.25	0.00	1.00	9.88	0.18
15.00	4.00	2.40	0.38	0.00	1.00	9.89	0.24
20.00	6.00	3.60	0.51	0.01	0.99	9.91	0.36
25.00	7.00	4.20	0.64	0.01	0.99	9.92	0.42
30.00	10.00	6.00	0.76	0.01	0.99	9.94	0.60
35.00	12.50	7.50	0.89	0.01	0.99	9.95	0.75
40.00	15.00	9.00	1.02	0.01	0.99	9.97	0.90
45.00	17.00	10.20	1.14	0.01	0.99	9.98	1.02
50.00	20.00	12.00	1.27	0.01	0.99	9.99	1.20
55.00	22.00	13.20	1.40	0.02	0.98	10.01	1.32
60.00	24.00	14.40	1.52	0.02	0.98	10.02	1.44
65.00	26.00	15.60	1.65	0.02	0.98	10.04	1.55
70.00	28.00	16.80	1.78	0.02	0.98	10.05	1.67
75.00	29.50	17.70	1.91	0.02	0.98	10.07	1.76
80.00	30.50	18.30	2.03	0.02	0.98	10.08	1.82
85.00	31.50	18.90	2.16	0.02	0.98	10.10	1.87
90.00	32.00	19.20	2.29	0.03	0.97	10.11	1.90
95.00	33.00	19.80	2.41	0.03	0.97	10.13	1.96
100.00	34.00	20.40	2.54	0.03	0.97	10.14	2.01
105.00	34.50	20.70	2.67	0.03	0.97	10.16	2.04
110.00	34.50	20.70	2.79	0.03	0.97	10.17	2.04
115.00	35.00	21.00	2.92	0.03	0.97	10.19	2.06
120.00	35.00	21.00	3.05	0.03	0.97	10.20	2.06
125.00	35.50	21.30	3.18	0.04	0.96	10.22	2.08
130.00	36.00	21.60	3.30	0.04	0.96	10.23	2.11
135.00	36.00	21.60	3.43	0.04	0.96	10.25	2.11
140.00	36.00	21.60	3.56	0.04	0.96	10.26	2.10
145.00	36.00	21.60	3.68	0.04	0.96	10.28	2.10

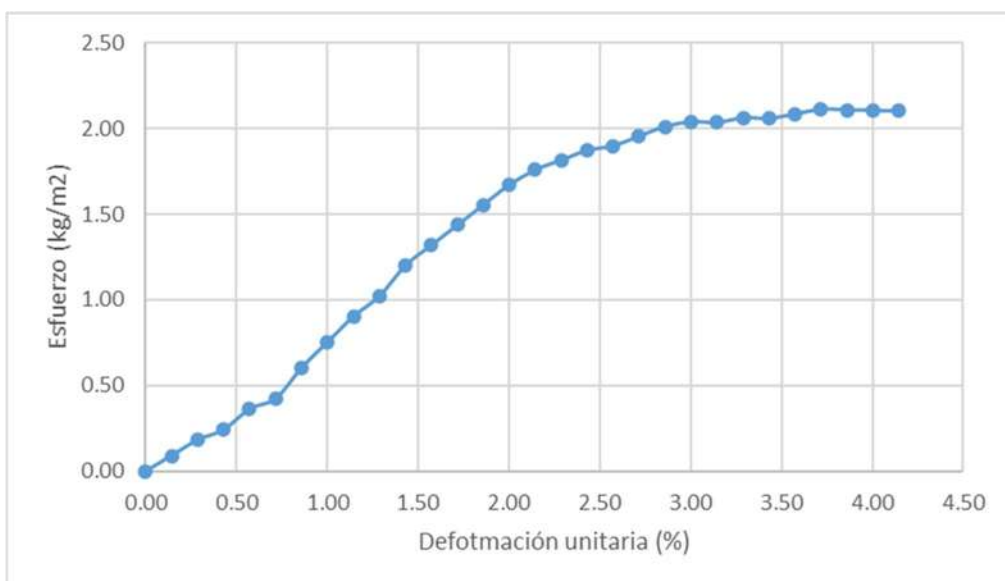


Figura 46. Deformación vs. Esfuerzo Sigma 3 0.6.

Tabla 32. Resultados Sigma 3 0.6

<b>Esfuerzo máx (kg/cm2)</b>
2.11
<b>Centro círculo</b>
1.66
<b>Radio Círculo</b>
1.06

### 6.1.5.3 Sigma 3 0.9

Tabla 33. Resultados Sigma 3 0.9

Lectura del micrómetro de deformación	Lectura del micrómetro de carga	Carga	Deformación Total	Deformación Unitaria	1-Deformación Unitaria	Área Corregida	Esfuerzo
mm	mm	Kg	mm	-	-	cm2	Kg/cm2
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	9.99	0.00
5.00	3.00	1.80	0.13	0.00	1.00	10.01	0.18
10.00	5.00	3.00	0.25	0.00	1.00	10.02	0.30
15.00	7.00	4.20	0.38	0.00	1.00	10.04	0.42
20.00	10.00	6.00	0.51	0.01	0.99	10.05	0.60
25.00	12.50	7.50	0.64	0.01	0.99	10.07	0.75
30.00	15.50	9.30	0.76	0.01	0.99	10.08	0.92
35.00	18.00	10.80	0.89	0.01	0.99	10.09	1.07
40.00	20.00	12.00	1.02	0.01	0.99	10.11	1.19
45.00	23.00	13.80	1.14	0.01	0.99	10.12	1.36
50.00	25.00	15.00	1.27	0.01	0.99	10.14	1.48
55.00	27.00	16.20	1.40	0.02	0.98	10.15	1.60
60.00	29.00	17.40	1.52	0.02	0.98	10.17	1.71
65.00	31.00	18.60	1.65	0.02	0.98	10.18	1.83
70.00	32.50	19.50	1.78	0.02	0.98	10.20	1.91
75.00	36.50	21.90	1.91	0.02	0.98	10.21	2.14
80.00	37.50	22.50	2.03	0.02	0.98	10.23	2.20
85.00	39.00	23.40	2.16	0.02	0.98	10.24	2.28
90.00	40.00	24.00	2.29	0.03	0.97	10.26	2.34
95.00	41.00	24.60	2.41	0.03	0.97	10.27	2.40
100.00	41.50	24.90	2.54	0.03	0.97	10.29	2.42
105.00	42.00	25.20	2.67	0.03	0.97	10.30	2.45
110.00	42.50	25.50	2.79	0.03	0.97	10.32	2.47
115.00	43.00	25.80	2.92	0.03	0.97	10.33	2.50
120.00	44.00	26.40	3.05	0.03	0.97	10.35	2.55
125.00	44.20	26.52	3.18	0.04	0.96	10.36	2.56
130.00	44.50	26.70	3.30	0.04	0.96	10.38	2.57
135.00	45.00	27.00	3.43	0.04	0.96	10.39	2.60
140.00	45.00	27.00	3.56	0.04	0.96	10.41	2.59
145.00	45.50	27.30	3.68	0.04	0.96	10.42	2.62
150.00	45.80	27.48	3.81	0.04	0.96	10.44	2.63
155.00	46.20	27.72	3.94	0.04	0.96	10.45	2.65
160.00	46.40	27.84	4.06	0.05	0.95	10.47	2.66
165.00	46.50	27.90	4.19	0.05	0.95	10.48	2.66
170.00	46.80	28.08	4.32	0.05	0.95	10.50	2.67
175.00	47.00	28.20	4.45	0.05	0.95	10.52	2.68
180.00	47.00	28.20	4.57	0.05	0.95	10.53	2.68
185.00	47.00	28.20	4.70	0.05	0.95	10.55	2.67
190.00	47.00	28.20	4.83	0.05	0.95	10.56	2.67

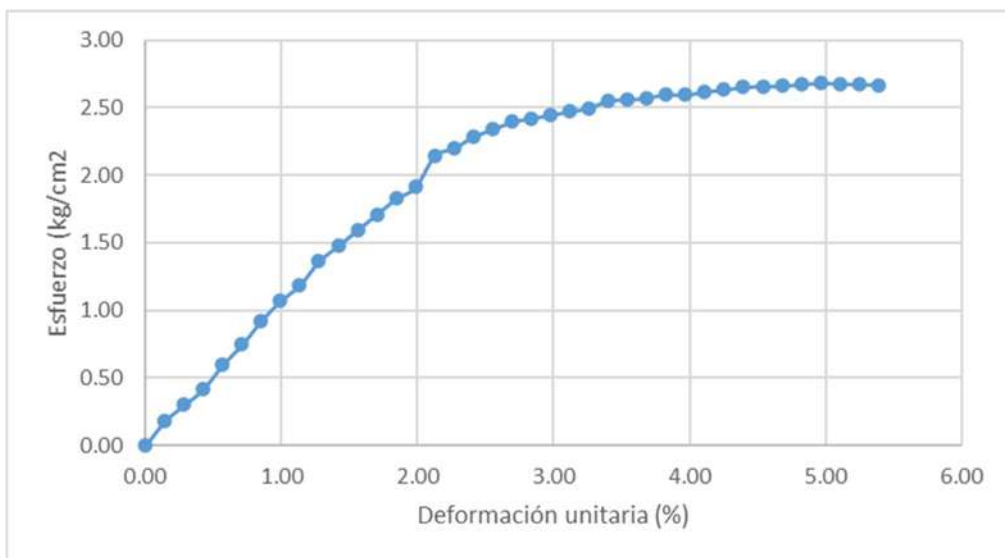


Figura 47. Deformación vs. Esfuerzo Sigma 3 0.9

Tabla 34. Resultados Sigma 3 0.9

<b>Esfuerzo máx (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	
2.11	
<b>Centro círculo</b>	
1.66	
<b>Radio Círculo</b>	
1.06	

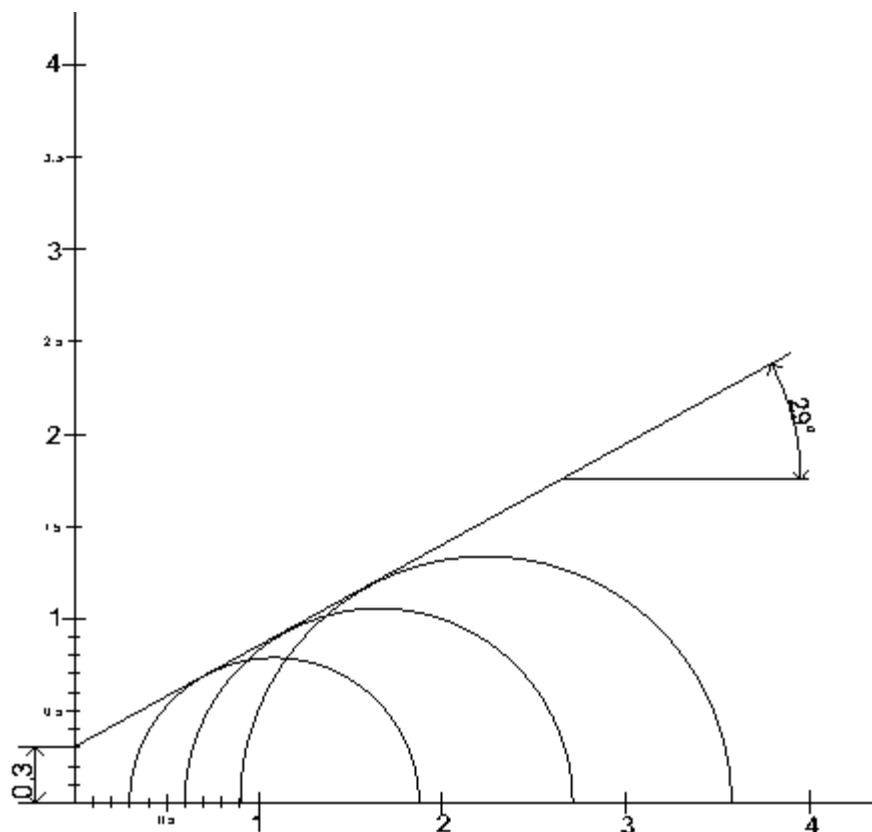


Figura 48. Envolvente de falla.

$$\phi (^{\circ}) = 29$$

$$c = 0.30$$

### 6.1.6 Densidad de sólidos

Tabla 35. Pruebas Densidad de Solidos

Prueba No.	1	2
Matraz No.	X	XV
W <sub>fsw</sub> (g)	723.20	717.60
Temperatura (°C)	27.00	28.00
W <sub>fs</sub> (g)	691.53	685.64
Cápsula de evaporación No.	10.00	20.00
Peso cápsula muestra seca (g)	707.40	706.00
Peso cápsula(g)	658.20	656.40
W <sub>s</sub> (g)	49.20	49.60
S <sub>s</sub>	2.81	2.81

## 6.2 Resultados compactaciones con LWD.

### 6.2.1 Módulos Objetivos Molde AASHTO.

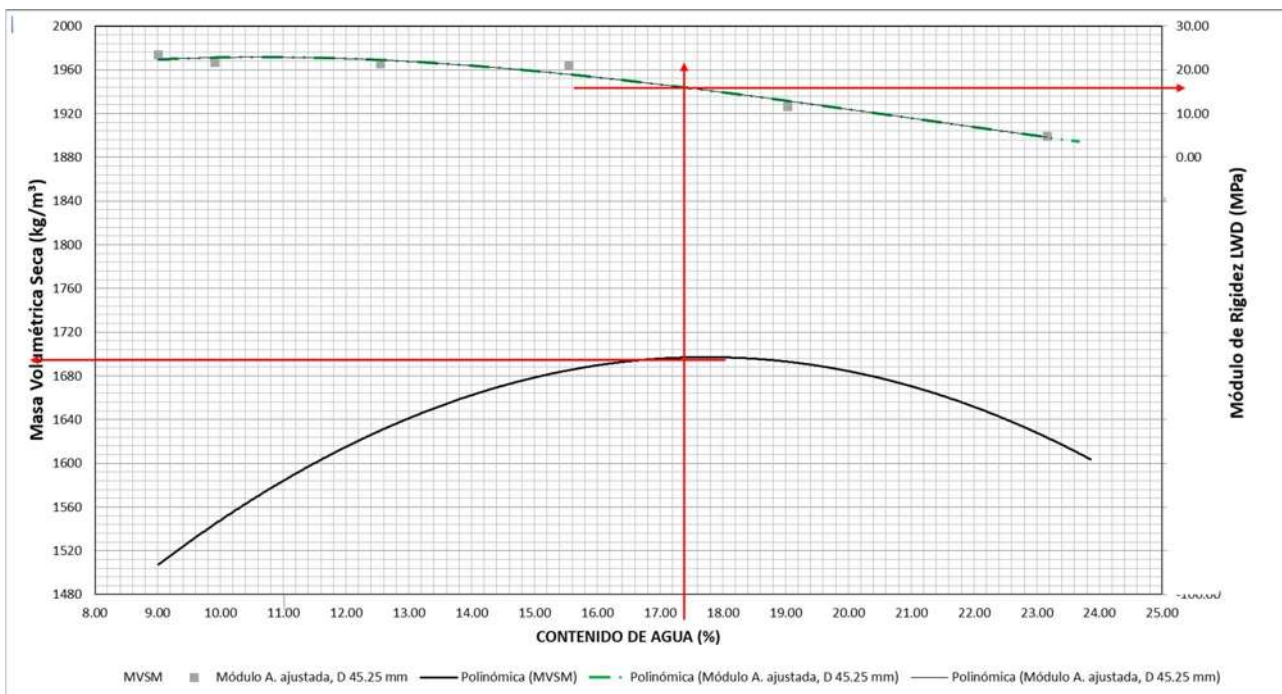


Figura 49. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.1 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 100%.

$E_{LWDObj} = 16.4 \text{ MPa}$

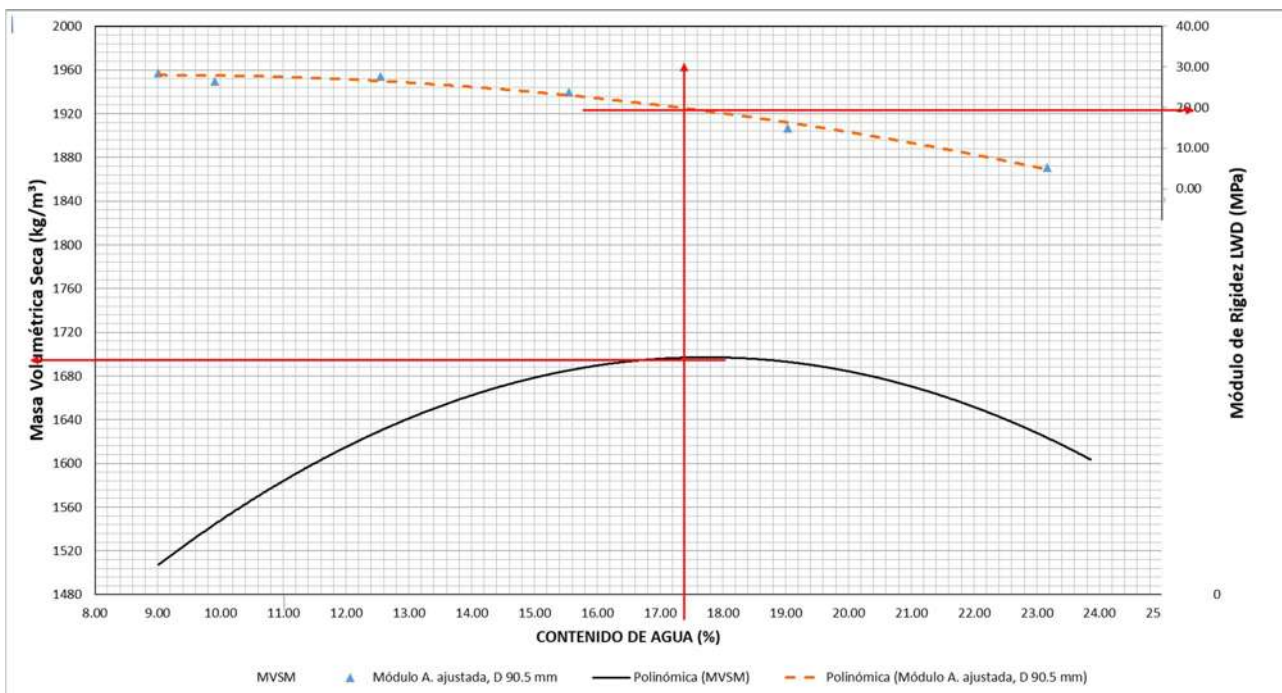


Figura 50. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.14 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 100%.

$E_{LWDObj} = 19 \text{ MPa}$

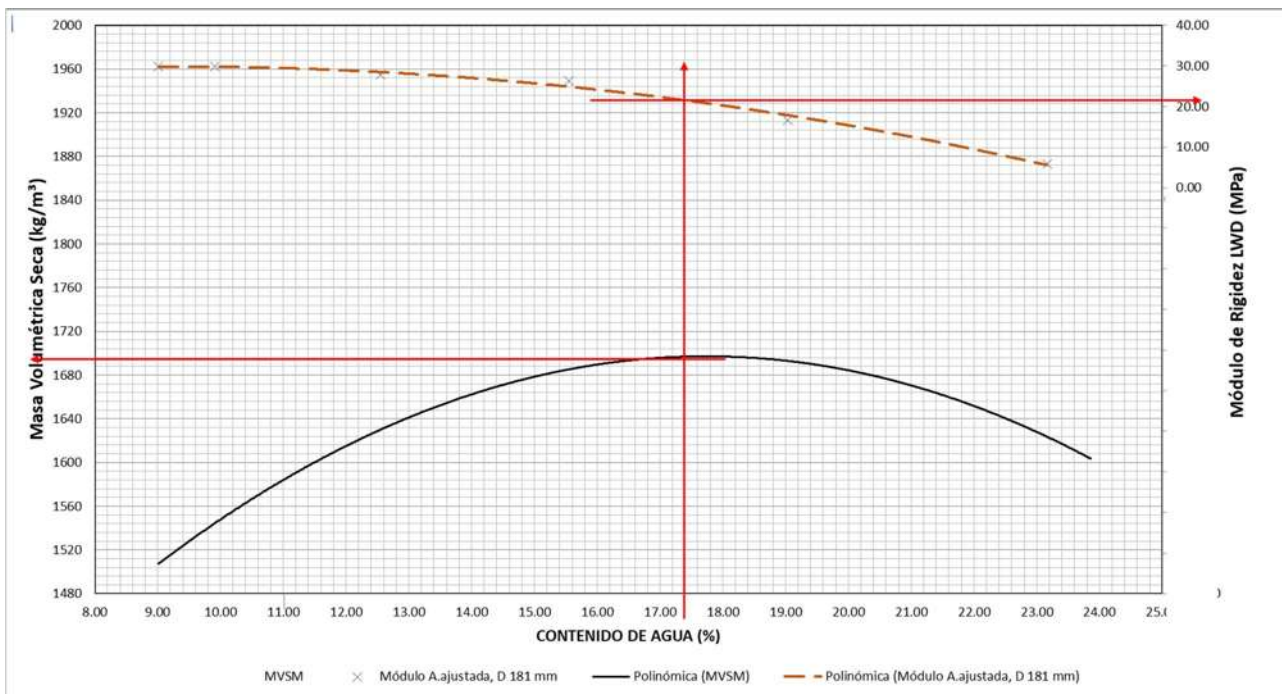


Figura 51. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.20 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 100%.

$E_{LWDObj} = 21.2 \text{ MPa}$ .

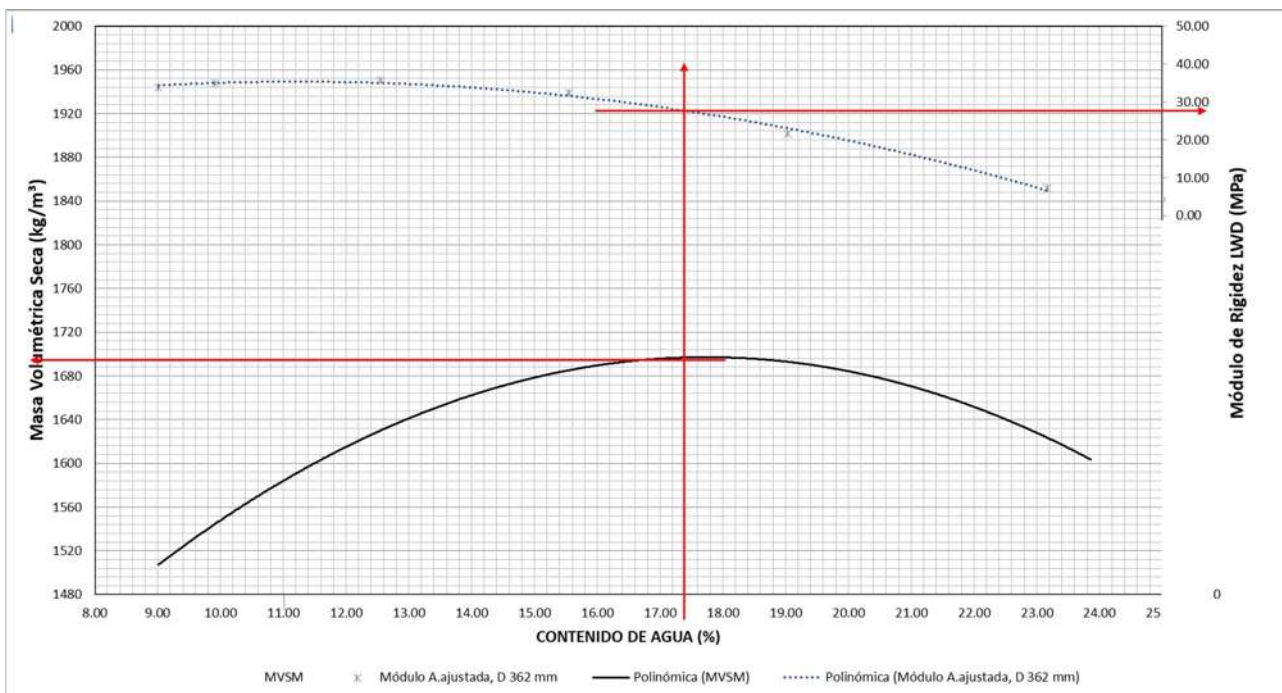


Figura 52. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo = 0.283 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 100%.

$E_{LWDObj} = 27.3 \text{ MPa}$ .

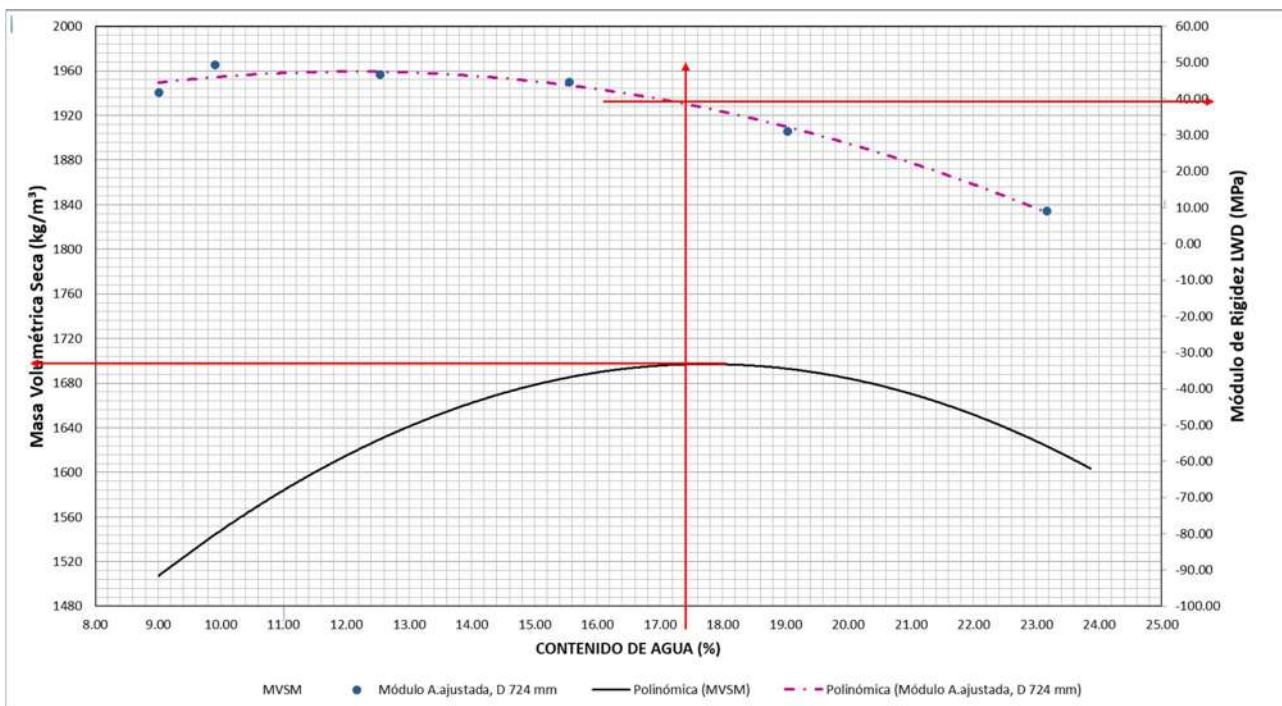


Figura 53. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.40 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 100%.

$E_{LWDObj} = 37.9 \text{ MPa}$ .

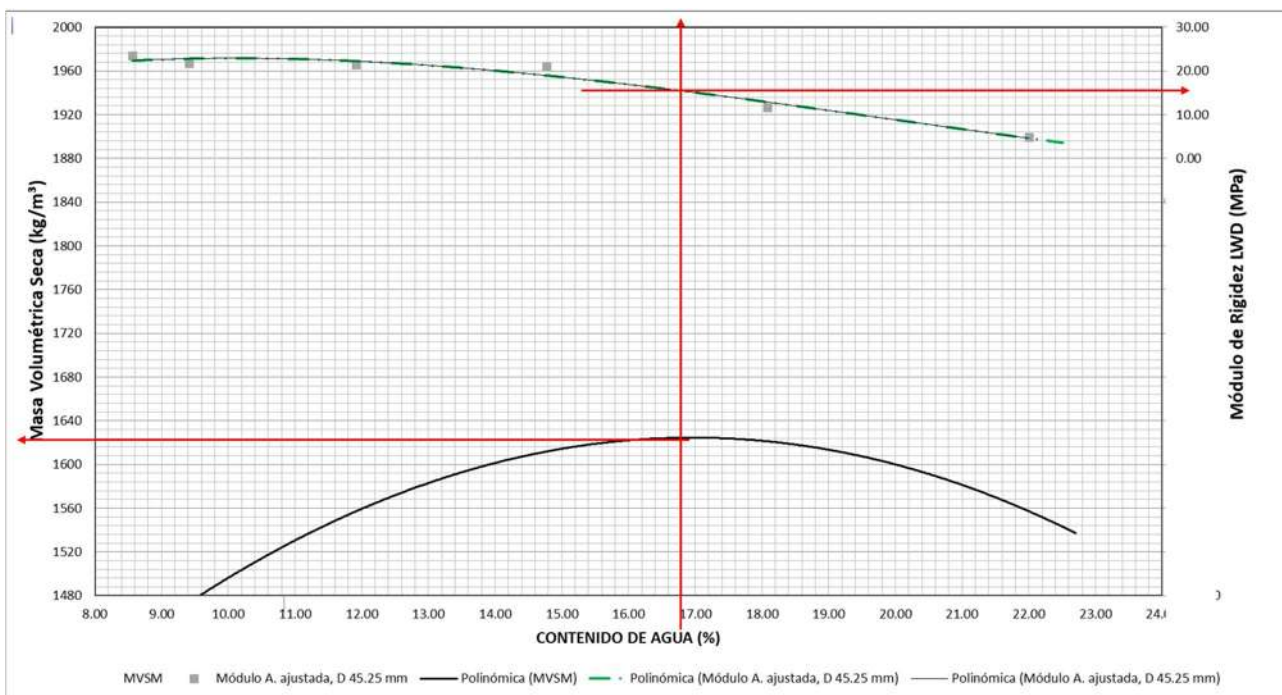


Figura 54. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.1 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 95%.

$E_{LWDObj} = 17 \text{ MPa}$ .

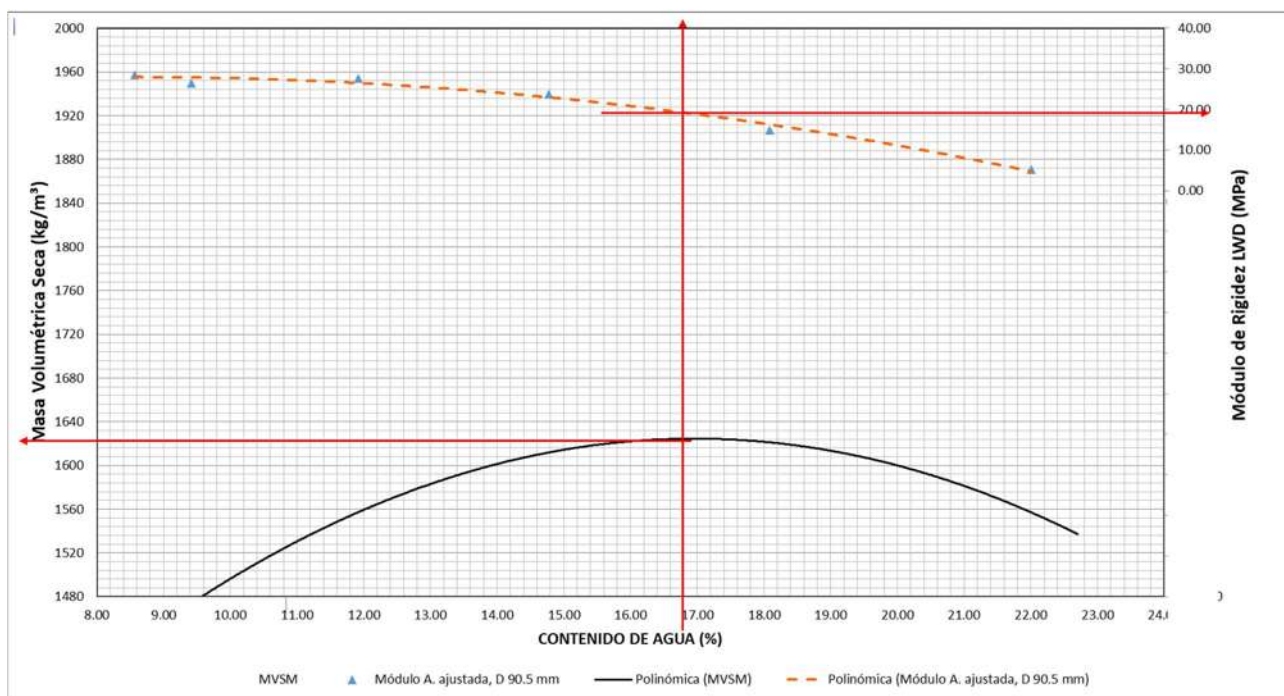


Figura 55. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.14 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 95%.

$E_{LWDObj} = 19 \text{ MPa}$ .

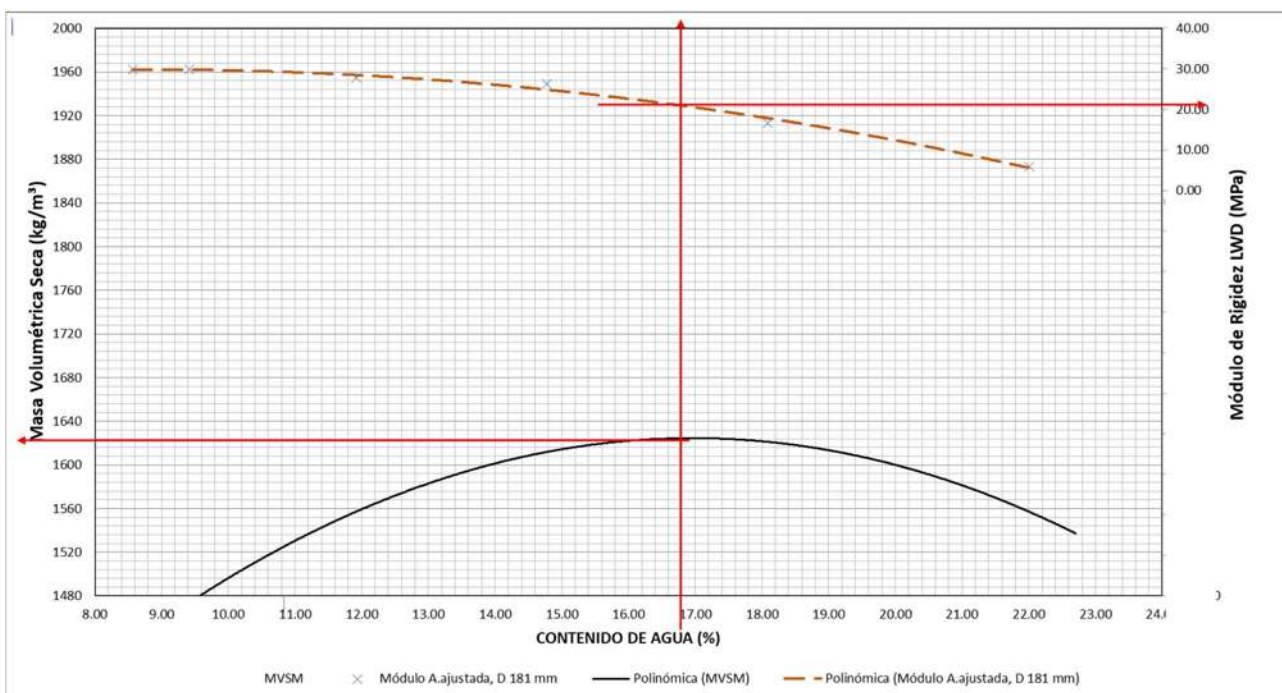


Figura 56. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.2 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 95%.

$E_{LWDObj} = 22 \text{ MPa}$ .

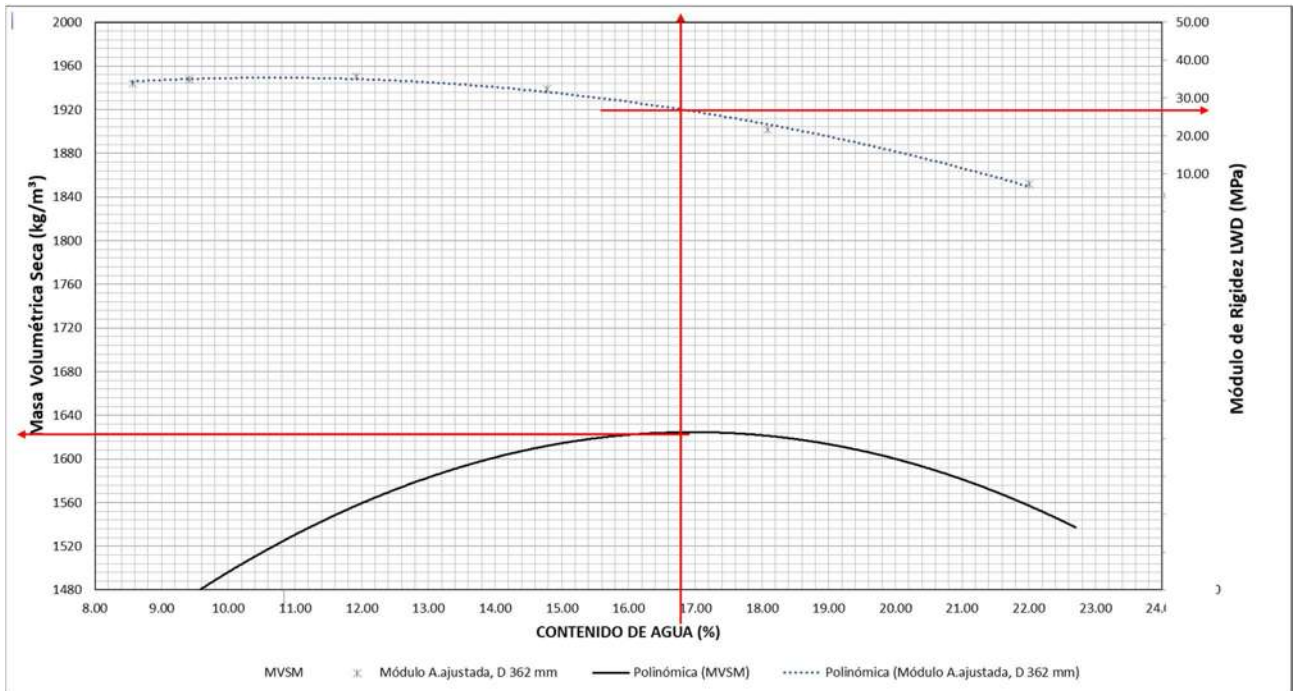


Figura 57. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.283 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 95%.

$E_{LWDObj} = 28 \text{ MPa}$ .

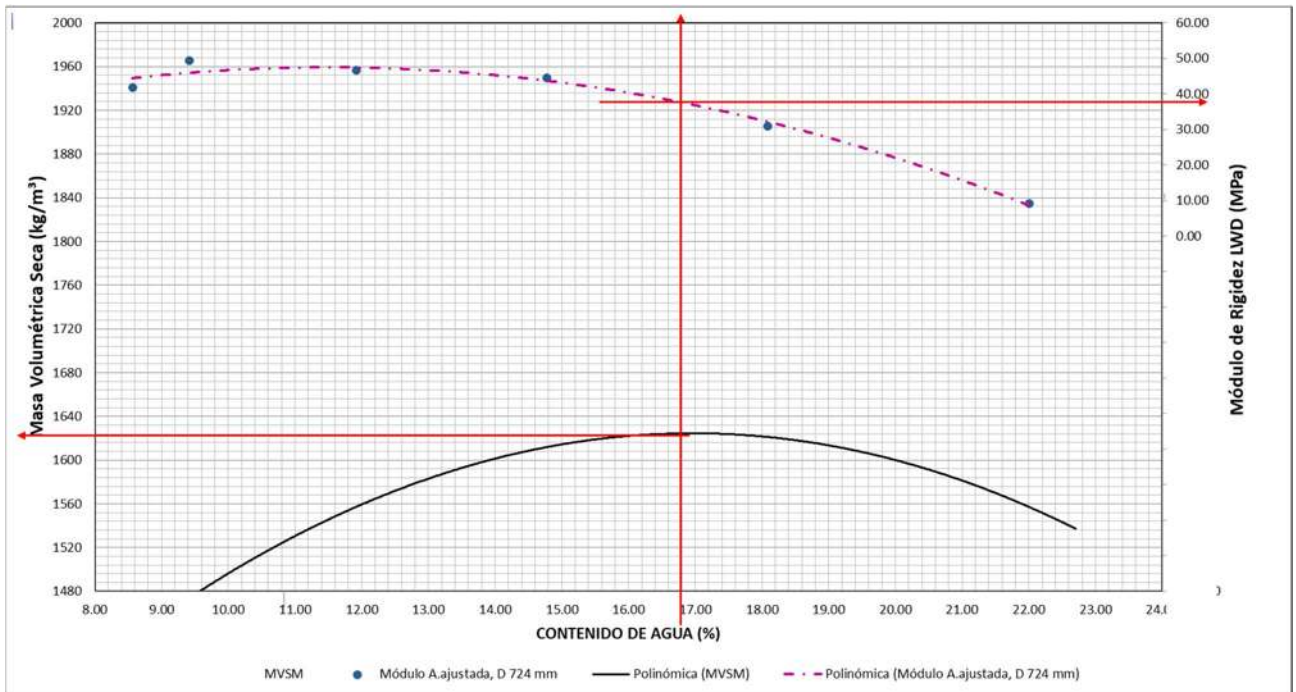


Figura 58. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.40 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 95%.

$E_{LWDObj} = 38 \text{ MPa}$ .

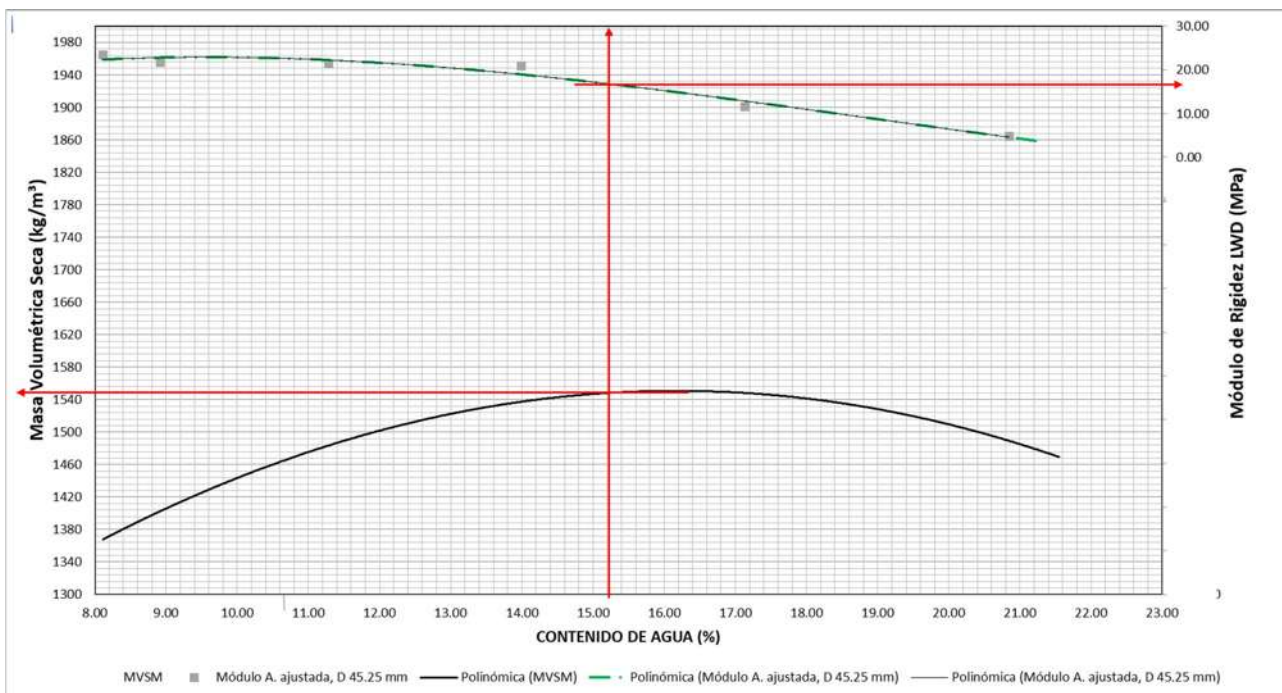


Figura 59. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.10 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 90%.

$E_{LWDObj} = 17.3 \text{ MPa}$ .

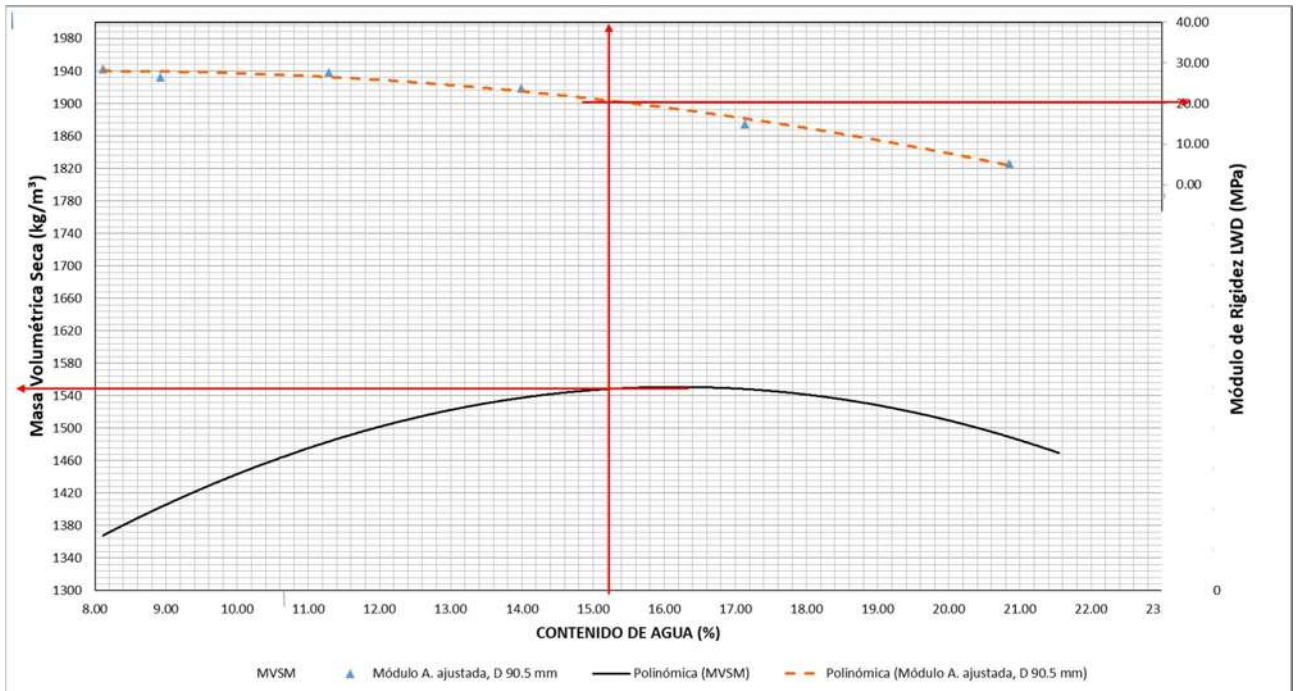


Figura 60. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.14 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 90%.

$E_{LWDObj} = 20 \text{ MPa}$ .

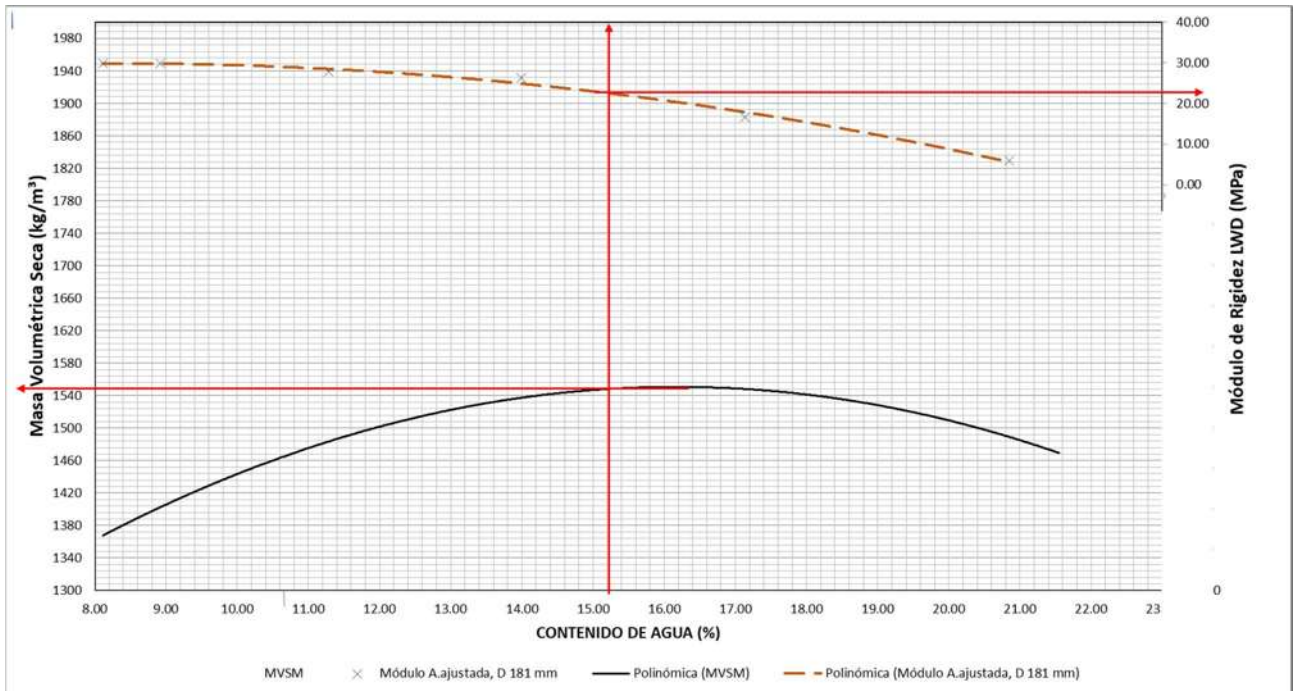


Figura 61. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.19 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 90%.

$E_{LWDObj} = 22.7 \text{ MPa}$ .

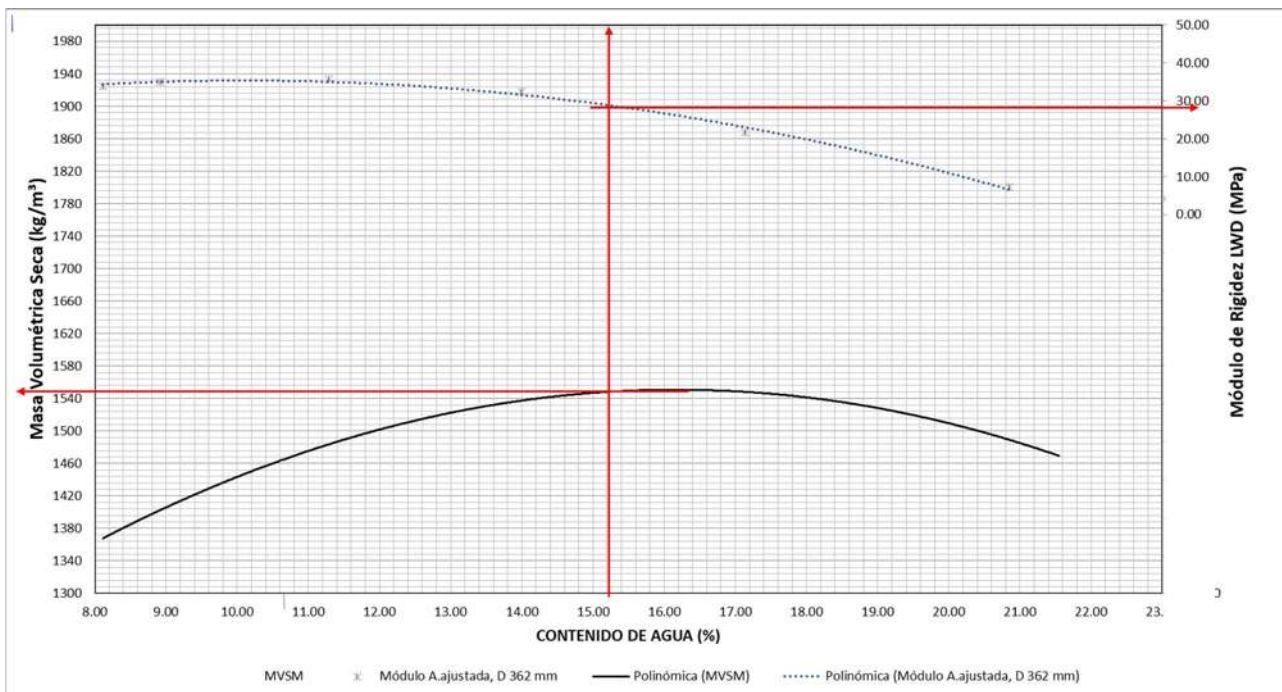


Figura 62. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.283 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 90%.

$E_{LWDObj} = 29 \text{ MPa}$ .

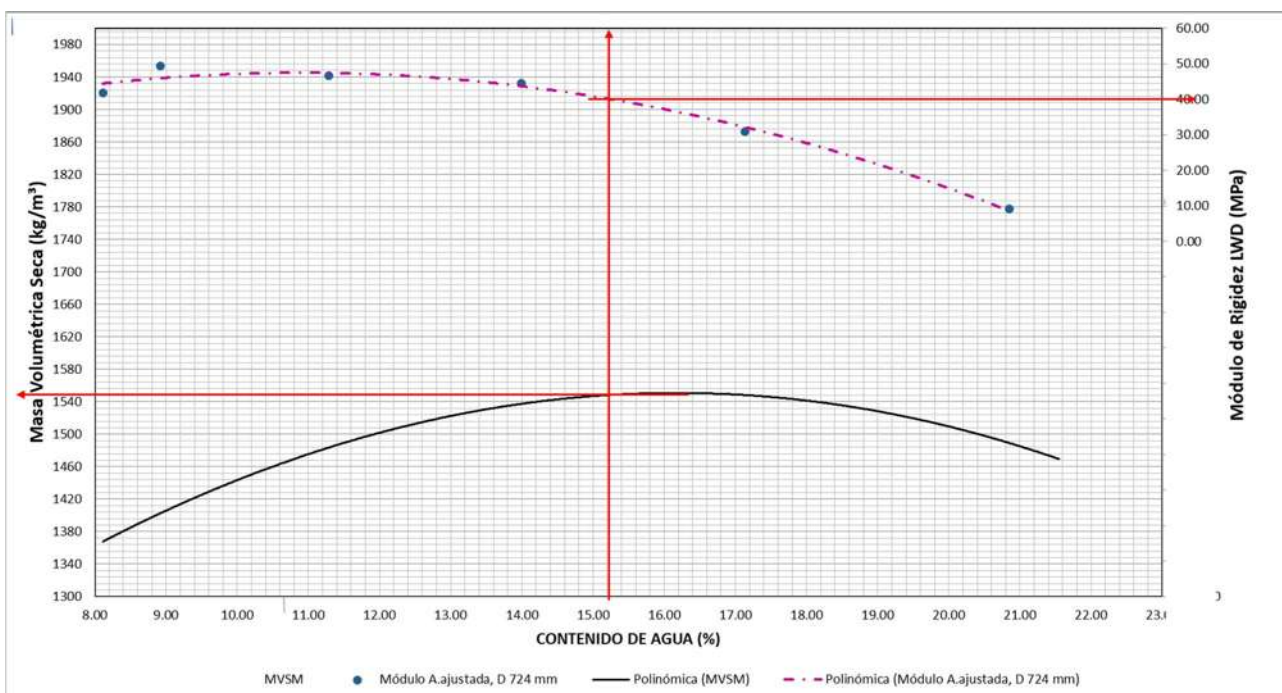


Figura 63. Módulo de Rigidez Objetivo esfuerzo= 0.40 MPa en molde de compactación AASHTO tradicional compactación 90%.

$E_{LWDobj} = 40 \text{ MPa}$ .

## 6.2.2 Cálculos LWD en moldes con dimensiones incrementadas.

### 6.2.2.1 Molde 1.5 AASHTO.

Tabla 36. Cálculo  $E_{LWDlab}$  molde 1.5 AASHTO con 90% de compactación.

Prueba	Altura (mm)	Rigidez (k) Zorn	Coficiente Poisson	Hmolde(mm)	D(mm)	Deflexión Promedio Zorn	Fuerza (kN)	Esfuerzo	Módulo Zorn	Módulo Zorn Cacl
2	45.25	1285.4545	0.3000	195.5000	150.0000	1.3750	1.7675	0.1000	80.79	10.56
	90.5	1442.3673	0.3000	195.5000	150.0000	1.7330	2.4996	0.1400	63.56	11.85
	181	1643.4217	0.3000	195.5000	150.0000	2.1510	3.5350	0.2000	45.27	13.51
	362	1738.2632	0.3000	195.5000	150.0000	2.8760	4.9992	0.2829	33.11	14.29
	724	2014.8190	0.3000	195.5000	150.0000	3.5090	7.07	0.4000	13.9	16.56

Tabla 37. Cálculo  $E_{LWDlab}$  molde 1.5 AASHTO con 95% de compactación.

Prueba	Altura (mm)	Rigidez (k) Zorn	Coficiente Poisson	Hmolde(mm)	D(mm)	Deflexión Promedio Zorn	Fuerza (kN)	Esfuerzo	Módulo Zorn	Módulo Zorn Cacl
2	45.25	1709.3810	0.3000	195.5000	150.0000	1.0340	1.7675	0.1000	43.52	14.05
	90.5	1722.6895	0.3000	195.5000	150.0000	1.4510	2.4996	0.1400	31.01	14.16
	181	1746.5415	0.3000	195.5000	150.0000	2.0240	3.5350	0.2000	22.23	14.35
	362	1829.8847	0.3000	195.5000	150.0000	2.7320	4.9992	0.2829	16.47	15.04
	724	1929.0587	0.3000	195.5000	150.0000	3.6650	7.07	0.4000	12.28	15.85

Tabla 38. Cálculo  $E_{LWDlab}$  molde 1.5 AASHTO con 100% de compactación.

Prueba	Altura (mm)	Rigidez (k) Zorn	Coficiente Poisson	Hmolde(mm)	D(mm)	Deflexión Promedio Zorn	Fuerza (kN)	Esfuerzo	Módulo Zorn	Módulo Zorn Cacl
2	45.25	1884.3284	0.3000	195.5000	150.0000	0.9380	1.7675	0.1000	80.79	15.49
	90.5	2083.0187	0.3000	195.5000	150.0000	1.2000	2.4996	0.1400	63.56	17.12
	181	2396.6102	0.3000	195.5000	150.0000	1.4750	3.5350	0.2000	45.27	19.70
	362	2587.6009	0.3000	195.5000	150.0000	1.9320	4.9992	0.2829	33.11	21.27
	724	2820.1037	0.3000	195.5000	150.0000	2.5070	7.07	0.4000	13.9	23.18

Tabla 39. Cálculo  $E_{LWDLab}$  molde 1.5 AASHTO con 90% de compactación con menor contenido de agua.

Prueba	Altura (mm)	Rigidez (k) Zorn	Coefficiente Poisson	Hmolde(mm)	D(mm)	Deflexión Promedio Zorn	Fuerza (kN)	Esfuerzo	Módulo Zorn	Módulo Zorn Cacl
2	45.25	3825.7576	0.3000	195.5000	150.0000	0.4620	1.7675	0.1000	97.40	31.44
	90.5	4159.1056	0.3000	195.5000	150.0000	0.6010	2.4996	0.1400	74.88	34.18
	181	4889.3499	0.3000	195.5000	150.0000	0.7230	3.5350	0.2000	62.24	40.18
	362	5433.9619	0.3000	195.5000	150.0000	0.9200	4.9992	0.2829	48.91	44.66
	724	6063.4648	0.3000	195.5000	150.0000	1.1660	7.07	0.4000	38.59	49.83

### 6.2.2.2 Molde 2.0 AASHTO

Tabla 40. Cálculo  $E_{LWDLab}$  molde 2.0 AASHTO con 90% de compactación placa 150 mm.

Prueba	Altura (mm)	Rigidez (k) Zorn (N/mm)	Coefficiente Poisson	Hmolde(mm)	D(mm)	Deflexión Promedio Zorn (mm)	Fuerza (kN)	Esfuerzo (MN/m2)	Módulo Zorn (Mpa)	Módulo Zorn Cacl (Mpa)
1	45.25	3237.1795	0.3000	236.0000	150.0000	0.5460	1.77	0.10	82.42	32.12
	90.5	3428.8374	0.3000	236.0000	150.0000	0.7290	2.50	0.14	61.73	34.02
	181	3958.5666	0.3000	236.0000	150.0000	0.8930	3.54	0.20	50.39	39.27
	362	4487.6526	0.3000	236.0000	150.0000	1.1140	5.00	0.28	40.39	44.52
	724	5272.1849	0.3000	236.0000	150.0000	1.3410	7.07	0.40	33.56	52.30

Tabla 41. Cálculo  $E_{LWDLab}$  molde 2.0 AASHTO con 95% de compactación placa 150 mm.

Prueba	Altura (mm)	Rigidez (k) Zorn (N/mm)	Coefficiente Poisson	Hmolde(mm)	D(mm)	Deflexión Promedio Zorn (mm)	Fuerza (kN)	Esfuerzo (MN/m2)	Módulo Zorn (Mpa)	Módulo Zorn Cacl (Mpa)
1	45.25	3801.0753	0.3000	236.0000	150.0000	0.4650	1.77	0.10	96.8	37.71
	90.5	4186.9723	0.3000	236.0000	150.0000	0.5970	2.50	0.14	75.4	41.54
	181	4809.5238	0.3000	236.0000	150.0000	0.7350	3.54	0.20	61.2	47.71
	362	5439.8748	0.3000	236.0000	150.0000	0.9190	5.00	0.28	49	53.97
	724	6196.3190	0.3000	236.0000	150.0000	1.1410	7.07	0.40	39.4	61.47

Tabla 42. Cálculo  $E_{LWDLab}$  molde 2.0 AASHTO con 100% de compactación placa 150 mm.

Prueba	Altura (mm)	Rigidez (k) Zorn (N/mm)	Coefficiente Poisson	Hmolde(mm)	D(mm)	Deflexión Promedio Zorn (mm)	Fuerza (kN)	Esfuerzo (MN/m2)	Módulo Zorn (Mpa)	Módulo Zorn Cacl (Mpa)
1	45.25	3936.5256	0.3000	236.0000	150.0000	0.4490	1.77	0.10	104.2000	39.05
	90.5	4561.3549	0.3000	236.0000	150.0000	0.5480	2.50	0.14	82.1333	45.25
	181	6450.7299	0.3000	236.0000	150.0000	0.5480	3.54	0.20	104.2000	45.96
	362	4728.1636	0.3000	236.0000	150.0000	1.0573	5.00	0.28	104.2000	46.91
	724	5149.3081	0.3000	236.0000	150.0000	1.3730	7.07	0.40	104.2000	51.09

Tabla 43. Cálculo  $E_{LWDLab}$  molde 2.0 AASHTO con 90% de compactación con menor contenido de agua placa 150 mm.

Prueba	Altura (mm)	Rigidez (k) Zorn (N/mm)	Coefficiente Poisson	Hmolde(mm)	D(mm)	Deflexión Promedio Zorn (mm)	Fuerza (kN)	Esfuerzo (MN/m2)	Módulo Zorn (Mpa)	Módulo Zorn Cacl (Mpa)
1	45.25	3945.3125	0.3000	236.0000	150.0000	0.4480	1.77	0.10	100.45	39.14
	90.5	3893.4929	0.3000	236.0000	150.0000	0.6420	2.50	0.14	70.09	38.83
	181	4694.5551	0.3000	236.0000	150.0000	0.7530	3.54	0.20	59.76	46.57
	362	5536.2624	0.3000	236.0000	150.0000	0.9030	5.00	0.28	49.83	54.92
	724	6273.2919	0.3000	236.0000	150.0000	1.1270	7.07	0.40	39.93	62.24

Tabla 44. Cálculo  $E_{LWDLab}$  molde 2.0 AASHTO con 90% de compactación placa 300 mm en concreto.

Prueba	Altura (mm)	Rigidez (k) Zorn (N/mm)	Coefficiente Poisson	Hmolde(mm)	D(mm)	Deflexión Promedio Zorn (mm)	Fuerza (kN)	Esfuerzo (MN/m2)	Módulo Zorn (Mpa)	Módulo Zorn Cacl (Mpa)
1	45.25	3689.9791	0.3000	236.0000	300.0000	0.4790	1.7675	0.03	46.97	9.15
	90.5	4569.6937	0.3000	236.0000	300.0000	0.5470	2.4996	0.04	41.13	11.33
	181	5260.4167	0.3000	236.0000	300.0000	0.6720	3.5350	0.05	33.48	13.05
	362	5994.2985	0.3000	236.0000	300.0000	0.8340	4.9992	0.07	26.98	14.87
	724	6911.0459	0.3000	236.0000	300.0000	1.0230	7.07	0.10	21.99	17.14

Tabla 45. Cálculo  $E_{LWDLab}$  molde 2.0 AASHTO con 95% de compactación placa 300 mm en concreto.

Prueba	Altura (mm)	Rigidez (k) Zorn (N/mm)	Coefficiente Poisson	Hmolde(mm)	D(mm)	Deflexión Promedio Zorn (mm)	Fuerza (kN)	Esfuerzo (MN/m2)	Módulo Zorn (Mpa)	Módulo Zorn Cacl (Mpa)
1	45.25	4764.1509	0.3000	236.0000	300.0000	0.3710	1.7675		60.7	11.82
	90.5	5153.8696	0.3000	236.0000	300.0000	0.4850	2.4996		46.4	12.78
	181	5489.1304	0.3000	236.0000	300.0000	0.6440	3.5350		34.9	13.61
	362	6023.1867	0.3000	236.0000	300.0000	0.8300	4.9992		27.1	14.94
	724	6546.2963	0.3000	236.0000	300.0000	1.0800	7.07		20.8	16.24

Tabla 46. Cálculo  $E_{LWDLab}$  molde 2.0 AASHTO con 100% de compactación placa 300 mm en concreto.

Prueba	Altura (mm)	Rigidez (k) Zorn (N/mm)	Coefficiente Poisson	Hmolde(mm)	D(mm)	Deflexión Promedio Zorn (mm)	Fuerza (kN)	Esfuerzo (MN/m2)	Módulo Zorn (Mpa)	Módulo Zorn Cacl (Mpa)
1	45.25	4110.4651	0.3000	236.0000	300.0000	0.4300	1.7675	0.0250	52.33	10.195
	90.5	4831.7445	0.3000	236.0000	300.0000	0.5173	2.4996	0.0354	43.49	11.984
	181	6833.1186	0.3000	236.0000	300.0000	0.5173	3.5350	0.0500	43.49	12.780
	362	5583.6690	0.3000	236.0000	300.0000	0.8953	4.9992	0.0707	25.13	13.849
	724	6295.6367	0.3000	236.0000	300.0000	1.1230	7.07	0.1000	20.04	15.614

Tabla 47. Cálculo  $E_{LWDLab}$  molde 2.0 AASHTO con 90% de compactación con menor contenido de agua placa 300 mm en concreto.

Prueba	Altura (mm)	Rigidez (k) Zorn (N/mm)	Coefficiente Poisson	Hmolde(mm)	D(mm)	Deflexión Promedio Zorn (mm)	Fuerza (kN)	Esfuerzo (MN/m2)	Módulo Zorn (Mpa)	Módulo Zorn Cacl (Mpa)
1	45.25	5050.0000	0.3000	236.0000	300.0000	0.3500	1.7675	0.0250	64.29	12.52
	90.5	5422.1746	0.3000	236.0000	300.0000	0.4610	2.4996	0.0354	48.81	13.45
	181	5971.2838	0.3000	236.0000	300.0000	0.5920	3.5350	0.0500	38.01	14.81
	362	6933.7655	0.3000	236.0000	300.0000	0.7210	4.9992	0.0707	31.21	17.20
	724	8052.3918	0.3000	236.0000	300.0000	0.8780	7.07	0.1000	25.63	19.97

Tabla 48. Cálculo  $E_{LWDLab}$  molde 2.0 AASHTO con 90% de compactación placa 300 mm en jardín

Prueba	Altura (mm)	Rigidez (k) Zorn	Coefficiente Poisson	Hmolde(mm)	D(mm)	Deflexión Promedio Zorn (mm)	Fuerza (kN)	Esfuerzo(MN/m2)	Módulo Zorn (Mpa)	Módulo Zorn Cacl (Mpa)
1	45.25	1709.3810	0.3000	236.0000	300.0000	1.0340	1.7675	0.0250	21.8	4.24
	90.5	1722.6895	0.3000	236.0000	300.0000	1.4510	2.4996	0.0354	15.5	4.27
	181	1746.5415	0.3000	236.0000	300.0000	2.0240	3.5350	0.0500	11.1	4.33
	362	1829.8847	0.3000	236.0000	300.0000	2.7320	4.9992	0.0707	8.2	4.54
	724	1929.0587	0.3000	236.0000	300.0000	3.6650	7.07	0.1000	6.1	4.78

Tabla 49. Cálculo  $E_{LWDLab}$  molde 2.0 AASHTO con 95% de compactación placa 300 mm en jardín.

Prueba	Altura (mm)	Rigidez (k) Zorn	Coefficiente Poisson	Hmolde(mm)	D(mm)	Deflexión Promedio Zorn (mm)	Fuerza (kN)	Esfuerzo(MN/m2)	Módulo Zorn (Mpa)	Módulo Zorn Cacl (Mpa)
1	45.25	1656.4136	0.3000	236.0000	300.0000	1.0670	1.7675	0.0250	21.1	4.11
	90.5	1612.6597	0.3000	236.0000	300.0000	1.3657	2.4996	0.0354	14.5	4.00
	181	1623.7942	0.3000	236.0000	300.0000	2.1770	3.5350	0.0500	10.3	4.03
	362	1656.4761	0.3000	236.0000	300.0000	3.0180	4.9992	0.0707	7.5	4.11
	724	1942.8414	0.3000	236.0000	300.0000	3.6390	7.07	0.1000	6.2	4.82

Tabla 50. Cálculo  $E_{LWDLab}$  molde 2.0 AASHTO con 100% de compactación placa 300 mm en jardín.

Prueba	Altura (mm)	Rigidez (k) Zorn	Coefficiente Poisson	Hmolde(mm)	D(mm)	Deflexión Promedio Zorn (mm)	Fuerza (kN)	Esfuerzo(MN/m2)	Módulo Zorn (Mpa)	Módulo Zorn Cacl (Mpa)
1	45.25	1908.0605	0.3000	236.0000	300.0000	0.9263	1.7675	0.0250	24.3	4.73
	90.5	1830.3313	0.3000	236.0000	300.0000	1.3657	2.4996	0.0354	16.5	4.54
	181	2588.4794	0.3000	236.0000	300.0000	1.3657	3.5350	0.0500	16.5	4.24
	362	1546.7961	0.3000	236.0000	300.0000	3.2320	4.9992	0.0707	7.0	3.84
	724	1483.2168	0.3000	236.0000	300.0000	4.7667	7.07	0.1000	4.7	3.68

Tabla 51. Cálculo  $E_{LWDLab}$  molde 2.0 AASHTO con 90% de compactación con menor contenido de agua placa 300 mm en jardín.

Prueba	Altura (mm)	Rigidez (k) Zorn	Coefficiente Poisson	Hmolde(mm)	D(mm)	Deflexión Promedio Zorn (mm)	Fuerza (kN)	Esfuerzo(MN/m2)	Módulo Zorn (Mpa)	Módulo Zorn Cacl (Mpa)
1	45.25	1898.4962	0.3000	236.0000	300.0000	0.9310	1.7675	0.0250	24.2	4.71
	90.5	1955.8861	0.3000	236.0000	300.0000	1.2780	2.4996	0.0354	17.6	4.85
	181	2043.3526	0.3000	236.0000	300.0000	1.7300	3.5350	0.0500	13.0	5.07
	362	2137.3429	0.3000	236.0000	300.0000	2.3390	4.9992	0.0707	9.6	5.30
	724	2160.0978	0.3000	236.0000	300.0000	3.2730	7.07	0.1000	6.9	5.36

## 7. Bibliografía

Academia Khan. (2020). *¿Qué es la ley de Hooke?*. Curso: Lecciones de física. Recuperado de: <https://es.khanacademy.org/science/physics/work-and-energy/hookes-law/a/what-is-hookes-law>

Afsharikia, Z., & Schwartz, C. W. (2018). *Implementation of lightweight deflectometer (LWD) for modulus based compaction quality assurance of unbound materials-- SHAUM 4-51 final report*. Universidad de Maryland, Parque Universitario.

Aguirre, A., Alaniz, I., Mendoza, J., Rodríguez, M., & Velázquez, M. (2010). *Programa de seguridad para el transporte y manejo del densímetro nuclear en el instituto mexicano del cemento y del concreto, AC*. [Tesis Licenciatura]. Instituto Politécnico Nacional. México.

Alshibli, K. A., Abu-Farsakh, M., & Seyman, E. (2005). *Laboratory evaluation of the geogauge and light falling weight deflectometer as construction control tools*. Diario de los Materiales en Ingeniería Civil. 17(5), 560–569.

American Society for Testing Materials. (2011). Norma ASTM E2583-07(2020). *Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD)*. Comité E17.

American Society for Testing Materials. (2016). Norma ASTM D2167-15 (2020). *Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Rubber Balloon Method*. Comité D18.

American Society for Testing Materials. (2016). Norma ASTM D2850-03(2017). *Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils*. Comité D18.

Asociación Francesa de la Normalización. (2000). Norma NFP 94-105. *Método del penetrómetro dinámico de energía variable — Principio y método de calibrado del penetrómetro — Explotación de resultados — Interpretación*. Libro XP Reconocimiento y pruebas: Control de calidad de compactación.

- Bretreger, A. (2015). Guía técnica L-G-002. *Field density testing by using a nuclear density gauge*. Gobierno de NSW.
- Castañeda, J. (2021). *AC Capas compactadas mediante LWD*. [Figura]. Conferencia en línea de Grupo Calidra de Occidente. Recuperada de: <https://www.youtube.com/watch?v=2iY8nu7eL7c&t=3000s>
- Das, B., (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Cengage Learning. México.
- Duddu, S. R., & Chennarapu, H. (2022). *Quality control of compaction with lightweight deflectometer (LWD) device: a state-of-art*. Diario Internacional de la Geo-Ingeniería, 13(1).
- Elhakim, A. F., Elbaz, K., & Amer, M. I. (2014). *The use of light weight deflectometer for in situ evaluation of sand degree of compaction*. HBRC Journal, 10(3), 298–307.
- Fleming, P. R., Frost, M. W., & Lambert, J. P. (2007). *Review of lightweight deflectometer for routine in situ assessment of pavement material stiffness [Figura]*. Registro de investigación de transporte, 2004(1), 80–87.
- Grainer. (2023). *Grainger approved Voluvessel, 1600 mL*. [Figura]. Recuperado de: <https://www.grainger.com/product/GRAINGER-APPROVED-Voluvessel-5DPH5>
- Guzmán, A. (2013). *Manual operativo del aparato de globo de hule ASTM D 2167, análisis comparativo y descriptivo con el método del cono de arena ASTM D2167 para la determinación de la densidad de campo*. [Tesis Licenciatura]. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala
- Mabel, S. (2007). *“LAS FUERZAS Y SU MEDICIÓN”: LEY DE HOOKE*. [Curso]. Escuela de Enseñanza Media N° 221 "Malvinas Argentinas",
- Moneef, N. (2015). *Chapter 6: Work, energy and power. [Presentación de PowerPoint]*. Universidad de King Saud. Recuperado de : <https://slideplayer.com/slide/5273601/>
- Mora, R. (2020). Técnicas de mejoramiento de suelos. Conferencia Geotecnia Introductiva G-0032. DOI: 10.13140/RG.2.2.20060.62082

---

Narvaez,E. (2017) . *Estudios comparativos del grado de compactación y módulo de young para evaluar la respuesta mecánica en rellenos estructurales*. [Proyecto para grado de Licenciatura]. Universidad Técnica de Machala. Ecuador.

Rico, A., & Del Castillo, H. (1992). *Consideraciones sobre compactación de suelos en obras de infraestructura de transporte*. ISSN 0188-7114. Documento Técnico No. 7. De la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes & el Instituto Mexicano del Transporte. México.

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2003). Manual M•MMP•1•06/03 *Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías*. Libro MMP Métodos de muestreo y prueba de materiales.

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2006). M•MMP•1•09/06, *Compactación AASHTO*. Libro MMP Métodos de muestreo y prueba de materiales.

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2001). M•CAL•1•02/01. *Criterios Estadísticos de Muestreo. Libro Cal Control y aseguramiento de calidad*

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2004). M•MMP•1•04, *Contenido de Agua*. Libro MMP Métodos de muestreo y prueba de materiales

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2003). M•MMP•1•07/03. *Límites de Consistencia*. Libro MMP Métodos de muestreo y prueba de materiales.

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2003). M•MMP•1•05/03. *Densidades Relativas y Absorción*. Libro MMP Métodos de muestreo y prueba de materiales.

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2003). Manual M•MMP•1•08/03. *Masas Volumétricas y Coeficientes de Variación Volumétrica*. Libro MMP Métodos de muestreo y prueba de materiales.

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2019). Manual M•MMP•1•10/19. *Grado de Compactación*. Libro MMP Métodos de muestreo y prueba de materiales.

---

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2020). Manual M•MMP•1•16/20. *Grado de Compactación con Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD)*. Libro MMP Métodos de muestreo y prueba de materiales.

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2021). Norma N.CMT.1.01/21. *Materiales para terraplén*. Libro CMT características de los materiales.

Shwartz CW,. Afsharikia Z, & Khosravifar S. (2017). *Standardizing lightweight deflectometer modulus measurements for compaction quality assurance (Final report No. MD-17 SHA/UM/3-20)*. Administración Estatal de Carreteras de Maryland

Siekmeier, J., Pinta, C., Merth, S., Jensen, J., Davich, P., Amargo, F., & Beyer, M. (2009). *Using the Dynamic Cone Penetrometer and Light Weight Deflectometer for Construction Quality Assurance*. Reporte Técnico No. MN/Rc 2009-12.

Sierra, E., Varela, M. (2012). *Correlación entre el método geogauge y el método del cono de arena para determinar la densidad del suelo en campo*. [Proyecto para grado de Licenciatura]. Universidad de la costa cuc. Colombia.

Sol Solution. (2018). *PANDA*. Penetrómetro dinámico ligero a energía variable. Recuperado de: <https://www.sol-solution.com/es/nuestras-materiales/panda-es/>

Villavicencio, G., Breul, P., Espinace, R., & Valenzuela P. (2011). *Control de compactación con penetrómetro ligero en tranques de relaves, considerando su variabilidad material y estructura*. Revista de la construcción .11(1), 119-133.

Zeta., D. (2019). *Análisis comparativo de la utilización del método de cono de arena y densímetro nuclear para determinar densidades de campo en suelos cohesivos para terraplenes procedente de la cantera Ramirez ubicada en el km 7+000 de la carretera Piura-Paita. Perú. 2019*. [Tesis Licenciatura]. Universidad Nacional de Piura. Perú.