



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS
VÍAS TERRESTRES**

**Evaluación del efecto causado por los cambios de succión a los
módulos resilientes en una capa subrasante.**

TESIS PROFESIONAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS
VÍAS TERRESTRES**

PRESENTA:

ING. JOSÉ ALFREDO CHÁVEZ CERNA

ASESOR:

DR. CARLOS CHÁVEZ NEGRETE

Morelia, Michoacán, Diciembre: 2019

Contenido

Agradecimientos	I
Dedicatoria.....	II
Resumen.....	III
Abstract.....	IV
Notación.....	V
Índice de figuras.....	IX
Índice de tablas	XII
1 Introducción	1
1.1 Motivación	2
1.2 Planteamiento y delimitación del problema	3
1.3 Descripción de la propuesta de solución	4
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo general.....	4
1.4.2 Objetivos específicos	4
1.5 Metodología	5
1.6 Resultados y aportaciones	6
1.7 Organización del documento.....	8
2 Marco teórico.....	10

2.1	Método mecanicista de diseño de pavimentos	10
2.2	Cargas cíclicas en una estructura de pavimento.....	12
2.3	Comportamiento resiliente de los materiales	13
2.4	Prueba de módulo resiliente (M_r).....	14
2.4.1	Norma AASTHO T307.....	14
2.5	Definición de Módulo Resiliente	20
2.5.1	Ecuaciones de módulos resilientes.....	22
2.6	Succión.....	27
2.6.1	Succión matricial	27
2.6.2	Succión osmótica	27
2.6.3	Succión Total	28
2.7	Curva Característica	29
2.7.1	Regiones de la curva característica.....	29
2.7.2	Método de transferencia de vapor.....	31
2.7.3	Tubo abierto de elevación capilar.....	32
2.7.4	Ecuación de ajuste para la curva de retención	33
2.8	Criterio de rechazo de Chauvenet	35
3	Estado del arte.....	36
3.1	Metodologías de ensayo	36

3.2	Ecuaciones de ajuste.....	38
3.2.1	Ecuaciones empíricas.....	38
3.2.2	Ecuaciones semi empíricas	40
4	Estudios de laboratorio	42
4.1	Muestreo del material.....	42
4.2	Pruebas índice	43
4.2.1	Granulometría	43
4.2.2	Límites de consistencia.....	44
4.2.3	Peso específico relativo de los sólidos.....	44
4.2.4	Clasificación de suelos.....	44
4.3	Pruebas de compactación y CBR	45
4.3.1	Compactación AASHTO	45
4.3.2	Expansión y CBR.....	46
4.4	Determinación de la curva característica	47
4.4.1	Columna de elevación capilar.....	47
4.4.2	Método de transferencia de vapor de agua	49
4.4.3	Ajuste para la curva de retención.....	52
4.5	Ensayo de módulo de resiliencia.....	53
4.5.1	Ensayo de M_{ropt}	53

4.5.2	Ensayos de módulo resiliente a diferentes succiones	55
5	Análisis y ajuste de ecuaciones con módulos de resiliencia a diferentes contenidos de agua	58
5.1	Etapa I, ajuste de M_{ropt}	58
5.1.1	Ajuste ecuación $K - \theta$ para M_{ropt}	58
5.1.2	Ajuste ecuación AASHTO para M_{ropt}	60
5.2	Etapa II, ajuste para los M_r a diferentes succiones.....	61
5.2.1	Metodología de ajuste para los M_r a diferentes succiones.....	61
5.2.2	Validación de datos mediante el Criterio de Chauvenet.....	62
5.2.3	Ajuste de la Ecuación AASHTO 2004 incorporando el F_{env}	63
5.2.4	Ajuste de la ecuación de Sawangsuriya, Benson, & Edil, (2009), Ecuación lineal	66
5.2.5	Ecuación de ajuste propuesta para este trabajo.....	68
6	Análisis de resultados	70
7	Conclusiones y trabajo futuros.....	72
7.1	Conclusiones	72
7.2	Trabajos futuros.....	74
8	Referencias.....	75

Agradecimientos

Primero que nada, agradezco a dios por haberme dado salud y fortaleza para concluir una meta más en mi vida.

Al programa de Conacyt, Por la beca otorgada que sustentó mis estudios durante el periodo de esta maestría.

A mi asesor **Dr. Carlos Chávez Negrete** por haberme apoyado y haber sido el conducto para terminar mi trabajo de tesis.

Al **Mir. Tarsicio Domínguez Telles** por su apoyo en las pruebas de laboratorio y por su compañía durante la estancia en el laboratorio.

A la **M.e. Monserrat Chávez Arévalo** por su apoyo en la redacción y ortografía del documento de tesis.

A todos mis profesores del posgrado por haber compartido conmigo sus valiosos conocimientos.

Dedicatoria

A mis padres **Gilberto Chávez Martínez** y **Silvia Cerna Arias**, que con su gran apoyo y comprensión lograron guiarme por el buen camino, gracias por todo el amor, cariño y confianza que me han dado.

A mi tío **José Luis Chávez Martínez** quien fue una gran persona que siempre me apoyó y me impulsó para seguir preparándome y salir adelante, gracias por esos buenos consejos, siempre te recordaré y te llevaré en el corazón.

A mis hermanos **Gilberto, Cesar Alejandro, Luis Enrique**, son una parte esencial en mi vida, son ejemplos a seguir y unas grandes personas los quiero mucho.

A toda mi familia y amigos por ese gran apoyo y por confiar en mí, con esfuerzo y dedicación se pueden lograr grandes cosas en la vida, y este para mí es un gran logro que quiero compartir con todos ustedes.

Resumen

En el presente trabajo se realizó una investigación sobre la tendencia que presenta el módulo resiliente de un suelo granular, usado en la conformación de la capa subrasante en la autopista siglo XXI, ante las variaciones del contenido de agua. Se midió esta variación mediante la succión matricial del suelo. Se realizó en laboratorio la obtención de las características granulométricas y mecánicas del suelo utilizando esta para la clasificación de este mediante el SUCS, como grava bien graduada con finos no plásticos (GW-GM). Una vez teniendo estos resultados más la compactación AASHTO y la curva de retención de este material, se procedió a realizar las pruebas de módulo resiliente a diferentes succiones, utilizando el contenido de agua óptimo como parámetro de control y realizando ensayos con succiones por encima de este y por debajo del mismo. Ya con los datos de M_r se procedió a analizar el comportamiento que presentaban los módulos ante el cambio de la succión, ajustando ecuaciones de la literatura y observando los resultados que estos arrojan. Se observó que el comportamiento que presentan los módulos ante la variación de la succión tiene una tendencia potencial. Con la finalidad de mejorar los resultados de predicción de los M_r a diferentes succiones, se propone una ecuación en este trabajo que es capaz de predecir los resultados de laboratorio logrando una correlación de $R^2 = 0.85$. Con lo cual se logra mejorar los resultados que arrojaban los ajustes de las otras ecuaciones de la literatura.

Palabras clave: Diseño de Pavimentos, Módulo resiliente, Subrasante, Succión, Curva de retención.

Abstract

In this work, it was performed research about the tendency that presents the resilient modulus (M_r) of granular soil under variations of the water content, which makes up the subgrade layer of the freeway "Siglo XXI". It was measured the variation of the water content through the matrix suction of the soil. It was obtained in the lab the granulometric and mechanical characteristics of the soil, to classify it through the SUCS as gravel well graduated with soil fines non-plastic (GW-GM). Once having these results plus the AASHTO compaction and the retention curve of the concerned material, they were performed the resilient modulus tests under different values of suction, by using the optimum water content as a control parameter and performing tests with suction values upon and under of it. The values obtained from M_r were needed to proceed to the analysis of the concerned M_r values performance under the suction change, adjusting equations of some approaches in the literature and watching the yielded results. It was observed that the modulus performance, under the suction variation, has a potential tendency. This work proposes an equation that is able to predict the resilient modulus values, achieving a correlation of $R^2=0.85$; this, in order to enhance the prediction of the M_r results under suction variations. This proposal reaches improving the yielded results by the fits of the remaining equations of the current literature.

Notación

Símbolo	Significado
σ	Distribución de esfuerzos
ε	Deformaciones unitarias
δ	Deflexiones
IRI	Índice Internacional de Rugosidad
E	Módulo de elasticidad
ν	Relación de poisson
M_r	Módulo de resiliencia
x_d	Peso volumétrico seco
w	Contenido de agua
σ_1	Esfuerzo principal mayor
σ_3	Esfuerzo principal menor
σ_d	Esfuerzo desviador
ε_{axial}	Deformación recuperable
θ	Invariante ($\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3$)
σ_m	Esfuerzo normal medio
τ_{oct}	Esfuerzo de corte octaédrica

τ_{ref}	Esfuerzo cortante de referencia
q_f	Resistencia máxima al corte
P_a	Presión atmosférica (101 kPa)
F_{env}	Factor de ajuste ambiental compuesto
M_{ropt}	Módulo de resiliencia en condiciones óptimas
S_r	Grado de saturación en decimal.
S_{ropt}	Grado de saturación en el contenido de agua óptimo
a	Mínimo de $\log (M_r / M_{ropt})$
b	Máximo de $\log (M_r / M_{ropt})$
k_m	Parámetros del modelo (F_{env})
ψ	Succión total
u_a	Presión de aire de poro
u_w	Presión de agua de poro
π	Succión osmótica
R	Constante universal para gas [8.31432 J/(mol K)]
T	Temperatura absoluta [$T = (273.16 + t^\circ) (K)$]
t°	Temperatura ($^\circ C$).
v_{wo}	Inverso de la densidad del agua
ρ_w	Densidad del agua

ω_v	Peso molecular del vapor de agua
U_v	Presión parcial de poro de vapor de agua
U_{v0}	Presión saturada de agua sobre una superficie plana de agua pura a la misma temperatura
h	Altura de ascensión capilar
g	Fuerza de gravedad atmosférica
$w(\psi)$	Contenido de agua en cualquier succión del suelo
w_s	Contenido de agua en estado saturado
a_f	Parámetro de ajuste que indica el punto de inflexión. Es mayor que el valor de entrada de aire.
n_f	Parámetro de ajuste relacionado con la tasa de desaturación
m_f	Parámetro de ajuste relacionado con la curvatura cerca de las condiciones residuales
ψ_r	Valor de succión residual
x	promedio de los valores de la serie de datos
$k(n)$	coeficiente de Chauvenet
s	desviación estándar de los valores de la serie de datos
M_0	Modulo de resiliencia en un estado de esfuerzos de referencia
p_r	Precion de referencia
p	Efurzo total medio
k_1, k_2, k_3	Parámetros de ajuste de la ecuación de las ecuaciones
a, n y m	

ATPSXXI	Parámetros de ajuste de la ecuación de Fredlun & Xing
<i>Ss</i>	Autopista siglo XXI
SUCS	Peso específico relativo de los sólidos
GW-GM	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
<i>CBR</i>	Grava bien graduada con finos no plásticos
<i>HR</i>	valor soporte de California
	Humedad relativa

Índice de figuras

Figura 1. Cambios en el grado de saturación en una capa subrasante de un pavimento en Torpsbruk en Suecia (Salour, Erlingsson, & Zapata, 2014).....	3
Figura 2. Variación de los M_r de un material producida por los cambios en el contenido de agua.....	3
Figura 3. Esquema de la metodología empírico-mecanicista.....	11
Figura 4. Estado de esfuerzos en la subrasante (Garnica, Gómez, & Sesma, 2002).	12
Figura 5. Comportamiento de las pulsaciones de carga en un pavimento. (Garnica, Gómez, & Sesma, 2002)	13
Figura 6. Comportamiento resiliente de un suelo (Garnica, Gómez, & Sesma, 2002).	14
Figura 7. Forma de la curva senoidal (AASHTO).....	15
Figura 8. Equipo para la prueba de M_r	18
Figura 9. Gráfica de ajuste Módulo Resiliente para Suelos Finos. (AASHTO, 2004).....	25
Figura 10. Gráfica de ajuste Módulo Resiliente para Suelos Grueso. (AASHTO, 2004). ...	26
Figura 11. Curvas características para suelos con diferentes texturas (Pérez, 2006) citado por (Pérez, Garnica, & Pola, 2013).	29
Figura 12. Regiones típicas de la curva característica (Pérez, Garnica, & Pola, 2013).	30
Figura 13. Tubo capilar y línea de potencia.	33
Figura 14. diagrama de flujo del método de prueba NCHRP 1-28.	37
Figura 15. diagrama de flujo del método de prueba NCHRP 1-28.	38
Figura 16. Ubicación del punto de muestreo.....	42

Figura 17. Curva granulométrica del material de la ATPSXXI para la capa subrasante.	43
Figura 18. Curvas de compactación, metodología AASHTO.	46
Figura 19. Representación gráfica de los CBR a diferentes γ_d	47
Figura 20. a) Columna de elevación capilar. b y c) Elevación del agua en la columna a distintos tiempos.....	48
Figura 21. Circuito cerrado de transferencia de humedad.....	50
Figura 22. Prueba de HR.	51
Figura 23. Curva de retención determinada con la ecuación de Fredlun & Xing, 1994.	52
Figura 24. Compactación y reproducción del espécimen de prueba.	53
Figura 25. Elevación del contenido de agua de un espécimen por encima del óptimo.	56
Figura 26. Ajuste ecuación K- θ	59
Figura 27. Ajuste en 3D de los M_{ropt} de laboratorio a la ecuación AASHTO.	60
Figura 28. Correlación de los M_{ropt} de laboratorio a los datos calculados con la ecuación AASHTO.....	61
Figura 29. Primera iteración del criterio de Chauvenet.....	62
Figura 30: Resultado de la aplicación del criterio de Chauvenet.	63
Figura 31. Ajuste de la Ecuación 14 para $\theta = 179.4$	64
Figura 32. Correlación entre los datos calculados por el ajuste de la ecuación AASHTO 2004 para los distintos S_r y los obtenidos en laboratorio.....	65
Figura 33. Comportamiento de la ecuación AASHTO 2004 ante los distintos S_r . La superficie verde corresponde al S_r óptimo.	65

Figura 34. Ajuste de la ecuación AASHTO 2004 a los valores de M_r para $S_r = 0.87\%$ 66

Figura 35. Ajuste ecuación lineal de los M_r a diferentes succinos. 67

Figura 36. Correlación entre los datos calculados por el ajuste de la ecuación línea para las distintas ψ y los obtenidos en laboratorio..... 67

Figura 37. Ajuste ecuación potencial a los M_r de laboratorio a diferentes succiones. 68

Figura 38. Correlación entre los datos calculados por el ajuste de la ecuación potencial para las distintas ψ y los obtenidos en laboratorio. 69

Índice de tablas

Tabla 1. Periodo de carga y reposo de la celda de carga.	15
Tabla 2. Secuencia de Prueba de Módulo Resiliente Suelos Finos (AASHTO, 2004).	19
Tabla 3. Secuencias de carga para prueba Módulo Resiliente en Materiales Gruesos (AASHTO, 2004).	20
Tabla 4. Cálculo del coeficiente $k(n)$ del criterio de Chauvenet.	35
Tabla 5. Granulometría del material de la ATPSXXI para la capa subrasante.	43
Tabla 6. Clasificación de suelos mediante el sistema (SUCS).	44
Tabla 7. Datos para la clasificación de suelos (AASHTO).	45
Tabla 8. Resultados de CBR.	46
Tabla 9. Valores de la prueba de tubo abierto de elevación capilar y resultados de succión calculados con la ecuación.	49
Tabla 10. Resultados obtenidos con la prueba de transferencia de vapor de aire.	51
Tabla 11. Parámetros de ajuste para la ecuación de Fredlun & Xing, 1994.	53
Tabla 12. Resultados de M_{ropt}	54
Tabla 13. Valores de M_r a contenidos de agua óptimos y mayores a este.	56
Tabla 14. Valores de M_r a contenidos de agua menores al óptimo.	57
Tabla 15. Representación gráfica de los puntos de M_r contra θ a diferentes $w\%$	57
Tabla 16. Datos para el ajuste de la ecuación $K-\theta$	59
Tabla 17. Datos para el ajuste de la ecuación AASHTO y resultados.	60

Tabla 18. Parámetros de mejor ajuste para la Ecuación 15.	64
Tabla 19. Coeficientes de ajuste para la Ecuación 17.	67
Tabla 20. Coeficientes de ajuste para la Ecuación 31.	69
Tabla 21. Comparación de resultados de N-CMT-1-03/02 y resultados de laboratorio de la ATPSXXI.	70
Tabla 22: Resultados, correlaciones y rangos de error de predicción de las ecuaciones analizadas.....	71

1 Introducción

Los pavimentos son una estructura conformada por distintas capas, diseñados para soportar las cargas vehiculares y las condiciones ambientales durante un periodo de vida para el que fueron proyectados, con la finalidad de permitir el rodamiento de los vehículos con rapidez y confort. Como toda estructura cuenta con métodos de diseño que pretenden garantizar su buen funcionamiento, estos métodos de diseño han evolucionado en conjunto con la ciencia, pasando de métodos puramente empíricos a métodos empíricos mecanicistas y con la tendencia de llevar el diseño estructural de un pavimento a métodos solo-mecanicistas. Los mecanismos principales de deterioro a controlar por estos diseños son; la deformación permanente y la fatiga. Las distintas metodologías se pueden describir de la siguiente manera:

- **Métodos empíricos:** Estos métodos se basan en los resultados de experimentos, requieren de un elevado número de observaciones para establecer relaciones aceptables entre las variables y los resultados de las pruebas, para correlacionar el comportamiento de los pavimentos en situ con los construidos en otro lugar, a través de observaciones y mediciones en campo, con los factores que causan los mecanismos de degradación en la estructura.
- **Métodos Mecanicistas:** Las metodologías mecanicistas pretenden tener un enfoque puramente científico, con un marco teórico suficiente que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento ante las acciones del clima y del tránsito vehicular. Utilizando la teoría elástica para determinar la respuesta de los elementos estructurales de un pavimento.
- **Métodos empíricos mecanicistas.** Este método incorpora factores mecanicistas con los cuales es capaz de determinar la respuesta del pavimento ante situaciones críticas de carga y clima con modelos matemáticos. utiliza métodos empíricos para relacionar respuestas del pavimento basados en indicadores observados.

En la actualidad los métodos de diseño más avanzados se encuentran en la etapa de métodos empíricos mecanicistas, en donde se requiere conocer el comportamiento de los materiales que se usan en la estructura de un pavimento, y encontrar formas de predecir el

comportamiento que presentarán durante su vida en servicio en el pavimento. Un parámetro muy importante y necesario para estos diseños es el módulo de elasticidad de los materiales, el cual, en una estructura de pavimento se conoce como módulo de resiliencia (M_r). Sin embargo, este parámetro presenta variaciones por distintas causas, una de las más importantes que provoca cambios en el M_r es el contenido de agua, y por esta razón, se decide realizar esta investigación y proponer una ecuación que proporcione lo más exacto posible, las variaciones que el M_r sufre ante los cambios de agua utilizando la succión de suelo como parámetro de correlación.

1.1 Motivación

Debido a que los módulos de resiliencia de la capa subrasante son un factor determinante para el comportamiento de un pavimento en su vida útil, ya que las deformaciones que esta capa pueda sufrir se reflejarán en la superficie de dicho pavimento. Por esta razón se decide realizar en este trabajo un estudio a las propiedades de esta capa.

En el (2014) Salour, Erlingsson, & Zapata, documentaron los cambios en el grado de saturación que una capa de subrasante, en el periodo de un año en la región de Torpsbruk en Suecia Figura 1. Los datos presentados dejan en evidencia que existen variaciones considerables en los grados de saturación de esta capa, y al ser un factor determinante para el comportamiento elástico de los materiales. En la Figura 2 se puede ver que los M_r aumentan o disminuyen de acuerdo con el contenido de agua que presentan.

Se considera que el análisis de estos cambios de M_r es de suma importancia en el diseño de un pavimento, al no considerarlos se pueden presentar problemas de deformación en la capa. En el momento que aumente el contenido de agua, el M_r disminuye, llevando estas deformaciones hasta la capa de rodadura y provocando con ello deformación en la superficie.

Por esta razón se decidió trabajar el material que es utilizado en una capa de subrasante, de un pavimento en construcción. Para conocer las variaciones que presentará de M_r y buscar una ecuación que sea capaz de proporcionar lo más exacto posible los valores de esta variación.

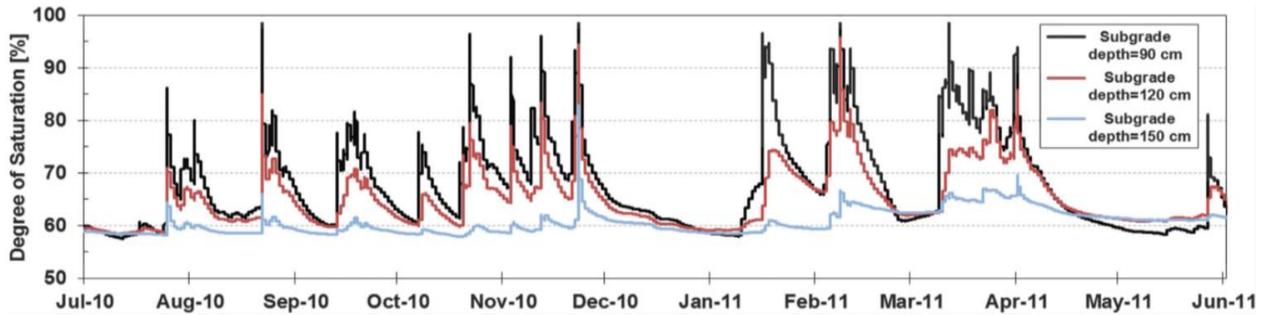


Figura 1. Cambios en el grado de saturación en una capa subrasante de un pavimento en Torpsbruk en Suecia (Salour, Erlingsson, & Zapata, 2014)..

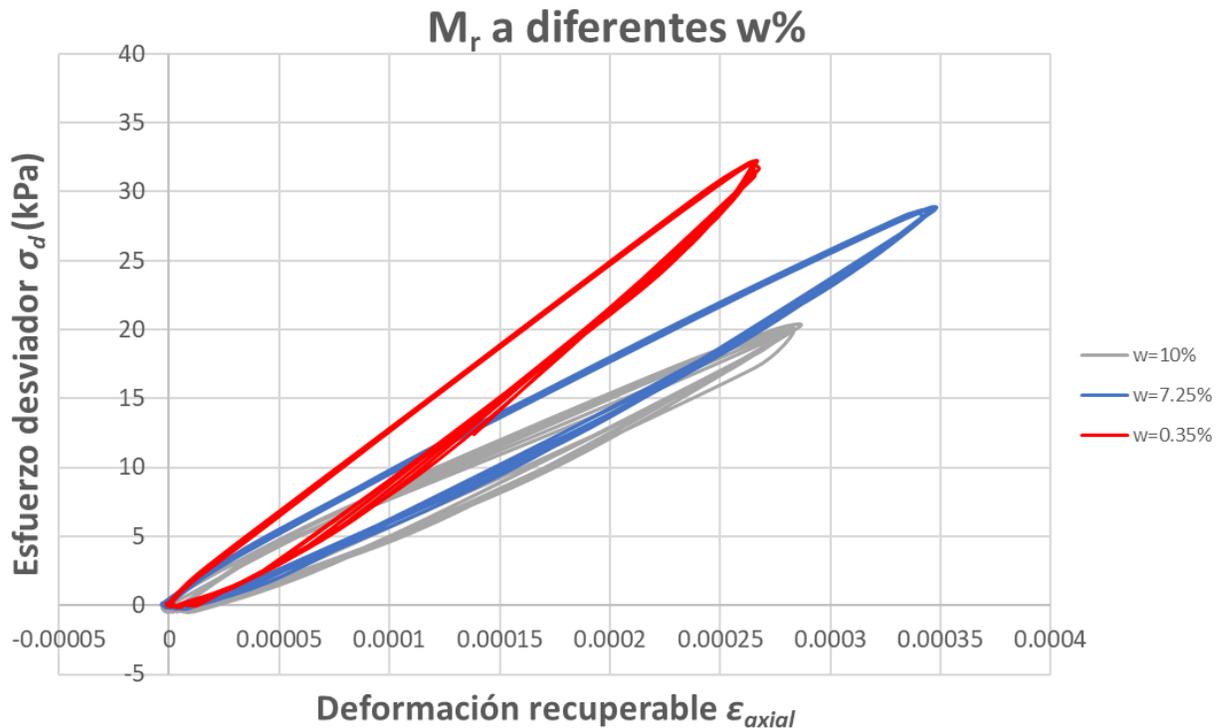


Figura 2. Variación de los M_r de un material producida por los cambios en el contenido de agua.

1.2 Planteamiento y delimitación del problema

Observando la necesidad de conocer sobre la ciencia más actual de pavimentos, debido esto al mal comportamiento que presentan las vialidades diseñadas en México con los métodos que se están utilizando. Se decidió realizar una investigación del comportamiento que presenta una capa subrasante a diferentes contenidos de agua, de un pavimento que está

siendo actualmente construido en una de las carreteras más importantes del estado de Michoacán, como lo es la autopista siglo XXI.

La finalidad es conocer la calidad de los materiales utilizados en la región, si son o no materiales adecuados y cuál es el comportamiento que se espera tengan durante su vida en operación. Y proponer una ecuación que ayude a simular los cambios que sufrirá el material en su M_r durante su vida útil.

1.3 Descripción de la propuesta de solución

Para conocer las propiedades, granulométricas, hidráulicas y mecánicas del material de la autopista siglo XXI, se decide realizar una serie de pruebas en laboratorio. Pruebas de granulometría, la cual nos permite conocer la distribución granulométrica y clasificar el material. Determinación de la curva característica, con la cual se obtienen las propiedades hidráulicas del material, y pruebas de M_r para conocer las propiedades mecánicas del material.

Este es el inicio de una metodología más avanzada de caracterización de suelos para pavimentos, que permitirá conocer la variación que presenta el M_r respecto al cambio de la succión en el suelo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Determinar la variación de los módulos de resiliencia causada por los cambios de succión en la capa de subrasante de un pavimento para la ampliación de la autopista siglo XXI en el Km 6+000, y proponer una ecuación de ajuste empírica capaz de predecir estas variaciones.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Medir la curva de retención del material utilizado en la capa subrasante del pavimento para la ampliación de la autopista siglo XXI en el Km 6+000.

2. Medir los módulos de resiliencia en el material utilizado en la capa subrasante del pavimento para la ampliación de la autopista siglo XXI en el Km 6+000, a diferentes humedades y esfuerzos.
3. Analizar las variaciones de los módulos de resiliencia en función de la succión, y proponer una ecuación de ajuste empírica para este material capaz de predecir estas variaciones.

1.5 Metodología

En la primera etapa se realizó una revisión bibliográfica sobre el tema. Buscando la manera de conformar una metodología para la solución del problema, utilizando ideas plasmadas en artículos y guías para el diseño de pavimentos.

Posteriormente se continuó con un proceso de pruebas de laboratorio, para conocer las propiedades del material que se decidió utilizar. Las pruebas que se realizan son:

Pruebas índice:

- Muestreo del material en estudio.
- Secado del material.
- Cuarteo.
- Granulometría.
- Peso específico relativo de los sólidos.

Pruebas de compactación del material.

- Compactación AASHTO estándar.
- Compactación AASHTO modificada.

Prueba para las propiedades hidráulicas del material.

- Curva de retención.

Prueba para las propiedades mecánicas del material en estudio.

- Expansión.
- CBR.
- Módulo de resiliencia óptimo (M_{ropt}).
- Módulo de resiliencia a diferentes succiones.

Después de contar con los datos de las pruebas, se procedió a realizar una depuración de datos atípicos para garantizar los resultados de la investigación. Una vez depurados los datos se procedió a realizar el ajuste de las ecuaciones a diferentes grados de saturación y succiones. Se observan los resultados de los ajustes, y se buscó la manera de mejorar estos resultados proponiendo una ecuación nueva.

1.6 Resultados y aportaciones

En esta investigación se aporta a la ciencia de pavimentos las siguientes metodologías de prueba:

1.-Metodología para obtener los puntos de succión de la curva de retención.

Al ser un material granular se implementaron dos pruebas de laboratorio, para conocer los puntos que dan forma a la curva de retención. Para los valores de succión que pertenecen a la zona de desaturación de la curva de retención se usó la ideología de Lambe & Whitman (1995), que consiste en la utilización de un tubo abierto de elevación capilar.

El procedimiento de esta prueba fue el siguiente:

En un tubo de acrílico de 8 pulgadas de diámetro y 1 metro de altura, tapado en uno de sus extremos con una placa de acero inoxidable perforada; con la finalidad de permitir el acceso del agua, fue llenado con suelo compactado y se colocó en un recipiente, donde se mantuvo un nivel constante con agua destilada, se monitoreó durante 2 semanas hasta un punto donde la ascensión capilar se mantuvo constante, en un periodo de 24 horas. Después de esto, se procedió con mucho cuidado, a extraer el material del tubo a diferentes alturas y se midió el contenido de agua para cada una de estas, mediante el secado en horno. Con estas alturas se calculó la succión matricial y se logró graficar los diferentes puntos que dan forma a la curva

de retención en la zona de desaturación. El procedimiento para conocer los puntos residuales de la curva de retención fue apoyado en la teoría termodinámica de Richards (1965), la cual nos permite medir la succión de un material mediante la obtención de la humedad relativa ($HR\%$) del aire en contacto con los poros. El procedimiento para esto fue el siguiente: se compactó un espécimen en la cámara triaxial en condiciones óptimas de humedad, después se conectó la cámara triaxial a un circuito cerrado de vapor de agua (ver Figura 22), se inició la bomba de agua para hacer fluir el vapor de agua, en equilibrio con la sal de un recipiente (NaOH, hidróxido de sodio con $HR=10\%$). En este caso se disminuye la HR , hasta lograr la deseada por aproximaciones sucesivas. Dentro del circuito se tiene un higrómetro capaz de medir la $HR\%$ y $T\text{ }^{\circ}C$, estos datos se guardan en la computadora por medio de una tarjeta de adquisición de datos. Después de esto, se colocó el espécimen de suelo en un horno de secado para conocer su contenido de agua. Mediante este procedimiento, se realizaron pruebas a distintos valores de $HR\%$, el cual nos permitió conocer los puntos residuales de la curva de retención de este material. Finalmente utilizando estos dos métodos se logró obtener un ajuste aceptable de la curva de retención.

2.- Metodología para disminuir y aumentar el contenido de agua en los especímenes que se usarán en las pruebas de M_r a diferentes contenidos de agua.

Todos los especímenes fueron compactados en condiciones óptimas de humedad y peso volumétrico máximo.

El procedimiento para los valores del contenido de agua por debajo del óptimo fue similar al ya descrito anteriormente para medir la $HR\%$.

Ahora bien, el procedimiento para los valores del contenido de agua por encima del óptimo fue el siguiente: utilizando de nuevo el circuito cerrado de transferencia de vapor de agua, se colocó agua destilada en el recipiente (HR de 100%), lo que incrementó de manera paulatina la humedad dentro del circuito y se transfería hacia el suelo. El control del contenido de agua del espécimen se realizó de la siguiente forma; en primera instancia se conocía el contenido de agua óptimo y el peso del recipiente con agua, se fue monitoreando en el tiempo la variación del peso del recipiente con agua y se asumió que esta se transfería al suelo. Cuando

se lograba la transferencia necesaria para tener el contenido de agua deseado, se retiró el recipiente con agua y se dejaba equilibrar por el tiempo de un día la HR dentro del circuito. Después se ensayaba el suelo y al final se verificaban los contenidos de agua en la parte superior, media e inferior del espécimen; con la finalidad de verificar que todo el espécimen tuviera el mismo contenido de agua.

3.- Otro aporte de esta investigación es la **ecuación potencial** la cual fue propuesta en esta investigación, para el ajuste de los valores de M_r a diferentes succiones.

Dicha ecuación se propuso al ver que en la gráfica M_r/M_{ropt} vs $\log(\psi)$ presenta una tendencia potencial. Esto con la finalidad de que los valores calculados por esta ecuación sean los más aproximados a los obtenidos en el laboratorio, la ecuación propuesta nos arrojó valores de correlación de M_r del laboratorio vs M_r calculados iguales a $R^2= 0.854$

1.7 Organización del documento

El documento se decidió organizar de la siguiente manera:

En el capítulo 1

Se da una introducción, sobre el tema de estudio, donde se trata el motivo por el cual se realiza la investigación, una delimitación de la investigación, la propuesta de solución, objetivos que se plantean alcanzar, una metodología para resolver el problema encontrado, los análisis de los resultados y las aportaciones que otorga este trabajo a la ciencia.

En el capítulo 2

Se describe el marco teórico de la investigación, donde se fundamenta las metodologías usadas en este trabajo encontradas en libros, guías de diseño de pavimentos y artículos publicados en revistas.

En el capítulo 3.

Se muestra un análisis de los trabajos más recientes, relacionados con el tema de investigación.

En el capítulo 4.

Se desarrolla la investigación en el laboratorio, donde se muestra a detalle las pruebas que fueron realizadas al material, especificando las normas que se usaron en cada una de las pruebas, y las que se proponen en este trabajo son descritas paso a paso; así como el proceso que fue utilizado.

En el capítulo 5.

Se realiza el análisis de los datos de M_r obtenidos; en primer lugar, se verifica la validez de los datos obtenidos en laboratorio para eliminar datos atípicos. Posterior a ello se llevan a cabo ajustes de ecuaciones de $M_r(Sr)$ y $M_r(\psi)$. Para conocer la ecuación que proporciona los mejores ajustes, en esta etapa se propuso una nueva ecuación de ajuste la cual da resultados más aproximados a los obtenidos en el laboratorio.

En el capítulo 6.

Se presenta un análisis de los resultados que se encontraron en la investigación.

En el capítulo 7.

Se presentan las conclusiones de la investigación y algunos trabajos futuros que siguen en línea de investigación.

En el capítulo 8.

Se encuentran las referencias utilizadas para la investigación.

2 Marco teórico

2.1 Método mecanicista de diseño de pavimentos

La metodología mecanicista tiene como finalidad el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento (ver Figura 3). Las componentes de entrada para el diseño básicamente son los espesores de cada capa, las propiedades de los materiales que conforman cada una de esas capas, que serán módulos dinámicos o resilientes, el tipo de clima del medio físico que atravesará la carretera, definido por precipitación y temperatura, y el nivel de tránsito vehicular definido ya sea en ejes equivalentes, o preferentemente a través de su correspondiente espectro de distribución de cargas (Garnica & Correa, 2004).

Una vez definido el diseño inicial se procede al análisis estructural de la sección del pavimento. Como respuesta se conocerá la distribución de esfuerzos (σ), deformaciones unitarias (ϵ), y deflexiones (δ). El cálculo se realiza básicamente considerando al pavimento como un medio multicapa en donde el comportamiento de los materiales se basa en la teoría de la elasticidad. A partir de la respuesta estructural en el pavimento, se calcula el nivel de daño esperado en el período de diseño para los diferentes tipos de deterioros que se pudieran presentar; estos deterioros pueden ser agrietamientos por fatiga, agrietamientos térmicos, deformaciones permanentes, escalonamiento en el caso de pavimentos de concreto y, finalmente, el nivel de regularidad medido a través del llamado Índice Internacional de Rugosidad (IRI). Una vez calculados los niveles de deterioro para el período de diseño se comparan con los valores máximos permitidos por el diseñador, que dependerán del tipo de camino del que se trate (Garnica & Correa, 2004).

En la Figura 3 se presenta un esquema de los elementos que conforman el análisis de un pavimento mediante un método empírico-mecanicista.

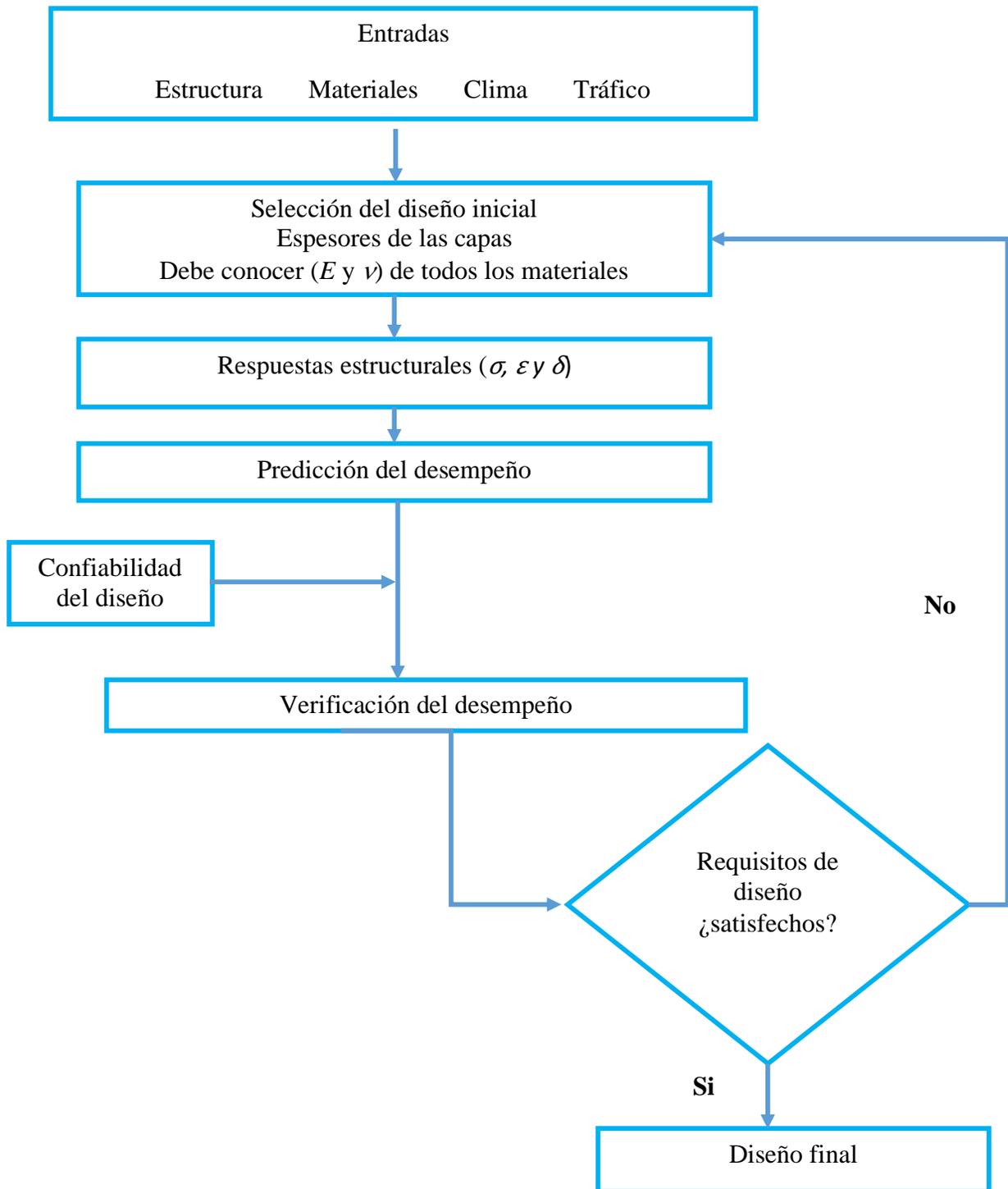


Figura 3. Esquema de la metodología empírico-mecanicista.

La capacidad de predecir los deterioros en una estructura de un pavimento es gracias a la información que el diseñador le proporciona al método respecto a los materiales que conformarán las capas. Uno de los parámetros más importantes a considerar en este método es el módulo de elasticidad de los suelos, debido a esta razón, se utiliza en esta metodología el módulo de elasticidad ante cargas repetidas (cíclicas), el cual es conocido como módulo de resiliencia (M_r), para conocer las propiedades mecánicas de las capas.

2.2 Cargas cíclicas en una estructura de pavimento

Los materiales que constituyen los pavimentos, incluyendo las terracerías y el terreno de cimentación, son sometidos a cargas dinámicas de diferentes magnitudes a causa del tránsito vehicular.

El patrón de esfuerzos inducidos a una estructura de pavimento como resultado del tránsito de vehículos es muy complejo. Un elemento de pavimento está sujeto a pulsos de carga que involucran componentes de esfuerzos normales y cortantes. Los esfuerzos son transitorios y cambian con el tiempo conforme la carga avanza. El esfuerzo cortante cambia de sentido conforme la carga pasa, provocando así una rotación de los ejes de esfuerzos principales (Garnica, Gómez, & Sesma, 2002).

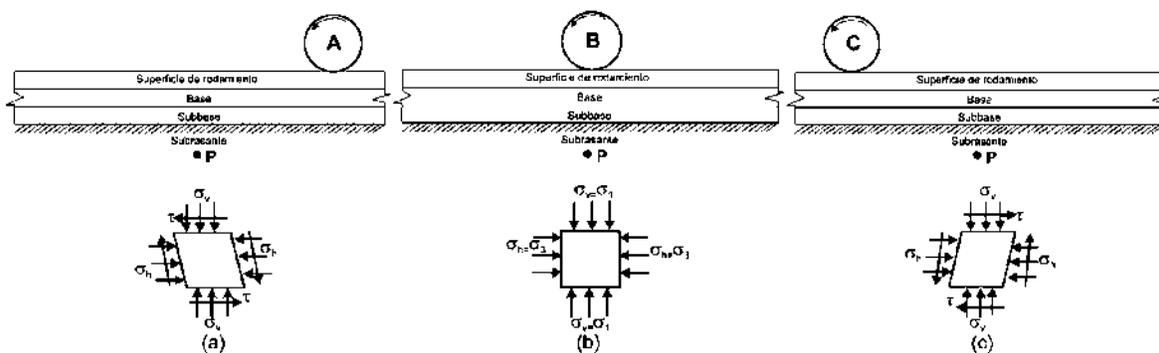


Figura 4. Estado de esfuerzos en la subrasante (Garnica, Gómez, & Sesma, 2002).

Lo anterior puede observarse en la Figura 4; en el punto A, actúan tanto esfuerzos normales como esfuerzos cortantes. Cuando la carga pasa al punto B, deja de inducir esfuerzos cortantes y únicamente actúan los esfuerzos normales; en este punto se tiene un estado triaxial

de esfuerzos. El punto C, presenta condiciones similares al punto A, con la diferencia de que el sentido de los esfuerzos cortantes es contrario (Garnica, Gómez, & Sesma, 2002).

En la Figura 5 se tiene una representación gráfica de las pulsaciones de carga causadas por el tránsito en un pavimento, este comportamiento describe una onda senoidal completa. El estado de esfuerzos descrito se presenta en forma repetida cuando el paso de los vehículos se hace constante.

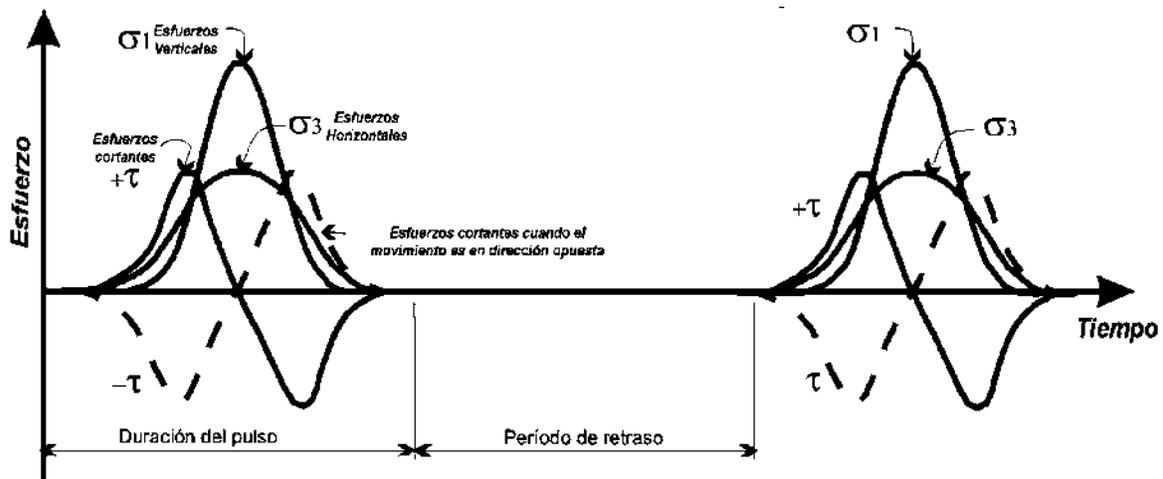


Figura 5. Comportamiento de las pulsaciones de carga en un pavimento. (Garnica, Gómez, & Sesma, 2002)

2.3 Comportamiento resiliente de los materiales

El comportamiento de esfuerzo-deformación, en una estructura de suelo debido al tipo y magnitud de cargas que son inducidas por los vehículos en un pavimento, las características asociadas al clima y la localización de las diferentes capas de material; es del tipo resiliente y plástico. Las deformaciones resilientes o elásticas son aquellas donde la recuperación es instantánea y las plásticas son las que permanecen aún después de que ha cesado la carga. Por lo que la deformación plástica tiende a hacerse acumulativa. En la Figura 6, se puede apreciar la deformación que una carga repetida le va produciendo a un espécimen de suelo. Con la constante aplicación de cargas la deformación que se acumula va siendo cada vez más pequeña hasta que desaparece y de este punto en adelante toda la deformación que le produce la carga al espécimen es totalmente recuperada. En este punto se considera que el material está en un estado de resiliencia, estado en el cual se presenta la resistencia elástica del suelo

ante la repetición de esa carga, también llamado M_r . El M_r es igual al módulo secante de la deformación recuperada (Garnica, Gómez, & Sesma, 2002).

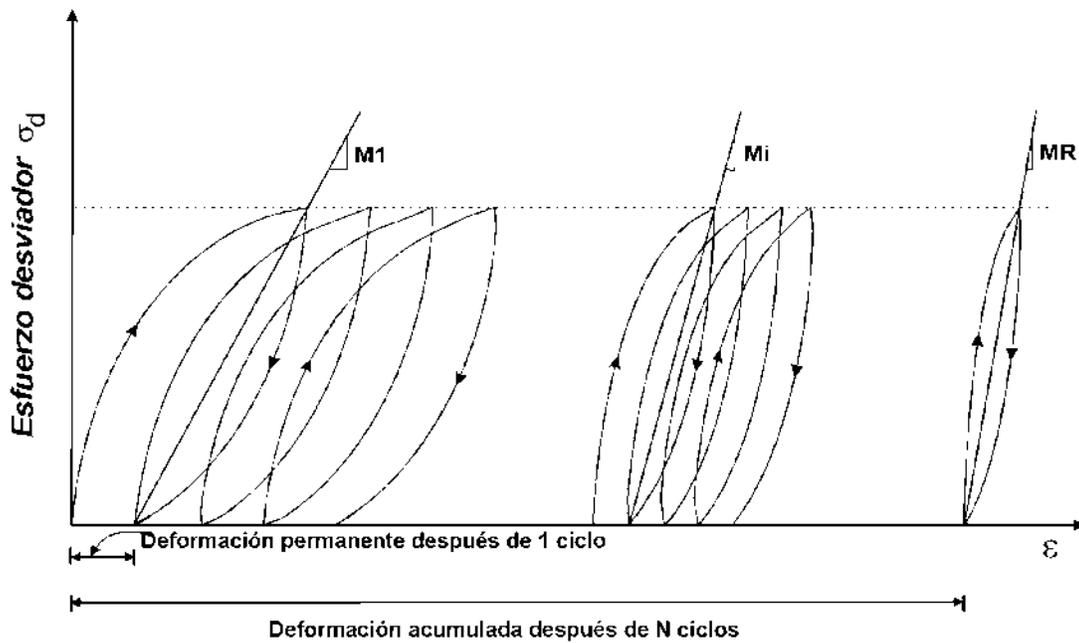


Figura 6. Comportamiento resiliente de un suelo (Garnica, Gómez, & Sesma, 2002).

2.4 Prueba de módulo resiliente (M_r)

Para la determinación del módulo resiliente se utilizará el protocolo de prueba aprobado por la AASTHO, denominada “T 307, Método estándar para determinar el módulo resiliente de suelos y agregados materiales”. Esta prueba está diseñada para conocer la respuesta del suelo inalterado o alterado. En este método de prueba, los niveles de esfuerzo y confinamientos están dispuestos de acuerdo con la función estructural del material.

2.4.1 Norma AASTHO T307

El equipo que se utiliza en este método es un equipo triaxial cíclico, que está formado por:

Cámara triaxial. Es una cámara de presión, utilizada para contener el espécimen y el fluido de confinamiento durante la prueba. El fluido de confinamiento para este método es aire.

Dispositivo de carga. El dispositivo pistón de baja fricción es un dispositivo situado en la parte superior del marco de carga, que sirve para aplicar carga sobre el espécimen. pueden ser electrohidráulico o electroneumático. Los pulsos de carga que aplica cada dispositivo generan una curva senoidal denominada (haversine-shaped load form), definida por la expresión matemática; $((1-\cos \theta) / 2)$ (ver Tabla 1 y Figura 7).

Tabla 1. Periodo de carga y reposo de la celda de carga.

Tipo de dispositivo	Periodo de carga (seg)	Periodo de reposo (seg)
Neumático	0.1	0.9 a 0.3
Hidráulico	0.1	0.9

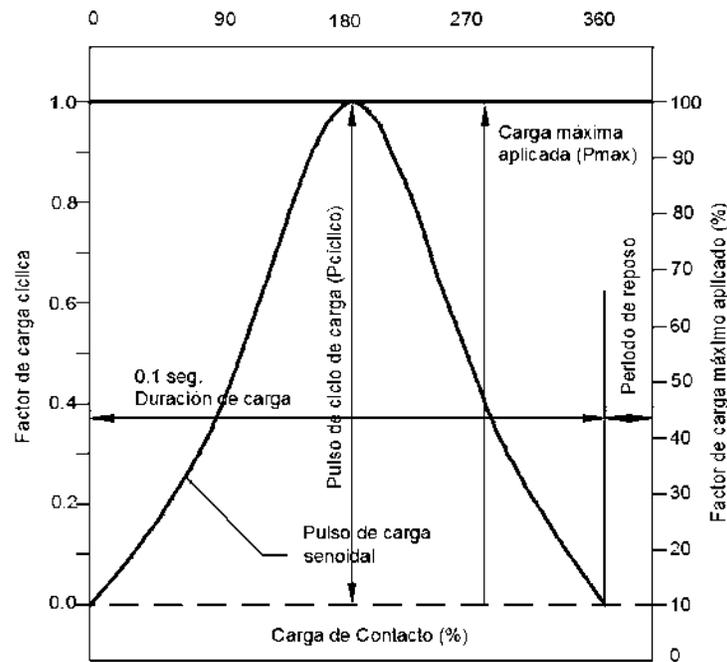


Figura 7. Forma de la curva senoidal (AASHTO).

La carga se define de la siguiente forma:

Carga de esfuerzo máximo aplicada, (P_{Max}); la carga total aplicada a la muestra, incluyendo la carga de contacto y cíclica.

$$P_{Max} = P_{contacto} + P_{ciclica}$$

Ecuación 1

Carga de contacto ($P_{contacto}$). Carga vertical colocada en la muestra para mantener un contacto positivo entre la tapa de la cámara y la muestra.

$$P_{Contacto} = 0.1P_{Max}$$

Ecuación 2

Carga axial cíclica ($P_{ciclica}$). Carga repetitiva aplicada a una muestra.

$$P_{ciclica} = P_{Max} - P_{Contacto}$$

Ecuación 3

Máximo esfuerzo axial aplicado (S_{Max}). El esfuerzo total aplicado a la muestra, incluyendo el esfuerzo de contacto y el esfuerzo cíclico.

$$S_{Max} = \frac{P_{Max}}{A}$$

Ecuación 4

A= Área de sección transversal inicial de la muestra.

Esfuerzo axial cíclico (esfuerzo resiliente, $S_{ciclico}$). Es el esfuerzo axial cíclico aplicado.

$$S_{ciclica} = \frac{P_{ciclica}}{A}$$

Ecuación 5

Esfuerzo de contacto ($S_{contacto}$). Esfuerzo axial aplicado a una muestra de prueba para mantener un contacto positivo entre la tapa de la cámara y la muestra.

$$S_{Contacto} = \frac{P_{contacto}}{A} = 0.1S_{Max}$$

Ecuación 6

Esfuerzo radial total S_3 . La presión de confinamiento aplicada en la cámara triaxial.

El M_r es definido según las cargas aplicadas a la muestra como:

$$M_r = \frac{S_{ciclico}}{\varepsilon_r}$$

Ecuación 7

$$\varepsilon_r = \frac{e_r}{L}$$

Ecuación 8

e_r : es la deformación axial debido a $S_{ciclica}$.

ε_r : es la deformación axial elástica (recuperada) debido a $S_{ciclica}$.

L = longitud original de la muestra.

2.4.1.1 Reconstrucción de muestras para la prueba (M_r)

En primera instancia es necesario conocer el peso volumétrico seco (γ_d) de la muestra de suelo, así como el contenido de agua (w) en porcentaje respecto de la masa de suelo con la que se realizará la prueba, ya sea mediante la prueba de compactación AASHTO Estándar o mediante la obtención de dichos parámetros en campo, con la finalidad de reproducir las condiciones a las que está sometida la masa de suelo en la realidad. Se requiere de una cámara triaxial especial con dimensiones específicas dependiendo del suelo a probar y del tamaño de las partículas, las cámaras que se utilizan son 71 mm, 100 mm y 152 mm de diámetros y alturas de al menos 2 veces el diámetro.

Durante el proceso de reconstitución de la muestra y durante su prueba, esta es protegida por membranas especiales las cuales ayudan a mantener el espécimen bajo las condiciones de humedad requeridas, y papel filtro cortado a medida, tanto en la parte inferior como superior de la muestra de suelo. Una vez homogeneizada la muestra de suelo a sus condiciones de humedad y peso volumétrico seco requerido, se compacta en un total de 6 capas para suelos finos (cuerpo de terraplén o cimentación) y 5 capas para suelos granulares (base o subbase) de forma dinámica mediante un martillo; vibrador, una representación del equipo se puede ver en la (Figura 8). Al haber reconstituido la muestra se continúa con el montaje de la cámara triaxial para posteriormente ser llevada a la prensa y ser probada bajo condiciones de carga axial y cíclica. En la Tabla 2 y Tabla 3 se muestra la secuencia de aplicaciones de cargas según el tipo de material y su funcionalidad en el pavimento.



1. Cámara triaxial.
2. LVDT rojo.
3. LVDT verde.
4. Transductor de deformación permanente.
5. Celda de carga.
6. Pistón neumático de baja fricción.
7. Marco de carga.
8. Controlador.

Figura 9. Equipo para la prueba de M_r .

Tabla 2. Secuencia de Prueba de Módulo Resiliente Suelos Finos (AASHTO, 2004).

Secuencia No.	Presión de Confinamiento		Esfuerzo Axial Máximo		Ciclos de Esfuerzo		Constante de Esfuerzo		No. De aplicaciones de carga
	kPa	PSI	kPa	PSI	kPa	PS I	kPa	PSI	
0	41.4	6	27.6	4	24.8	3.6	2.8	0.4	500- 1000
1	41.4	6	13.8	2	12.4	1.8	1.4	0.2	100
2	41.4	6	27.6	4	24.8	3.6	2.8	0.4	100
3	41.4	6	41.4	6	37.3	5.4	4.1	0.6	100
4	41.4	6	55.2	8	49.7	7.2	5.5	0.8	100
5	41.4	6	68.9	10	62	9	6.9	1	100
6	27.6	4	13.8	2	12.4	1.8	1.4	0.2	100
7	27.6	4	27.6	4	24.8	3.6	2.8	0.4	100
8	27.6	4	41.4	6	37.3	5.4	4.1	0.6	100
9	27.6	4	55.2	8	49.7	7.2	5.5	0.8	100
10	27.6	4	68.9	10	62	9	6.9	1	100
11	13.8	2	13.8	2	12.4	1.8	1.4	0.2	100
12	13.8	2	24.8	4	24.8	3.6	2.8	0.4	100
13	13.8	2	37.3	6	37.3	5.4	4.1	0.6	100
14	13.8	2	49.7	8	49.7	7.2	5.5	0.8	100
15	13.8	2	62	10	62	9	6.9	1	100

Tabla 3. Secuencias de carga para prueba Módulo Resiliente en Materiales Gruesos (AASHTO, 2004).

Secuencia No.	Presión de Confinamiento		Esfuerzo Axial Máximo		Ciclos de Esfuerzo		Constante de Esfuerzo		No. De aplicaciones de carga
	kPa	PSI	kPa	PSI	kPa	PSI	kPa	PSI	
0	103.4	15	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	500-1000
1	20.7	3	20.7	3	18.6	2.7	2.1	0.3	100
2	20.7	3	41.4	6	37.3	5.4	4.1	0.6	100
3	20.7	3	62.1	9	55.9	8.1	6.2	0.9	100
4	34.5	5	34.5	5	31.0	4.5	3.5	0.5	100
5	34.5	5	68.9	10	62	9.0	6.9	1	100
6	34.5	5	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
7	68.9	10	68.9	10	62	9.0	6.9	1.0	100
8	68.9	10	137.9	20	124.1	18	13.8	2.0	100
9	68.9	10	206.8	30	186.1	27.0	20.7	3.0	100
10	103.4	15	68.9	10	62	9.0	6.9	1.0	100
11	103.4	15	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
12	103.4	15	206.8	30	186.1	27	20.7	3.0	100
13	137.9	20	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
14	137.9	20	137.9	20	124.1	18	13.8	2.0	100
15	137.9	20	275.8	40	248.2	36	27.6	4.0	100

2.5 Definición de Módulo Resiliente

Hveem y Carmany (1948) citado por (Garnica, Pérez, & Gómez, 2001) reconocieron que el módulo dinámico de elasticidad para subrasantes es un parámetro de gran importancia para entender el agrietamiento (por fatiga) de las superficies de asfalto y que la carga monótonica podría no ser la adecuada para su determinación. En 1955, Hveem desarrolló el tema “comportamiento resiliente de los pavimentos”. Él propuso la prueba del estabilómetro para

caracterizar a las subrasantes. Seed y sus colegas de la Universidad de California siguieron lo establecido por Hveem. Desarrollaron pruebas de carga repetida e introdujeron el término de módulo de resiliencia. Este término fue cambiado más tarde por el de módulo resiliente, el cual fue definido como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable y se representa con la siguiente ecuación:

$$M_r = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\varepsilon_{axial}} = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_{axial}} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

σ_1 = Esfuerzo principal mayor

σ_3 = Esfuerzo principal menor

σ_d = Esfuerzo desviador

ε_{axial} = Deformación recuperable

El M_r no es constante en un material, presenta variaciones dependiendo de las condiciones en que este material se encuentra; las causas por las que el material puede variar su M_r son:

- Tipo de material.
- Tamaño del espécimen.
- Tipo de compactación.
- Peso específico.
- Granulometría.
- Magnitud del esfuerzo aplicado.
- Contenido de Agua.

Por esta razón sería falso decir que una capa de material compuesto por suelo en un pavimento tendrá un solo M_r , lo correcto es que se proporcione una ecuación ajustada al

material, la cual sea capaz de proporcionar los valores que presentará el módulo resiliente del material ante las causas que provocan su variación.

En los últimos años se ha investigado mucho sobre este tema, dando como resultados ecuaciones particulares para los tipos de suelo en que se aplicaron, y otras ecuaciones generales que pretenden ser utilizadas en todo tipo de suelo. En la realidad aun hasta estos días no existe una ecuación capaz de tomar en consideración todos los factores causantes de variación, ya que para simplificar la ecuación consideran a unos de estos factores como constantes y predicen el cambio del M_r mediante la variación de otros factores.

2.5.1 Ecuaciones de módulos resilientes

Tutumluer & Thompson (1997) citado por (Azam, Cameron, & Rahman, 2013) propusieron una ecuación donde suponen que el factor causante de los cambios en el módulo son los esfuerzos, agrupando todos los esfuerzos que sufre un suelo en el pavimento en la variable (θ); a la cual llamaron Invariante, este modelo fue llamado Modelo $K - \text{Theta}$ (θ) y su ecuación es la siguiente:

$$M_r = k\theta^n \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

k y n : Son coeficientes de regresión.

$$\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3.$$

May y Witzak (1981) citado por (Azam, Cameron, & Rahman, 2013) propusieron una ecuación de potencia, denominada el modelo de May y Witzak, que se basó en medidas normalizadas del esfuerzo normal medio y el esfuerzo de corte octaédrica, su ecuación es la siguiente:

$$Mr = K_0 \left(\frac{\sigma_m}{p_a} \right)^{k_1} \left(\frac{\tau_{oct}}{\tau_{ref}} \right)^{k_2}$$

Donde:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}; \text{ esfuerzo normal medio.}$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}; \text{ esfuerzo de corte octaédrica.}$$

$$\tau_{ref} = \sqrt{\frac{2}{3q_f}} \text{ esfuerzo cortante de referencia.}$$

$$q_f = (d + \sigma_d \tan \beta) \text{ la resistencia máxima al corte.}$$

d y β : son los parámetros de falla de Drucker-Prager.

K_0 : es el parámetro de regresión.

La guía de diseño de pavimentos empírico mecanicista, propuso una variación de la Ecuación 11 como el modelo universal modificado (AASHTO 2002) para la predicción de M_r . El modelo universal es:

$$Mr = K_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{K_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{K_3}$$

Donde:

$$\theta: \text{ Invariante } (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3).$$

$$P_a: \text{ Presión atmosférica (101 kPa).}$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \text{ Esfuerzo de corte octaédrico.}$$

k_1, k_2, k_3 : Constantes de regresión de la ecuación.

Uno de los factores que no se puede controlar en un pavimento durante su vida útil y que provoca variaciones en el M_r , es el contenido de agua. Buscando una solución a esto dentro de la guía de diseño de pavimentos (AASHTO, 2004) se encuentra un modelo climático (Enhanced Integrated Climatic Model, EICM), el cual considera que la humedad y la temperatura son dos factores clave que afectan significativamente el cambio del M_r in situ con el tiempo. Los efectos de estos factores en el módulo resiliente se consideran en el (F_{env}); factor de ajuste ambiental compuesto. El M_r en cualquier momento o posición se expresa de la siguiente manera:

$$M_r = F_{env} M_{ropt} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

F_{env} : Factor de ajuste ambiental compuesto.

M_{ropt} : Módulo de resiliencia en condiciones óptimas (peso volumétrico máximo y contenido de agua óptimo), en cualquier estado de esfuerzos. El F_{env} es una ecuación predictiva realizada con el fin de pronosticar cambios en el módulo debido a cambios del grado de saturación; su representación matemática es la siguiente: (AASHTO, 2004)

$$\log \frac{M_r}{M_{ropt}} = a + \frac{b - a}{1 + e^{[(\ln \frac{-b}{a}) + k_m(S_r - S_{ropt})]}} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

M_r : Módulo de resiliencia a cualquier valor de grado de saturación.

M_{ropt} : Módulo de resiliencia en el contenido de agua óptimo.

S_r : Grado de saturación en decimal.

S_{ropt} : Grado de saturación en el contenido de agua óptimo.

a = Mínimo de $\log (M_r / M_{ropt})$.

b = Máximo de $\log (M_r / M_{ropt})$.

k_m : Parámetros del modelo.

La Ecuación 14 se puede despejar para dejarla en términos M_r .

$$M_r = \left(10^{\frac{a + \frac{b-a}{1 + e^{\left[\left(\ln \frac{b}{a} \right) + k_m (S_r - S_{ropt}) \right]}}}{}} \right) (M_{ropt}) \quad \text{Ecuación 15}$$

Con la Ecuación 15, se puede calcular el M_r de cualquier capa que forma la estructura del pavimento ante cualquier contenido de agua, siempre y cuando se consiga un ajuste adecuado del parámetro k_m para el material a utilizar.

Una representación gráfica de la Ecuación 14 se muestra en las siguientes figuras: Figura 10 y Figura 11. Las gráficas representan el ajuste de la guía AASHTO con base en su modelo para M_r establecido en la literatura existente, los resultados de laboratorio teóricamente deberían de ajustarse a esta ecuación.

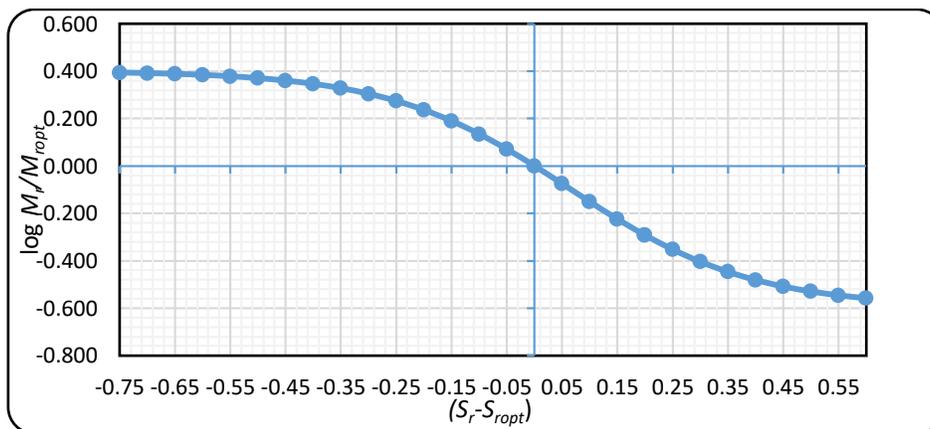


Figura 10. Gráfica de ajuste Módulo Resiliente para Suelos Finos. (AASHTO, 2004)

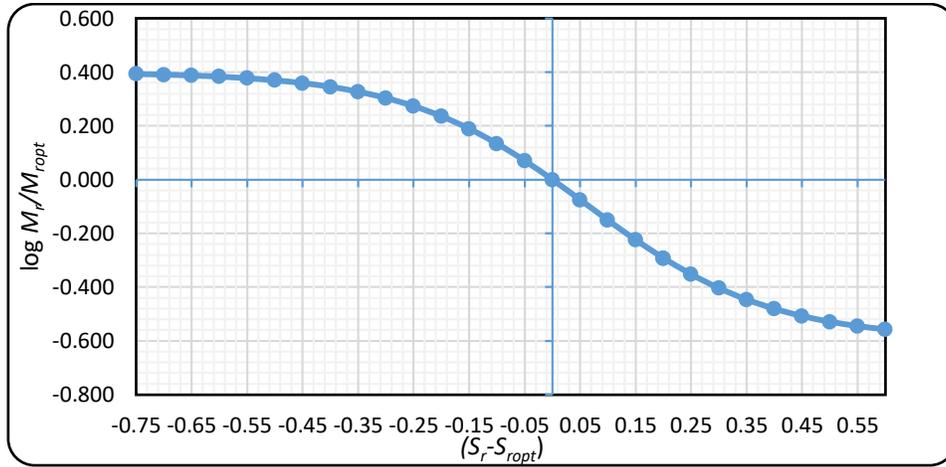


Figura 11. Gráfica de ajuste Módulo Resiliente para Suelos Grueso. (AASHTO, 2004).

Por otra parte, se ha observado que los ajustes son más adecuados cuando se utiliza la succión del suelo como variable en lugar de S_r , esto se debe a que la succión es una variable de esfuerzo y permite conocer con mayor certeza la resistencia del suelo a la deformación.

Sawangsurriya, Benson, & Edil, (2009) proponen una ecuación que consta de una regresión lineal. Al normalizar los M_r/M_{ropt} obtenidos en el laboratorio y graficarlos respecto al $\log \psi$, obtuvieron una nube de puntos que representan los cambios de M_r ante la variación de la succión matricial. Se utiliza la metodología de mínimos cuadrados, para conocer los coeficientes (a y b) de la ecuación que representa matemáticamente a la línea de mejor ajuste, la representación matemática de una ecuación lineal es la siguiente:

$$Y = a + b * X \tag{Ecuación 16}$$

Donde a y b son los valores que ajustan a Y respecto a X , si la Ecuación 16 es expresada en términos de M_r/M_{ropt} y $\log \psi$, tenemos como resultado:

$$\frac{M_r}{M_{ropt}} = a + b * (\log \psi) \tag{Ecuación 17}$$

La Ecuación 17 es la propuesta por (Sawangsuriya, Benson, & Edil, 2009), considerando que el comportamiento de la variación de M_r respecto a la succión es lineal.

2.6 Succión

El concepto de “succión” surge a principios del siglo XX, de las investigaciones realizadas por Buckingham (1907). La importancia del tema en su momento fue explicar la interacción entre el sistema: suelo-agua-planta (Pérez, Garnica, & Pola, 2013).

Buckingham (1907) citado por (Pérez, Garnica, & Pola, 2013) definió la succión del suelo como: “la cantidad que mide la atracción entre el agua y el suelo en cualquier punto dado”. La succión de los suelos está compuesta por dos fases, la succión matricial y la succión osmótica, ambas fases conforman lo que se conoce como succión total.

2.6.1 Succión matricial

Fredlund, Rahardjo, & Fredlund (2012) definieron la succión matricial como *“la succión equivalente derivada de la medición de la presión parcial del vapor de agua, en equilibrio con el agua del suelo en relación con la presión parcial del vapor de agua en equilibrio con una solución idéntica en composición con el suelo-agua”*.

También se puede definir como la succión matricial o energía potencial matricial, está asociada a las fuerzas capilares existentes en el suelo. Este fenómeno se denomina ascensión capilar, y se produce por varios efectos: por efecto de la atracción existente entre las moléculas de suelo y agua y debido a la tensión superficial del agua. El agua capilar (dentro del suelo) tiene un valor de presión negativa respecto de la presión de aire, normalmente presión atmosférica (u_a) en el campo. La componente matricial de la succión depende de la textura del suelo, de la distribución y geometría de las interfaces agua-aire existentes (Fredlund, Rahardjo, & Fredlund, 2012).

2.6.2 Succión osmótica

Fredlund, Rahardjo, & Fredlund (2012) definieron la succión osmótica como *“la succión equivalente derivada de la medición de la presión parcial del vapor de agua en equilibrio,*

con una solución idéntica en composición al agua del suelo, en relación con la presión parcial del vapor de agua en equilibrio con agua pura libre”.

2.6.3 Succión Total

Fredlund, Rahardjo, & Fredlund (2012) definieron la succión total como *“la succión equivalente derivada de la medición de la presión parcial del vapor de agua, en equilibrio con el agua del suelo en relación con la presión parcial del vapor de agua en equilibrio con el agua pura libre”.*

La succión total corresponde a la energía libre del agua del suelo, mientras que las succiones matriciales y osmóticas son los componentes de la energía libre. La relación matemática entre los componentes de la succión del suelo se puede escribir de la siguiente manera:

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi$$

Ecuación 18

Donde:

ψ , Succión total en kPa.

u_a , Presión de aire de poro en kPa.

u_w , Presión de agua de poro en kPa.

π , Succión osmótica en kPa.

2.7 Curva Característica

La curva característica es la representación gráfica de la relación que existe entre el contenido de agua en una masa de suelo y la succión total que presenta la misma masa de suelo. Esta relación también se llama curva de retención del suelo, curva de succión, etc. (Fredlund & Rahardjo, 1993). En otras palabras, la curva característica es la representación de la capacidad de un suelo para retener agua, y el esfuerzo de succión que puede alcanzar, estos esfuerzos y capacidades del suelo para retener el agua están directamente asociados a las composiciones granulométricas y estructuras del suelo. Una representación gráfica de las distintas curvas que se forman, ante distintos tipos de suelo se puede ver en la Figura 12.

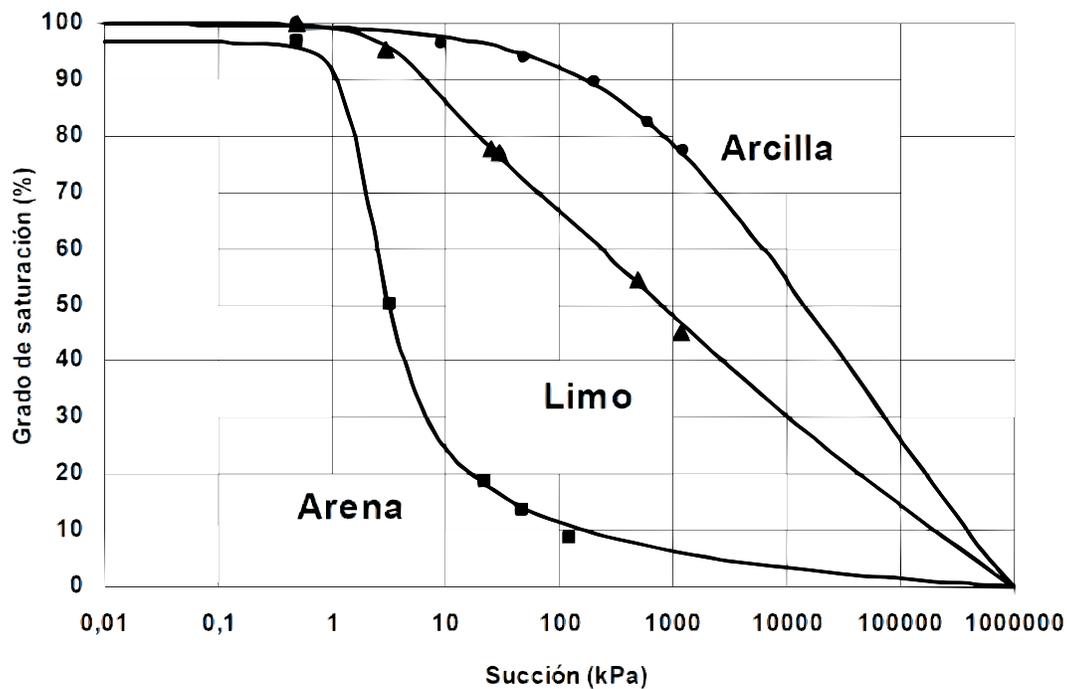


Figura 12. Curvas características para suelos con diferentes texturas (Pérez, 2006) citado por (Pérez, Garnica, & Pola, 2013).

2.7.1 Regiones de la curva característica

Por su forma y propiedades, la curva característica se puede dividir en tres zonas: zona capilar, zona de desaturación, y zona residual, los puntos clave de transición son el valor de entrada de aire y el valor residual de succión y contenido de agua (Fredlund & Houston, 2009).

La zona capilar es aquella en la cual el suelo se mantiene en un estado de saturación, y termina en el valor de entrada de aire (Fredlund M. , 1999), el cual está definido como el valor que debe de exceder la succión, antes de que el aire empiece a entrar en los macroporos del suelo (Pérez, Garnica, & Pola, 2013).

La zona de desaturación, es cuando el agua que se encuentra en la masa de suelo empieza a ser discontinua, provocando que la fuerza con la que el agua se encuentra adherida a las partículas del suelo se incremente a medida que el suelo pierde agua (Pérez, Garnica, & Pola, 2013).

En la zona residual el agua está adsorbida a las partículas del suelo, y los valores de succiones son muy altos, en esta zona el agua es tan escasa que no fluye entre los poros y la remoción puede ser sólo por evaporación (Pérez, Garnica, & Pola, 2013).

Una representación gráfica de las zonas se puede ver en la Figura 13, donde se puede comprender con mayor facilidad cada una de ellas.

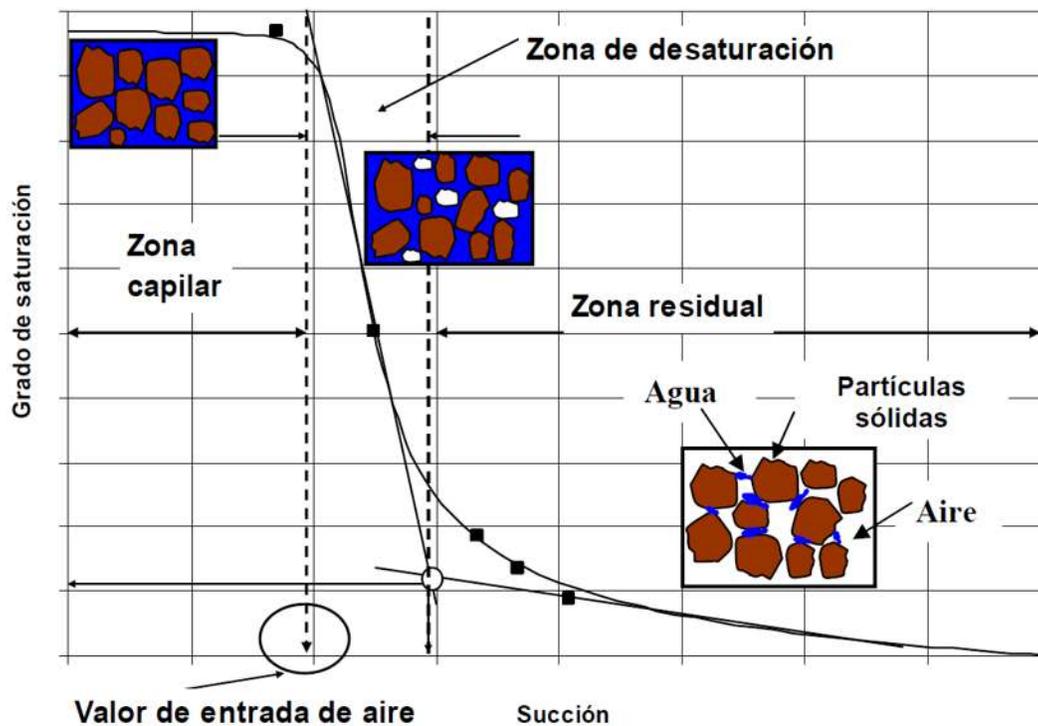


Figura 13. Regiones típicas de la curva característica (Pérez, Garnica, & Pola, 2013).

La obtención de los puntos que dan forma a la curva característica de un suelo, se realiza en el laboratorio. Existen métodos para medir el contenido de agua y la succión en una masa de suelo a distintos puntos de secado o humedecimiento.

2.7.2 Método de transferencia de vapor

La energía libre del agua del suelo se puede medir en términos de la presión de vapor parcial adyacente al agua del suelo (Richards, 1965) citado por (Fredlund, Rahardjo, & Fredlund, 2012). La relación termodinámica entre la succión del suelo y la presión parcial del vapor de agua de los poros se puede escribir de la siguiente manera:

$$\psi = \frac{RT_k}{v_{w0}\omega_v} \ln\left(\frac{U_v}{U_{v0}}\right)$$

Ecuación 19

Donde:

ψ = Succión total en (kPa).

R = Constante universal para gas [8.31432 J/(mol K)].

T = Temperatura absoluta [$T = (273.16 + t^\circ)$ (K)].

t° = Temperatura ($^\circ\text{C}$).

v_{w0} = Inverso de la densidad del agua $\left(\frac{1}{\rho_w}\right)\left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right)$

ρ_w = Densidad del agua $\left(998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ a una } t = 20^\circ\text{C}\right)$

ω_v = peso molecular del vapor de agua $\left(18.016 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}\right)$

U_v = Presión parcial de poro de vapor de agua (kPa)

U_{v0} = Presión saturada de agua sobre una superficie plana de agua pura a la misma temperatura(kPa)

El termino $\left(\frac{U_v}{U_{v0}}\right) \%$ es conocido y medido como Humedad relativa (*HR*).

2.7.3 Tubo abierto de elevación capilar

Yang, Rahardjo, Leong, & Fredlund (2004) utilizaron un tubo abierto de 1 metro de altura y 6 in de diámetro, relleno de material granular de suelo, con la finalidad de medir la ascensión capilar del agua ver Figura 14, y con ello medir la fuerza necesaria para que la partícula de agua llegara a diferentes alturas del tubo; basándose en la metodología de Lambe & Whitman, (1995). Esta describe la forma de calcular la fuerza que requiere una partícula de suelo para encontrarse en diferentes alturas en un suelo parcialmente saturado respecto al nivel de agua; la energía o fuerza que requiere la partícula de agua se denomina succión del suelo, y su expresión matemática se desglosa de la siguiente manera:

$$u_w = -\rho_w g h \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

u_w = Presión de agua de poro.

ρ_w = Densidad del agua (998 kg/m³ a $T = 20^\circ\text{C}$).

h = Altura de ascensión capilar (m).

g = fuerza de gravedad atmosférica (9.81 m/s²).

Ya que la succión matricial es igual a $(u_a - u_w)$, y al estar el tubo capilar abierto, el valor de u_a es igual a 0, la succión se puede expresar como el valor de $-u_w$; el signo negativo nos indica que es un esfuerzo contrario al que ejerce la gravedad, lo cual conocemos como succión, por lo tanto, la Ecuación 19 se puede escribir de la siguiente forma:

$$\psi = \rho_w g h$$

Ecuación 21

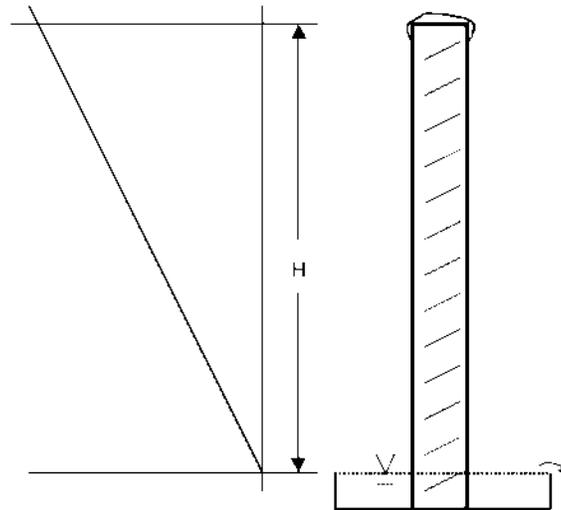


Figura 14. Tubo capilar y línea de potencia.

Hay un gran número de ecuaciones empíricas que se han propuesto para ajustar mejor el contenido de agua del laboratorio en comparación con los datos de succión del suelo. Los puntos de la curva de retención se miden en el laboratorio. Estas ecuaciones aparecen en la literatura de investigación y utilizan una de las tres variables principales para describir la cantidad de agua en el suelo; contenido de agua gravimétrica, contenido de agua volumétrica o grado de saturación (Fredlund & Houston, 2009).

2.7.4 Ecuación de ajuste para la curva de retención

Dado que la curva característica suelo-agua es la base para la predicción de otros parámetros de los suelos parcialmente saturados, como la permeabilidad y las funciones de resistencia al corte. Fredlund & Xing, (1994) proponen una ecuación matemática capaz de ajustarse a los datos de laboratorio, la expresión matemática es:

$$w(\psi) = C(\psi) \left(\frac{w_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a_f} \right)^{n_f} \right] \right\}^{m_f}} \right)$$

Donde:

$w(\psi)$ = Contenido de agua en cualquier succión del suelo.

$C(\psi)$ = Factor de corrección que es principalmente una función de succión correspondiente al contenido de agua residual, su expresión matemática es la siguiente:

$$C(\psi) = \left(\frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left[1 + \left(\frac{10^6}{\psi_r} \right) \right]} \right)$$

w_s = Contenido de agua en estado saturado.

a_f = Parámetro de ajuste que indica el punto de inflexión. Es mayor que el valor de entrada de aire.

n_f = Parámetro de ajuste relacionado con la tasa de desaturación.

m_f = Parámetro de ajuste relacionado con la curvatura cerca de las condiciones residuales.

$e = 2.71828$.

ψ = valor de succión (kPa).

ψ_r = Valor de succión residual (kPa).

2.8 Criterio de rechazo de Chauvenet

El criterio de Chauvenet, es un método que consiste en determinar si un dato experimental de un conjunto de mediciones es probable que sea un dato atípico (Sánchez Salinas & Gómez Galán, 2019).

Este criterio es iterativo y determina valores atípicos de una serie de datos en cada intervalo, creando líneas de confianza. Si un dato está fuera de las líneas de confianza se considera atípico. Mediante el procedimiento se pueden ir eliminando datos atípicos iterativamente hasta que todos estén dentro de las líneas de confianza.

Procedimiento del criterio de Chauvenet:

Con la Ecuación 24 se determinan los límites inferiores y superiores de la serie de datos.

$$x - k(n) * s \leq x_i \leq x + k(n) * s \quad \text{Ecuación 24}$$

x = promedio de los valores de la serie de datos.

$k(n)$ = coeficiente de Chauvenet que depende el número de datos (ver Tabla 4).

s = desviación estándar de los valores de la serie de datos.

Se aplica de manera reiterada el criterio hasta que no se rechace ninguna medida (todas las medidas están dentro de los Límites inferior y superior del criterio).

Tabla 4. Cálculo del coeficiente $k(n)$ del criterio de Chauvenet.

nº	α	$1-\alpha/2$	$K(n)$	nº	α	$1-\alpha/2$	$K(n)$
2	0,250	0,8750	1,15	55	0,0091	0,9955	2,61
3	0,1667	0,9167	1,38	56	0,0089	0,9955	2,615
4	0,1250	0,9375	1,54	57	0,0088	0,9956	2,62
5	0,1000	0,9500	1,65	58	0,0086	0,9957	2,63
6	0,0833	0,9583	1,73	59	0,0085	0,9958	2,635
7	0,0714	0,9643	1,8	60	0,0083	0,9958	2,64
8	0,0625	0,9688	1,86	70	0,0071	0,9964	2,69
9	0,0556	0,9722	1,92	80	0,0063	0,9969	2,74
10	0,0500	0,9750	1,96	90	0,0056	0,9972	2,77
20	0,0250	0,9875	2,24	100	0,0050	0,9975	2,81
30	0,0167	0,9917	2,4	300	0,0017	0,9992	3,14
40	0,0125	0,9938	2,48	500	0,0010	0,9995	3,29
50	0,0100	0,9950	2,57	1000	0,0005	0,9998	3,48

3 Estado del arte

En los últimos años se ha utilizado el M_r como un parámetro clave en el diseño mecanicista de los pavimentos, para caracterizar razonablemente el comportamiento elástico de los materiales del pavimento. Tomando en cuenta los principios de mecánica de suelos parcialmente saturados, se encuentra que el M_r está muy influenciado por los cambios de succión del suelo asociados con las fluctuaciones estacionales del contenido de agua. Por esta razón muchos investigadores durante la última década han propuesto varios enfoques utilizando la succión del suelo como el parámetro clave para interpretar y predecir el comportamiento del M_r respecto a los cambios en el contenido de agua.

3.1 Metodologías de ensayo

The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, (2004) desarrolló un procedimiento para el ensayo de M_r denominado (NCHRP 1-28). Esta metodología, mejoró los procedimientos anteriores de ASTM, AASHTO y SHRP logrando resultados más reproducibles. En la norma, se clasificó los materiales para fines de prueba respecto a la distribución del tamaño de las partículas y el índice de plasticidad, un esquema descriptivo se puede ver en las Figura 15 y Figura 16.

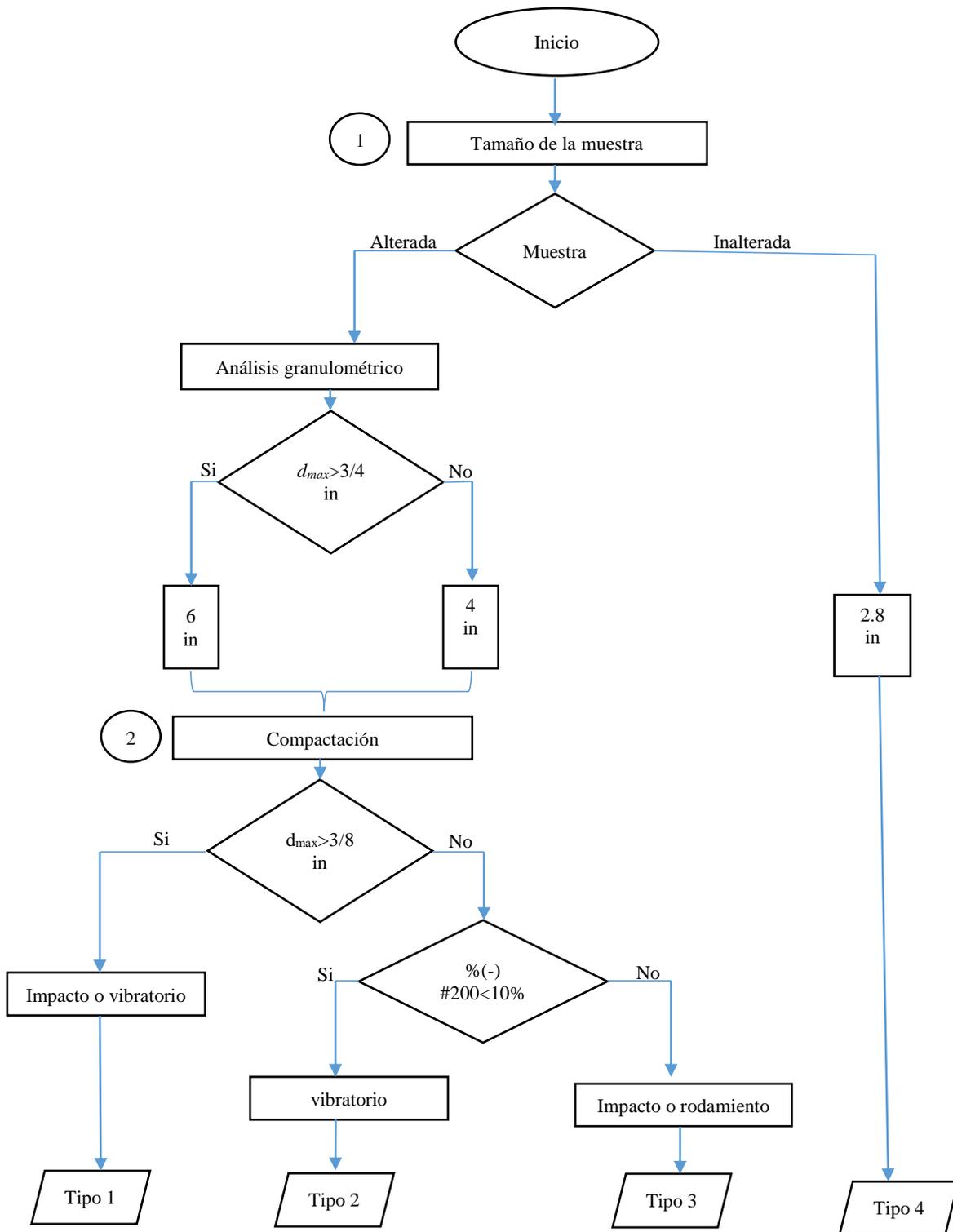


Figura 15. diagrama de flujo del método de prueba NCHRP 1-28.

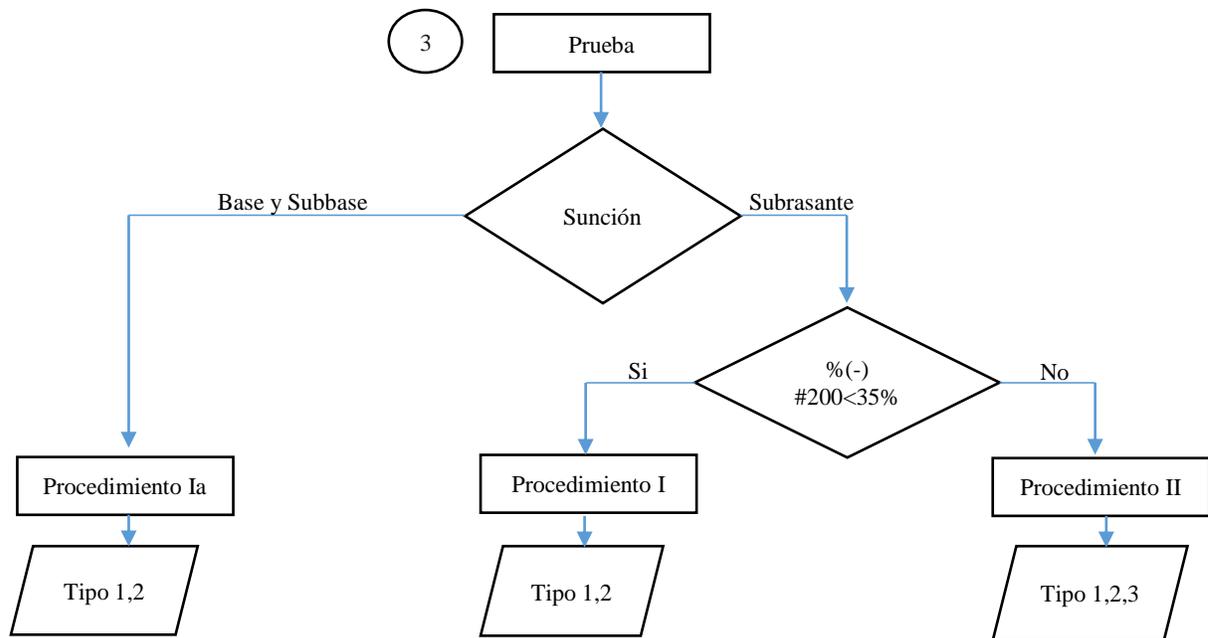


Figura 16. diagrama de flujo del método de prueba NCHRP 1-28.

3.2 Ecuaciones de ajuste

Varios investigadores durante los últimos diez años han propuesto enfoques para predecir el comportamiento resiliente de los materiales cohesivos y granulares teniendo en cuenta la influencia de la succión del suelo. Los estudios experimentales relacionados con el M_r de materiales granulares y los enfoques para predecir el comportamiento del M_r ante cambios de succión, están limitados en comparación con los materiales cohesivos, debido a las dificultades asociadas con el control efectivo y la medición confiable de los bajos valores de succión del suelo de los materiales granulares (Vanapalli & Han, 2014).

3.2.1 Ecuaciones empíricas

Pérez, Garnica & Gudiño (2012) proponen tres ecuaciones para 3 suelos del valle de Querétaro, utilizando el software MINITAB en los datos obtenidos de las pruebas de laboratorio. Las ecuaciones son las siguientes:

Suelo tipo CH:

$$M_r = e^{4.50 + 0.00296(\psi - \psi_{opt}) + 1.04(\gamma_d - \gamma_{dmax}) + 0.00620\sigma_3 - 0.0058\sigma_d} \quad \text{Ecuación 25}$$

Suelo tipo ML:

$$M_r = e^{4.08 + 0.000805(\psi - \psi_{opt}) + 2.61(\gamma_d - \gamma_{dmax}) + 0.0115\sigma_3 - 0.00368\sigma_d} \quad \text{Ecuación 26}$$

Suelo tipo SM:

$$M_r = e^{4.19 + 0.00313(\psi - \psi_{opt}) + 0.394(\gamma_d - \gamma_{dmax}) + 0.0150\sigma_3 - 0.00311\sigma_d} \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde:

e = Base de los logaritmos (2.71828)

$(\psi - \psi_{opt})$ = Variación de la succión ante un contenido de agua, con respecto a la succión ante el contenido de agua óptimo (kPa)

$(\gamma_d - \gamma_{dmax})$ = Variación del peso volumétrico seco con respecto al máximo de la prueba Proctor estándar (%)

σ_3 = Presión de confinamiento (kPa)

σ_d = Esfuerzo desviador (kPa)

Makhaly, Nokkaew, Fall, & Tinjum (2013) propusieron una ecuación empírica para un suelo granular, material de base para un pavimento flexible. Normalizando los valores de M_r/M_{ropt} y utilizando el log (ψ), observaron la tendencia lineal que proporciona la dispersión de los puntos de M_r/M_{ropt} a distintas log (ψ) y utilizando el principio de la línea de mejor ajuste obtuvieron la siguiente ecuación:

$$\frac{M_r}{M_{ropt}} = 0.385 + 0.267(\log \psi)$$

Donde:

M_r = Valor de M_r a diferentes secciones.

M_{ropt} = Valor de M_r en la succión en condiciones óptimas de humedad y compactación.

$\log \psi$ = Logaritmo de la succión.

3.2.2 Ecuaciones semi empíricas

Zhou, Yuan, & Xu (2013) proponen una ecuación semi empírica basándose en la relación que existe entre el módulo de corte en un suelo (G_0) y el módulo de resiliencia, debido a que el M_r es equivalente al módulo de Young y el módulo de Young está vinculado al módulo G_0 . La expresión matemática propuesta por estos investigadores es la siguiente:

$$M_r = M_0 \left(\frac{p}{p_r}\right)^{k_1} \left(1 + \frac{q_{cyc}}{p_r}\right)^{k_2} \left(1 + \frac{\psi}{p}\right)^{k_3} \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde:

M_0 = Módulo de resiliencia en un estado de esfuerzos de referencia.

p_r = Presión de referencia.

p = Esfuerzo total medio $((\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/(3-u_a))$.

q_{cyc} = Esfuerzo cíclico.

ψ = Succión.

k_1, k_2, k_3 = Parámetros de ajuste de la ecuación.

Han & Vanapalli (2015) proponen un nuevo modelo semi - empírico para la predicción de la variación del M_r respecto a la succión, para los suelos de subrasante de grano fino, utilizando los parámetros de la curva característica calculados mediante la expresión matemática propuesta por Fredlun & Xing (1994), Ecuación 22.

$$\frac{M_r - M_{rsat}}{M_{ropt} - M_{rsat}} = \frac{\psi}{\psi_{opt}} \left(\frac{\ln[2.718 + (\frac{\psi_{opt}}{a})^n]}{\ln[2.718 + (\frac{\psi}{a})^n]} \right)^{m\xi} \quad \text{Ecuación 30}$$

Donde:

M_{rsat} = Valor de M_r en condiciones saturadas.

M_{ropt} = Valor de M_r en condiciones óptimas de humedad y compactación.

ψ = Succión.

ψ_{opt} = Valor de succión ante condiciones óptimas de humedad y compactación.

a , n y m = Parámetros de ajuste de la ecuación de Fredlun & Xing.

ξ = Parámetro de ajuste del modelo.

Los modelos semi-empíricos proporcionan buenas predicciones para diferentes suelos con base en la determinación razonable de los parámetros del modelo. No obstante los parámetros de los modelos son difíciles de obtener experimentalmente. Por lo tanto, puede no ser práctico para muchas empresas de diseño de pavimentos.

Los modelos empíricos son más sencillos en la obtención de los parámetros del modelo, y tienen una mejor predicción que los modelos semi-empíricos, sin embargo, solo funcionan para el suelo que son propuestos. La implementación de los modelos semi-empíricos requiere de modelos empíricos, de donde se toman datos e ideas.

4 Estudios de laboratorio

Para el desarrollo de este trabajo fue necesario realizar una caracterización geotécnica completa del material en estudio, con la finalidad de tener un amplio conocimiento del comportamiento de este. Las pruebas realizadas para este trabajo fueron:

1. Muestreo del material.
2. Pruebas índice.
3. Pruebas de compactación y CBR.
4. Determinación de la curva característica.
5. Ensayos de módulo de resiliencia con distintas succiones.

4.1 Muestreo del material

El material utilizado en esta investigación fue muestreado de la ampliación que está siendo efectuada en la autopista siglo XXI (ATPSXXI), del tramo que comprende el entronque de Pátzcuaro-Morelia en el kilómetro 6+000, con base en el manual (M-MMP-1-01/03). En la Figura 17 se puede ver la ubicación del punto de muestreo y el material; las coordenadas del sitio de muestreo son ($19^{\circ}29'34.98''$ N, $101^{\circ}36'20.45''$ O).



Figura 17. Ubicación del punto de muestreo.

4.2 Pruebas índice

4.2.1 Granulometría

Este ensayo se realiza con forme al manual M-MMP-1-06/03, con la finalidad de separar por tamaños las partículas del suelo, pasando a través de una sucesión de tamices (mallas de aberturas cuadradas) y pesar las proporciones que se retienen en cada una de ellas, expresando dicho material retenido en porcentaje del peso de la muestra ver la Tabla 5. Los resultados se presentan en la gráfica de la Figura 18. La cual presenta los coeficientes de uniformidad y curvatura de 61.5 y 1.38 respectivamente.

Tabla 5. Granulometría del material de la ATPSXXI para la capa subrasante.

Malla No.	Peso suelo retenido (gr)	Porcentaje retenido parcial (%)	Porcentaje que pasa (%)	Malla No.	Peso suelo retenido (gr)	Porcentaje retenido parcial (%)	Porcentaje que pasa (%)
3"	0	0.00	100.00	No. 10	54.4	12.99	34.75
2"	0	0.00	100.00	No. 20	35.4	8.45	26.30
1 1/2"	887	5.91	94.09	No. 40	33.6	8.02	18.28
1"	1790	11.93	82.15	No. 60	17.4	4.15	14.13
3/4"	807	5.38	76.77	No. 100	10.4	2.48	11.65
1/2"	1007	6.71	70.06	No. 200	23.2	5.54	6.11
3/8"	1045	6.97	63.09	Pasa 200	25.6	6.11	0.00
1/4"	1244	8.29	54.80	Suma	200	47.74	
No. 4	1059	7.06	47.74				
Pasa No. 4	7161	47.74					
Suma	15000	100.00					

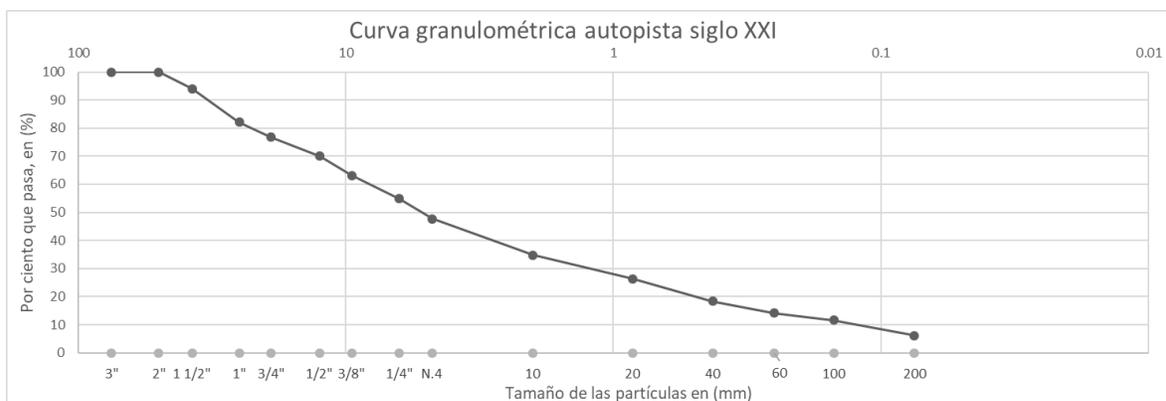


Figura 18. Curva granulométrica del material de la ATPSXXI para la capa subrasante.

4.2.2 Límites de consistencia

Se realizaron de acuerdo con el manual M-MMP-1-07/07. Esta prueba permite conocer la plasticidad de los materiales utilizados en terracerías que pasan la malla N°40. Para el caso de estudio no fue posible realizarles la prueba de límite líquido e índice plástico. Esto se debe a que el material fino no presenta propiedades plásticas.

4.2.3 Peso específico relativo de los sólidos

Esta prueba permite determinar la relación masa-volumen del material respecto a la relación masa-volumen del agua, y el cambio de masa del material debido a la entrada de agua en sus poros, con respecto a su condición en estado seco.

La prueba le fue realizada al material que pasa la malla N°40, la cual dio como resultado que el material presenta un peso específico relativo de los sólidos de ($S_s = 2.63$).

4.2.4 Clasificación de suelos

Mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), fue clasificado el material de la ATPSXXI, los datos se pueden ver en la Tabla 6. La clasificación dio como resultado que el suelo conformador de la capa subrasante es una Grava bien graduada con finos no plásticos (GW-GM).

Tabla 6. Clasificación de suelos mediante el sistema (SUCS).

Clasificación (SUCS)			
Grava (G) =52.26%	$D_{10} = 0.13$	$C_u = 61.54$	LL (Inapreciable)
Arena (S) =41.63%	$D_{30} = 1.2$	$C_c = 1.38$	IP (Inapreciable)
Finos (F) =6.11%	$D_{60} = 8$		

De la misma forma fue clasificado el material usando el sistema de clasificación (AASHTO), el cual está basado en la norma ASTM-3282 del método AASHTO M145. Con los datos

mostrados en la Tabla 7 la clasificación del suelo en estudio es, (A-1-a) la cual pertenece al grupo de clasificación de materiales granulares, donde el 35% o menos de las partículas pasan la malla N°200.

Tabla 7. Datos para la clasificación de suelos (AASHTO).

Malla No.	Porcentaje que pasa (%)
No. 10	34.75
No. 20	26.30
No. 40	18.28
No. 60	14.13
No. 100	11.65
No. 200	6.11
Pasa. 200	0.00

4.3 Pruebas de compactación y CBR

4.3.1 Compactación AASHTO

Con la finalidad de conocer el peso específico seco máximo del suelo y el contenido de agua óptimo, le fueron realizadas al material las pruebas de compactación AASHTO estándar y AASHTO modificada, con forme lo marca el manual M-MMP-1-09/06. Las curvas de compactación se muestran en la Figura 19, donde se puede observar que los resultados de peso específico seco máximo y contenido de agua óptimo son de ($\gamma_d = 14.68 \text{ kN/m}^3$ con un $w = 7.25 \%$) para AASHTO estándar y de ($\gamma_d = 16.26 \text{ kN/m}^3$ con un $w = 0.75 \%$) para AASHTO modificada.

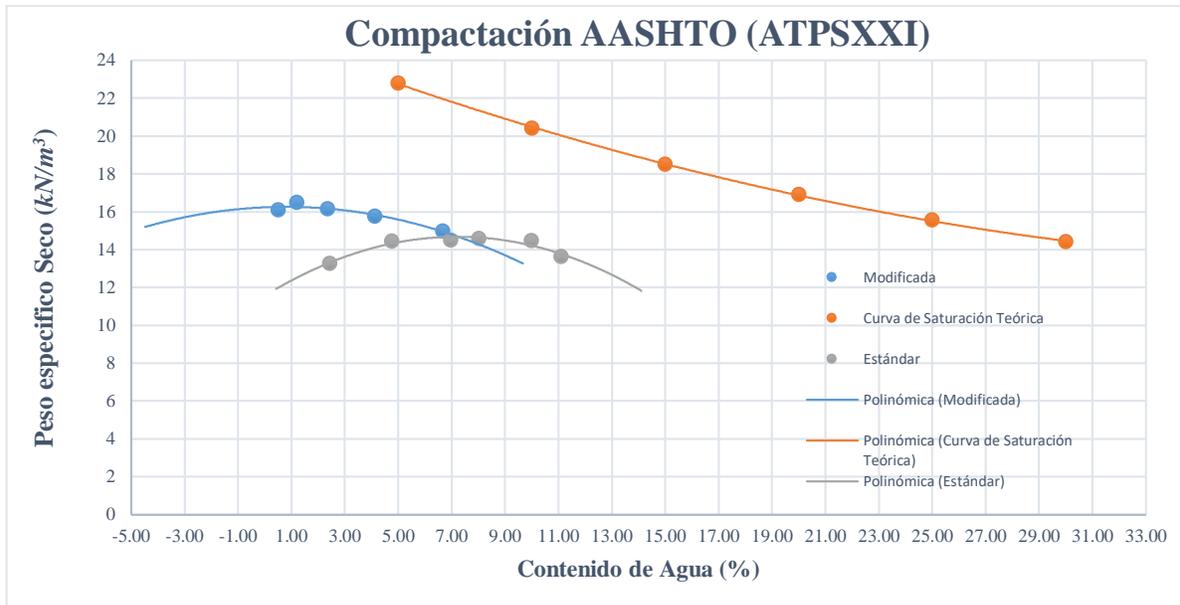


Figura 19. Curvas de compactación, metodología AASHTO.

4.3.2 Expansión y CBR

Fue utilizado el manual M-MMP-1-11/08, para conocer la expansión (Exp) originada por la saturación del material, así como el valor soporte de California (*CBR*), del material en estudio, el cual da como resultado un valor de Exp de (0.15mm o 0.12% respecto al tamaño de la muestra), y un *CBR* de 40.42 % que fue obtenido para un γ_d de 14.69 kN/m^3 , ver la Tabla 8 y la Figura 20.

Tabla 8. Resultados de CBR.

<i>CBR</i> (%)	40.42
γ_d (kN/m^3)	14.69
<i>W</i>%	7.25

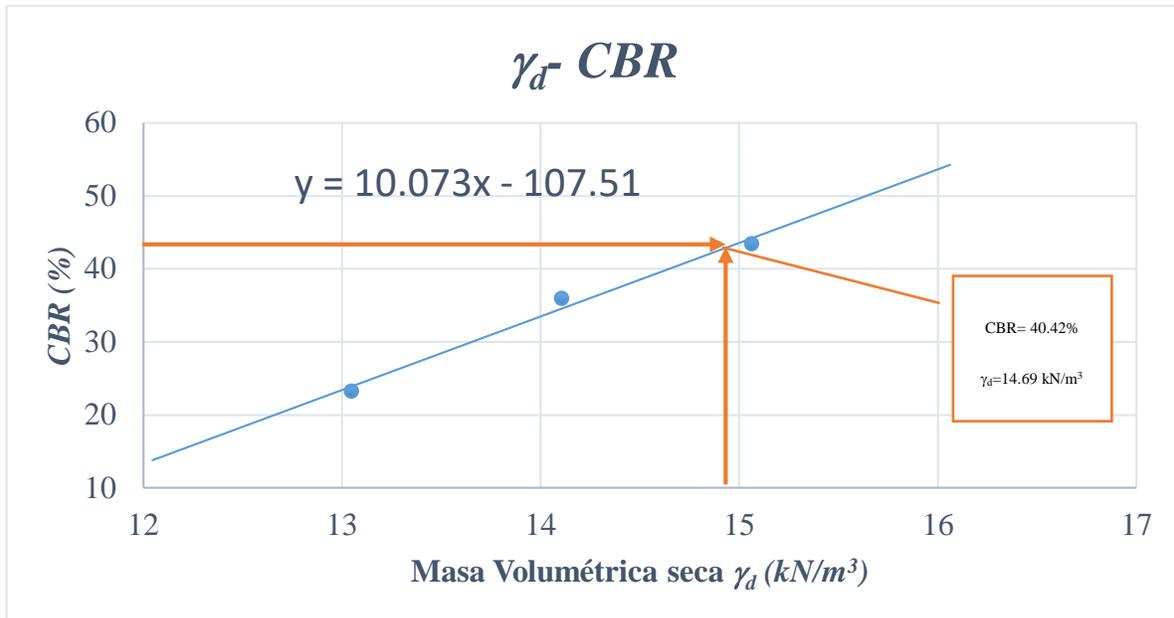


Figura 20. Representación gráfica de los CBR a diferentes γ_d .

4.4 Determinación de la curva característica

La obtención de los puntos que dan forma a la curva característica del suelo fue llevada a cabo en el laboratorio mediante dos métodos, esto con la finalidad de lograr una representación de la curva de retención más exacta. Las metodologías usadas fueron:

1. Columna de elevación capilar.
2. Método de transferencia de vapor de agua.

4.4.1 Columna de elevación capilar

Debido a que el material conformador de la capa subrasante para la ampliación en la ATPSXXI es un material granular, que se clasificó como (GW-GM) fue necesaria, la utilización de la metodología de Lambe & Whitman (1995), donde describe la forma de calcular la fuerza que requiere una partícula de agua, para encontrarse en diferentes alturas, en un suelo parcialmente saturado, respecto al nivel de agua freáticas. Fue implementado un ensayo de ascensión capilar conocido como columna de elevación capilar (ver Figura 21), el cual permite conocer la elevación capilar que alcanza el suelo en estudio, y se puede medir

en distintos puntos el esfuerzo o succión que requiere la partícula de agua para permanecer en este punto, al igual que el contenido de agua en el mismo punto mencionado.

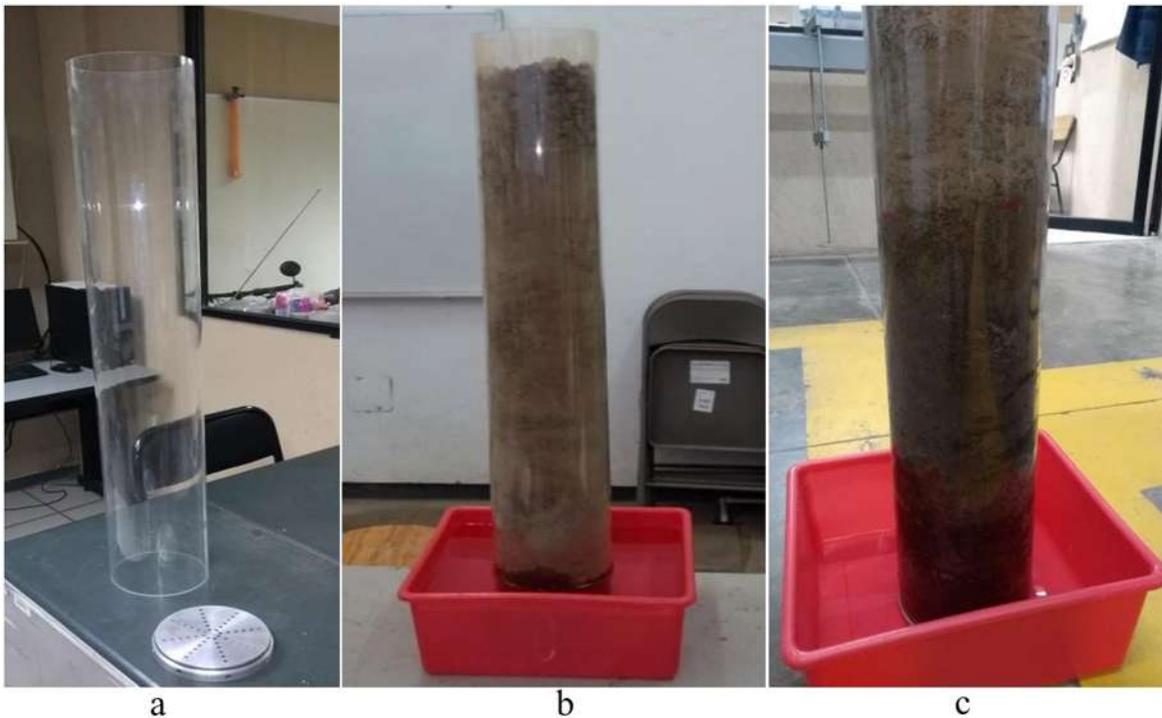


Figura 21. a) Columna de elevación capilar. b y c) Elevación del agua en la columna a distintos tiempos

El ensayo de columna de elevación capilar fue efectuado de la siguiente manera:

1. En un tubo de acrílico de 1 m de altura y 0.1524 m de diámetro, tapado en la parte inferior por una placa perforada especialmente para permitir el ingreso de agua y lograr la elevación capilar (ver Figura 21). Fue llenada la columna con el suelo a analizar y compactada con un pisón, tratando de reproducir el volumétrico necesario.
2. Posteriormente, la columna fue introducida en un recipiente de agua destilada a un nivel constante, el cual representa el nivel freático.
3. Fue mantenido un monitoreo de la elevación capilar, hasta el punto donde se mantiene constante.
4. Una vez constante la elevación capilar fue dividido el tubo en distintas alturas, las cuales se pueden ver en la Tabla 9, y en cada punto de estas elevaciones se extrajo el

material para posteriormente determinar el contenido de agua mediante el secado en horno.

5. Con las diferentes alturas de elevación capilar que fueron registradas, fue calculada la succión mediante la Ecuación 21, estos resultados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores de la prueba de tubo abierto de elevación capilar y resultados de succión calculados con la ecuación.

No	$H (m)$	$w(\%)$	Sr	$\psi(kPa)$
1	0.02	23.9977676	0.57307124	0.20
2	0.04	20.5985915	0.49189827	0.39
3	0.06	19.4672131	0.46488074	0.59
4	0.08	18.852459	0.45020029	0.78
5	0.10	17.2236504	0.41130403	0.98
6	0.12	16.6666667	0.39800316	1.18
7	0.14	16.3487738	0.39041182	1.37
8	0.16	16.1473088	0.38560079	1.57
9	0.18	15.1741294	0.36236108	1.77
10	0.20	14.3250689	0.34208536	1.96
11	0.24	13.7640449	0.328688	2.35
12	0.28	12.8787879	0.30754789	2.75
13	0.32	9.53488372	0.22769483	3.14
14	0.36	7.50798722	0.17929216	3.53
15	0.40	4.35571688	0.10401534	3.92

4.4.2 Método de transferencia de vapor de agua

Dada la necesidad de medir los puntos de succión residual del suelo analizado, y la dificultad que presenta obtener estos puntos en materiales granulares. Se recurre a la idea propuesta por Richards (1965), la cual indica que la energía libre de agua del suelo se puede medir en términos de presión de vapor parcial adyacente al agua del suelo.

La metodología propone medir la humedad relativa $\left(HR = \frac{U_v}{U_{v0}} \right)$ del aire en contacto con el suelo utilizando un sensor en un circuito cerrado, donde se puede secar o humedecer el espécimen de suelo que está siendo analizado (ver Figura 22). El ensayo de laboratorio utilizado para medir la HR del suelo en estudio consta de los siguientes pasos y equipos:

- 1 Sensor de *HR* y Temperatura en ($^{\circ}\text{C}$) (Higrómetro).
- 2 Bomba de aire.
- 3 Panel de control de la bomba de aire.
- 4 Depósito de sustancia secante o hidratante.
- 5 Cámara triaxial con espécimen de prueba.

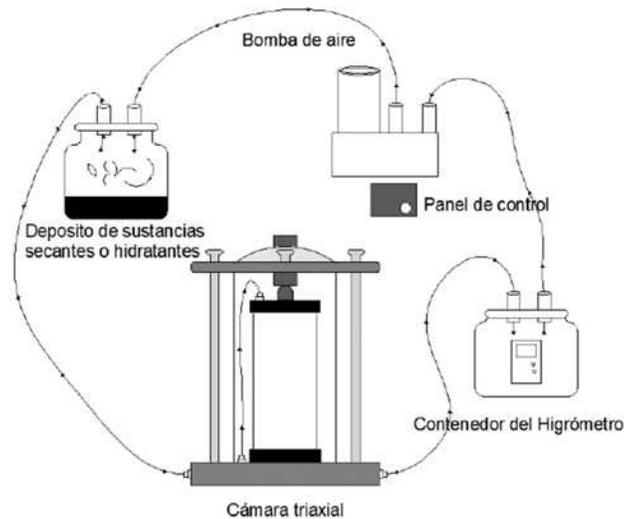


Figura 22. Circuito cerrado de transferencia de humedad.

Los pasos para realizar la prueba de vapor de aire son:

1. En la cámara triaxial debe ser compactado un espécimen con la humedad óptima y el peso volumétrico seco óptimo deseado.
2. Una vez que el espécimen se encuentra montado en la cámara triaxial en las condiciones antes mencionadas, se procede a conectar el circuito cerrado de transferencia de vapor, con la finalidad de circular una corriente de aire húmedo o seco dentro de la muestra, y leer que *HR* presenta la muestra dependiendo de la humedad del vapor de aire (ver la Figura 23).
3. El secado del aire que circula por la muestra se realiza con la utilización de hidróxido de sodio (NaOH), el cual tiene la capacidad de retener las partículas de agua, llevando

el aire a una $HR=10\%$, y permite con esto el secado de la muestra en los puntos deseados (ver la Figura 23).

4. La obtención de los datos de HR y temperatura, se realiza con un transmisor modelo C12A0A3A0 de la marca Vaisala, el cual fue conectado a una tarjeta de National Instruments modelo CB-68LP mediante el programa LABview 2016. La conexión y el algoritmo utilizado para la decodificación de los datos fueron realizados en colaboración con el M.I. Tarcisio Domínguez Telles, técnico responsable del laboratorio.
5. Con los datos de HR y Temperatura se calculan los valores de succión utilizando la Ecuación 19, estos resultados se pueden ver en la Tabla 10 al igual que los contenidos de agua, los cuales se determinan mediante secado en horno.



Figura 23. Prueba de HR.

Tabla 10. Resultados obtenidos con la prueba de transferencia de vapor de aire.

$w \%$	Sr	$T (^{\circ}C)$	$HR\%$	$\psi (kPa)$
0.74	0.02	19.84	80.50	29312.60
0.67	0.02	20.23	70.50	47388.40
0.61	0.02	19.77	62.27	63924.10
0.29	0.01	20	50.00	93608.60
0.26	0.01	20.5	39.90	124281.00
0.35	0.01	20.26	35.43	140245.00

4.4.3 Ajuste para la curva de retención

Con los datos determinados mediante las dos técnicas antes mencionadas, se realiza un ajuste de la ecuación de Fredlun & Xing, 1994 (Ecuación 22), para lograr la mayor representación de esta a los datos de laboratorio. El resultado de este ajuste se puede apreciar gráficamente en la Figura 24, y los parámetros de la ecuación se encuentran en la Tabla 11.

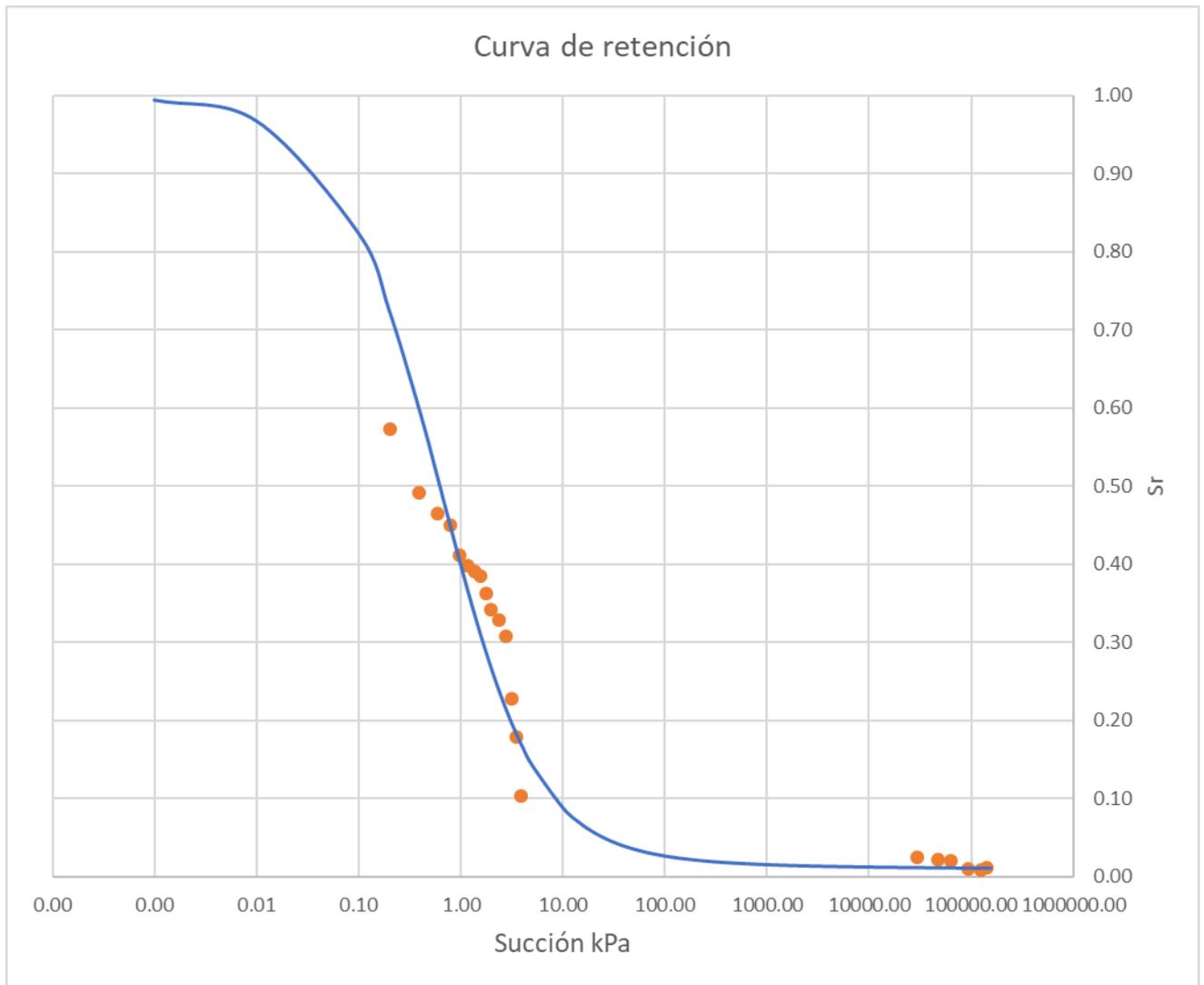


Figura 24. Curva de retención determinada con la ecuación de Fredlun & Xing, 1994.

Tabla 11. Parámetros de ajuste para la ecuación de Fredlun & Xing, 1994

n_f	a_f	m_f	S_{rr}	ψ_r	S_{rs}
0.8	0.8	3	0.01	93608.6	1

4.5 Ensayo de módulo de resiliencia

Los ensayos de M_r se realizaron utilizando la norma AASTHO T307, en dos variantes.

- 1 Ensayo de módulo resiliente en condiciones óptimas (M_{ropt}) el cual corresponde al ensayo de un espécimen remoldeado en condiciones de humedad y peso volumétrico seco óptimo.
- 2 Ensayos de módulo resiliente a diferentes succiones. Estos ensayos fueron realizados a contenidos de agua por encima del óptimo y por debajo del mismo, con la finalidad de medir la variación que el contenido de agua le provoca al M_r .

4.5.1 Ensayo de M_{ropt}

Para el ensayo en laboratorio del M_{ropt} se utilizó la norma AASTHO T307, la cual indica que el espécimen a probar para una subrasante debe ser compactado en 6 capas dentro de un molde con las siguientes dimensiones; 7.5 cm de diámetro y 15 cm de alto. Logrando reproducir el volumétrico correspondiente al grado de compactación necesario y contenido de agua óptimo para las capas de subrasante, el cual corresponde a 100% de compactación respecto a la prueba AASHTO estándar como lo marca la norma N-CMT-1-03/02.



Figura 25. Compactación y reproducción del espécimen de prueba.

Con base en lo anterior el espécimen a probar fue compactado en el molde mencionado ver (Figura 25), con un contenido de agua de 7.25% en 6 capas, utilizando un pisón neumático para la compactación, y reproduciendo un peso volumétrico seco suelto de 14.68 kN/m^3 .

Ya compactado el espécimen y montado dentro de la cámara triaxial, se procede a aplicar la secuencia de cargas necesarias para la prueba de subrasante de acuerdo con la norma AASHTO T307, la cual se encuentra en la Tabla 2.

La obtención de los datos de las pruebas se realiza a través de los dispositivos de carga y deformación que se encuentran en el equipo (ver Figura 9), los cuales a su vez, están conectados a una tarjeta de National Instruments y la decodificación de los datos se realiza utilizando un algoritmo en el programa LABview, con lo cual permite tener los datos en formato xml.

Una vez contando con los datos en la Pc en el formato xml, se procede a calcular los M_r de cada esfuerzo aplicado y se genera un compendio de los M_r obtenidos en la prueba. Estos resultados se pueden ver en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultados de $M_{r\text{opt}}$.

Confinamiento	Desviador	M_r
kPa	kPa	kPa
41.4	27.6	104410.16
41.4	41.4	109226.47
41.4	55.2	108912.47
41.4	68.9	103815.56
27.6	27.6	89952.32
27.6	41.4	81434.11
27.6	55.2	83095.29
27.6	68.9	86979.82
13.8	24.8	63655.69
13.8	37.3	62376.44
13.8	49.7	64245.88
13.8	62	71294.63

4.5.2 Ensayos de módulo resiliente a diferentes succiones

Los ensayos de M_r a diferentes contenidos de agua fueron realizados de la misma forma que los M_{ropt} , respecto al proceso de compactación y montaje del espécimen en la cámara triaxial. Posteriormente una vez montados en la cámara, se procedió a secar o humedecer el material con el sistema de circuito cerrado para la transferencia del vapor, el cual se puede ver en la Figura 22.

1. El secado del material fue realizado con (NaOH, hidróxido de sodio con HR=10%), la cual permite el secado del vapor de aire húmedo y con esto se logra la reducción del contenido de agua por debajo del óptimo, (ver Figura 23). Durante el secado fue monitoreado el valor de $HR\%$ y $T^{\circ}C$, el cual permite conocer los contenidos de agua del material, y así seleccionar los valores en los cuales se desea conocer el M_r .
2. El humedecimiento de los especímenes por encima del óptimo fue realizado por transferencia de vapor de aire. Con la utilización de agua destilada en el circuito cerrado se humedece el vapor de aire (HR al 100%) que circulará a través de la muestra, logrando con ello que se eleve el contenido de agua dentro del espécimen, (ver Figura 26). El control del contenido de agua del espécimen se realizó de la siguiente forma. En primera instancia se conocía el contenido de agua óptimo y el peso del recipiente con agua, se fue monitoreando en el tiempo la variación del peso del recipiente con agua y se asumió que esta se transfería al suelo. Cuando se lograba la transferencia necesaria para tener el contenido de agua deseado, se retiró el recipiente con agua y se dejaba equilibrar por un tiempo de un día la humedad dentro del circuito.
3. Después se ensayaba el suelo y al final se verificaba los contenidos de agua en la parte superior, media e inferior del espécimen; con la finalidad de verificar que todo el espécimen tuviera el mismo contenido de agua



Figura 26. Elevación del contenido de agua de un espécimen por encima del óptimo.

Los diferentes contenidos de agua analizados y los M_r obtenidos en estas pruebas se muestran en las , una representación gráfica del comportamiento de los valores de M_r a diferentes succiones se muestra en la Figura 26.

Tabla 13 y Tabla 14, una representación gráfica del comportamiento de los valores de M_r a diferentes succiones se muestra en la Figura 26.

Tabla 13. Valores de M_r a contenidos de agua óptimos y mayores a este.

$w\%$	7.25 opt	7.32	9.30	10.01	10.16	11.05
S_r	0.24	0.25	0.31	0.33	0.34	0.37
ψ (kPa)	2.40	2.30	1.69	1.51	1.48	1.30
θ	M_r	M_r	M_r	M_r	M_r	M_r
kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
151.80	104,410.16	172,664.71	79,725.02	87,838.15	123,647.60	109,756.85
165.60	109,226.47	122,050.76	93,671.79	89,424.57	164,819.55	96,246.39
179.40	108,912.47	114,021.04	102,031.53	95,743.55	118,725.87	100,962.37
193.10	103,815.56	104,904.63	106,833.44	96,330.23	118,110.24	114,813.35
110.40	89,952.33	100,430.42	66,246.06	61,444.14	115,221.35	57,574.76
124.20	81,434.11	94,106.37	82,555.64	68,426.26	90,347.13	68,865.34
138.00	83,095.30	91,399.04	80,912.70	71,853.43	90,202.58	83,093.64
151.70	86,979.82	95,476.37	86,700.07	79,560.27	86,697.49	80,345.06
66.20	63,655.69	120,996.44	49,114.75	56,069.20	89,285.71	50,910.93
78.70	62,376.44	81,432.61	57,198.57	60,724.23	78,228.66	56,873.01
91.10	64,245.88	80,902.19	72,952.31	67,478.78	74,886.54	60,773.32
103.40	71,294.63	81,142.72	74,663.16	77,352.94	71,886.76	70,385.07

Tabla 14. Valores de M_r a contenidos de agua menores al óptimo.

$w\%$	0.26	0.29	0.35	0.61	0.67	0.74
S_r	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
ψ (kPa)	534,200.00	255,900.00	57,150.00	475.00	295.00	185.00
θ	M_r	M_r	M_r	M_r	M_r	M_r
kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
151.80	124,022.35	194,865.14	131,878.03	148,354.61	129,610.84	129,637.83
165.60	168,934.24	189,734.59	134,179.97	154,995.94	142,833.48	138,708.60
179.40	170,481.93	168,327.73	136,533.86	157,351.21	144,125.70	148,171.29
193.10	168,049.79	167,230.43	132,103.76	145,644.60	146,666.85	146,887.30
110.40	121,239.34	133,968.25	125,381.23	158,426.66	116,771.68	138,523.18
124.20	133,027.52	147,393.36	122,834.65	129,473.86	125,440.52	125,212.45
138.00	139,037.43	159,700.65	120,089.79	130,901.80	128,632.68	124,774.77
151.70	146,428.57	157,429.72	120,983.94	130,269.55	140,164.62	120,693.67
66.20	103,899.44	86,403.16	-----	-----	101,071.33	110,619.47
78.70	109,259.26	98,071.17	97,323.60	112,053.57	105,417.48	97,223.67
91.10	124,171.78	117,092.45	107,881.64	113,124.27	112,432.43	112,802.76
103.40	128,519.02	126,931.89	111,777.78	110,180.10	121,095.79	117,120.49

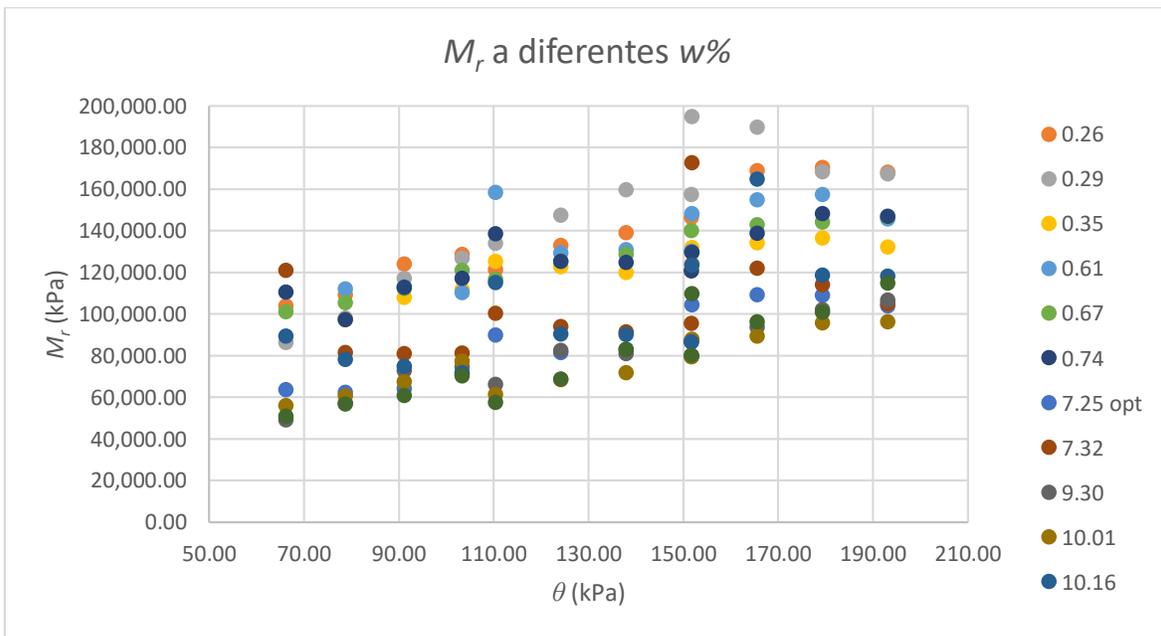


Tabla 15. Representación gráfica de los puntos de M_r contra θ a diferentes $w\%$.

5 Análisis y ajuste de ecuaciones con módulos de resiliencia a diferentes contenidos de agua

Los datos de M_r obtenidos en laboratorio son procesados en dos etapas: etapa 1, los módulos óptimos (M_{ropt}) son con los cuales se busca la ecuación de ajuste que dé los mejores resultados, y etapa 2, se ajustan los M_r a diferentes succiones o grados de saturación.

5.1 Etapa I, ajuste de M_{ropt}

Los datos de M_{ropt} fueron ajustados a la ecuación AASHTO 2004 (Ecuación 12) y a la ecuación $K - \theta$ (Ecuación 10), para conocer cuál de las dos ecuaciones proporciona mejores resultados. El mejor ajuste se obtuvo con la Ecuación 12, por esta razón en los siguientes análisis de M_r a diferentes succiones se utiliza esta ecuación para calcular el M_{ropt} .

5.1.1 Ajuste ecuación $K - \theta$ para M_{ropt}

Con los datos de M_{ropt} obtenidos en el laboratorio, fue realizado el ajuste de la Ecuación 10, para conocer los parámetros que proporcionan el mejor ajuste de esta ecuación a dichos datos. Los resultados de este ajuste se pueden apreciar en la Figura 27 y la

Tabla 16. Los parámetros de ajuste que proporcionaron el mejor resultado son $k = 5,074.8$ y $n = 0.5831$, los cuales dan una correlación de $R^2 = 0.85$. Los rangos de error de la ecuación de ajuste varían entre -2.38% a 9.67% respecto a los valores obtenidos en laboratorio.

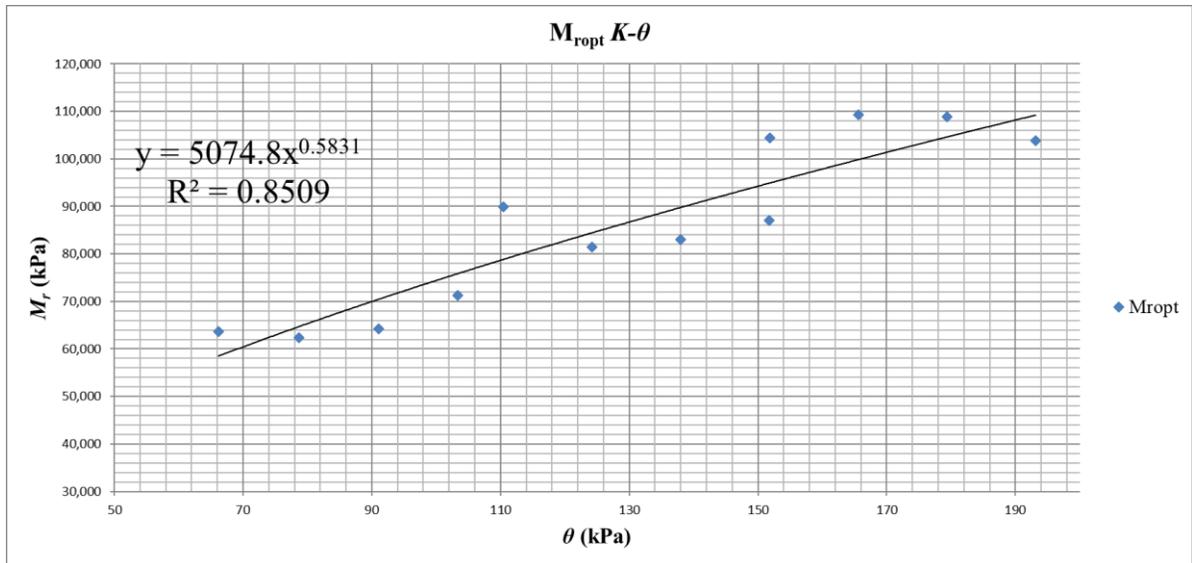


Figura 27. Ajuste ecuación K- θ .

Tabla 16. Datos para el ajuste de la ecuación K- θ .

Confinamiento	Desviador	Invariante	M_{rop}	M_r Ecuación
kPa	kPa	θ	kPa	kPa
41.4	27.6	151.8	104,410.16	94,896.46
41.4	41.4	165.6	109,226.47	99,835.40
41.4	55.2	179.4	108,912.47	104,605.45
41.4	68.9	193.1	103,815.56	109,191.82
27.6	27.6	110.4	89,952.33	78,814.43
27.6	41.4	124.2	81,434.11	84,417.55
27.6	55.2	138	83,095.30	89,766.43
27.6	68.9	151.7	86,979.82	94,860.01
13.8	24.8	66.2	63,655.69	58,491.50
13.8	37.3	78.7	62,376.44	64,698.37
13.8	49.7	91.1	64,245.88	70,460.49
13.8	62	103.4	71,294.63	75,860.79

5.1.2 Ajuste ecuación AASHTO para M_{ropt}

Posteriormente se realiza el ajuste de la Ecuación 12. Los valores de los coeficientes que proporcionan el mejor ajuste de la ecuación a los datos de laboratorio son: $k_1 = 937.39$, $k_2 = 0.718$ y $k_3 = -1.34$. El resultado se puede apreciar gráficamente en las Figura 28 y la Figura 29. Los resultados de los cálculos se muestran en la Tabla 17. El coeficiente de correlación del ajuste es de $R^2 = 0.98$. El error del ajuste varía entre -5.56% a 5.91% respecto a los valores obtenidos en laboratorio.

Tabla 17. Datos para el ajuste de la ecuación AASHTO y resultados.

Confinamiento kPa	Desviador kPa	σ_1 kPa	σ_2 kPa	σ_3 kPa	θ kPa	τ_{oct} kPa	P_a kPa	M_r Laboratorio kPa	M_r Ecuación kPa
41.40	27.60	69.00	41.40	41.40	151.80	13.01	101	104,410.16	107,838.85
41.40	41.40	82.80	41.40	41.40	165.60	19.52	101	109,226.47	106,564.92
41.40	55.20	96.60	41.40	41.40	179.40	26.02	101	108,912.47	105,190.97
41.40	68.90	110.30	41.40	41.40	193.10	32.48	101	103,815.56	103,768.26
27.60	27.60	55.20	27.60	27.60	110.40	13.01	101	89,952.33	85,797.36
27.60	41.40	69.00	27.60	27.60	124.20	19.52	101	81,434.11	86,677.88
27.60	55.20	82.80	27.60	27.60	138.00	26.02	101	83,095.30	87,129.88
27.60	68.90	96.50	27.60	27.60	151.70	32.48	101	86,979.82	87,261.07
13.80	24.80	38.60	13.80	13.80	66.20	11.69	101	63,655.69	60,363.57
13.80	37.30	51.10	13.80	13.80	78.70	17.58	101	62,376.44	63,833.33
13.80	49.70	63.50	13.80	13.80	91.10	23.43	101	64,245.88	66,476.74
13.80	62.00	75.80	13.80	13.80	103.40	29.23	101	71,294.63	68,494.48

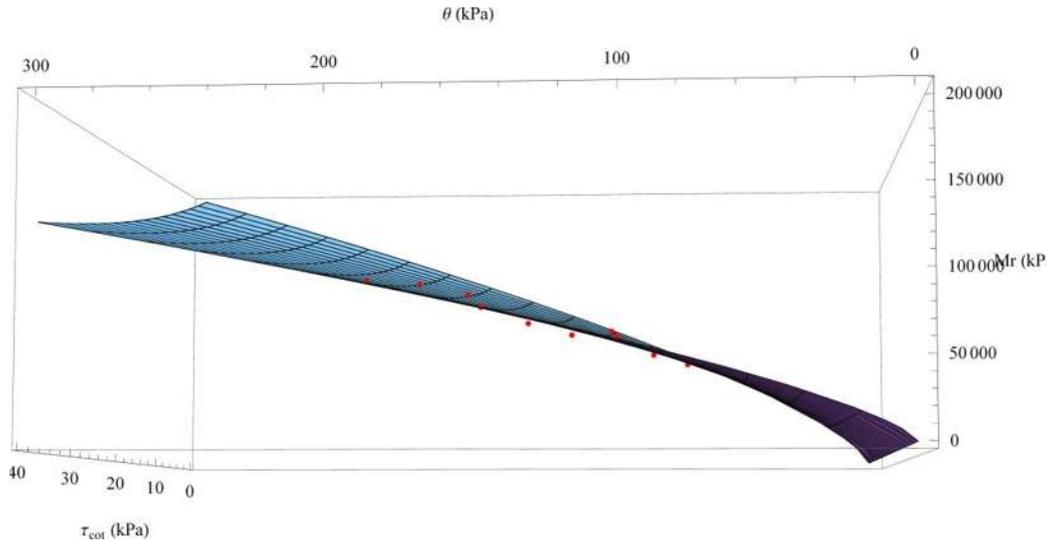


Figura 28. Ajuste en 3D de los M_{ropt} de laboratorio a la ecuación AASHTO.

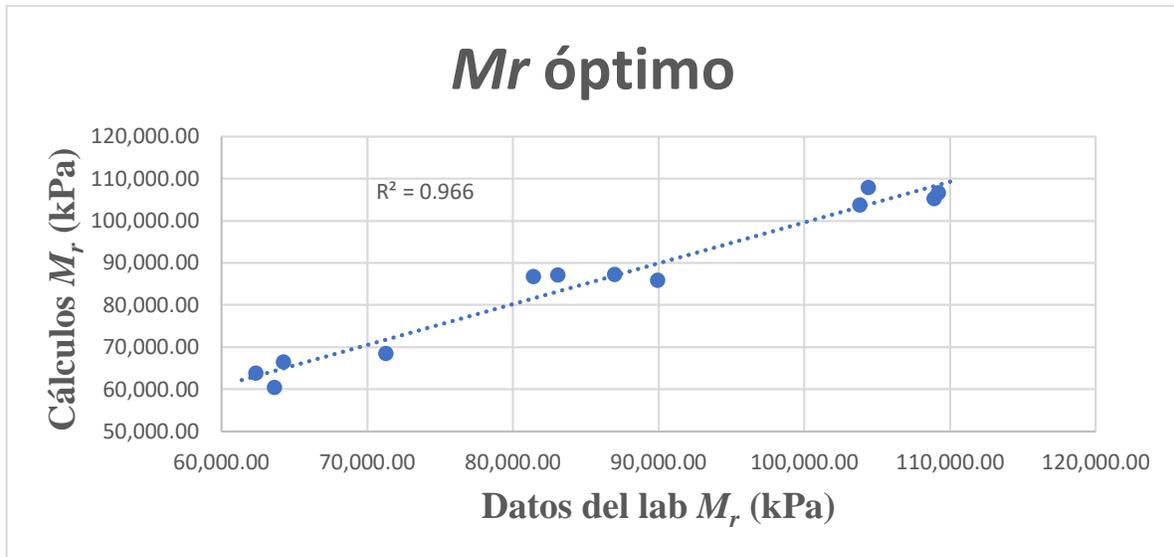


Figura 29. Correlación de los $M_{r_{opt}}$ de laboratorio a los datos calculados con la ecuación AASHTO.

5.2 Etapa II, ajuste para los M_r a diferentes succiones

5.2.1 Metodología de ajuste para los M_r a diferentes succiones

El primer paso fue realizar una validación de los datos obtenidos del laboratorio, con la finalidad de encontrar valores atípicos en las mediciones. Este procedimiento fue realizado mediante un criterio de estadística, conocido como Criterio de rechazo de Chauvenet (Sánchez Salinas & Gómez Galán, 2019).

Una vez depurados los datos de laboratorio, se procedió a realizar una investigación del comportamiento que presenta el material ante los cambios de grado de saturación o succión.

Los resultados se ajustaron a las ecuaciones, AASHTO 2004 Ecuación 15, la cual considera el factor ambiental (F_{env}), y a la ecuación propuesta por Sawangsuriya, Benson, & Edil, (2009) Ecuación 17, la cual determina que los módulos normalizados contra el logaritmo de la succión tienen un comportamiento lineal. Después de analizar los resultados, se decidió proponer una nueva ecuación de ajuste.

5.2.2 Validación de datos mediante el Criterio de Chauvenet

Se utilizó este criterio, debido a que al tratar de ajustar los datos en la ecuación AASHTO 2004 con el F_{env} , se observó que existían algunos puntos que se encontraban muy dispersos (Ver Figura 30). Para garantizar la validez de los resultados, se aplicó la primera iteración del criterio utilizando como herramienta el programa Python versión 3. Los resultados se presentan en la Figura 30, se pueden destacar las líneas de confianza del 99%, que corresponde a la cantidad de datos que se tienen (Sánchez Salinas & Gómez Galán, 2019). Los datos que se encuentran fuera de las bandas, según el criterio, se consideran datos atípicos y son eliminados.

Una vez eliminados los datos atípicos en la iteración, se procede a realizar otra iteración del criterio, la cual consta en calcular de nuevo las líneas de confianza y verificar si existen datos atípicos. Este proceso se realiza iterativamente hasta el punto donde no se encuentran datos atípicos (Sánchez Salinas & Gómez Galán, 2019). En este trabajo se eliminaron 11 datos atípicos, para lograr que todos los resultados estuvieran dentro de las bandas de predicción (ver Figura 31).

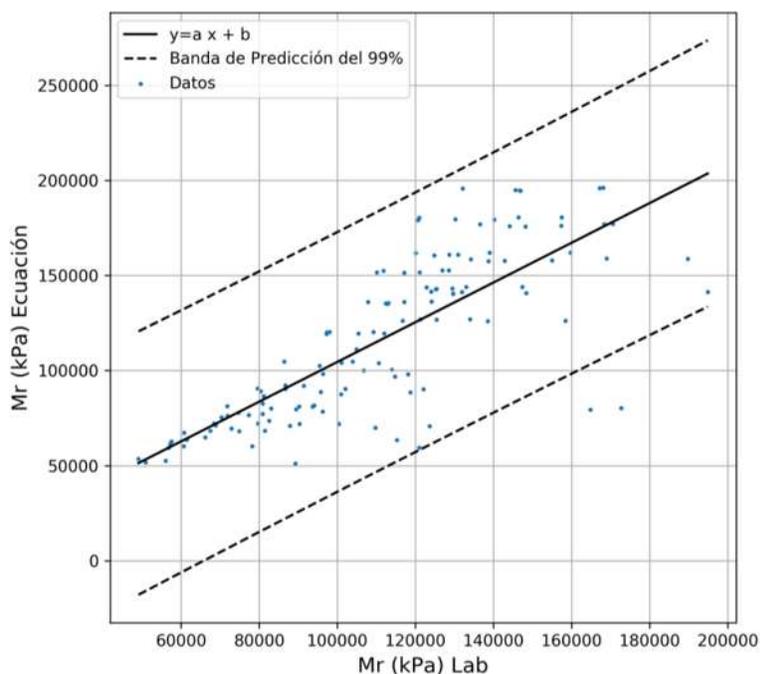


Figura 30. Primera iteración del criterio de Chauvenet.

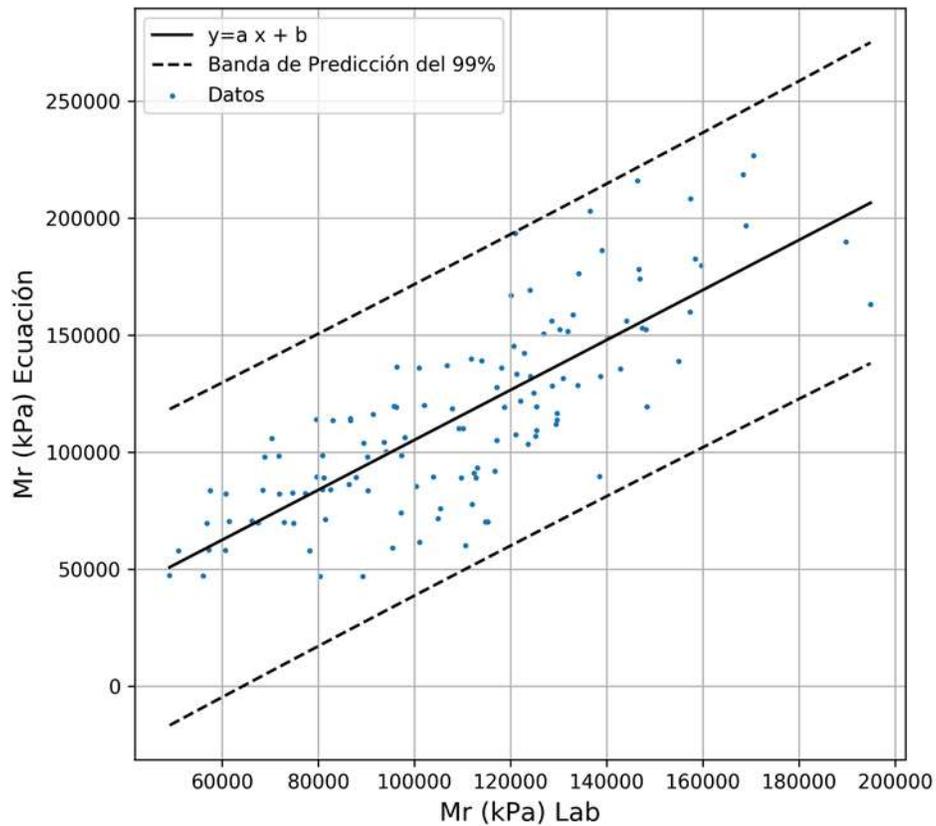


Figura 31: Resultado de la aplicación del criterio de Chauvenet.

5.2.3 Ajuste de la Ecuación AASHTO 2004 incorporando el F_{env}

Ya con los datos depurados, se procedió a realizar el ajuste de la Ecuación 15, con la finalidad de observar el comportamiento frente a los datos de esta y analizar que validez representa esta ecuación para estos datos. La Ecuación 15, se ajusta utilizando el grado de saturación, donde el parámetro Km se obtiene de la Ecuación 14.

Para realizar el ajuste de la Ecuación 14, en este trabajo, se tomó un valor del parámetro a y b constante, para lograr esto fue necesario detectar entre todos los datos de M_r el M_{rmax} y el M_{rmin} , una vez determinados estos datos, fueron calculados los parámetros a y b con forme a su ecuación, este procedimiento se llevó acabo para cada combinación de esfuerzos. En la Figura 32 se puede ver una de las gráficas utilizadas para obtener el parámetro Km . Una vez obtenidos los Km para cada esfuerzo, se procedió a utilizar el promedio de este para los primeros ajustes de la Ecuación 15. Los valores de los coeficientes que resultaron en primera

estancia son: $a = -0.194$, $b = 0.286$ y $Km = 7.96$. El valor de M_{ropt} se calculó con la Ecuación 12, utilizando sus coeficientes de ajuste.

Una vez calculados los datos y mediante la ayuda del programa Excel, con la herramienta Solver, se consiguió un mejor ajuste, el cual se puede ver en la Figura 33. Los resultados de los coeficientes para este ajuste final se presentan en la Tabla 18. El comportamiento de la Ecuación 15 en 3D se puede ver en la Figura 34, al igual que el ajuste de la misma a los datos de M_r obtenidos en laboratorio para $S_r = 0.87\%$ en la Figura 35. Como bien se aprecia en estas figuras los resultados son aceptables, dando como resultado final que los M_r de laboratorio, frente a los M_r calculados por la ecuación presenten una correlación $R^2 = 0.859$. Los errores de cálculo de este ajuste respecto a los datos obtenidos en el laboratorio son de -40.16% a 63.26% .

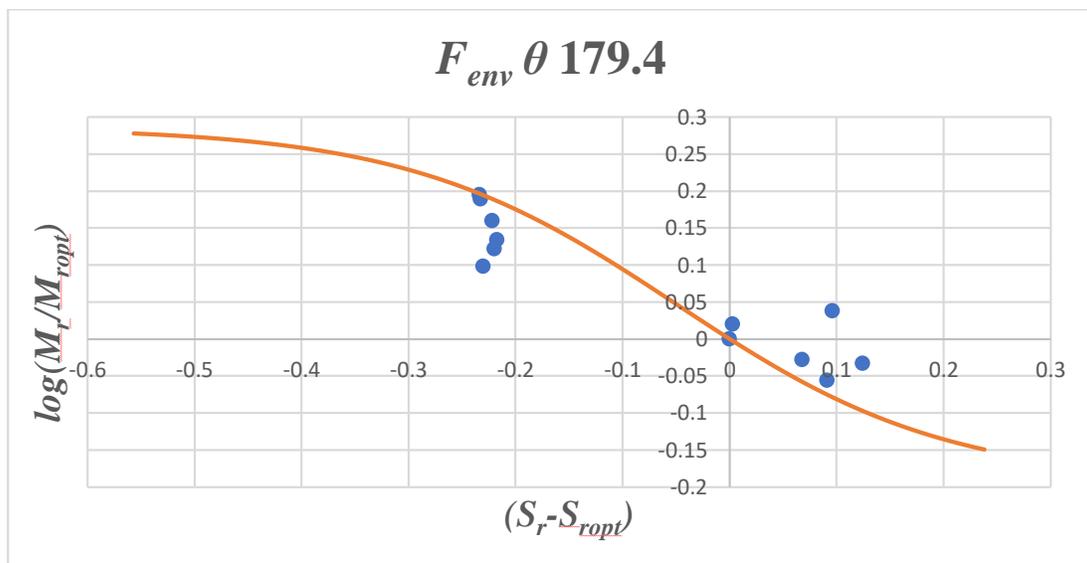


Figura 32. Ajuste de la Ecuación 14 para $\theta = 179.4$.

Tabla 18. Parámetros de mejor ajuste para la Ecuación 15.

k_1	k_2	k_3	a	b	km
937.39	0.572	0	-0.19	0.29	8.09

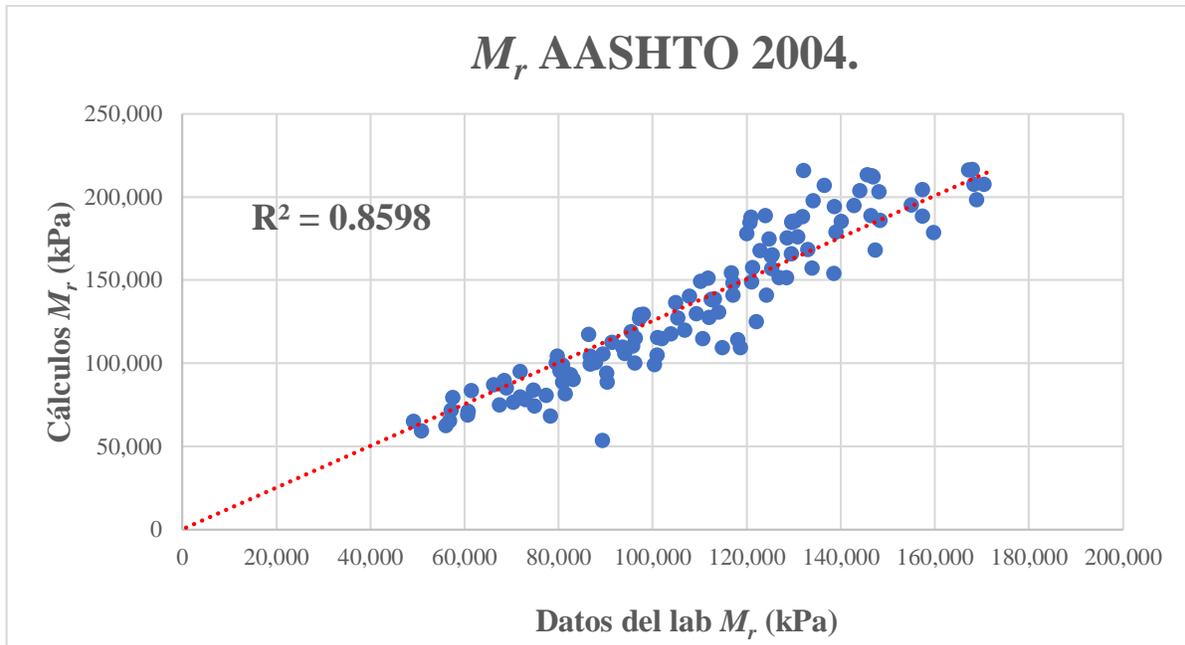


Figura 33. Correlación entre los datos calculados por el ajuste de la ecuación AASHTO 2004 para los distintos S_r y los obtenidos en laboratorio.

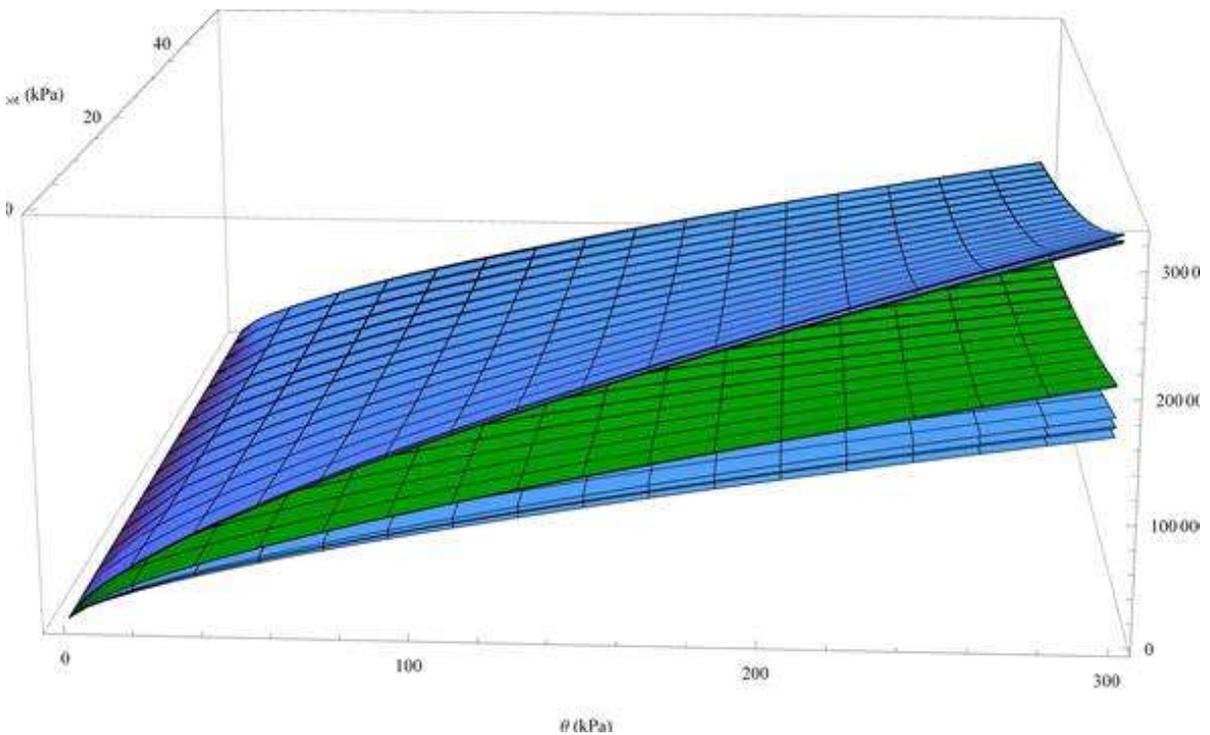


Figura 34. Comportamiento de la ecuación AASHTO 2004 ante los distintos S_r . La superficie verde corresponde al S_r óptimo.

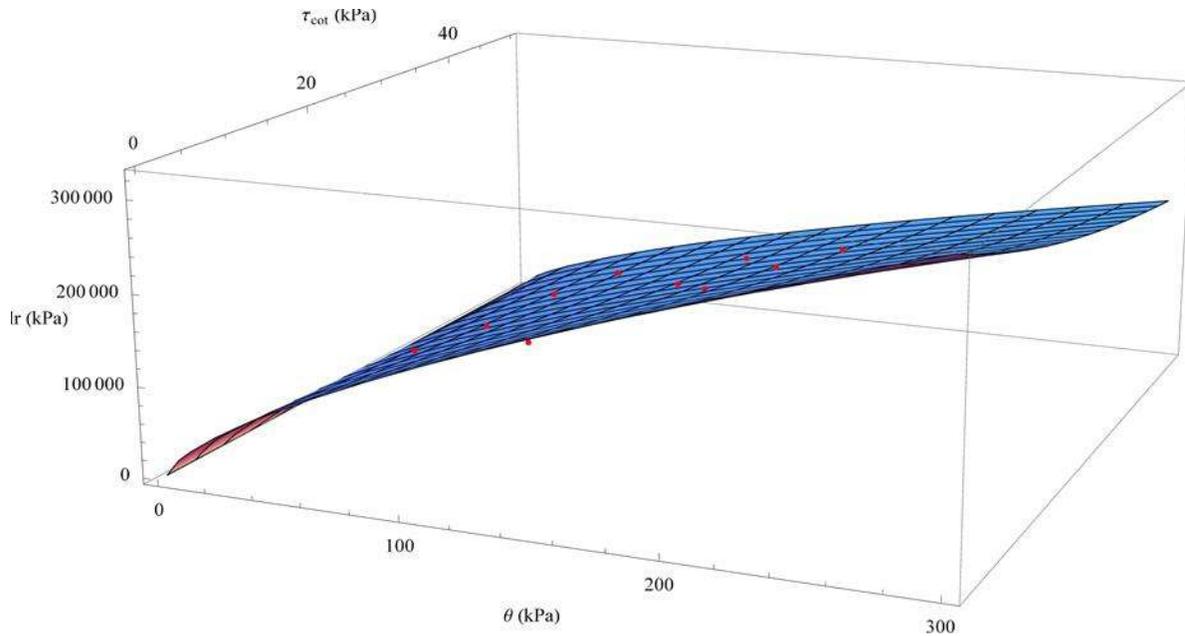


Figura 35. Ajuste de la ecuación AASHTO 2004 a los valores de M_r para $S_r = 0.87\%$.

5.2.4 Ajuste de la ecuación de Sawangsuriya, Benson, & Edil, (2009), Ecuación lineal

Con los datos depurados de M_r , se procedió a realizar el ajuste mediante la metodología de Sawangsuriya, Benson, & Edil, (2009), la cual propone un ajuste de los datos de laboratorio utilizando la succión mediante la Ecuación 17. Esta ecuación considera que la normalización de M_r entre M_{ropt} graficada frente al logaritmo natural de la succión, tiene un comportamiento lineal (ver Figura 36). Los parámetros resultantes para este ajuste fueron $a = 1.0205$ y $b = 0.1172$. Una vez determinados los parámetros se procedió a realizar el primer ajuste de la ecuación utilizando la Ecuación 12 para calcular el M_{ropt} . Contando con este ajuste y mediante la herramienta Solver del programa Excel, se lograron mejores resultados reajustando los parámetros de las ecuaciones 12 y 17; estos resultados se pueden ver en la Figura 37 y la Tabla 19. Con este ajuste se logró obtener un coeficiente de correlación de $R^2 = 0.776$, entre los datos obtenidos en el laboratorio y los calculados por la ecuación. Los rangos de error de la predicción de esta ecuación varían de -27.68% a 57.62% respecto a los datos de laboratorio.

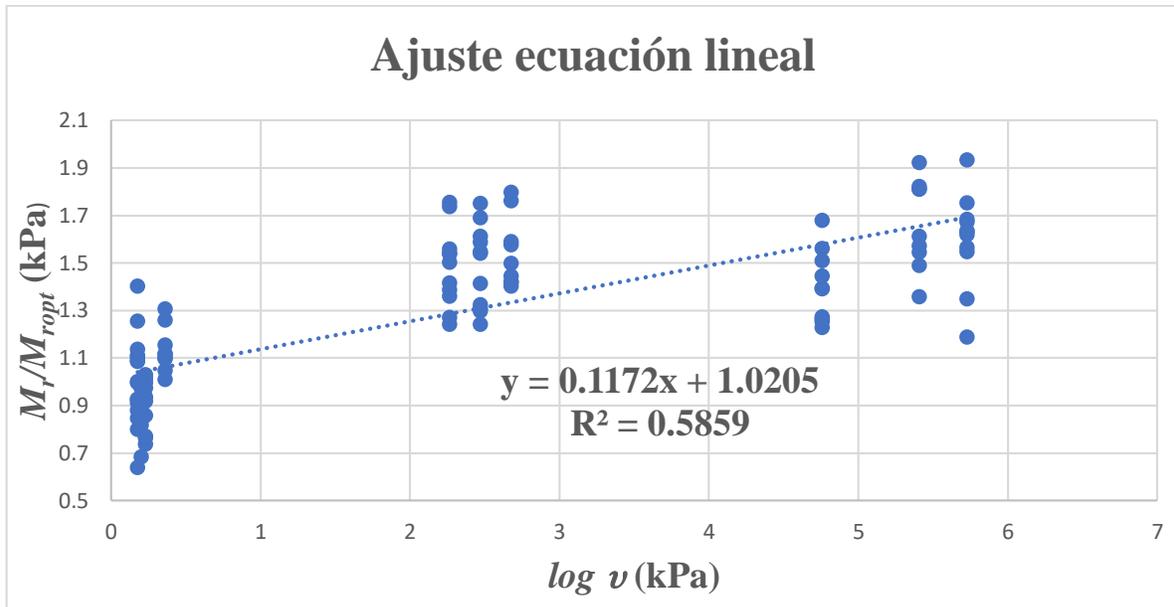


Figura 36. Ajuste ecuación lineal de los M_r a diferentes succinos.

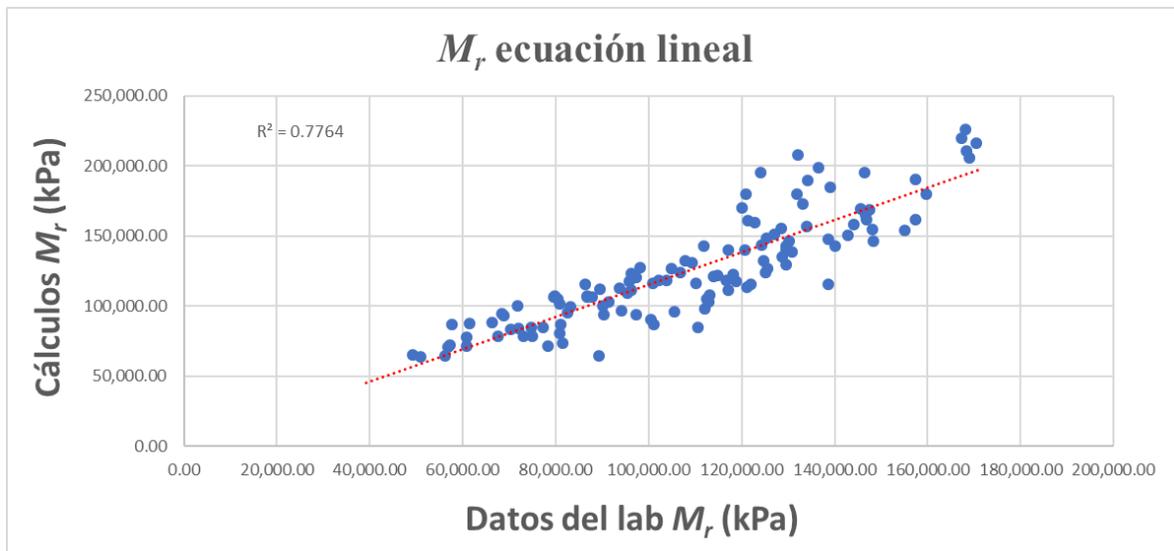


Figura 37. Correlación entre los datos calculados por el ajuste de la ecuación línea para las distintas ψ y los obtenidos en laboratorio.

Tabla 19. Coeficientes de ajuste para la Ecuación 17.

k_1	k_2	k_3	a	b
937.59	0.60	0.00	0.86	0.13

5.2.5 Ecuación de ajuste propuesta para este trabajo

Una vez contando con los datos depurados de M_r , y observando el comportamiento que presentan estos al realizar el ajuste de las ecuaciones 12, 15 y 17. Fue detectado que la normalización de M_r entre M_{ropt} graficada frente al logaritmo natural de la succión, los puntos presentan una tendencia potencial. Por lo tanto, utilizando el ajuste de una ecuación potencial a los datos, se puede tener una mejor respuesta del comportamiento que presentan estos.

Mediante esta idea se propone la Ecuación 31, la cual es una ecuación potencial, y los parámetros de ajuste que requiere se obtienen de los resultados del ajuste de la ecuación potencial a los datos normalizados.

$$M_r = (a * (\log \psi)^b)(M_{ropt}) \quad \text{Ecuación 31}$$

El ajuste de la ecuación potencial a los datos normalizados se puede ver en la Figura 38, la cual dio como resultado los valores de $a = 1.2411$ y $b = 0.1523$.

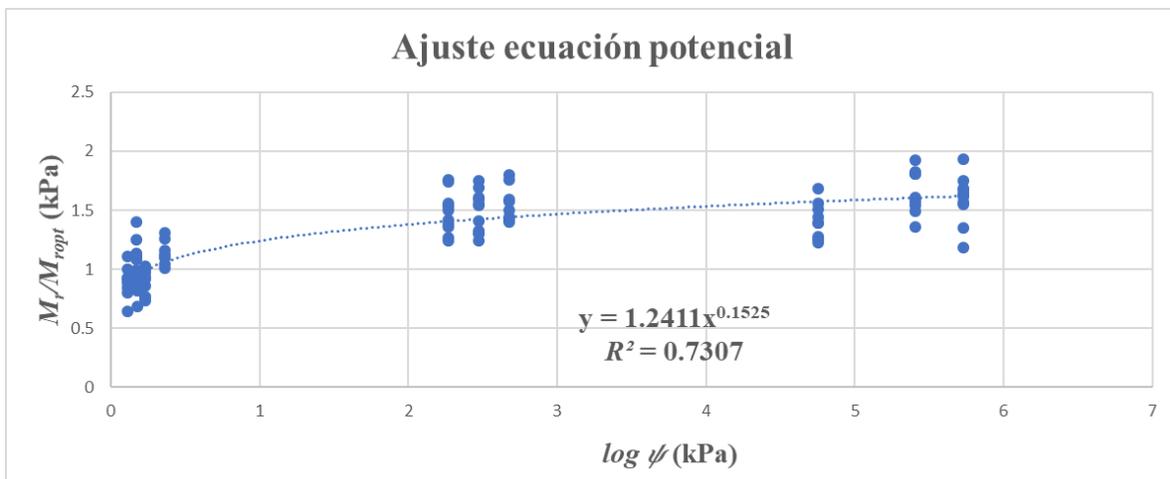


Figura 38. Ajuste ecuación potencial a los M_r de laboratorio a diferentes succiones.

Una vez obtenidos los parámetros de ajuste se procedió a calcular los M_r mediante la ecuación propuesta, los datos de M_{ropt} se obtuvieron utilizando la Ecuación 12, logrando con ello un primer ajuste de la Ecuación 31. Mediante la utilización de la herramienta Solver del programa Excel, se lograron mejorar los resultados, reajustando los parámetros de las

ecuaciones 12 y 31, estos resultados se pueden ver en la Figura 39 y la Tabla 20. Alcanzando un coeficiente de correlación de $R^2 = 0.8514$ entre los datos obtenidos en el laboratorio y los calculados por la ecuación. El rango de error de esta ecuación varía entre -29.91% a 32.83% respecto a los datos de laboratorio.

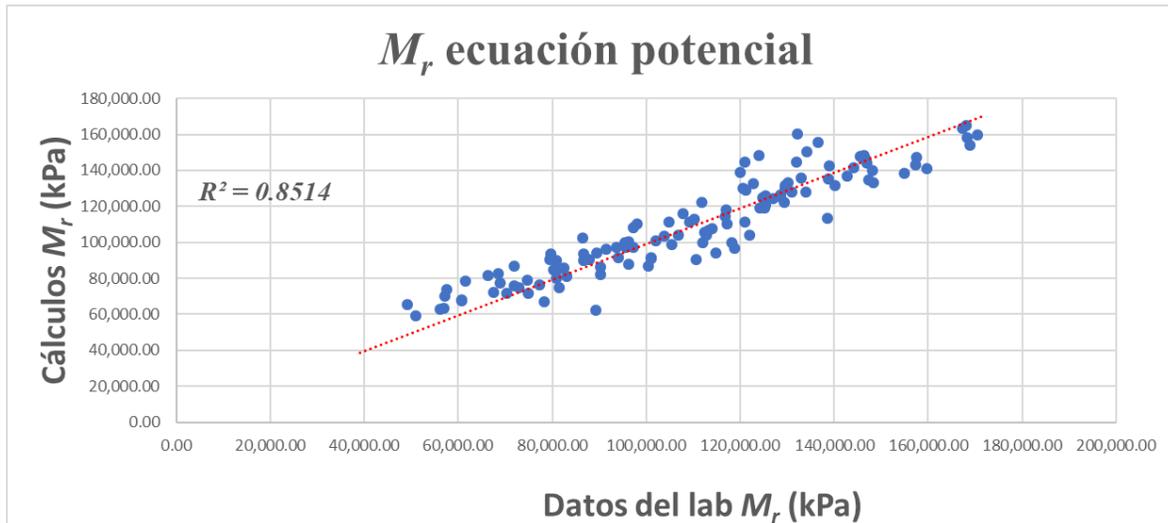


Figura 39. Correlación entre los datos calculados por el ajuste de la ecuación potencial para las distintas ψ y los obtenidos en laboratorio.

Tabla 20. Coeficientes de ajuste para la Ecuación 31.

k_1	k_2	k_3	a	b
937.59	0.44	0.00	1.02	0.14

6 Análisis de resultados

Una vez contando con los datos de los materiales y el ajuste de las ecuaciones, se encontraron resultados interesantes a analizar, los cuales son:

- El material que se colocó en la autopista siglo XXI en la capa subrasante es un material granular clasificado como GW-GM, que cumple con las especificaciones de la norma CMT (N-CMT-1-03/02), para 30 millones o menos de ejes equivalentes (ver Tabla 21). Como la ampliación fue diseñada para 43,690,579 ejes equivalentes en el periodo de diseño, se requería un diseño especial de acuerdo con la norma, por tanto, se utilizó un suelo de mejor calidad (ver Tabla 21).

Tabla 21. Comparación de resultados de N-CMT-1-03/02 y resultados de laboratorio de la ATPSXXI.

Característica	Valor	ATPSXXI
Tamaño máximo: mm	76	37.5
Limite liquido: %, máximo	40	Inapreciable
Índice plástico: %, máximo	12	Inapreciable
Valor Soporte de California (CBR): %, mínimo	20	40.4156
Expansión: %	2	0.118203

- La correlación que se alcanzó con la ecuación AASHTO 2004 con los datos de laboratorio es muy buena, ya que esta ecuación es general y los resultados son mejores que los encontrados en la literatura para datos granulares. Pero al ser una ecuación que utiliza el S_r como parámetro de variación, los rangos de error de predicción en los que esta ecuación se puede mover para calcular datos, resultaron mucho más amplios que los de las ecuaciones que utilizan succión, esto se puede ver en la Tabla 22. Otro factor muy importante que condiciona los resultados de la ecuación se relaciona con el manejo de los datos para obtener los parámetros de ajuste, de acuerdo con la guía de diseño AASHTO 2004, la cual dice que se debe seleccionar un esfuerzo y mediante los datos de este a diferentes S_r obtener los parámetros a y b . Sin embargo, en esta investigación se descubrió que es más efectivo determinar a y b de entre todos los esfuerzos. También se observó que se pueden mejorar aún más los resultados, si

se realiza un segundo ajuste de datos de forma global utilizando la herramienta Solver del programa Excel.

- El comportamiento de los resultados normalizados de M_r/M_{ropt} frente al $\log(\psi)$ en este material granular es potencial, por esta razón los mejores resultados presentados en este trabajo son los obtenidos por la Ecuación 31 propuesta (ver Tabla 22). Esto se debe a que se ajusta la tendencia potencial como en las ecuaciones más simples.

Tabla 22: Resultados, correlaciones y rangos de error de predicción de las ecuaciones analizadas.

Tipo de Ecuación	Error de predicción máximo (%)	Error de predicción mínimo (%)	Coefficiente de correlación (R^2)
AASHTO 2004 (S_r %)	63.26	-40.16	0.85
Lineal (Succión)	57.62	-27.68	0.78
Potencial (Succión)	32.83	-29.91	0.85

7 Conclusiones y trabajo futuros

7.1 Conclusiones

El material analizado de la autopista siglo XXI, cumple con los requisitos de calidad para subrasante según lo marca la norma (N-CMT-1-03/02). El diseño del pavimento contempló un valor mayor a 30 millones de ejes equivalentes, es decir, el diseño fue especial. Por lo tanto, se especificó la utilización de un material de mejor calidad, clasificado como GW-GM.

La caracterización mecánica del suelo consistió en medir las propiedades índice del suelo, compactación, CBR, curva de retención y medir módulos de resiliencia a distintas succiones.

La curva de retención en suelos granulares es difícil de medir, debido a que los valores de succión son muy pequeños en la zona de desaturación del suelo. Por otro lado, los contenidos de agua residuales son muy pequeños y difíciles de cuantificar. En este trabajo se logró medir los contenidos de agua con pequeñas succiones utilizando el método de tubo de ascensión capilar propuesto por Lambe & Whitman (1995). En el procedimiento se utilizó agua destilada para evitar tener la componente de succión osmótica. Se diseñó y construyó un tubo abierto de elevación capilar, con un disco de acero inoxidable perforado para permitir la entrada de agua por la parte inferior de la muestra. El tubo con suelo compactado se colocó en un recipiente con nivel de agua constante, y se dejó que ascendiera el agua y se estabilizara después de dos semanas; hasta que se observó que no varió el nivel de ascensión capilar. Se retiró con cuidado el suelo de distintas alturas y se obtuvo el contenido de agua, para obtener la curva de retención de la zona de succiones bajas. Para completar la curva se utilizó la técnica de transferencia de vapor de aire de Richards (1965), que nos permitió estimar los puntos de la curva con valores residuales. Al final se pudo ajustar de manera satisfactoria la ecuación de Fredlund & Xing, (1994) a los puntos obtenidos para el suelo estudiado.

La metodología adoptada para la obtención de los Módulos de Resiliencia fue la norma AASTHO T307. Cada espécimen se compactó con un contenido de agua que corresponde al óptimo de la norma AASTHO estándar. Después se variaron los contenidos de agua de dos formas por transferencia de vapor de agua: en la primera se controló con la humedad relativa del interior de los poros del suelo, para las pruebas del lado seco de la curva de la

compactación, para las pruebas del lado húmedo se controló el peso del agua que se incorporó al suelo. En los últimos ensayos se verificó la homogeneidad en los contenidos de agua y se tuvo una variación de más menos 0.5%.

Los datos del laboratorio se ajustaron a la ecuación del AASTHO 2004 (en función del S_r), la ecuación lineal de Sawangsurriya, Benson, & Edil, (2009), (en función de la succión) y se propuso una nueva ecuación (en función de la succión). Al analizar los datos se observó que, la ecuación AASTHO 2004 con el F_{env} , da buenos resultados, cuando se realiza un buen ajuste de los datos a diferentes S_r para conocer el parámetro km , en este trabajo se alcanzó una correlación de M_r calculados vs M_r de laboratorio de 0.86. Sin embargo, se observa que los rangos de error de predicción son mayores que los obtenidos por otras ecuaciones que están en función de la ψ . Debido a esto se puede considerar que, para este caso, las ecuaciones de $M_r(\psi)$ se correlacionan adecuadamente y tienen un rango de error de predicción menor a las de S_r . Por lo tanto, se puede decir que el uso de la succión como parámetro de correlación es más adecuado. El problema de esto es que es un concepto menos aplicado en la práctica de las Vías Terrestres en México. Sin embargo, en este trabajo se decidió utilizar, puesto que la succión es un esfuerzo que altera el comportamiento que presentarán los materiales utilizados en la estructura de un pavimento. Además, en la medida que se conozcan más estos términos, se incorporarán en los conocimientos de pavimentos de este país.

Por último, se observó que, al utilizar el parámetro de succión, el comportamiento de los resultados normalizados de M_r/M_{ropt} frente al $\log(\psi)$ no es lineal para este material granular, como se consideró anteriormente en la literatura. Sin embargo, se encontró que el material granular en estudio presenta una tendencia potencial. Debido a esto se propuso una ecuación potencial para predecir el comportamiento de los M_r ante el cambio de la succión, logrando con esto que, la ecuación potencial propuesta tenga mejor ajuste.

7.2 Trabajos futuros

Seguir investigando sobre el comportamiento de los materiales que conforman las capas de los pavimentos, para lograr comprender mejor estos comportamientos y buscar ser capaces de proponer mejoras en los diseños de pavimentos en México.

Realizar una investigación en materiales granulares, y observar si la tendencia de M_r a diferentes succiones es potencial y ver si la ecuación propuesta para el material de este trabajo da buenos resultados.

Buscar la forma de implementar los resultados encontrados en este trabajo en los diseños de pavimentos utilizados en México.

8 Referencias

- AASHTO. (2004). Guía de diseño de pavimentos. *Environmental effects. E.E.U.U.*
- Azam, A., Cameron, D., & Rahman, M. (2013). Model for prediction of resilient modulus incorporating matric suction for recycled unbound granular materials. *Research Press*, 1143-1158.
- Cecretaría de comunicaciones y transportes. (2007). 07. Límites de consistencia. En C. d. transportes, *MMP-Método de muestreo y prueba de materiales* (págs. 1-11). México : SCT.
- Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). *Equations for the soil-water characteristic'curve*. Canada.
- Fredlund, D. G., & Houston, S. L. (2009). Protocol for the assessment of unsaturated soil properties in geotechnical engineering practice. *NRC Research Press*, 695-707.
- Fredlund, D., & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York: John Wiley & Sons.
- Fredlund, D., Rahardjo, H., & Fredlund, M. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, Inc.
- Fredlund, M. (1999). *The Role of Unsaturated Soil Property Functions in the Practice of Unsaturated Soil Mechanics*. Canada: PhD thesis. University of Saskatchewan.
- Garnica, P., & Correa, A. (2004). Conceptos mecanicistas en pavimentos. *ISSN 0188-7297*, 1-49.
- Garnica, P., Gómez, J. A., & Sesma, J. A. (2002). Mecánica de materiales para pavimentos. *ISSN 0188-7297*, 1-211.
- Garnica, P., Pérez, N., & Gómez, J. A. (2001). Modulos de resiliencia en suelos Finos Y Materiales Granulares. *Publicación Técnica No. 142*. Sanfandila, Querétaro, México: ISSN 0188-7297.

- Han, Z., & Vanapalli, S. K. (2015). Model for predicting resilient modulus of unsaturated subgrade soil using soil-water characteristic curve. *NRC Research Press*, 1605-1619.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1995). *Mecánica de suelos*. Massachusetts: Limusa.
- Makhaly, B., Nokkaew, K., Fall, M., & Tinjum, J. M. (2013). Effect of Matric Suction on Resilient Modulus of Compacted Aggregate Base Courses. *Springer Science+Business Media Dordrecht*, 1498-1510.
- National Academies of Sciences. (2004). Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design. *Engineering, and Medicine*, 1-53.
- Pérez, N., Garnica, P., & Pola, J. C. (2013). Predicción de la curva característica con el modelo de proporcionalidad natural. *Publicación Técnica No. 361*. Querétaro, Querétaro, México: ISSN 0188-7297.
- Pérez, N., Garnica, P., Nute, H., & Gudiño, M. (2012). Evaluación del módulo de resiliencia, en trayectorias de humedecimiento y secado. *Publicación Técnica No. 355*. Sanfandila, Querétaro, México: ISSN 0188-7297.
- Salour, F., Erlingsson, S., & Zapata, C. E. (2014). Modelling resilient modulus seasonal variation of silty sand subgrade soils with matric suction control. *NRC Research Press*, 1413-1422.
- Salour, F., Erlingsson, S., & Zapata, C. E. (2014). Modelling resilient modulus seasonal variation of silty sand subgrade soils with matric suction control. *Can. Geotech. J.* 51: 1413–1422, 1413-1422.
- Sánchez Salinas, S., & Gómez Galán, M. (2019). *Metrología dimensional: Resumen de teoría y problemas*. Almería: Universida de Almería.
- Sawangsuriya, A., Benson, C. H., & Edil, T. B. (2009). Effect of Suction on Resilient Modulus of Compacted Fine-Grained Subgrade Soils. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 82-87.

- Secretaría de comunicaciones y transportes. (2003). 01, Muestreo de materiales para terracerías. En S. d. transportes, *MMP. Método de muestreo y prueba de materiales* (págs. 1-11). México: SCT.
- Secretaría de comunicaciones y transportes. (2006). 09. Compactación AASHTO. En S. d. transportes, *MMP-Método de muestreo y prueba de materiales*. (págs. 1-9). México: SCT.
- Secretaría de comunicaciones y transportes. (2002). N-CMT-1-03/02, Materiales para subrasante. . En S. d. transportes., *CMT. Características de los materiales*. (págs. 1-5). México: SCT.
- secretaría de comunicaciones y transportes. (2008). 11. Valor soporte de California (CBR) y expansión (Exp) en laboratorio. En s. d. transportes., *Método de muestreo y prueba de materiales*. (págs. 1-15). México: SCT.
- Secretaría de comunicaciones y transportes. (2003). Granulometría de materiales compactables para terracerías . En S. d. transportes., *MMP-Método de muestreo y prueba de materiales* (págs. 1-14). México: SCT.
- Vanapalli, S. K., & Han, Z. (2014). Prediction of the Variation of the Resilient Modulus with Respect to the Soil Suction for Three Granular Materials Using Three Methods. *Geotechnical Special Publication*, 414-423.
- Yang, H., Rahardjo, H., Leong, E. C., & Fredlund, D. G. (2004). A study of infiltration on three sand capillary barriers . *NRC*, 629-643.
- Zhou, C., Yuan, Q., & Xu, J. (2013). Resilient modulus of unsaturated subgrade soil: experimental and theoretical investigations. *NRC Research Press*, 223-232.