

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

Efecto de la humedad en el módulo resiliente de la subrasante

Trabajo de Graduación

Para obtener el Grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Mónica Liseth Navarro Cordero

Director:

Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Hoja de aprobación

Comité asesor:



Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD.

Director



Ing. Tania Ávila Esquivel, Msc.

Asesor



Ing. Marcia Cordero Sandí, Msc.

Asesor

Estudiante:



Mónica Liseth Navarro Cordero

Fecha: 2019, Octubre, 29

El suscrito, Mónica Liseth Navarro Cordero, cedula 1-1551-0908, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné B14682, manifiesta que es autora del Proyecto Final de Graduación Efecto de la humedad en el módulo resiliente de la subrasante, bajo la dirección del PhD. José Pablo Aguiar Moya, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos No 6683, Artículo 7 (versión **actualizada el 02 de julio de 2001**); **“no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”**. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Dedicatoria

Por la sonrisa de mis padres que me alegra el corazón
y a Dios por acompañarme en todo momento.

Agradecimientos

A José Pablo Aguiar, Tania Ávila y Marcia Cordero a quienes admiro por su calidad humana y profesionalismo, gracias por su apoyo y guía en este proceso. Sus conocimientos fueron indispensables en la elaboración de este proyecto.

A mi familia por ser un apoyo durante toda la carrera universitaria, por confiar en mí y ser un ejemplo de constancia y dedicación. Todos los esfuerzos realizados son por y para ustedes.

Al personal de LanammeUCR quienes me brindaron pacientemente su ayuda y asesoría en la realización de ensayos.

A Shamay y Auri por su amistad y acompañarme a lo largo de este trayecto, cada consejo y cada tarde de café con ustedes hicieron más fácil el cumplimiento de esta meta.

A Diego por ser un apoyo incondicional, por estar a mi lado en los momentos más difíciles y cuidar de mí.

Finalmente, agradezco a los amigos, compañeros de la universidad, de la UMP y a todas las personas que de una forma u otra estuvieron en el proceso y me ayudaron a culminar esta etapa.

Índice

I.	Introducción.....	1
1.1	Justificación.....	1
1.1.1	Problema específico.....	1
1.1.2	Importancia.....	2
1.1.3	Antecedentes teóricos y prácticos del problema.....	3
1.2	Objetivos.....	5
1.2.1	Objetivo general.....	5
1.2.2	Objetivos específicos.....	5
1.3	Delimitación del problema.....	5
1.3.1	Alcances.....	5
1.3.2	Limitaciones.....	6
1.4	Metodología.....	6
II.	Marco teórico.....	9
2.1	Suelos.....	9
2.1.1	Propiedades de los suelos para su clasificación.....	10
2.1.2	Clasificación de los suelos.....	14
2.2	Pavimentos.....	17
2.2.1	Estructura de un pavimento.....	17
2.2.2	Subrasante como cimentación de la estructura de pavimento.....	19
2.3	Módulo resiliente (Mr).....	21
2.3.1	Factores que afectan el Mr en suelos cohesivos.....	24
2.3.2	Modelos de Mr usados en el diseño de pavimentos.....	27
III.	Caracterización de los suelos en estudio.....	30
3.1	Selección de los suelos.....	30

3.2	Ubicación	32
3.3	Ensayos de caracterización física	34
IV.	Resultados de Ensayos	36
4.1	Índice de soporte de california CBR	36
4.2	Módulo Resiliente	36
4.2.1	Generalidades y equipo	36
4.2.2	Protocolo de Ensayo	37
4.2.3	Resultados	43
4.3	Deflectometría de impacto LWD	47
4.3.1	Generalidades y equipo	47
4.3.2	Protocolo de ensayo	50
4.3.3	Resultados	52
V.	Análisis de resultados	54
5.1	Calibración de modelo Mr	54
5.1	Correlación de datos y factores de ajuste	63
5.1.1	Correlación de los datos de LWD con los modelos de Mr.	63
5.1.2	Correlación entre CBR y Mr	67
VI.	Conclusiones y recomendaciones	70
6.1	Conclusiones.	70
6.2	Recomendaciones	72
	Referencias Bibliográficas.....	74
	Apéndices.....	1

Índice de cuadros

Cuadro 1. Valores típicos de gravedad específica para suelos gruesos y finos	12
Cuadro 2. Simbología para la clasificación de suelos mediante SUCS	14
Cuadro 3. Resumen del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)	15
Cuadro 4. Sistema de clasificación AASHTO	16
Cuadro 5. Correlaciones para obtener el Módulo Resiliente.....	23
Cuadro 6. Valores típicos de Mr en la MEPDG según clasificación del suelo	24
Cuadro 7 Modelos mecanísticos para Mr basados en estados de esfuerzos.	28
Cuadro 8. Modelos mecanísticos que incorpora mecánica de suelos no saturados.....	29
Cuadro 9. Características físicas del suelo M 1002-16.....	34
Cuadro 10. Características físicas del suelo M 1189-18.	35
Cuadro 11. Características físicas del suelo M 1397-18.	35
Cuadro 12. Resultados de CBR para las tres muestras de suelo.....	36
Cuadro 13. Secuencia de combinaciones de carga esfuerzo NCHRP para suelos finos....	38
Cuadro 14. Variación de los esfuerzos principales (psi) en el suelo con la profundidad y distancia del punto de aplicación de carga.....	48
Cuadro 15. Disminución de los esfuerzos en porcentajes respecto al esfuerzo mayor	49
Cuadro 16. Resultados de LWD para los tres suelos en estudio	53
Cuadro 17. Resultados de la RL del MU para Mr con humedad variable del suelo M1002-16.....	55
Cuadro 18. Resultados de la RL del MU para Mr con humedad variable del suelo M1189-18	56
Cuadro 19. Resultados de la RL del MU para Mr con humedad variable del suelo M 1397-18.....	57
Cuadro 20. Resultados de la RL para el modelo global.....	59
Cuadro 21. Resultados de LWD para M 1002	63

Cuadro 22. Resultados de LWD para M 1189-18 para 15k.....	63
Cuadro 23. . Resultados de LWD para M 1397-18 para 10k.....	64
Cuadro 24. Esfuerzos generados por el ensayo de LWD en M1002-16.....	64
Cuadro 25. Esfuerzos generados por el ensayo de LWD en M 1189-18.....	65
Cuadro 26. Esfuerzos generados por el ensayo de LWD en M 1397-18.....	65
Cuadro 27. Correlaciones con para obtener Mr a partir del módulo obtenido por LWD...	66
Cuadro 28. Correlaciones con CBR para suelo M 1002-16	68
Cuadro 29. Correlaciones con CBR para suelo M 1189-18	69
Cuadro 30. Correlaciones con CBR para suelo M 1397-18	69

Índice de figuras

Figura 1. Metodología propuesta para la elaboración del proyecto	6
Figura 2. Ejemplo de curva granulométrica	11
Figura 3. Curva típica de densidad seca contra contenido de humedad.....	13
Figura 4. Deformación ante cargas repetidas	22
Figura 5. Módulo resiliente en suelos cohesivo a diferentes valores de esfuerzo desviador	25
Figura 6. Distribución espacial de los puntos muestreados y su clasificación SUCS.....	30
Figura 7. Gráfico de distribución de los suelos por su clasificación SUCS	31
Figura 8. Gráfico de distribución por tipo de suelo de acuerdo a su granulometría.....	31
Figura 9. Ubicación de los suelos muestreados.....	32
Figura 10. Muestreo de los suelos.....	33
Figura 11. Muestras pasando malla #4 los tres suelos en estudio	33
Figura 12. Cámara triaxial dinámica del LANAMME.	37
Figura 13. Molde para el moldeo de especímenes	39
Figura 14. Enrasado del espécimen de suelo.....	40
Figura 15. Humedecimiento de los especímenes	41
Figura 16. Comparación de los valores de módulo resiliente para las diferentes humedades de la muestra M 1002-16.....	44
Figura 17. Comparación de los valores de módulo resiliente para las diferentes humedades de la muestra M 1189-18.....	45
Figura 18. Comparación de los valores de módulo resiliente para las diferentes humedades de la muestra M 1397-18.....	46
Figura 19. Deflectómetro de Impacto Liviano.....	47
Figura 20. Variación de esfuerzos principales con la profundidad.....	49

Figura 21. Variación de esfuerzos principales con la distancia al punto de aplicación de carga	50
Figura 22. Construcción de calicatas y sustitución con suelo.....	50
Figura 23. Verificación de compactación con densímetro.....	51
Figura 24. Ejecución del ensayo LWD.....	51
Figura 25. Toma de muestras de humedad de las calicatas.....	52
Figura 26. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1002-16 a diferentes humedades.	55
Figura 27. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1189-18 a diferentes humedades.	56
Figura 28. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1397-18 a PS2.....	57
Figura 29. Índice de liquidez en función del Mr	59
Figura 30. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el Modelo global para los tres suelo	60
Figura 31. Módulo resiliente contra humedad M 1002-16	61
Figura 32. Módulo resiliente contra humedad M 1189-18	61
Figura 33. Módulo resiliente contra humedad M 1189-18	62

Navarro Cordero, Mónica Liseth.
Efecto de la humedad en el módulo resiliente de la subrasante.
Proyecto de graduación-Ingeniería Civil-San José. C.R.:
M.L. Navarro C., 2019
xii,76, [43]h; ils. col.-38 refs

Resumen

A nivel nacional se busca mejorar los métodos de diseño de pavimentos utilizados tradicionalmente. Para lo cual es importante realizar investigaciones que permita a los ingenieros contar con parámetros y propiedades reales de los materiales que componen la estructura del pavimento, que generen diseños más ajustados a las condiciones en campo, que a su vez garanticen calidad, durabilidad y optimización de recursos.

El objetivo de la presente investigación consiste en generar factores de ajuste que permitan cuantificar el efecto de la humedad en el Módulo Resiliente (M_r) de la subrasante, con el fin de realizar diseños de pavimentos acordes a las características de nuestro país. Para lograrlo se estudiaron tres suelos de diferentes puntos del país a los cuales se le realizaron los ensayos de relación de soporte de california (CBR, por sus siglas en inglés) y de deflectometría empleando el deflectómetro de impacto liviano (LWD, por sus siglas en inglés), comúnmente realizados en campo para determinar el módulo resiliente de la subrasante y se compararon con los resultados del ensayo de M_r en laboratorio, el cual se realizó a cinco porcentajes de humedad diferente, con el fin de analizar el efecto de la variación de la humedad en la rigidez del material.

En los resultados obtenidos se observa una variación importante de M_r ante el incremento o disminución de la humedad en suelo, así como la dependencia de este parámetro del estado de esfuerzos, se calibraron por tanto modelos que consideran estas variables.

Finalmente se logró demostrar con los resultados de la investigación, la importancia de considerar en el diseño de pavimentos valores de M_r más ajustados a las condiciones reales a las que se encuentran expuestas las carreteras de nuestro país. M.N.C.

MÓDULO RESILIENTE, SUBRASANTE, PAVIMENTOS, DISEÑO, SATURACIÓN.

Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD.

Escuela de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

EIC

Escuela de
Ingeniería Civil

29 de octubre de 2019
IC-1285-2019

**Señorita:
Mónica Navarro Cordero
Presente**

Estimada estudiante:

Según el artículo 39 del reglamento de Trabajos Finales de Graduación, la Escuela de Ingeniería Civil se complace en otorgarle la aprobación con distinción de su Trabajo Final de Graduación denominado "Efecto de la humedad en el módulo resiliente de la subrasante."

Por este motivo le manifestamos nuestras más sinceras felicitaciones por su dedicación y empeño.

Atentamente,

**Ing. Flor Muñoz Umaña, M.Sc.
Directora
Escuela de Ingeniería Civil**

GAA
C.: Archivo

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería

EIC Escuela de
Ingeniería Civil

I. Introducción

1.1 Justificación

1.1.1 Problema específico

La vida útil de un pavimento flexible se basa principalmente en predecir las deformaciones o esfuerzos en las interfaces de las diferentes capas. Estos esfuerzos críticos se encuentran fuertemente relacionados con los módulos de todas las capas del pavimento, considerar los parámetros ambientales para cuantificar las variaciones de estos módulos, mejora la capacidad de los algoritmos para predecir un desempeño más realista de los pavimentos (Mena, 2013).

A nivel internacional se observa una tendencia a realizar un cambio en la metodología de diseño de pavimentos, considerando la variación de las propiedades de los materiales con las condiciones climáticas. Los métodos de diseño empíricos basados en parámetros que correlacionan las propiedades físicas de los materiales (como el CBR) están siendo combinados con métodos mecanísticos que se basan en el análisis del comportamiento mecánico de los materiales (Perera, 2015).

Actualmente, el diseño de pavimentos en Costa Rica, se elabora siguiendo la guía de diseño estructural de pavimentos flexibles y rígidos de la Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales de Transporte (AASHTO, por sus siglas en inglés) y del Instituto de Asfalto. El método de AASHTO 93, el más utilizado en el país, implica una gran limitación en el diseño, ya que esta guía realiza aproximaciones empíricas basadas en los resultados de la pista de prueba AASHTO en el estado de Illinois, con condiciones de clima y entorno muy diferente a las de nuestro país.

Debido a condiciones tropicales de nuestro país, factores como la temperatura y altas precipitaciones (que finalmente se traduce como humedad del suelo) causan el deterioro acelerado de las estructuras de pavimentos tanto rígidos como flexibles. El factor de temperatura afecta directamente a las capas de rodamiento, y el factor de humedad afecta directamente a las capas granulares y materiales cohesivos. No obstante, el daño en las capas inferiores genera daños en la superficie de rodamiento, de ahí que un problema de humedad también está asociado directamente con problemas en la superficie (Orozco, 2007).

Así mismo, se debe considerar que, según el contenido de humedad de los suelos, el valor del módulo de resiliencia varía considerablemente. Sin embargo, en la ecuación de diseño de AASHTO, se incluye solamente un valor de todas las variaciones que tiene este parámetro a través del año. Por lo tanto, se pretende determinar cuáles son los valores de los módulos de resiliencia reales para diferentes tipos de suelos de subrasante en Costa Rica y su variación según el contenido de humedad.

1.1.2 Importancia

Actualmente, a nivel nacional se busca mejorar los métodos de diseño de pavimentos que se han utilizado tradicionalmente. Para lo cual es importante realizar investigaciones que permita a los ingenieros contar con parámetros y propiedades reales de los materiales que componen la estructura del pavimento, que generen diseños más ajustados a las condiciones reales del suelo, que su vez garanticen calidad, durabilidad y optimización de recursos.

Al diseñarse el pavimento con una metodología que no está acorde con las condiciones del país, se espera que las predicciones no sean confiables y en el peor de los casos, poco conservadoras. Diseños especializados, como se mencionó, garantizan un buen desempeño del pavimento a través de su vida útil. Adicionalmente, permitirían conocer el deterioro real que sufriría cada año y hasta permitiría el desarrollo de estrategias de mantenimiento y preservación detalladas (Perera, 2015).

En Costa Rica se han adoptado métodos empíricos para el diseño de pavimentos basados en los resultados de CBR, para los materiales granulares. Sin embargo, en años recientes se han dado cambios en la tecnología de pavimentos, donde se han aceptado métodos mecanísticos o estructurales debido a la introducción de nuevas técnicas de construcción, alternativas de materiales y procesos. Lo que está conduciendo a cambiar el criterio de CBR de la subrasante por el criterio de esfuerzos-deformaciones (módulo resiliente M_r) (Jiménez, 2009).

Estas metodologías de diseño estructural de pavimentos consideran que la propiedad fundamental para caracterizar y evaluar la capacidad de soporte de los materiales constitutivos de la estructura de pavimentos de una carretera es el parámetro denominado módulo de resiliencia.

Por lo tanto, se busca mantener al país dentro de las nuevas corrientes de diseño que tratan de explicar de una manera más realista el comportamiento de los pavimentos. Con el estudio de la variación de los módulos debido al efecto de la humedad, se pretende mediante factores de ajuste, calibrar los modelos que se desarrollan para el diseño de pavimentos, a las condiciones reales de Costa Rica. De manera que se pueda correlacionar la respuesta del material (esfuerzos, deflexiones y deformaciones) con el módulo de materiales, estos siendo ajustados a las diferentes condiciones de humedad a las que se puede ver sometida la estructura.

1.1.3 Antecedentes teóricos y prácticos del problema

A nivel internacional se ha realizado gran cantidad de investigaciones respecto a la influencia de las condiciones ambientales como lo es la variación de la humedad en el diseño de pavimentos. En 2011, la AASHTO presentó oficialmente la nueva guía MEPDG, que a diferencia de la actual guía de diseño AASHTO, toma en cuenta la interacción entre materiales, la estructura, los parámetros de construcción, el clima y el tráfico. (Mena, 2013)

Uno de los puntos fuertes de la MEPDG es su capacidad para integrar plenamente a los modelos climáticos en el proceso de diseño de carreteras con altos niveles de confiabilidad y predicciones, ya que todos los modelos son calibrados y validados con los registros reales de las estaciones climáticas. Programas como el dirigido por la Administración Federal de Carreteras (FHWA, por sus siglas en inglés) y el estudio del comportamiento del pavimento a largo plazo (LTPP - Long Term Pavement Performance) también se han enfocado en el estudio de estos temas (AASHTO, 2008).

Se han realizado varios proyectos para el análisis y predicción de variaciones estacionales como el Proyecto de investigación de carreteras de Minnesota (MnROAD), donde se empleó una herramienta de modelado analítico denominado modelo de clima integrado mejorado (ICM). Este modelo, es un programa de flujo de calor y humedad acoplado unidimensionalmente que se emplea para analizar sistemas de suelos de pavimentos, que permite predecir las temperaturas in situ del pavimento, el contenido de humedad y el módulo de capa de secciones de prueba representativa (Birgisson et al, 2000).

En materia nacional, en el año 2010, Badilla y Sibaja realizaron un análisis de la respuesta estructural de pavimentos mediante deflectómetro de impacto (FWD-Falling Weight Deflectometer) en diferentes épocas el año. Se analizaron treinta y dos diferentes tramos

localizados en seis regiones geográficas y en once zonas climáticas. En el estudio se realizó la comparación de la deflexión obtenida mediante el deflectómetro de impacto, producto de la humedad en la que se encuentran las capas granulares y suelos, en la estación seca y en la estación lluviosa (Badilla & Sibaja, 2010).

Actualmente, la Unidad de Materiales y Pavimentos realiza estudios del efecto de la humedad en el desempeño de los pavimentos, basados en ensayos acelerados a escala natural de pavimentos (APT, por el acrónimo en inglés). Estos se realizan empleando un Simulador de Vehículos Pesados (HVS, de sus siglas en inglés); donde el desempeño de los materiales es evaluado mediante la medición de los cambios en el módulo de las capas, deformación permanente y regularidad superficial. El efecto de la humedad es obtenido mediante la saturación parcial de las capas de materiales no ligados.

Recientemente, se analizaron diferentes estructuras de pavimento, las cuales son parte del grupo inicial de experimentos desarrollados en el PaveLab, y corresponden a 4 secciones de análisis. Las secciones AC1 que cuentan con una base estabilizada y las secciones AC2 con una base granular, ambas se ensayaron con un contenido de humedad cercano al óptimo, mientras las otras dos secciones idénticas (AC1-Húmeda y AC2-Húmeda) fueron sometidas a condiciones altas de nivel freático resultando en condiciones cercanas a la saturación de los materiales no ligados (Aguiar, Camacho, Arias , & Loría, 2017)

Entre los resultados del ensayo, se observó una diferencia significativa en las cargas requeridas para alcanzar la falla, al comparar las secciones en condición seca y en condición saturada. Se determinó que en términos de ESALs, la sección AC2-Seco resistió 21 veces lo que la sección AC2-Húmeda: 9.40 vs 0.45 MESALs respectivamente. Además, se pudo observar, hacia el final de la vida útil de las secciones bajo condiciones húmedas, las capas de MAC presentan una disminución significativa del módulo elástico (medido por medio de RSD) la cual varía desde una rigidez inicial de 3500 MPa contra 439 MPa en la condición de falla; lo que corresponde al 12% de la capacidad inicial. (Aguiar, Camacho, Arias , & Loría, 2017)

Cuando se compara como la humedad puede afectar el comportamiento de las diferentes capas que componen el pavimento, se puede notar que la humedad afecta principalmente la rigidez de la subrasante. Lo anterior puede esperarse de las propiedades del material (alta plasticidad y susceptibilidad a los cambios volumétricos). En el caso de las secciones AC2,

la reducción en la rigidez de la subrasante varió entre 4 y 14 veces comparando la rigidez de la condición seca contra la húmeda. En el caso de las secciones AC1 se observaron diferencias de 24 veces al comparar las dos condiciones de humedad (Aguiar et al., 2017).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Generar factores de ajuste que permitan cuantificar el efecto de la humedad en el módulo de resiliencia, con el fin de realizar diseños de pavimentos acordes a las características de nuestro país.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Efectuar ensayos de CBR, LWD y triaxial a los diferentes tipos de suelos y para cada una de las humedades seleccionadas, con el fin de analizar el efecto en la rigidez del material.
2. Establecer el bulbo de esfuerzos producto de la carga de una llanta empleando el programa 3DMove, para determinar las dimensiones de las muestras que se deben ensayar con LWD.
3. Obtener factores de ajuste del análisis comparativo de los resultados obtenidos en los ensayos de cada suelo, con el fin de cuantificar el efecto de la humedad en el módulo resiliente.

1.3 Delimitación del problema

1.3.1 Alcances

- Se determinará el efecto de la humedad para 3 tipos de suelo de nuestro país.
- Se utilizarán las cargas y compactación típicas de construcción de carreteras para simular adecuadamente los ensayos.
- La variación del módulo resiliente, en relación con el contenido de humedad se medirá para 5 humedades diferentes por cada tipo de suelo.
- Se confeccionará para el ensayo LWD únicamente una muestra por tipo de suelo a analizar.
- Se realizarán al menos dos especímenes por método de ensayo por humedad.

1.3.2 Limitaciones

- Los resultados obtenidos en la investigación serán propios de los tres tipos de suelo analizados, por lo que no se deben extrapolar a suelos que no cuenten con características similares.
- El proyecto considerará ensayos a escala de laboratorio por lo tanto no se pretende realizar correlaciones con las condiciones en sitio de las zonas determinadas.

1.4 Metodología

La metodología seguida para la elaboración del proyecto propuesto se muestra en la Figura 1.

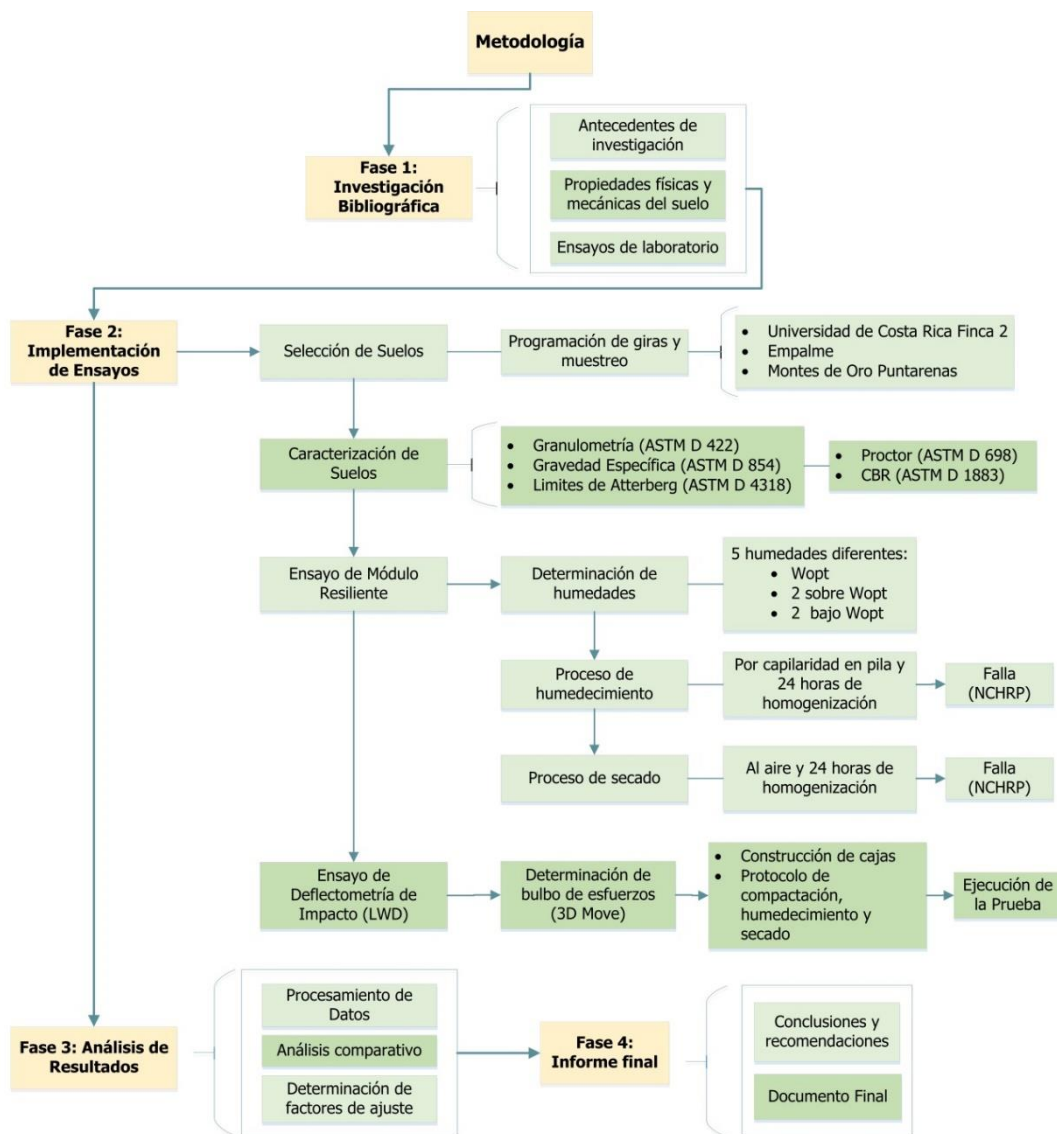


Figura 1. Metodología propuesta para la elaboración del proyecto

En la primera fase del proyecto se estudiaron los fundamentos teóricos para el desarrollo de la investigación, la normativa correspondiente de los ensayos a realizar, así como documentaciones e investigaciones relacionadas al proyecto.

La fase de realización de los ensayos se subdivide en cuatro etapas distintas, en la primera se seleccionaron las distintas muestras; para lo cual se determinaron tres tipos de suelos los cuales representan las formaciones de mayor incidencia en proyectos de carreteras. Para este fin, se empleó el estudio LM-PI-UMP-046-R1 Caracterización físico química de los suelos de Costa Rica, realizado por Programa de infraestructura de transporte (PITRA) del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). Posteriormente, se programaron las giras y muestreo de los mismos.

En la siguiente etapa se realizó la caracterización de los suelos seleccionados mediante los ensayos de granulometría (ASTM D 422), gravedad específica (ASTM D 845), límites de Atterberg (ASTM D 4218), Proctor estándar (ASTM D 698) y finalmente el ensayo determinación del índice de soporte de california (CBR) (ASTM D 1883).

En la tercera etapa se implementaron los ensayos de módulo resiliente, los cuales se realizaron para cada suelo a cinco porcentajes de humedad diferentes. Un porcentaje correspondiente a la humedad óptima, la cual se determinó mediante el ensayo de Proctor Estándar, dos porcentajes de humedad sobre el óptimo y dos porcentajes bajo el mismo, para cada porcentaje de humedad se ensayaron dos especímenes.

En todos los casos los especímenes a ensayar fueron compactados considerando la humedad óptima y la densidad máxima, alcanzando un porcentaje de compactación mayor al 95%. El primer valor de módulo resiliente se obtuvo en el estado de humedad óptima, ya que se espera sean las condiciones en las que se encuentra la subrasante en el momento de compactación, los valores posteriores de módulo resiliente se obtuvieron variando las humedades después de la compactación como se da en la subrasante a lo largo del tiempo.

La variación de las humedades posterior a la compactación se realizó según el caso, las humedades superiores a la óptima se alcanzaron mediante capilaridad colocando los especímenes sobre superficies porosas sumergidas y realizando mediciones de peso constantes. Las humedades inferiores a la óptima se obtuvieron mediante el secado de los especímenes al aire y mediciones constantes del peso. En ambos casos la ganancia o pérdida de humedad se controlaba con el peso y una vez alcanzado el peso esperado se mantenían

en empaques herméticos y a temperatura constante durante 24 horas para alcanzar la estabilidad o homogeneidad antes de ser ensayados. El procedimiento exacto para preparación, acondicionamiento y falla se detalla en el capítulo IV.

En la etapa final de esta fase se realizaron los ensayos de deflectometría empleando el deflectómetro de impacto liviano (LWD). Para la realización de este ensayo primero se determinó mediante el uso del programa 3D-Move el bulbo de esfuerzos producido ante la aplicación de carga del equipo y lograr dimensionar las calicatas que posteriormente se sustituyeron con los suelos muestreados a una humedad cercana a la óptima, la compactación se realizó en varias capas empleando un compactador mecánico y con un densímetro nuclear se verificó el estado de compactación final. Finalmente, se realizaron las mediciones con el LWD durante cinco días para obtener los valores de deflexión a diferentes humedades, el procedimiento para la realización de este ensayo se encuentra paso a paso el capítulo IV así como los diferentes equipos y sus especificaciones.

En la fase tres del proyecto, análisis de resultados, se realizó el procesamiento de todos los datos obtenidos en los ensayos para posteriormente realizar el análisis comparativo de los mismos. Se emplearon las ecuaciones de módulo que consideran diferentes variables como esfuerzo desviador, confinamiento y humedad, se realizó la calibración de las mismas mediante regresiones lineales y una vez calibradas las ecuaciones se emplearon análisis estadísticos para corroborar que los modelos y los datos obtenidos se correlacionan de la mejor manera. Finalmente, en esta fase se realiza la comparación de los resultados obtenidos de la calibración de módulo resiliente con los resultados de deflectometría y CBR, para obtener los factores de ajuste correspondientes y el análisis de los mismos.

Como fase final del proyecto se generaron las conclusiones y recomendaciones derivadas de la comparación de los resultados.

II. Marco teórico

2.1 Suelos

El suelo se define como el material no cementado que se encuentra sobre la roca de la corteza terrestre compuesto de acumulaciones de partículas de minerales rocosos, materia orgánica y otras partículas relativamente sueltas, con espacios vacíos entre las partículas sólidas que son ocupados con líquido y gas (Das, 2014). Estas partículas sólidas se forman como producto de acciones químicas y físicas causadas por el intemperismo. Si los depósitos de estas partículas se encuentran directamente sobre el lecho rocoso de donde se derivaron se llaman suelos residuales. Cuando los depósitos fueron transportados desde el origen hacia diferentes lugares por medio de acciones naturales como el viento, el agua, hielo o acción volcánica se denominan suelos transportados.

Los factores como la composición mineralógica, el clima, el tiempo de exposición al intemperismo, así como su medio de transporte son determinantes en el tamaño, la distribución de las partículas minerales y su estructura. Con estas características se puede clasificar el suelo y conocer de manera general la influencia sobre las propiedades ingenieriles. Los principales grupos en que se clasifican los suelos según el tamaño de partícula, en orden ascendente son: arcillas, limos, arenas y gravas.

Las gravas son las partículas de mayor tamaño entre unos 8-10cm y 2mm, se caracterizan porque los granos son observables a simple vista y no suelen retener mucha agua por la inactividad de su superficie y los grandes vacíos existentes entre sus partículas. Las arenas con partículas entre 2 y 0.060 mm aún son observables a simple vista, a mezclarse con agua no forman agregados continuos, sino que se separan de ella con facilidad. Los limos con partículas entre los 0.060 y 0.002 mm retienen el agua mejor que los tamaños superiores. Finalmente, las arcillas con las partículas más pequeñas, inferior a los 0.002 mm, tienen una alta capacidad de retención de agua (González de Vallejo, 2002).

Los suelos que son compuestos principalmente por gravas y arenas se conocen como suelos granulares. La interacción entre partículas en este tipo de suelos es regida por las fuerzas de gravitación ya que presentan poca o ninguna cohesión entre partículas, por lo cual la presencia de agua tiene un menor efecto en sus propiedades mecánicas. Estos suelos se distinguen por presentar una baja plasticidad, alta permeabilidad y buena estabilidad ante fuerzas axiales (Chaves, 2017).

Los suelos cohesivos son los conformados en su mayoría por partículas finas de limos y arcillas. En este tipo de suelos la interacción entre las partículas es regido por la cohesión generada por fuerzas químicas y eléctricas. Estas fuerzas se ven afectadas con la presencia de fluidos, por lo tanto, su comportamiento mecánico se ve afectado ante la presencia de agua. Los limos se caracterizan por presentar de baja a mediana plasticidad, baja permeabilidad y en términos mecánicos son de baja resistencia, alta compresibilidad y elasticidad. Las arcillas se caracterizan por su alta plasticidad y pérdidas de resistencias drásticas ante la presencia de agua, al igual que los limos las arcillas presentan alta compresibilidad, elasticidad y pueden presentar cambios volumétricos considerables con las variaciones de humedad (Chaves, 2017).

2.1.1 Propiedades de los suelos para su clasificación

Granulometría

Para estudiar los suelos es de gran interés conocer tanto los tamaños de las partículas como su distribución, lo cual se conoce como granulometría. El análisis granulométrico divide esas partículas en grupos de tamaños y determina sus proporciones relativas por peso, el análisis se realiza mediante un ensayo de laboratorio básico y es necesario para identificar los suelos en los sistemas ingenieriles de clasificación (Vargas, 2016).

Los suelos de grano grueso se analizan con un ensayo de separación de tamaños, en el cual una muestra de suelo seco se agita para que pase a través de una serie de tamices o mallas con aberturas cada vez más pequeñas, como la masa total de la muestra es conocida el porcentaje retenido o el que pasa cada tamiz se pueden determinar. Los detalles del procedimiento del ensayo están especificados en las normas ASTM C136, ASTM D 422 y AASHTO T 27 y T88 (Vargas, 2016).

Para los suelos finos (partículas inferiores a 0,075mm o malla no.200) el análisis mediante tamizado es impráctico. En este caso es común recurrir a un ensayo por sedimentación en agua, el cual consiste mezclar los finos de una muestra de suelo con agua en una probeta graduada para producir una suspensión. El proceso de sedimentación separa las partículas finas por tamaño y las mediciones se hacen de forma periódica con un hidrómetro el cual permite obtener una curva granulométrica a partir de la distancia/ tiempo de caída y la densidad de la suspensión. Los detalles del procedimiento de análisis están dados por las normas ASTM D 422 y AASHTO T88 (Vargas, 2016).

Con los datos obtenidos de los ensayos se puede generar la curva granulométrica, como la que se muestra en la Figura 2

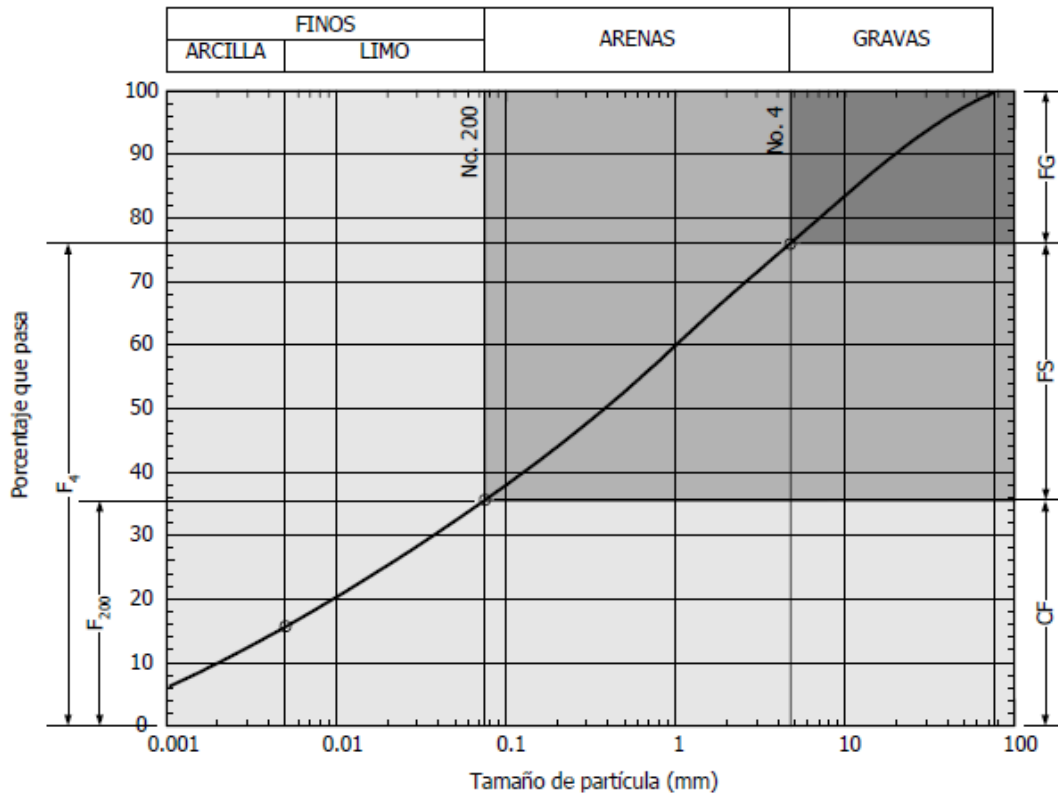


Figura 2. Ejemplo de curva granulométrica
Fuente: Vargas (2016).

Plasticidad

Existen cuatro estados básicos de consistencia para describir el comportamiento de un suelo ante la presencia de humedad: sólido, semisólido, plástico y líquido. Cuando la humedad es muy baja, el suelo se encuentra en estado sólido y se comporta como un sólido quebradizo, al aumentar el contenido de humedad el suelo pasa a estado semisólido y luego al plástico, estado en el que el suelo puede ser remodelado sin fracturarse, cuando el contenido de humedad ya es muy alto el suelo se comporta como un líquido y puede fluir. (Das, 2014)

Los contenidos de humedad en los cuales se da la transición de un estado a otro en un suelo son conocidos como los límites de Atterberg. El límite de contracción es el punto donde se da la transición entre sólido y semisólido, el límite plástico es la transición entre semisólido y plástico y el límite líquido cuando el suelo pasa al estado líquido. (Chaves, 2017)

El índice de plasticidad (IP) es la diferencia entre límite líquido (LL) y el límite plástico (LP):

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

El ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad está establecido en la norma ASTM D 4318 o AASHTO T-89.

Gravedad específica

La gravedad específica de un suelo corresponde al peso unitario del volumen de un material, a una temperatura específica, entre el peso unitario para un mismo volumen de agua destilada a la misma temperatura.

En el laboratorio la gravedad específica de un material se determina dependiendo de la granulometría del mismo. Para los materiales granulares o con partículas mayores a los 4,75mm (tamiz no.4) se debe seguir el ensayo ASTM C 127, que consiste en la saturación de un espécimen y mediante las mediciones de pesos y volúmenes se pueden obtener las densidades, gravedad específica y absorción del material. Los suelos con partículas pasando el tamiz no.4 el ensayo se realiza empleando un picnómetro con agua, procedimiento que debe seguir la norma ASTM D 854.

Existen valores típicos de gravedad específica que sirven de guía para la clasificación de suelos como los mostrados en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Valores típicos de gravedad específica para suelos gruesos y finos

Tipo	Descripción	Gravedad específica
Grano Grueso	Gravas	2,65
	Arena gruesa a media	2,65
	Arena fina limosa	2,65-2,67
Grano Fino	Arena arcillosa	2,65
	Limo arenoso	2,66-2,68
	Limo	2,65-2,67
	Limo arcilloso	2,68
	Arcilla arenosa	2,68-2,70
	Arcilla	2,75-2,80
Orgánico	Limo orgánico	2,30
	Turba	1,50-2,15

Fuente: Cordero (2004).

Grado de compactación y humedad óptima

La relación entre el contenido de humedad de un suelo y su densidad se obtiene de un ensayo estandarizado conocido como Proctor, el cual puede ser de dos tipos: Proctor Estándar que sigue la norma AASHTO T99 o Proctor Modificado que sigue la norma AASHTO T 180 y su principal diferencia es la aplicación de mayor energía de compactación. En el primer caso para Proctor Estándar se emplea un mazo de 2,55 kg y una altura de caída de 305 mm y en Proctor Modificado el peso del mazo es de 4,54 kg y se deja caer desde una altura de 457 cm, el procedimiento de ensayo también varía dependiendo del mismo.

Con estos ensayos partiendo desde un estado de humedad seco y conforme se aumenta el contenido de agua se pueden obtener mayores densidades secas, aplicando una misma energía de compactación. Sin embargo, después de cierta cantidad de agua los valores de densidad seca empiezan a disminuir (Chaves, 2017).

En la Figura 3, se observa la curva típica de densidad seca contra humedad, el punto máximo, en la curva donde se alcanza la densidad máxima seca se le conoce como contenido de humedad óptimo.

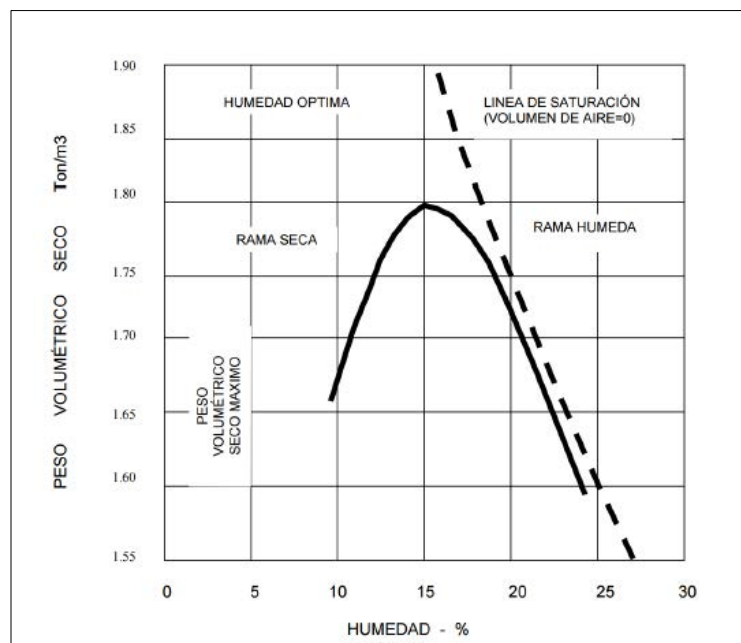


Figura 3. Curva típica de densidad seca contra contenido de humedad
Fuente: Rico & del Castillo (1992).

El grado de compactación de un suelo es la relación entre la densidad seca del suelo y la densidad seca máxima mencionada anteriormente.

2.1.2 Clasificación de los suelos

Los suelos se clasifican en grupos y subgrupos con similitudes en sus propiedades físicas y mecánicas, con el fin de realizar una valoración inicial del tipo de suelo de una forma rápida y económica. Esta clasificación inicial nos permite determinar los estudios que se deben realizar posteriormente según el tipo de obra a construir.

Existen diferentes sistemas de clasificación de suelos, estos se basan principalmente en la granulometría y plasticidad del suelo, entre los sistemas de clasificación más comunes se encuentra el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el sistema de clasificación de suelos AASHTO.

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos se basa en el sistema de clasificación desarrollado por Casagrande en 1942, después de algunas modificaciones fue aprobado por el gobierno de Estados Unidos en 1952 y la versión actual fue publicada en 1960 por el *U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station*.

Este sistema de clasificación divide los suelos en grano grueso, grano fino y suelos orgánico, para la fracción gruesa considera únicamente el análisis granulométrico para su clasificación, ya que parte de la suposición que la porción fina de estos suelos no afecta su comportamiento ingenieril. En la clasificación de los suelos finos asume que el comportamiento ingenieril del suelo está relacionado con sus características plásticas, por lo que emplea los límites de consistencia para clasificarlos (Chaves, 2017).

Para la clasificación del suelo en el Sistema Unificado se emplean dos letras, la primera letra hace referencia al grupo que pertenecen y la segunda al subgrupo. En el Cuadro 2, se muestran los símbolos que se usan como identificación.

Cuadro 2. Simbología para la clasificación de suelos mediante SUCS

Símbolo	G	S	M	C	O	Pt	H	L	W	P
Descripción	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Limos o arcillas orgánicos	Turba y suelos altamente orgánicos	Alta plasticidad	Baja plasticidad	Bien graduado	Mal graduado

Fuente: (Das, 2014)

En el Cuadro 3, se muestra un resumen del procedimiento de clasificación SUCS.

Cuadro 3. Resumen del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

DIVISIONES PRINCIPALES		CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO	SÍMBOLO	SUELOS TÍPICOS			
SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenida en la malla No. 200 (75 µm)	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa la malla No. 4	ARENAS LIMPÍAS (Poco o nada de partículas finas) ARENAS CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas)	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}}$	Cu > 4 y 1 < Cc < 3	GW	Gravas bien gradadas, mezclas de grava y arena, con poco o nada de finos	
				Cu < 4, Cc < 1 o Cc > 3	GP	Gravas mal gradadas, mezclas de grava y arena, con poco o nada de finos	
	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida en la malla No. 4	GRAVAS LIMPÍAS (Poco o nada de partículas finas) GRAVAS CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas)	IP < IP _A o IP < 4 (Finos ML/MH) IP > IP _A , IP > 7 y LL < 30 (Finos CL/CH)	4 < IP < 7 y LL < 30 (Finos CL-ML) Use símbolos dobles (GC-GM)	IP < IP _A o IP < 4 (Finos ML/MH)	GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo
					IP > IP _A , IP > 7 y LL < 30 (Finos CL/CH)	GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla
	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa la malla No. 4	ARENAS LIMPÍAS (Poco o nada de partículas finas) ARENAS CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas)	IP < IP _A o IP < 4 (Finos ML/MH) IP > IP _A , IP > 7 y LL < 30 (Finos CL/CH)	4 < IP < 7 y LL < 30 (Finos CL-ML) Use símbolos dobles (SC-SM)	Cu > 6 y 1 < Cc < 3	SW	Arenas bien gradadas, arenas con grava, con poco o nada de finos
					Cu < 6, Cc < 1 o Cc > 3	SP	Arenas mal gradadas, arenas con grava, con poco o nada de finos
	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa la malla No. 4	ARENAS LIMPÍAS (Poco o nada de partículas finas) ARENAS CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas)	IP < IP _A o IP < 4 (Finos ML/MH) IP > IP _A , IP > 7 y LL < 30 (Finos CL/CH)	4 < IP < 7 y LL < 30 (Finos CL-ML) Use símbolos dobles (SC-SM)	IP < IP _A o IP < 4 (Finos ML/MH)	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo
					IP > IP _A , IP > 7 y LL < 30 (Finos CL/CH)	SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla
	SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS Más de la mitad del material pasa la malla No. 200 (75 µm)	LIMOS Y ARCILLAS Baja compresibilidad (Límite líquido menor de 50)	Determine la ubicación del límite líquido y el índice de plasticidad en la Carta		ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos	
					CL	Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres	
OL		Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad					
MH		Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, limos elásticos					
CH		Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas					
OH		Arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de mediana plasticidad					
OH o MH							
LIMOS Y ARCILLAS Alta compresibilidad (Límite líquido mayor de 50)	Determine la presencia de materia orgánica en la coloración (oscura), el olor, etc.	Pt	Turba y otros suelos altamente orgánicos				

Fuente: Vargis (2016).

Sistema de clasificación AASHTO

El sistema de clasificación AASHTO se usa principalmente para la clasificación de las subrasante de las carreteras y fue propuesto originalmente por el Comité de clasificación de materiales para subrasante y caminos de tipo granular del Highway Research Board en 1945.

El sistema actualmente clasifica los suelos en según ocho grupos principales, A-1 al A-8, con base en su distribución granulométrica, límites líquido e índice de plasticidad. Los suelos entre os grupos A-1, A-2 y A-3 corresponden a suelos de grano grueso y los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 son suelos de grano fino, las turbas y suelos orgánicos quedan clasificados en el grupo A-8. (Das, 2014)

Este sistema utiliza un valor de conocido como índice de grupo (IG) para evaluar la idoneidad de suelo como material de subrasante, este índice se presenta en números enteros y positivos, un valor de IG=0 corresponde a suelos de muy buena calidad, los suelos con valores de IG=20 o mayores son considerados muy pobres para ser usados en subrasante.

En el Cuadro 4, se resume el sistema de clasificación de AASHTO.

Cuadro 4. Sistema de clasificación AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa por el tamiz N° 200)						Materiales limosos y arcillosos (más del 35% pasa el tamiz N° 200)				
	A-1		A-3				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6	
Grupo:	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6					A-2-7
Porcentaje que pasa: N° 10 (2mm) N° 40 (0,425mm) N° 200 (0,075mm)	50 máx 30 máx 15 máx	- 50 máx 25 máx	- 51 mín 10 máx	- - 35 máx			- - 36 mín				
Características de la fracción que pasa por el tamiz N° 40											
Límite líquido	-		-	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín (2)
Índice de plasticidad	6 máx		NP (1)	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Constituyentes principales	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa			Suelos limosos		Suelos arcillosos		
Características como subrasante	Excelente a bueno						Pobre a malo				

Fuente: Vargas (2016).

2.2 Pavimentos

Un pavimento consiste en una estructura de capas sobrepuestas de diferentes materiales con el objetivo de transmitir las cargas, que son recibidas directamente por la superficie de rodamiento, producto del paso de los vehículos y llevarlas hasta la subrasante. Además, deben cumplir con las características funcionales y estructurales óptimas que brinden seguridad y confort al usuario.

Los pavimentos se pueden clasificar en dos tipos, flexibles o rígidos, cuya diferencia esencial es su comportamiento ante la aplicación de cargas y distribución de las mismas.

Los pavimentos flexibles se caracterizan por su capacidad de deformación ante las cargas, estos están conformados por una superficie de rodamiento generalmente asfáltica, apoyada sobre capas de menor rigidez, disipando las cargas a través de cada capa de tal forma que al llegar a la subrasante estas sean mínimas. Los pavimentos rígidos, por su parte, son capaces de distribuir las cargas verticales en un área mayor dada su rigidez, reduciendo las presiones que se transmiten al suelo en magnitudes muy pequeñas (Zárate, 2003).

Ante la aplicación de cargas vehiculares y su interacción con las condiciones ambientales los pavimentos experimentan una respuesta, la cual se puede obtener mediante el análisis mecánico de la estructura lo implica el cálculo de esfuerzos, deformaciones y deflexiones en los puntos críticos del pavimento. Estas respuestas conllevan al desempeño del pavimento el cual es la medida de las diferentes fallas desarrolladas en la vida útil del pavimento. Las fallas más comunes que presentan los pavimentos son el ahuellamiento, fisuramiento, rugosidad, resistencia al deslizamiento entre otros y suelen darse por diferentes factores como mal diseño de la estructura, condiciones climáticas, exceder los ESAL y poco mantenimiento o nulo (Mena, 2013).

2.2.1 Estructura de un pavimento

Las capas que conforman comúnmente la estructura del pavimento son la capa de rodadura, la base, la subbase y finalmente la subrasante. Sus características y funcionamiento principal son:

Capa de rodadura

Puede ser flexible, rígida o semirrígida según el material utilizado, son construidas comúnmente en hormigón o mezcla asfáltica y la diferencia principal como se mencionó es

la distribución de las fuerzas y los efectos de la temperatura. En el pavimento bituminoso la carpeta asfáltica es la capa que presenta la mayor resistencia de la estructura, absorbiendo el mayor porcentaje de la carga y distribuyendo de manera gradual la carga a las capas subyacentes. En los pavimentos rígidos la losa es la que resiste la mayoría de los esfuerzos impuestos (Herrera, 2007).

Base

Es la capa pétreo entre la capa de rodadura y la subbase. En algunos casos esta capa puede ser construida directamente sobre la subrasante cuando esta presenta buen comportamiento mecánico. La función principal de esta capa de es transmitir las cargas impuestas por el tránsito con intensidades adecuadas a las capas subyacentes. Esta capa contribuye adicionalmente al drenaje y facilita los procesos constructivos, en pavimentos rígidos evita el fenómeno de bombeo (Rondón & Reyes , 2015).

Su rigidez y resistencia a la deformación están relacionadas con el tránsito, por lo que en carreteras de tránsito bajo o medio se suelen utilizar materiales granulares y para tránsito alto bases estabilizadas con cal o cemento, cuando así se requiera. El material utilizado en su construcción no debe contener partículas arcillosas, orgánicas o algún otro tipo de material que perjudique su desempeño (Herrera, 2007).

Subbase

La subbase es la capa que se encuentra entre la base y la subrasante. Al igual que la base, tiene como función principal transmitir los esfuerzos, además de proveer un cimiento uniforme a la base y cumplir como una capa drenante (Zárate, 2003). La subbase previene la intrusión de finos de la subrasante a la base. Los materiales empleados en su construcción deben ser libres de orgánicos escombros o cualquier material degradable.

Subrasante

Es la capa bajo la subbase o la base, sobre la cual se soporta o cimienta la estructura del pavimento. Está conformada de suelo compactado de manera que sus propiedades mecánicas le permitan resistir los esfuerzos transmitidos por la carga cíclica y el peso de la estructura sin deformaciones o erosiones. Esta capa debe cumplir con estabilidad volumétrica y presentar uniformidad en la superficie para no interferir con el espesor de la capa superior (Herrera, 2007).

La subrasante debe brindar resistencia al ahuellamiento y debe tratar de no inducir fatiga en las capas ligadas del pavimento. Para la ingeniería es un material que constituye tal vez la principal variable de diseño de pavimentos, es importante considerar su potencial expansivo y su capacidad portante expresada a través de su resistencia al corte y/o rigidez bajo carga cíclica (Rondón & Reyes , 2015).

2.2.2 Subrasante como cimentación de la estructura de pavimento

Las propiedades de la subrasante, al funcionar como cimentación de la estructura de pavimento, pueden tener gran influencia en el desempeño y durabilidad del pavimento. La caracterización y determinación de los parámetros de resistencia de la subrasante debe ser tan extensa como la magnitud del proyecto lo requiera. Un conocimiento errado de las propiedades del suelo puede llevar a diseños inadecuados, resultando en un mal desempeño y reduciendo la vida útil. Por otro lado, una subestimación de las capacidades de la subrasante pueden generar sobre diseños que generen un impacto directo en el costo del proyecto (Chaves, 2017).

Antes de diseñar una carretera, se deben realizar estudios geológicos y geotécnicos correspondientes, pues las propiedades del suelo son determinantes en el comportamiento estructural del pavimento. Se deben tomar en cuenta aspectos como la facilidad de compactación, capacidad de drenaje y resistencia a esfuerzos aplicados, para lograr evitar fallas durante su vida útil. En el caso de pavimentos flexibles, algunos deterioros atribuibles a fallas a **nivel de subrasante son el "cuero de lagarto" y las roderas**, en el caso de pavimentos rígidos los deterioros más comunes son el bombeo y agrietamiento de las losas (Herrera, 2007).

A pesar que tramo de cimentación esté conformado por un mismo tipo de suelo, se debe ser consciente de su heterogeneidad, y de las variaciones del nivel freático que pueden influir en su comportamiento. Por ello la necesidad de llevar a cabo suficientes pruebas de laboratorio, para evaluar el comportamiento de lo suelo y emitir un criterio acorde con el comportamiento real de la subrasante (Herrera, 2007).

Para el dimensionamiento o diseño del pavimento, los ingenieros además de los ensayos de caracterización de suelos, caracterizan la subrasante a través de la relación de soporte de California (CBR), de la deflectometría o del módulo resiliente (M_r).

Valor Relativo de Soporte o California Bearing Ratio (CBR)

Ensayo desarrollado por Stanton y Porter en 1929. Mediante este ensayo se obtiene la capacidad relativa de soporte de un suelo. Para la realización del ensayo se debe seguir como parámetros las normas AASHTO T-190, T-193, T-292, T-294. Y ASTM D-1883.

En este ensayo, se compara la presión o esfuerzo necesario para introducir ½" (12.7mm) de un pistón con características estandarizadas en el área de suelo, con la presión requerida para penetrar el mismo pistón en un material estándar de California. El resultado se expresa como un porcentaje y permite evaluar la calidad relativa de los suelos usados en subrasantes y capas de subbases y bases (Rivera, 2013).

$$\text{CBR} = \frac{\text{Carga Unitaria del Ensayo}}{\text{Carga Unitaria Patrón}} \times 100 \quad (2)$$

Este ensayo debe realizarse sobre el suelo en estado saturado para simular su condición más crítica. Por ese motivo los especímenes en el laboratorio se sumergen en agua durante cuatro días, con una carga aplicada sobre la superficie de dichos especímenes, la cual representa la masa de la estructura del pavimento que soporta la subrasante. El CBR mide de manera indirecta una resistencia al corte (penetración) y una rigidez la cual se obtiene a través de la relación entre carga y desplazamiento (Rondón & Reyes , 2015).

Ensayo estándar para la determinación de deflexiones

La deflectometría de impacto es una tecnología que permite evaluar el módulo resiliente in-situ de un pavimento. Esta información se obtiene aplicando una carga dinámica a la capa y registrando su deformación mediante sensores (Osorio, 2008).

El Deflectómetro de Impacto Liviano (LWD, por sus siglas en inglés) es un deflectómetro de impacto portátil que fue diseñado para realizar mediciones de módulo resiliente in-situ. Este utiliza diferentes configuraciones de plato de carga (10, 20 y 30 cm) y presión aplicadas (10,15 o 20 kg) y alturas variables hasta 85 cm. Para la realización de este ensayo con el LWD, se debe tomar como referencia la norma ASTM E2583.

Los ensayos mencionados anteriormente permiten conocer el comportamiento de la subrasante. La utilización del valor de CBR como capacidad estructural es el ensayo más empleado ya que la realización del mismo es simple y económica. Por su parte el LWD es una alternativa sencilla al ser muy versátil por su peso y facilidad de transporte lo que permite evaluar la condiciones reales in-situ. Estos ensayos, ya sean por correlaciones o

retrocálculo, buscan determinar el módulo resiliente (M_r) del material, parámetro indispensable en el diseño. Sin embargo, existen otras metodologías de ensayo para obtenerlo, con mayores niveles de complejidad, pero con resultados más precisos.

2.3 Módulo resiliente (M_r)

El módulo resiliente (M_r) es una propiedad empleada para evaluar la respuesta de un material. Es un parámetro de entrada para el diseño, la evaluación y el análisis de pavimentos. El módulo resiliente se mide mediante ensayos de carga cíclica, y se define como el cociente entre el esfuerzo desviador aplicado y la deformación recuperable (elástica) medida. Este módulo se refiere a la capacidad de un material de recuperar su forma original después de haber sido deformado, por lo que no es indicador de la resistencia de un material sino una medida de la rigidez del material y un indicador de su calidad o condición (Perera, 2015).

Se le llama deformación resiliente o elástica a las deformaciones que tienen una recuperación instantánea una vez que se remueve la carga que la generó y se denomina deformación permanente o plástica a la deformación que se mantiene en el material aún luego de removida la carga (Chaves, 2017). La magnitud de la deformación permanente depende de la cantidad de repeticiones de carga; para un esfuerzo constante conforme aumenta el número de repeticiones, la deformación plástica generada por estas cargas es cada vez menor y la deformación total pasa a ser prácticamente la deformación resiliente (Garnica, Gómez, & Sesma, 2002).

Como se puede observar en la Figura 4, se observa como la deformación permanente se va acumulando. En los ciclos intermedios la deformación permanente para cada ciclo empieza a disminuir, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales; el material llega así a un estado en el cual toda la deformación es elástica, en esta condición surge el módulo resiliente (Garnica, Pérez, & Gómez, 2001).

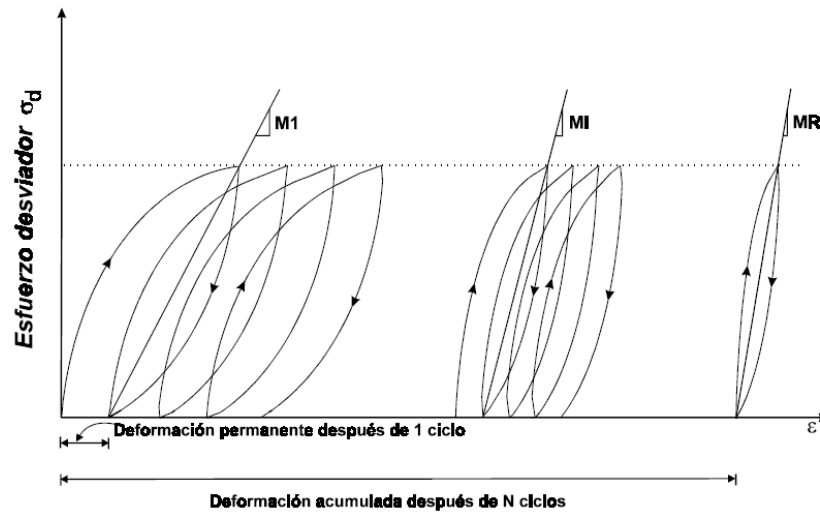


Figura 4. Deformación ante cargas repetidas
Fuente: Garnica et al. (2002)

El módulo resiliente se puede determinar entonces como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable y se representa como:

$$M_r = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon_{axial}} = \frac{\sigma_d}{\epsilon_{axial}} \quad (1)$$

Dónde:

- σ_1 = Esfuerzo principal mayor
- σ_3 = Esfuerzo principal menor
- σ_d = Esfuerzo desviador
- ϵ_{axial} = Deformación recuperable

Por tanto, el concepto de módulo resiliente se encuentra ligado invariablemente a un proceso de carga repetida.

Esta variable es el principal parámetro para modelar las capas estructurales usando la teoría de multicapa elástica y utilizado integralmente en las metodologías de diseño AASHTO y en la guía MEPDG. Existen distintos métodos de obtención del módulo resiliente. Los mismos están asociados a tres niveles de precisión, que van desde el nivel 1 que representa la mayor precisión al nivel 3 el menos preciso (Chaves, 2017).

El nivel 1, está asociado al nivel de confiabilidad más alto y para determinarlo se realiza en laboratorio un ensayo triaxial cíclico sobre una muestra representativa, la cual se somete a una carga cíclica de duración definida bajo determinados estados de esfuerzo. El equipo empleado en la realización del ensayo está constituido por una cámara triaxial para ensayos

cíclicos, un marco de carga con un actuador dinámico servo controlado, un panel de control y de mediciones de presiones de cámara y una unidad de adquisición de datos con software de procesamiento.

Para la realización de este ensayo se debe seguir lo estipulado en las normas AASHTO T307 ó la NCHRP 1-28A. En la presente investigación se seguirá para la realización del ensayo la norma NCHRP 1-28A.

Sin embargo, en algunos casos realizar el ensayo de módulo resiliente es complejo puesto que se requiere del equipo de laboratorio especial. Es por esto que, los valores de módulo resiliente también se pueden obtener de correlaciones empíricas con otras variables de los suelos. Esta metodología corresponde al nivel 2 y representa el nivel intermedio de confiabilidad. Utilizando esas correlaciones el valor de M_r se puede obtener de ensayos de laboratorio más accesibles y de ensayos in-situ, la principal variable de correlación es el valor de CBR. En el Cuadro 5, se muestran algunas relaciones empíricas para obtener el Módulo Resiliente.

Cuadro 5. Correlaciones para obtener el Módulo Resiliente

Propiedad	Relación	Autor
CBR (para $CBR \leq 10$ psi)	$M_r(\text{psi}) = 1500 * CBR$	Heukelom & Klomp (1960)
CBR	$M_r(\text{psi}) = 5409 * CBR^{0,7111}$	Green & Hall (1975)
CBR	$M_r(\text{MPa}) = 17,6 * CBR^{0,64}$	Powell (1984)
CBR	$M_r(\text{psi}) = 2555 * CBR^{0,64}$	Lister (1987)
Coefficiente de capa AASHTO(a_i)	$M_r(\text{psi}) = 3000 * (a_i/0,14)$	AASHTO MEPDG

El nivel 3, de menor confiabilidad consiste en obtener el valor de módulo a partir de valores típicos para el tipo de suelo según su clasificación AASHTO o SUCS, en el siguiente Cuadro 6, se pueden observar algunos valores típicos de M_r .

Cuadro 6. Valores típicos de Mr en la MEPDG según clasificación del suelo

Clasificación de material	Rango Mr (psi)	Mr Típico (psi)
A-1-a	38,500 - 42,000	40,000
A-1-b	35,500 - 40,000	38,000
A-2-4	28,000 - 37,500	32,000
A-2-5	24,000 - 33,000	28,000
A-2-6	21,500 - 31,000	26,000
A-2-7	21,500 - 28,000	24,000
A-3	24,500 - 35,500	29,000
A-4	21,500 - 29,000	24,000
A-5	17,000 - 25,500	20,000
A-6	13,500 - 24,000	17,000
A-7-5	8,000 - 17,500	12,000
A-7-6	5,000 - 13,500	8,000
CH	5,000 - 13,500	8,000
MH	8,000 - 17,500	11,500
CL	13,500 - 24,000	17,000
ML	17,000 - 25,500	20,000
SW	28,000 - 37,500	32,000
SP	24,000 - 33,000	28,000
SW-SC	21,500 - 31,000	25,500
SW-SM	24,000 - 33,000	28,000
SP-SP	21,500 - 31,000	25,500
SP-SM	24,000 - 33,000	28,000
SC	21,500 - 28,000	24,000
SM	28,000 - 37,500	32,000
GW	39,500 - 42,000	41,000
GP	35,500 - 40,000	38,000
GW-GC	28,000 - 40,000	34,500
GW-GM	35,500 - 40,500	38,500
GP-GC	28,000 - 39,000	34,000
GP-GM	31,000 - 40,000	36,000
GC	24,000 - 37,500	31,000
GM	33,000 - 42,000	38,500

Fuente: NCHRP (2004).

2.3.1 Factores que afectan el Mr en suelos cohesivos

El módulo resiliente no es una propiedad constante en el suelo. Este varía según el estado de esfuerzos aplicados, obteniendo de los ensayos más una familia de curvas que un valor único (Ávila , 2017). Por su parte, el comportamiento de un suelo ante los esfuerzos aplicados, no depende únicamente de factores internos inherentes al suelo, sino también de factores externos como el grado de compactación, los ciclos de carga y condiciones climatológicas principalmente el contenido de humedad (Herrera, 2007).

El estado de esfuerzos de un suelo se describe en función de los esfuerzos de confinamiento (σ_c) y el esfuerzo desviador (σ_d). Si se somete un suelo, especialmente cohesivos, ante esfuerzos desviadores cada vez mayores, el valor de M_r decrece rápidamente, pero la tasa de decrecimiento es cada vez menor hasta alcanzar un valor de M_r casi constante (Herrera, 2007). En la Figura 5, que corresponde a una arcilla, se puede notar la dependencia del módulo de resiliencia del esfuerzo desviador (Garnica et al, 2001).

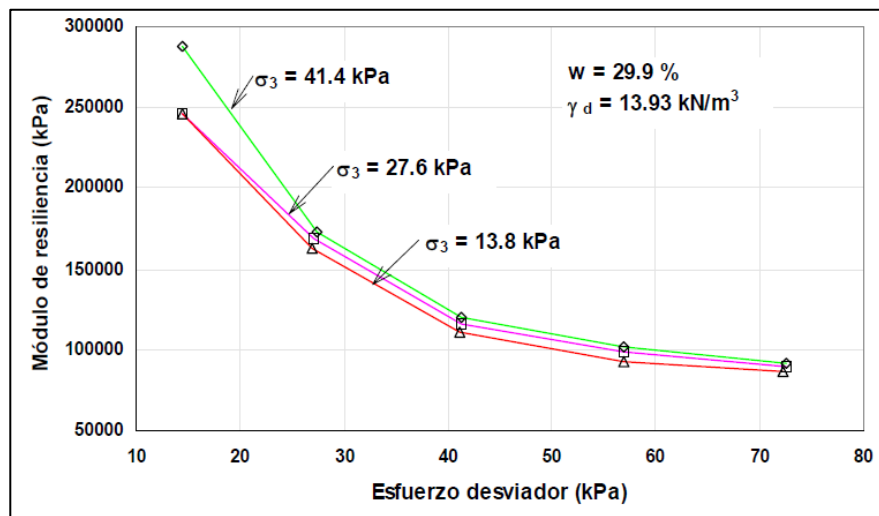


Figura 5. Módulo resiliente en suelos cohesivo a diferentes valores de esfuerzo desviador
Fuente: Garnica et al.,(2001).

Este efecto del esfuerzo desviador en el módulo resiliente de suelos cohesivos se le conoce como *stress-softening*. Los suelos granulares presentan un comportamiento contrario un aumento del esfuerzo desviador provoca un aumento del M_r , este es conocido como *stress-hardening*. En el caso de un aumento en el esfuerzo de confinamiento, el valor de M_r tanto para suelos finos como granulares aumenta, en este último el efecto del aumento de este esfuerzo es más pronunciado (Chaves, 2017).

Otro factor que afecta el valor M_r es el número de repeticiones de carga. Como se había indicado, cuando la cantidad de ciclos incrementa la deformación permanente acumulada aumenta y la deformación permanente producida en cada ciclo empieza a disminuir, a su vez, la deformación resiliente también va cambiando por lo que el módulo resiliente variará hasta llegar a un valor constante (Chaves, 2017).

La compactación del suelo también termina afectando los resultados de M_r . Esta se debe realizar a la humedad óptima del material para lograr alcanzar la densidad máxima del mismo. Si consideramos la compactación de la subrasante y el material está más seco que

la condición óptima de humedad el suelo presenta una estructura floculada con las partículas en orientación aleatoria. Si el mismo suelo es compactado, pero con una humedad mayor a la óptima, las partículas presentan una estructura dispersa con orientación paralela sin que exista contacto entre ellas. La orientación de las partículas y la presencia o ausencia de puntos de contacto, afecta el valor de M_r (Herrera, 2007).

Finalmente, la humedad es una de las variables más influyentes en el M_r , ya que aumentos en el contenido de humedad típicamente genera reducciones significativas en el módulo. El módulo de un material totalmente saturado puede ser hasta 50% más bajo que el del mismo suelo en una condición parcialmente saturada (Richter, 2006).

La reacción ante una alteración del contenido de humedad depende de la naturaleza del material. En general, se puede afirmar que (Austroads, 2012):

- Para suelos arenosos, pequeñas fluctuaciones en el contenido de humedad producen pocos cambios en el volumen y módulo resiliente.
- Para suelos limosos, pequeñas fluctuaciones en el contenido de humedad producen pocos cambios en el volumen, pero pueden producir grandes cambios en el módulo resiliente.
- Para los suelos arcillosos o suelos granulares con grandes contenidos de finos, pequeñas fluctuaciones en la humedad pueden producir grandes variaciones en el volumen (caso de arcillas expansivas) y disminuciones en el módulo del material.

El módulo de resiliencia y su variación debido a cambios en el contenido de agua ha sido analizado por diversos investigadores. Pérez et al. (2016), cita diferentes estudios entre ellos el realizado por Jones y Witczak (1977), quienes determinaron que el módulo de resiliencia de una arcilla limosa a la cual se le varió su contenido de agua de 11% a 20% cambiaba de 275 MPa a 52 MPa.

En el estudio de Seed, Chan y Lee (1962) que muestra la influencia del agua en el M_r de muestras inalteradas de una arcilla limosa, se encontró que un decremento de humedad de 3% bajo el óptimo duplicaba el valor de M_r . Salem, Bayomy y Al-Taher, (2003) desarrollaron un modelo que muestra como varía del M_r (retrocalculado) con el contenido de agua en suelos plásticos y no plásticos. En suelos plásticos un cambio en el contenido de agua entre el 3% y 5.5% conduce a cambios en el módulo entre 19% y 21%, en suelos no plásticos

tipo arenosos el valor de Mr cambia un 27% para un cambio de humedad del 5% aproximadamente.

Soliman y Shalaby (2010) (citados también por Pérez et al., 2016), realizaron pruebas de Mr a seis suelos variando el porcentaje de humedad bajo el óptimo y sobre él. En el suelo clasificado como arcilla de alta compresibilidad el valor de Mr se redujo de 63.9 MPa a 31.5 MPa cuando se incrementó de 28% a un 32.6% de humedad. Para otro suelo clasificado como CH, el valor de Mr pasó de 108 MPa a 34.8 MPa, al variar el contenido de agua de 18.8% a 23.8%. En las arcillas arenosas estudiadas, una de ellas pasó de un Mr de 101.9 MPa en la condición más seca a 15.4 MPa cuando se llevó a humedades sobre el punto óptimo, humedades de 12.4% a 16.9% respectivamente.

El estudio de la variación del módulo de resiliencia con respecto al contenido de humedad es un paso para mejorar los diseños de los pavimentos y para considerar estas variaciones en las metodologías de diseño de pavimentos, se deben de generar modelos que los representen.

2.3.2 Modelos de Mr usados en el diseño de pavimentos.

En el diseño de pavimentos el módulo de resiliencia se expresa comúnmente en función del estado de esfuerzos inducido por las cargas de tránsito, por lo tanto, surgen diferentes modelos que buscan describir el comportamiento resiliente de los materiales en función de estos esfuerzos. Los modelos mecanísticos, se adaptan a un suelo por medio de constantes k , que son calibradas de ensayos dinámicos sobre suelos a distintas condiciones de carga. (Chaves, 2017). Es importante recordar que estos modelos consideran solo los estados de esfuerzo y omiten las variables de humedad y grados de compactación. En el Cuadro 7, Ávila (2017) resume los modelos mecanísticos más utilizados.

Cuadro 7 Modelos mecánicos para Mr basados en estados de esfuerzos.

Nombre	Descripción	Modelo
Modelo presión de confinamiento	Este modelo fue desarrollado por Dunlap en 1963 su ecuación fue desarrollada en arenas y gravas en estado seco y saturado bajo carga triaxial dinámica.	$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_3}{Pa} \right)^{k_2}$
Modelo K- θ	Este modelo fue desarrollado por Seed y otros autores en 1967. El módulo resiliente está expresado como una función de los esfuerzos principales (θ) a los cuales el espécimen está sometido. El <i>primer invariante de esfuerzos</i> θ es igual a la suma de los esfuerzos principales ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) que actúan en el espécimen. La relación entre Mr y θ es una recta en un gráfico log-log. La desventaja de este modelo es que no toma en cuenta los efectos del esfuerzo cortante.	$M_r = k_1 \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2}$
Modelo K- σ_d	Este modelo fue desarrollado por Moossazadeh y Witczak en 1981. Es un modelo para los suelos cohesivos. Se introduce el esfuerzo desviador $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$.	$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{Pa} \right)^{k_2}$
Modelo May-Witczak	Desarrollado por May y Witczak en 1981. Considera al primer invariante de esfuerzos θ y el esfuerzo desviador σ_d . El esfuerzo desviador está relacionado directamente con el máximo esfuerzo cortante τ_m ($\sigma_d / 2$) aplicado al espécimen. Como toma en cuenta el esfuerzo cortante es aplicable a suelos cohesivos.	$M_r = k_3 \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_4} \left(\frac{\sigma_d}{Pa} \right)^{k_5}$
Modelo esfuerzo cortante octaédrico (Modelo Universal)	Desarrollado por Witczak y Uzan en 1988. Considera un cambio en el esfuerzo desviador por el esfuerzo cortante octaédrico que es un parámetro fundamental. Los esfuerzos fueron normalizados utilizando la presión atmosférica. Tiene la misma precisión que el modelo anterior pues el esfuerzo desviador y el esfuerzo octaédrico son proporcionales.	$M_r = k_1 Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right)^{k_3}$ $\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$
Modelo de la Guía de Diseño 2002	Aplicable para todos los tipos de materiales no ligados para pavimentos, desde las arcillas más plásticas hasta las bases granulares más limpias.	$M_r = k_1 Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{k_3}$
Modelo del Programa de Desempeño a largo plazo de pavimentos (LTPP)	Es una versión modificada del modelo universal constitutivo.	$\log \left(\frac{M_r}{Pa} \right) = k_1 + k_2 \log \left(\frac{\theta}{Pa} \right) + k_3 \log \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right) + k_4 \left(\log \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right) \right)^2$

Nota: Para todos los casos k_1 , k_2 , k_3 , k_4 y k_5 son constantes producto de la regresión lineal, θ es el primer invariante de esfuerzos, σ_1 , σ_2 y σ_3 son los esfuerzos principales, Pa es la presión atmosférica y τ_{oct} es el cortante octaédrico.

Fuente: Ávila (2017).

Los modelos anteriores son muy útiles en el diseño de carreteras, sin embargo, como se mencionó el efecto de la humedad sobre M_r es de gran importancia, para lo cual distintos autores han propuesto varios modelos para incorporar estos efectos dentro de un modelo racional para la predicción de M_r (Ávila , 2017). En el Cuadro 8, se muestra un resumen realizado por Ávila (2017), donde se encuentran los principales modelos de predicción de M_r para condiciones no saturadas de diversos autores utilizando métodos empíricos.

Cuadro 8. Modelos mecanísticos que incorpora mecánica de suelos no saturados.

Relaciones Empíricas		
Nombre	Modelo	Descripción
Johnson <i>et al.</i> (1968)	$M_r = 1.35 \times 10^6 (101.36 - \psi)^{2.36} (\theta_1)^{3.25} (\gamma_d)^{3.06}$	M_r (MPa) ψ y θ_1 en kPa y γ_d (Mg/m ³). Esta expresión se derivó para suelos arenosos.
Ceratti <i>et al.</i> (2004)	$M_r = 142 + 16,9\psi_m$	M_r (MPa), ψ_m (kPa). Esta relación se derivó para un suelo laterítico (A-7-6 ¹) para un rango de succión en sitio de 0 a 14 kPa.
Parreira & Goncalves (2000)	$M_r = 14,10\sigma_d^{0,782}\psi^{0,076}$	M_r (MPa), σ_d (kPa), ψ (kPa). Esta relación se derivó para un suelo laterítico (A-7-6 ¹) para un rango de succión en sitio de 0 a 87500 kPa.
Sawangsuriya <i>et al.</i> (2009)	$\frac{M_r}{M_{rsat}} = -5,61 + 4,54\log(u_a - u_w)$ $\frac{M_r}{M_{ropt}} = -0,24 + 0,25\log(u_a - u_w)$	Donde $(u_a - u_w)$ (kPa). Esta relación se desarrolló para 4 tipos de suelos finos (2 A-4 ¹ y 2 A-7-6 ¹) para un rango de succiones entre 0-1000 kPa.
MEPDG (2004)	$\log\left(\frac{M_r}{M_{ropt}}\right) = a$ $+ \frac{b - a}{1 + \exp\left[\ln\left(-\frac{b}{a}\right) + k_m(S - S_{opt})\right]}$	Donde $(S - S_{opt})$ es en decimales. Esta relación se desarrolló utilizando información anteriormente publicada. Es capaz de predecir el M_r tanto de materiales finos como gruesos tomando en cuenta el contenido de humedad.
<p>Nota: Para todos los casos ψ es la succión total, θ_1 es el primer invariante de esfuerzos, γ_d es la densidad seca, u_a es la presión de poro de aire, u_w es la presión de poro de agua, ψ_m es la succión matricial, M_{rsat} es el módulo en condiciones de saturación, $(S - S_{opt})$ es la variación en el grado de saturación, a es el mínimo del $\log(M_r/M_{ropt})$, b es el máximo del $\log(M_r/M_{ropt})$. $k, k_s, k_{us}, k_m, K1, K2, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, n_1, n_2, n_3, \alpha_1, \beta_1$ y m son parámetros de regresión. Para suelos finos a es -0,5934, b es 6,1324 y para suelos gruesos a es -0,3123, b es 0,3 y k_m es 6,8157.</p>		

Fuente: Ávila (2017).

III. Caracterización de los suelos en estudio

3.1 Selección de los suelos

Es de gran importancia en el diseño de carreteras conocer detalladamente el suelo sobre el cual será cimentada la estructura del pavimento. En el país se cuenta con una gran variedad de suelos debido a sus diferentes climas, litologías y condiciones topográficas. Por lo tanto, en el desarrollo de este proyecto se estudiaron cuales tipos de suelo son los de mayor incidencia a lo largo del territorio y cuales se encuentran con mayor frecuencia en los proyectos de carreteras del país.

Ávila & Araya (2014) realizan una caracterización física y química de diferentes suelos, todos pertenecientes a proyectos de carreteras, a los cuales les efectuaron los ensayos de granulometría, gravedad específica y límites de Atterberg para su respectiva clasificación. Analizando los 92 puntos muestreados en este estudio, cuyas ubicaciones se muestran en la Figura 6, se obtiene un acercamiento a los suelos que potencialmente se localizarán como subrasante en el país.

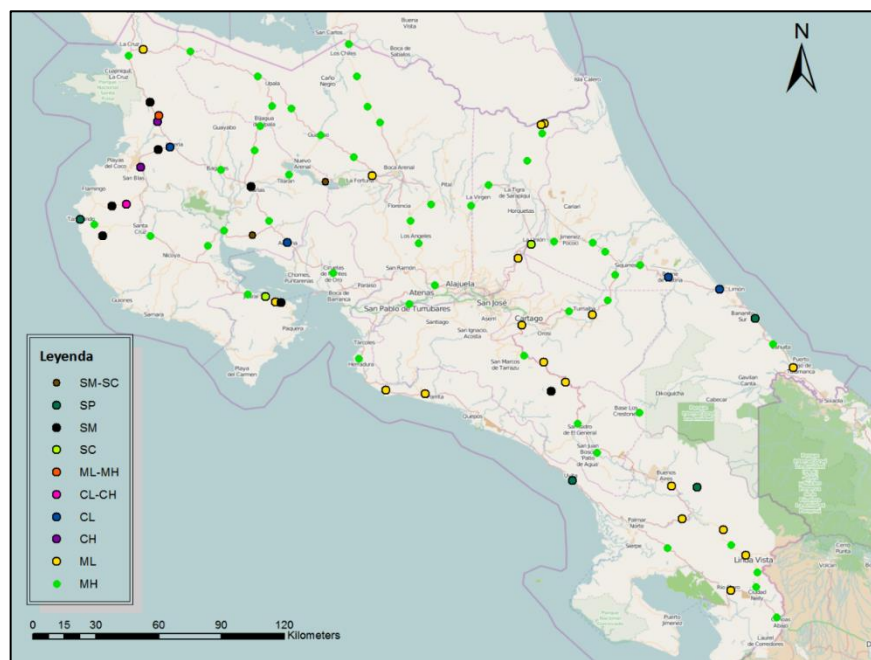


Figura 6. Distribución espacial de los puntos muestreados y su clasificación SUCS.
Fuente: Ávila & Araya (2014)

En la Figura 7, se muestra la distribución de los tipos de suelos clasificados por el método SUCS, donde se puede observar que la mayoría de los suelos muestreados (55%),

corresponde a limos de alta plasticidad, estos suelos son sensibles a los cambios de humedad y tienen tendencia a ser colapsables y sufrir grandes deformaciones cuando se encuentran cerca de la saturación (Ávila & Araya, 2014). El siguiente suelo con mayor incidencia en las muestras son los limos de baja plasticidad que corresponden a 21% y los porcentajes restantes a otros tipos de suelos.

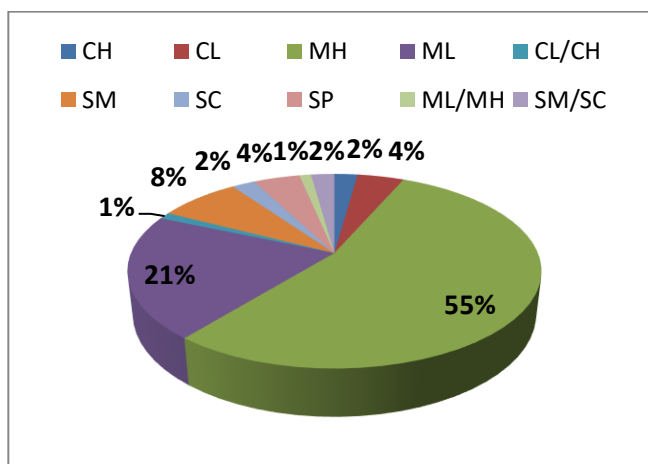


Figura 7. Gráfico de distribución de los suelos por su clasificación SUCS
Fuente: Ávila & Araya (2014)

De la totalidad de suelos analizados como se muestra en el gráfico de la Figura 8, el 76% corresponde a limos, el 16% a arenas y el 8% a arcillas. Es de esperar, por lo tanto, que los suelos que tengan mayor incidencia como subrasante en los proyectos de carreteras correspondan a limos. Por lo tanto, para el desarrollo de este proyecto se estudiaron tres limos de distintas procedencias, considerando zonas que tengan influencias climáticas distintas

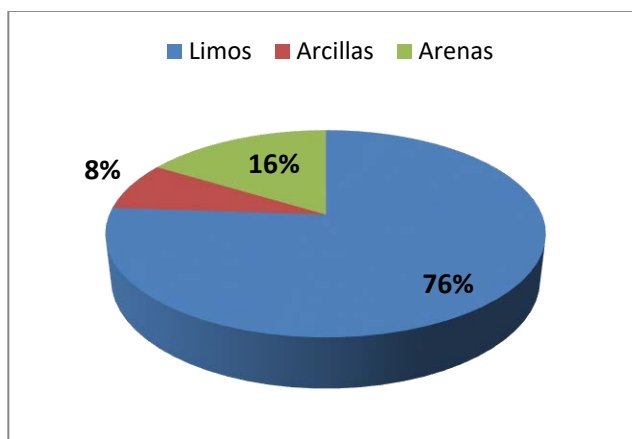


Figura 8. Gráfico de distribución por tipo de suelo de acuerdo a su granulometría
Fuente: Ávila & Araya (2014)

3.2 Ubicación

Se muestrearon tres puntos diferentes en zonas con presencia de vías, en la Figura 9, se muestra la ubicación exacta de cada uno de los puntos. El primer muestreo se realizó en Valle Central, dentro de la Ciudad de la investigación de la Universidad de Costa Rica (Finca 2) y corresponde a la muestra M-1002-16. El segundo muestreo se realizó en Montes de Oro Puntarenas sobre Ruta Nacional 1 (latitud: 10,0632 , longitud: -84,76030) y corresponde la muestra M-1397-18. El tercer punto muestreado se realizó en el Empalme Cerro de la Muerte (latitud: 9,69965 , longitud: -83,940493) sobre la ruta nacional 2, muestra M-1189-18.

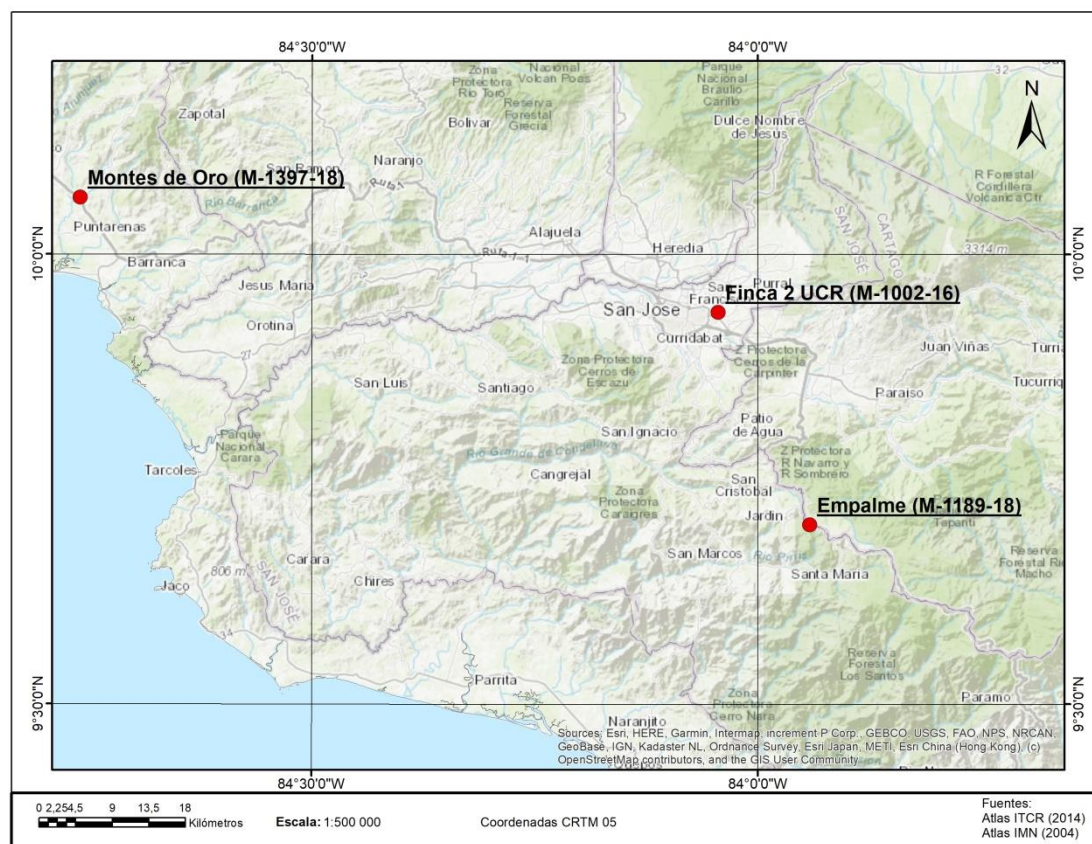


Figura 9. Ubicación de los suelos muestreados.

Los muestreos se realizaron mediante calicatas, removiendo la capa vegetal y con las precauciones necesarias para no contaminar las muestras con otros materiales. En la Figura 10, se puede observar la recolección del material.



Figura 10. Muestreo de los suelos

Para conocer más acerca de los puntos de muestreo se consultó el Geoportal de suelos de Costa Rica, que consiste en una plataforma virtual que cuenta con 1565 puntos de muestreo georreferenciados con datos sobre características físicas, químicas y taxonómicas de suelos.

En el mismo se describe, mediante puntos muestreados en el sector de Montes de Oro, Puntarenas, cercanos al punto en estudio que el suelo de la zona proviene de depósitos aluviales y coluviales del Cuaternario.

En muestreos cercanos al punto de muestreo del Empalme, los suelos son provenientes de rocas volcánicas, coladas de lava, tobas y brechas del Terciario. El punto muestreado en Finca 2 UCR, se localiza en el valle central donde se da la presencia de suelos de origen volcánico del Terciario y Cuaternario.

En la Figura 11, se puede observar una muestra de los tres suelos en estudio.



Figura 11. Muestras pasando malla #4 los tres suelos en estudio

3.3 Ensayos de caracterización física

Los ensayos de caracterización física de los suelos se realizaron en el Laboratorio de Suelos de LanammeUCR. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada suelo.

Finca 2 (M-1002-16)

Como se observó, en la Figura 11, el suelo muestreado presenta un color café oscuro en condiciones húmedas. Al secarse pierde su tono oscuro; pasando un café claro. En el Cuadro 9, se presenta un resumen de los resultados de los ensayos de caracterización física del suelo.

Cuadro 9. Características físicas del suelo M 1002-16.

Material más fino que 75μm	
62,9%	
Límites de Atterberg	
LL(%)	46
LP(%)	32
IP(%)	14
Gravedad específica	
Gs	2,717
Densidad seca máxima	
1329	kg/m ³
Humedad óptima	
34,5%	

Considerando los resultados anteriores, se determina que el suelo perteneciente a la muestra M-1002-16 corresponde según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) a un suelo tipo ML y según el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un A-7-5.

Empalme (M-1189-18):

El suelo muestreado presenta un color café claro con café grisáceo amarillento, con betas rojizas y blancas. En el Cuadro 10, se muestran los valores de los parámetros obtenidos de los ensayos de caracterización física del suelo junto a la densidad máxima seca para este suelo y humedad óptima.

Cuadro 10. Características físicas del suelo M 1189-18.

Material más fino que 75µm	
49,1%	
Límites de Atterberg	
LL(%)	60
LP(%)	51
IP(%)	9
Gravedad específica	
Gs	2,621
Densidad seca máxima	
1210	kg/m ³
Humedad óptima	
38,4%	

Este suelo corresponde a un material tipo MH, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y A-5 para sistema AASHTO.

Montes de Oro (M-1397-18)

El suelo muestreado en Montes de Oro presenta un color morado oscuro con vetas grisáceas y bloquecillos de roca meteorizada degradable. En el Cuadro 11, se muestra el resumen de los valores obtenidos de los ensayos de caracterización física del material. suelo.

Cuadro 11. Características físicas del suelo M 1397-18.

Material más fino que 75µm	
57,8%	
Límites de Atterberg	
LL(%)	54
LP(%)	40
IP(%)	14
Gravedad específica	
Gs	2,514
Densidad seca máxima	
1257	kg/m ³
Humedad óptima	
33,0%	

Esta muestra de suelo, corresponde según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), por sus características a un material tipo MH y se clasifica como A-7-5 según el sistema de clasificación de AASHTO.

IV. Resultados de Ensayos

4.1 Índice de soporte de california CBR

En el Apéndice II, se encuentran los resultados del ensayo de CBR de cada suelo. A continuación, se muestran los valores de CBR de los tres suelos al porcentaje de compactación promedio de los especímenes ensayados en Mr.

Cuadro 12. Resultados de CBR para las tres muestras de suelo

Suelo	C (%)	% CBR
M 1002-16	98%	14,8
M 1189-18	98%	22,5
M 1397-18	96%	22,0

4.2 Módulo Resiliente

El ensayo de Módulo Resiliente se realizó en el equipo *Universal Testing Machine (UTM-25)* del Laboratorio de Mezclas Asfálticas del LanammeUCR.

4.2.1 Generalidades y equipo

El ensayo de módulo resiliente, consiste en medir las deformaciones que se generan sobre una probeta cilíndrica de suelo que es sometida a diferentes combinaciones de presión de confinamiento y esfuerzo desviador. Estos simulan los diferentes esfuerzos que puede experimentar la subrasante de un pavimento en servicio (Chaves, 2017).

El suelo se evalúa comúnmente sólo en su humedad óptima, condición que no se mantiene a lo largo de la vida útil del pavimento. Sin embargo, las sollicitaciones de carga por el paso de vehículos claramente nunca dejan de existir. Por tanto, en esta investigación se realizaron el ensayo de módulo resiliente no solo considerando la humedad óptima, sino también con variaciones del contenido de agua en las probetas a ensayar tanto con porcentajes de humedad sobre el óptimo como bajo el mismo.

Se realizó un total de cinco puntos de humedades diferentes por suelo, de esta forma se obtuvo el comportamiento del suelo ante la aplicación de las cargas en su estado óptimo; dos porcentajes sobre la humedad óptima y dos porcentajes más secos, ensayando dos especímenes por porcentaje.

El equipo que se utilizó para ejecutar el ensayo, mencionado anteriormente, es el mostrado en la Figura 12. El mismo está compuesto por cuatro elementos principales, la cámara triaxial, el marco de carga, las unidades de distribución de presión y la unidad de control y registro de los datos. La cámara triaxial conformada por una cámara presurizada es la encargada de generar las presiones de confinamiento, para lo cual emplea aire, sobre esta se encuentra un pistón que es el encargado de generar el esfuerzo desviador.



Figura 12. Cámara triaxial dinámica del LANAMME.

Sobre la cámara se colocan dos sensores LVDTs para medir la deformación del espécimen. El marco es el encargado de generar la carga haversiana de 0,2 segundos de duración de forma cíclica sobre la cámara donde se encuentra el espécimen. La unidad de control cuenta con un sistema automatizado para aplicar las secuencias de carga. Desde esta unidad se puede controlar las diferentes partes del sistema y muestra en tiempo real las mediciones de los sensores.

4.2.2 Protocolo de Ensayo

La guía de diseño Mecánico-Empírico recomienda la realización de pruebas de módulo resiliente en laboratorio empleando la cámara triaxial dinámica y las metodologías de ensayo desarrolladas por la AASHTO T 307 y la NCHRP 1-28A. En este proyecto se siguió la norma NCHRP 1-28A, la cual utiliza 16 secuencias de falla con 100 ciclos de carga y anterior a estas secuencias, un acondicionamiento de 1000 ciclos de carga. En el Cuadro 13, se muestran

las combinaciones y la magnitud de los esfuerzos que establece el protocolo de ensayo de la NCHRP para los suelos finos de subrasante. Estas combinaciones son aplicadas por la unidad de control de forma automática durante la realización del ensayo.

Cuadro 13. Secuencia de combinaciones de carga esfuerzo NCHRP para suelos finos.

Procedimiento II (Subrasante cohesiva)										
Secuencia	σ de confinamiento		σ de contacto			σ de cíclico		σ de máximo		Nrep
	kPa	psi	kPa	psi		kPa	psi	kPa	psi	
0	27.6	4	5.5	0.8		48.3	7	53.8	7.8	1000
1	55.2	8	11	1.6		27.6	4	38.6	5.6	100
2	41.4	6	8.3	1.2		27.6	4	35.9	5.2	100
3	27.6	4	5.5	0.8		27.6	4	33.1	4.8	100
4	13.8	2	2.8	0.4		27.6	4	30.4	4.4	100
5	55.2	8	11	1.6		48.3	7	59.3	8.6	100
6	41.4	6	8.3	1.2		48.6	7	56.9	8.2	100
7	27.6	4	5.5	0.8		48.3	7	53.8	7.8	100
8	13.8	2	2.8	0.4		48.6	7	51.4	7.4	100
9	55.2	8	11	1.6		69	10	80	11.6	100
10	41.4	6	8.3	1.2		69	10	77.3	11.2	100
11	27.6	4	5.5	0.8		69	10	74.5	10.8	100
12	13.8	2	2.8	0.4		69	10	71.8	10.4	100
13	55.2	8	11	1.6		96.6	10	107.6	11.6	100
14	41.4	6	8.3	1.2		96.6	14	104.9	15.2	100
15	27.6	4	5.5	0.8		96.6	14	102.1	14.8	100
16	13.8	2	2.8	0.4		96.6	14	99.4	14.4	100

Fuente: NCHRP (2004).

La norma indica que para suelos finos se debe ensayar solamente la proporción de suelos que pasa la malla no.4 (4,75mm). Para separar este suelo se toma el suelo muestreado se deja secar en bandejas al aire se separan las partículas o cúmulos grandes del suelo y se tamiza. Posteriormente se almacena en baldes sellados hasta que se tengan que generar los especímenes.

Para la construcción de los cilindros se toman las humedades del suelo en balde, siguiendo la norma ASTM D 2216. Conociendo el porcentaje de humedad de la muestra y su humedad óptima se añade la cantidad de agua necesaria, se homogeniza el suelo y se deja reposar en bolsas selladas durante 24 horas antes de la compactación de los especímenes.

A continuación, se detalla los procedimientos para la construcción de los especímenes, acondicionamiento y falla:

Preparación del espécimen y compactación:

Para la construcción del espécimen se emplea un molde como el mostrado en la Figura 13, el cual tiene un diámetro de 70 mm y una altura de 140mm.



Figura 13. Molde para el moldeo de especímenes

El procedimiento para la compactación del material se presenta a continuación:

- 1) Preparar 4000g de suelo y con base a la humedad del mismo se añade la cantidad de agua para alcanzar el óptimo y se deja reposar por 24 horas.
- 2) Preparar el molde de acero como se muestra en la Figura 13, para lo cual se le coloca una membrana de látex, un papel filtro al fondo, se toma el peso del conjunto y posteriormente se le coloca el collarín.
- 3) Mediante una bomba de vacío se aplica succión a la membrana con el fin de ajustarla lo mejor posible al molde y no interfiera en la compactación.
- 4) Se coloca la primera capa de suelo en el fondo del molde (1/7 del suelo en la bandeja) y se le aplican 25 golpes con el mazo de Proctor estándar. Se repite el procedimiento 6 capas más (durante el proceso se debe tapar la bandeja para mantener la humedad del suelo a lo largo de la compactación).
- 5) Al finalizar la compactación, se toma una muestra del suelo restante, para determinar la humedad exacta de compactación.
- 6) Se retira el collarín y se enrasa como se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Enrasado del espécimen de suelo

- 7) Se vuelve a pesar el conjunto (molde, membrana, filtro) con el suelo compactado para determinar por diferencia el peso del mismo. Con este peso y el contenido de humedad se determina la densidad seca y el grado de compactación.
- 8) Se procede a desmoldar el espécimen.

Acondicionamiento de las pastillas:

Para ensayar el suelo a humedad óptima, después de desmoldar la pastilla se realiza inmediatamente el montaje en el equipo de falla, con el paso a paso que se detalla en el apartado siguiente.

Para obtener el M_r del suelo a una humedad diferente se deben seguir los siguientes pasos dependiendo si se quiere ganar o perder humedad.

Humedecimiento de los especímenes:

- 1) Posterior a la compactación y desmolde se toman los especímenes y se llevan a laboratorio con temperatura controlada.
- 2) Se debe tomar el peso del espécimen.
- 3) La membrana de látex se dobla hasta dejar ambas caras del espécimen al descubierto.

- 4) Se colocan las probetas sobre una cama de superficies porosas, en una bandeja la cual se inunda hasta cubrir casi por completo las superficies porosas pero sin llegar al mismo nivel de estas, como se muestra en la Figura 15.



Figura 15. Humedecimiento de los especímenes

- 5) Se debe dar vuelta variando las caras de absorción del espécimen frecuentemente y se realiza el pesaje del mismo para determinar la ganancia de humedad.
- 6) Cuando alcanzan la humedad se almacenan en bolsas herméticas por 24 horas para alcanzar la homogeneidad, y posteriormente se fallan.

Secado de los especímenes:

- 1) Posterior a la compactación si se desea ensayar a un porcentaje de humedad menor a W_{opt} , se coloca el espécimen con la membrana a secar al aire.
- 2) Se toma el peso del espécimen frecuentemente hasta que se llegue al peso esperado.
- 3) Cuando el espécimen alcanza la humedad deseada se almacenan en bolsas herméticas por 24 horas para garantizar la homogeneidad y posteriormente se fallan.

Implementación del ensayo:

Una vez acondicionados los especímenes o ya sea después de la compactación en el caso de falla en humedad óptima, se debe realizar el montaje de los especímenes de la siguiente manera:

- 1) Sobre la placa metálica, base del espécimen durante la falla, se debe colocar una piedra porosa húmeda y un filtro de papel húmedo, preparar de igual forma la placa superior (medir altura del conjunto).
- 2) Se monta el espécimen sobre la estructura anterior y se coloca en la otra cara del espécimen nuevamente un papel filtro y una piedra porosa húmeda y la placa metálica superior.
- 3) Se realizan las mediciones de diámetros y alturas del espécimen (se restan a estas el espesor de la membrana y la altura del conjunto placas con piedras porosas y filtro).
- 4) Se coloca una segunda membrana a las probetas, ya que la primera durante el proceso de compactación o acondicionamiento pudo sufrir fisuras.
- 5) Se coloca en la parte superior e inferior los anillos de hule que se ajustan con las placas metálicas.
- 6) Se coloca el conjunto sobre la base de la cámara triaxial de forma centrada con ayuda de la placa metálica inferior.
- 7) Se cierra la cámara triaxial y se coloca en la maquina universal, se verifica que tenga las conexiones de forma correcta para evitar fugas de aire.
- 8) Se ajustan los LVDT, los medidores de presión y el pistón de carga.

Finalmente, en la interfaz del software, se selecciona el ensayo a realizar, en este caso el de módulo resiliente para subrasante NCHRP 1-28A, se ingresan los datos de falla, peso y dimensiones del espécimen, se verifican todas las condiciones de falla y se procede a dar inicio con la ejecución del ensayo.

Una vez finalizado el ensayo, se retira el espécimen se parte para verificar de forma visual que efectivamente contaba con una distribución homogénea de la humedad y se toman muestras de los extremos y el núcleo para determinar el porcentaje de humedad del espécimen y confirmar homogeneidad.

4.2.3 Resultados

Finca 2 (M 1002-16)

El ensayo de módulo resiliente se realizó para cinco humedades diferentes del suelo, humedad óptima (W_{opt}), el primer porcentaje de humedad sobre el óptimo (PH1), el segundo porcentaje de humedad sobre el óptimo (PH2), primer porcentaje bajo la humedad óptima (PS1) y un segundo porcentaje por debajo el óptimo (PS2). Se ensayaron dos especímenes por humedad. En el Apéndice IV, se muestran los resultados (σ_{conf} , σ_d , M_r) obtenidos para cada espécimen, así como el promedio de los datos para los especímenes ensayados en el mismo punto de humedad y la desviación estándar asociada.

En la Figura 16, se muestran la variación del valor de M_r , ponderado de los dos especímenes ensayados por punto, en función de las secuencias del ensayo, para todas las humedades ensayadas del suelo de Finca 2. Podemos observar como a menores porcentajes de humedad el valor de módulo incrementa considerablemente, en algunos casos hasta el doble, en comparación a los obtenidos en óptimo. Sin embargo, la curva PS1 con un 29,1% de humedad aproximadamente 5,4% por debajo del óptimo es la que presenta los valores mayores de M_r , entre los 140 MPa y los 100 MPa, cuando el suelo se llevó a una condición más seca, PS2 a 26,4%W con menos 8% de humedad respecto al óptimo, su capacidad cayó disminuyendo los valores de M_r entre 90 MPa y 70 MPa.

Cuando la humedad aumenta los valores M_r disminuyen, mientras que en humedad óptima el M_r se mantiene entre los 70 MPa y los 30 MPa, para contenidos de agua mayores (PH1 36%W tan solo un 1,5% sobre W_{opt} y PH2 de 37,1%W un 2,6% sobre W_{opt}), el valor de M_r disminuye a valores entre los 20 MPa y los 10 MPa, según el estado de esfuerzos. La diferencia entre la capacidad del suelo en PH1 y PH2 no es tan marcada, aproximadamente 5 MPa, esto se debe a que el suelo ya se encuentra a más de un 90% de saturación y el comportamiento del mismo a porcentajes tan altos no tiende a variar significativamente.

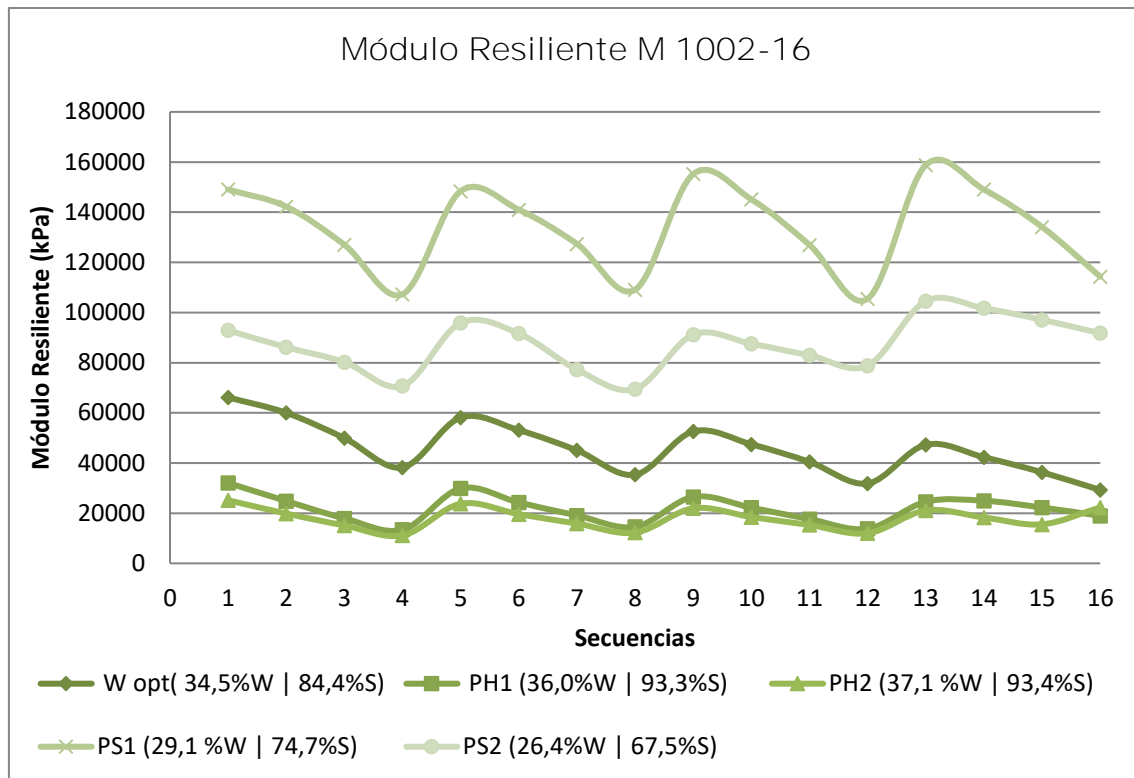


Figura 16. Comparación de los valores de módulo resiliente para las diferentes humedades de la muestra M 1002-16

Empalme (M-1189-18)

El suelo el empalme fue ensayado también a cinco porcentajes de humedad diferentes, (Wopt, PH1, PH2, PS1, y PS2) con dos especímenes por porcentaje. En el Apéndice IV, se encuentran los datos obtenidos de Mr para cada espécimen, así como la ponderación de los datos para los especímenes en condiciones similares.

En la Figura 17, se muestra la comparación de los módulos para el suelo del Empalme en las cinco condiciones de humedad distintas. Este suelo muestra una brecha grande entre el comportamiento a humedad óptima y a humedades más secas con hasta 50 MPa más. En estado de humedad óptima se presentan valores de Mr entre los 80 MPa y los 50 MPa según el estado de esfuerzos aplicados, reduciendo la humedad aproximadamente un 5,5% por debajo del óptimo incrementa su Mr por encima de los 140 MPa. Cuando se reduce la humedad incluso a más de un 10% bajo el óptimo el suelo parece mantener un comportamiento muy similar, incluso con valores por debajo de los obtenidos en el PS1, por lo cual se puede considerar que en condiciones más secas no continúe incrementado su capacidad.

En humedades mayores al óptimo (PH1 a 44,7%W un 6,3% sobre Wopt y PH2 a 47%W a 8,6% sobre Wopt) disminuye su capacidad en algunos casos hasta en 20 MPa por debajo de los registrados en condiciones óptimas.

Los especímenes ensayados húmedos presentan un comportamiento no tan diferenciado entre ellos, ya que ambos se encuentran muy cerca de la saturación y la respuesta del suelo en estas condiciones es de esperar que presenten un comportamiento muy similar.

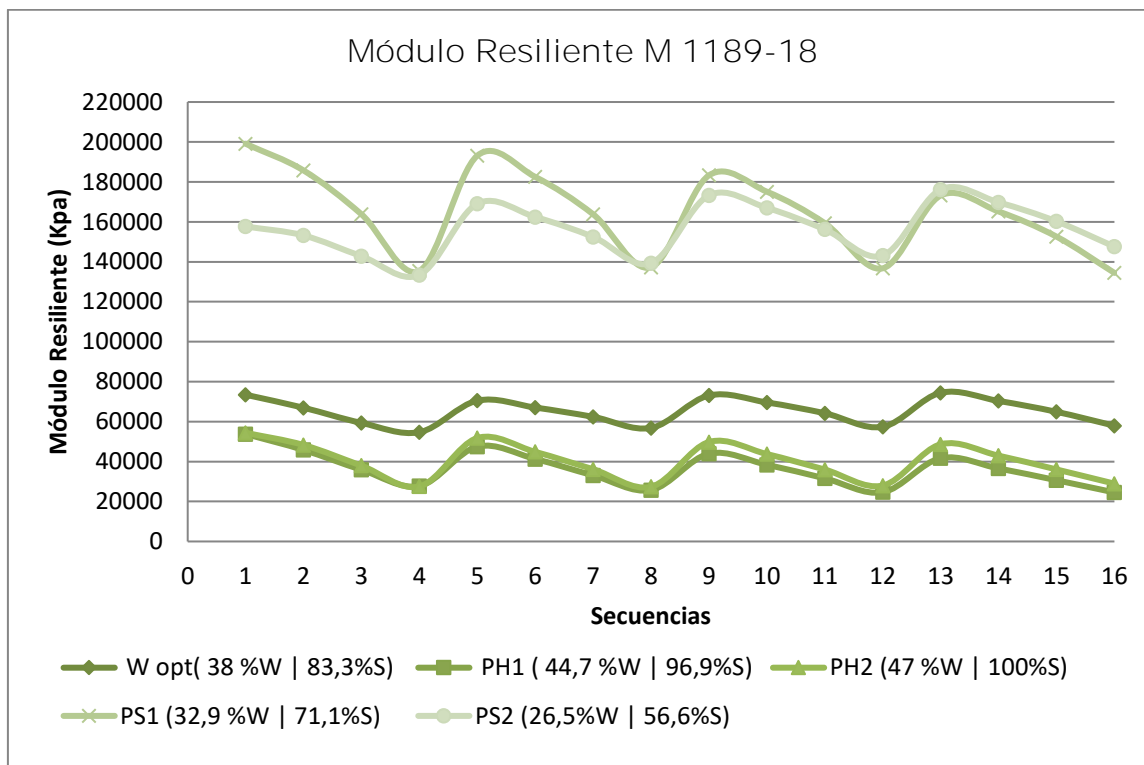


Figura 17. Comparación de los valores de módulo resiliente para las diferentes humedades de la muestra M 1189-18

Montes de Oro (M 1397-18)

Para Montes de Oro se ensayaron, de igual manera, dos especímenes por cada porcentaje de humedad y cinco puntos de humedad diferentes, dos en humedad óptima, dos sobre el óptimo, dos por debajo (Wopt, PH1, PH2, PS1 y PS2). Se muestra en el Apéndice IV, los resultados obtenidos en el ensayo para todos los especímenes.

Los valores promedio de módulo en función de su secuencia para las diferentes humedades se muestran en la Figura 18, las dos curvas superiores representan a los valores de Mr para las condiciones más secas, este suelo igual que Finca 2, para PS2 (21,7% W) que se

encuentra con un porcentaje menor de humedad que PS1 (26,7%W) presenta menores valores de Mr, lo que implica una caída de la resistencia para condiciones más secas.

En condiciones óptimas el Mr se encuentra entre los 70 MPa y los 40 MPa, para el PH1 a 37,7%W un 4,7% por debajo del contenido de humedad óptima, los valores de Mr disminuyen en aproximadamente 10 MPa respecto al anterior, para el PH2 a una humedad de 41,1% W con un 8,1% sobre Wopt los valores de Mr disminuyen entre 20 MPa y 30 MPa respecto a los valores de Mr en Wopt.

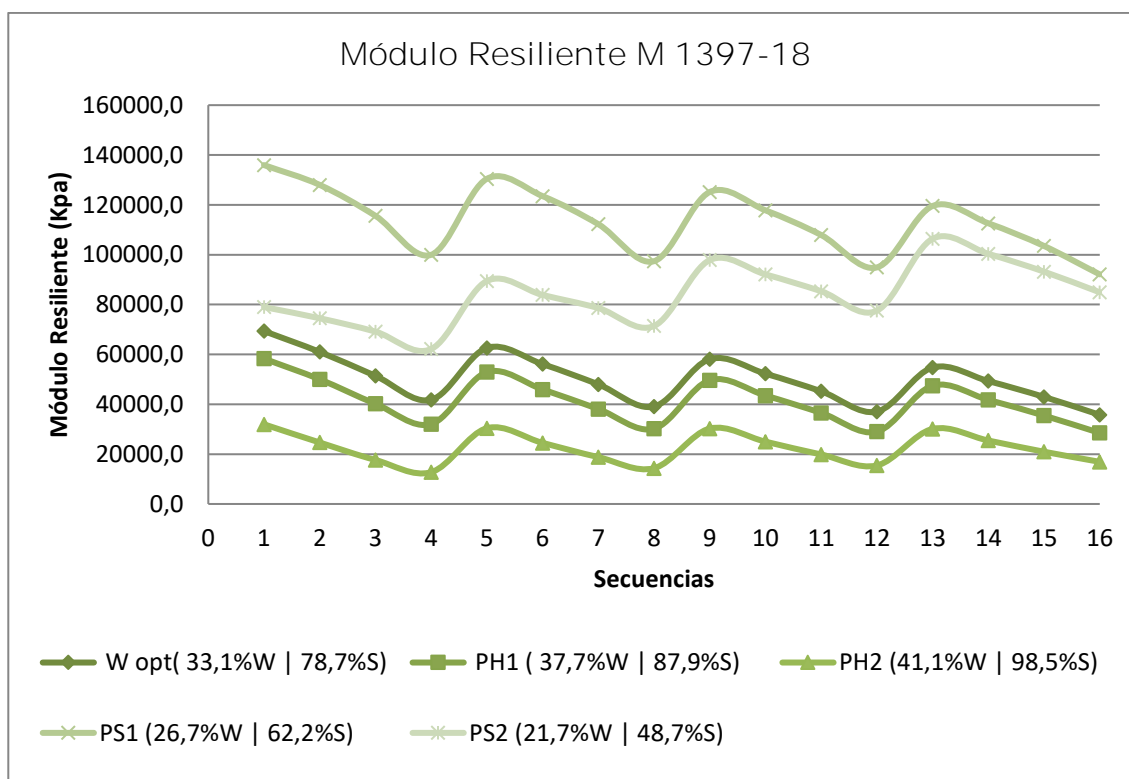


Figura 18. Comparación de los valores de módulo resiliente para las diferentes humedades de la muestra M 1397-18

En los tres suelos podemos observar la dependencia del módulo resiliente con el estado de esfuerzos. Como se mostró en el Cuadro 13, el ensayo aplica cuatro estados de confinamiento diferentes y cuatro esfuerzos desviadores diferentes.

En las primeras cuatro secuencias mantiene el esfuerzo desviador y varía los esfuerzos de confinamiento del más alto al más bajo, por tanto, a menor confinamiento y un mismo esfuerzo desviador el módulo de resiliencia disminuyó, reflejado en la caída de la primera sección de la curva. De la quinta secuencia a la octava, se vuelve a iniciar con los esfuerzos de confinamiento del mayor a menor, pero esta vez aplicando un esfuerzo desviador mayor,

lo que genera M_r menores que los de las cuatro secuencias anteriores, por lo cual esta sección de la curva tiende a desplazarse hacia abajo. Lo mismo sucede en las siguientes cuatro secuencias de la 9 a la 12 y de la 13 a la 16, variando los esfuerzos confinantes y aumentando el esfuerzo desviador dos veces más

4.3 Deflectometría de impacto LWD

Los ensayos de deflectometría se realizaron en la fosa del Laboratorio del HVS LanammeUCR.

4.3.1 Generalidades y equipo

El deflectómetro de impacto liviano (LWD) mostrado en la Figura 19, es un equipo portátil diseñado para realizar mediciones de deflectometría en sitio. Se puede usar en materiales granulares de base, subbases y en los materiales cohesivos de subrasante.

El equipo consiste en un peso que se deja caer a través de una guía sobre el sistema de amortiguamiento; estos son parte del dispositivo generador de carga, además cuenta con sensores y un sistema de transmisión de datos. Este dispositivo debe convertir la fuerza de una masa cayendo de tal forma que se logre un pulso de carga haversiano, lo que se logra con el sistema de amortiguamiento entre el plato de carga y el peso. El peso utilizado debe ser diseñado para minimizar el efecto de la fricción con la guía y comúnmente se utilizan pesas de 10 kg, 15 kg y 20 kg y platos de carga de 300mm, 200mm o 150mm (Chaves, 2017).



Figura 19. Deflectómetro de Impacto Liviano

Para determinar las dimensiones de las calicatas en las cuales se ensayarían las muestras de suelo se realizó un análisis en 3D-Move para determinar el bulbo de esfuerzos causado

por la carga y determinar la distancia a la cual, desde el punto de aplicación de la carga, los esfuerzos dejan de ser significativos.

Para obtener el bulbo se consideró las condiciones más críticas del ensayo, las cuales consistían en aplicar la mayor carga del equipo 20 kg sobre el plato de menor diámetro 150 mm y considerar estos valores en el programa como los datos de presión y diámetro de llanta respectivamente, se consideró un valor típico de M_r de 70 MPa.

En Cuadro 14, se muestran los resultados de los esfuerzos principales en (psi) a cada 50mm aproximadamente. Los valores de Z corresponden a profundidad y en X la distancia horizontal a partir del borde de la llanta, donde se dan las mayores concentraciones de esfuerzo.

Cuadro 14. Variación de los esfuerzos principales (psi) en el suelo con la profundidad y distancia del punto de aplicación de carga

Distancias Z/X (m)	0,075	0,126	0,177	0,227	0,278	0,329
0,00	1,21E+02	1,20E+02	-5,24E-01	-8,06E-02	-3,11E-02	-1,51E-02
0,05	9,93E+01	7,73E+01	1,77E+01	2,33E+00	4,88E-01	1,48E-01
0,10	5,77E+01	4,53E+01	2,09E+01	6,87E+00	2,26E+00	8,45E-01
0,15	3,34E+01	2,82E+01	1,74E+01	8,55E+00	3,88E+00	1,79E+00
0,20	2,10E+01	1,87E+01	1,35E+01	8,25E+00	4,62E+00	2,52E+00
0,25	1,42E+01	1,31E+01	1,03E+01	7,24E+00	4,68E+00	2,90E+00
0,30	1,02E+01	9,57E+00	8,04E+00	6,15E+00	4,38E+00	2,98E+00
0,36	7,61E+00	7,27E+00	6,36E+00	5,16E+00	3,94E+00	2,89E+00
0,41	5,90E+00	5,69E+00	5,13E+00	4,34E+00	3,49E+00	2,70E+00
0,46	4,70E+00	4,57E+00	4,20E+00	3,66E+00	3,06E+00	2,47E+00
0,51	3,83E+00	3,74E+00	3,49E+00	3,12E+00	2,69E+00	2,24E+00
0,56	3,18E+00	3,12E+00	2,94E+00	2,68E+00	2,36E+00	2,02E+00

En el cuadro anterior, se puede observar en verde el valor mayor de esfuerzo y como este empieza disminuir con la profundidad y la distancia. Para determinar hasta qué punto se presentan esfuerzos significativos, se consideró que a partir de los esfuerzos que representan menos del 5% del esfuerzo mayor no es necesario preocuparse por la influencia que estos puedan producir en el suelo. En el Cuadro 15, se presenta la comparación en porcentajes de los esfuerzos respecto al esfuerzo mayor en el punto de aplicación de la carga.

Cuadro 15. Disminución de los esfuerzos en porcentajes respecto al esfuerzo mayor

Distancias Z/X (m)	0,075	0,126	0,177	0,227	0,278	0,329
0,00	100,00%	99,73%	-0,43%	-0,07%	-0,03%	-0,01%
0,05	82,26%	64,06%	14,68%	1,93%	0,40%	0,12%
0,10	47,81%	37,50%	17,31%	5,69%	1,87%	0,70%
0,15	27,71%	23,40%	14,39%	7,09%	3,21%	1,48%
0,20	17,40%	15,50%	11,15%	6,83%	3,83%	2,09%
0,25	11,76%	10,84%	8,57%	6,00%	3,87%	2,40%
0,30	8,42%	7,93%	6,66%	5,09%	3,63%	2,47%
0,36	6,31%	6,02%	5,27%	4,28%	3,27%	2,39%
0,41	4,89%	4,72%	4,25%	3,59%	2,89%	2,23%
0,46	3,90%	3,79%	3,48%	3,04%	2,54%	2,05%
0,51	3,18%	3,10%	2,89%	2,59%	2,22%	1,86%
0,56	2,64%	2,59%	2,44%	2,22%	1,95%	1,67%

Podemos observar en el cuadro como a partir de una profundidad de 410mm los esfuerzos representan menos de un 5% del valor inicial, y a una distancia horizontal de 278mm los esfuerzos representan un porcentaje muy bajo del esfuerzo mayor, por tanto, se determina que las dimensiones de las muestras a las cuales se les realizará en ensayo de LWD serán de 450x450x450 mm. En la Figura 20 y en la Figura 21, se puede observar la variación de esfuerzos en función de la profundidad y de la distancia al punto de aplicación de carga respectivamente.

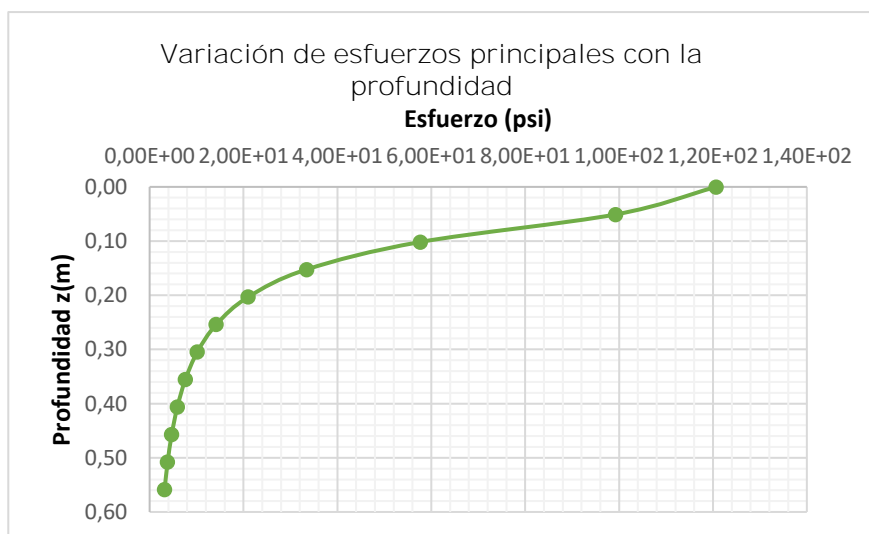


Figura 20. Variación de esfuerzos principales con la profundidad

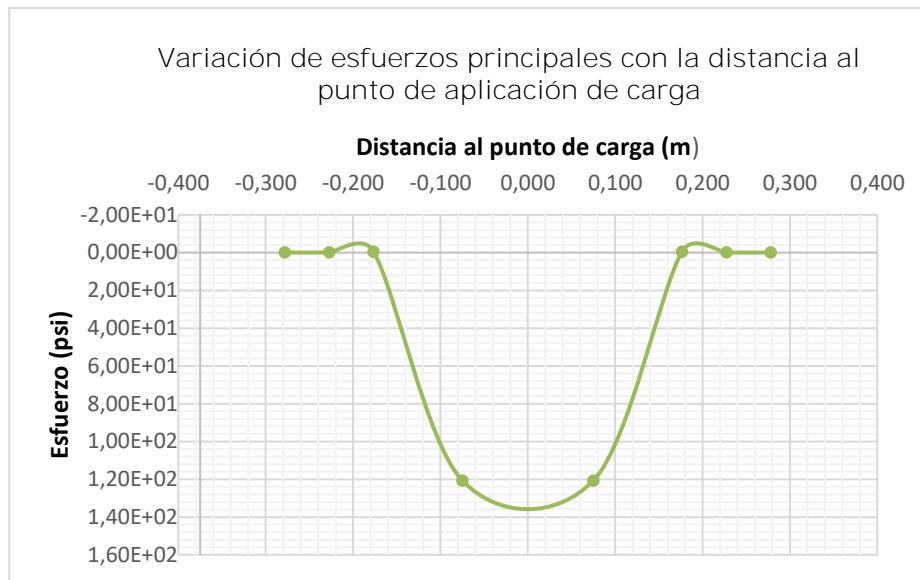


Figura 21. Variación de esfuerzos principales con la distancia al punto de aplicación de carga

4.3.2 Protocolo de ensayo

Para la realización de este ensayo se realizaron calicatas de 45x45x45 cm directamente sobre el suelo de la fosa del laboratorio de escala natural. Posteriormente, fueron sustituidas por los suelos en estudio como se muestra en la Figura 22. La compactación se realizó con un martillo Hilti serie TE 905 AVR y una pata metálica cuadrada diseñada por Alfaro (2015).



Figura 22. Construcción de calicatas y sustitución con suelo

La compactación se realizó en varias capas, de no más de 10 cm y al finalizar se verificó su compactación con un densímetro nuclear como se muestra en la Figura 23.



Figura 23. Verificación de compactación con densímetro

Posterior a la verificación de la densidad se procedió a realizar el ensayo, como se muestra en la Figura 24, usando una carga de 10 kg y posteriormente de 15 kg en ambos casos se usó el plato de 300mm, el ensayo se realizó durante cinco días para obtener valores a diferentes humedades. Para la realización de este ensayo se debe seguir la norma ASTM E2583.



Figura 24. Ejecución del ensayo LWD

A continuación, se describe el procedimiento a seguir para la realización del ensayo:

- 1) Una vez compactada la calicata se debe enrasar la superficie o asegurarse que se encuentre completamente plana y uniforme.
- 2) Colocar la base de hule sobre la cual se coloca el equipo del LWD y verificar que no quede inestable.

- 3) Conectar vía bluetooth la computadora de mano al equipo.
- 4) Colocar el peso a la altura deseada y sujetar con el mecanismo de liberación.
- 5) Liberar el mecanismo y dejar caer el peso libremente.
- 6) Las primeras tres caídas son de acondicionamiento por lo cual estos valores no se deben registrar, posterior a estas se realizan tres caídas más de las cuales se obtiene finalmente los valores.
- 7) Al terminar la ejecución del ensayo para los dos pesos de 10 kg y 15kg, se toman muestras de humedad de las calicatas. Las muestras de humedad se realizaron con una probeta de perforación, de la cual se sacaban pajillas de muestra de suelo que se llevaban al horno, en la Figura 25, se observa el equipo y la toma de muestra de humedad de las calicatas.



Figura 25. Toma de muestras de humedad de las calicatas

4.3.3 Resultados

En el Apéndice V, se muestran todos los datos generados por ensayo de LWD para los tres suelos en estudio. A continuación, en el Cuadro 16, se presentan el promedio de las tres caídas registradas por punto para cada suelo, así como el día de realización del ensayo y el porcentaje de humedad medido.

Se puede observar en los datos que la variación de humedad de los ensayos no se dio de manera uniforme dado que, por las condiciones de humedad de la fosa, las calicatas tendieron a equilibrar su humedad después de la compactación y en los días posteriores a esta no se presentó una variación significativa de humedad y la deformación registrada es

similar. Por tanto, para el análisis de los datos se considerarán el promedio de los datos obtenidos en los días que presentan un comportamiento semejante, en el cuadro siguiente se resaltan los datos usados.

Cuadro 16. Resultados de LWD para los tres suelos en estudio

Suelo	Caída	Día	% W	Radio (mm)	Carga (KN)	Esfuerzo (kPa)	Def (Micron)	Eo (MPa)
M 1002-16	10 kg	1	41,3	150	4,2	59,7	956,0	15,0
		2	34,7	150	4,3	60,0	557,0	26,0
		3	33,0	150	4,1	58,0	566,7	24,3
		4	33,9	150	4,2	59,0	496,0	28,0
		5	34,6	150	4,1	58,0	258,0	54,0
	15 kg	1	41,3	150	5,7	81,0	1309,0	15,0
		2	34,7	150	5,9	83,0	835,7	24,0
		3	33,0	150	5,8	82,0	857,3	23,0
		4	33,9	150	5,8	82,0	752,3	26,0
		5	34,6	150	5,9	82,9	427,0	51,3
M 1189-18	10 kg	1	51,1	150	4,3	60,3	1437,7	10,0
		2	49,4	150	4,4	62,7	434,7	34,3
		3	46,9	150	4,1	58,3	322,7	43,0
		4	44,6	150	4,2	59,0	308,0	46,0
		5	45,1	150	4,2	59,0	333,3	42,0
	15 kg	1	51,1	150	5,8	82,0	1263,3	15,3
		2	49,4	150	5,9	83,7	678,3	29,3
		3	46,9	150	5,9	84,0	510,0	39,0
		4	44,6	150	5,9	84,0	489,7	41,0
		5	45,1	150	5,9	83,3	507,0	39,7
M 1397-18	10 kg	1	33,6	150	4,4	61,7	259,7	56,7
		2	35,3	150	4,5	64,3	219,7	70,0
		3	35,0	150	4,2	59,0	225,0	63,0
		4	34,0	150	4,1	58,7	205,7	68,3
		5	33,9	150	4,2	59,0	305,7	46,0
	15 kg	1	33,6	150	6,0	85,0	401,3	51,0
		2	35,3	150	6,1	86,0	327,7	62,7
		3	35,0	150	6,0	84,7	340,0	59,3
		4	34,0	150	5,9	83,0	318,3	62,7
		5	33,9	150	5,9	84,0	452,7	44,0

V. Análisis de resultados

5.1 Calibración de modelo Mr

Para determinar si los resultados obtenidos de los ensayos de Mr son aceptables y para tener un mejor ajuste de los datos, se procede a calcular el valor de Mr de cada entrada de datos mediante una regresión lineal de mínimos cuadrados, con el modelo que mejor se ajusta a los datos, el cual es el Modelo Universal (MU) de Witczak y Uzan (1988).

En el Apéndice VI, se muestran las calibraciones del MU para cada conjunto de datos (los dos especímenes en cada porcentaje de humedad).

Para el suelo M 1002-16, el modelo brinda un ajuste adecuado de los datos en la mayoría de los casos, sin embargo, el PS1 es único que presenta valores de R² bajos, debido a que como se observó en los gráficos de Mr en función de la secuencia para este porcentaje en el Apéndice VI, los especímenes presentaron un comportamiento casi idéntico, pero con una desviación mayor que los demás porcentajes.

El MU en este caso presenta una mejor predicción para Mr en condiciones húmedas y óptimas donde se presentan valores de Mr menores a 100 MPa que en condiciones secas donde el Mr tiende a incrementar.

Una vez observado el ajuste de estos datos al modelo universal se procedió a ajustar la totalidad de los datos, incorporando la variación de humedad en el modelo como se muestra a continuación:

$$M_r = k_1 P a \left(\frac{\theta}{P a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P a} + 1 \right)^{k_3} \left(\frac{w}{w_{opt}} \right)^{k_4} \quad (2)$$

Donde W representa la humedad del espécimen y W opt la humedad óptima del suelo, de modo que el resultado de $\left(\frac{w}{w_{opt}} \right)^{k_4}$ castigue o incremente el valor de Mr, ya que el modelo fue generado para suelo en condiciones óptimas.

A continuación; se muestran las calibraciones para los tres suelos:

Finca 2 (M 1002-16)

Realizando la regresión lineal para este modelo (Cuadro A- 33), para todos los datos obtenidos de los ensayos y considerando la humedad de falla, se obtienen los parámetros

mostrados en el Cuadro 17 y en la Figura 26 se muestra el ajuste de los datos obtenidos en el laboratorio contra el predicho con el modelo .

Cuadro 17. Resultados de la RL del MU para Mr con humedad variable del suelo M1002-16

Parámetros		Estadístico t	Valor p	R ²
k1	349,379	88,25	9,08E-114	0,897
k2	0,594	7,88	1,46E-12	
k3	-1,228	-4,20	5,00E-05	
k4	-8,232	-32,38	2,40E-62	

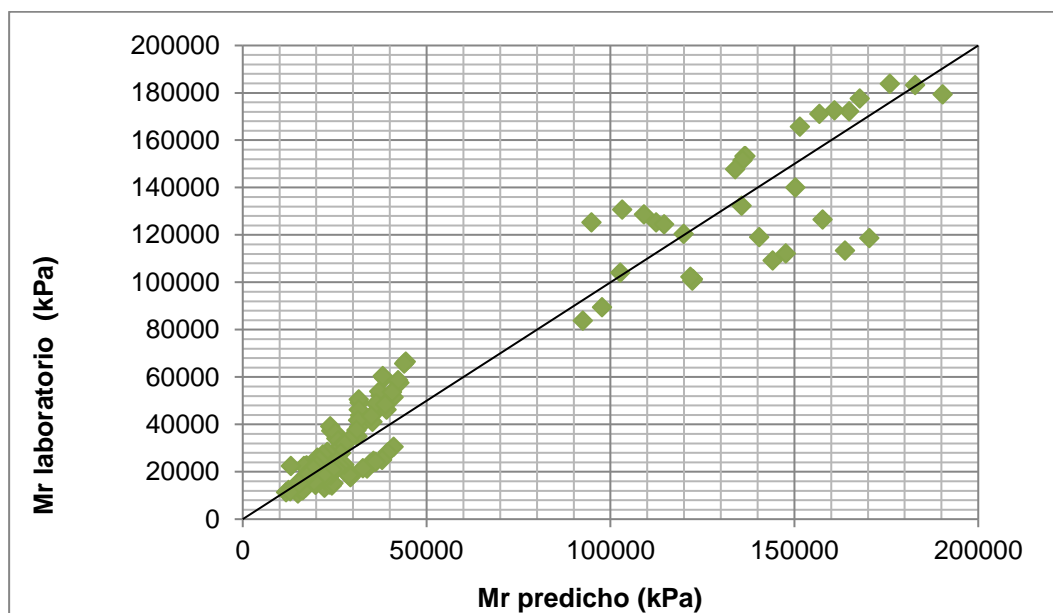


Figura 26. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1002-16 a diferentes humedades.

Empalme (M 1189-18)

Para el suelo del Empalme se realizó de igual manera, para los cinco porcentajes de humedad, el análisis mediante regresión lineal para el MU. Los parámetros obtenidos de cada regresión se detallan en el Apéndice VI. Este modelo se ajusta a la mayoría de los datos y para todos los casos se presenta homocedasticidad en los datos.

Al igual que en el suelo anterior se realizó el ajuste de todos los datos del modelo con la ecuación (2), en el Cuadro 18 se puede observar el resumen de los resultados de la RL y podemos observar en la Figura 27 la predicción de datos respecto al medido en el laboratorio.

Cuadro 18. Resultados de la RL del MU para Mr con humedad variable del suelo M1189-18

Parámetros		Estadístico t	Valor p	R ²
k1	793,362	129,10	4,93E-134	0,896
k2	0,532	9,11	1,74E-15	
k3	-1,248	-5,55	1,68E-07	
k4	-4,113	-31,73	2,33E-61	

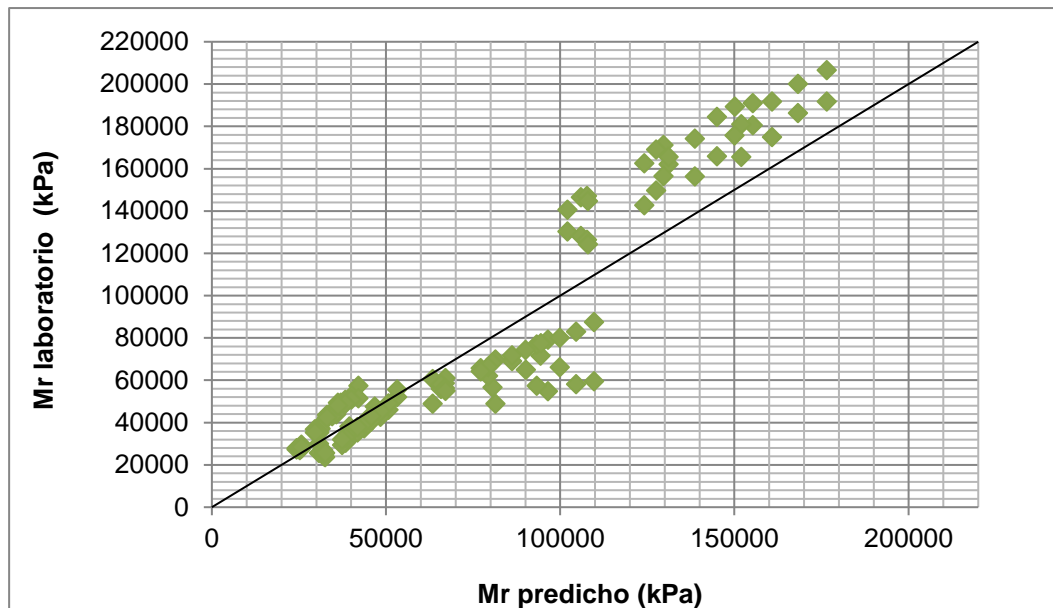


Figura 27. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1189-18 a diferentes humedades.

El modelo, igual que en el caso anterior, predice con mayor exactitud los valores más bajos de Mr, para los ensayos en humedades más secas donde el valor de Mr tiende a subir genera predicciones menos exactas.

Montes de Oro (M 1397-18)

Los ajustes de Mr con MU para el suelo de Montes de Oro, para cada porcentaje de humedad, se muestran en el Apéndice IV, este suelo igual que los anteriores presenta un buen ajuste al MU generando una buena predicción de Mr. Para cuatro porcentajes de humedad se presentaron valores de R² mayor a 0,9; el porcentaje PS1 es el único que no muestra un buen ajuste de los datos para los dos especímenes ensayados, ya que como se observa en la Figura A- 23, los especímenes desplegaron durante la realización una diferencia de Mr más marcada entre ellos que el resto, lo que se puede deber a la pequeña

variación de humedad entre ellos, sin embargo, ambos tienen una tendencia muy similar en los datos y parecen ajustarse de manera individual al modelo.

Para determinar el comportamiento del M_r este suelo a diferentes humedades, al igual que los suelos anteriores, se realizó el ajuste de datos usando la ecuación (2). En el Cuadro 19, se muestra los parámetros obtenidos de la regresión lineal y en la Figura 28, los valores de M_r predicho por el modelo contra los valores medidos en el laboratorio.

Cuadro 19. Resultados de la RL del MU para M_r con humedad variable del suelo M 1397-18

Parámetros		Estadístico t	Valor p	R^2
k1	583,682	152,23	7,50E-143	
k2	0,610	12,86	1,43E-24	
k3	-1,488	-8,15	3,39E-13	
k4	-3,541	-38,81	3,15E-71	

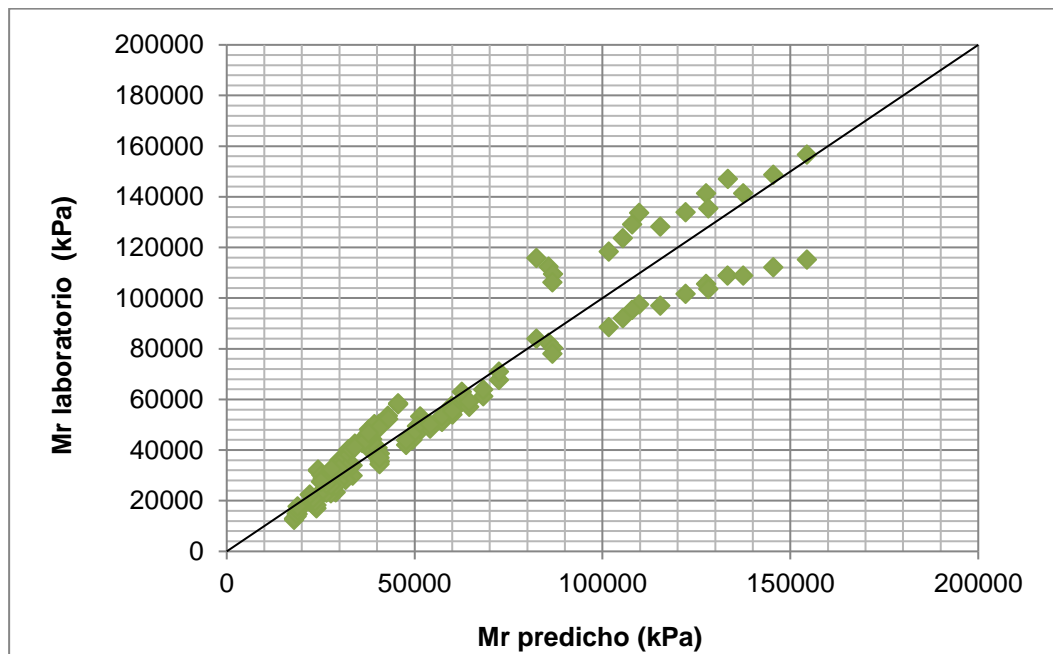


Figura 28. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1397-18 a PS2.

Este suelo es el que presenta para el MU una mejor predicción de los datos, con una correlación lineal ajustada mayor. Los tres modelos, así como el ajuste para cada porcentaje de humedad en el Apéndice IV, se realizaron con los datos de los dos especímenes por porcentaje y no con valor promedio de ambos, lo que genera una mayor dispersión de los

datos ya que para un mismo estado de esfuerzo y una humedad similar se tienen en algunos casos datos de M_r no tan exactos, debido a los errores asociados al ensayo.

Dado que los tres suelos corresponden a limos y presentan características similares se decide proponer la calibración de un modelo global que considere además de las condiciones de humedad las características de cada suelo como es la plasticidad ya que es una de las propiedades más influyentes en su comportamiento mecánico.

En suelos finos se espera que a un mayor esfuerzo desviador el suelo responda con un menor módulo resiliente (stress-softening) y la plasticidad de los suelos afecta directamente esta propiedad (Chaves, 2017).

Para incluir estas variaciones de consistencia y humedad de los tres suelos y su efecto en los valores de módulo obtenido, se decidió utilizar en el modelo el índice de liquidez, definido de la siguiente manera por Das (2014):

$$IL = \frac{w-LP}{IP} \quad (3)$$

Donde:

W= contenido de humedad

LP=Límite Plástico

IP= Índice de plasticidad

Este índice es un indicador de la consistencia del suelo y muestra en una escala de 0-1 el estado plástico del suelo. Valores mayores a 1 indican que el suelo se encuentra en el estado líquido y valores menores a 0 indican que el suelo se encuentra en un estado semiplástico o sólido (Das, 2014).

Al comparar los valores de IL de cada suelo en función de M_r (Figura 29), se muestra una correlación entre las dos variables y se observó en todos los casos un comportamiento exponencial.

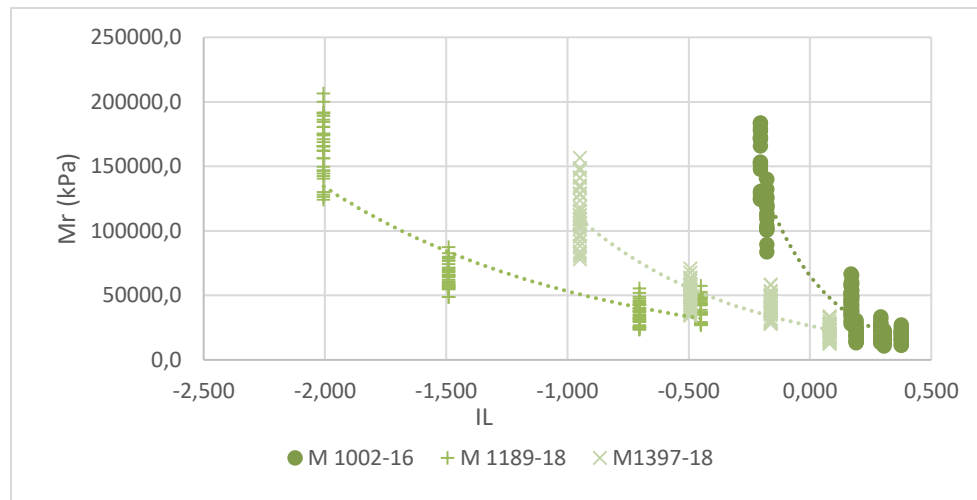


Figura 29. Índice de liquidez en función del Mr

Por tanto, considerado que el MU se ajustaba a cada suelo, el mismo se modificó como se muestra a continuación:

$$M_r = k_1 Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{k_3} \left(\frac{w}{w_{opt}} \right)^{k_4} \left(e^{\left(\frac{w-LP}{IP} \right)} \right)^{k_4} \quad (4)$$

En el Cuadro 20, se observan los parámetros generados de la regresión lineal de los datos de todos los suelos para el modelo de la ecuación (4), en la Figura 30 se observa el ajuste de los datos Mr predicho contra los generados en los ensayos.

Cuadro 20. Resultados de la RL para el modelo global.

Parámetros		Estadístico t	Valor p	R ²
k1	445,929	122,44	7,83E-307	0,794
k2	0,577	10,63	2,83E-23	
k3	-1,343	-6,41	4,34E-10	
k4	-3,037	-21,89	2,96E-69	
k5	-0,452	-16,33	9,12E-46	

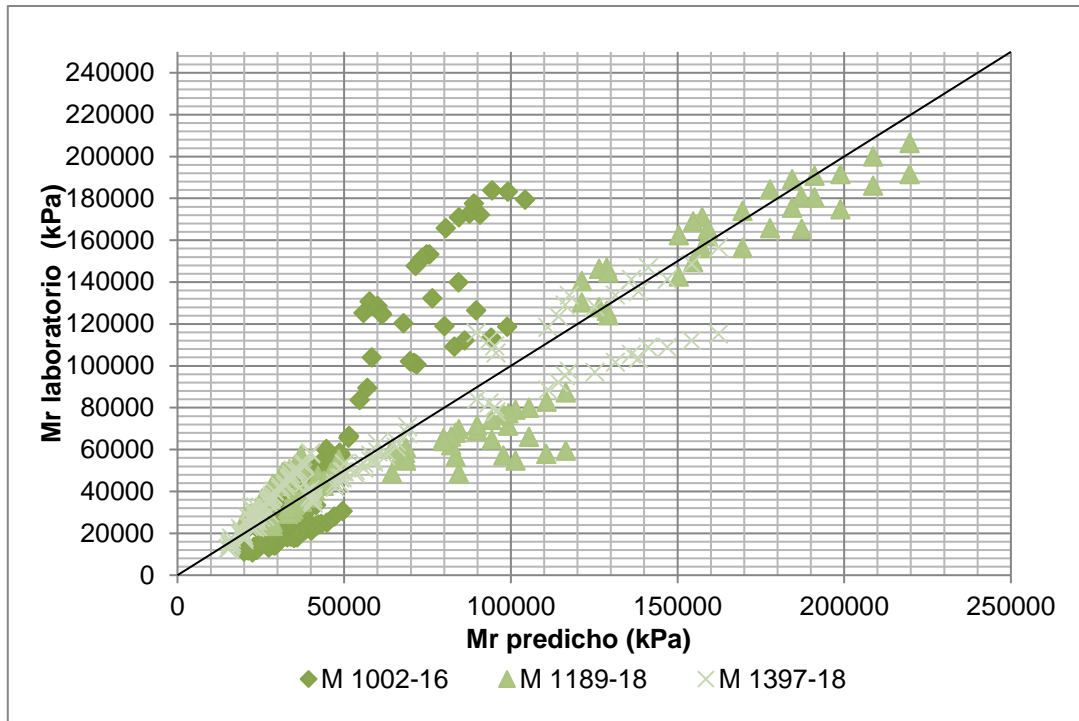


Figura 30. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el Modelo global para los tres suelo

En el ajuste de los datos se observa como tiende a distribuirse a lo largo de la línea de mejor ajuste, para los suelos de M 189,18 y M 1397-18 se da una predicción mejor de los valores, en el caso de M 1002-16 parece no ajustar bien los datos para los Mr más altos correspondientes al caso seco.

Para la calibración de los modelos de los tres suelos y el modelo global no se consideraron los valores de Mr obtenido de los especímenes en el porcentaje de humedad más seca (PS2), debido que registraron valores de Mr inferiores al obtenido de los especímenes en PS1. Al contar con solo estos dos porcentajes de humedad en el lado seco no se puede determinar de forma exacta el porcentaje en el cual se da un punto de inflexión en los valores de Mr, por tanto, no se pueden calibrar ecuaciones que logren predecir de forma adecuada el comportamiento del Mr en estas condiciones más secas. En las siguientes figuras se muestra el comportamiento Mr vs humedad, el cual es muy similar en los tres suelos.

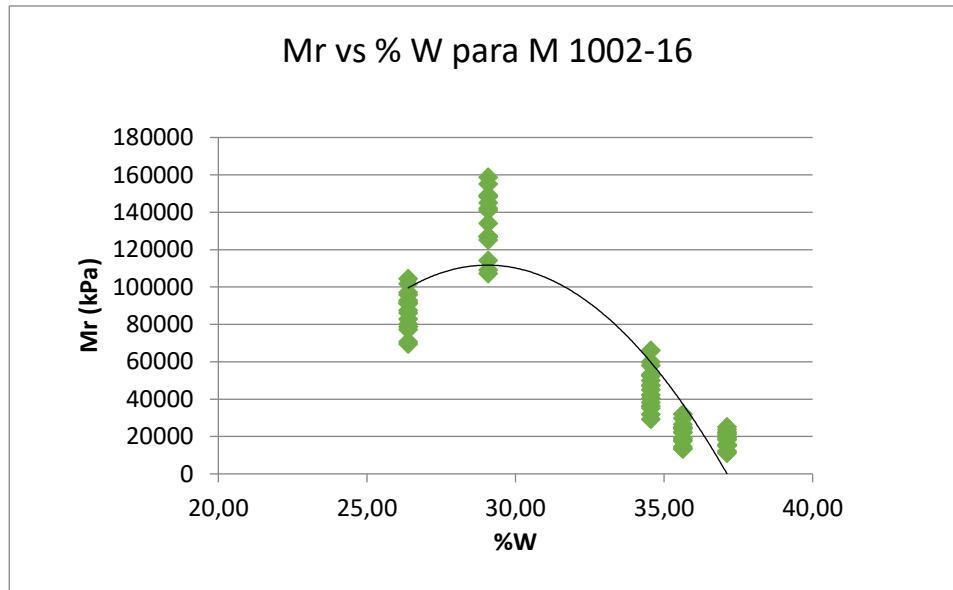


Figura 31. Módulo resiliente contra humedad M 1002-16

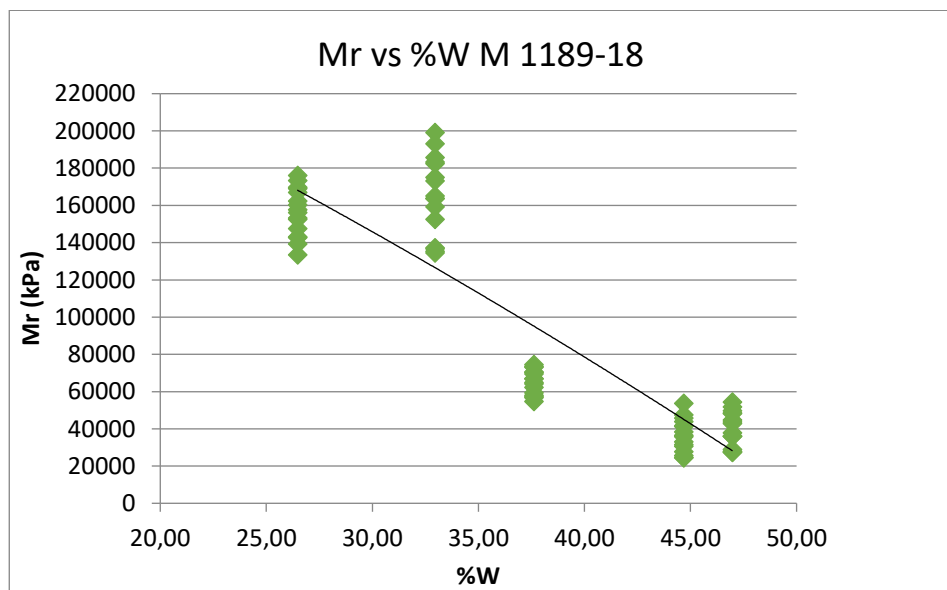


Figura 32. Módulo resiliente contra humedad M 1189-18

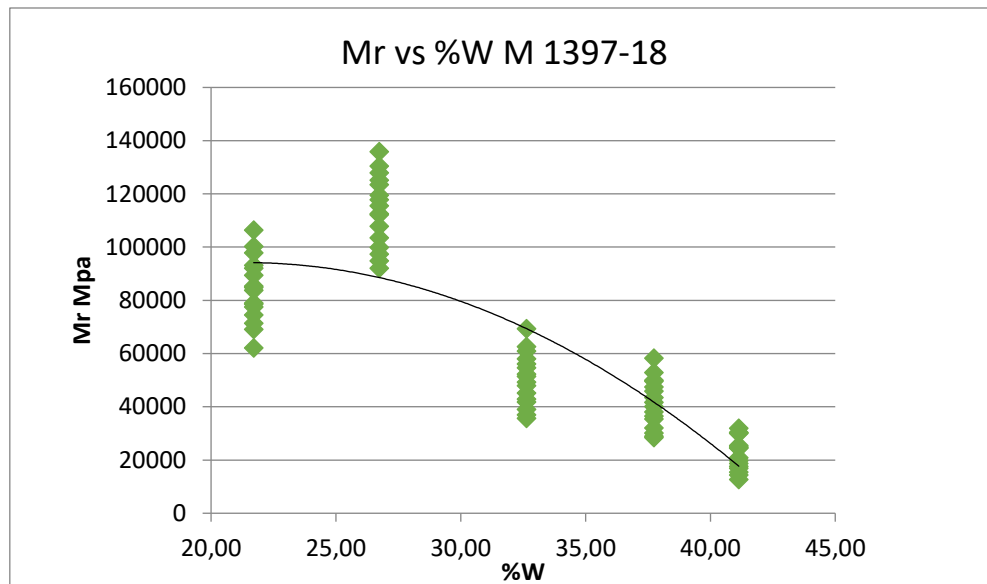


Figura 33. Módulo resiliente contra humedad M 1189-18

Es de esperar que los valores de módulo para condiciones más secas aumenten, pero no de forma infinita. Por lo cual, se espera al igual que en condiciones húmedas que al alcanzar un porcentaje de humedad dado, el comportamiento del módulo tienda a ser constante. Sin embargo, se observa en los casos anteriores que el valor de Mr tiende a caer en condiciones muy secas.

Estas caídas de módulo se pueden deber a la interacción que se da entre las partículas, ya que el comportamiento mecánico de los suelos cohesivos está regido por los efectos electroquímicos en la superficie y las partículas tienden a juntarse por la interacción agua/partícula y en condiciones muy secas esta interacción disminuye y desaparece, lo que puede llevar a los especímenes a no comportarse como un conjunto de partículas si no a reaccionar ante las cargas de forma individual y generar por tanto un comportamiento diferente ante las cargas.

Se observa en los gráficos anteriores que los suelos con una plasticidad mayor, M1002-16 y M 1397-18, presentaron una caída en modulo mayor, en comparación con el suelo M 1189-18, que presenta una caída no tan marcada. A su vez, los dos suelos anteriores con mayor caída presentan el mayor porcentaje de finos, lo que podría implicar una perdida mayor en la interacción de las partículas finas.

5.1 Correlación de datos y factores de ajuste.

En el diseño de pavimentos el parámetro de módulo de la subrasante es fundamental, el mismo se suele obtener de diferentes maneras según el grado de precisión que se quiera en los diseños. Comúnmente, por su facilidad y bajo costo el ensayo realizado para determinar este parámetro es el CBR, el cual mediante correlaciones ya existentes genera valores de M_r , en otros casos el ensayo empleado también por su facilidad es el de LWD.

Con el fin de comparar y determinar las diferencias de los parámetros determinados mediante estos dos ensayos y los obtenidos del ensayo de M_r en la cámara triaxial, que corresponde al mayor nivel precisión en el diseño, se realiza en el apartado siguiente correlaciones entre los datos, que consideran además las pérdida o ganancia de capacidad del material por variaciones en la humedad.

5.1.1 Correlación de los datos de LWD con los modelos de M_r .

El ensayo de LWD se realizó empleando pesas de 10 kg y 15 kg, lo que genera en el suelo cargas diferentes, por tanto, esfuerzos y módulos distintos. En los cuadros 21, 22 y 23, se muestra el promedio de los datos seleccionados de los ensayos de deflectometría realizados a cada suelo para las dos condiciones de carga.

Cuadro 21. Resultados de LWD para M 1002

Caída	%W	Radio (mm)	Carga (KN)	Esfuerzo (kPa)	Def (Micron)	Eo (MPa)
10 kg	33,89	150,00	4,19	59,00	539,89	26,11
15 kg	33,89	150,00	5,83	82,33	815,11	24,33

Cuadro 22. Resultados de LWD para M 1189-18 para 15k

Caída	%W	Radio (mm)	Carga (KN)	Esfuerzo (kPa)	Def (Micron)	Eo (MPa)
10 kg	45,51	150	4,16	58,78	321,33	43,67
15 kg	45,51	150	5,91	83,78	502,22	39,89

Cuadro 23. . Resultados de LWD para M 1397-18 para 10k

Caída	% W	Radio (mm)	Carga (KN)	Esfuerzo (kPa)	Def (Micron)	Eo (MPa)
10 kg	34,76	150	4,29	60,67	216,78	67,11
15 kg	34,76	150	5,99	84,56	328,67	61,56

Las deformaciones obtenidas con este ensayo de deflectometría pertenecen únicamente a la subrasante. Al conocer la carga aplicada, el diámetro del plato de carga, el esfuerzo y módulo del suelo, se empleó el programa PITRAPAVE para determinar los esfuerzos principales generados en la subrasante bajo el punto de aplicación de la carga, se verificó a su vez la deformación generada con el ensayo y la calculada. Con estos esfuerzos se obtiene el invariante de esfuerzos y el esfuerzo cortante octaédrico requeridos en las ecuaciones de modelo generado de Mr de cada suelo para determinar las correlaciones entre los dos ensayos. A continuación, se muestran los resultados para cada caso:

Finca 2 (M 1002-16)

En el Cuadro 24, se muestran los esfuerzos asociados al módulo de la subrasante obtenido con LWD

Cuadro 24. Esfuerzos generados por el ensayo de LWD en M1002-16

Caída	% W	Eo (MPa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	σ_3 (kPa)	θ (kPa)	τ_{oct} (kPa)
10 kg	33,89	26,11	59,00	43,50	43,50	146,00	7,31
15 kg	33,89	24,33	82,33	60,67	60,67	203,67	10,21

El modelo calibrado para el suelo de Finca 2 es el siguiente:

$$M_r = 349,37 Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,594} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-1,228} \left(\frac{w}{w_{opt}} \right)^{-8,232} \quad (5)$$

Sustituyendo los datos de esfuerzo y humedad del cuadro 29, en la ecuación anterior y comparándola con el módulo obtenido del ensayo de LWD, se obtiene los siguientes factores (n) que nos permiten correlacionar los módulos obtenidos del ensayo de LWD con los Mr obtenidos de lab:

$$M_r = n Eo_{lwd10} \quad (6)$$

$$n = 1,79$$

Para el ensayo de LWD empleando el peso de 15 kg se obtiene:

$$M_r = n E o_{lwd15} \quad (7)$$

$$n = 2,27$$

Empalme (M 1189-18)

Los esfuerzos asociados al módulo obtenido del ensayo de LWD, se muestran en el Cuadro 25.

Cuadro 25. Esfuerzos generados por el ensayo de LWD en M 1189-18

Caída	% W	Eo (MPa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	σ_3 (kPa)	θ (kPa)	T_{oct} (kPa)
10 kg	45,51	43,67	58,78	43,31	43,31	145,41	7,29
15 kg	45,51	39,89	83,78	61,73	61,73	207,23	10,40

El modelo que se calibro, para este suelo, a partir de los datos de Mr de laboratorio empleando el MU y las variaciones de humedad es el siguiente:

$$M_r = 793,362 Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,532} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-1,248} \left(\frac{w}{w_{opt}} \right)^{-4,113} \quad (8)$$

Al igual que suelo anterior, sustituyendo en la ecuación el invariante de esfuerzos y el esfuerzo cortante octaédrico asociados a los ensayos de LWD, se obtiene para la ecuación (6) un valor n de:

$$n = 1,02$$

Para LWD empleando el peso de 15 kg se obtiene para la ecuación (7) el valor n de:

$$n = 1,3$$

Montes de Oro (M 1397-18)

Para el suelo de Montes de Oro, a partir de los datos generados por el LWD se calcularon los esfuerzos mostrados en el Cuadro 26.

Cuadro 26. Esfuerzos generados por el ensayo de LWD en M 1397-18

Caída	% W	Eo (Mpa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	σ_3 (kPa)	θ (kPa)	T_{oct} (kPa)
10 kg	34,76	67,11	60,67	44,71	44,71	150,08	7,53
15 kg	34,76	61,56	84,56	62,31	62,31	209,19	10,49

En la ecuación (7) se muestra el modelo calibrado de M_r para el suelo de Montes de Oro, el cual se compara con los valores de modulo obtenido del ensayo de LWD.

$$M_r = 583,682 Pa \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{0,61} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{-1,488} \left(\frac{w}{w_{opt}}\right)^{-3,541} \quad (9)$$

Con la ecuación anterior y el estado de esfuerzos anterior, correlacionando con el módulo de ensayo de deflectometría con la ecuación (6) se obtiene para el ensayo de LWD con 10kg un:

$$n = 0,84$$

Para LWD a 15 kg:

$$n = 1,07$$

A continuación, se muestra en el Cuadro 27, el resumen de las correlaciones para LWD para los tres suelos, estas correlaciones aplican a suelos con características físicas similares y que se encuentren con una humedad natural similar a la mostrada.

Cuadro 27. Correlaciones con para obtener M_r a partir del módulo obtenido por LWD

Correlaciones para LWD			
M 1002-16	33,9%W	LWD _{10kg}	$M_{r\ lab} = 1,79 E_{o\ lwd}$
		LWD _{15kg}	$M_{r\ lab} = 2,27 E_{o\ lwd}$
M1189-18	41,50%	LWD _{10kg}	$M_{r\ lab} = 1,02 E_{o\ lwd}$
		LWD _{15kg}	$M_{r\ lab} = 1,30 E_{o\ lwd}$
M1397-18	34,8%W	LWD _{10kg}	$M_{r\ lab} = 0,84 E_{o\ lwd}$
		LWD _{15kg}	$M_{r\ lab} = 1,07 E_{o\ lwd}$

Los módulos obtenidos con LWD para Montes de Oro presentan una mayor aproximación con los datos de M_r de laboratorio que los suelos de Empalme y Montes de Oro. No obstante, en casi todos los casos presenta una gran diferencia entre los valores predichos y LWD. Obteniendo valores de M_r con el modelo mayores al medido directamente con LWD.

Las correlaciones empíricas entre estos dos datos, son muy pocas. Sin embargo, en algunas de ellas se refleja la tendencia del ensayo de LWD de registrar módulos menores. White, Thompson, & Vennapusa (2007), proponen un modelo para predecir el M_r en MPa partir del módulo del LWD, para generar el modelo asumieron un coeficiente Poisson de 0,35 y un

factor de distribución de carga de $\pi/2$ en suelos cohesivos y 2 para no cohesivos, además consideraron una presión de confinamiento de 41,4 kPa y un esfuerzo desviador de 69 kPa, la siguiente correlación:

$$Mr = \frac{E_{LWD} + 45,3}{1,24} \quad (8)$$

Otro modelo de correlación es el generado por Mohammad (2008), el cual desarrolló asumiendo un coeficiente de Poisson de 0,4 y las mismas distribuciones de carga que el modelo anterior. El modelo se generó para predecir Mr a una presión de confinamiento de 13,8 kPa y un esfuerzo desviador de 41,4 kPa.

$$Mr = 27,75 * E_{LWD}^{0,18} \quad (9)$$

El estado de esfuerzos utilizado en el modelo desarrollado por Mohammad es considerado en gran parte de la literatura como representativo de los esfuerzos comunes en la subrasante (Chaves, 2017).

5.1.2 Correlación entre CBR y Mr

Las correlaciones entre los ensayos de CBR y Mr se han estudiado de forma más extensa y existen diferentes modelos como los mencionados en el Cuadro 5, dado que es el ensayo realizado generalmente para caracterizar el comportamiento mecánico de la subrasante.

Sin embargo, muchas de las correlaciones usadas en el diseño de pavimentos son una aproximación inexacta ya que el módulo resiliente de un material no corresponde a un valor único, depende de diferentes parámetros como el estado de esfuerzos y la humedad y a las características propias de cada suelo.

Buscando generar valores de Mr a partir de los resultados del ensayo de CBR más exactos, se proponen diferentes correlaciones, empleando estados de esfuerzos típicos en subrasante y variaciones de humedad.

El estado de esfuerzos empleado en las correlaciones corresponde a un esfuerzo de confinamiento de 13,8 kPa y un esfuerzo desviador de 41,4 kPa, este estado de esfuerzos fue propuesto originalmente por el *Asphalt Institute* (1989).

A continuación, se muestran las correlaciones para cada suelo:

Finca 2 (M 1002-16)

Considerando los porcentajes de compactación de todos los especímenes ensayados, se determinó que el promedio de compactación es del 98%, por tanto, para las correlaciones de este suelo se utilizará el valor de CBR para este porcentaje el cual corresponde a 14,8.

Se genera una correlación de CBR y Mr en condiciones de humedad óptima del suelo (34,5%W) y los esfuerzos anteriores, para considerar el Mr que se da durante la construcción y al inicio de la vida útil del pavimento antes de empezar a sufrir variaciones de humedad. Para determinar las correlaciones se sigue la siguiente la ecuación:

$$M_r = n CBR$$

Se correlaciona el valor de CBR, con el MR a dos humedades más. La primera humedad sobre el óptimo, a un 90% de saturación ya que a partir de este porcentaje de humedad se observó en los ensayos que los Mr caen y empiezan a disminuir su variación presentando comportamientos similares aún con humedades mayores. La segunda humedad corresponde al extremo seco, condición en la que se dan los valores de Mr mayor para conocer a partir de CBR el rango de variación de módulo para suelos similares.

En el Cuadro 28, se muestran los parámetros empleados en la ecuación (5), Modelo de Mr para suelo M1002-16, el valor de Mr obtenido, el CBR y la ecuación final de correlación.

Cuadro 28. Correlaciones con CBR para suelo M 1002-16

% W	σ_c (kPa)	σ_d (kPa)	Mr	CBR	n	Correlación para CBR
34,5	13,8	41,4	25292,28	14,8	1709	$M_{rWopt} = 1709 CBR$
36,0	13,8	41,4	17816,92	14,8	1204	$M_{rH} = 1204 CBR$
29,1	13,8	41,4	102694,61	14,8	6939	$M_{rS} = 6939 CBR$

Empalme (M 1189-18)

Para el ensayo de Mr se logró un promedio de compactación de todos los especímenes de 98%, usando este porcentaje para determinar CBR se obtiene un valor de 22,5.

Las correlaciones con el valor de CBR para este suelo se realizaron para las mismas tres condiciones de humedad para la Wopt, para una humedad cercana al 90% de saturación,

la cual se determinó con un 98% de la densidad máxima seca y las curvas de saturación en Proctor, para el porcentaje más seco se usó el valor en el cual se dan los mayores valores de modulo.

Con el estado de esfuerzos definido anteriormente y el modelo de Mr para el suelo del empalme, ecuación (8), y los datos de humedad definidos se obtiene para el suelo del Empalme las correlaciones de CBR mostradas en el Cuadro 29.

Cuadro 29. Correlaciones con CBR para suelo M 1189-18

%W	σ_c (kPa)	σ_d (kPa)	Mr	CBR	n	Correlación para CBR
38,4	13,8	41,4	59091,16	22,5	2626	$M_{rWopt} = 2626 CBR$
42,0	13,8	41,4	40086,59	22,5	1782	$M_{rH} = 1782 CBR$
32,9	13,8	41,4	109445,20	22,5	4864	$M_{rS} = 4865 CBR$

Montes de Oro (M 1397-18)

Para los especímenes empleados en los ensayos de Mr de Montes de Oro se alcanzó una compactación promedio de 96%, este mismo porcentaje se utilizó para determinar el valor de CBR el cual corresponde a 22.

Las correlaciones se realizaron a las tres humedades | porcentaje optimo, a un 90 % de saturación humedad que se determinó con la curva Proctor la curva de saturación y el 96% de la densidad máxima y el último punto al porcentaje más seco. En el Cuadro 30, se muestran los resultados obtenidos con los parámetros anteriores en el modelo de modulo para el suelo , ecuación (9), el valor de CBR y su correlación con los módulos.

Cuadro 30. Correlaciones con CBR para suelo M 1397-18

%W	σ_c (kPa)	σ_d (kPa)	Mr	CBR	n	Correlación para CBR
33,0	13,8	41,4	60211,24	22	2737	$M_{rWopt} = 2737 CBR$
39,0	13,8	41,4	30288,43	22	1377	$M_{rH} = 1377 CBR$
26,7	13,8	41,4	143907,89	22	6541	$M_{rS} = 6541 CBR$

VI. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones.

Los suelos ensayados presentaron una buena trabajabilidad en la realización de los ensayos de módulo y LWD, cumpliendo con lo esperado derivado de la caracterización física, todos presentan altos porcentajes de finos.

El procedimiento realizado para el ensayo de módulo resiliente logró cumplir con los objetivos, ya que se logró la correcta variación de humedades y comportamientos muy semejantes entre los especímenes a las mismas humedades. Las humedades se verificaban después de la falla con muestras de humedad de los extremos y el núcleo, en todos los casos para el mismo punto los dos especímenes ensayados presentaron porcentajes de humedad muy similares. El proceso de homogenización fue indispensable para lograr los resultados esperados, ya que si un espécimen mantenía las caras más húmedas al corazón del espécimen los datos no se ajustaban bien.

En el proceso de humedecimiento las membranas de látex de 70mm por 140 mm absorbían en promedio 5 gramos de agua, lo cual se debió considerar.

Para todos los suelos, se pudo observar en el comportamiento de las curvas de M_r su dependencia del estado esfuerzos.

Se observó, en los tres suelos que a condiciones más secas la variación del M_r con el esfuerzo desviador es menos marcado, que en condiciones óptimas o de mayor humedad, donde la curva tiende a caer más.

Los valores obtenidos de M_r variaron considerablemente con la humedad, como se esperaba, a contenidos de humedad sobre el óptimo los valores de M_r generados se encuentran bajo los valores de módulo en condiciones de humedad óptima. Cuando se secaron los especímenes los valores de módulo incrementaron, en algunos casos como se mencionó, hasta se duplica lo obtenido en W_{opt} .

Para los ensayos realizados a porcentajes de humedad sobre el óptimo, se observó que cuando el suelo se encontraba sobre el 90% de la saturación los módulos dejaron de caer y se daban comportamientos similares independiente del incremento de humedad. Por tanto, se concluye que para humedades de más del 90% de saturación a la saturación completa la curva M_r deja de caer y empieza a presentar valores constantes.

En los tres suelos, se observó, que cuando el espécimen se llevó a condiciones muy secas los valores de M_r dejaron de aumentar y sufrieron una disminución respecto al espécimen seco anterior.

Se observó también después del acondicionamiento de los especímenes, para estos porcentajes secos, un endurecimiento de los especímenes. Por tanto, el protocolo de ensayo de la norma NCHRP puede no presentar los esfuerzos suficientes para alterar el espécimen y no se registre de forma adecuada el comportamiento del suelo.

Debido a lo anterior los valores de módulo generado en esas condiciones no se tomaron en cuenta para las calibraciones de M_r con el MU.

Para todos los suelos se obtuvieron buenas calibraciones con el modelo universal y la consideración de la humedad, con valores de R^2 cercanos a 0,9. El modelo global brindó un buen ajuste para la mayoría de los datos. Todos los modelos brindan una mejor predicción de módulo para las condiciones de humedad óptima y porcentajes más húmedos que para los módulos en condiciones secas.

Se logró determinar bulbo de esfuerzos producto el ensayo de LWD, por lo tanto, conocer las dimensiones de las muestras que se deben emplear en dicho ensayo

Los valores obtenidos de módulo con el ensayo de LWD, tienden a estar por debajo de los obtenidos en el laboratorio. Las correlaciones para estos ensayos aplican únicamente para suelos con características similares y en las condiciones determinadas.

Las correlaciones de CBR, tienden a dar valores de modulo mayores en comparación con otras correlaciones existentes, lo que puede implicar diseños menos conservadores que se ve reflejado en la disminución del costo de las obras. Las correlaciones para este parámetro, también, aplican únicamente para suelos con características similares a los estudiados y para diseños que consideren el mismo estado de esfuerzos para la subrasante.

Los valores típicos de M_r , según MEPDG, para los suelos clasificados como A-7-5 se encuentra entre los 82,7 MPa aproximadamente, los dos suelos estudiados dentro de esta clasificación presentaron valores de M_r , en condiciones de humedad óptima, por debajo de los 80 MPa. Para el suelo clasificado como A-5 se determina un valor típico de M_r de 137 MPa aproximadamente, el mismo en condiciones de humedad óptimas presenta valores de

Mr inferiores a este. Por tanto, el uso de valores típicos para estos suelos podría incurrir en sobreestimaciones de la subrasante en el diseño.

Se logró demostrar con los resultados de la investigación, la importancia de considerar en el diseño de pavimentos valores de Mr más ajustados a las condiciones reales a las que se encuentran expuestas las carreteras de nuestro país. Pues se presenta gran variación en el Mr ante los incrementos y disminuciones de humedad respecto a la humedad óptima, considerar estas variaciones en el diseño pueden llevar a mejoras económicas tanto en la construcción como en el mantenimiento de las vías.

6.2 Recomendaciones

Para la realización de los ensayos de módulo se debe variar el protocolo de ensayo de falla cuando los especímenes se encuentran a diferentes humedades. El mismo recomienda humedecer las piedras porosas para que el espécimen no pierda humedad, pero cuando los especímenes se encontraban muy secos, estos robaban la humedad de las piedras porosas y las caras presentaban humedades muy diferentes al resto del espécimen lo que llevaba a cálculos de humedad erróneos y deformaciones en las caras únicamente. Por tanto, en estos casos se usaron las piedras porosas con muy poca humedad y el papel filtro seco, para que este absorba la humedad de la piedra y a su vez no robe humedad significativa al espécimen.

El procedimiento de humedecimiento de los especímenes se debe realizar con extremo cuidado, para evitar la pérdida de material, ya que el control de humedad se realiza por peso y se debe estar manipulando el espécimen frecuentemente. Por tanto, se recomienda mantener el espécimen dentro de la membrana de látex todo el tiempo y conocer el peso de las mismas para que no interfieran el peso que va ganando o perdiendo el espécimen y a su vez considerar la ganancia de humedad de la membrana.

Las humedades a las que se variaron los ensayos se determinaron por su tiempo en las pilas de capilaridad y no se encuentran asociadas a las humedades que experimentan las subrasante en campo. Por tanto, se recomienda tomar muestras de humedad de la subrasante durante los muestreos para conocer entre que porcentajes de humedad se encuentran comúnmente la subrasante y así no tener que realizar tantas variaciones de humedad en los ensayos de laboratorio y se realice directamente para humedades cercanas a las presentadas en campo.

Es recomendable realizar análisis de Mr para las condiciones secas del suelo y determinar protocolos de ensayo aplicables para las condiciones donde debido al secado el material presenta endurecimientos considerables.

Se recomiendan realizar los ensayos desarrollados en este proyecto para los otros tipos de suelo que tienen una incidencia en los proyectos de carreteras.

Durante la realización de los ensayos de LWD se recomienda impermeabilizar las calicatas con plástico antes de realizar la compactación con los suelos de sustitución, ya que debido a la humedad natural del suelo de la fosa las muestras empezaron a ganar humedad para equilibrarse y a perder humedad posteriormente, por lo cual las humedades a las que se realizaron los ensayos de deflectometría no se pudieron controlar como se esperaba.

Se recomienda realizar diferentes calicatas ya que las muestras con el tiempo y ante la realización de los ensayos sobre el mismo punto, empezó a presentar compactaciones y por tanto los valores de Mr incrementaron independiente de la humedad presentada.

Referencias Bibliográficas

- AASHTO. (2003). Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending. Estados Unidos.
- AASHTO. (2008). Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide.
- Aguiar, J., Camacho, E., Arias, E., & Loría, G. (2017). *Efecto de Humedad en ensayos a escala real de pavimentos*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- ASTM. (2009). Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures. Estados Unidos.
- ASTM. (2014). Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures. Estados Unidos.
- Austroroads. (Febrero de 2012). *Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design*. Recuperado el 26 de abril de 2017, de <https://www.onlinepublications.austroroads.com.au/items/AGPT02-12>
- Ávila, T. (2017). *Efecto del contenido de agua en el modulo resiliente de las subrasantes*. Tesis de Maestría, Universidad de Costa Rica.
- Ávila, T., & Araya, Y. (2014). *Caracterización físico química de los suelos de Costa Rica*. Universidad de Costa Rica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, San Pedro, San José, Costa Rica.
- Badilla, G. A., & Sibaja, D. (Enero/Diciembre de 2010). Análisis de la respuesta estructural de pavimentos mediante deflectómetro de impacto (FWD) en diferentes épocas el año en Costa Rica. *Ingeniería, 20*, págs. 169-181.
- Birgisson et al. (2000). Analytical Predictions of Seasonal Variations in Flexible Pavements. (C. o. Design, Ed.) 00-0425.
- Ceratti, J., Yuk Gehling, W., & Peres Núñez, W. (1974). Seasonal Variations of a Subgrade Soil Resilient Modulus in Southern Brazil. (R. G. Constructors, Ed.) *Transportation Research Record*.
- Chaves, S. (2017). *Comparación de módulo resiliente en suelos de subrasante obtenidos por ensayos de campo y laboratorio*. Tesis de Licenciatura, Universidad De Costa Rica.

-
- Cordero, M. (2004). *Notas de clase del curso de Laboratorio de Mecánica de de Suelos 1 Ic-0703*. Universidad de Costa Rica .
- Das, B. (2014). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (Cuarta ed.). (S. Cervantes González, Ed.) Mexico: Cengage learning.
- Garnica, P., Gómez, J., & Sesma, J. (2002). *Mecánica de Materiales para Pavimentos*. Instituto Mexicano del Transporte, Mexico.
- Garnica, P., Pérez, N., & Gómez, J. (2001). *Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares*. Instituto Mexicano del Transporte.
- González de Vallejo, L. I. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Herrera, V. (2007). *Valoración del módulo resiliente para un suelo utilizado como subrasante*. Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica, San José.
- Jiménez, M. (2009). *Implementación del ensayo de módulo resiliente en bases granulares para pavimentos*. LANAMME. San José: Universidad de Costa Rica.
- Jones, M., & Witczak, M. (1977). *Subgrade Modulus on the San Diego Tert Road*. Transportation Research Record 641, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- Mena, W. B. (2013). *Implementación del modelo climático de la MEPDG —AASHTO 2008*. Medellín: UNIVERSIDAD EAFIT.
- Mohammad, L. (2008). *Development of Models to Estimate the Subgrade and Subbase Layers' Resilient Modulus from In Situ Devices Test Results for Construction Control*. EEUU, Federal Highway Administration.
- Myung S, J., K, W., & William D, K. (July/August de 1994). Seasonal variation of resilient modulus of subgrade soils. *120*(4).
- NCHRP. (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design*. National Research Council, EEUU.
- NCHRP. (2004). *Research Results Digest: Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design*. National Cooperative Highway Research Program.
- Orozco, E. G. (2007). *Zonificación climática de Costa Rica para la gestión de infraestructura vial*. Universidad de Costa Rica.

-
- Osorio, A. (2008). *Metodología de evaluación in-situ de la capacidad de soporte de bases y subbases granulares de pavimentos flexibles con deflectómetro de impacto liviano*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago Chile.
- Perera, A. L. (2015). *Determinación y análisis de los factores climáticos críticos para el diseño de pavimentos flexibles en Costa Rica*. San Jose: Universidad de Costa Rica.
- Pérez, N., Garnica, P., & Mestas, N. (2016). *El módulo de resiliencia: Cómo fluctúa después de la construcción del pavimento y como estimar estas fluctuaciones*. Instituto Mexicano del Transporte.
- Richter, C. A. (2006). *Seasonal Variations in the Moduli of Unbound Pavement Layers*. 300 Georgetown Pike McLean.
- Rico, A., & del Castillo, H. (1992). *Consideraciones sobre compactación de suelos en obras de infraestructura de transporte*. Instituto mexicano del Transporte, México.
- Rivera, W. (2013). *Correlación del valor de soporte de California (C.B.R)*. Universidad del Valle, Santiago de Cali. Recuperado el 15 de 09 de 2017, de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7832/1/CB-0478826.pdf>
- Rondón, H., & Reyes, F. (2015). *Pavimentos: Materiales, construcción y diseño*. Bogotá: ECOE.
- Salem, H., Bayomy, F., & Al-Taher, M. (2003). *Prediction of Seasonal Variation of Subgrade Resilient Modulus Using LTPP Data*.
- Soliman, H., & Shalaby. (2010). Sensitivity of subgrade resilient modulus to moisture variation. *Annual Conference of the Transportation Association of Canada*. Halifax, Nova Scotia.
- Vargas, W. (2016). *Notas de clase del curso Mecánica de Suelos 1 IC-0703*. Universidad de Costa Rica.
- White, w., Thompson, M., & Vennapusa, P. (2007). *Field Validation of Intelligent Compaction Monitoring Technology for Unbounded Materials*. Minnesota Department of Transportation.
- Zárate, M. (2003). *Diseño de Pavimentos Flexibles*. Mexico, D.F.: Gráfica, Creatividad y Diseño, S.A.

Apéndices

Apéndice I. Resultados de los ensayos de caracterización de suelos.

Finca 2 (M1002-16)

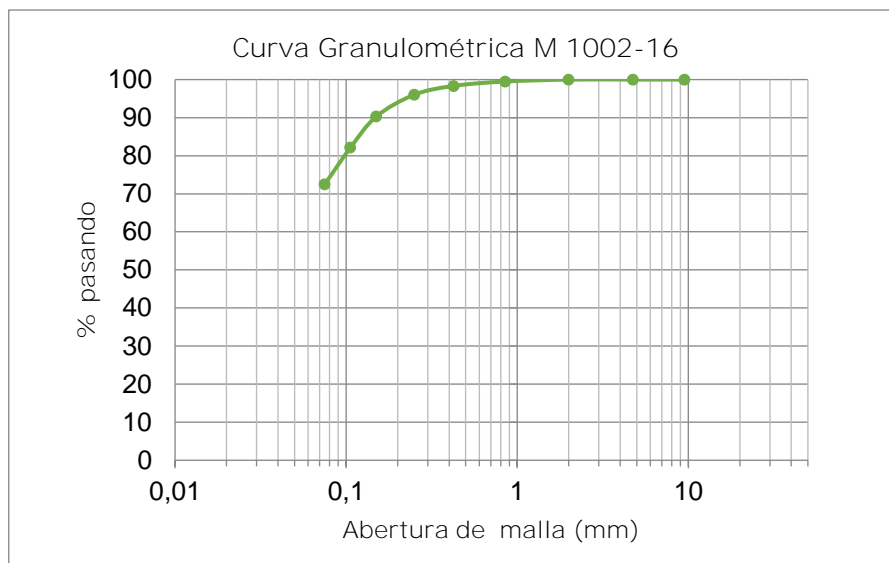


Figura A- 1. Curva granulométrica del suelo M-1002-16

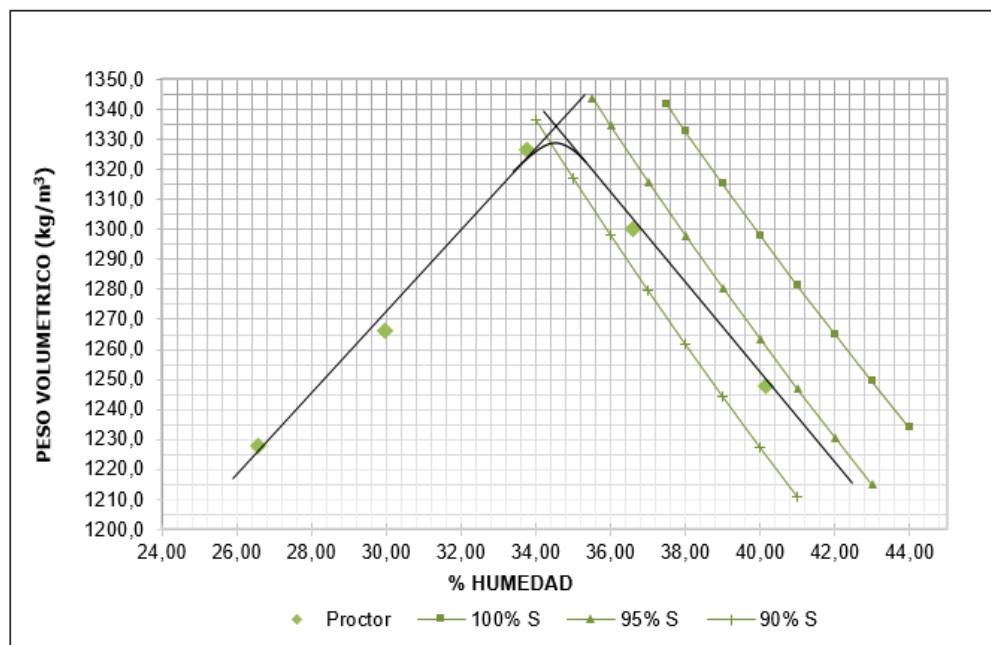


Figura A- 2. Curva de compactación Proctor estándar M 1002-16

Empalme (M-1189-18)

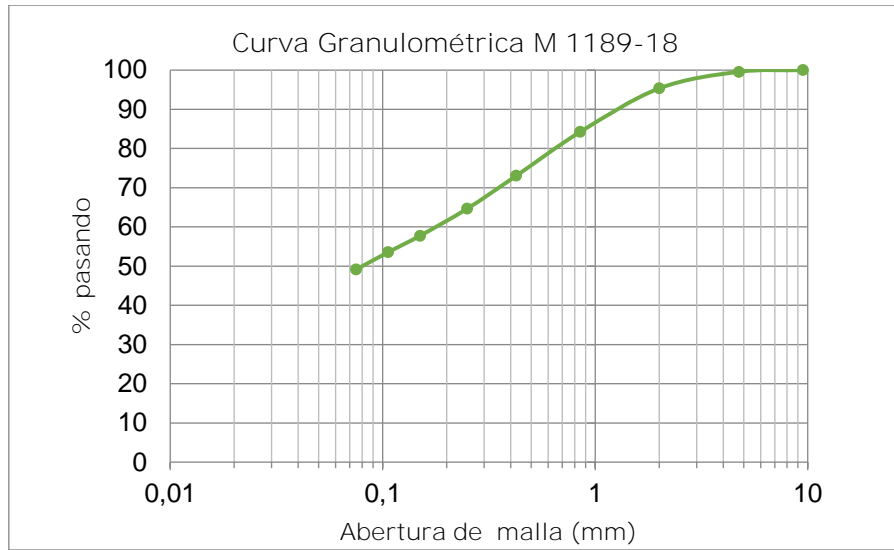


Figura A- 3. Curva granulométrica del suelo M 1189-18

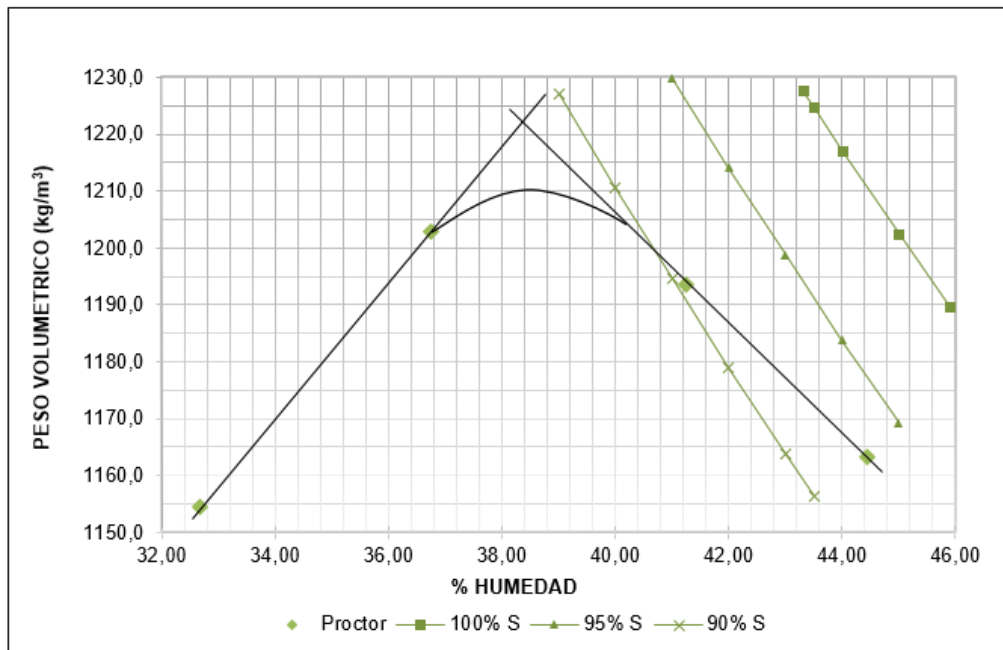


Figura A- 4. Curva de compactación Proctor estándar M1189-18

Montes de Oro (M-1397-18)

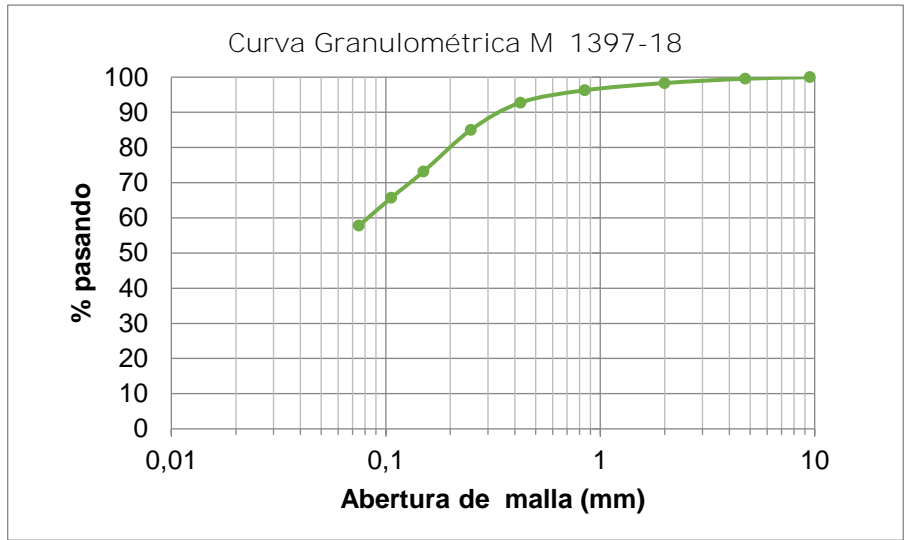


Figura A- 5. Curva granulométrica suelo M 1397-18

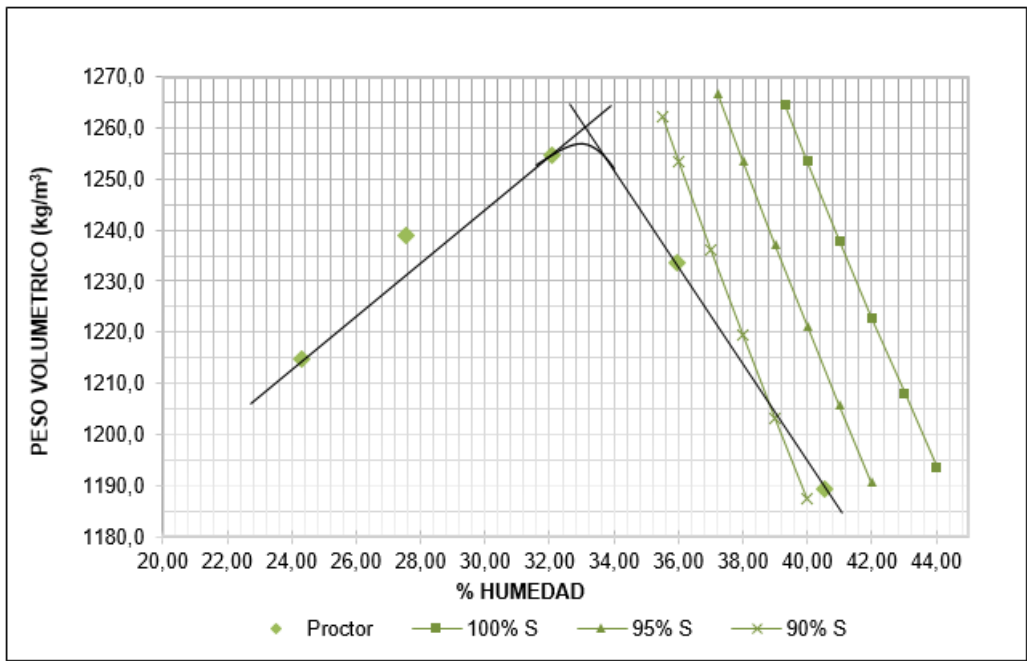


Figura A- 6. Curva de compactación Proctor estándar M 1397-18

Apéndice II. Resultados del ensayo de CBR.

Finca 2 (M 1002-16)

Cuadro A- 1. Resultados de CBR para la muestra M1002-16

No. Golpes	C (%)	%CBR Calculado		%CBR Corregido	
		0,1 pulg	0,2 pulg	0,1 pulg	0,2 pulg
		2,4mm	5,08mm	2,4mm	5,08mm
56	99,7	14,4	16,4	16,4	17
25	93,8	8,0	9,7	10,6	10,4
10	87,8	4,00	4,6	4,0	4,6



Figura A- 7. Porcentaje de compactación contra CBR: Muestra M-1002-16

Empalme (M 1189-18)

Cuadro A- 2. Resultados de CBR para la muestra M 1189-18

No. Golpes	C (%)	%CBR Calculado		%CBR Corregido	
		0,1 pulg	0,2 pulg	0,1 pulg	0,2 pulg
		2,4mm	5,08mm	2,4mm	5,08mm
56	99,0	21,5	21,5	23,2	21,8
25	90,3	10,7	9,9	10,7	9,9
10	82,2	4,1	3,7	4,1	3,7

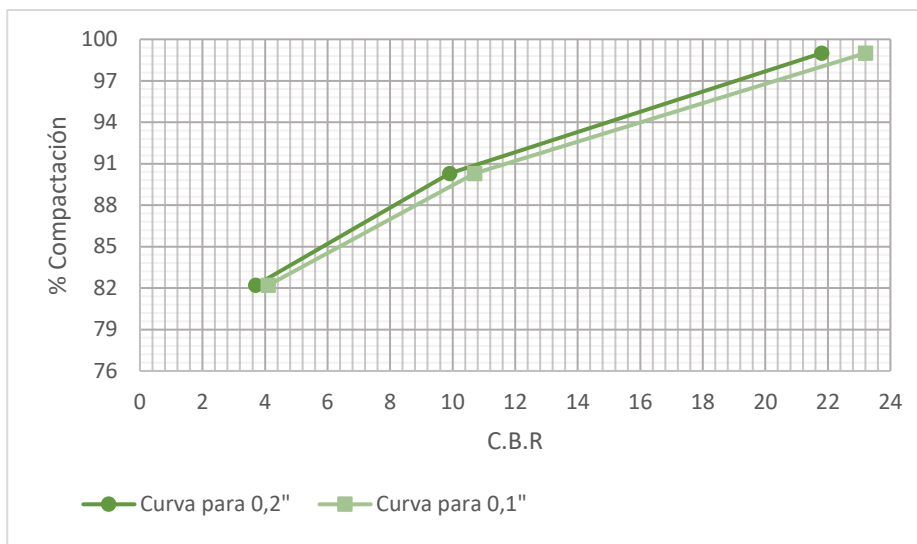


Figura A- 8. Porcentaje de compactación contra CBR: Muestra M-1189-18.

Montes de Oro (M 1397-18)

Cuadro A- 3. Resultados de CBR para la muestra M 1189-18

No. Golpes	C (%)	%CBR Calculado		%CBR Corregido	
		0,1 pulg	0,2 pulg	0,1 pulg	0,2 pulg
		2,4mm	5,08mm	2,4mm	5,08mm
56	96,1	20,8	20,1	22,4	20,5
25	88,5	9,9	9,2	10,3	9,2
10	81,3	2,8	2,9	2,8	2,9

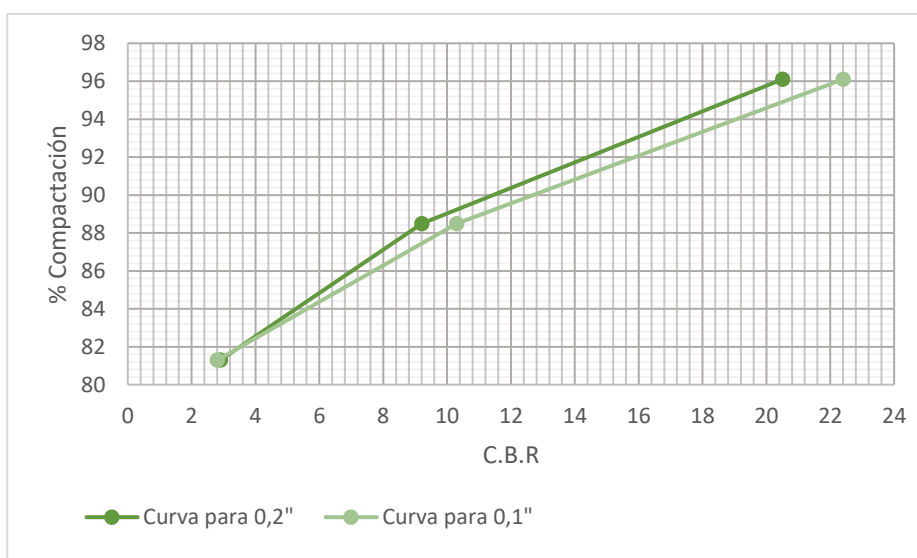


Figura A- 9. Porcentaje de compactación contra CBR: Muestra M-1397-18.

Apéndice III. Datos de los especímenes para ensayo de módulo resiliente.

Cuadro A- 4. Datos de los especímenes M 1002-16

%W	Especímen	Elaboración del espécimen				Falla	
		W _{opt} (%)	Peso (g)	Densidad seca (kg/m ³)	% compactación	%W objetivo	%W la falla
W _{opt}	1	34,3	2824,9	1270,3	0,96	34,5	34,5
	2	34,0	2866,2	1293,5	0,97	34,5	34,6
PH1	1	34,0	2895,4	1304,9	0,98	36,0	36,4
	2	34,3	2980,7	1341,1	1,01	36,0	35,5
PH2	1	34,0	2903,1	1311,6	0,99	37,0	36,6
	2	34,0	2858,8	1291,6	0,97	37,0	37,7
PS1	1	34,8	2949,2	1321,9	0,99	29,0	29,2
	2	34,5	2919,9	1311,3	0,99	29,0	28,9
PS2	1	34,0	2898,3	1307,3	0,98	23,0	22,9
	2	34,0	2921,6	1319,9	0,99	23,0	23,5

Cuadro A- 5. Datos de los especímenes M 1189-18

Humedad	Especímen	Elaboración del espécimen				Falla	
		W _{opt} (%)	Peso (g)	Densidad seca (kg/m ³)	% compactación	%W objetivo	%W la falla
W _{opt}	1	38,0	2753,7	1205,6	1,00	38,4	37,2
	2	38,0	2695,9	1182,5	0,98	38,4	38,1
PH1	1	38,2	2713,1	1185,7	0,98	44,4	44,9
	2	37,7	2708,3	1188,2	0,98	44,4	44,5
PH2	1	38,1	2715,6	1187,9	0,98	47,0	47,1
	2	38,3	2709,7	1183,9	0,98	47,0	46,8
PS1	1	39,1	2729,9	1185,8	0,98	33,0	32,8
	2	38,5	2707,8	1181,3	0,98	33,0	33,1
PS2	1	38,2	2695,0	1178,1	0,97	26,0	26,3
	2	38,0	2684,5	1176,1	0,97	26,0	26,7

Cuadro A- 6. Datos de los especímenes M 1397-18

Humedad	Especímen	Elaboración del espécimen				Falla	
		W _{opt} (%)	Peso (g)	Densidad seca (kg/m ³)	% compactación	%W objetivo	%W la falla
W _{opt}	1	33,0	2694,3	1226,1	0,98	33,0	32,7
	2	32,5	2668,0	1216,1	0,97	33,0	33,6
PH1	1	33,6	2671,3	1207,4	0,96	37,0	37,8
	2	33,6	2679,6	1211,1	0,96	37,0	37,7
PH2	1	33,0	2709,4	1232,0	0,98	41,0	41,3
	2	33,6	2699,5	1220,6	0,97	41,0	41,0
PS1	1	33,5	2665,1	1205,8	0,96	26,5	27,1
	2	33,6	2680,2	1211,6	0,96	26,5	26,3
PS2	1	33,0	2598,6	1183,0	0,94	21,5	21,8
	2	33,0	2613,2	1189,4	0,95	21,5	21,6

Apéndice IV. Resultados de ensayo de módulo resiliente

Finca 2 (M- 1002-16)

Cuadro A- 7. Resultados ensayos de Mr de los especímenes de M1002-16 a (W opt), promedio de datos y desviación estándar (SD).

M-1002-16 (W opt)										
Sec	Especímen 1			Especímen 2			Promedio			
	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	SD
1	55,2	27,6	66600	55,2	27,7	65700	55,2	27,7	66150	450
2	41,4	27,6	59600	41,4	27,6	60400	41,4	27,6	60000	400
3	27,6	27,6	49300	27,6	27,6	50600	27,6	27,6	49950	650
4	13,8	27,6	37300	13,8	27,5	39200	13,8	27,6	38250	950
5	55,2	48,4	57600	55,2	48,3	58700	55,2	48,4	58150	550
6	41,4	48,3	52200	41,4	48,4	54000	41,4	48,4	53100	900
7	27,6	48,2	43800	27,6	48,3	46300	27,6	48,3	45050	1250
8	13,8	48,3	34100	13,8	48,3	36600	13,8	48,3	35350	1250
9	55,2	69	51500	55,2	69,0	53700	55,2	69,0	52600	1100
10	41,4	69	46100	41,4	69,0	48800	41,4	69,0	47450	1350
11	27,6	69,1	39100	27,6	69,0	41800	27,6	69,1	40450	1350
12	13,8	69	30400	13,8	69,1	33300	13,8	69,1	31850	1450
13	55,2	96,6	46200	55,2	96,6	48400	55,2	96,6	47300	1100
14	41,4	96,7	41100	41,4	96,6	43500	41,4	96,7	42300	1200
15	27,6	96,5	35000	27,6	96,6	37600	27,6	96,6	36300	1300
16	13,8	96,6	28000	13,8	96,7	30500	13,8	96,7	29250	1250

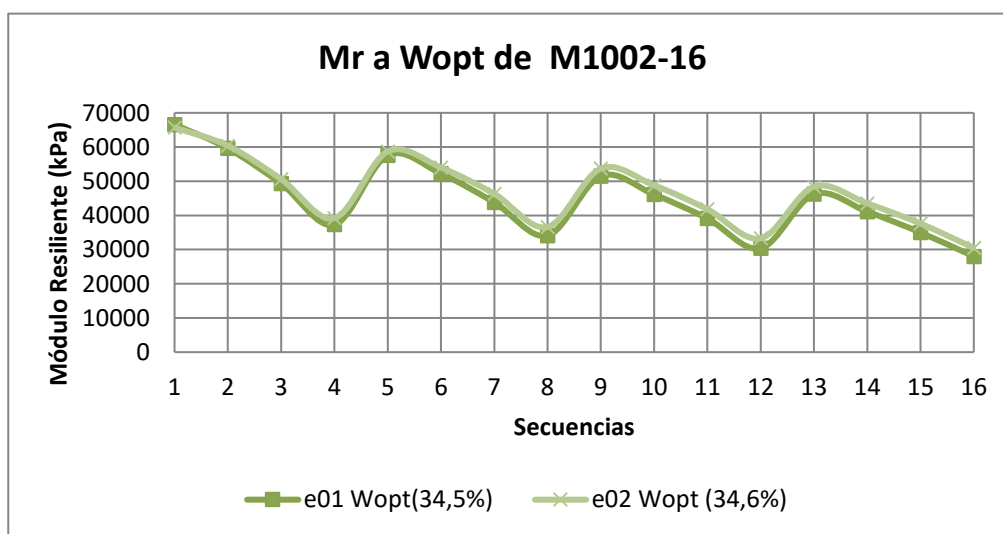


Figura A- 10. Mr obtenidos para las muestras de M 1002-16 ensayadas a Wopt.

Cuadro A- 8. Resultados ensayos de Mr de los especímenes de M1002-16 a (PH1), promedio de datos y desviación estándar (SD).

M-1002-16 (PH1)										
Sec	Especímen 1			Especímen 2			Promedio			
	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	SD
1	55,2	27,5	33500	55,2	27,6	30600	55,2	27,6	32050	1450
2	41,4	27,6	25100	41,4	27,7	24600	41,4	27,7	24850	250
3	27,6	27,6	17700	27,6	27,5	18200	27,6	27,6	17950	250
4	13,8	27,5	13500	13,8	27,4	13300	13,8	27,5	13400	100
5	55,2	48,3	31700	55,2	48,4	28100	55,2	48,4	29900	1800
6	41,4	48,3	25000	41,4	48,6	23500	41,4	48,5	24250	750
7	27,6	48,2	19300	27,6	48,1	18900	27,6	48,2	19100	200
8	13,8	48,2	14400	13,8	48,3	14700	13,8	48,3	14550	150
9	55,2	69	27900	55,2	69,1	25100	55,2	69,1	26500	1400
10	41,4	69	23000	41,4	68,9	21400	41,4	69,0	22200	800
11	27,6	69	17500	27,6	68,9	17800	27,6	69,0	17650	150
12	13,8	69,5	13400	13,8	69,4	14200	13,8	69,5	13800	400
13	55,2	96,5	24800	55,2	96,5	24300	55,2	96,5	24550	250
14	41,4	96,4	28400	41,4	96,5	21500	41,4	96,5	24950	3450
15	27,6	96,7	26000	27,6	96,6	18500	27,6	96,7	22250	3750
16	13,8	98,2	22700	13,8	97,1	15200	13,8	97,7	18950	3750

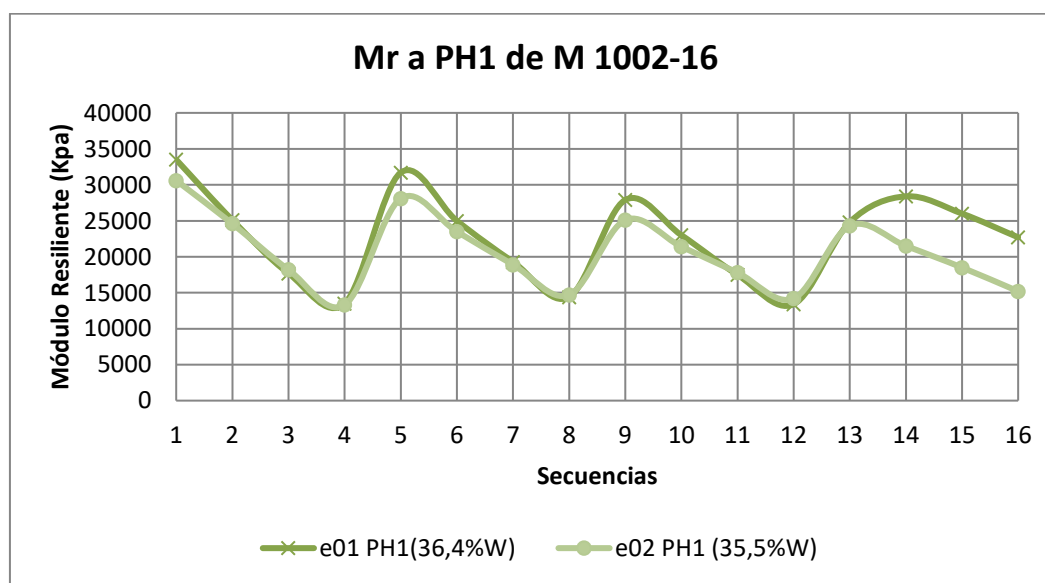


Figura A- 11. Mr obtenidos para las muestras de M 1002-16 ensayadas a PH1.

Cuadro A- 9. Resultados ensayos de Mr de los especímenes de M1002-16 a (PH2), promedio de datos y desviación estándar (SD).

M-1002-16 (PH2)										
Sec	Especimen 1			Especimen 2			Promedio			
	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	SD
1	55,2	27,6	23000	55,2	27,5	27300	55,2	27,6	25150	2150
2	41,4	27,8	18500	41,4	27,7	21200	41,4	27,8	19850	1350
3	27,6	27,7	14500	27,6	27,5	15700	27,6	27,6	15100	600
4	13,8	27,5	10900	13,8	27,6	11400	13,8	27,6	11150	250
5	55,2	48,2	22500	55,2	48,1	25000	55,2	48,2	23750	1250
6	41,4	48,3	18900	41,4	48,1	20300	41,4	48,2	19600	700
7	27,6	48,1	15500	27,6	48,3	16200	27,6	48,2	15850	350
8	13,8	48,7	12200	13,8	48,7	12300	13,8	48,7	12250	50
9	55,2	69,1	21300	55,2	69,2	22600	55,2	69,2	21950	650
10	41,4	68,8	18200	41,4	69,0	18700	41,4	68,9	18450	250
11	27,6	69,1	15300	27,6	69,0	15300	27,6	69,1	15300	0
12	13,8	69,8	12200	13,8	69,9	11800	13,8	69,9	12000	200
13	55,2	96,6	21000	55,2	96,8	21200	55,2	96,7	21100	100
14	41,4	96,6	18500	41,4	96,6	18100	41,4	96,6	18300	200
15	27,6	97	15900	27,6	97,0	15200	27,6	97,0	15550	350
16	13,8	98	22500	13,8	98,5	22100	13,8	98,3	22300	200

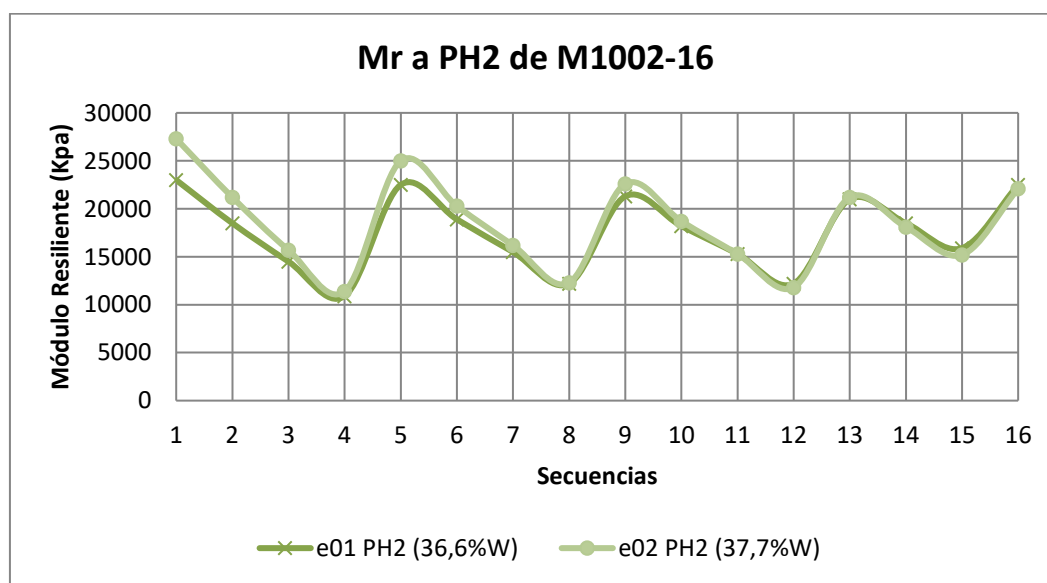


Figura A- 12. Mr obtenidos para las muestras de M 1002-16 ensayadas a PH2

Cuadro A- 10. Resultados ensayos de Mr de los especímenes de M1002-16 a (PS1), promedio de datos y desviación estándar (SD).

M-1002-16 (PS1)										
Sec	Especímen 1			Especímen 2			Promedio			
	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	SD
1	55,2	27,7	118700	55,2	27,5	179400	55,2	27,6	149050	30350
2	41,4	27,6	112200	41,4	27,7	172200	41,4	27,7	142200	30000
3	27,6	27,7	100700	27,6	27,5	153300	27,6	27,6	127000	26300
4	13,8	27,6	83800	13,8	27,6	130800	13,8	27,6	107300	23500
5	55,2	48,2	113500	55,2	48,1	183300	55,2	48,2	148400	34900
6	41,4	48,3	109300	41,4	48,3	172700	41,4	48,3	141000	31700
7	27,6	48,3	101400	27,6	48,3	153300	27,6	48,3	127350	25950
8	13,8	48,3	89500	13,8	48,3	128700	13,8	48,3	109100	19600
9	55,2	68,9	126500	55,2	69,0	183900	55,2	69,0	155200	28700
10	41,4	69,2	119100	41,4	68,9	171100	41,4	69,1	145100	26000
11	27,6	69	102300	27,6	69,0	151600	27,6	69,0	126950	24650
12	13,8	35,5	85700	13,8	68,9	125300	13,8	52,2	105500	19800
13	55,2	96,6	140000	55,2	96,6	177600	55,2	96,6	158800	18800
14	41,4	96,5	132300	41,4	96,6	165800	41,4	96,6	149050	16750
15	27,6	96,5	120400	27,6	96,5	147800	27,6	96,5	134100	13700
16	13,8	96,7	104100	13,8	96,5	124500	13,8	96,6	114300	10200

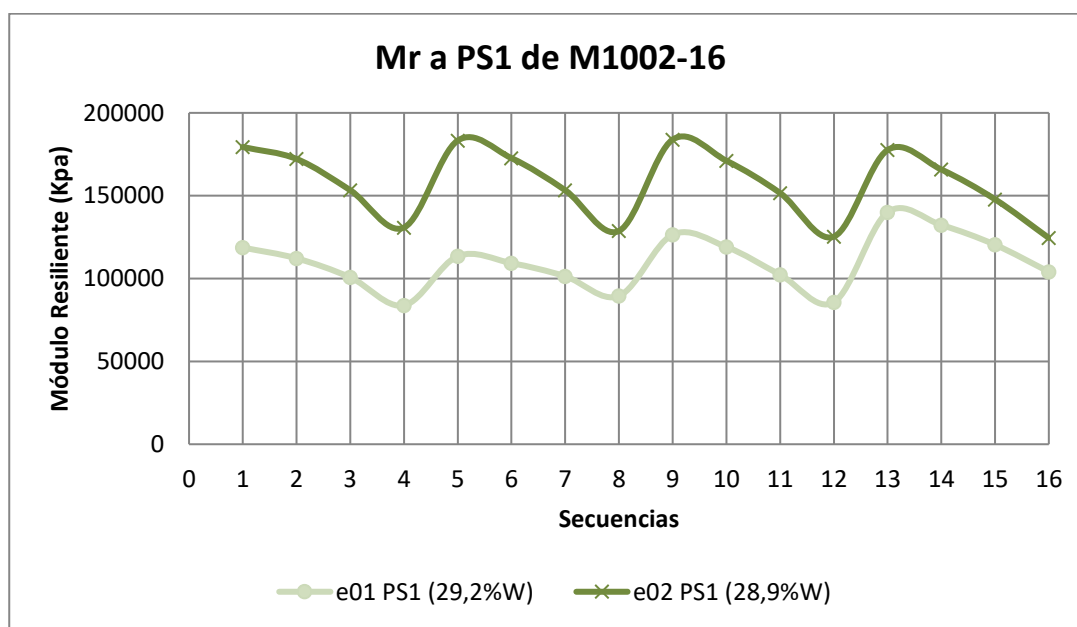


Figura A- 13. Mr obtenidos para las muestras de M 1002-16 ensayadas a PS1

Cuadro A- 11. Resultados ensayos de Mr de los especímenes de M1002-16 a (PS2), promedio de datos y desviación estándar (SD).

M-1002-16 (PS2)										
Sec	Especimen 1			Especimen 2			Promedio			
	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	SD
1	55,2	27,6	100000	55,2	27,5	85800	55,2	27,6	92900	SD
2	41,4	27,6	89800	41,4	27,6	82500	41,4	27,6	86150	3650
3	27,6	27,7	82900	27,6	27,7	77600	27,6	27,7	80250	2650
4	13,8	27,6	70100	13,8	27,6	71400	13,8	27,6	70750	650
5	55,2	48,4	95500	55,2	48,4	96300	55,2	48,4	95900	400
6	41,4	48,3	91100	41,4	48,3	92200	41,4	48,3	91650	550
7	27,6	48,4	84000	27,6	48,2	70500	27,6	48,3	77250	6750
8	13,8	48,3	73300	13,8	48,3	65700	13,8	48,3	69500	3800
9	55,2	68,8	99700	55,2	68,8	82700	55,2	68,8	91200	8500
10	41,4	68,9	94600	41,4	69,1	80500	41,4	69,0	87550	7050
11	27,6	68,9	87900	27,6	68,9	78000	27,6	68,9	82950	4950
12	13,8	69	80800	13,8	68,9	76900	13,8	69,0	78850	1950
13	55,2	96,6	111500	55,2	96,8	97600	55,2	96,7	104550	6950
14	41,4	96,6	108500	41,4	96,6	94900	41,4	96,6	101700	6800
15	27,6	96,6	103200	27,6	96,5	91000	27,6	96,6	97100	6100
16	13,8	96,6	95900	13,8	96,6	87600	13,8	96,6	91750	4150

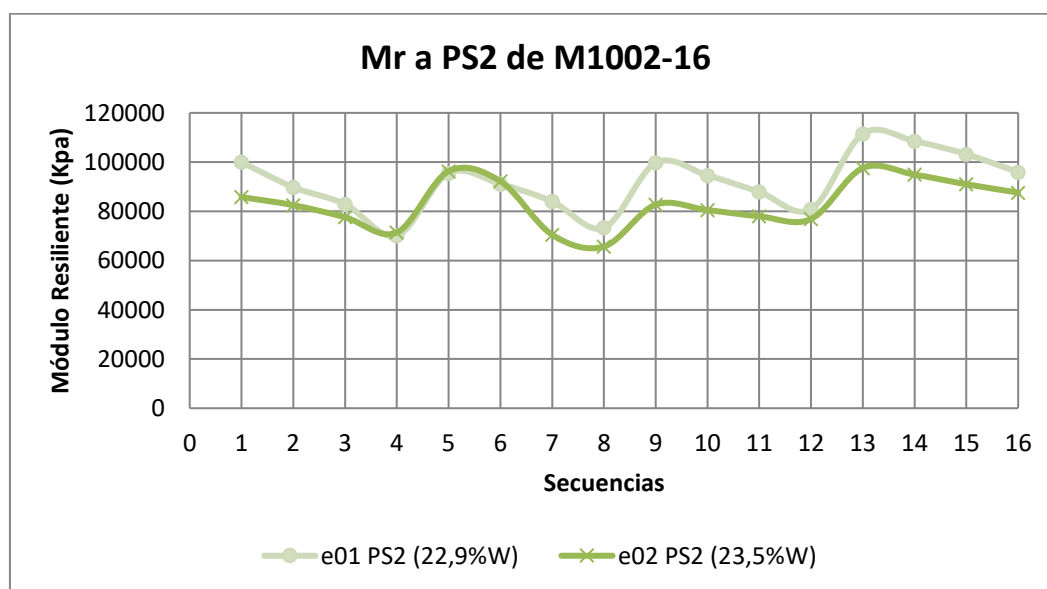


Figura A- 14. Mr obtenidos para las muestras de M 1002-16 ensayadas a PS2

Empalme (M 1189-18)

Cuadro A- 12. Resultados ensayos de Mr de los especímenes de M1189-18 a (Wopt), promedio de datos y desviación estándar (SD).

M-1189-18 (Wopt)										
Sec	Especímen 1			Especímen 2			Promedio			
	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	SD
1	55,2	27,6	59500	55,2	27,7	87400	55,2	27,7	73450	13950
2	41,4	27,7	54800	41,4	27,7	79100	41,4	27,7	66950	12150
3	27,6	27,7	48900	27,6	27,7	69800	27,6	27,7	59350	10450
4	13,8	27,7	48900	13,8	27,6	60500	13,8	27,7	54700	5800
5	55,2	48,4	58100	55,2	48,3	82900	55,2	48,4	70500	12400
6	41,4	48,2	57300	41,4	48,3	76800	41,4	48,3	67050	9750
7	27,6	48,3	56600	27,6	48,2	68200	27,6	48,3	62400	5800
8	13,8	48,3	55800	13,8	48,3	57900	13,8	48,3	56850	1050
9	55,2	69	66100	55,2	69,0	80100	55,2	69,0	73100	7000
10	41,4	69	64900	41,3	69,0	74300	41,4	69,0	69600	4700
11	27,6	69	62100	27,6	69,0	66300	27,6	69,0	64200	2100
12	13,8	69	58500	13,8	68,9	56300	13,8	69,0	57400	1100
13	55,1	96,7	71500	55,2	96,6	77400	55,2	96,7	74450	2950
14	41,4	96,4	69000	41,4	96,6	71700	41,4	96,5	70350	1350
15	27,6	96,7	65600	27,6	96,6	64200	27,6	96,7	64900	700
16	13,8	96,5	61000	13,8	96,6	54900	13,8	96,6	57950	3050

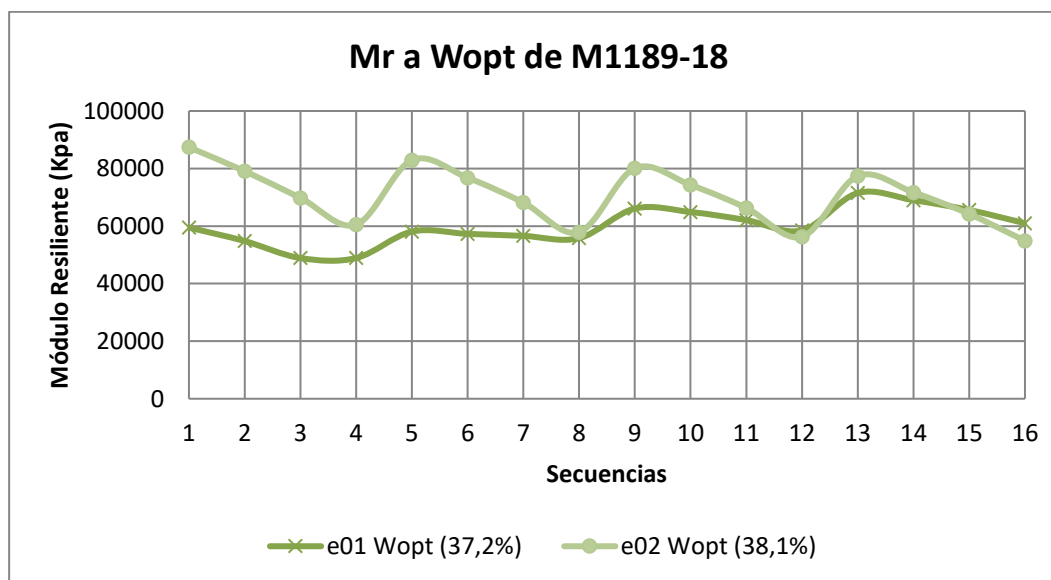


Figura A- 15. Mr obtenidos para las muestras de M 1189-18 ensayadas a Wopt

Cuadro A- 13. Resultados ensayos de Mr de los especímenes de M1189-18 a (PH1), promedio de datos y desviación estándar (SD).

M-1189-18 (PH1)										
Sec	Especímen 1			Especímen 2			Promedio			
	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	SD
1	55,2	27,6	52100	55,2	27,6	55500	55,2	27,6	53800	1700
2	41,4	27,5	44100	41,4	27,6	47500	41,4	27,6	45800	1700
3	27,6	27,7	33600	27,6	27,5	38200	27,6	27,6	35900	2300
4	13,8	27,5	25600	13,8	27,7	29900	13,8	27,6	27750	2150
5	55,2	48,3	46000	55,2	48,3	49000	55,2	48,3	47500	1500
6	41,4	48,3	40000	41,4	48,4	42600	41,4	48,4	41300	1300
7	27,6	48,3	31600	27,6	48,3	34600	27,6	48,3	33100	1500
8	13,8	48,2	24600	13,8	48,3	26900	13,8	48,3	25750	1150
9	55,2	69	42700	55,2	69,0	45200	55,2	69,0	43950	1250
10	41,4	68,9	37200	41,4	69,0	39600	41,4	69,0	38400	1200
11	27,6	69,1	30400	27,6	69,1	32800	27,6	69,1	31600	1200
12	13,8	69	23700	13,8	69,1	25600	13,8	69,1	24650	950
13	55,2	96,7	40500	55,2	96,6	42900	55,2	96,7	41700	1200
14	41,4	96,6	35300	41,4	96,7	37800	41,4	96,7	36550	1250
15	27,6	96,6	29400	27,6	96,7	31900	27,6	96,7	30650	1250
16	13,8	96,6	23600	13,8	96,7	25500	13,8	96,7	24550	950

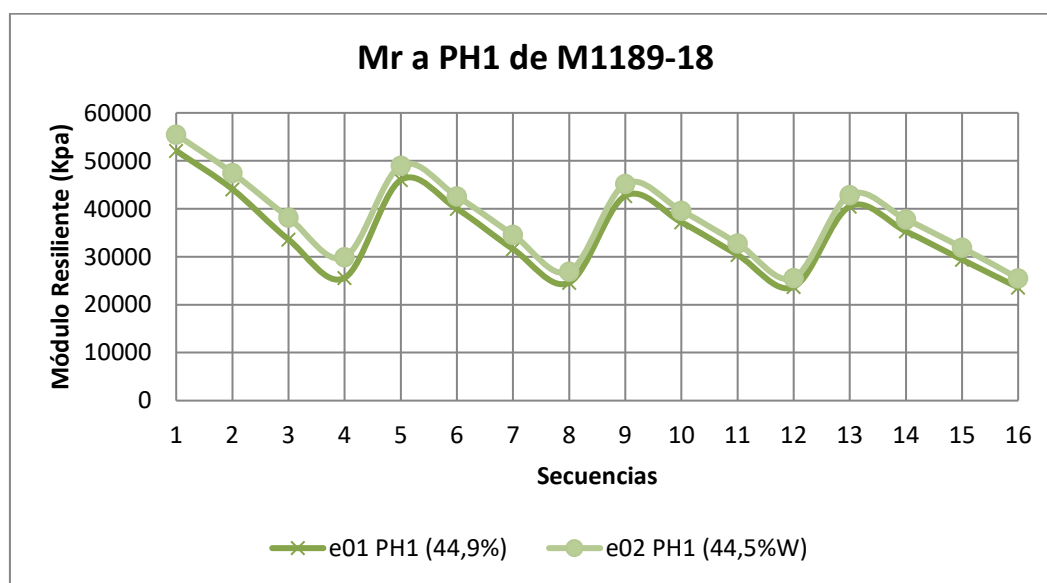


Figura A- 16. Mr obtenidos para las muestras de M 1189-18 ensayadas a PH1

Cuadro A- 14. Resultados ensayos de Mr de los especímenes de M1189-18 a (PH2) promedio de datos y desviación estándar (SD).

M-1189-18 (PH2)										
Sec	Especímen 1			Especímen 2			Promedio			
	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	SD
1	55,2	27,6	57400	55,2	27,6	51400	55,2	27,6	54400	3000
2	41,4	27,5	49400	41,4	27,6	47200	41,4	27,6	48300	1100
3	27,6	27,7	38900	27,6	27,6	37000	27,6	27,7	37950	950
4	13,8	27,5	27900	13,8	27,7	27200	13,8	27,6	27550	350
5	55,2	48,4	52700	55,2	48,5	50900	55,2	48,5	51800	900
6	41,4	48,3	45800	41,4	48,3	43900	41,4	48,3	44850	950
7	27,6	48,3	37000	27,6	48,4	35300	27,6	48,4	36150	850
8	13,8	48,2	27900	13,8	48,3	26900	13,8	48,3	27400	500
9	55,2	69,1	50700	55,2	68,9	48900	55,2	69,0	49800	900
10	41,4	68,9	44500	41,4	69,0	43000	41,4	69,0	43750	750
11	27,6	68,9	36800	27,6	68,9	35200	27,6	68,9	36000	800
12	13,8	69	28500	13,8	69,0	27500	13,8	69,0	28000	500
13	55,2	96,7	49300	55,2	96,6	48000	55,2	96,7	48650	650
14	41,4	96,5	43600	41,4	96,6	42300	41,4	96,6	42950	650
15	27,6	96,5	36800	27,6	96,5	35300	27,6	96,5	36050	750
16	13,8	96,8	29500	13,8	96,6	28400	13,8	96,7	28950	550

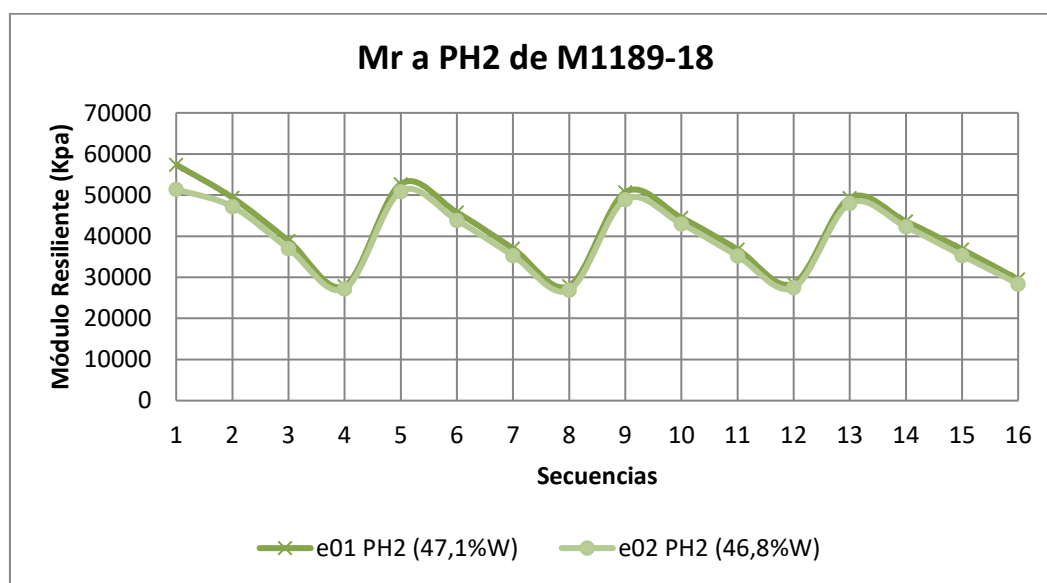


Figura A- 17. Mr obtenidos para las muestras de M 1189-18 ensayadas a PH2

Cuadro A- 15. Resultados ensayos de Mr de los especímenes de M1189-18 a (PS1), promedio de datos y desviación estándar (SD).

M-1189-18 (PS1)										
Sec	Especimen 1			Especimen 2			Promedio			
	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	SD
1	55,2	27,6	191700	55,2	27,7	206500	55,2	27,7	199100	7400
2	41,4	27,7	180500	41,4	27,7	191000	41,4	27,7	185750	5250
3	27,6	27,6	162000	27,6	27,5	165600	27,6	27,6	163800	1800
4	13,8	27,5	140600	13,8	27,5	130300	13,8	27,5	135450	5150
5	55,2	48,3	200100	55,2	48,3	186200	55,2	48,3	193150	6950
6	41,4	48,1	189300	41,4	48,3	175700	41,4	48,2	182500	6800
7	27,6	48,2	171200	27,6	48,3	156400	27,6	48,3	163800	7400
8	13,8	48,3	146500	13,8	48,3	128100	13,8	48,3	137300	9200
9	55,2	68,9	191700	55,2	69,0	174900	55,2	69,0	183300	8400
10	41,4	69	184400	41,4	69,2	165800	41,4	69,1	175100	9300
11	27,6	68,9	169000	27,6	69,1	149700	27,6	69,0	159350	9650
12	13,8	69	147100	13,8	69,1	126400	13,8	69,1	136750	10350
13	55,2	96,6	180900	55,2	96,5	165500	55,2	96,6	173200	7700
14	41,4	96,6	174100	41,4	96,6	156300	41,4	96,6	165200	8900
15	27,6	96,6	162500	27,6	96,7	142700	27,6	96,7	152600	9900
16	13,8	96,8	144700	13,8	96,7	124200	13,8	96,8	134450	10250

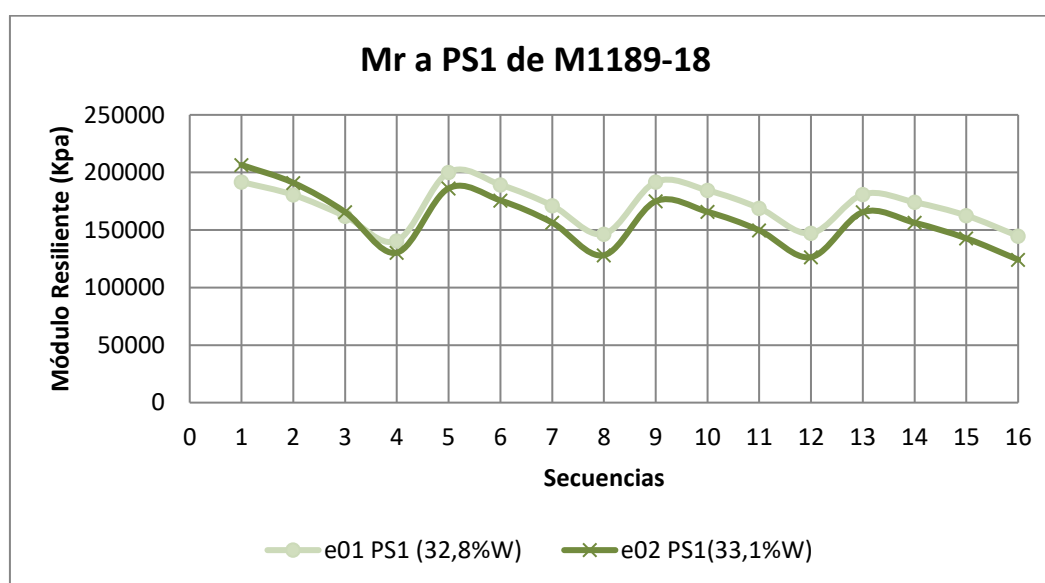


Figura A- 18. Mr obtenidos para las muestras de M 1189-18 ensayadas a PS1

Cuadro A- 16. Resultados ensayos de Mr de los especímenes de M1189-18 a (PS2), promedio de datos y desviación estándar (SD).

M-1189-18 (PS2)										
Sec	Especímen 1			Especímen 2			Promedio			
	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	SD
1	55,2	27,5	169200	55,2	27,6	146200	55,2	27,6	157700	SD
2	41,4	27,6	166000	41,4	27,7	140400	41,4	27,7	153200	12800
3	27,6	27,6	156600	27,6	27,6	129100	27,6	27,6	142850	13750
4	13,8	27,6	147900	13,8	27,6	119000	13,8	27,6	133450	14450
5	55,2	48,2	181800	55,2	48,3	156400	55,2	48,3	169100	12700
6	41,4	48,3	176400	41,4	48,3	148500	41,4	48,3	162450	13950
7	27,6	48,3	166500	27,6	48,3	138500	27,6	48,3	152500	14000
8	13,8	48,3	152500	13,8	48,3	126200	13,8	48,3	139350	13150
9	55,2	68,9	183800	55,2	69,1	162800	55,2	69,0	173300	10500
10	41,4	69,1	178300	41,4	69,0	155700	41,4	69,1	167000	11300
11	27,6	69	167600	27,6	68,9	144900	27,6	69,0	156250	11350
12	13,8	69	153900	13,8	68,9	132400	13,8	69,0	143150	10750
13	55,2	96,5	183900	55,2	96,6	168500	55,2	96,6	176200	7700
14	41,4	96,7	177900	41,4	96,4	161600	41,4	96,6	169750	8150
15	27,6	96,6	167900	27,6	96,7	152600	27,6	96,7	160250	7650
16	13,8	96,6	155400	13,8	96,6	139800	13,8	96,6	147600	7800

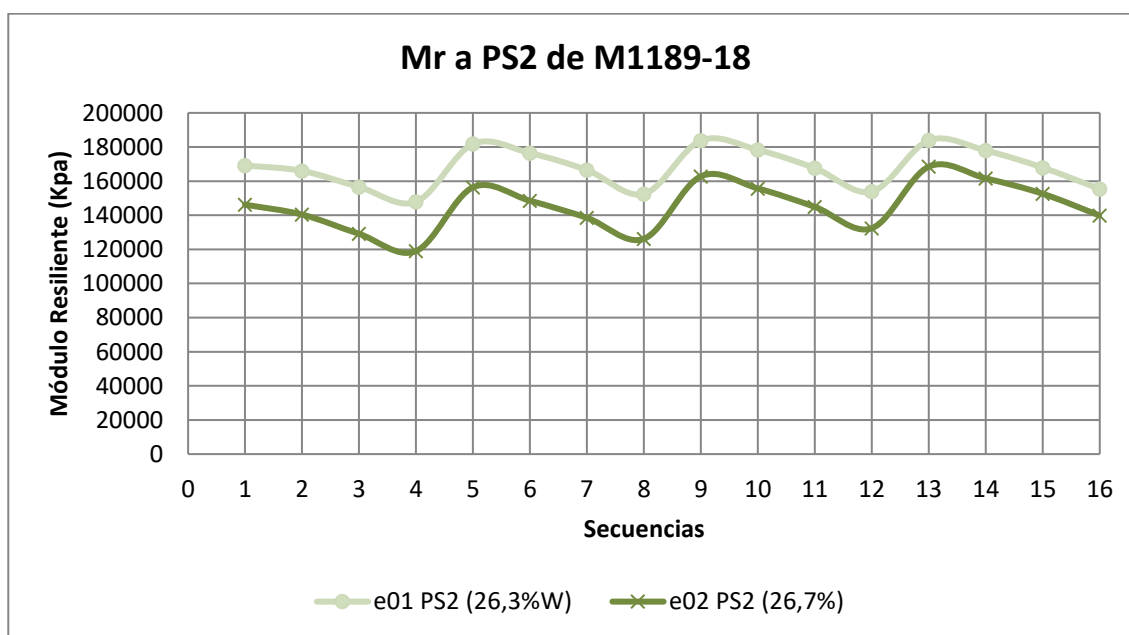


Figura A- 19. Mr obtenidos para las muestras de M 1189-18 ensayadas a PS2

Montes de Oro (M 1397-18)

Cuadro A- 17. Resultados ensayos de Mr de los especímenes de M 1397-18 a (Wopt), promedio de datos y desviación estándar (SD).

M-1397-18 (Wopt)										
Sec	Especimen 1			Especimen 2			Promedio			
	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	SD
1	55,2	27,6	67700	55,2	27,6	71000	55,2	27,6	69350	1650
2	41,4	27,6	59000	41,4	27,6	63000	41,4	27,6	61000	2000
3	27,6	27,6	49500	27,6	27,6	53300	27,6	27,6	51400	1900
4	13,8	27,6	39300	13,8	27,6	44300	13,8	27,6	41800	2500
5	55,2	48,3	61300	55,2	48,2	63900	55,2	48,3	62600	1300
6	41,4	48,3	54700	41,4	48,3	57500	41,4	48,3	56100	1400
7	27,6	48,3	46500	27,6	48,3	49500	27,6	48,3	48000	1500
8	13,8	48,3	37300	13,8	48,3	40900	13,8	48,3	39100	1800
9	55,2	68,8	57100	55,2	68,9	59100	55,2	68,9	58100	1000
10	41,4	69,1	51100	41,4	69,0	53400	41,4	69,1	52250	1150
11	27,6	69	44000	27,6	69,0	46400	27,6	69,0	45200	1200
12	13,8	69,1	35500	13,8	69,0	38600	13,8	69,1	37050	1550
13	55,2	96,7	54100	55,2	96,6	55400	55,2	96,7	54750	650
14	41,4	96,6	48500	41,4	96,5	50100	41,4	96,6	49300	800
15	27,6	96,6	42000	27,6	96,7	43900	27,6	96,7	42950	950
16	13,8	96,5	34500	13,8	96,5	37000	13,8	96,5	35750	1250

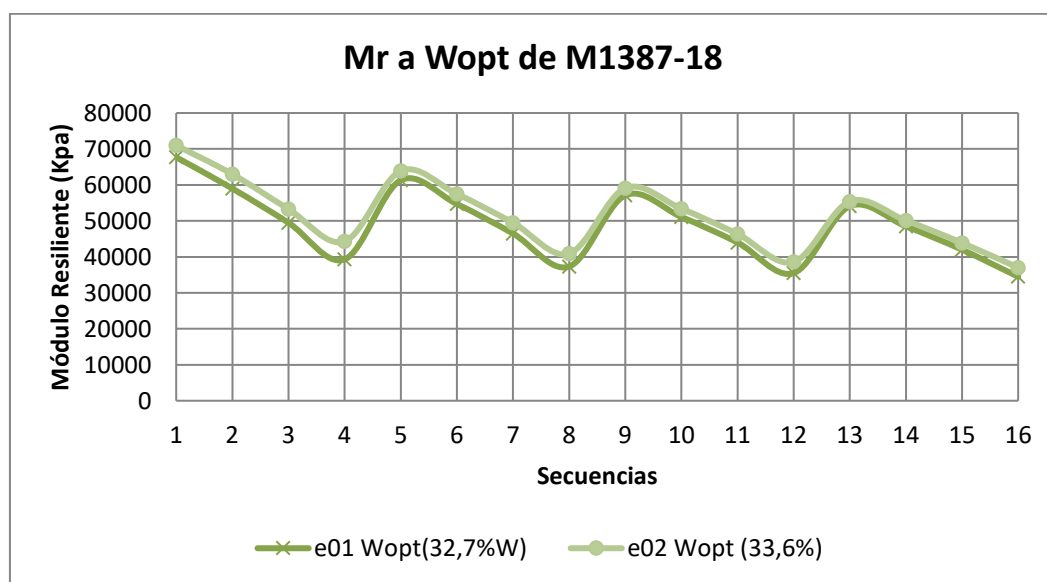


Figura A- 20. Mr obtenidos para las muestras de M 1397-18 ensayadas a Wopt

Cuadro A- 18. Resultados ensayos de Mr de los especímenes de M 1397-18 a (PH1), promedio de datos y desviación estándar (SD).

M-1397-18 (PH1)										
Sec	Especímen 1			Especímen 2			Promedio			
	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	SD
1	55,2	27,6	58100	55,2	27,6	58500	55,2	27,6	58300	200
2	41,4	27,5	49800	41,4	27,6	50200	41,4	27,6	50000	200
3	27,6	27,6	40100	27,6	27,6	40300	27,6	27,6	40200	100
4	13,8	27,6	31800	13,8	27,6	32300	13,8	27,6	32050	250
5	55,2	48,4	53500	55,2	48,2	52300	55,2	48,3	52900	600
6	41,4	48,3	46400	41,4	48,2	45500	41,4	48,3	45950	450
7	27,6	48,3	38300	27,6	48,4	37900	27,6	48,4	38100	200
8	13,8	48,3	30300	13,8	48,3	30100	13,8	48,3	30200	100
9	55,2	69	50400	55,2	68,9	48900	55,2	69,0	49650	750
10	41,4	69	44200	41,4	69,0	42800	41,4	69,0	43500	700
11	27,6	69	37100	27,6	69,0	36000	27,6	69,0	36550	550
12	13,8	69	29400	13,8	69,0	28600	13,8	69,0	29000	400
13	55,2	96,6	48200	55,2	96,8	46700	55,2	96,7	47450	750
14	41,4	96,5	42500	41,4	96,6	41000	41,4	96,6	41750	750
15	27,6	96,7	36100	27,6	96,5	34800	27,6	96,6	35450	650
16	13,8	96,6	28900	13,8	96,6	28100	13,8	96,6	28500	400

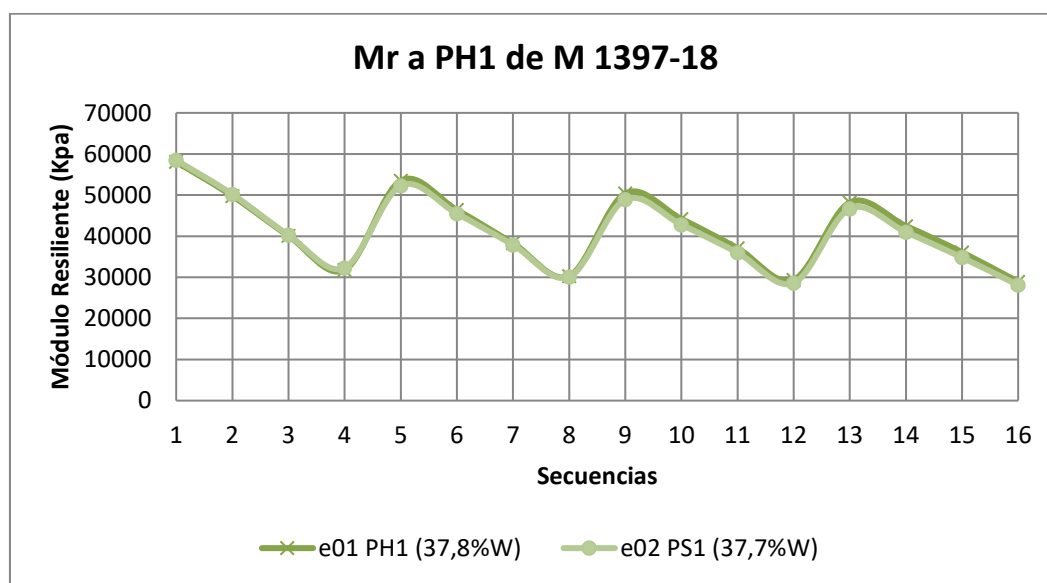


Figura A- 21. Mr obtenidos para las muestras de M 1397-18 ensayadas a PH1

Cuadro A- 19. Resultados ensayos de Mr de los especímenes de M 1397-18 a (PH2), promedio de datos y desviación estándar (SD).

M-1397-18 (PH2)										
Sec	Especimen 1			Especimen 2			Promedio			
	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	SD
1	55,2	27,6	29900	55,2	27,6	34000	55,2	27,6	31950	2050
2	41,4	27,6	23300	41,4	27,6	26000	41,4	27,6	24650	1350
3	27,6	27,5	17000	27,6	27,5	18300	27,6	27,5	17650	650
4	13,8	27,5	12500	13,8	27,5	13000	13,8	27,5	12750	250
5	55,2	48,3	28200	55,2	48,4	32600	55,2	48,4	30400	2200
6	41,4	48,4	22900	41,4	48,4	26100	41,4	48,4	24500	1600
7	27,6	48,2	17900	27,6	48,2	19700	27,6	48,2	18800	900
8	13,8	48,3	13800	13,8	48,2	14900	13,8	48,3	14350	550
9	55,2	69	27800	55,2	69,0	32700	55,2	69,0	30250	2450
10	41,4	69,1	23200	41,4	68,9	26800	41,4	69,0	25000	1800
11	27,6	68,9	18600	27,6	68,9	21100	27,6	68,9	19850	1250
12	13,8	69,1	14700	13,8	68,8	16200	13,8	69,0	15450	750
13	55,2	96,6	27600	55,2	96,5	32600	55,2	96,6	30100	2500
14	41,4	96,6	23400	41,4	96,5	27500	41,4	96,6	25450	2050
15	27,6	96,4	19500	27,6	96,6	22400	27,6	96,5	20950	1450
16	13,8	97	16000	13,8	96,7	17800	13,8	96,9	16900	900

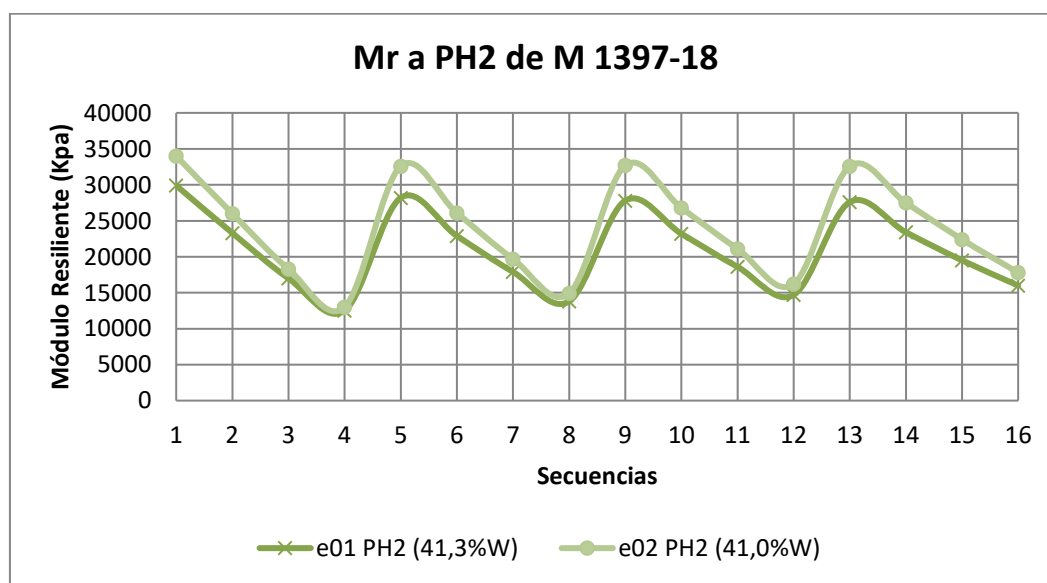


Figura A- 22. Mr obtenidos para las muestras de M 1397-18 ensayadas a PH2

Cuadro A- 20. Resultados ensayos de Mr de los especímenes de M 1397-18 a (PS1), promedio de datos y desviación estándar (SD).

M-1397-18 (PS1)										
Sec	Especímen 1			Especímen 2			Promedio			
	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	SD
1	55,2	27,6	156700	55,2	27,6	115200	55,2	27,6	135950	20750
2	41,4	27,5	147100	41,4	27,7	108900	41,4	27,6	128000	19100
3	27,6	27,7	133700	27,6	27,7	97500	27,6	27,7	115600	18100
4	13,8	27,6	115900	13,8	27,7	84000	13,8	27,7	99950	15950
5	55,2	48,3	148700	55,2	48,2	112200	55,2	48,3	130450	18250
6	41,4	48,4	141400	41,4	48,4	105600	41,4	48,4	123500	17900
7	27,6	48,3	129100	27,6	48,2	95400	27,6	48,3	112250	16850
8	13,8	48,4	112400	13,8	48,2	82400	13,8	48,3	97400	15000
9	55,2	69	141400	55,2	69,0	108900	55,2	69,0	125150	16250
10	41,4	69	133900	41,4	69,0	101700	41,4	69,0	117800	16100
11	27,6	69	123700	27,6	69,0	92100	27,6	69,0	107900	15800
12	13,8	69	109500	13,8	69,1	80300	13,8	69,1	94900	14600
13	55,2	96,7	135500	55,2	96,6	103600	55,2	96,7	119550	15950
14	41,4	96,7	128200	41,4	96,6	97000	41,4	96,7	112600	15600
15	27,6	96,6	118400	27,6	96,7	88600	27,6	96,7	103500	14900
16	13,8	96,6	106200	13,8	96,6	78000	13,8	96,6	92100	14100

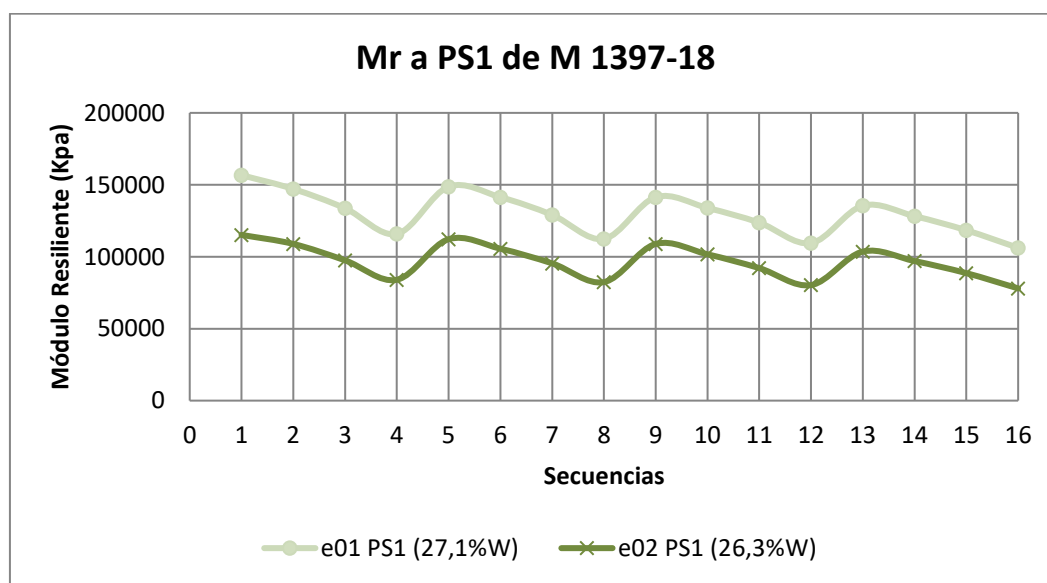


Figura A- 23. Mr obtenidos para las muestras de M 1397-18 ensayadas a PS1

Cuadro A- 21. Resultados ensayos de Mr de los especímenes de M 1397-18 a (PS2), promedio de datos y desviación estándar (SD).

M-1397-18 (PS2)										
Sec	Especimen 1			Especimen 2			Promedio			
	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	σ_{conf} (kPa)	σ_d (kPa)	Mr (kPa)	SD
1	55,2	27,7	85300	55,2	27,5	72700	55,2	27,6	79000	SD
2	41,4	27,7	80400	41,4	27,4	68600	41,4	27,6	74500	5900
3	27,6	27,6	73800	27,6	27,6	64500	27,6	27,6	69150	4650
4	13,8	27,5	64500	13,8	27,6	59800	13,8	27,6	62150	2350
5	55,2	48,3	93300	55,2	48,4	85600	55,2	48,4	89450	3850
6	41,4	48,3	87700	41,4	48,2	80000	41,4	48,3	83850	3850
7	27,6	48,2	82600	27,6	48,3	74600	27,6	48,3	78600	4000
8	13,8	48,3	73800	13,8	48,3	69000	13,8	48,3	71400	2400
9	55,2	69,1	98800	55,2	68,9	96900	55,2	69,0	97850	950
10	41,4	68,9	92900	41,4	69,0	91300	41,4	69,0	92100	800
11	27,6	69	86300	27,6	69,1	84400	27,6	69,1	85350	950
12	13,8	69	77800	13,8	69,0	77300	13,8	69,0	77550	250
13	55,2	96,6	105400	55,2	96,7	107400	55,2	96,7	106400	1000
14	41,4	96,7	99500	41,4	96,7	101200	41,4	96,7	100350	850
15	27,6	96,7	92600	27,6	96,7	93800	27,6	96,7	93200	600
16	13,8	96,7	83900	13,8	96,6	85900	13,8	96,7	84900	1000

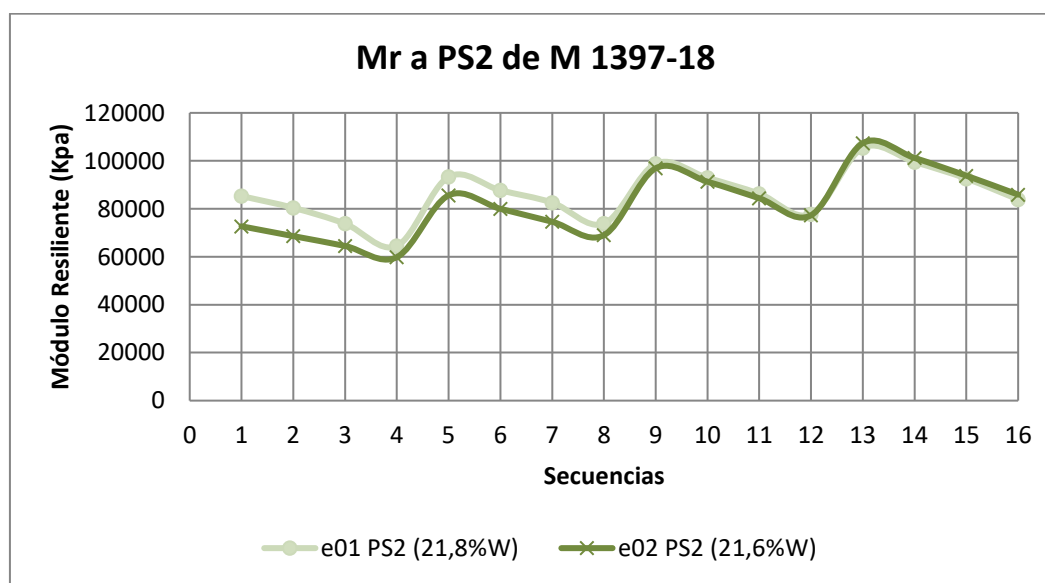


Figura A- 24. Mr obtenidos para las muestras de M 1397-18 ensayadas a PS2

Apéndice V. Resultados de ensayo de LWD

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de LWD con la masa 10kg y 15 kg durante 5 días para los tres suelos en estudio.

Finca 1(M 1002-16)

Cuadro A- 22. Datos generados en el ensayo de LWD (10kg) para M 1002-16

Caída	Día	%W	Radio (mm)	Carga (KN)	Esfuerzo (kPa)	Def. (Micron)	Eo (MPa)	Energía (Joule)
10 kg	1	41,27	150	4,3	60	948	15	1,492
			150	4,2	60	960	15	1,491
			150	4,2	59	960	15	1,451
	2	34,72	150	4,2	60	554	26	0,693
			150	4,3	60	557	26	0,676
			150	4,3	60	560	26	0,675
	3	33,00	150	4,1	58	559	25	0,769
			150	4,1	58	572	24	0,736
			150	4,1	58	569	24	0,726
	4	33,94	150	4,2	59	498	28	0,564
			150	4,2	59	494	28	0,561
			150	4,2	59	496	28	0,551
	5	34,65	150	4,1	58	258	54	0,281
			150	4,1	58	258	54	0,273
			150	4,1	58	258	54	0,276

Cuadro A- 23. Datos generados en el ensayo de LWD (15kg) para M 1002-16

Caída	Día	%W	Radio (mm)	Carga (KN)	Esfuerzo (kPa)	Def. 1 (Micron)	Eo (MPa)	Energía (Joule)
15 kg	1	41,27	150	5,7	81	1311	15	2,610
			150	5,7	81	1307	15	2,567
			150	5,7	81	1309	15	2,509
	2	33,94	150	5,9	83	823	24	1,396
			150	5,9	83	837	24	1,382
			150	5,9	83	847	24	1,396
	3	0,00	150	5,7	81	837	23	1,423
			150	5,8	82	865	23	1,408
			150	5,9	83	870	23	1,438
	4	0,00	150	5,7	81	736	26	1,163
			150	5,8	82	756	26	1,182
			150	5,9	83	765	26	1,192
	5	0,00	150	5,9	83	422	52	0,000
			150	5,8	83	426	51	0,000
			150	5,9	83	433	51	0,000

Empalme (M 1189-18)

Cuadro A- 24. Datos generados en el ensayo de LWD (10kg) para M 1189-18

Caída	Día	%W	Radio (mm)	Carga (KN)	Esfuerzo (kPa)	Def. 1 (Micron)	Eo (MPa)	Energía (Joule)
10 kg	1	51,14	150	4,2	60	1451	10	2,536
			150	4,3	60	1428	10	2,355
			150	4,3	61	1434	10	2,424
	2	49,35	150	4,8	68	448	36	0,657
			150	4,2	60	429	33	0,599
			150	4,2	60	427	34	0,583
	3	46,86	150	4,1	59	324	43	0,444
			150	4,1	58	323	43	0,433
			150	4,1	58	321	43	0,422
	4	44,55	150	4,2	59	308	46	0,411
			150	4,2	59	311	46	0,417
			150	4,2	59	305	46	0,396
	5	45,12	150	4,2	59	336	42	0,409
			150	4,1	59	333	42	0,396
			150	4,2	59	331	42	0,385

Cuadro A- 25. Datos generados en el ensayo de LWD (15kg) para M 1189-18

Caída	Día	%W	Radio (mm)	Carga (KN)	Esfuerzo (kPa)	Def. 1 (Micron)	Eo (MPa)	Energía (Joule)
15 kg	1	51,14	150	5,8	82	1354	14	3,053
			150	5,8	82	1164	17	2,340
			150	5,8	82	1272	15	2,711
	2	44,55	150	5,9	83	679	29	1,362
			150	5,9	84	676	30	1,283
			150	5,9	84	680	29	1,253
	3	0,00	150	5,8	83	502	39	0,982
			150	6	84	514	39	1,006
			150	6	85	514	39	0,987
	4	0,00	150	5,9	84	494	41	0,949
			150	5,9	84	489	41	0,916
			150	5,9	84	486	41	0,902
	5	0,00	150	5,9	83	511	39	0,902
			150	5,9	83	506	40	0,860
			150	5,9	84	504	40	0,841

Montes de Oro (M 1397-18)

Cuadro A- 26. Datos generados en el ensayo de LWD (10kg) para M 1397-18

Caída	Día	%W	Radio (mm)	Carga (KN)	Esfuerzo (kPa)	Def. 1 (Micron)	Eo (MPa)	Energía (Joule)
10 kg	1	33,62	150	4,3	61	258	57	0,338
			150	4,4	62	262	56	0,331
			150	4,4	62	259	57	0,318
	2	35,30	150	4,5	64	221	69	0,272
			150	4,6	65	219	71	0,235
			150	4,5	64	219	70	0,266
	3	35,02	150	4,2	59	226	63	0,264
			150	4,2	59	224	63	0,264
			150	4,2	59	225	63	0,258
	4	33,96	150	4,2	60	206	69	0,247
			150	4,1	58	205	68	0,240
			150	4,1	58	206	68	0,243
	5	33,91	150	4,1	59	304	46	0,350
			150	4,2	59	306	46	0,341
			150	4,2	59	307	46	0,333

Cuadro A- 27. Datos generados en el ensayo de LWD (15kg) para M 1397-18

Caída	Día	%W	Radio (mm)	Carga (KN)	Esfuerzo (kPa)	Def. 1 (Micron)	Eo (MPa)	Energía (Joule)
15 kg	1	33,62	150	6,0	85	401	51	0,645
			150	6,0	85	402	51	0,648
			150	6,0	85	401	51	0,639
	2	33,96	150	6,1	86	325	63	0,540
			150	6,1	86	328	63	0,535
			150	6,1	86	330	62	0,534
	3	0,00	150	5,9	84	337	60	0,544
			150	6	85	342	59	0,543
			150	6	85	341	59	0,533
	4	0,00	150	5,9	83	318	63	0,500
			150	5,9	83	318	63	0,498
			150	5,9	83	319	62	0,493
	5	0,00	150	5,9	84	453	44	0,703
			150	5,9	84	453	44	0,689
			150	5,9	84	452	44	0,683

Apéndice VI. Resultados de las calibraciones de MU para Mr

Finca 2 M 1002-16

Para los resultados de Mr en estado óptimo de finca 2 y el Modelo Universal se obtuvieron los siguientes resultados de la regresión lineal múltiple.

Cuadro A- 28. Resultado de la regresión lineal múltiple para el Mr de M 1002-16 en Wopt

Estadísticas de la regresión					
Coeficiente de correlación múltiple		0,985			
Coeficiente de determinación R ²		0,970			
R ² ajustado		0,968			
Error típico		0,018			
Observaciones		32			
Análisis de varianza					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,303400	0,151700	464,593083	9,41342E-23
Residuos	29	0,009469	0,000327		
Total	31	0,312869			
	Coeficientes		Error típico	Estadístico t	Valor p
log (K1)	2,788		0,00899	310,03	1,32E-52
K2	0,609		0,02353	25,87	1,38E-21
K3	-2,411		0,09069	-26,58	6,51E-22

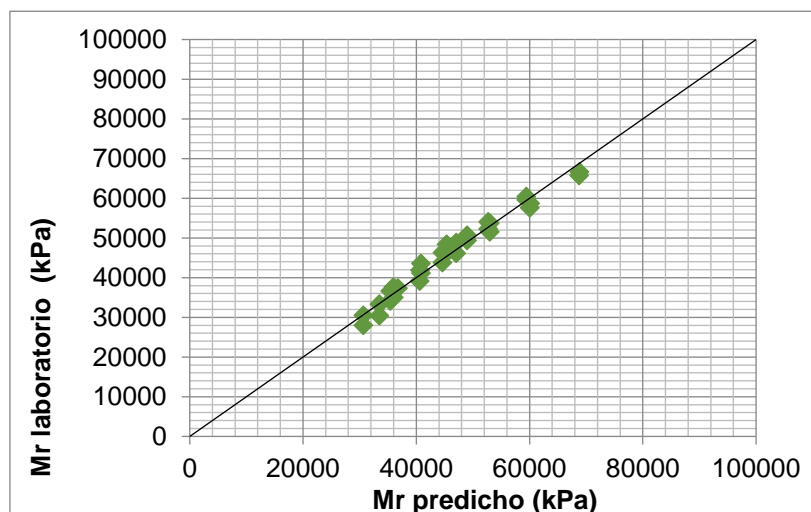


Figura A- 25. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1002-16 a Wopt

Cuadro A- 29 Resultado de la regresión lineal múltiple para el Mr de M 1002-16 en PH1

Estadísticas de la regresión					
Coeficiente de correlación múltiple		0,916			
Coeficiente de determinación R ²		0,840			
R ² ajustado		0,829			
Error típico		0,049			
Observaciones		32			
Análisis de varianza					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,365103	0,182551	76,0782598	2,90395E-12
Residuos	29	0,069586	0,002400		
Total	31	0,434689			
	Coeficientes		Error típico	Estadístico t	Valor p
log (K1)	2,309		0,02431	94,97	1,01E-37
K2	0,786		0,06380	12,32	4,80E-13
K3	-1,305		0,24494	-5,33	1,02E-05

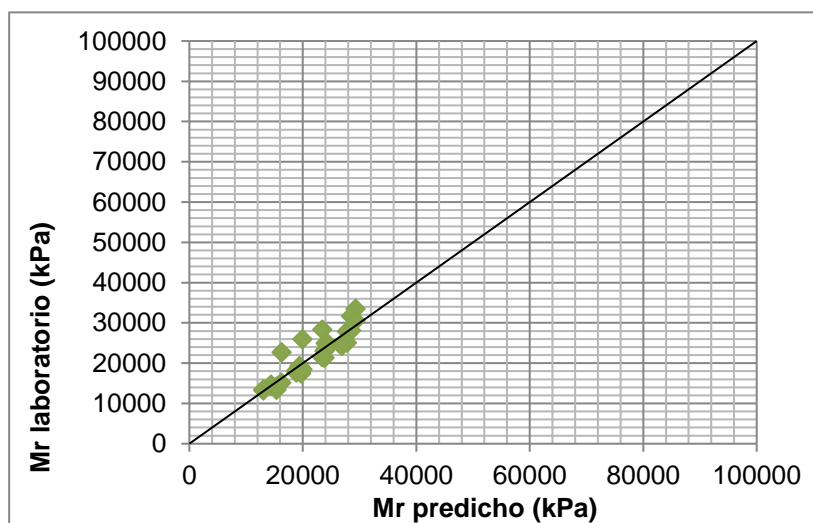


Figura A- 26. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1002-16 a PH1

Cuadro A- 30. Resultado de la regresión lineal múltiple para el Mr de M 1002-16 en PH2

Estadísticas de la regresión					
Coeficiente de correlación múltiple		0,848			
Coeficiente de determinación R ²		0,719			
R ² ajustado		0,700			
Error típico		0,059			
Observaciones		32			
Análisis de varianza					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,259490	0,129745	37,1279013	1,00696E-08
Residuos	29	0,101342	0,003495		
Total	31	0,360831			
	Coeficientes		Error típico	Estadístico t	Valor p
log (K1)	2,203		0,02930	75,19	8,56E-35
K2	0,655		0,07709	8,49	2,35E-09
K3	-0,817		0,29420	-2,78	9,47E-03

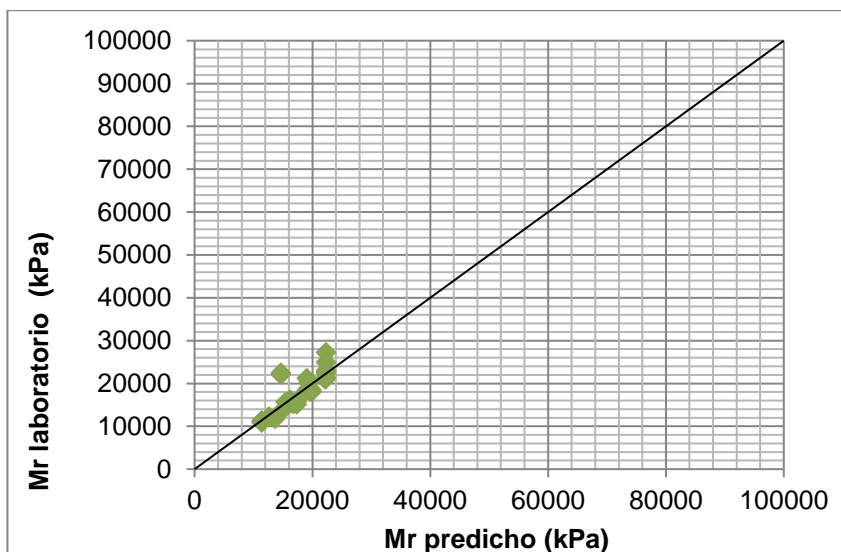


Figura A- 27. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1002-16 a PH2

Cuadro A- 31. Resultado de la regresión lineal múltiple para el Mr de M 1002-16 en PS1

Estadísticas de la regresión					
Coeficiente de correlación múltiple		0,581			
Coeficiente de determinación R ²		0,337			
R ² ajustado		0,291			
Error típico		0,085			
Observaciones		32			
Análisis de varianza					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,106176	0,053088	7,37714089	0,002570235
Residuos	29	0,208693	0,007196		
Total	31	0,314869			
	Coeficientes		Error típico	Estadístico t	Valor p
log (K1)	3,075		0,04138	74,31	1,20E-34
K2	0,394		0,10863	3,62	1,10E-03
K3	-0,345		0,43233	-0,80	4,31E-01

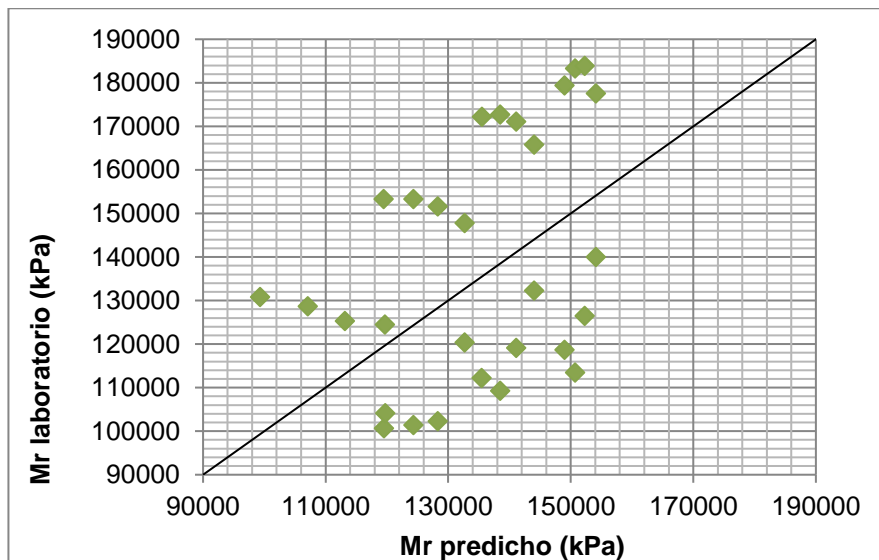


Figura A- 28. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1002-16 a PS1

Cuadro A- 32. Resultado de la regresión lineal múltiple para el Mr de M 1002-16 en PS2

Estadísticas de la regresión					
Coeficiente de correlación múltiple		0,823			
Coeficiente de determinación R ²		0,677			
R ² ajustado		0,654			
Error típico		0,034			
Observaciones		32			
Análisis de varianza					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,069056	0,034528	30,3281795	7,8045E-08
Residuos	29	0,033016	0,001138		
Total	31	0,102072			
	Coeficientes		Error típico	Estadístico t	Valor p
log (K1)	2,861		0,01679	170,37	4,52E-45
K2	0,271		0,04394	6,16	1,03E-06
K3	0,206		0,16937	1,22	2,33E-01

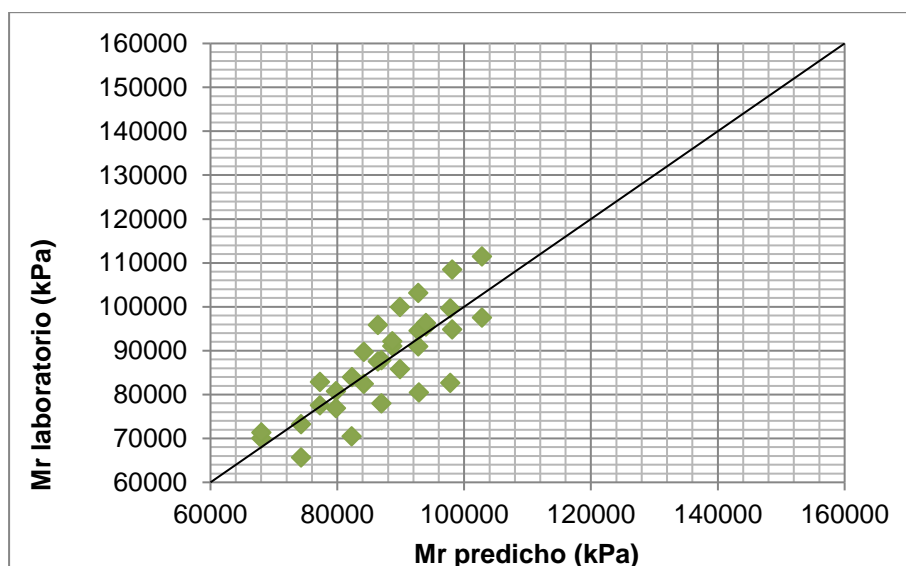


Figura A- 29. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1002-16 a PS2

Cuadro A- 33. Regresión lineal para Mr con humedad variable del suelo M1002-16

Estadísticas de la regresión					
Coeficiente de correlación múltiple			0,948		
Coeficiente de determinación R ²			0,899		
R ² ajustado			0,897		
Error típico			0,116		
Observaciones			128		
Análisis de varianza					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	15,010365	5,003455	369,732791	1,19327E-61
Residuos	124	1,678045	0,013533		
Total	127	16,688411			
	Coeficientes		Error típico	Estadístico t	Valor p
log (K1)	2,543		0,02882	88,25	9,08E-114
K2	0,594		0,07542	7,88	1,46E-12
K3	-1,228		0,29211	-4,20	5,00E-05
K4	-8,232		0,25421	-32,38	2,40E-62

Empalme (M 1189-18)

A continuación, se muestran los ajustes de Mr para cada caso de humedad empleando el MU para la muestra de suelo del Empalme.

Cuadro A- 34. Resultado de la regresión lineal múltiple para el Mr de M 1189-18 en Wopt

Estadísticas de la regresión					
Coeficiente de correlación múltiple		0,641			
Coeficiente de determinación R ²		0,410			
R ² ajustado		0,370			
Error típico		0,051			
Observaciones		32			
Análisis de varianza					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,053312	0,026656	10,0942799	0,000470697
Residuos	29	0,076580	0,002641		
Total	31	0,129892			
	Coeficientes		Error típico	Estadístico t	Valor p
log (K1)	2,778		0,02560	108,51	2,13E-39
K2	0,289		0,06694	4,32	1,66E-04
K3	-0,257		0,25816	-1,00	3,28E-01

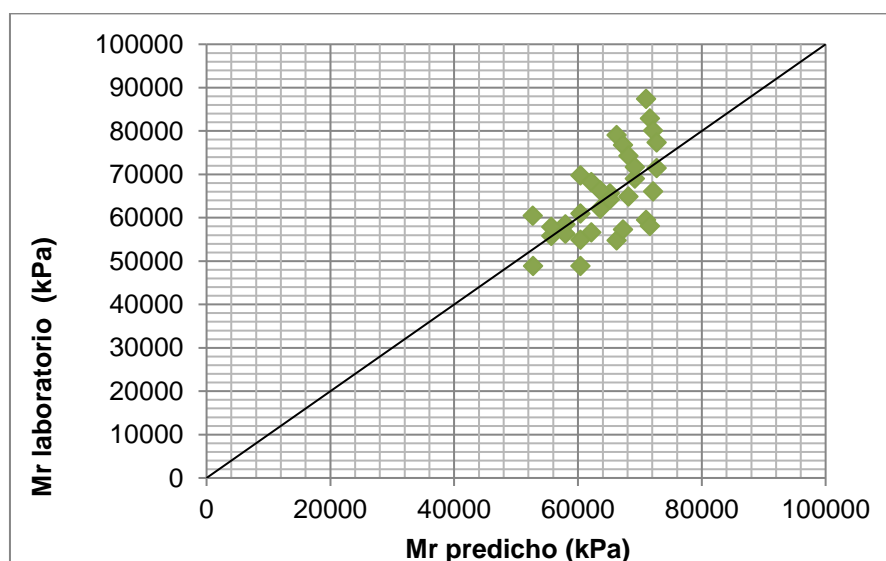


Figura A- 30. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1189-18 a Wopt

Cuadro A- 35. Resultado de la regresión lineal múltiple para el Mr de M 1189-18 en PH1

Estadísticas de la regresión					
Coeficiente de correlación múltiple		0,976			
Coeficiente de determinación R ²		0,952			
R ² ajustado		0,948			
Error típico		0,024			
Observaciones		32			
Análisis de varianza					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,332937	0,166468	285,647747	8,28853E-20
Residuos	29	0,016900	0,000583		
Total	31	0,349837			
	Coeficientes		Error típico	Estadístico t	Valor p
log (K1)	2,632		0,01201	219,23	3,03E-48
K2	0,718		0,03144	22,82	4,45E-20
K3	-2,083		0,12106	-17,20	9,33E-17

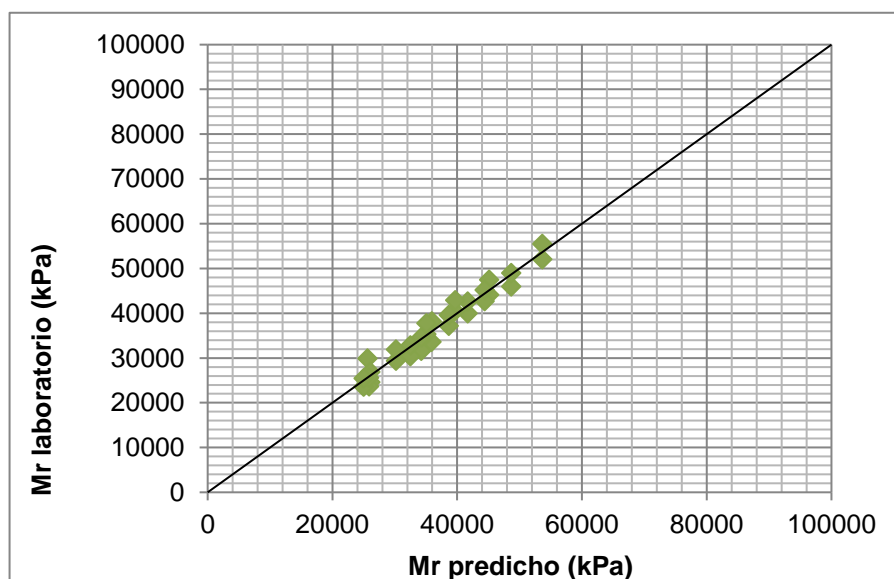


Figura A- 31. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1189-18 a PH1

Cuadro A- 36. Resultado de la regresión lineal múltiple para el Mr de M 1189-18 en PH2

Estadísticas de la regresión					
Coeficiente de correlación múltiple		0,989			
Coeficiente de determinación R ²		0,978			
R ² ajustado		0,977			
Error típico		0,016			
Observaciones		32			
Análisis de varianza					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,316821	0,158411	657,627876	6,94678E-25
Residuos	29	0,006986	0,000241		
Total	31	0,323807			
	Coeficientes		Error típico	Estadístico t	Valor p
log (K1)	2,619		0,00773	339,04	9,84E-54
K2	0,730		0,02021	36,13	1,15E-25
K3	-1,573		0,07792	-20,18	1,28E-18

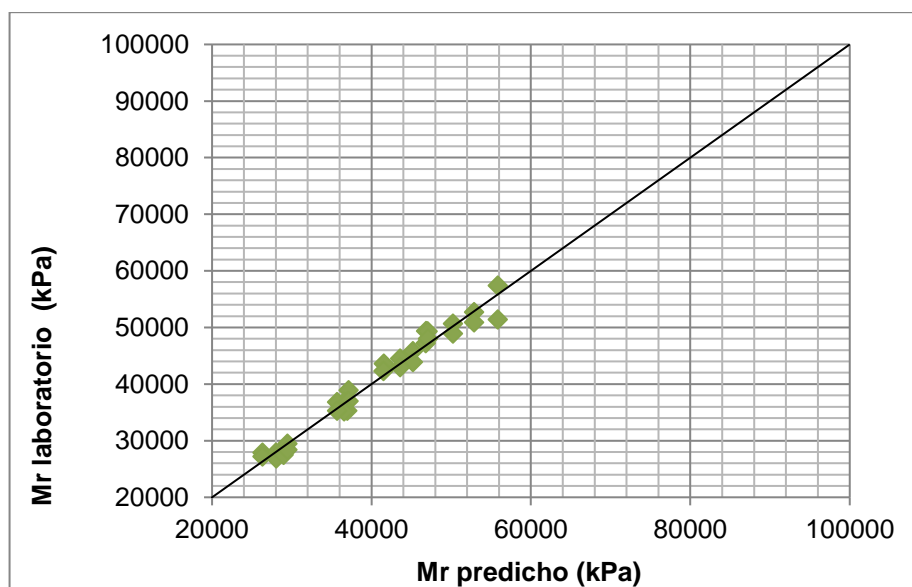


Figura A- 32. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1189-18 a PH2

Cuadro A- 37. Resultado de la regresión lineal múltiple para el Mr de M 1189-18 en PS1

Estadísticas de la regresión					
Coeficiente de correlación múltiple		0,922			
Coeficiente de determinación R ²		0,850			
R ² ajustado		0,840			
Error típico		0,024			
Observaciones		32			
Análisis de varianza					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,096945	0,048472	82,2865689	1,1105E-12
Residuos	29	0,017083	0,000589		
Total	31	0,114028			
	Coeficientes		Error típico	Estadístico t	Valor p
log (K1)	3,250		0,01207	269,24	7,86E-51
K2	0,392		0,03160	12,40	4,04E-13
K3	-1,077		0,12175	-8,84	9,97E-10

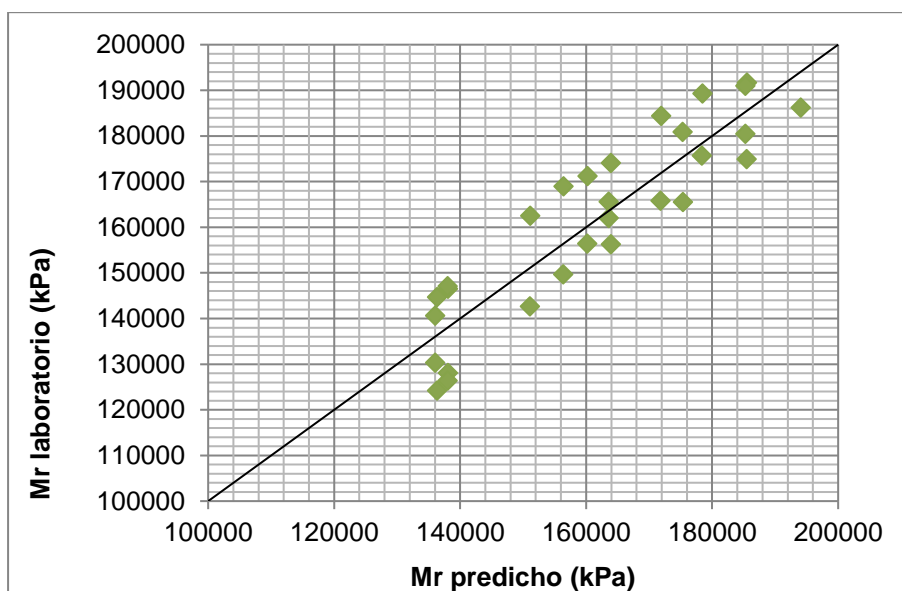


Figura A- 33. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1189-18 a PS1

Cuadro A- 38. Resultado de la regresión lineal múltiple para el Mr de M 1189-18 en PS2

Estadísticas de la regresión					
Coeficiente de correlación múltiple			0,714		
Coeficiente de determinación R ²			0,510		
R ² ajustado			0,477		
Error típico			0,036		
Observaciones			32		
Análisis de varianza					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,038121	0,019061	15,1158771	3,18221E-05
Residuos	29	0,036568	0,001261		
Total	31	0,074690			
	Coeficientes		Error típico	Estadístico t	Valor p
log (K1)	3,143		0,01767	177,90	1,29E-45
K2	0,220		0,04624	4,76	4,96E-05
K3	0,023		0,17820	0,13	8,99E-01

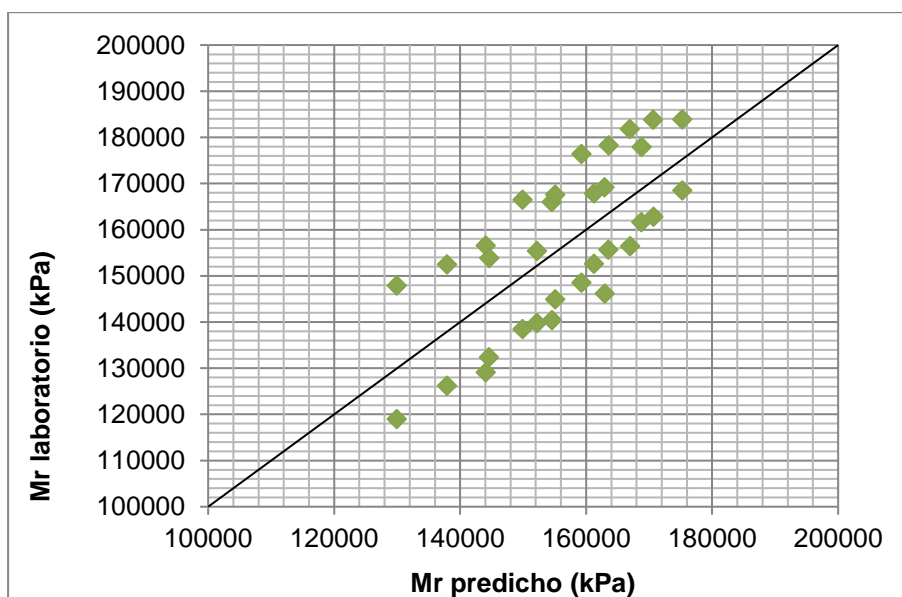


Figura A- 34. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1189-18 a PS2.

Cuadro A- 39. Regresión lineal para Mr con humedad variable del suelo M1189-18

Estadísticas de la regresión					
Coeficiente de correlación múltiple			0,948		
Coeficiente de determinación R ²			0,898		
R ² ajustado			0,896		
Error típico			0,090		
Observaciones			128		
Análisis de varianza					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	8,779857	2,926619	363,7819601	2,94467E-61
Residuos	124	0,997578	0,008045		
Total	127	9,777435			
	Coeficientes		Error típico	Estadístico t	Valor p
log (K1)	2,899		0,02246	129,10	4,93E-134
K2	0,532		0,05840	9,11	1,74E-15
K3	-1,248		0,22508	-5,55	1,68E-07
K4	-4,113		0,12966	-31,73	2,33E-61

Montes de Oro (M 1397-18)

A continuación, se muestran los ajustes de Mr para cada caso de humedad empleando el MU, para la muestra de suelo del Montes Oro.

Cuadro A- 40 Resultado de la regresión lineal múltiple para el Mr de M 1397-18 en Wopt

Estadísticas de la regresión					
Coeficiente de correlación múltiple		0,978			
Coeficiente de determinación R ²		0,957			
R ² ajustado		0,954			
Error típico		0,018			
Observaciones		32			
Análisis de varianza					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,212700	0,106350	322,951536	1,51625E-20
Residuos	29	0,009550	0,000329		
Total	31	0,222250			
	Coeficientes		Error típico	Estadístico t	Valor p
log (K1)	2,778		0,00903	307,63	1,65E-52
K2	0,554		0,02363	23,43	2,16E-20
K3	-1,811		0,09106	-19,89	1,90E-18

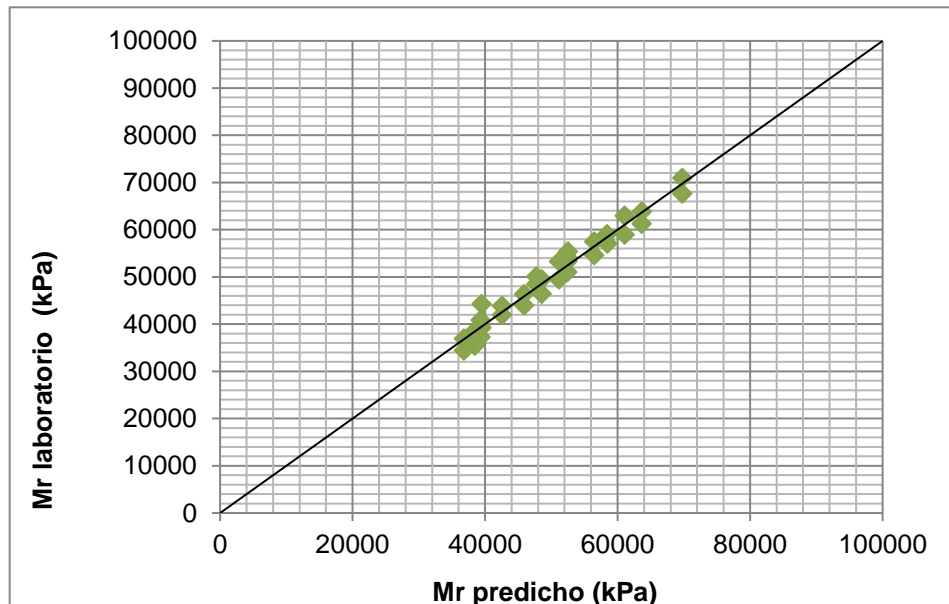


Figura A- 35. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1397-18 a Wopt

Cuadro A- 41. Resultado de la regresión lineal múltiple para el Mr de M 1397-18 en PH1

Estadísticas de la regresión					
Coeficiente de correlación múltiple			0,989		
Coeficiente de determinación R ²			0,977		
R ² ajustado			0,976		
Error típico			0,015		
Observaciones			32		
Análisis de varianza					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,275370	0,137685	624,783798	1,43641E-24
Residuos	29	0,006391	0,000220		
Total	31	0,281761			
	Coeficientes		Error típico	Estadístico t	Valor p
log (K1)	2,674		0,00738	362,11	1,46E-54
K2	0,658		0,01933	34,01	6,35E-25
K3	-1,846		0,07447	-24,79	4,53E-21

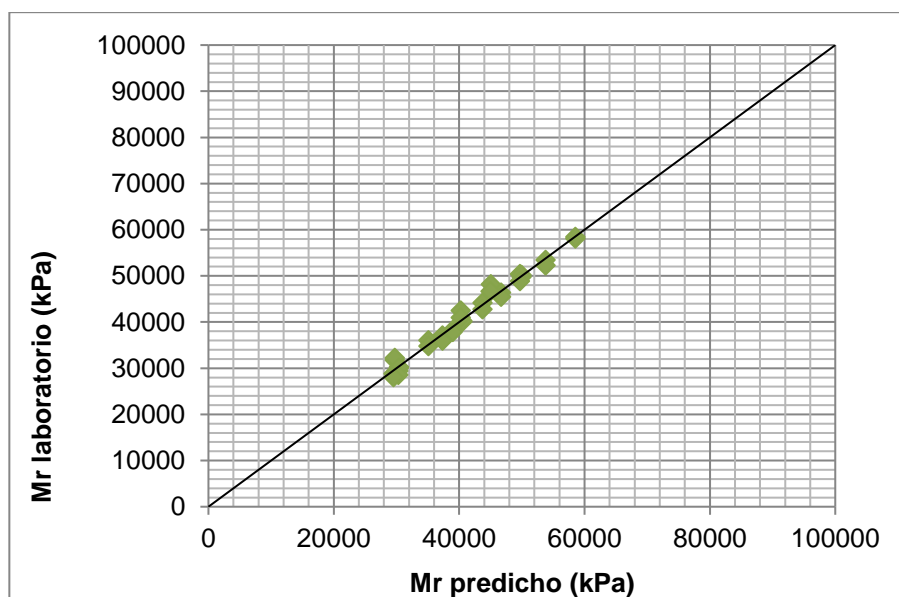


Figura A- 36. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1397-18 a PH1

Cuadro A- 42. Resultado de la regresión lineal múltiple para el Mr de M 1397-18 en PH2

Estadísticas de la regresión					
Coeficiente de correlación múltiple			0,972		
Coeficiente de determinación R ²			0,945		
R ² ajustado			0,942		
Error típico			0,031		
Observaciones			32		
Análisis de varianza					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,468930	0,234465	250,628995	5,00848E-19
Residuos	29	0,027130	0,000936		
Total	31	0,496060			
	Coeficientes		Error típico	Estadístico t	Valor p
log (K1)	2,294		0,01521	150,89	1,52E-43
K2	0,883		0,03982	22,17	9,95E-20
K3	-1,215		0,15346	-7,91	9,94E-09

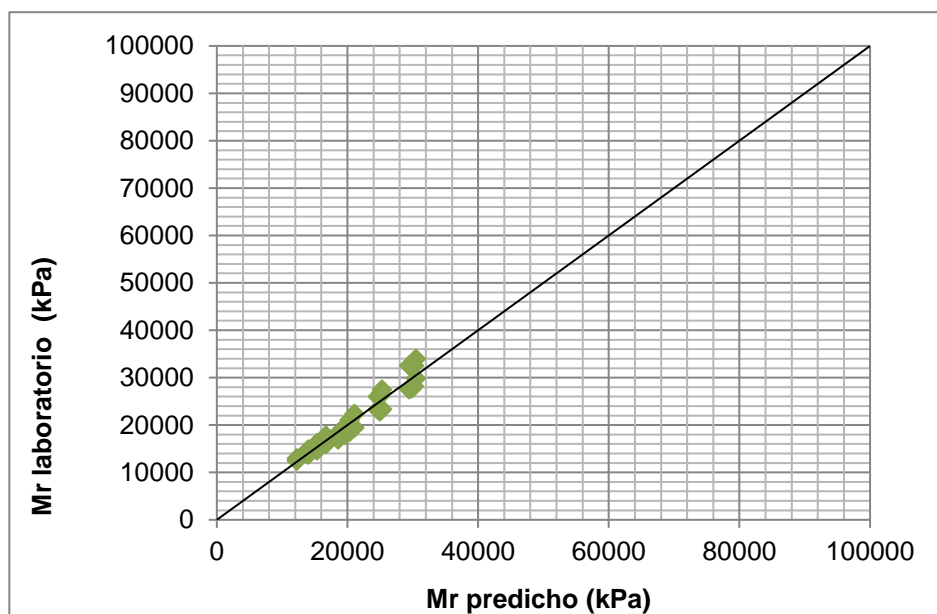


Figura A- 37. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1397-18 a PH2

Cuadro A- 43. Resultado de la regresión lineal múltiple para el Mr de M 1397-18 en PS1

Estadísticas de la regresión					
Coeficiente de correlación múltiple		0,613			
Coeficiente de determinación R ²		0,376			
R ² ajustado		0,333			
Error típico		0,068			
Observaciones		32			
Análisis de varianza					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,080189	0,040095	8,7500115	0,001063408
Residuos	29	0,132885	0,004582		
Total	31	0,213074			
	Coeficientes		Error típico	Estadístico t	Valor p
log (K1)	3,093		0,03369	91,80	2,68E-37
K2	0,344		0,08817	3,91	5,17E-04
K3	-1,084		0,33965	-3,19	3,39E-03

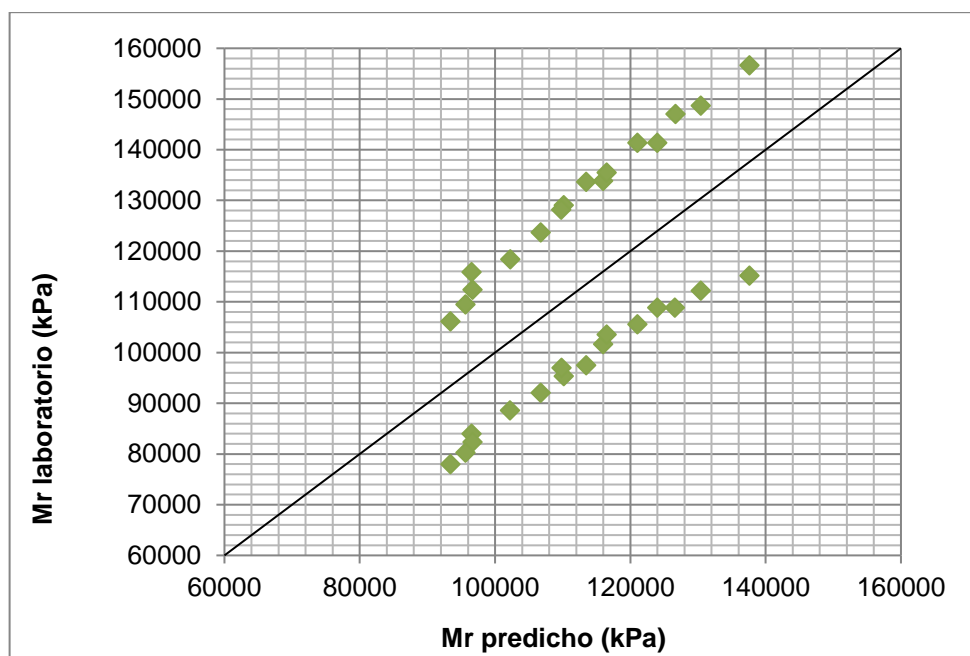


Figura A- 38. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1397-18 a PS1

Cuadro A- 44. Resultado de la regresión lineal múltiple para el Mr de M 1397-18 en PS2

Estadísticas de la regresión					
Coeficiente de correlación múltiple		0,952			
Coeficiente de determinación R ²		0,907			
R ² ajustado		0,900			
Error típico		0,020			
Observaciones		32			
Análisis de varianza					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,118586	0,059293	141,16058	1,13044E-15
Residuos	29	0,012181	0,000420		
Total	31	0,130767			
	Coeficientes		Error típico	Estadístico t	Valor p
log (K1)	2,791		0,01019	273,95	4,76E-51
K2	0,272		0,02669	10,18	4,40E-11
K3	0,700		0,10275	6,81	1,75E-07

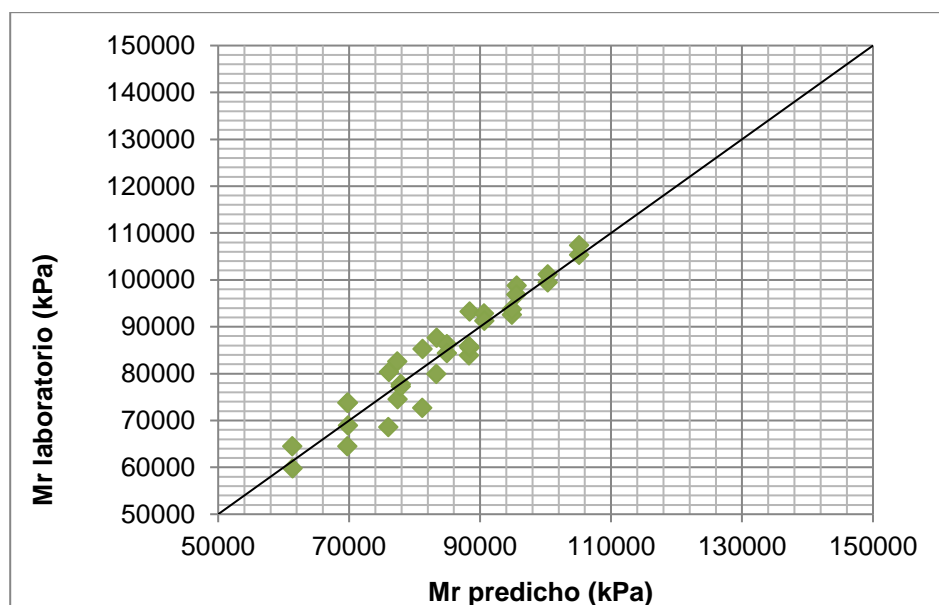


Figura A- 39. Ajuste de los datos obtenidos en laboratorio vs los calculados con el MU para M1397-18 a PS2

Cuadro A- 45. Regresión lineal para Mr con humedad variable del suelo M 1397-18

Estadísticas de la regresión					
Coeficiente de correlación múltiple			0,965		
Coeficiente de determinación R ²			0,931		
R ² ajustado			0,929		
Error típico			0,073		
Observaciones			128		
Análisis de varianza					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	8,891721	2,963907	558,9921412	7,70326E-72
Residuos	124	0,657477	0,005302		
Total	127	9,549199			
	Coeficientes		Error típico	Estadístico t	Valor p
log (K1)	2,766		0,01817	152,23	7,50E-143
K2	0,610		0,04741	12,86	1,43E-24
K3	-1,488		0,18268	-8,15	3,39E-13
K4	-3,541		0,09122	-38,81	3,15E-71

Cuadro A- 46. Regresión lineal para Mr con humedad variable para los tres suelos en estudio.

Estadísticas de la regresión					
Coeficiente de correlación múltiple			0,892		
Coeficiente de determinación R ²			0,796		
R ² ajustado			0,794		
Error típico			0,145		
Observaciones			384		
Análisis de varianza					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	4	30,880812	7,720203	369,3707138	2,6092E-129
Residuos	379	7,921464	0,020901		
Total	383	38,802276			
	Coeficientes		Error típico	Estadístico t	Valor p
log (K1)	2,649		0,02164	122,44	7,83E-307
K2	0,577		0,05427	10,63	2,83E-23
K3	-1,343		0,20948	-6,41	4,34E-10
K4	-3,037		0,13875	-21,89	2,96E-69
K5	-0,452		0,02767	-16,33	9,12E-46