



LanammeUCR



IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE EN BASES GRANULARES PARA PAVIMENTOS

Informe Final

Preparado por
LABORATORIO DE ENSAYOS DINÁMICOS (LED)



Ing. Mónica Jiménez Acuña

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica

Tel: (506) 2511 4965

E-mail: mjimenez@lanamme.ucr.ac.cr

San José, Costa Rica

Abril 2009

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN | 8 |
| 1.1 Resumen | 8 |
| 1.2 Justificación e importancia | 9 |
| 1.2.1 Uso de materiales granulares en Costa Rica | 9 |
| 1.2.2 Procedimientos actuales de diseño en Costa Rica | 9 |
| 1.2.3 Nuevos retos..... | 10 |
| 1.3 Objetivo General..... | 10 |
| 1.4 Objetivos específicos..... | 11 |
| | |
| CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO | 12 |
| 2.1 Definiciones | 12 |
| 2.2 Formas de obtener el módulo resiliente | 17 |
| 2.2.1 Correlación con el resultado de CBR..... | 18 |
| 2.2.2 Valores típicos..... | 18 |
| 2.2.3 Modelos mecanísticos..... | 20 |
| | |
| CAPÍTULO 3 IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE ENSAYO AASHTO T 307 | 24 |
| 3.1 Resumen del método de ensayo..... | 24 |
| 3.2 Instrumentación del método | 27 |
| 3.2.1 Moldes para la compactación de los especímenes | 27 |
| 3.2.2 Equipo para realizar el ensayo | 28 |
| 3.2.3 Otros equipos..... | 31 |
| | |
| CAPÍTULO 4 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO | 32 |
| 4.1 Densidad, gravedad específica y absorción | 35 |
| 4.2 Abrasión de los Ángeles..... | 35 |
| 4.3 Contenido de vacíos en finos no compactados..... | 35 |
| 4.4 Equivalente de arena..... | 36 |
| 4.5 Índice de durabilidad..... | 36 |
| 4.6 Degradación en el equipo Micro-Deval | 36 |
| 4.7 Disgregabilidad en sulfato de sodio | 37 |
| 4.8 Partículas friables y arcillosas | 37 |
| 4.9 Granulometría..... | 37 |
| 4.9.1 Material M1 | 38 |
| 4.9.2 Material M2 | 39 |
| 4.9.3 Material M3 | 40 |
| 4.9.4 Material M4 | 41 |
| 4.9.5 Material M5 | 42 |
| | |
| CAPÍTULO 5 ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE I FASE | 44 |
| 5.1 Especímenes de 152 mm de diámetro | 44 |
| 5.1.1 Material M1 | 46 |
| 5.1.2 Material M2 | 48 |

| | |
|--|-----|
| 5.1.3 Material M3 | 50 |
| 5.1.4 Material M4 | 51 |
| 5.1.5 Material M5 | 53 |
| 5.2 Especímenes de 102 mm de diámetro | 55 |
| 5.2.1 Material M1 | 55 |
| 5.2.2 Material M2 | 58 |
| 5.2.3 Material M3 | 61 |
| 5.2.4 Material M4 | 64 |
| 5.2.5 Material M5 | 67 |
| | |
| CAPÍTULO 6 ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE II FASE | 71 |
| | |
| CAPÍTULO 7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS OBTENIDOS..... | 90 |
| 7.1 Selección de las variables para el modelo de RLM | 91 |
| 7.2 Regresión lineal múltiple para los datos del material M1 | 92 |
| 7.3 Regresión lineal múltiple para los datos del material M2 | 95 |
| 7.4 Regresión lineal múltiple para los datos del material M3 | 104 |
| 7.5 Regresión lineal múltiple para los datos del material M4 | 110 |
| 7.6 Regresión lineal múltiple para los datos del material M5 | 116 |
| | |
| CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y COMENTARIOS FINALES | 132 |
| 8.1 Conclusiones | 132 |
| 8.2 Recomendaciones | 134 |
| | |
| CAPÍTULO 9 REFERENCIAS..... | 135 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Modelos para encontrar el Mr a partir del dato de CBR..... | 18 |
| Tabla 2: Valores típicos para materiales granulares y suelos sin estabilizar | 19 |
| Tabla 3: Secuencia del estado de esfuerzos en el ensayo para materiales de base y subbases | 25 |
| Tabla 4: Resumen de resultados de densidad, gravedades específicas y absorción para los 5 materiales. | 35 |
| Tabla 5: Resumen de resultados de abrasión para los 5 materiales..... | 35 |
| Tabla 6: Resumen de resultados de vacíos en finos no compactados para los 5 materiales.. | 35 |
| Tabla 6: Resumen de resultados de equivalente de arena para los 5 materiales..... | 36 |
| Tabla 8: Resumen de resultados de índice de durabilidad para los 5 materiales. | 36 |
| Tabla 9: Resumen de resultados de desgaste en el Micro-Deval para los 5 materiales..... | 36 |
| Tabla 10: Resumen de resultados de la disgregabilidad en sulfato de sodio para los 5 materiales. | 37 |
| Tabla 11: Resumen de resultados del porcentaje de partículas friables y arcillosas para los 5 materiales. | 37 |
| Tabla 12: Análisis granulométrico para el material M1..... | 38 |
| Tabla 13: Análisis granulométrico para el material M2..... | 39 |
| Tabla 14: Análisis granulométrico para el material M3..... | 40 |
| Tabla 15: Análisis granulométrico para el material M4..... | 41 |
| Tabla 16: Análisis granulométrico para el material M5..... | 42 |
| Tabla 17: Cálculo del volumen M1..... | 47 |
| Tabla 18: Resumen de la medición del porcentaje de humedad del material M1. | 47 |
| Tabla 19: Resumen de la medición de la densidad del material M1. | 47 |
| Tabla 20: Resumen de resultados de módulo resiliente para el espécimen de 150 mm del material M1..... | 47 |
| Tabla 21: Cálculo del volumen M2..... | 49 |
| Tabla 22: Resumen de la medición del porcentaje de humedad del material M2. | 49 |
| Tabla 23: Resumen de la medición de la densidad del material M2..... | 49 |
| Tabla 24: Resumen de resultados de módulo resiliente para el espécimen de 150 mm del material M2..... | 49 |
| Tabla 25: Cálculo del volumen M3..... | 50 |
| Tabla 26: Resumen de la medición del porcentaje de humedad del material M3. | 50 |
| Tabla 27: Resumen de la medición de la densidad del material M3..... | 50 |
| Tabla 28: Resumen de resultados de módulo resiliente para el espécimen de 150 mm del material M3..... | 51 |
| Tabla 29: Cálculo del volumen M4..... | 52 |
| Tabla 30: Resumen de la medición del porcentaje de humedad del material M4. | 52 |
| Tabla 31: Resumen de la medición de la densidad del material M4..... | 52 |
| Tabla 32: Resumen de resultados de módulo resiliente para el espécimen de 150 mm del material M4..... | 52 |
| Tabla 33: Cálculo del volumen M5..... | 53 |
| Tabla 34: Resumen de la medición del porcentaje de humedad del material M5. | 54 |
| Tabla 35: Resumen de la medición de la densidad del material M6..... | 54 |
| Tabla 36: Resumen de resultados de módulo resiliente para el espécimen de 150 mm del material M5..... | 54 |
| Tabla 37: Resumen de las densidades húmeda y seca con los contenidos de agua para el material M1..... | 55 |

| | |
|---|--------------------------------------|
| Tabla 38: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material M1..... | 56 |
| Tabla 39: Resumen de las densidades húmeda y seca con los contenidos de agua para el material M2..... | 58 |
| Tabla 40: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material M2..... | 59 |
| Tabla 41: Resumen de las densidades húmeda y seca con los contenidos de agua para el material M3..... | 61 |
| Tabla 42: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material M3..... | 62 |
| Tabla 43: Resumen de las densidades húmeda y seca con los contenidos de agua para el material M4..... | 65 |
| Tabla 44: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material M4..... | 65 |
| Tabla 45: Resumen de las densidades húmeda y seca con los contenidos de agua para el material M5..... | 68 |
| Tabla 46: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material M5..... | 68 |
| Tabla 47: Variables de entrada consideradas para el análisis de regresión. | 92 |
| Tabla 48: Variables de entrada consideradas para el análisis de regresión. ¡Error! Marcador no definido. | |
| Tabla 49: Variables de entrada consideradas para el análisis de regresión. ¡Error! Marcador no definido. | |
| Tabla 50: Variables de entrada consideradas para el análisis de regresión. ¡Error! Marcador no definido. | |
| Tabla 51: Variables de entrada consideradas para el análisis de regresión. ¡Error! Marcador no definido. | |
| Tabla 52: Resumen de resultados para los parámetros de la regresión para todos los materiales. | 123 |
| Tabla 53: Resumen de resultados para los parámetros de la regresión para todos los materiales. | 132 |
| Tabla 54: Resumen de resultados de módulo resiliente para todos los materiales..... | ¡Error! Marcador no definido. |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Rotación de los ejes de esfuerzos de un elemento cuando un vehículo circula por la superficie..... | 13 |
| Figura 2: Tipos de cargas dinámicas..... | 14 |
| Figura 3: Ciclo de carga descarga..... | 15 |
| Figura 4: Simulación de cargas de tránsito | 17 |
| Figura 5: Concepto de esfuerzo cortante octaédrico..... | 22 |
| Figura 6: Definición de los esfuerzos aplicados por el método de ensayo. | 25 |
| Figura 7: Diagrama de la colocación del espécimen y los deformímetros externos..... | 26 |
| Figura 8: Molde de 152 mm de diámetro con sus accesorios y colocación de la membrana. | 27 |
| Figura 9: Cámara triaxial y tanque neumático..... | 28 |
| Figura 10: Marco de carga y el sistema CDAS de circuito cerrado. | 29 |
| Figura 11: Arreglo de los deformímetros fuera de la cámara triaxial. | 29 |
| Figura 12: Colocación de los transductores para la realización del ensayo de módulo..... | 30 |

| | |
|---|--------------------------------------|
| Figura 13: Equipos adicionales para la realización del ensayo..... | 31 |
| Figura 14: Fotografía del material extendido 0143-06 (M1)..... | 32 |
| Figura 15: Fotografía del material extendido 0144-06 (M2)..... | 33 |
| Figura 16: Fotografía del material extendido 0148-06 (M3)..... | 33 |
| Figura 17: Fotografía del material extendido 0149-06 (M4)..... | 34 |
| Figura 18: Fotografía del material extendido 0159-06 (M5)..... | 34 |
| Figura 19: Gráfico de la granulometría del material M1..... | 38 |
| Figura 20: Gráfico de la granulometría del material M2..... | 39 |
| Figura 21: Gráfico de la granulometría del material M3..... | 40 |
| Figura 22: Gráfico de la granulometría del material M4..... | 41 |
| Figura 23: Gráfico de la granulometría del material M5..... | 42 |
| Figura 24: Gráfico de la granulometría de los 5 materiales. | 43 |
| Figura 25: Espécimen compactado colocado en la base de la cámara triaxial. | 45 |
| Figura 26: Espécimen dentro de la cámara triaxial. | 45 |
| Figura 27: Colocación de deformímetros externos..... | 46 |
| Figura 28: Falla del espécimen en el ciclo 12 del material M1 de 150 mm de diámetro. | 48 |
| Figura 29: Falla del espécimen en el preacondicionamiento del material M2..... | 49 |
| Figura 30: Falla del espécimen en el preacondicionamiento del material M3..... | 51 |
| Figura 31: Falla del espécimen en el preacondicionamiento del material M4..... | 53 |
| Figura 32: Falla del espécimen en el preacondicionamiento del material M5..... | 54 |
| Figura 33: Agregado retenido en el tamiz de 19 mm y agregado que pasa el mismo tamiz del material M1..... | 55 |
| Figura 34: Agregado retenido en el tamiz de 19 mm y agregado que pasa el mismo tamiz del material M2..... | 58 |
| Figura 35: Agregado retenido en el tamiz de 19 mm y agregado que pasa el mismo tamiz del material M3..... | 61 |
| Figura 36: Agregado retenido en el tamiz de 19 mm y agregado que pasa el mismo tamiz del material M4..... | 64 |
| Figura 37: Agregado retenido en el tamiz de 19 mm y agregado que pasa el mismo tamiz del material M5..... | 68 |
| Figura 38: Primera salida antes de realizar la regresión por pasos del material M1..... | ¡Error! |
| Marcador no definido. | |
| Figura 39: Segunda salida luego de realizar la regresión por pasos del material M1. | 93 |
| Figura 40: Resultados de la regresión lineal para el material M1. | 94 |
| Figura 41: Gráfico de módulo real contra el predicho para el material M1..... | 94 |
| Figura 42: Gráfico de residuales para el material M1..... | 95 |
| Figura 43: Primera salida antes de realizar la regresión por pasos del material M2..... | ¡Error! |
| Marcador no definido. | |
| Figura 44: Segunda salida luego de realizar la regresión por pasos del material M2. | 99 |
| Figura 45: Resultados de la regresión lineal para el material M2. | 100 |
| Figura 46: Gráfico de módulo real contra el predicho para el material M2..... | 101 |
| Figura 47: Gráfico de residuales para el material M2..... | 101 |
| Figura 48: Primera salida antes de realizar la regresión por pasos del material M3..... | ¡Error! |
| Marcador no definido. | |
| Figura 49: Segunda salida luego de realizar la regresión por pasos del material M3. | ¡Error! |
| Marcador no definido. | |
| Figura 50: Resultados de la regresión lineal para el material M3. ... | ¡Error! Marcador no definido. |
| Figura 51: Gráfico de módulo real contra el predicho para el material M3.. | ¡Error! Marcador no definido. |
| definido. | |
| Figura 52: Gráfico de residuales para el material M3..... | ¡Error! Marcador no definido. |

Figura 53: Primera salida antes de realizar la regresión por pasos del material M4..... ¡Error!
Marcador no definido.

Figura 54: Segunda salida luego de realizar la regresión por pasos del material M4. ¡Error!
Marcador no definido.

Figura 55: Resultados de la regresión lineal para el material M4. ...¡Error! **Marcador no definido.**

Figura 56: Gráfico de módulo real contra el predicho para el material M4..¡Error! **Marcador no definido.**

Figura 57: Gráfico de residuales para el material M4.....¡Error! **Marcador no definido.**

Figura 58: Primera salida antes de realizar la regresión por pasos del material M5..... ¡Error!
Marcador no definido.

Figura 59: Segunda salida luego de realizar la regresión por pasos del material M5. ¡Error!
Marcador no definido.

Figura 60: Resultados de la regresión lineal para el material M5. ...¡Error! **Marcador no definido.**

Figura 61: Gráfico de módulo real contra el predicho para el material M5..¡Error! **Marcador no definido.**

Figura 62: Gráfico de residuales para el material M5.....¡Error! **Marcador no definido.**

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

5.1 Resumen

En Costa Rica se han adoptado métodos empíricos para el diseño de pavimentos basados en los resultados de CBR (California Bearing Ratio) para los materiales granulares. Sin embargo, en años recientes se han dado cambios en la tecnología de pavimentos, donde se han aceptado métodos mecánicos 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) que se presentan dentro de las capas del pavimento.

El propósito de este proyecto es implementar el ensayo AASHTO T 307 Método de ensayo estándar para determinar el módulo resiliente de suelos y materiales granulares como método alternativo para la caracterización por CBR de materiales granulares.

Como objetivos específicos se propuso implementar el método de ensayo desarrollado para materiales que se encuentran en nuestro medio, del cual se obtendrían las propiedades ingenieriles fundamentales, incluyendo la rigidez, que depende del estado de esfuerzos y desarrollar los modelos mecánicos de análisis para realizar una mejor simulación del comportamiento no lineal de los materiales granulares y permitir una predicción más realista del comportamiento esfuerzo-deformación de estos materiales dentro del pavimento.

Se llevó a cabo un estudio en diferentes fuentes de materiales granulares para obtener sus propiedades mecánicas dinámicas (en términos de módulo resiliente) bajo dos condiciones de densidad y humedad para cada material. Los resultados fueron analizados utilizando las técnicas estadísticas para obtener el modelo constitutivo óptimo y se encontró que el modelo recomendado por la nueva Guía Mecánica-empírica fue el que mostró la mejor correlación en el ajuste del modelo cuando se presenta mayor cantidad de agua mientras que para la condición más seca y mayor compactación el modelo que mejor se ajustó fue el modelo de Seed donde el módulo se ve influenciado por los esfuerzos principales.

5.2 Justificación e importancia

1.2.1 Uso de materiales granulares en Costa Rica

Debido al bajo costo de los materiales granulares en Costa Rica existen gran cantidad de caminos a lo largo y ancho del territorio construidos con estos materiales, que son tomados por facilidad, de zonas cercanas del sitio de compactación, dándose así gran variedad de fuentes de materiales, desde rocas quebradas de tajo como gravas de río hasta materiales tipo lastre de baja calidad.

Dentro del diseño estructural del pavimento es importante considerar los siguientes factores: tipo y calidad de materiales a ser utilizados, cargas a las cuales el pavimento será sometido en su vida útil, el clima tropical húmedo que impera en la mayoría del territorio, pues esto afecta las consideraciones ambientales a tomar en cuenta a la hora del diseño del pavimento, ya sea para la colocación de drenajes u otros sistemas para la evacuación del agua. Las condiciones de congelamiento no tienen que ser consideradas en el diseño pues el país no sufre esta condición tan crítica que se da en otros países.

1.2.2 Procedimientos actuales de diseño en Costa Rica

A lo largo del tiempo, en Costa Rica se han adoptado métodos empíricos de diseño basados en los resultados de CBR (California Bearing Ratio) para los materiales granulares. Sin embargo, en años recientes se han dado cambios en la tecnología de pavimentos, donde se han aceptado métodos mecánicos 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 que se podrían presentar dentro de las capas del pavimento.

Esta transición ha sido difícil pues la contribución de las capas granulares al desempeño de todo el pavimento se ha asumido como un valor fijo y tampoco se han considerado las características de deformación permanente de las capas granulares.

1.2.3 Nuevos retos

Es por lo expuesto anteriormente, que con este proyecto de implementación se pretende introducir al país dentro de las nuevas corrientes de diseño que tratan de explicar de una manera más realista el comportamiento de los pavimentos.

Por lo tanto, hay nuevos parámetros relacionados directamente con el desempeño en el campo, esto es, módulo resiliente y deformación permanente, que no están incluidos dentro de las especificaciones actuales, por lo que los rangos aceptables de dichos parámetros todavía no han sido establecidos.

En cuanto a las consideraciones de compactación, se debería establecer un procedimiento nacional que considere los problemas antes mencionados a través del establecimiento de correlaciones de módulo resiliente, el esfuerzo de compactación y las condiciones de humedad de los diferentes materiales granulares.

Los procedimientos de diseño macanísticos no se podrían desarrollar completamente si no se cuenta con datos confiables como entrada para los modelos de comportamiento, o que los modelos de predicción de desempeño no se puedan validar. Con el desarrollo de este trabajo se tratará de proveer las diferentes herramientas para lograr un desarrollo más aproximado a la realidad de los pavimentos.

Todo lo anterior conduce a buscar una disminución de los costos de construcción pues se trata de llegar a un uso óptimo de materiales en cada situación en particular y un mejoramiento en las estimaciones de los costos de operación durante la vida útil.

5.3 Objetivo General

Implementar el ensayo AASHTO T 307 Método de ensayo estándar para determinar el módulo resiliente de suelos y materiales granulares en el Laboratorio de Ensayos Dinámicos como método alternativo para la caracterización por CBR de materiales granulares.

5.4 Objetivos específicos

- Implementar el método de ensayo desarrollado para materiales que se encuentran en nuestro medio.
- Obtener las propiedades ingenieriles fundamentales, incluyendo la rigidez, que depende del estado de esfuerzos para los materiales granulares.
- Desarrollar los modelos mecánicos de comportamiento no lineal de los materiales granulares y permitir una predicción del módulo resiliente de estos materiales dentro del pavimento.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 Definiciones

Dentro de este proyecto de implementación se incluye el uso de equipos de laboratorio de última generación para determinar las propiedades físico-mecánicas de los materiales que están incluidos dentro de los modelos mecanísticos de análisis de pavimentos. El comportamiento de los materiales granulares se analizan desde el punto de vista de los esfuerzos de reacción y de falla, los cuales se consideran los principales indicadores del desempeño.

Se entiende como modelos mecanísticos todas aquellas representaciones para el análisis del comportamiento de los pavimentos que incluyen las propiedades mecánicas fundamentales de los materiales. Los esfuerzos de reacción son los que se presentan cuando el pavimento es sometido a cargas repetitivas como lo son las cargas de tránsito. Los esfuerzos de falla se dan cuando el material ya no puede continuar soportando las cargas ya sean repetitivas o estáticas (tales como desprendimientos, deformación o fatiga). Los datos de esfuerzos son obtenidos de los resultados de los ensayos de laboratorio.

La definición de desempeño es la interpretación que incluye las condiciones estructurales y funcionales del pavimento en un momento dado dentro de la vida útil del mismo (Ullidtz, 1987).

El desarrollo de modelos de esfuerzos de reacción y falla dentro de los modelos de desempeño para predecir el comportamiento de los pavimentos puede estar basado en:

1. Modelos matemáticos basados en las propiedades mecánicas fundamentales; y
2. Relaciones empíricas.

Los métodos mecanísticos de diseño no podrían ser utilizados de manera completa si no se pueden obtener los datos de entrada para el modelo de respuesta de una manera práctica y que tienen que cumplir con 3 cualidades esenciales: bajo costo, confiabilidad y reproducibilidad.

Las cargas dinámicas se producen cuando el tráfico de vehículos se mueve a lo largo de la superficie del pavimento, un gran número de pulsos de esfuerzos rápidamente aplicados de magnitud variable son aplicados a cada elemento de material subyacente y hasta cierta distancia fuera de los lados del paso de la llanta (Figura 1). Cerca de la superficie el pulso de esfuerzo tiene una forma haversiana pronunciada. Por lo tanto, se han desarrollado métodos de ensayo de laboratorio que simulen este tipo de cargas, por lo que se tiene equipos que aplican una serie de pulsos de carga que están separados por un período de reposo (Figura 2 a y b). El módulo resiliente del material ensayado es determinado a partir de los resultados de estos ensayos dinámicos.

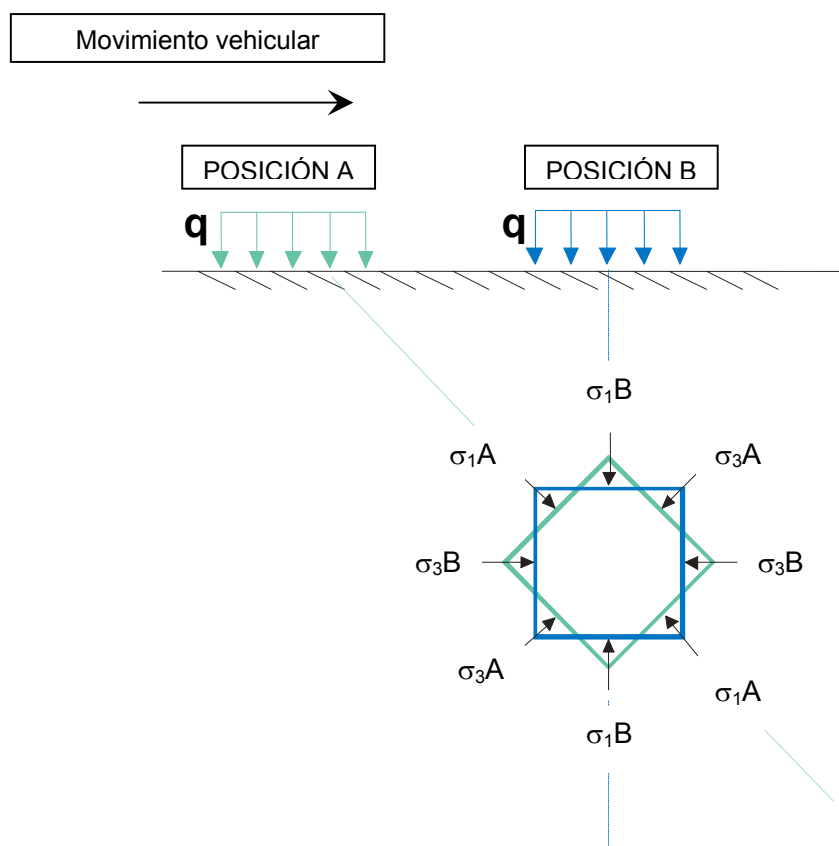
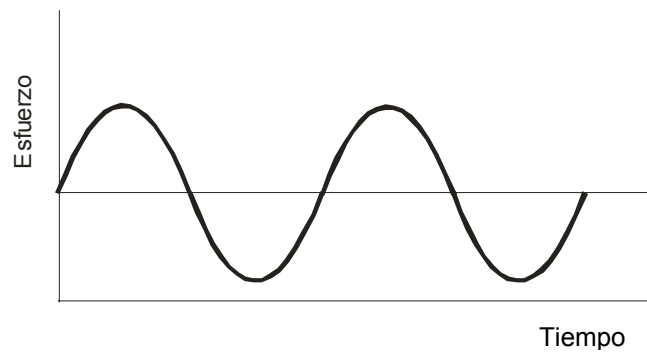
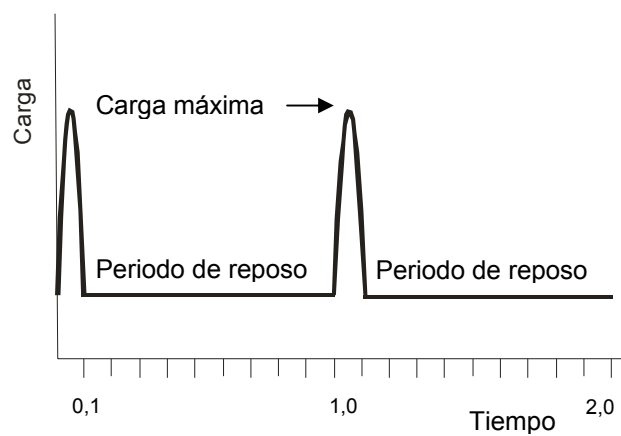


Figura 1: Rotación de los ejes de esfuerzos de un elemento cuando un vehículo circula por la superficie.

Figura tomada de Barksdale et al 1997



a) Carga cíclica onda sinusoidal



b) Pulso de carga dinámica repetido

Figura 2: Tipos de cargas dinámicas

Figura tomada de Barksdale et al 1997

El módulo resiliente se utiliza para el análisis multicapa, y es una variable muy importante para predecir los esfuerzos resilientes (recuperables), deformaciones y deflexiones dentro de un pavimento flexible. También se puede relacionar con la deformación permanente de materiales sin estabilizar. También ahora es utilizado en la Guía de Diseño AASHTO aunque está basado en modelos estadísticos en lugar de los principios de diseño mecánicos. El uso extendido del módulo resiliente en el diseño del espesor de capa indica que es de suma importancia la obtención de valores confiables de esta variable de diseño.

El módulo resiliente es un índice que indica la capacidad de cualquier material para almacenar o absorber energía sin deformación permanente (Figura 3). Es igual al esfuerzo

axial pico repetido dividido entre la deformación axial recuperable que ocurre dentro del espécimen. La deformación axial resiliente es igual a la deformación recuperable a la cual el espécimen se ve sometido cuando es sometido a un pulso, dividida por la distancia axial donde la deformación es medida.

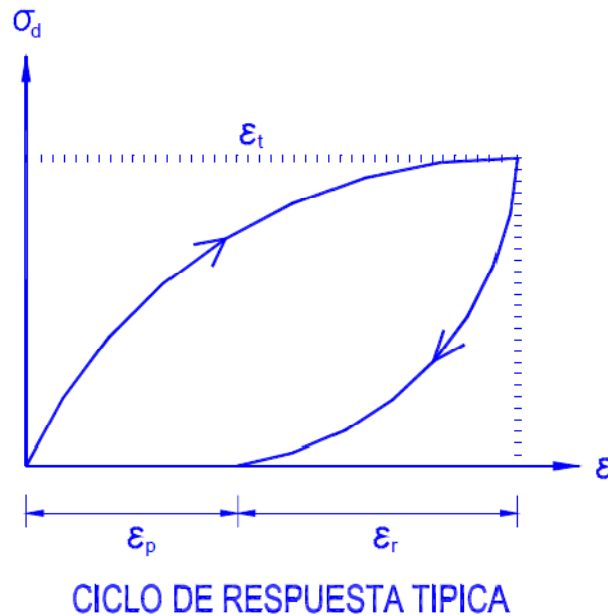


Figura 3: Ciclo de carga descarga.
Figura tomada de Peterssen et al 2002

El módulo resiliente se designa como M_r y se calcula con la siguiente fórmula:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

Donde

M_r = módulo resiliente

σ_d = esfuerzo desviador)

ϵ_r = deformación axial recuperable

También el módulo resiliente es conocido como el módulo de elasticidad.

En un ensayo dinámico el esfuerzo máximo aplicado ocurre antes de que se desarrolle la deformación máxima por lo que se dice que el esfuerzo y la deformación están desfasados uno de otro. Debido a este desfase el concepto de módulo resiliente es una aproximación.

El módulo de Poisson es la razón del valor de la deformación lineal en dirección lateral a la deformación lineal en dirección axial. El módulo de Poisson resiliente se designa como ν_r y se calcula con la siguiente fórmula:

$$\nu_r = \frac{-\epsilon_{3r}}{\epsilon_{1r}}$$

Donde

ν_r = módulo de Poisson resiliente

ϵ_{3r} = deformación radial resiliente

ϵ_{1r} = deformación axial resiliente

Los pavimentos se compactan con esfuerzos constructivos mucho mayores que las cargas de diseño produciendo en el pavimento los esfuerzos residuales iniciales, que son los esfuerzos laterales a los cuales las capas se ven sometidas por los equipos de construcción del pavimento. El estado de esfuerzos completo consiste en un efecto combinado de los esfuerzos residuales iniciales que quedan luego de la construcción y los esfuerzos dinámicos causados por las cargas de tránsito (Figura 4), de manera que corresponde una modelación de comportamiento resiliente bajo ciclos de carga y descarga.

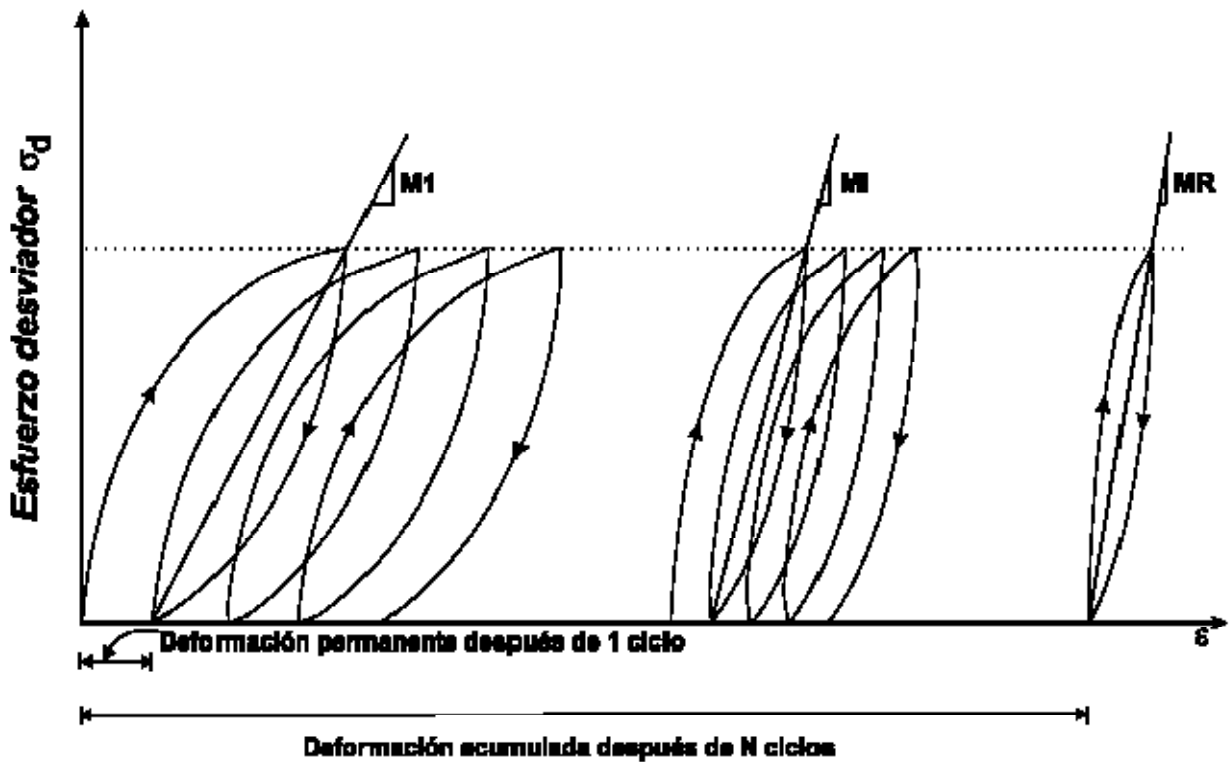


Figura 4: Simulación de cargas de tránsito
 Figura tomada de Moreno Rubio 2005

Observaciones:

- Acumulación de micro-deformaciones permanente.
- Sistemas elásticos, equivalentes-elásticos, o no-lineales elásticos no modelan la deformación plástica acumulada (“roderas”).
- Metodologías mecanísticas convencionales se basan en teorías elásticas, pero “ ϵ_p ” debe calcularse con base en la máxima respuesta elástica, a partir de las cargas de tránsito aplicadas. Ejemplo: aplicación de leyes de fatiga y deformación plástica a partir de la estimación de una deformación elástica unitaria en modelos de multi-capa elástica.

2.2 Formas de obtener el módulo resiliente

El módulo resiliente de bases granulares o suelos se puede obtener a través de correlaciones con otras propiedades de los materiales como CBR, a través de valores típicos dependiendo de la clasificación del material, por medio de modelos mecanísticos o por medio del ensayo de módulo resiliente en laboratorio.

2.2.1 Correlación con el resultado de CBR

Anteriormente se utilizaban modelos empíricos que no incluían la dependencia en el estado de esfuerzos, basados en el CBR (California Bearing Ratio). Estos modelos simplistas se han utilizado a lo largo del tiempo hasta que se lograron desarrollar equipos de laboratorio que pueden simular los estados de esfuerzos que se pueden presentar en las capas del pavimento. En la Tabla 1 se presenta un resumen de algunos modelos empíricos.

Tabla 1: Modelos para encontrar el Mr a partir del dato de CBR.

| Expresión matemática del modelo (Mr en MPa) | Referencia |
|---|---|
| $M_r = 10 \cdot CBR$ | Método de diseño Shell Heukelom y Foster (1960) |
| $M_r = 38 \cdot CBR^{0,711}$ | Cuerpo de Ingenieros de Los Estados Unidos Green y Hall (1975) |
| $M_r = 18 \cdot CBR^{0,64}$ | TRRL Lister (1987) |
| $M_r = 21 \cdot CBR^{0,65}$ | Consejo de Suráfrica Ayres (1997) |
| $M_r = B \cdot CBR$ | Guía de Diseño AASHTO 93 con $5,25 < B < 21$; $B = 10,5$ para $CBR < 10$ |
| $M_r = 6,5 \cdot CBR^{0,625}$ | Colombia Suelos de Bogotá |

2.2.2 Valores típicos

En los Estados Unidos se han recopilado en una base de datos valores típicos de los materiales según su clasificación AASHTO o SUCS los cuales se resumen en la Tabla 2 obtenida de la Guía Empírico-Mecanística para el Diseño de Pavimentos del año 2002.

Tabla 2: Valores típicos para materiales granulares y suelos sin estabilizar.

| Material Classification | M_r Range | Typical M_r |
|-------------------------|-----------------|---------------|
| 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-SC | 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 |

Estos datos recomendados fueron obtenidos para la condición del contenido óptimo de humedad, por lo que es importante ser cautelosos a la hora de utilizarlos, pues es recomendable utilizar el módulo resiliente para las condiciones reales.

2.2.3 Modelos mecánicos

Los materiales granulares sin estabilizar utilizados como bases y subbases en pavimentos flexibles exhiben una dependencia direccional de su rigidez bajo un estado de esfuerzos en particular al cual el material es sometido. Esta dependencia direccional del comportamiento resiliente puede ser representado adecuadamente con funciones exponenciales dependientes del estado de esfuerzos en la capa granular.

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, las constantes k_1 y k_2 son provienen de la regresión.

$$M_r = k_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{Pa} \right)^{k_2}$$

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 *primer invariante de esfuerzos* θ es igual a la suma de los esfuerzos principales ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) que actúan en el espécimen. La relación entre M_r y θ es una recta en un gráfico log-log. Como resultado, las constantes k_1 y k_2 se obtienen del análisis de regresión lineal del gráfico. La desventaja de este modelo es que no toma en cuenta los efectos del esfuerzo cortante.

$$M_r = k_1 \cdot \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2}$$

Modelo K- σ_d : Este modelo fue desarrollado por Moosazadeh y Witczak en 1981. Es un modelo para los suelos cohesivos. Se introduce el esfuerzo desviador $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$.

$$M_r = k_1 \cdot \left(\frac{\sigma_d}{Pa} \right)^{k_2}$$

Modelos simples que toman en cuenta los efectos del esfuerzo cortante:

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 aplicado al espécimen. ($\tau_m = \sigma_d / 2$). Las tres constantes k_3 , k_4 y k_5 deben ser evaluadas en un análisis de regresión múltiple de una secuencia de ensayos dinámicos de módulo resiliente.

$$M_r = k_3 \cdot \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_4} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{Pa} \right)^{k_5}$$

Modelo esfuerzo cortante octaédrico: Desarrollado por Witczak y Uzan. 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.

$$MR = k_1 \cdot Pa \cdot \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right)^{k_3}$$

donde

k_1 , k_2 y k_3 = constantes propias de cada material

$\theta = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$

Pa = presión atmosférica, y

τ_{oct} = esfuerzo cortante octaédrico (Ver Figura 5)

1. Para materiales granulares, $k_3 = 0$ entonces

$$MR = k_1 \cdot Pa \cdot \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2}$$

2. Para materiales cohesivos, $k_2 = 0$ entonces

$$MR = k_1 \cdot Pa \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right)^{k_3}$$

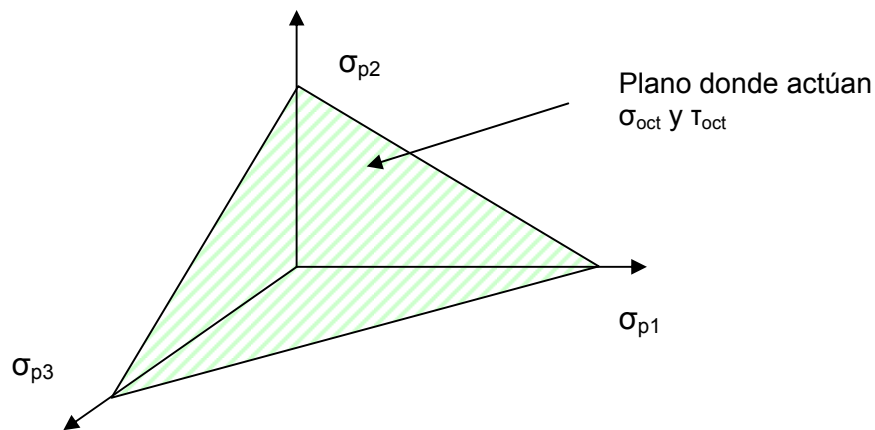


Figura 5: Concepto de esfuerzo cortante octaédrico.

Modelo de la Guía de Diseño 2002: Al respecto, los resultados del Proyecto 1-28 A entregan un protocolo armonizado de ensayo para el MR. Este protocolo asegura el uso de un modelo no - lineal del módulo resiliente, aplicable para todos los tipos de materiales no ligados para pavimentos, desde las arcillas más plásticas hasta las bases granulares más limpias.

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

Donde:

MR = módulo resiliente (en Pa);

Pa = presión atmosférica (usado para normalizar las unidades del MR);

k_1, k_2, k_3 = constantes de regresión, las cuales son funciones del tipo específico y propiedades físicas del material;

θ = esfuerzo de deformación, representado por la suma de todos los esfuerzos normales actuando en un punto dado;

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = esfuerzos normales aplicados en un punto dado;

τ_{oct} = esfuerzo octaédrico de corte actuando en el material.

$$\tau_{\text{oct}} = \frac{1}{3} * \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

Modelo del Programa de Desempeño a largo plazo de pavimentos (LTTP): del año 2002. Es una versión modificada del modelo universal constitutivo.

$$\log\left(\frac{M_R}{P_a}\right) = K_1 + K_2 \log\left(\frac{\theta}{P_a}\right) + K_3 \log\left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{P_a}\right) + K_4 \left(\log\left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{P_a}\right)\right)^2$$

CAPÍTULO 3 IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE ENSAYO AASHTO T 307

3.1 Resumen del método de ensayo

En el presente, el único método de ensayo de laboratorio recomendado y disponible para determinar el módulo resiliente de materiales granulares es el método triaxial de carga repetida. El material se somete a una serie de pulsos de carga generados por el paso de los vehículos en el pavimento. El ensayo triaxial se usa para simular estas condiciones que se presentan en el pavimento.

En este ensayo, el material sin estabilizar se somete a una serie de cargas axiales por un periodo muy corto de tiempo y entre cargas se da un periodo de reposo, esto con el fin de simular el paso del tránsito por el pavimento. Al mismo tiempo se aplica una presión de confinamiento constante, que simula los esfuerzos laterales causados por el peso del material que está por encima más las cargas de tránsito. En el laboratorio esta presión de confinamiento se simula a través de aire comprimido dentro de la cámara triaxial.

Actualmente, el método de ensayo para determinar el módulo resiliente en materiales granulares y suelos es el método estándar AASHTO T 307. Las muestras pueden ser especímenes sin estabilizar que pueden tener la densidad natural (extraídos del sitio de compactación) o con la densidad obtenida en el laboratorio (recompactados). En este estudio, primero se compactó un espécimen por cada fuente con la granulometría propia y a un contenido de agua, en el molde de 152 mm de diámetro. Luego se tamizó el material en la malla de $\frac{3}{4}$ y se compactaron 3 especímenes por cada fuente en el molde de 101,6 mm de diámetro.

Una vez compactada la muestra se coloca en la cámara triaxial y el espécimen es sometido a 15 combinaciones distintas de esfuerzos desviadores y presiones de confinamiento, que dan como resultado 15 diferentes valores de módulo para cada muestra. La secuencia de esfuerzos para bases granulares se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Secuencia del estado de esfuerzos en el ensayo para materiales de base y subbases.

| | Esfuerzo confinamiento σ_3 (kPa) | | | | |
|-------------------------------------|---|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | 21 | 35 | 69 | 103 | 138 |
| Esfuerzo desviador σ_d (kPa) | 21 ¹ | 35 ⁴ | 69 ⁷ | 69 ¹⁰ | 103 ¹³ |
| | 41 ² | 69 ⁵ | 138 ⁸ | 103 ¹¹ | 138 ¹⁴ |
| | 62 ³ | 103 ⁶ | 207 ⁹ | 207 ¹² | 276 ¹⁵ |

ⁱ⁼¹⁻¹⁵ Secuencia de ensayo (100 ciclos)

La secuencia de ensayos tiene dos fases, la primera fase es la aplicación de 500 ciclos de acondicionamiento al inicio del ensayo con un esfuerzo de confinamiento σ_3 de 103 kPa y un esfuerzo desviador de σ_d de 103 kPa. Si la altura del espécimen se sigue reduciendo hay que continuar hasta los 1000 ciclos antes del ensayo. La segunda fase es la aplicación de 100 ciclos de cada una de las 15 secuencias de la Tabla 3.

En la Figura 6 se muestra cómo se definen los esfuerzos máximo, cíclico y de contacto para el ensayo. Los esfuerzos se calculan con el área transversal del espécimen. Además de la carga de tipo haversiana.

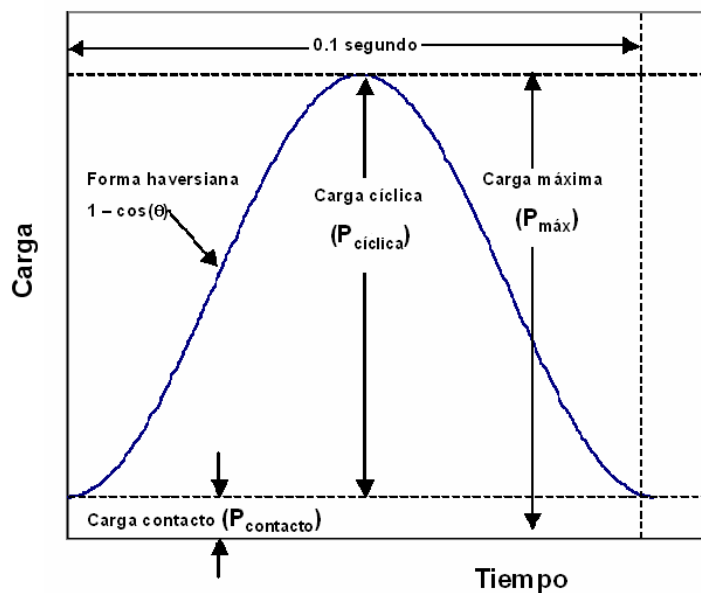


Figura 6: Definición de los esfuerzos aplicados por el método de ensayo.

En este estudio se utilizaron los medidores de deformación en la posición externa a la cámara triaxial como está descrito en el diagrama del método AASHTO T 307 y como se muestra en la Figura 7 .

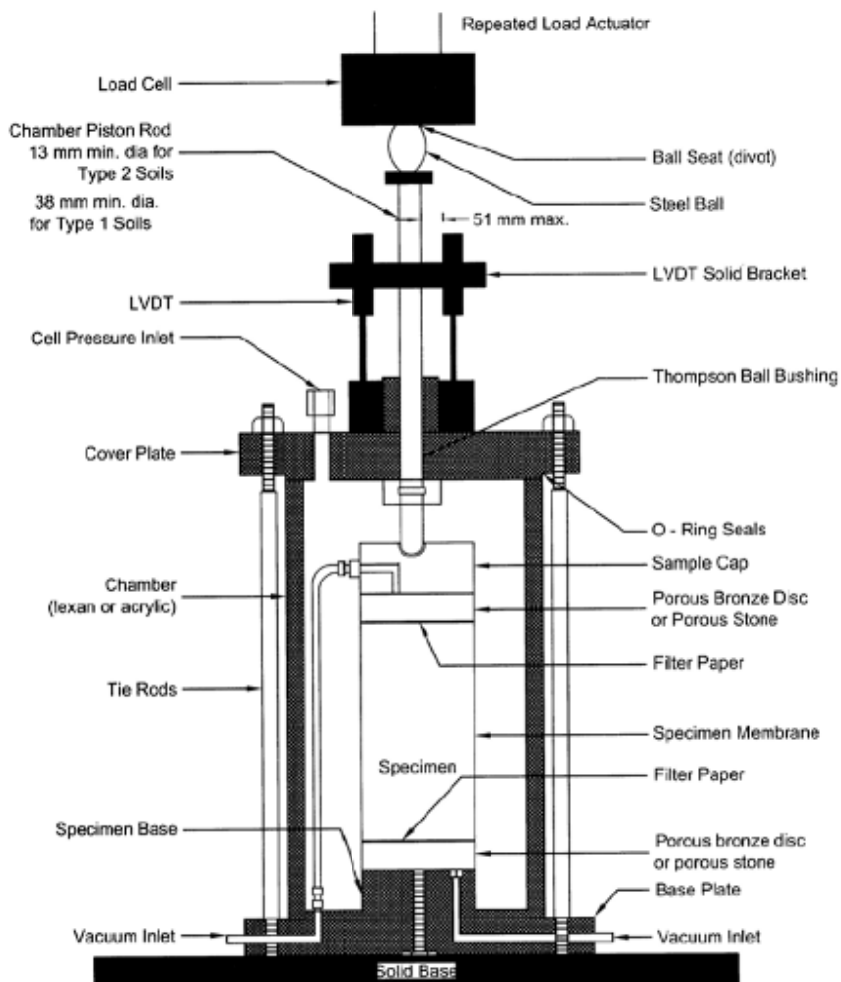


Figura 7: Diagrama de la colocación del espécimen y los deformímetros externos.

Para los especímenes de 152 mm de diámetro, las bases superior e inferior no tienen conexión para la entrada del vacío. Para los especímenes de 101.6 mm de diámetro las bases sí tienen la conexión para la entrada del vacío.

El método AASHTO T 307 define dos tipos de material en los cuales se puede realizar el ensayo. El material Tipo 1 es todo aquel material sin estabilizar que cumpla los siguientes criterios: menos del 70% debe pasar el tamiz de 2.0 mm (Nº 10), menos del 20% debe pasar el tamiz de 0.075 mm (Nº 200) y un índice de plasticidad de 10 o menos. Este material se debe

compactar en el molde de 152 mm de diámetro. El material Tipo 2 es todo aquel material que no cumple con los criterios anteriores y se pueden compactar en moldes de 71 ó 86 mm de diámetro.

3.2 Instrumentación del método

3.2.1 Moldes para la compactación de los especímenes

Con respecto a este punto, se hicieron dos moldes de 101.6 mm y 152 mm de diámetro con aditamentos para poder compactar las bases dentro de los mismos con membrana por medio de la aplicación de vacío para asegurar que la membrana tiene un contacto total con las paredes del molde. Las dimensiones anteriores se escogieron pues se debe cumplir con el criterio de que el diámetro mínimo debe ser igual a 5 veces el tamaño máximo de partícula. Si el tamaño máximo de las partículas excede en un 25% el tamaño del molde disponible estas partículas deben ser descartadas. La altura del espécimen debe ser 2 veces el diámetro.

Estos moldes están separados en el centro para desmoldar los especímenes evitando que se dañen en el proceso de sacar el espécimen del molde (Ver Figura 8).



Figura 8: Molde de 152 mm de diámetro con sus accesorios y colocación de la membrana.

3.2.2 Equipo para realizar el ensayo

Se presentan todos los equipos necesarios para la realización del ensayo.

La cámara triaxial para introducir el espécimen y confinarlo con aire y que sea de policarbonato para poder observar el espécimen durante el ensayo. La cámara del equipo además posee las extensiones para poder introducir el espécimen de 152 mm de diámetro. Además se tiene un tanque neumático para almacenar aire comprimido y tiene una servoválvula para controlar la presión de aire que tiene que haber en la cámara triaxial. (Ver Figura 9)



Figura 9: Cámara triaxial y tanque neumático.

El equipo de carga es de carga en la parte superior, de circuito cerrado, electrohidráulico o electroneumático con un generador de funciones capaz de aplicar ciclos de carga repetida con pulsos de forma haversiana (Figura 6) con periodos muy cortos de tiempo, 0.1 segundos de carga y 0.9 segundos de reposo. (Ver Figura 10)

También se necesitan dos transductores de deformación, los cuales se colocan fuera de la cámara triaxial como se muestra en la Figura 11.

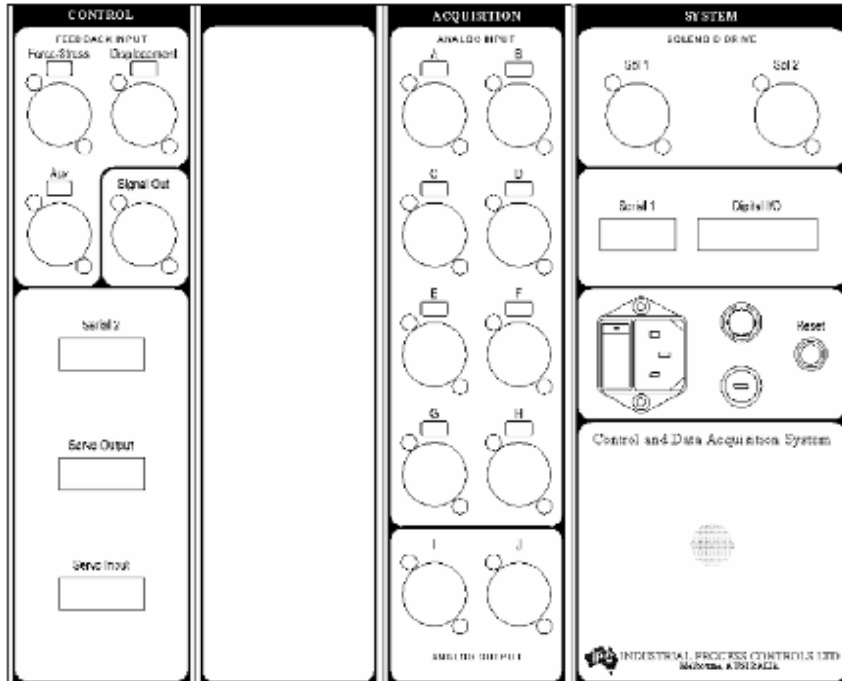


Figura 10: Marco de carga y el sistema CDAS de circuito cerrado.



Figura 11: Arreglo de los deformímetros fuera de la cámara triaxial.

En la siguiente Figura 12 se presenta la colocación de los transductores para la medición de las variables en el sistema de adquisición y control de los datos del ensayo.



| | |
|--------------------------------------|---|
| Panel de Control | Transductor |
| Force/Stress | Celda de carga (Fuerza o esfuerzo) |
| Displacement | Pistón del actuador |
| Signal Out | Cable que conecta con el Canal E del panel de Adquisición |
| Signal Out | No se usa |
| Servo Output | Cable de la servoválvula del tanque de aire comprimido |
| Servo Input | Botón para control manual de la presión de aire en la cámara triaxial |
| Panel de adquisición | Transductor |
| Cable Y de Force/Stress Displacement | Cable del transductor de presión que está en el tanque de aire comprimido |
| A | Celda de carga |
| B | Desplazamiento del pistón del actuador |
| C | Deformímetro LVDT externo izquierdo |
| D | Deformímetro LVDT externo derecho |
| E | Signal Out |

Figura 12: Colocación de los transductores para la realización del ensayo de módulo.

3.2.3 Otros equipos

Además de los equipos anteriores se necesitan los siguientes equipos y accesorios para la realización del ensayo.

Martillo Proctor modificado y estándar para la compactación de los materiales, bomba de vacío, membranas, discos porosos, o-rings, extensor de membrana y las bases superior e inferior con conexiones para el vacío. Todos los equipos anteriores deben ser compatibles con los tamaños de molde de 101.6 mm y 152 mm de diámetro. (Ver Figura 13)



Figura 13: Equipos adicionales para la realización del ensayo.

CAPÍTULO 4 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO

Se hizo el estudio a cinco fuentes de base granular distintas muestreadas en el año 2006. Para ese momento se estaban construyendo distintos proyectos en todo el país y se muestrearon los materiales en el apilamiento de cada sitio.

El primer material se muestreó en el Tajo de la empresa MECO en Santa Ana el 14 de marzo de 2006, el material estaba destinado para la Municipalidad de Santa Ana, el material es extraído del tajo y se encuentra en un solo apilamiento mezclados todos los tamaños. La descripción visual del material indica que es un agregado de tipo “chopo” color rojizo, partículas alongadas y cúbicas, medianamente ligero, poroso, no evidencia contaminación orgánica es un material bien graduado.

En el LanammeUCR se le designó con el número 0143-06. Para referencia el material se designará como **M1**. (Figura 14)



Figura 14: Fotografía del material extendido 0143-06 (**M1**).

El segundo material se muestreó en el Tajo de la empresa MECO en el Quebrador de Guápiles, el 13 de marzo de 2006, el material estaba destinado para el Colegio Lincoln en Moravia, el material es extraído del río Guápiles y se encuentra en un solo apilamiento mezclados todos los tamaños. En la descripción visual se indica que es un agregado de río triturado de partículas cúbicas y redondeadas de color gris con betas blancuzcas y amarillentas, aparentemente bien graduado y no evidencia contaminación orgánica. En el

LanammeUCR se le designó con el número 0144-06. Para referencia el material se designará como **M2**. (Figura 15)



Figura 15: Fotografía del material extendido 0144-06 (**M2**).

El tercer material se muestreó en el Tajo de la empresa MECO en Cañas el 15 de marzo de 2006, el material estaba destinado a una urbanización en Bagaces, el material es extraído del río Cañas y se encuentra en un solo apilamiento mezclados todos los tamaños. La descripción visual indica que es un agregado de río color gris oscuro, material triturado de partículas redondeadas y cúbicas, medianamente compacta no evidencia contaminación orgánica. En el LanammeUCR se le designó con el número 0148-06. Para referencia el material se designará como **M3**. (Figura 16)



Figura 16: Fotografía del material extendido 0148-06 (**M3**).

El cuarto material se muestreó en el Tajo de la empresa MECO en Barranca el 15 de marzo de 2006, el material estaba destinado para el proyecto Interamericana-Caldera, el material es extraído del río y se encuentra en un solo apilamiento mezclados todos los tamaños. La descripción visual indica que es un agregado de río triturado color gris, partícula

redondeada y cúbica, medianamente compacto, aparentemente bien graduado, no evidencia contaminación orgánica. En el LanammeUCR se le designó con el número 0149-06. Para referencia el material se designará como **M4**. (Figura 17)



Figura 17: Fotografía del material extendido 0149-06 (**M4**).

Finalmente, el quinto material se muestreó en el quebrador del ICE en San Carlos el 18 de marzo de 2006, el material estaba destinado para el proyecto Pirris, el material es extraído del túnel y se encuentra en un solo apilamiento mezclados todos los tamaños. La descripción visual indica que es un agregado de río triturado, partícula cúbica, color gris con partículas cafezucas y amarillentas, medianamente compacto, no evidencia contaminación con materia orgánica. En el LanammeUCR se le designó con el número 0159-06. Para referencia el material se designará como **M5**. (Figura 18)



Figura 18: Fotografía del material extendido 0159-06 (**M5**).

4.1 Densidad, gravedad específica y absorción

En la Tabla 4 se resumen los resultados de los ensayos de densidad, gravedad específica y absorción de los cinco materiales granulares.

Tabla 4: Resumen de resultados de densidad, gravedades específicas y absorción para los 5 materiales.

| Material | Gravedad específica | | | Densidad | | | Absorción (%) |
|----------|---------------------|------|------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------|
| | Gs | Gbs | Gbss | Ds (kg/m ³) | Dbss (kg/m ³) | Dbss (kg/m ³) | |
| M1 | 2,64 | 2,32 | 2,44 | 2629 | 2311 | 2431 | 5,22 |
| M2 | 2,77 | 2,51 | 2,61 | 2766 | 2508 | 2601 | 3,71 |
| M3 | 2,79 | 2,42 | 2,55 | 2780 | 2413 | 2545 | 5,45 |
| M4 | 2,74 | 2,44 | 2,55 | 2736 | 2434 | 2544 | 4,53 |
| M5 | 2,76 | 2,46 | 2,57 | 2753 | 2456 | 2563 | 4,38 |

4.2 Abrasión de los Ángeles

En la Tabla 5 se resumen los resultados de los ensayos de abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles.

Tabla 5: Resumen de resultados de abrasión para los 5 materiales.

| Material | Tipo de abrasión | Desgaste (%) |
|----------|------------------|--------------|
| M1 | A | 50,1 |
| M2 | A | 26,9 |
| M3 | A | 19,2 |
| M4 | A | 19,8 |
| M5 | A | 17,4 |

4.3 Contenido de vacíos en finos no compactados

En la Tabla 6 se resumen los resultados de los ensayos de vacíos en fino no compactados.

Tabla 6: Resumen de resultados de vacíos en finos no compactados para los 5 materiales.

| Material | % Vacíos |
|----------|----------|
| M1 | 41,8 |
| M2 | 35,8 |
| M3 | 36,1 |
| M4 | 34,8 |
| M5 | 34,6 |

4.4 Equivalente de arena

En la Tabla 7 se resumen los resultados de los ensayos de equivalente de arena.

Tabla 7: Resumen de resultados de equivalente de arena para los 5 materiales.

| Material | Equivalente de arena |
|-----------------|-----------------------------|
| M1 | 74,0 |
| M2 | 76,3 |
| M3 | 54,3 |
| M4 | 54,6 |
| M5 | 39,9 |

4.5 Índice de durabilidad

En la Tabla 8 se resumen los resultados de los ensayos de índice de durabilidad.

Tabla 8: Resumen de resultados de índice de durabilidad para los 5 materiales.

| Material | Gruesos | Finos |
|-----------------|----------------|--------------|
| M1 | 89,6 | 66,5 |
| M2 | 89,6 | 62,8 |
| M3 | 85,4 | 42,4 |
| M4 | 87,5 | 41,0 |
| M5 | 64,3 | 60,4 |

4.6 Degradación en el equipo Micro-Deval

En la Tabla 9 se resumen los resultados de los ensayos de desgaste en el equipo de Micro-Deval.

Tabla 9: Resumen de resultados de desgaste en el Micro-Deval para los 5 materiales.

| Material | Tipo de abrasión | Desgaste (%) |
|-----------------|-------------------------|---------------------|
| M1 | 1 | 23,5 |
| M2 | 1 | 9,71 |
| M3 | 1 | 15,3 |
| M4 | 1 | 10,3 |
| M5 | 1 | 22,8 |

4.7 Disgregabilidad en sulfato de sodio

En la Tabla 10 se resumen los resultados de los ensayos de disgregabilidad en sulfato de sodio para las fracciones fina y gruesa de cada material.

Tabla 10: Resumen de resultados de la disgregabilidad en sulfato de sodio para los 5 materiales.

| Material | Gruesos | Finos |
|-----------------|----------------|--------------|
| M1 | 0,66 | 4,46 |
| M2 | 0,44 | 3,07 |
| M3 | 2,32 | 9,30 |
| M4 | 2,38 | 4,71 |
| M5 | 9,03 | 9,34 |

4.8 Partículas friables y arcillosas

En la Tabla 11 se resumen los resultados de los ensayos de disgregabilidad en sulfato de sodio para las fracciones fina y gruesa de cada material.

Tabla 11: Resumen de resultados del porcentaje de partículas friables y arcillosas para los 5 materiales.

| Material | % Arcillas |
|-----------------|-------------------|
| M1 | 2,43 |
| M2 | 0,56 |
| M3 | 1,58 |
| M4 | 0,66 |
| M5 | 5,06 |

4.9 Granulometría

Se tomó una muestra cuarteada de los distintos materiales, la muestra luego se pasó por las distintas mallas para separar las partículas en los distintos tamaños. Se pesó el material retenido en cada tamiz, para realizar el cálculo de los porcentajes retenidos y pasando. Los resultados del análisis granulométrico se presentan a continuación para cada material estudiado.

4.9.1 Material M1

En la Tabla 12 se muestran los porcentajes retenido y pasando para el material M1. En la Figura 19 se muestra de manera gráfica el porcentaje pasando en función del tamaño del tamiz.

Tabla 12: Análisis granulométrico para el material **M1**.

| MALLA | | % RETENIDO | % PASANDO |
|-------|--------|------------|-----------|
| mm | pulg | | |
| 37,5 | 1 1/2 | 0,0 | 100,0 |
| 25,0 | 1 | 6,3 | 94,0 |
| 19,0 | 3/4 | 9,9 | 84,0 |
| 12,5 | 1/2 | 9,9 | 74,0 |
| 9,5 | 3/8 | 6,5 | 68,0 |
| 4,75 | Nº 4 | 14,9 | 53,0 |
| 2,36 | Nº 8 | 14,5 | 38,0 |
| 2,00 | Nº 10 | 3,4 | 35,0 |
| 1,18 | Nº 16 | 8,2 | 27,0 |
| 0,850 | Nº 20 | 4,5 | 22,0 |
| 0,600 | Nº 30 | 4,1 | 18,0 |
| 0,425 | Nº 40 | 3,2 | 15,0 |
| 0,300 | Nº 50 | 3,0 | 12,0 |
| 0,250 | Nº 60 | 1,5 | 10,0 |
| 0,150 | Nº 100 | 2,8 | 7,5 |
| 0,075 | Nº 200 | 2,1 | 5,4 |

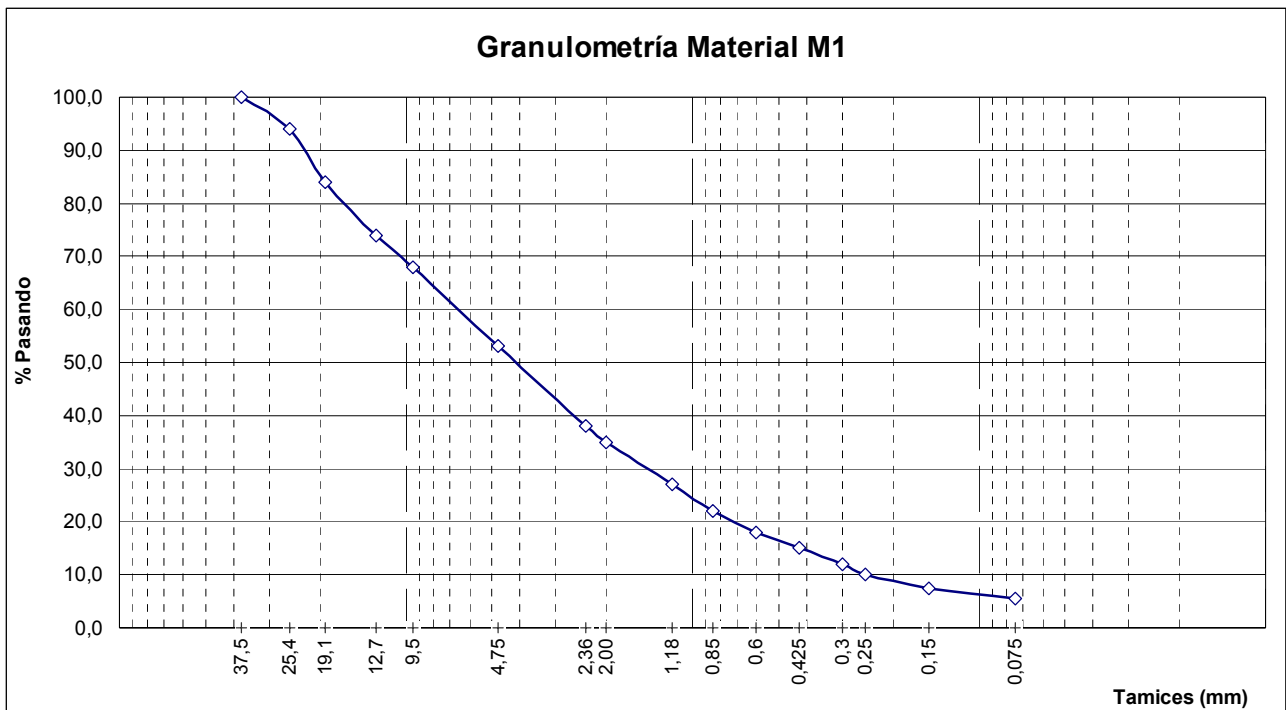


Figura 19: Gráfico de la granulometría del material **M1**.

4.9.2 Material M2

En la Tabla 13 se muestran los porcentajes retenido y pasando para el material M1. En la Figura 20 se muestra de manera gráfica el porcentaje pasando en función del tamaño del tamiz.

Tabla 13: Análisis granulométrico para el material **M2**.

| MALLA | | % RETENIDO | % PASANDO |
|-------|--------|------------|-----------|
| mm | pulg | | |
| 37,5 | 1 1/2 | 0,0 | 100,0 |
| 25,0 | 1 | 6,2 | 94,0 |
| 19,0 | 3/4 | 8,2 | 86,0 |
| 12,5 | 1/2 | 10,8 | 75,0 |
| 9,5 | 3/8 | 8,4 | 66,0 |
| 4,75 | Nº 4 | 16,5 | 50,0 |
| 2,36 | Nº 8 | 9,1 | 41,0 |
| 2,00 | Nº 10 | 2,3 | 38,0 |
| 1,18 | Nº 16 | 6,9 | 31,0 |
| 0,850 | Nº 20 | 4,7 | 27,0 |
| 0,600 | Nº 30 | 5,0 | 22,0 |
| 0,425 | Nº 40 | 4,3 | 18,0 |
| 0,300 | Nº 50 | 4,1 | 13,0 |
| 0,250 | Nº 60 | 2,0 | 11,0 |
| 0,150 | Nº 100 | 3,5 | 8,0 |
| 0,075 | Nº 200 | 2,1 | 5,9 |

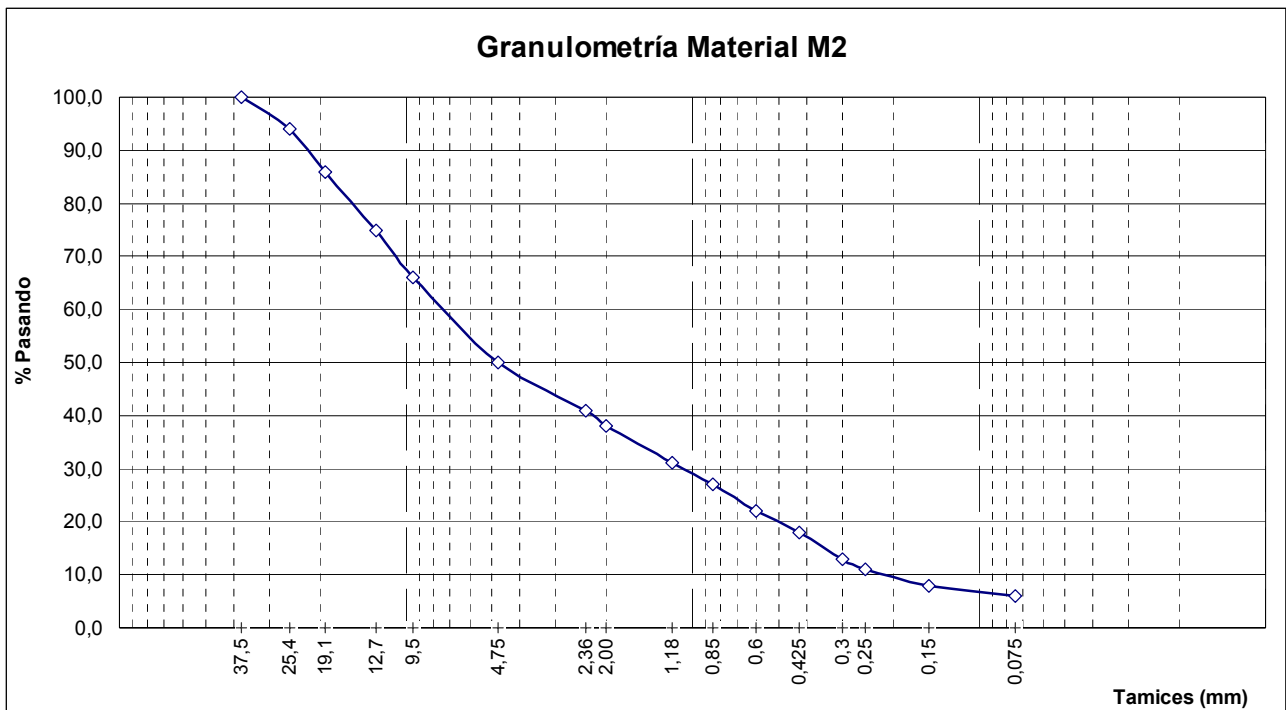


Figura 20: Gráfico de la granulometría del material **M2**.

4.9.3 Material M3

En la Tabla 14 se muestran los porcentajes retenido y pasando para el material M1. En la Figura 21 se muestra de manera gráfica el porcentaje pasando en función del tamaño del tamiz.

Tabla 14: Análisis granulométrico para el material **M3**.

| MALLA | | % RETENIDO | % PASANDO |
|-------|--------|------------|-----------|
| mm | pulg | | |
| 37,5 | 1 1/2 | 0,0 | 100,0 |
| 25,0 | 1 | 19,5 | 80,0 |
| 19,0 | 3/4 | 10,2 | 70,0 |
| 12,5 | 1/2 | 12,4 | 58,0 |
| 9,5 | 3/8 | 6,2 | 52,0 |
| 4,75 | Nº 4 | 12,4 | 39,0 |
| 2,36 | Nº 8 | 7,6 | 32,0 |
| 2,00 | Nº 10 | 1,7 | 30,0 |
| 1,18 | Nº 16 | 5,1 | 25,0 |
| 0,850 | Nº 20 | 3,3 | 22,0 |
| 0,600 | Nº 30 | 3,5 | 18,0 |
| 0,425 | Nº 40 | 3,4 | 15,0 |
| 0,300 | Nº 50 | 3,7 | 11,0 |
| 0,250 | Nº 60 | 1,7 | 9,2 |
| 0,150 | Nº 100 | 2,8 | 6,5 |
| 0,075 | Nº 200 | 1,2 | 5,3 |

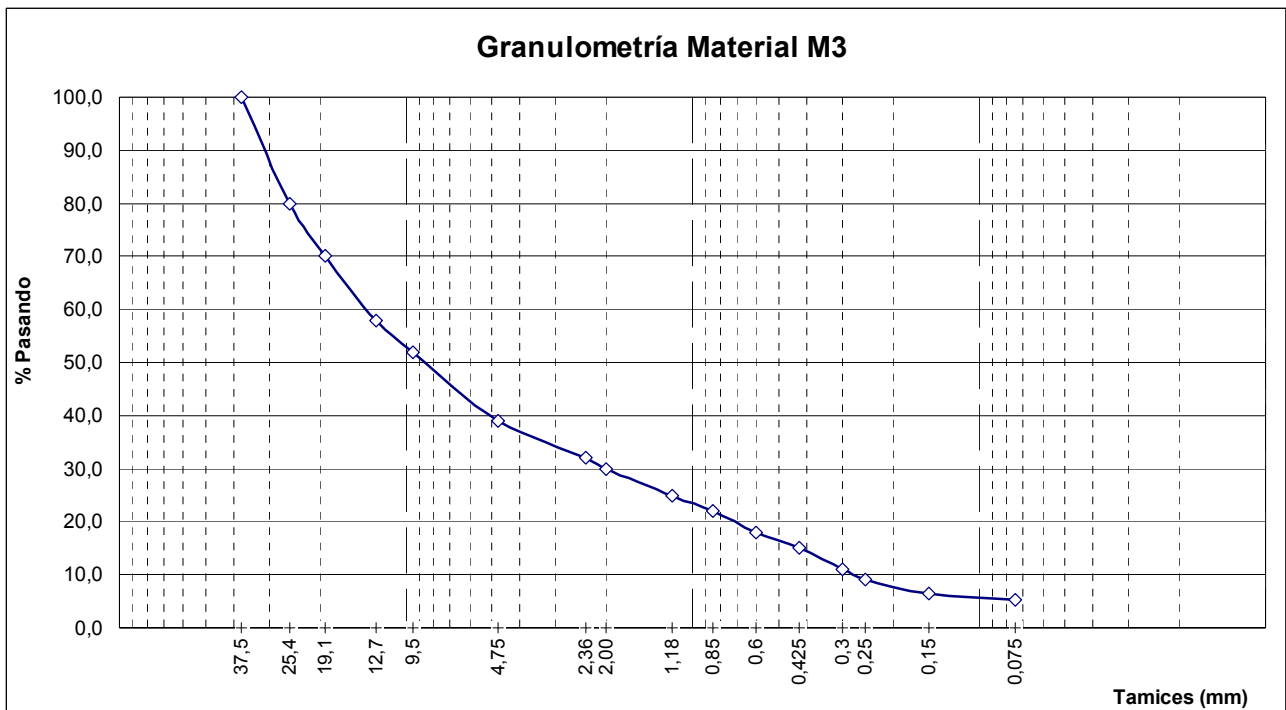


Figura 21: Gráfico de la granulometría del material **M3**.

4.9.4 Material M4

En la Tabla 15 se muestran los porcentajes retenido y pasando para el material M1. En la Figura 22 se muestra de manera gráfica el porcentaje pasando en función del tamaño del tamiz.

Tabla 15: Análisis granulométrico para el material **M4**.

| MALLA | | % RETENIDO | % PASANDO |
|-------|--------|------------|-----------|
| mm | pulg | | |
| 37,5 | 1 1/2 | 0,0 | 100,0 |
| 25,0 | 1 | 12,5 | 88,0 |
| 19,0 | 3/4 | 14,5 | 73,0 |
| 12,5 | 1/2 | 14,9 | 58,0 |
| 9,5 | 3/8 | 7,2 | 51,0 |
| 4,75 | Nº 4 | 13,2 | 38,0 |
| 2,36 | Nº 8 | 8,2 | 30,0 |
| 2,00 | Nº 10 | 1,8 | 28,0 |
| 1,18 | Nº 16 | 4,5 | 23,0 |
| 0,850 | Nº 20 | 2,5 | 21,0 |
| 0,600 | Nº 30 | 2,2 | 19,0 |
| 0,425 | Nº 40 | 1,8 | 17,0 |
| 0,300 | Nº 50 | 2,2 | 15,0 |
| 0,250 | Nº 60 | 1,5 | 13,0 |
| 0,150 | Nº 100 | 4,2 | 8,9 |
| 0,075 | Nº 200 | 2,3 | 6,6 |

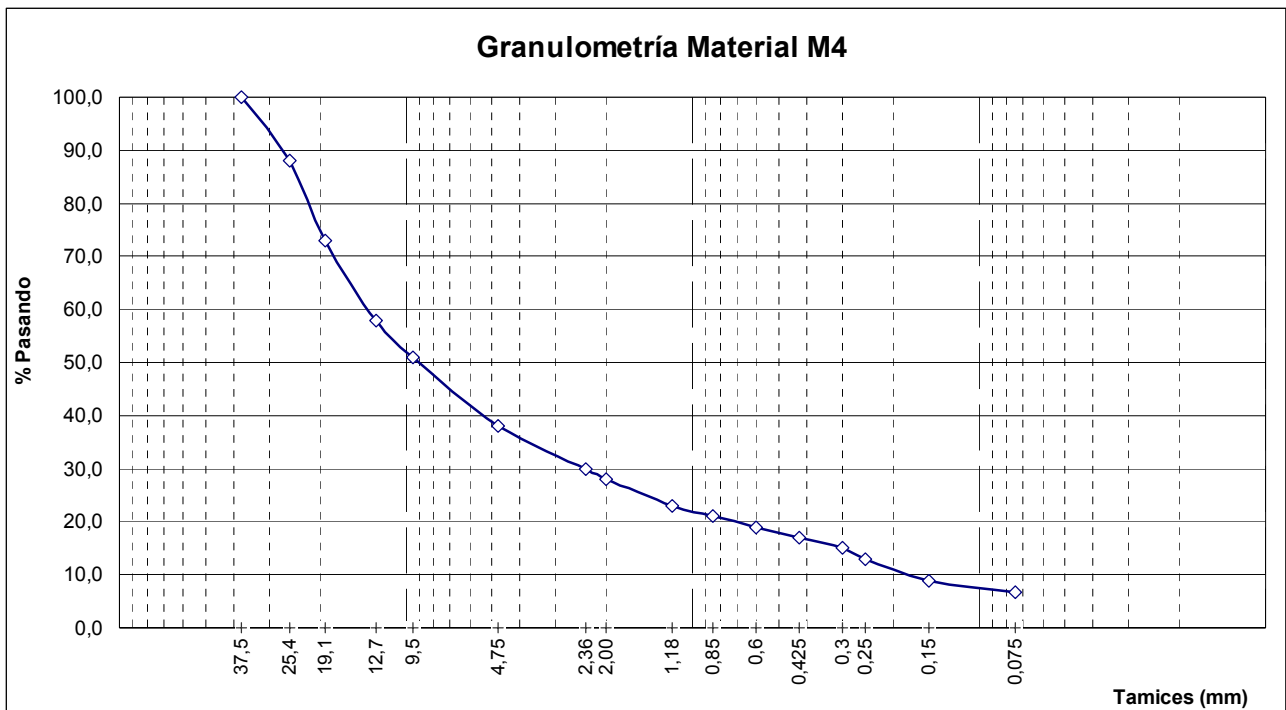


Figura 22: Gráfico de la granulometría del material **M4**.

4.9.5 Material M5

En la Tabla 16 se muestran los porcentajes retenido y pasando para el material M1. En la Figura 23 se muestra de manera gráfica el porcentaje pasando en función del tamaño del tamiz.

Tabla 16: Análisis granulométrico para el material **M5**.

| MALLA | | % RETENIDO | % PASANDO |
|-------|--------|------------|-----------|
| mm | pulg | | |
| 50,0 | 2 | 0,0 | 100,0 |
| 37,5 | 1 1/2 | 3,5 | 96,0 |
| 25,0 | 1 | 9,3 | 87,0 |
| 19,0 | 3/4 | 9,2 | 78,0 |
| 12,5 | 1/2 | 10,2 | 68,0 |
| 9,5 | 3/8 | 6,1 | 62,0 |
| 4,75 | Nº 4 | 11,7 | 50,0 |
| 2,36 | Nº 8 | 13,6 | 36,0 |
| 2,00 | Nº 10 | 2,9 | 33,0 |
| 1,18 | Nº 16 | 7,1 | 26,0 |
| 0,850 | Nº 20 | 3,5 | 23,0 |
| 0,600 | Nº 30 | 3,1 | 20,0 |
| 0,425 | Nº 40 | 2,4 | 17,0 |
| 0,300 | Nº 50 | 2,3 | 15,0 |
| 0,250 | Nº 60 | 1,2 | 14,0 |
| 0,150 | Nº 100 | 2,7 | 11,0 |
| 0,075 | Nº 200 | 2,8 | 8,4 |

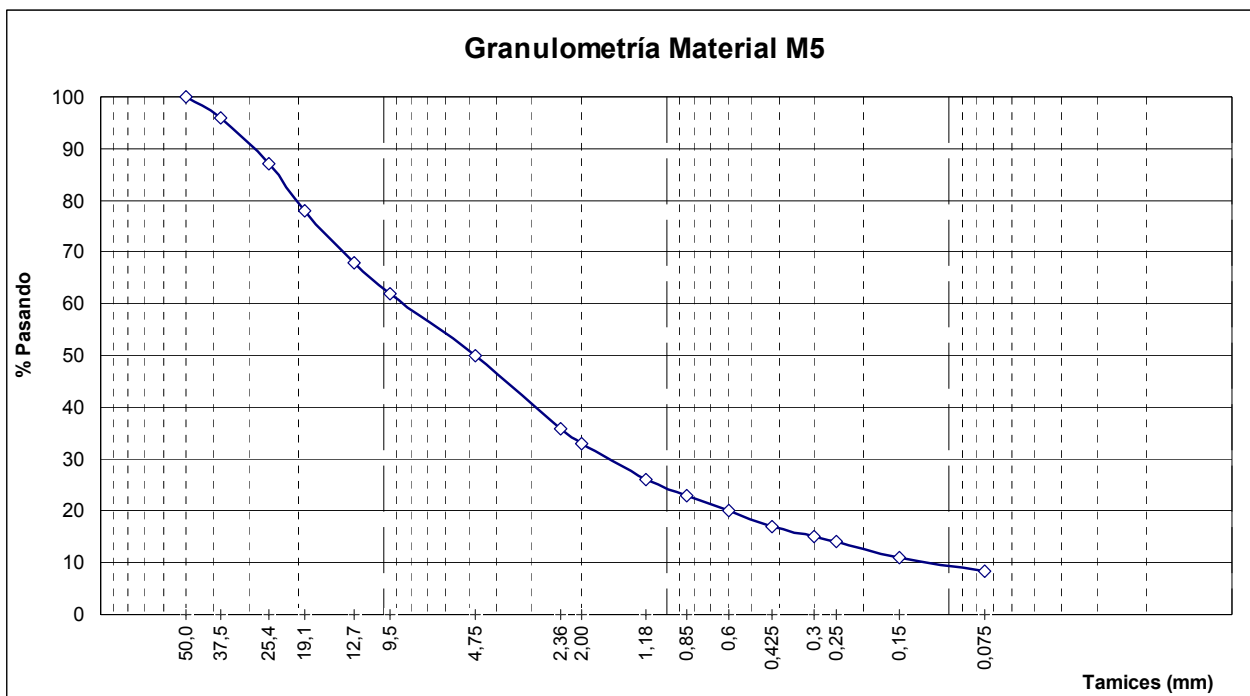


Figura 23: Gráfico de la granulometría del material **M5**.

En la siguiente Figura 24 se resumen todas las granulometrías de todos los materiales utilizados en el estudio.

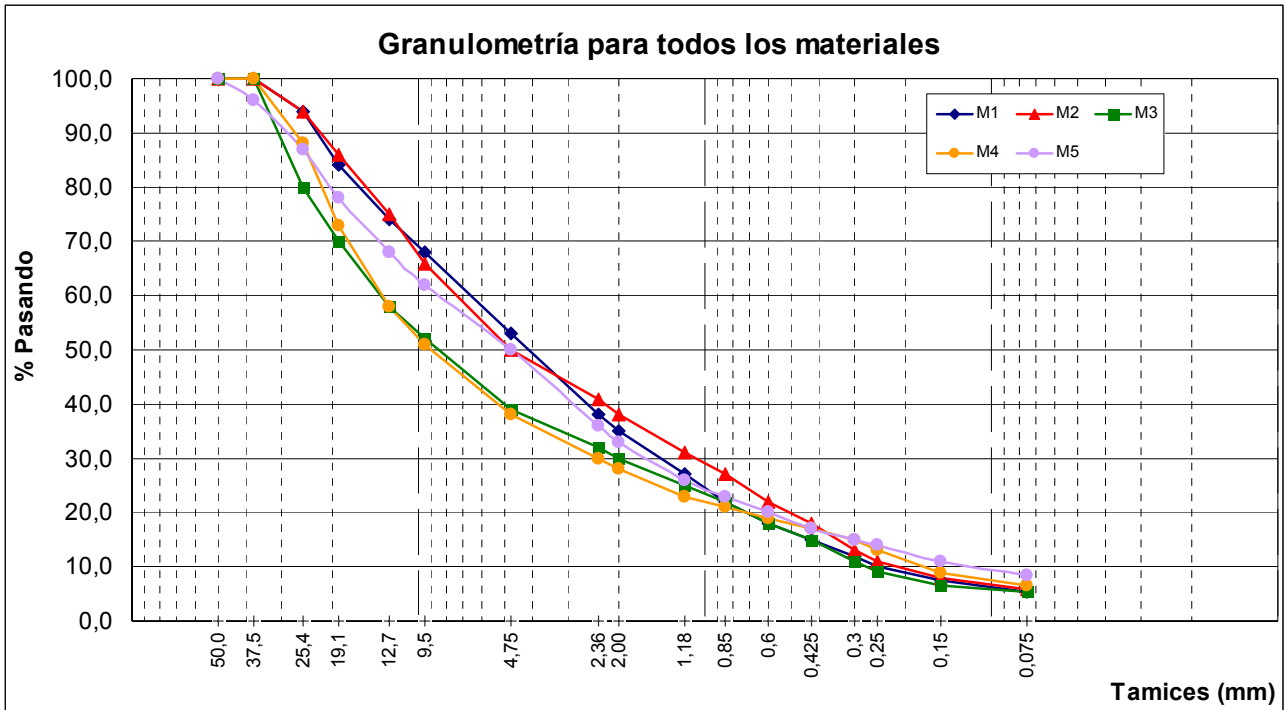


Figura 24: Gráfico de la granulometría de los 5 materiales.

Los 5 materiales se clasifican según AASHTO como **A-3**.

CAPÍTULO 5 ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE I FASE

5.1 Especímenes de 152 mm de diámetro

El módulo resiliente es un indicador de la rigidez del material de base que es sometido a un confinamiento constante y controlado junto con una carga axial repetida. Con el ensayo se tiene la intención de simular el estado de esfuerzos que se producen en la base y subbase en el pavimento. Los ensayos de módulo se realizaron a las muestras con un contenido de agua constante para alcanzar una densidad que permitiera que el espécimen soportara los ciclos de carga del ensayo. El contenido de agua para la compactación de cada muestra se alcanzó para obtener una buena consistencia en la muestra húmeda con la prueba de la presión de la mano, es decir no se obtuvo con el ensayo de densidad-humedad Próctor de cada material.

Según la granulometría obtenida para cada material, cada uno clasifica como Material Tipo 1 según el método de ensayo AASHTO T 307-99 (2003). Las muestras se mantuvieron en un horno a 60 °C por 16 horas para remover el exceso de agua de la muestra. Como clasificaron Tipo 1, los materiales se compactaron en un molde de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. Además se utilizó el mazo de Próctor modificado para compactar las 5 capas con 56 golpes, esperando con esto alcanzar una buena compactación y que el espécimen no se desmoronara a la hora de desmoldarlo.

Un día antes de la compactación, a cada material se le añadió la cantidad de agua calculada y se homogenizó bien, luego se guardaron en bolsas plásticas por 24 horas evitando la pérdida de humedad.

Los especímenes de 150 mm se compactaron con membrana en el molde y luego de desmoldar se les colocó una segunda membrana para asegurar que no hay agujeros en la membrana. Luego, se colocó el espécimen sobre una piedra porosa humedecida, se montó sobre la base y se selló con un empaque, igual se hizo con la parte superior. Finalmente, se colocó todo el ensamblaje sobre la base de la cámara triaxial. (Ver Figura 25)



Figura 25: Espécimen compactado colocado en la base de la cámara triaxial.

Una vez que el espécimen estaba colocado en la base de la cámara triaxial se procedió a medir la altura y el diámetro en tres puntos distintos, luego se colocó la parte superior de la cámara triaxial (Figura 26) y se probó que no hubiera fuga de aire a través de la membrana o los sellos.

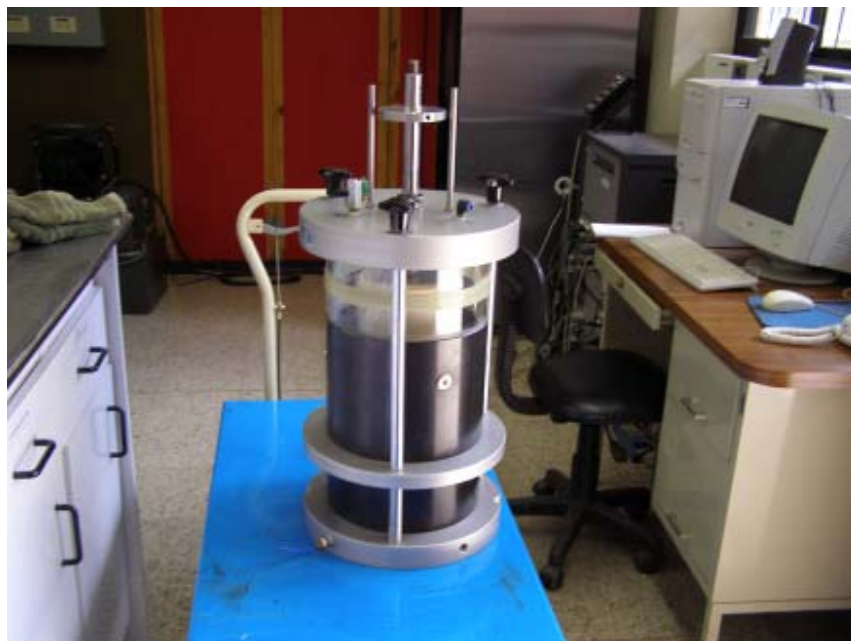


Figura 26: Espécimen dentro de la cámara triaxial.

Luego se introduce todo el ensamblaje en la máquina universal de carga dinámica, y se colocan los deformímetros externos para la medición de la deformación axial. (Figura 27)



Figura 27: Colocación de deformímetros externos.

El módulo resiliente para cada secuencia de esfuerzos fue calculado para el promedio de los últimos 5 ciclos de los 100 ciclos aplicados.

5.1.1 Material M1

Se compactó un espécimen de 150 mm de diámetro. Se le añadió 800 ml de agua a la muestra seca que tenía un peso de 15363 g. Luego de la compactación de 5 capas con 56 golpes por capa, el espécimen se sometió a una carga adicional de 3500 lbs en la máquina universal. En la Tabla 17 se resume el tamaño del espécimen y el cálculo del volumen. En la Tabla 18 se resume el cálculo del porcentaje de humedad real de la muestra. En la Tabla 19 se resume el cálculo de la densidad del material.

Finalmente, en la Tabla 20 se resume el resultado del ensayo de módulo resiliente, el cual no se terminó totalmente pues en el ciclo 12 el espécimen se derrumbó (Figura 28) y los deformímetros externos perdieron contacto con el espécimen. Esto se debió a que no se logró alcanzar una densidad adecuada pues resultó bastante baja.

Tabla 17: Cálculo del volumen M1.

| Altura (mm) | Diámetro (mm) | Altura (m) | Diámetro (m) | Vol (m ³) |
|-------------|---------------|------------|--------------|-----------------------|
| 310,21 | 154,0 | 0,310 | 0,154 | 0,005731 |
| 310,37 | 153,5 | | | |
| 308,51 | 153,0 | | | |

Tabla 18: Resumen de la medición del porcentaje de humedad del material M1.

| Cantidad de agua añadida (ml) | Peso de cápsula (g) | Peso de cápsula+material húmedo (g) | Peso de cápsula+material seco (g) | Peso material húmedo (g) | Peso material seco (g) | Wa (%) |
|-------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|------------------------|--------|
| 800 | 120,5 | 944,1 | 901,0 | 823,6 | 780,5 | 5,5 |

Tabla 19: Resumen de la medición de la densidad del material M1.

| Peso molde+membrana+gasas+material comp (g) | Peso molde+membrana+gasas (g) | Peso de material húmedo compactado (g) | γ_w (kg/m ³) | γ_s (kg/m ³) |
|---|-------------------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|
| 20001,0 | 9981,6 | 10019,4 | 1748,3 | 1656,8 |

Tabla 20: Resumen de resultados de módulo resiliente para el espécimen de 150 mm del material M1.

| Secuencia | σ_{conf} (kPa) | σ_3 (kPa) | σ_d (kPa) | $\sigma_{contacto}$ (kPa) | δr (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|-----------------------|------------------|------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------------------|----------|
| 1-0 | 103,2 | 102,3 | 92,3 | 10,0 | 0,280 | 910,7 | 101,3 |
| 1-1 | 20,7 | 20,0 | 18,1 | 2,0 | 0,129 | 421,1 | 42,9 |
| 1-2 | 20,7 | 41,0 | 36,9 | 4,0 | 0,188 | 610,8 | 60,5 |
| 1-3 | 20,7 | 61,2 | 55,3 | 5,9 | 0,220 | 717,0 | 77,2 |
| 1-4 | 34,5 | 33,8 | 30,4 | 3,4 | 0,174 | 568,4 | 53,5 |
| 1-5 | 34,5 | 68,1 | 61,5 | 6,6 | 0,231 | 751,5 | 81,9 |
| 1-6 | 34,5 | 102,7 | 92,8 | 9,9 | 0,274 | 891,7 | 104,0 |
| 1-7 | 68,8 | 68,3 | 61,4 | 7,0 | 0,266 | 866,0 | 70,9 |
| 1-8 | 68,8 | 137,6 | 12,3 | 13,9 | 0,319 | 1038,3 | 119,2 |
| 1-9 | 68,8 | 205,8 | 185,3 | 20,5 | 0,465 | 1513,2 | 122,5 |
| 1-10 | 103,3 | 68,4 | 61,6 | 6,8 | 0,363 | 1181,7 | 52,1 |
| 1-11 | 103,3 | 102,6 | 92,4 | 10,2 | 0,336 | 1094,3 | 84,5 |
| 1-12 | 103,3 | 189,0 | 168,4 | 20,5 | - | 880,5 | 141,6* |

* Alcanzó hasta el ciclo 88.



Figura 28: Falla del espécimen en el ciclo 12 del material **M1** de 150 mm de diámetro.

5.1.2 Material M2

Se compactó un espécimen de 150 mm de diámetro. Se le añadió 400 ml de agua a la muestra seca que tenía un peso de 14922.7 g. Luego de la compactación de 5 capas con 56 golpes por capa, al espécimen se sometió a una carga adicional de 6000 lbs en la máquina universal. En la Tabla 21 se resume el tamaño del espécimen y el cálculo del volumen. En la Tabla 22 se resume el cálculo del porcentaje de humedad real de la muestra. En la Tabla 23 se resume el cálculo de la densidad del material.

Finalmente, en la Tabla 24 se resume el resultado del ensayo de módulo resiliente, el cual no se terminó totalmente pues en el ciclo de preacondicionamiento el espécimen se derrumbó (Figura 29) y los deformímetros externos perdieron contacto con el espécimen. Esto se debió a que no se logró alcanzar una densidad adecuada pues resultó bastante baja y además a la hora del desmolde el fondo se desmoronó.

Tabla 21: Cálculo del volumen **M2**.

| Altura (mm) | Diámetro (mm) | Altura (m) | Diámetro (m) | Vol (m ³) |
|-------------|---------------|------------|--------------|-----------------------|
| 306,21 | 153,5 | 0,306 | 0,153 | 0,005655 |
| 306,21 | 153,5 | | | |
| 306,37 | 153,0 | | | |

Tabla 22: Resumen de la medición del porcentaje de humedad del material **M2**.

| Cantidad de agua añadida (ml) | Peso de cápsula (g) | Peso de cápsula+material húmedo (g) | Peso de cápsula+material seco (g) | Peso material húmedo (g) | Peso material seco (g) | Wa (%) |
|-------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|------------------------|--------|
| 400 | 120,5 | 1105,9 | 1071,9 | 985,4 | 951,4 | 3,6 |

Tabla 23: Resumen de la medición de la densidad del material **M2**.

| Peso molde+membrana+gasas+material comp (g) | Peso molde+membrana+gasas (g) | Peso de material húmedo compactado (g) | γ_w (kg/m ³) | γ_s (kg/m ³) |
|---|-------------------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|
| 21538,0 | 9981,6 | 11556,4 | 2043,5 | 1973,0 |

Tabla 24: Resumen de resultados de módulo resiliente para el espécimen de 150 mm del material **M2**.

| Secuencia | σ_{conf} (kPa) | σ_3 (kPa) | σ_d (kPa) | $\sigma_{contacto}$ (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|-----------------------|------------------|------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------------------|----------|
| 1-0 | 104,6 | 93,4 | 83,1 | 10,3 | 0,437 | 1426,5 | 58,4* |

* Alcanzó hasta el ciclo 38.



Figura 29: Falla del espécimen en el precondicionamiento del material **M2**.

5.1.3 Material M3

Se compactó un espécimen de 150 mm de diámetro. Se le añadió 450 ml de agua a la muestra seca que tenía un peso de 15069 g. Luego de la compactación de 5 capas con 56 golpes por capa, al espécimen se sometió a una carga adicional de 6000 lbs en la máquina universal. En la Tabla 25 se resume el tamaño del espécimen y el cálculo del volumen. En la Tabla 26 se resume el cálculo del porcentaje de humedad real de la muestra. En la Tabla 27 se resume el cálculo de la densidad del material.

Finalmente, en la Tabla 28 se resume el resultado del ensayo de módulo resiliente, el cual no se terminó totalmente pues en el ciclo 8 el espécimen se derrumbó (Figura 30) y los deformímetros externos perdieron contacto con el espécimen. Esto se debió a que no se logró alcanzar una densidad adecuada pues resultó bastante baja.

Tabla 25: Cálculo del volumen M3.

| Altura (mm) | Diámetro (mm) | Altura (m) | Diámetro (m) | Vol (m ³) |
|-------------|---------------|------------|--------------|-----------------------|
| 306,81 | 153,5 | 0,306 | 0,154 | 0,005684 |
| 306,18 | 153,5 | | | |
| 306,50 | 154,0 | | | |

Tabla 26: Resumen de la medición del porcentaje de humedad del material M3.

| Cantidad de agua añadida (ml) | Peso de cápsula (g) | Peso de cápsula+material húmedo (g) | Peso de cápsula+material seco (g) | Peso material húmedo (g) | Peso material seco (g) | Wa (%) |
|-------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|------------------------|--------|
| 450 | 120,6 | 1046,2 | 1006,9 | 925,6 | 886,3 | 4,4 |

Tabla 27: Resumen de la medición de la densidad del material M3.

| Peso molde+membrana+gasas+material comp (g) | Peso molde+membrana+gasas (g) | Peso de material húmedo compactado (g) | γ_w (kg/m ³) | γ_s (kg/m ³) |
|---|-------------------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|
| 21606,5 | 9981,6 | 11624,9 | 2045,2 | 1958,3 |

Tabla 28: Resumen de resultados de módulo resiliente para el espécimen de 150 mm del material **M3**.

| Secuencia | σ_{conf} (kPa) | σ_3 (kPa) | σ_d (kPa) | $\sigma_{contacto}$ (kPa) | δr (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|--------------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------|
| 1-0 | 103,3 | 102,6 | 92,4 | 10,2 | 0,238 | 774,5 | 119,2 |
| 1-1 | 20,7 | 19,9 | 17,9 | 2,0 | 0,096 | 314,6 | 57,0 |
| 1-2 | 20,7 | 40,7 | 36,6 | 4,1 | 0,146 | 477,2 | 76,6 |
| 1-3 | 20,7 | 61,4 | 55,2 | 6,2 | 0,172 | 561,8 | 98,2 |
| 1-4 | 34,5 | 33,8 | 30,5 | 3,3 | 0,135 | 438,6 | 69,5 |
| 1-5 | 34,5 | 68,0 | 61,5 | 6,6 | 0,182 | 592,4 | 103,7 |
| 1-6 | 34,5 | 102,6 | 92,5 | 10,1 | 0,261 | 852,0 | 108,6 |
| 1-7 | 68,8 | 68,1 | 61,4 | 6,7 | 0,206 | 672,1 | 91,3* |

* Alcanzó hasta el ciclo 100.



Figura 30: Falla del espécimen en el preacondicionamiento del material **M3**.

5.1.4 Material M4

Se compactó un espécimen de 150 mm de diámetro. Se le añadió 350 ml de agua a la muestra seca que tenía un peso de 15156.4 g. Luego de la compactación de 5 capas con 56 golpes por capa, al espécimen se sometió a una carga adicional de 6000 lbs en la máquina universal. En la Tabla 29 se resume el tamaño del espécimen y el cálculo del

volumen. En la Tabla 34 se resume el cálculo del porcentaje de humedad real de la muestra. En la Tabla 31 se resume el cálculo de la densidad del material. Finalmente, en la Tabla 32 se resume el resultado del ensayo de módulo resiliente, el cual no se terminó totalmente pues en el ciclo de preacondicionamiento el espécimen se derrumbó (Figura 32) y los deformímetros externos perdieron contacto con el espécimen. Esto se debió a que no se logró alcanzar una densidad adecuada pues resultó bastante baja.

Tabla 29: Cálculo del volumen M4.

| Altura (mm) | Diámetro (mm) | Altura (m) | Diámetro (m) | Vol (m ³) |
|-------------|---------------|------------|--------------|-----------------------|
| 309,72 | 153,5 | 0,308 | 0,154 | 0,005706 |
| 307,31 | 153,5 | | | |
| 308,03 | 153,5 | | | |

Tabla 30: Resumen de la medición del porcentaje de humedad del material M4.

| Cantidad de agua añadida (ml) | Peso de cápsula (g) | Peso de cápsula+material húmedo (g) | Peso de cápsula+material seco (g) | Peso material húmedo (g) | Peso material seco (g) | Wa (%) |
|-------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|------------------------|--------|
| 350 | 121,7 | 985,0 | 953,4 | 863,3 | 831,7 | 3,8 |

Tabla 31: Resumen de la medición de la densidad del material M4.

| Peso molde+membrana+gasas+material comp (g) | Peso molde+membrana+gasas (g) | Peso de material húmedo compactado (g) | γ_w (kg/m ³) | γ_s (kg/m ³) |
|---|-------------------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|
| 21691,0 | 9981,6 | 11709,4 | 2052,1 | 1977,0 |

Tabla 32: Resumen de resultados de módulo resiliente para el espécimen de 150 mm del material M4.

| Secuencia | σ_{conf} (kPa) | σ_3 (kPa) | σ_d (kPa) | $\sigma_{contacto}$ (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|-----------------------|------------------|------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------------------|----------|
| 1-0 | 105,0 | 101,8 | 91,5 | 10,2 | - | - | 89,1* |

* Alcanzó hasta el ciclo 98.



Figura 31: Falla del espécimen en el preacondicionamiento del material **M4**.

5.1.5 Material M5

Se compactó un espécimen de 150 mm de diámetro. Se le añadió 475 ml de agua a la muestra seca que tenía un peso de 15101.3 g. Luego de la compactación de 5 capas con 56 golpes por capa, al espécimen se sometió a una carga adicional de 6000 lbs en la máquina universal. En la Tabla 33 se resume el tamaño del espécimen y el cálculo del volumen. En la Tabla 34 se resume el cálculo del porcentaje de humedad real de la muestra. En la Tabla 35 se resume el cálculo de la densidad del material.

Finalmente, en la Tabla 36 se resume el resultado del ensayo de módulo resiliente, el cual no se terminó totalmente pues en el ciclo 9 el espécimen se derrumbó (Figura 32) y los deformímetros externos perdieron contacto con el espécimen. Esto se debió a que no se logró alcanzar una densidad adecuada pues resultó bastante baja.

Tabla 33: Cálculo del volumen **M5**.

| Altura (mm) | Diámetro (mm) | Altura (m) | Diámetro (m) | Vol (m ³) |
|-------------|---------------|------------|--------------|-----------------------|
| 311,22 | 153,5 | 0,310 | 0,153 | 0,005721 |
| 308,82 | 153,5 | | | |
| 309,52 | 153,0 | | | |

Tabla 34: Resumen de la medición del porcentaje de humedad del material **M5**.

| Cantidad de agua añadida (ml) | Peso de cápsula (g) | Peso de cápsula+material húmedo (g) | Peso de cápsula+material seco (g) | Peso material húmedo (g) | Peso material seco (g) | Wa (%) |
|-------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|------------------------|--------|
| 475 | 121,6 | 995,4 | 961,0 | 873,8 | 839,4 | 4,1 |

Tabla 35: Resumen de la medición de la densidad del material **M5**.

| Peso molde+membrana+gasas+ material comp (g) | Peso molde+membrana+ gasas (g) | Peso de material húmedo compactado (g) | γ_w (kg/m ³) | γ_s (kg/m ³) |
|--|--------------------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|
| 22374,0 | 9981,6 | 12392,4 | 2166,0 | 2080,7 |

Tabla 36: Resumen de resultados de módulo resiliente para el espécimen de 150 mm del material **M5**.

| Secuencia | σ_{conf} (kPa) | σ_3 (kPa) | σ_d (kPa) | $\sigma_{contacto}$ (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|-----------------------|------------------|------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------------------|----------|
| 1-0 | 103,3 | 102,4 | 92,1 | 10,3 | 0,222 | 717,5 | 128,4 |
| 1-1 | 20,6 | 20,0 | 18 | 2,0 | 0,118 | 380,4 | 47,2 |
| 1-2 | 20,7 | 40,8 | 36,8 | 4,0 | 0,167 | 540,2 | 68,1 |
| 1-3 | 20,7 | 61,4 | 55,3 | 6,1 | 0,186 | 598,8 | 92,3 |
| 1-4 | 34,5 | 33,8 | 30,6 | 3,2 | 0,162 | 523,5 | 58,5 |
| 1-5 | 34,5 | 67,8 | 61,0 | 6,8 | 0,189 | 611,2 | 99,9 |
| 1-6 | 34,5 | 102,2 | 92,1 | 10,1 | 0,210 | 678,4 | 135,8 |
| 1-7 | 68,8 | 68,2 | 61,4 | 6,8 | 0,200 | 644,3 | 95,3 |
| 1-8 | 68,8 | 136,7 | 122,8 | 13,9 | 0,240 | 774,5 | 158,5 |
| 1-9 | 68,8 | 161,3 | 141,0 | 20,3 | - | - | 158,9* |

* Alcanzó hasta el ciclo 39.



Figura 32: Falla del espécimen en el precondicionamiento del material **M5**.

5.2 Especímenes de 102 mm de diámetro

Como se tuvo problemas para alcanzar una buena densidad de los distintos materiales para lograr un ensayo completo de módulo resiliente. Entonces, se decidió descartar el agregado más grueso de 19 mm. Por lo tanto, se trabajó con especímenes de 101.6 mm de diámetro y 203 mm de altura aproximadamente. Se compactaron con el mazo Próctor modificado en 5 capas con 56 golpes por capa. Por cada material se compactaron 6 especímenes. A continuación se presentan los resultados para cada material.

5.2.1 Material M1

En la Figura 33 se presenta una fotografía del material retenido en el tamiz de 19 mm y también el material que pasa esta malla.



Figura 33: Agregado retenido en el tamiz de 19 mm y agregado que pasa el mismo tamiz del material **M1**.

En la Tabla 37 se resumen las densidades obtenidas y los contenidos de agua para los especímenes del material M1. En la Tabla 38 se resumen los resultados de módulo resiliente.

Tabla 37: Resumen de las densidades húmeda y seca con los contenidos de agua para el material **M1**.

| Pastilla | % Wa | γ_w (kg/m ³) | γ_s (kg/m ³) |
|-----------------|------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 8,8 | 1913,5 | 1758,2 |
| 2 | 8,3 | 1906,5 | 1761,0 |
| 3 | 8,0 | 1887,9 | 1748,1 |
| 4 | 13,9 | 1905,8 | 1673,0 |
| 5 | 7,1 | 1893,4 | 1768,2 |
| 6 | 6,9 | 1875,1 | 1753,4 |
| Promedio | 8,8 | 1897,0 | 1743,6 |

Tabla 38: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material M1.

| Secuencia | σ_{conf} (kPa) | $\sigma_{m\acute{a}x}$ (kPa) | σ_d (kPa) | $\sigma_{contacto}$ (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|--------------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------|
| 1-0 | 103,3 | 101,3 | 91,2 | 10,1 | 0,122 | 595,1 | 153,2 |
| 1-1 | 20,6 | 19,2 | 17,3 | 1,9 | 0,058 | 281,1 | 61,5 |
| 1-2 | 20,7 | 39,7 | 35,5 | 4,3 | 0,108 | 527,4 | 67,3 |
| 1-3 | 20,8 | 60,4 | 54,3 | 6,1 | 0,145 | 707,1 | 76,8 |
| 1-4 | 34,4 | 33,3 | 29,9 | 3,4 | 0,079 | 385,5 | 77,5 |
| 1-5 | 34,4 | 67,1 | 60,1 | 7,0 | 0,141 | 687,3 | 87,4 |
| 1-6 | 34,6 | 101,7 | 91,1 | 10,7 | 0,183 | 890,5 | 102,3 |
| 1-7 | 68,8 | 67,5 | 60,8 | 6,7 | 0,108 | 524,7 | 116,0 |
| 1-8 | 68,8 | 136,2 | 123,1 | 13,1 | 0,183 | 891,4 | 138,0 |
| 1-9 | 68,8 | 205,0 | 184,3 | 20,7 | 0,240 | 1170,6 | 157,4 |
| 1-10 | 103,3 | 68,1 | 60,8 | 7,3 | 0,090 | 436,9 | 139,2 |
| 1-11 | 103,3 | 102,8 | 92,2 | 10,6 | 0,127 | 619,6 | 148,8 |
| 1-12 | 103,3 | 204,9 | 184,9 | 19,9 | 0,212 | 1034,2 | 178,8 |
| 1-13 | 137,7 | 101,8 | 90,7 | 11,1 | 0,108 | 525,5 | 172,6 |
| 1-14 | 137,7 | 136,6 | 122,0 | 14,6 | 0,136 | 664,6 | 183,6 |
| 1-15 | 137,7 | 274,8 | 246,5 | 28,3 | 0,232 | 1131,3 | 217,9 |
| 2-0 | 103,3 | 102,2 | 92,0 | 10,3 | 0,113 | 546,4 | 168,3 |
| 2-1 | 20,7 | 19,0 | 17,1 | 1,9 | 0,050 | 244,5 | 70,0 |
| 2-2 | 20,7 | 39,9 | 35,9 | 4,0 | 0,096 | 465,4 | 77,3 |
| 2-3 | 20,7 | 60,6 | 54,6 | 6,1 | 0,132 | 642,0 | 85,0 |
| 2-4 | 34,5 | 33,4 | 29,9 | 3,4 | 0,072 | 349,0 | 85,8 |
| 2-5 | 34,4 | 67,7 | 60,8 | 6,8 | 0,130 | 629,6 | 96,6 |
| 2-6 | 34,5 | 101,5 | 91,2 | 10,3 | 0,174 | 843,9 | 108,0 |
| 2-7 | 68,8 | 67,8 | 60,7 | 7,2 | 0,100 | 484,0 | 125,4 |
| 2-8 | 68,8 | 136,2 | 122,6 | 13,6 | 0,173 | 842,0 | 145,6 |
| 2-9 | 68,8 | 205,0 | 184,9 | 20,1 | 0,241 | 1167,5 | 158,4 |
| 2-10 | 103,3 | 67,6 | 60,7 | 6,9 | 0,084 | 406,2 | 149,3 |
| 2-11 | 103,3 | 101,2 | 90,7 | 10,5 | 0,121 | 588,0 | 154,3 |
| 2-12 | 103,2 | 204,7 | 183,7 | 21,0 | 0,210 | 1021,3 | 179,9 |
| 2-13 | 137,7 | 102,6 | 91,5 | 11,1 | 0,105 | 508,8 | 179,9 |
| 2-14 | 137,7 | 137,1 | 123,3 | 13,8 | 0,135 | 655,0 | 188,3 |
| 2-15 | 137,7 | 274,5 | 246,1 | 28,4 | 0,232 | 1128,0 | 218,2 |
| 3-0 | 103,3 | 102,4 | 91,9 | 10,6 | 0,136 | 663,7 | 138,4 |
| 3-1 | 20,7 | 19,0 | 16,8 | 2,3 | 0,054 | 264,3 | 63,5 |
| 3-2 | 20,7 | 40,0 | 36,3 | 3,7 | 0,112 | 549,4 | 66,2 |
| 3-3 | 20,7 | 60,8 | 54,5 | 6,2 | 0,157 | 766,3 | 71,2 |
| 3-4 | 34,5 | 33,4 | 30,2 | 3,1 | 0,083 | 405,7 | 74,6 |
| 3-5 | 34,5 | 67,6 | 61,0 | 6,6 | 0,152 | 741,7 | 82,2 |
| 3-6 | 34,4 | 101,5 | 91,1 | 10,4 | 0,209 | 1021,3 | 89,1 |
| 3-7 | 68,8 | 68,1 | 61,0 | 7,1 | 0,119 | 583,1 | 104,5 |
| 3-8 | 68,8 | 137,2 | 123,5 | 13,7 | 0,210 | 1027,4 | 120,2 |
| 3-9 | 68,8 | 204,5 | 183,6 | 20,9 | 0,275 | 1346,3 | 136,4 |
| 3-10 | 103,3 | 67,8 | 60,7 | 7,0 | 0,102 | 499,0 | 121,7 |
| 3-11 | 103,3 | 102,8 | 92,1 | 10,7 | 0,146 | 713,1 | 129,1 |
| 3-12 | 103,3 | 205,1 | 184,1 | 21,0 | 0,233 | 1141,2 | 161,3 |
| 3-13 | 137,7 | 102,3 | 91,9 | 10,4 | 0,120 | 586,5 | 156,7 |
| 3-14 | 137,7 | 136,6 | 122,2 | 14,3 | 0,148 | 723,0 | 169,1 |
| 3-15 | 137,7 | 273,9 | 247,0 | 26,9 | 0,213 | 1042,3 | 237,0 |

Tabla 38: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M1**.

| | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|------|-------|--------|-------|
| 4-0 | 103,3 | 101,9 | 91,7 | 10,2 | 0,186 | 905,9 | 101,2 |
| 4-1 | 20,7 | 19,1 | 17,1 | 2,0 | 0,067 | 323,9 | 52,9 |
| 4-2 | 20,7 | 40,0 | 36,2 | 3,7 | 0,126 | 614,1 | 59,0 |
| 4-3 | 20,7 | 60,8 | 54,6 | 6,2 | 0,169 | 822,9 | 66,4 |
| 4-4 | 34,5 | 32,9 | 29,6 | 3,3 | 0,098 | 477,3 | 62,0 |
| 4-5 | 34,5 | 67,7 | 60,7 | 7,0 | 0,173 | 843,7 | 72,0 |
| 4-6 | 34,5 | 101,1 | 91,1 | 10,0 | 0,230 | 1117,8 | 81,5 |
| 4-7 | 68,9 | 67,2 | 60,2 | 7,0 | 0,150 | 729,0 | 82,6 |
| 4-8 | 68,8 | 136,1 | 121,7 | 14,3 | 0,242 | 1177,9 | 103,3 |
| 4-9 | 68,8 | 205,1 | 184,6 | 20,5 | 0,304 | 1481,6 | 124,6 |
| 4-10 | 103,3 | 67,6 | 60,3 | 7,2 | 0,136 | 663,8 | 90,9 |
| 4-11 | 103,3 | 102,4 | 92,2 | 10,1 | 0,192 | 935,7 | 98,6 |
| 4-12 | 103,3 | 204,8 | 184,0 | 20,7 | 0,276 | 1344,3 | 136,9 |
| 4-13 | 137,7 | 101,6 | 91,0 | 10,6 | 0,167 | 815,4 | 111,6 |
| 4-14 | 137,7 | 136,9 | 122,7 | 14,2 | 0,203 | 989,3 | 124,0 |
| 4-15 | 137,7 | 274,8 | 246,8 | 28,1 | 0,285 | 1388,6 | 177,7 |
| 5-0 | 103,3 | 103,0 | 93,0 | 9,9 | 0,138 | 674,3 | 137,9 |
| 5-1 | 20,7 | 19,1 | 17,0 | 2,1 | 0,062 | 303,2 | 56,2 |
| 5-2 | 20,7 | 39,8 | 35,6 | 4,2 | 0,120 | 584,8 | 60,8 |
| 5-3 | 20,7 | 60,9 | 54,7 | 6,3 | 0,164 | 800,1 | 68,3 |
| 5-4 | 34,5 | 33,5 | 29,6 | 3,9 | 0,092 | 449,9 | 65,8 |
| 5-5 | 34,5 | 67,3 | 60,4 | 6,8 | 0,156 | 762,1 | 79,3 |
| 5-6 | 34,5 | 101,5 | 90,7 | 10,8 | 0,200 | 976,5 | 92,9 |
| 5-7 | 68,8 | 68,0 | 61,5 | 6,5 | 0,121 | 590,9 | 104,1 |
| 5-8 | 68,8 | 137,3 | 123,6 | 13,7 | 0,191 | 933,8 | 132,4 |
| 5-9 | 68,8 | 205,4 | 184,0 | 21,3 | 0,248 | 1211,9 | 151,9 |
| 5-10 | 103,3 | 68,0 | 60,9 | 7,1 | 0,102 | 500,0 | 121,8 |
| 5-11 | 103,3 | 102,5 | 92,2 | 10,3 | 0,140 | 685,1 | 134,6 |
| 5-12 | 103,3 | 205,1 | 184,5 | 20,6 | 0,218 | 1065,9 | 173,0 |
| 5-13 | 137,7 | 102,4 | 91,1 | 11,3 | 0,121 | 590,3 | 154,3 |
| 5-14 | 137,7 | 137,2 | 122,4 | 14,8 | 0,148 | 720,4 | 169,9 |
| 5-15 | 137,7 | 274,0 | 245,6 | 28,3 | 0,232 | 1133,5 | 216,7 |
| 6-0 | 103,3 | 101,8 | 90,9 | 10,9 | 0,121 | 590,9 | 153,9 |
| 6-1 | 20,7 | 19,2 | 17,2 | 2,0 | 0,053 | 258,7 | 66,6 |
| 6-2 | 20,7 | 40,2 | 36,1 | 4,1 | 0,099 | 481,1 | 75,0 |
| 6-3 | 20,7 | 60,2 | 53,9 | 6,3 | 0,128 | 625,8 | 86,2 |
| 6-4 | 34,5 | 32,8 | 29,5 | 3,2 | 0,074 | 361,1 | 81,8 |
| 6-5 | 34,4 | 67,6 | 61,4 | 6,2 | 0,127 | 618,5 | 99,3 |
| 6-6 | 34,5 | 100,9 | 90,2 | 10,7 | 0,164 | 799,4 | 112,8 |
| 6-7 | 68,8 | 67,3 | 60,4 | 6,9 | 0,099 | 482,5 | 125,2 |
| 6-8 | 68,8 | 136,2 | 122,6 | 13,6 | 0,167 | 813,8 | 150,7 |
| 6-9 | 68,8 | 204,9 | 184,3 | 20,6 | 0,232 | 1129,7 | 163,1 |
| 6-10 | 103,3 | 67,5 | 60,3 | 7,2 | 0,101 | 491,7 | 122,6 |
| 6-11 | 103,3 | 101,7 | 91,0 | 10,7 | 0,129 | 630,3 | 144,4 |
| 6-12 | 103,3 | 205,9 | 184,9 | 21,1 | 0,204 | 992,8 | 186,2 |
| 6-13 | 137,7 | 102,3 | 91,8 | 10,5 | 0,127 | 618,5 | 148,4 |
| 6-14 | 137,7 | 136,7 | 122,4 | 14,3 | 0,146 | 712,3 | 171,9 |
| 6-15 | 137,7 | 274,0 | 245,5 | 28,5 | 0,220 | 1074,8 | 228,4 |

5.2.2 Material M2

En la Figura 34 se presenta una fotografía del material retenido en el tamiz de 19 mm y también el material que pasa esta malla.



Figura 34: Agregado retenido en el tamiz de 19 mm y agregado que pasa el mismo tamiz del material **M2**.

En la Tabla 39 se resumen las densidades obtenidas y los contenidos de agua para los especímenes del material M2. En la Tabla 40 se resumen los resultados de módulo resiliente.

Tabla 39: Resumen de las densidades húmeda y seca con los contenidos de agua para el material **M2**.

| Pastilla | % Wa | γ_w (kg/m ³) | γ_s (kg/m ³) |
|----------|------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 4,9 | 2163,9 | 2063,1 |
| 2 | 4,4 | 2147,5 | 2056,7 |
| 3 | 4,5 | 2138,8 | 2046,8 |
| 4 | 4,6 | 2138,9 | 2044,5 |

| | | | |
|-----------------|------------|---------------|---------------|
| 5 | 5,3 | 2153,8 | 2045,9 |
| 6 | 3,7 | 2146,6 | 2069,3 |
| Promedio | 4,6 | 2148,2 | 2054,4 |

Tabla 40: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M2**.

| Secuencia | σ_{conf} (kPa) | $\sigma_{m\acute{a}x}$ (kPa) | σ_d (kPa) | $\sigma_{contacto}$ (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|------------------|---|--|--|---|---------------------------------------|--|---------------------|
| 1-0 | 103,3 | 102,1 | 91,0 | 11,2 | 0,085 | 415,0 | 219,2 |
| 1-1 | 20,6 | 19,3 | 16,6 | 2,7 | 0,041 | 201,3 | 82,3 |
| 1-2 | 20,8 | 40,1 | 35,9 | 4,2 | 0,081 | 397,6 | 90,2 |
| 1-3 | 20,8 | 61,0 | 54,6 | 6,4 | 0,109 | 533,9 | 102,3 |
| 1-4 | 34,5 | 32,9 | 29,8 | 3,1 | 0,059 | 290,1 | 102,7 |
| 1-5 | 34,4 | 68,0 | 61,3 | 6,6 | 0,101 | 493,8 | 124,2 |
| 1-6 | 34,5 | 101,8 | 91,3 | 10,4 | 0,131 | 642,0 | 142,3 |
| 1-7 | 68,8 | 67,3 | 60,0 | 7,3 | 0,070 | 341,9 | 175,6 |
| 1-8 | 68,8 | 136,1 | 121,8 | 14,3 | 0,124 | 607,7 | 200,5 |
| 1-9 | 68,8 | 206,4 | 185,6 | 20,7 | 0,175 | 856,4 | 216,7 |
| 1-10 | 103,3 | 67,8 | 60,4 | 7,5 | 0,059 | 290,0 | 208,2 |
| 1-11 | 103,3 | 102,8 | 92,2 | 10,6 | 0,087 | 426,2 | 216,4 |
| 1-12 | 103,3 | 205,1 | 183,8 | 21,3 | 0,151 | 738,4 | 249,0 |
| 1-13 | 137,7 | 102,2 | 91,2 | 10,9 | 0,075 | 364,3 | 250,5 |
| 1-14 | 137,7 | 136,9 | 122,9 | 14,0 | 0,096 | 468,9 | 262,1 |
| 1-15 | 137,7 | 274,4 | 246,5 | 27,9 | 0,167 | 813,0 | 303,2 |
| 2-0 | 103,3 | 101,9 | 91,2 | 10,7 | 0,174 | 849,3 | 107,4 |
| 2-1 | 20,7 | 18,9 | 17,4 | 1,5 | 0,061 | 297,9 | 58,4 |
| 2-2 | 20,7 | 39,9 | 35,8 | 4,1 | 0,092 | 451,2 | 79,3 |
| 2-3 | 20,7 | 60,6 | 54,8 | 5,8 | 0,118 | 576,9 | 94,9 |
| 2-4 | 34,5 | 33,1 | 29,8 | 3,3 | 0,090 | 440,2 | 67,7 |
| 2-5 | 34,5 | 66,7 | 60,0 | 6,6 | 0,128 | 623,4 | 96,3 |
| 2-6 | 34,5 | 101,4 | 91,4 | 10,0 | 0,157 | 764,0 | 119,6 |
| 2-7 | 68,8 | 67,5 | 60,6 | 6,9 | 0,136 | 664,4 | 91,3 |
| 2-8 | 68,9 | 135,8 | 122,3 | 13,5 | 0,179 | 873,9 | 140,0 |
| 2-9 | 68,8 | 204,7 | 184,0 | 20,7 | 0,214 | 1046,4 | 175,8 |
| 2-10 | 103,3 | 67,9 | 60,8 | 7,1 | 0,136 | 664,5 | 91,5 |
| 2-11 | 103,3 | 101,7 | 91,2 | 10,5 | 0,166 | 812,2 | 112,2 |
| 2-12 | 103,3 | 205,2 | 184,8 | 20,4 | 0,210 | 1025,7 | 180,2 |
| 2-13 | 137,7 | 102,1 | 91,8 | 10,3 | 0,162 | 791,0 | 116,0 |
| 2-14 | 137,7 | 136,0 | 121,4 | 14,5 | 0,178 | 867,8 | 139,9 |
| 2-15 | 137,7 | 274,8 | 247,2 | 27,6 | 0,227 | 1108,2 | 223,1 |
| 3-0 | 103,3 | 102,4 | 91,2 | 11,2 | 0,094 | 459,0 | 198,6 |
| 3-1 | 20,7 | 19,3 | 17,3 | 2,1 | 0,046 | 223,3 | 77,3 |
| 3-2 | 20,6 | 40,3 | 36,3 | 4,0 | 0,086 | 420,2 | 86,3 |
| 3-3 | 20,6 | 60,3 | 54,1 | 6,2 | 0,113 | 552,7 | 98,0 |
| 3-4 | 34,4 | 33,2 | 29,7 | 3,5 | 0,060 | 294,3 | 100,9 |
| 3-5 | 34,5 | 68,0 | 61,2 | 6,9 | 0,107 | 522,1 | 117,2 |
| 3-6 | 34,4 | 102,4 | 91,8 | 10,6 | 0,146 | 712,2 | 128,8 |
| 3-7 | 68,8 | 67,8 | 60,7 | 7,1 | 0,080 | 389,2 | 155,9 |
| 3-8 | 68,8 | 136,7 | 122,5 | 14,2 | 0,139 | 680,0 | 180,2 |
| 3-9 | 68,8 | 206,2 | 185,8 | 20,3 | 0,193 | 941,2 | 197,5 |
| 3-10 | 103,3 | 68,2 | 60,9 | 7,3 | 0,068 | 329,7 | 184,6 |

Tabla 40: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M2**.

| | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 3-11 | 103,3 | 101,9 | 91,1 | 10,8 | 0,096 | 467,9 | 194,8 |
| 3-12 | 103,3 | 204,9 | 183,8 | 21,1 | 0,164 | 799,7 | 229,9 |
| 3-13 | 137,7 | 102,6 | 91,5 | 11,1 | 0,082 | 401,6 | 227,9 |
| 3-14 | 137,7 | 137,5 | 123,0 | 14,5 | 0,104 | 507,2 | 242,6 |
| 3-15 | 137,7 | 274,4 | 245,8 | 28,6 | 0,176 | 859,9 | 285,8 |
| 4-0 | 103,3 | 101,7 | 90,9 | 10,7 | 0,090 | 439,6 | 206,9 |
| 4-1 | 20,6 | 19,2 | 16,8 | 2,4 | 0,042 | 204,1 | 82,3 |
| 4-2 | 20,7 | 40,1 | 36,2 | 3,8 | 0,082 | 398,1 | 91,0 |
| 4-3 | 20,7 | 60,7 | 54,3 | 6,4 | 0,110 | 536,2 | 101,4 |
| 4-4 | 34,5 | 32,9 | 29,4 | 3,5 | 0,058 | 280,6 | 104,7 |
| 4-5 | 34,4 | 66,9 | 60,8 | 6,1 | 0,104 | 508,8 | 119,5 |
| 4-6 | 34,5 | 101,5 | 91,5 | 10,0 | 0,141 | 687,5 | 133,1 |
| 4-7 | 68,8 | 67,7 | 61,1 | 6,6 | 0,078 | 379,9 | 160,9 |
| 4-8 | 68,8 | 136,0 | 121,9 | 14,1 | 0,137 | 666,0 | 183,1 |
| 4-9 | 68,8 | 204,5 | 184,7 | 19,8 | 0,191 | 932,9 | 197,9 |
| 4-10 | 103,3 | 67,6 | 60,4 | 7,2 | 0,065 | 316,2 | 190,9 |
| 4-11 | 103,3 | 101,9 | 91,3 | 10,5 | 0,094 | 459,3 | 198,9 |
| 4-12 | 103,3 | 205,0 | 184,3 | 20,7 | 0,163 | 792,3 | 232,6 |
| 4-13 | 137,7 | 102,1 | 91,1 | 11,0 | 0,079 | 384,6 | 236,8 |
| 4-14 | 137,7 | 136,7 | 122,5 | 14,2 | 0,102 | 497,1 | 246,4 |
| 4-15 | 137,7 | 274,5 | 246,1 | 28,5 | 0,175 | 854,7 | 287,9 |
| 5-0 | 103,3 | 101,9 | 90,9 | 11,0 | 0,102 | 498,2 | 182,5 |
| 5-1 | 20,8 | 19,1 | 16,9 | 2,1 | 0,043 | 210,3 | 80,6 |
| 5-2 | 20,8 | 40,1 | 36,2 | 4,0 | 0,084 | 410,3 | 88,2 |
| 5-3 | 20,6 | 60,5 | 53,9 | 6,7 | 0,111 | 539,6 | 99,8 |
| 5-4 | 34,4 | 33,5 | 29,9 | 3,5 | 0,060 | 294,1 | 101,8 |
| 5-5 | 34,5 | 67,9 | 61,1 | 6,8 | 0,106 | 517,8 | 118,0 |
| 5-6 | 34,6 | 102,3 | 91,9 | 10,4 | 0,143 | 698,1 | 131,7 |
| 5-7 | 68,8 | 67,5 | 60,6 | 6,9 | 0,082 | 399,5 | 151,6 |
| 5-8 | 68,8 | 135,9 | 121,6 | 14,3 | 0,138 | 673,5 | 180,6 |
| 5-9 | 68,8 | 205,3 | 185,2 | 20,1 | 0,194 | 945,4 | 195,8 |
| 5-10 | 103,3 | 67,6 | 61,0 | 6,6 | 0,084 | 407,9 | 149,5 |
| 5-11 | 103,3 | 102,7 | 91,9 | 10,9 | 0,105 | 514,3 | 178,7 |
| 5-12 | 103,3 | 205,8 | 185,2 | 20,7 | 0,166 | 809,9 | 228,6 |
| 5-13 | 137,7 | 102,4 | 91,6 | 10,9 | 0,103 | 501,1 | 182,7 |
| 5-14 | 137,7 | 137,5 | 123,5 | 14,0 | 0,120 | 583,4 | 211,6 |
| 5-15 | 137,7 | 273,9 | 246,2 | 27,7 | 0,180 | 878,4 | 280,2 |
| 6-0 | 103,3 | 101,7 | 91,5 | 10,2 | 0,089 | 434,5 | 210,7 |
| 6-1 | 20,7 | 19,0 | 17,0 | 2,0 | 0,041 | 200,5 | 84,9 |
| 6-2 | 20,6 | 39,7 | 34,8 | 4,9 | 0,074 | 362,2 | 96,2 |
| 6-3 | 20,7 | 60,1 | 54,1 | 6,0 | 0,103 | 502,0 | 107,7 |
| 6-4 | 34,5 | 32,9 | 29,4 | 3,6 | 0,053 | 258,4 | 113,7 |
| 6-5 | 34,5 | 67,3 | 60,2 | 7,1 | 0,097 | 472,9 | 127,4 |
| 6-6 | 34,4 | 101,9 | 92,0 | 9,9 | 0,134 | 651,7 | 141,1 |
| 6-7 | 68,8 | 67,7 | 61,0 | 6,6 | 0,073 | 358,2 | 170,4 |
| 6-8 | 68,8 | 136,2 | 122,9 | 13,4 | 0,133 | 649,1 | 189,3 |
| 6-9 | 68,8 | 205,7 | 184,6 | 21,1 | 0,185 | 901,9 | 204,7 |
| 6-10 | 103,3 | 67,7 | 60,8 | 6,9 | 0,062 | 302,1 | 201,2 |
| 6-11 | 103,3 | 102,5 | 92,2 | 10,3 | 0,092 | 448,3 | 205,7 |
| 6-12 | 103,3 | 205,2 | 184,5 | 20,7 | 0,161 | 784,3 | 235,2 |
| 6-13 | 137,7 | 102,8 | 92,2 | 10,6 | 0,080 | 390,5 | 236,1 |

Tabla 40: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M2**.

| | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 6-14 | 137,7 | 137,0 | 122,8 | 14,2 | 0,103 | 500,4 | 245,4 |
| 6-15 | 137,7 | 275,5 | 247,6 | 27,9 | 0,176 | 858,0 | 288,6 |

5.2.3 Material M3

En la Figura 35 se presenta una fotografía del material retenido en el tamiz de 19 mm y también el material que pasa esta malla.



Figura 35: Agregado retenido en el tamiz de 19 mm y agregado que pasa el mismo tamiz del material **M3**.

En la Tabla 41 se resumen las densidades obtenidas y los contenidos de agua para los especímenes del material M2. En la Tabla 42 se resumen los resultados de módulo resiliente.

Tabla 41: Resumen de las densidades húmeda y seca con los contenidos de agua para el material **M3**.

| Pastilla | % Wa | γ_w (kg/m ³) | γ_s (kg/m ³) |
|-----------------|------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 8,4 | 2163,6 | 1996,4 |
| 2 | 8,2 | 2128,4 | 1967,6 |
| 3 | 5,2 | 2122,0 | 2016,6 |
| 4 | 5,4 | 2122,0 | 2016,6 |
| 5 | 5,2 | 2153,8 | 2046,5 |
| 6 | 5,0 | 2140,7 | 2037,8 |
| Promedio | 6,2 | 2138,4 | 2013,6 |

Tabla 42: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M3**.

| Secuencia | σ_{conf} (kPa) | $\sigma_{m\acute{a}x}$ (kPa) | σ_d (kPa) | $\sigma_{contacto}$ (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|--------------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------|
| 1-0 | 103,3 | 102,3 | 91,3 | 11,0 | 0,071 | 344,9 | 264,8 |
| 1-1 | 20,6 | 18,9 | 17,0 | 1,9 | 0,025 | 121,4 | 140,5 |
| 1-2 | 20,6 | 40,4 | 36,2 | 4,2 | 0,057 | 280,7 | 129,0 |
| 1-3 | 20,7 | 60,8 | 54,9 | 6,0 | 0,083 | 403,8 | 135,9 |
| 1-4 | 34,4 | 33,3 | 29,9 | 3,4 | 0,041 | 200,5 | 149,1 |
| 1-5 | 34,4 | 67,6 | 60,6 | 7,0 | 0,079 | 385,5 | 157,3 |
| 1-6 | 34,5 | 102,2 | 92,2 | 10,0 | 0,112 | 545,1 | 169,1 |
| 1-7 | 68,8 | 67,8 | 60,8 | 7,0 | 0,060 | 292,1 | 208,2 |
| 1-8 | 68,8 | 136,7 | 122,9 | 13,8 | 0,109 | 534,2 | 230,1 |
| 1-9 | 68,8 | 204,6 | 184,6 | 20,0 | 0,153 | 747,2 | 247,0 |
| 1-10 | 103,3 | 68,0 | 60,9 | 7,1 | 0,049 | 241,6 | 252,0 |
| 1-11 | 103,3 | 102,2 | 91,7 | 10,5 | 0,073 | 358,4 | 255,8 |
| 1-12 | 103,3 | 206,0 | 185,3 | 20,7 | 0,132 | 642,2 | 288,5 |
| 1-13 | 137,7 | 102,1 | 91,8 | 10,4 | 0,063 | 308,5 | 297,5 |
| 1-14 | 137,8 | 136,6 | 122,2 | 14,4 | 0,082 | 399,9 | 305,6 |
| 1-15 | 137,7 | 275,0 | 247,6 | 27,5 | 0,146 | 712,8 | 347,3 |
| 2-0 | 103,3 | 101,7 | 91,4 | 10,3 | 0,105 | 513,2 | 178,1 |
| 2-1 | 20,7 | 18,9 | 17,3 | 1,5 | 0,041 | 201,4 | 86,1 |
| 2-2 | 20,7 | 39,9 | 36,2 | 3,8 | 0,079 | 383,2 | 94,4 |
| 2-3 | 20,7 | 60,4 | 54,2 | 6,2 | 0,105 | 510,4 | 106,2 |
| 2-4 | 34,4 | 33,0 | 30,0 | 3,0 | 0,060 | 292,1 | 102,9 |
| 2-5 | 34,5 | 67,4 | 60,9 | 6,5 | 0,104 | 505,1 | 120,6 |
| 2-6 | 34,5 | 102,4 | 92,4 | 10,0 | 0,138 | 672,8 | 137,3 |
| 2-7 | 68,8 | 67,5 | 61,2 | 6,4 | 0,085 | 415,6 | 147,2 |
| 2-8 | 68,8 | 136,2 | 122,0 | 14,2 | 0,138 | 671,8 | 181,5 |
| 2-9 | 68,8 | 205,5 | 185,1 | 20,5 | 0,183 | 893,9 | 207,0 |
| 2-10 | 103,3 | 67,8 | 61,3 | 6,5 | 0,071 | 346,7 | 176,8 |
| 2-11 | 103,3 | 102,5 | 92,0 | 10,5 | 0,099 | 482,0 | 190,9 |
| 2-12 | 103,3 | 205,3 | 185,0 | 20,3 | 0,159 | 774,3 | 239,0 |
| 2-13 | 137,7 | 102,2 | 92,0 | 10,1 | 0,089 | 431,9 | 213,0 |
| 2-14 | 137,7 | 136,5 | 122,6 | 13,9 | 0,109 | 530,6 | 231,0 |
| 2-15 | 137,7 | 275,3 | 247,8 | 27,6 | 0,173 | 842,5 | 294,1 |
| 3-0 | 103,3 | 102,3 | 91,5 | 10,7 | 0,108 | 526,2 | 174,0 |
| 3-1 | 20,7 | 19,4 | 16,7 | 2,7 | 0,035 | 168,9 | 98,9 |
| 3-2 | 20,7 | 39,9 | 35,9 | 4,0 | 0,069 | 335,5 | 107,0 |
| 3-3 | 20,7 | 60,8 | 54,6 | 6,1 | 0,094 | 460,0 | 118,8 |
| 3-4 | 34,5 | 33,0 | 29,3 | 3,7 | 0,050 | 244,8 | 119,8 |

Tabla 42: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M3**.

| | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 3-5 | 34,4 | 67,3 | 60,2 | 7,1 | 0,088 | 430,4 | 139,9 |
| 3-6 | 34,5 | 101,1 | 90,6 | 10,5 | 0,119 | 580,7 | 156,0 |
| 3-7 | 68,8 | 67,9 | 60,9 | 7,0 | 0,084 | 410,8 | 148,3 |
| 3-8 | 68,8 | 137,0 | 123,0 | 14,0 | 0,126 | 612,2 | 201,0 |
| 3-9 | 68,8 | 205,2 | 184,7 | 20,5 | 0,169 | 822,7 | 224,4 |
| 3-10 | 103,3 | 67,7 | 60,6 | 7,1 | 0,095 | 462,2 | 131,2 |
| 3-11 | 103,3 | 102,0 | 91,6 | 10,4 | 0,114 | 556,3 | 164,7 |
| 3-12 | 103,3 | 205,6 | 184,8 | 20,8 | 0,157 | 764,1 | 241,9 |
| 3-13 | 137,7 | 101,6 | 90,2 | 11,4 | 0,111 | 538,5 | 167,5 |
| 3-14 | 137,7 | 136,5 | 122,6 | 13,9 | 0,126 | 612,9 | 200,0 |
| 3-15 | 137,7 | 274,3 | 246,2 | 28,1 | 0,173 | 843,2 | 292,0 |
| 4-0 | 103,3 | 101,4 | 91,0 | 10,4 | 0,085 | 412,7 | 220,6 |
| 4-1 | 20,7 | 19,1 | 17,1 | 1,9 | 0,038 | 183,1 | 93,6 |
| 4-2 | 20,7 | 39,8 | 36,0 | 3,8 | 0,076 | 371,8 | 96,7 |
| 4-3 | 20,6 | 60,4 | 54,2 | 6,2 | 0,103 | 503,2 | 107,7 |
| 4-4 | 34,5 | 33,1 | 29,6 | 3,5 | 0,052 | 254,8 | 116,2 |
| 4-5 | 34,5 | 66,9 | 60,1 | 6,8 | 0,097 | 473,4 | 127,0 |
| 4-6 | 34,5 | 101,9 | 91,3 | 10,7 | 0,129 | 628,7 | 145,2 |
| 4-7 | 68,8 | 67,2 | 60,1 | 7,1 | 0,071 | 346,8 | 173,2 |
| 4-8 | 68,8 | 136,5 | 122,9 | 13,7 | 0,125 | 608,0 | 202,1 |
| 4-9 | 68,8 | 205,0 | 185,3 | 19,7 | 0,167 | 812,1 | 228,2 |
| 4-10 | 103,3 | 67,2 | 59,9 | 7,3 | 0,059 | 288,9 | 207,4 |
| 4-11 | 103,2 | 101,4 | 91,2 | 10,2 | 0,084 | 410,4 | 222,2 |
| 4-12 | 103,3 | 205,4 | 184,3 | 21,0 | 0,143 | 697,9 | 264,1 |
| 4-13 | 137,7 | 103,0 | 92,5 | 10,5 | 0,076 | 368,5 | 251,1 |
| 4-14 | 137,7 | 136,2 | 121,7 | 14,5 | 0,093 | 454,7 | 267,8 |
| 4-15 | 137,7 | 273,3 | 245,7 | 27,6 | 0,157 | 765,9 | 320,8 |
| 5-0 | 103,3 | 101,9 | 91,4 | 10,5 | 0,080 | 391,6 | 233,5 |
| 5-1 | 20,7 | 19,7 | 17,5 | 2,2 | 0,036 | 177,5 | 98,9 |
| 5-2 | 20,7 | 40,1 | 35,9 | 4,1 | 0,070 | 340,1 | 105,7 |
| 5-3 | 20,7 | 60,7 | 54,5 | 6,1 | 0,098 | 476,2 | 114,5 |
| 5-4 | 34,5 | 33,1 | 29,7 | 3,4 | 0,051 | 247,4 | 120,2 |
| 5-5 | 34,5 | 67,7 | 60,9 | 6,9 | 0,093 | 452,0 | 134,6 |
| 5-6 | 34,5 | 102,4 | 91,9 | 10,5 | 0,127 | 617,9 | 148,7 |
| 5-7 | 68,8 | 67,4 | 60,0 | 7,4 | 0,068 | 332,8 | 180,3 |
| 5-8 | 68,8 | 137,5 | 124,0 | 13,5 | 0,122 | 592,3 | 209,3 |
| 5-9 | 68,8 | 204,8 | 184,8 | 20,0 | 0,167 | 812,8 | 227,3 |
| 5-10 | 103,3 | 68,1 | 60,6 | 7,5 | 0,056 | 273,4 | 221,7 |
| 5-11 | 103,3 | 102,1 | 91,3 | 10,7 | 0,081 | 397,0 | 230,0 |
| 5-12 | 103,3 | 205,4 | 183,9 | 21,5 | 0,141 | 687,3 | 267,6 |
| 5-13 | 137,7 | 102,7 | 91,8 | 10,9 | 0,070 | 338,7 | 271,0 |
| 5-14 | 137,7 | 137,5 | 123,4 | 14,1 | 0,089 | 434,6 | 284,0 |
| 5-15 | 137,7 | 273,9 | 246,1 | 27,8 | 0,154 | 748,6 | 328,7 |
| 6-0 | 103,3 | 102,4 | 92,6 | 9,8 | 0,074 | 360,3 | 257,1 |
| 6-1 | 20,6 | 18,7 | 16,7 | 2,0 | 0,031 | 153,3 | 109,0 |
| 6-2 | 20,6 | 40,0 | 35,6 | 4,4 | 0,063 | 305,8 | 116,4 |
| 6-3 | 20,7 | 60,5 | 54,6 | 5,9 | 0,085 | 415,8 | 131,3 |
| 6-4 | 34,5 | 32,8 | 29,9 | 3,0 | 0,046 | 223,4 | 133,6 |
| 6-5 | 34,5 | 67,3 | 60,7 | 6,6 | 0,080 | 391,9 | 154,8 |
| 6-6 | 34,5 | 100,9 | 90,6 | 10,3 | 0,109 | 530,3 | 170,8 |
| 6-7 | 68,8 | 67,6 | 60,9 | 6,7 | 0,061 | 298,3 | 204,2 |

Tabla 42: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M3**.

| | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 6-8 | 68,8 | 136,5 | 123,0 | 13,5 | 0,110 | 536,3 | 229,3 |
| 6-9 | 68,8 | 205,5 | 185,1 | 20,4 | 0,156 | 761,9 | 242,9 |
| 6-10 | 103,3 | 68,0 | 60,9 | 7,2 | 0,053 | 259,5 | 234,5 |
| 6-11 | 103,3 | 101,4 | 90,8 | 10,5 | 0,077 | 375,8 | 241,7 |
| 6-12 | 103,3 | 205,2 | 184,2 | 21,0 | 0,136 | 662,2 | 278,1 |
| 6-13 | 137,7 | 102,9 | 92,6 | 10,3 | 0,068 | 332,0 | 279,0 |
| 6-14 | 137,7 | 136,7 | 123,8 | 13,0 | 0,087 | 426,0 | 290,5 |
| 6-15 | 137,7 | 274,2 | 246,1 | 28,0 | 0,151 | 734,1 | 335,3 |

5.2.4 Material M4

En la Figura 36 se presenta una fotografía del material retenido en el tamiz de 19 mm y también el material que pasa esta malla.



Figura 36: Agregado retenido en el tamiz de 19 mm y agregado que pasa el mismo tamiz del material **M4**.

En la Tabla 43 se resumen las densidades obtenidas y los contenidos de agua para los especímenes del material M2. En la Tabla 44 se resumen los resultados de módulo resiliente.

Tabla 43: Resumen de las densidades húmeda y seca con los contenidos de agua para el material **M4**.

| Pastilla | % Wa | γ_w (kg/m ³) | γ_s (kg/m ³) |
|-----------------|------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 4,8 | 2235,8 | 2134,0 |
| 2 | 4,6 | 2209,4 | 2112,2 |
| 3 | 5,2 | 2225,7 | 2116,4 |
| 4 | 5,3 | 2233,8 | 2122,2 |
| 5 | 5,1 | 2229,3 | 2120,5 |
| 6 | 5,1 | 2226,4 | 2118,4 |
| Promedio | 5,0 | 2226,7 | 2120,6 |

Tabla 44: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M4**.

| Secuencia | σ_{conf} (kPa) | $\sigma_{m\acute{a}x}$ (kPa) | σ_d (kPa) | $\sigma_{contacto}$ (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|-----------------------|------------------------------|------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------------------|----------|
| 1-0 | 103,3 | 101,9 | 91,3 | 10,5 | 0,074 | 362,9 | 251,6 |
| 1-1 | 20,6 | 19,3 | 17,4 | 1,9 | 0,034 | 166,1 | 104,9 |
| 1-2 | 20,6 | 40,1 | 36,3 | 3,8 | 0,067 | 327,2 | 110,9 |
| 1-3 | 20,7 | 60,9 | 55,1 | 5,8 | 0,093 | 452,6 | 121,7 |
| 1-4 | 34,4 | 33,1 | 29,7 | 3,4 | 0,048 | 232,0 | 127,9 |
| 1-5 | 34,5 | 67,3 | 60,6 | 6,6 | 0,086 | 420,2 | 144,3 |
| 1-6 | 34,4 | 101,8 | 91,4 | 10,4 | 0,118 | 575,6 | 158,8 |
| 1-7 | 68,8 | 67,6 | 60,7 | 6,9 | 0,063 | 307,5 | 197,4 |
| 1-8 | 68,8 | 136,3 | 122,8 | 13,5 | 0,115 | 561,5 | 218,7 |
| 1-9 | 68,8 | 205,1 | 184,6 | 20,6 | 0,161 | 785,0 | 235,1 |
| 1-10 | 103,2 | 68,1 | 61,2 | 6,8 | 0,053 | 259,9 | 235,6 |
| 1-11 | 103,3 | 101,8 | 91,3 | 10,5 | 0,078 | 379,1 | 240,8 |
| 1-12 | 103,3 | 204,8 | 184,3 | 20,5 | 0,138 | 670,9 | 274,7 |
| 1-13 | 137,7 | 102,7 | 92,3 | 10,4 | 0,067 | 324,3 | 284,6 |
| 1-14 | 137,7 | 136,9 | 123,1 | 13,8 | 0,086 | 418,2 | 294,3 |
| 1-15 | 137,7 | 274,6 | 246,9 | 27,7 | 0,146 | 712,0 | 346,7 |
| 2-0 | 103,3 | 101,5 | 91,3 | 10,2 | 0,097 | 475,5 | 192,0 |
| 2-1 | 20,6 | 19,2 | 17,6 | 1,6 | 0,029 | 142,8 | 123,1 |
| 2-2 | 20,6 | 39,3 | 35,8 | 3,5 | 0,059 | 281,8 | 127,1 |
| 2-3 | 20,7 | 60,1 | 54,3 | 5,8 | 0,080 | 388,8 | 139,7 |
| 2-4 | 34,5 | 33,3 | 30,3 | 2,9 | 0,048 | 233,7 | 130,0 |
| 2-5 | 34,5 | 66,9 | 60,8 | 6,1 | 0,080 | 391,4 | 155,3 |
| 2-6 | 34,4 | 101,9 | 92,3 | 9,6 | 0,108 | 525,3 | 175,7 |
| 2-7 | 68,8 | 67,4 | 60,9 | 6,5 | 0,077 | 374,3 | 162,6 |
| 2-8 | 68,9 | 136,7 | 123,0 | 13,7 | 0,115 | 560,5 | 219,5 |
| 2-9 | 68,8 | 205,7 | 185,3 | 20,4 | 0,150 | 731,7 | 253,3 |
| 2-10 | 103,3 | 67,8 | 60,9 | 6,9 | 0,079 | 383,3 | 159,0 |
| 2-11 | 103,3 | 102,8 | 92,7 | 10,1 | 0,098 | 480,2 | 193,0 |
| 2-12 | 103,3 | 205,1 | 184,7 | 20,4 | 0,139 | 675,8 | 273,3 |
| 2-13 | 137,7 | 101,9 | 91,8 | 10,1 | 0,096 | 466,0 | 197,1 |
| 2-14 | 137,7 | 136,0 | 122,6 | 13,5 | 0,108 | 527,3 | 232,5 |
| 2-15 | 137,7 | 274,6 | 247,4 | 27,2 | 0,151 | 734,8 | 336,7 |
| 3-0 | 103,3 | 102,9 | 92,4 | 10,5 | 0,081 | 394,0 | 234,5 |

Tabla 44: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M4**.

| | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 3-1 | 20,7 | 19,0 | 17,3 | 1,7 | 0,036 | 177,1 | 97,8 |
| 3-2 | 20,7 | 40,1 | 36,5 | 3,6 | 0,071 | 344,0 | 106,2 |
| 3-3 | 20,7 | 61,1 | 55,7 | 5,5 | 0,098 | 475,8 | 117,0 |
| 3-4 | 34,4 | 33,0 | 29,0 | 4,0 | 0,049 | 237,3 | 122,2 |
| 3-5 | 34,6 | 67,8 | 61,3 | 6,5 | 0,091 | 442,9 | 138,4 |
| 3-6 | 34,5 | 101,6 | 91,5 | 10,0 | 0,122 | 595,0 | 153,8 |
| 3-7 | 68,8 | 67,7 | 60,9 | 6,9 | 0,067 | 327,5 | 185,9 |
| 3-8 | 68,8 | 137,3 | 123,7 | 13,6 | 0,117 | 569,9 | 217,0 |
| 3-9 | 68,8 | 205,9 | 185,5 | 20,3 | 0,163 | 794,0 | 233,7 |
| 3-10 | 103,3 | 68,2 | 61,4 | 6,8 | 0,061 | 298,7 | 205,6 |
| 3-11 | 103,3 | 102,2 | 91,9 | 10,3 | 0,082 | 401,3 | 229,1 |
| 3-12 | 103,3 | 205,8 | 185,5 | 20,3 | 0,139 | 678,2 | 273,5 |
| 3-13 | 137,7 | 103,5 | 93,0 | 10,5 | 0,076 | 372,4 | 249,9 |
| 3-14 | 137,7 | 137,0 | 123,2 | 13,8 | 0,092 | 446,1 | 276,3 |
| 3-15 | 137,8 | 274,3 | 246,7 | 27,6 | 0,151 | 734,4 | 335,9 |
| 4-0 | 103,3 | 101,6 | 91,6 | 10,1 | 0,070 | 341,7 | 268,0 |
| 4-1 | 20,7 | 19,2 | 16,8 | 2,4 | 0,030 | 148,4 | 113,4 |
| 4-2 | 20,7 | 39,8 | 36,3 | 3,5 | 0,061 | 299,8 | 121,2 |
| 4-3 | 20,7 | 60,7 | 55,3 | 5,4 | 0,084 | 412,2 | 134,1 |
| 4-4 | 34,5 | 33,1 | 30,5 | 2,6 | 0,044 | 217,2 | 140,2 |
| 4-5 | 34,5 | 66,8 | 60,1 | 6,7 | 0,077 | 377,7 | 159,2 |
| 4-6 | 34,5 | 102,0 | 92,1 | 9,9 | 0,108 | 528,6 | 174,3 |
| 4-7 | 68,8 | 67,3 | 60,3 | 7,0 | 0,058 | 283,0 | 213,0 |
| 4-8 | 68,8 | 136,1 | 122,6 | 13,5 | 0,106 | 516,1 | 237,5 |
| 4-9 | 68,8 | 204,9 | 184,2 | 20,7 | 0,147 | 718,5 | 256,3 |
| 4-10 | 103,3 | 67,5 | 60,4 | 7,1 | 0,050 | 242,9 | 248,6 |
| 4-11 | 103,3 | 102,1 | 92,0 | 10,1 | 0,073 | 358,4 | 256,7 |
| 4-12 | 103,3 | 206,1 | 185,5 | 20,5 | 0,127 | 617,8 | 300,3 |
| 4-13 | 137,7 | 101,7 | 91,3 | 10,5 | 0,063 | 305,9 | 298,4 |
| 4-14 | 137,7 | 136,7 | 122,7 | 13,9 | 0,080 | 391,3 | 313,7 |
| 4-15 | 137,7 | 274,7 | 247,1 | 27,6 | 0,139 | 680,5 | 363,1 |
| 5-0 | 103,3 | 102,2 | 91,7 | 10,5 | 0,072 | 353,2 | 259,6 |
| 5-1 | 20,6 | 19,4 | 17,8 | 1,6 | 0,032 | 156,5 | 113,8 |
| 5-2 | 20,7 | 40,0 | 36,4 | 3,7 | 0,063 | 309,9 | 117,3 |
| 5-3 | 20,7 | 60,4 | 54,8 | 5,6 | 0,088 | 431,4 | 127,0 |
| 5-4 | 34,5 | 33,1 | 30,0 | 3,1 | 0,046 | 225,0 | 133,3 |
| 5-5 | 34,5 | 67,8 | 61,5 | 6,2 | 0,084 | 411,1 | 149,6 |
| 5-6 | 34,5 | 101,7 | 91,9 | 9,8 | 0,115 | 559,9 | 164,1 |
| 5-7 | 68,9 | 67,1 | 60,8 | 6,3 | 0,062 | 303,3 | 200,6 |
| 5-8 | 68,8 | 136,5 | 122,8 | 13,7 | 0,112 | 547,3 | 224,4 |
| 5-9 | 68,8 | 204,9 | 184,8 | 20,1 | 0,158 | 769,6 | 240,1 |
| 5-10 | 103,3 | 67,9 | 61,3 | 6,6 | 0,052 | 252,4 | 242,7 |
| 5-11 | 103,3 | 102,2 | 91,8 | 10,5 | 0,076 | 372,7 | 246,3 |
| 5-12 | 103,3 | 204,7 | 184,1 | 20,5 | 0,135 | 659,2 | 279,4 |
| 5-13 | 137,7 | 102,4 | 92,1 | 10,3 | 0,065 | 318,2 | 289,4 |
| 5-14 | 137,7 | 136,4 | 122,5 | 13,9 | 0,084 | 411,4 | 297,8 |
| 5-15 | 137,7 | 273,7 | 245,9 | 27,9 | 0,148 | 721,7 | 340,7 |
| 6-0 | 103,3 | 101,5 | 90,9 | 10,6 | 0,069 | 338,8 | 268,4 |
| 6-1 | 20,7 | 19,1 | 17,4 | 1,7 | 0,029 | 142,1 | 122,7 |
| 6-2 | 20,7 | 40,1 | 36,5 | 3,6 | 0,058 | 283,3 | 128,7 |
| 6-3 | 20,7 | 60,5 | 54,7 | 5,8 | 0,079 | 387,6 | 141,1 |

Tabla 44: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M4**.

| | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 6-4 | 34,5 | 33,1 | 30,1 | 3,0 | 0,042 | 206,8 | 145,7 |
| 6-5 | 34,5 | 66,8 | 60,2 | 6,6 | 0,075 | 365,7 | 164,7 |
| 6-6 | 34,5 | 101,7 | 91,8 | 9,9 | 0,105 | 510,5 | 179,8 |
| 6-7 | 68,8 | 67,3 | 60,8 | 6,5 | 0,058 | 281,8 | 215,6 |
| 6-8 | 68,8 | 136,8 | 123,3 | 13,4 | 0,105 | 512,0 | 240,9 |
| 6-9 | 68,8 | 205,6 | 185,4 | 20,2 | 0,148 | 721,8 | 256,9 |
| 6-10 | 103,3 | 67,3 | 60,4 | 7,0 | 0,049 | 239,3 | 252,2 |
| 6-11 | 103,3 | 102,5 | 91,8 | 10,7 | 0,073 | 357,3 | 256,9 |
| 6-12 | 103,3 | 203,0 | 182,5 | 20,5 | 0,127 | 620,3 | 294,2 |
| 6-13 | 137,7 | 102,1 | 91,9 | 10,2 | 0,063 | 309,3 | 296,9 |
| 6-14 | 137,7 | 137,4 | 123,2 | 14,2 | 0,081 | 397,4 | 310,0 |
| 6-15 | 137,7 | 274,4 | 246,7 | 27,7 | 0,141 | 689,9 | 357,6 |

5.2.5 Material M5

En la Figura 37 se presenta una fotografía del material retenido en el tamiz de 19 mm y también el material que pasa esta malla.



Figura 37: Agregado retenido en el tamiz de 19 mm y agregado que pasa el mismo tamiz del material **M5**.

En la Tabla 43 se resumen las densidades obtenidas y los contenidos de agua para los especímenes del material M2. En la Tabla 44 se resumen los resultados de módulo resiliente.

Tabla 45: Resumen de las densidades húmeda y seca con los contenidos de agua para el material **M5**.

| Pastilla | % Wa | γ_w (kg/m ³) | γ_s (kg/m ³) |
|-----------------|------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 4,5 | 2320,1 | 2220,6 |
| 2 | 5,2 | 2351,2 | 2234,4 |
| 3 | 5,3 | 2376,2 | 2257,0 |
| 4 | 5,0 | 2349,6 | 2238,3 |
| 5 | 4,9 | 2319,4 | 2211,2 |
| 6 | 5,2 | 2353,5 | 2236,5 |
| Promedio | 5,0 | 2345,0 | 2233,0 |

Tabla 46: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M5**.

| Secuencia | σ_{conf} (kPa) | $\sigma_{m\acute{a}x}$ (kPa) | σ_d (kPa) | $\sigma_{contacto}$ (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|-----------------------|------------------------------|------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------------------|----------|
| 1-0 | 103,3 | 102,1 | 91,6 | 10,4 | 0,074 | 362,7 | 252,6 |
| 1-1 | 20,8 | 19,1 | 17,1 | 2,0 | 0,034 | 165,7 | 103,2 |
| 1-2 | 20,8 | 40,4 | 36,7 | 3,7 | 0,069 | 337,5 | 108,7 |
| 1-3 | 20,6 | 61,0 | 55,1 | 5,9 | 0,097 | 471,0 | 117,0 |
| 1-4 | 34,6 | 33,3 | 30,3 | 3,0 | 0,051 | 246,7 | 122,7 |
| 1-5 | 34,5 | 67,5 | 60,8 | 6,7 | 0,093 | 451,5 | 134,8 |
| 1-6 | 34,4 | 101,9 | 91,9 | 10,0 | 0,126 | 616,3 | 149,1 |
| 1-7 | 68,8 | 68,2 | 60,9 | 7,3 | 0,067 | 328,6 | 185,3 |
| 1-8 | 68,8 | 137,0 | 123,6 | 13,4 | 0,117 | 569,4 | 217,0 |
| 1-9 | 68,8 | 205,1 | 184,6 | 20,5 | 0,149 | 727,1 | 253,9 |
| 1-10 | 103,3 | 67,6 | 60,9 | 6,8 | 0,051 | 246,5 | 246,9 |
| 1-11 | 103,3 | 101,7 | 91,4 | 10,3 | 0,073 | 356,4 | 256,6 |
| 1-12 | 103,3 | 205,4 | 184,2 | 21,2 | 0,125 | 610,0 | 302,0 |
| 1-13 | 137,7 | 102,6 | 91,8 | 10,8 | 0,061 | 297,7 | 308,5 |
| 1-14 | 137,7 | 136,8 | 122,5 | 14,3 | 0,079 | 383,3 | 319,6 |
| 1-15 | 137,7 | 274,6 | 247,2 | 27,4 | 0,138 | 672,0 | 367,8 |
| 2-0 | 103,3 | 101,7 | 91,6 | 10,1 | 0,074 | 360,7 | 254,1 |
| 2-1 | 20,6 | 19,1 | 17,5 | 1,6 | 0,033 | 162,3 | 107,9 |
| 2-2 | 20,7 | 39,9 | 36,2 | 3,7 | 0,065 | 318,6 | 113,7 |
| 2-3 | 20,7 | 61,0 | 55,4 | 5,6 | 0,089 | 434,7 | 127,5 |
| 2-4 | 34,4 | 33,3 | 30,6 | 2,6 | 0,048 | 233,1 | 131,4 |
| 2-5 | 34,5 | 67,3 | 60,9 | 6,4 | 0,082 | 401,4 | 151,7 |
| 2-6 | 34,5 | 102,0 | 92,1 | 9,9 | 0,111 | 538,5 | 171,0 |
| 2-7 | 68,8 | 67,4 | 60,7 | 6,7 | 0,061 | 296,7 | 204,7 |
| 2-8 | 68,8 | 136,4 | 123,0 | 13,4 | 0,108 | 526,2 | 233,7 |
| 2-9 | 68,8 | 205,4 | 185,3 | 20,1 | 0,150 | 730,8 | 253,5 |

Tabla 46: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M5**.

| | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 2-10 | 103,3 | 67,2 | 60,6 | 6,6 | 0,057 | 275,5 | 220,0 |
| 2-11 | 103,3 | 102,0 | 92,0 | 10,1 | 0,078 | 379,3 | 242,4 |
| 2-12 | 103,3 | 204,7 | 184,5 | 20,1 | 0,130 | 634,7 | 290,7 |
| 2-13 | 137,7 | 102,2 | 92,1 | 10,1 | 0,074 | 359,9 | 256,0 |
| 2-14 | 137,8 | 136,8 | 123,3 | 13,6 | 0,088 | 430,0 | 286,7 |
| 2-15 | 137,8 | 274,4 | 247,3 | 27,1 | 0,143 | 698,5 | 354,0 |
| 3-0 | 103,3 | 101,4 | 91,4 | 10,0 | 0,076 | 370,0 | 247,0 |
| 3-1 | 20,7 | 18,9 | 17,6 | 1,2 | 0,034 | 166,4 | 106,0 |
| 3-2 | 20,6 | 39,8 | 36,3 | 3,5 | 0,068 | 333,3 | 108,8 |
| 3-3 | 20,7 | 60,2 | 54,6 | 5,6 | 0,094 | 460,4 | 118,6 |
| 3-4 | 34,5 | 32,9 | 30,3 | 2,7 | 0,049 | 236,7 | 127,9 |
| 3-5 | 34,5 | 67,0 | 60,6 | 6,5 | 0,089 | 433,4 | 139,8 |
| 3-6 | 34,5 | 101,1 | 91,4 | 9,7 | 0,118 | 577,2 | 158,4 |
| 3-7 | 68,8 | 67,4 | 60,5 | 6,8 | 0,065 | 315,3 | 192,0 |
| 3-8 | 68,8 | 136,4 | 123,1 | 13,3 | 0,112 | 544,3 | 226,1 |
| 3-9 | 68,8 | 204,4 | 184,4 | 19,9 | 0,147 | 715,1 | 257,9 |
| 3-10 | 103,3 | 67,2 | 60,5 | 6,7 | 0,055 | 268,5 | 225,2 |
| 3-11 | 103,3 | 102,2 | 92,2 | 10,0 | 0,076 | 370,7 | 248,7 |
| 3-12 | 103,3 | 204,5 | 184,3 | 20,2 | 0,125 | 611,3 | 301,4 |
| 3-13 | 137,7 | 101,9 | 92,0 | 9,9 | 0,071 | 348,3 | 264,2 |
| 3-14 | 137,7 | 137,5 | 123,4 | 14,0 | 0,084 | 408,5 | 302,1 |
| 3-15 | 137,7 | 274,0 | 246,7 | 27,3 | 0,136 | 662,3 | 372,5 |
| 4-0 | 103,3 | 102,5 | 92,1 | 10,4 | 0,072 | 352,2 | 261,6 |
| 4-1 | 20,7 | 19,2 | 17,2 | 2,0 | 0,032 | 157,5 | 109,1 |
| 4-2 | 20,7 | 40,3 | 36,5 | 3,8 | 0,061 | 298,8 | 122,0 |
| 4-3 | 20,7 | 60,5 | 54,6 | 5,9 | 0,083 | 405,0 | 134,7 |
| 4-4 | 34,4 | 33,6 | 30,5 | 3,1 | 0,044 | 214,3 | 142,1 |
| 4-5 | 34,5 | 67,9 | 61,5 | 6,4 | 0,079 | 384,1 | 160,1 |
| 4-6 | 34,4 | 102,3 | 92,4 | 9,9 | 0,107 | 521,3 | 177,2 |
| 4-7 | 68,8 | 67,8 | 60,9 | 6,9 | 0,060 | 291,9 | 208,5 |
| 4-8 | 68,8 | 136,7 | 123,2 | 13,5 | 0,108 | 524,2 | 235,0 |
| 4-9 | 68,8 | 205,0 | 184,5 | 20,5 | 0,151 | 734,3 | 251,3 |
| 4-10 | 103,3 | 67,8 | 60,8 | 6,9 | 0,052 | 254,6 | 238,9 |
| 4-11 | 103,3 | 101,7 | 91,3 | 10,4 | 0,076 | 369,7 | 247,0 |
| 4-12 | 103,3 | 205,3 | 184,9 | 20,5 | 0,133 | 645,6 | 286,3 |
| 4-13 | 137,7 | 101,8 | 91,4 | 10,5 | 0,069 | 333,7 | 273,7 |
| 4-14 | 137,7 | 136,7 | 123,0 | 13,7 | 0,086 | 420,6 | 292,4 |
| 4-15 | 137,7 | 274,2 | 246,4 | 27,9 | 0,147 | 714,5 | 344,8 |
| 5-0 | 103,3 | 101,9 | 91,8 | 10,1 | 0,073 | 353,9 | 259,4 |
| 5-1 | 20,8 | 19,4 | 17,5 | 1,8 | 0,043 | 209,3 | 83,9 |
| 5-2 | 20,7 | 40,3 | 36,9 | 3,4 | 0,077 | 375,4 | 98,4 |
| 5-3 | 20,7 | 60,1 | 54,5 | 5,6 | 0,099 | 483,2 | 112,7 |
| 5-4 | 34,4 | 33,4 | 29,9 | 3,5 | 0,048 | 236,3 | 126,7 |
| 5-5 | 34,5 | 67,7 | 61,4 | 6,3 | 0,089 | 432,0 | 142,1 |
| 5-6 | 34,5 | 101,5 | 91,9 | 9,6 | 0,117 | 570,4 | 161,0 |
| 5-7 | 68,8 | 67,4 | 61,0 | 6,4 | 0,064 | 309,8 | 197,0 |
| 5-8 | 68,8 | 136,7 | 123,2 | 13,5 | 0,110 | 534,0 | 230,7 |
| 5-9 | 68,8 | 205,3 | 185,2 | 20,1 | 0,144 | 703,2 | 263,3 |
| 5-10 | 103,3 | 67,2 | 60,7 | 6,4 | 0,051 | 246,5 | 246,4 |
| 5-11 | 103,3 | 101,5 | 91,4 | 10,1 | 0,073 | 355,6 | 256,9 |
| 5-12 | 103,3 | 205,1 | 185,0 | 20,1 | 0,124 | 602,4 | 307,2 |

Tabla 46: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M5**.

| | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 5-13 | 137,8 | 102,0 | 91,9 | 10,1 | 0,063 | 307,0 | 299,4 |
| 5-14 | 137,7 | 136,8 | 122,9 | 13,9 | 0,080 | 388,2 | 316,6 |
| 5-15 | 137,7 | 274,6 | 247,3 | 27,3 | 0,136 | 662,3 | 373,5 |
| 6-0 | 103,3 | 101,7 | 91,4 | 10,3 | 0,077 | 377,4 | 242,3 |
| 6-1 | 20,6 | 18,9 | 17,4 | 1,5 | 0,035 | 169,5 | 102,9 |
| 6-2 | 20,7 | 39,8 | 36,2 | 3,6 | 0,065 | 318,5 | 113,5 |
| 6-3 | 20,7 | 60,6 | 54,9 | 5,7 | 0,088 | 430,6 | 127,5 |
| 6-4 | 34,5 | 33,0 | 29,9 | 3,1 | 0,045 | 221,1 | 135,4 |
| 6-5 | 34,5 | 67,6 | 61,4 | 6,3 | 0,081 | 395,0 | 155,4 |
| 6-6 | 34,5 | 102,5 | 92,8 | 9,7 | 0,111 | 542,2 | 171,1 |
| 6-7 | 68,8 | 67,4 | 60,8 | 6,6 | 0,060 | 294,5 | 206,6 |
| 6-8 | 68,8 | 136,0 | 122,1 | 13,9 | 0,107 | 523,7 | 233,2 |
| 6-9 | 68,8 | 204,4 | 183,6 | 20,7 | 0,152 | 742,2 | 247,4 |
| 6-10 | 103,3 | 68,0 | 60,7 | 7,3 | 0,058 | 283,8 | 214,0 |
| 6-11 | 103,3 | 102,6 | 92,2 | 10,3 | 0,080 | 390,1 | 236,5 |
| 6-12 | 103,3 | 206,2 | 185,6 | 20,6 | 0,133 | 646,9 | 286,9 |
| 6-13 | 137,7 | 101,0 | 90,9 | 10,1 | 0,076 | 371,3 | 244,8 |
| 6-14 | 137,7 | 136,0 | 122,4 | 13,7 | 0,092 | 446,9 | 273,9 |
| 6-15 | 137,7 | 275,0 | 247,3 | 27,7 | 0,147 | 717,3 | 344,8 |

CAPÍTULO 6 ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE II FASE

6.1 Ensayos de Próctor modificado

Luego de la primera fase, se decidió realizar el ensayo de Próctor modificado para todos los materiales, descartando el material retenido en el tamiz de 19,0 mm (Nº 3/4) de la granulometría original de los materiales, para establecer la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptimo.

6.1.1 Resultados para el material M1

El ensayo de Próctor consiste en compactar muestras de material granular con distintos contenidos de agua, se compactan en 5 capas y 56 golpes por capa dentro de un molde de dimensiones y forma especificadas, los golpes se aplican con un pistón y se deja caer libremente desde una altura ya establecida.

Generalmente, tres puntos en la rama ascendente y otros dos en la descendente son suficientes para definir la curva de porcentaje de humedad y densidad seca. El punto máximo de la curva de mejor ajuste indica la densidad máxima seca y el contenido de agua óptimo.

Para el material **M1** se presentan de manera resumida los resultados en la Tabla 47 y la Figura 38.

Tabla 47: Resumen de resultados del ensayo de densidad máxima seca para el material **M1**.

| | |
|-------------------------------|------------------------|
| Contenido de agua óptimo | 3,85 % |
| Densidad seca máxima estándar | 1831 kg/m ³ |

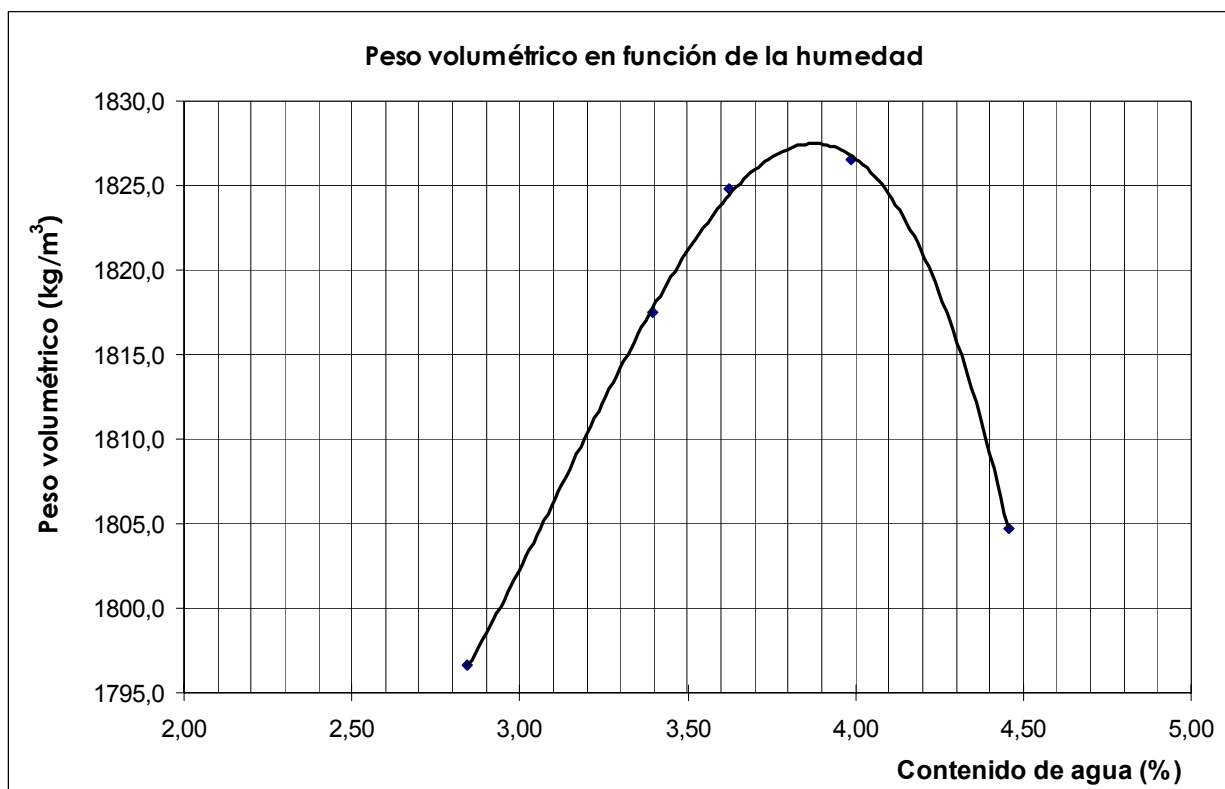


Figura 38: Gráfico de la relación densidad y contenido de agua para el material **M1**.

6.1.2 Resultados para el material M2

Para el material **M2** se presentan de manera resumida los resultados en la Tabla 48 y la Figura 39.

Tabla 48: Resumen de resultados del ensayo de densidad máxima seca para el material **M2**.

| | |
|-------------------------------|------------------------|
| Contenido de agua óptimo | 3,30 % |
| Densidad seca máxima estándar | 2107 kg/m ³ |

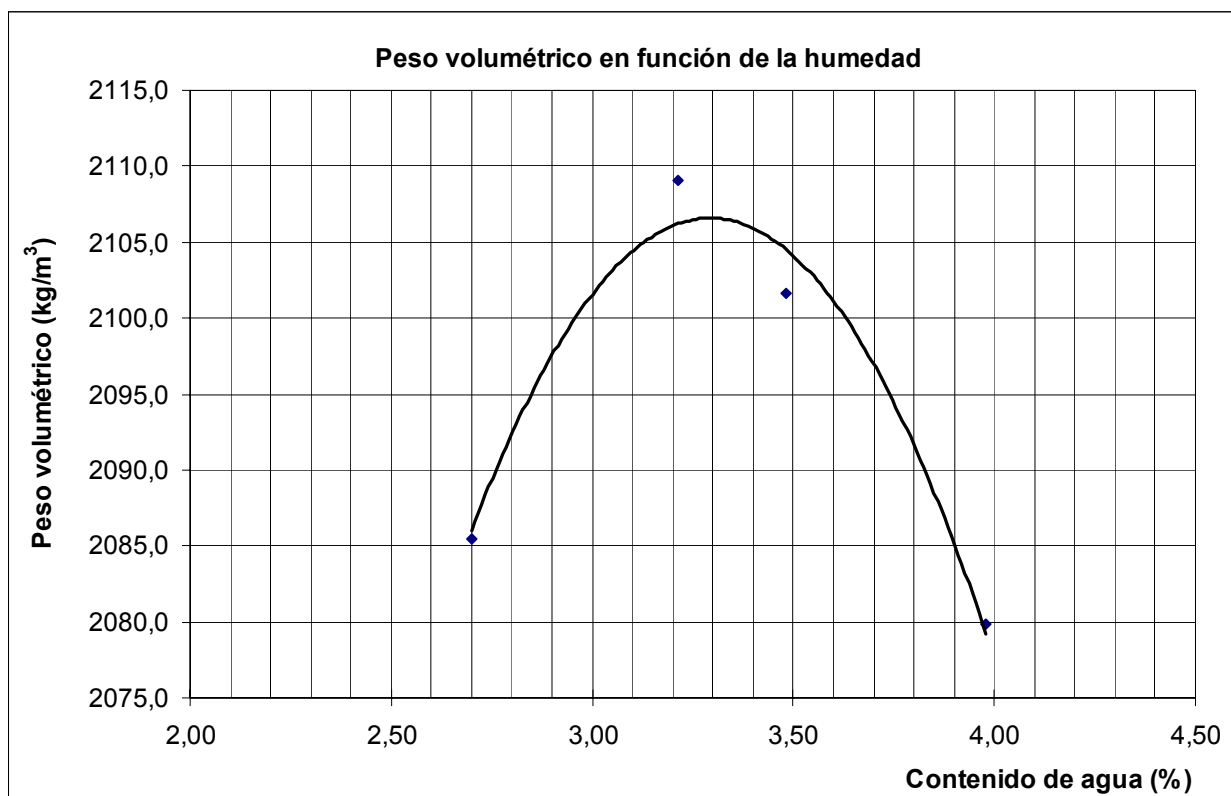


Figura 39: Gráfico de la relación densidad y contenido de agua para el material **M2**.

6.1.3 Resultados para el material M3

Para el material **M3** se presentan de manera resumida los resultados en la Tabla 49 y la Figura 40.

Tabla 49: Resumen de resultados del ensayo de densidad máxima seca para el material **M3**.

| | |
|-------------------------------|------------------------|
| Contenido de agua óptimo | 2,85 % |
| Densidad seca máxima estándar | 2095 kg/m ³ |

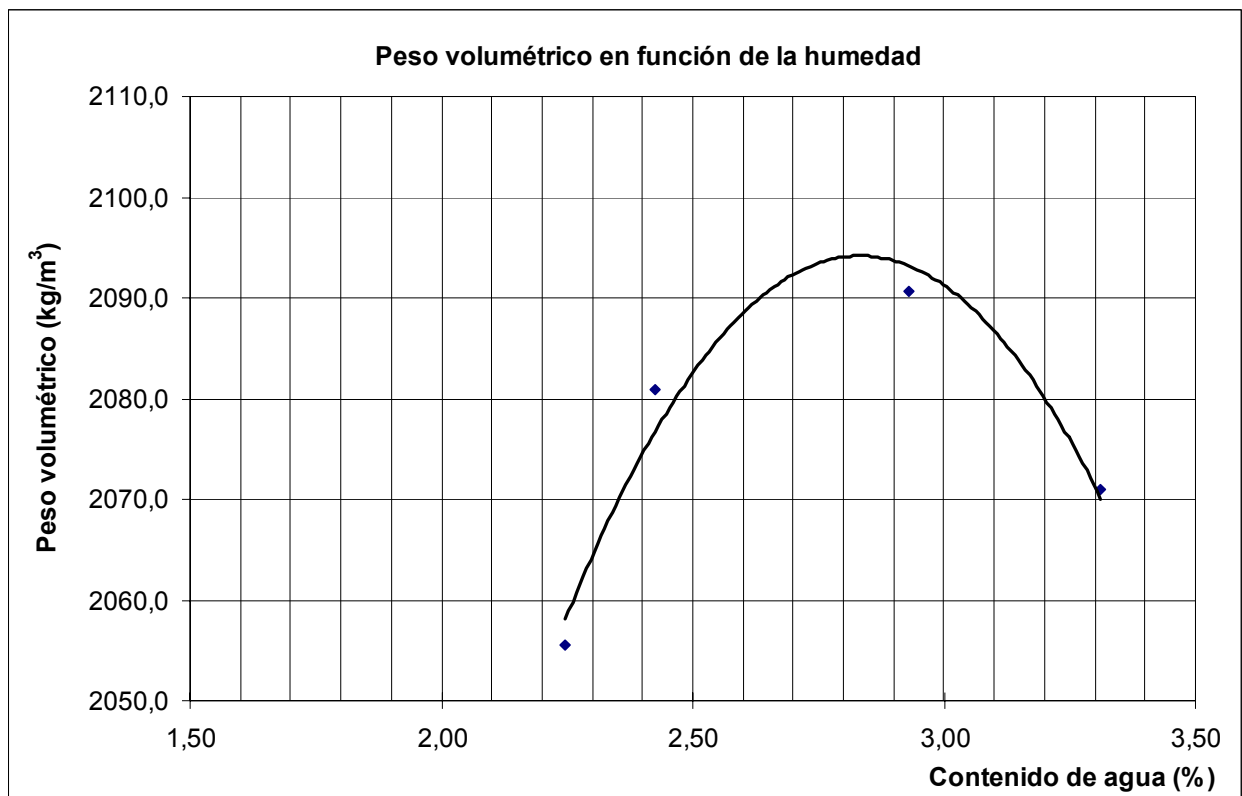


Figura 40: Gráfico de la relación densidad y contenido de agua para el material **M3**.

6.1.4 Resultados para el material M4

Para el material **M4** se presentan de manera resumida los resultados en la Tabla 50 y la Figura 41.

Tabla 50: Resumen de resultados del ensayo de densidad máxima seca para el material **M4**.

| | |
|-------------------------------|------------------------|
| Contenido de agua óptimo | 4,40 % |
| Densidad seca máxima estándar | 2127 kg/m ³ |

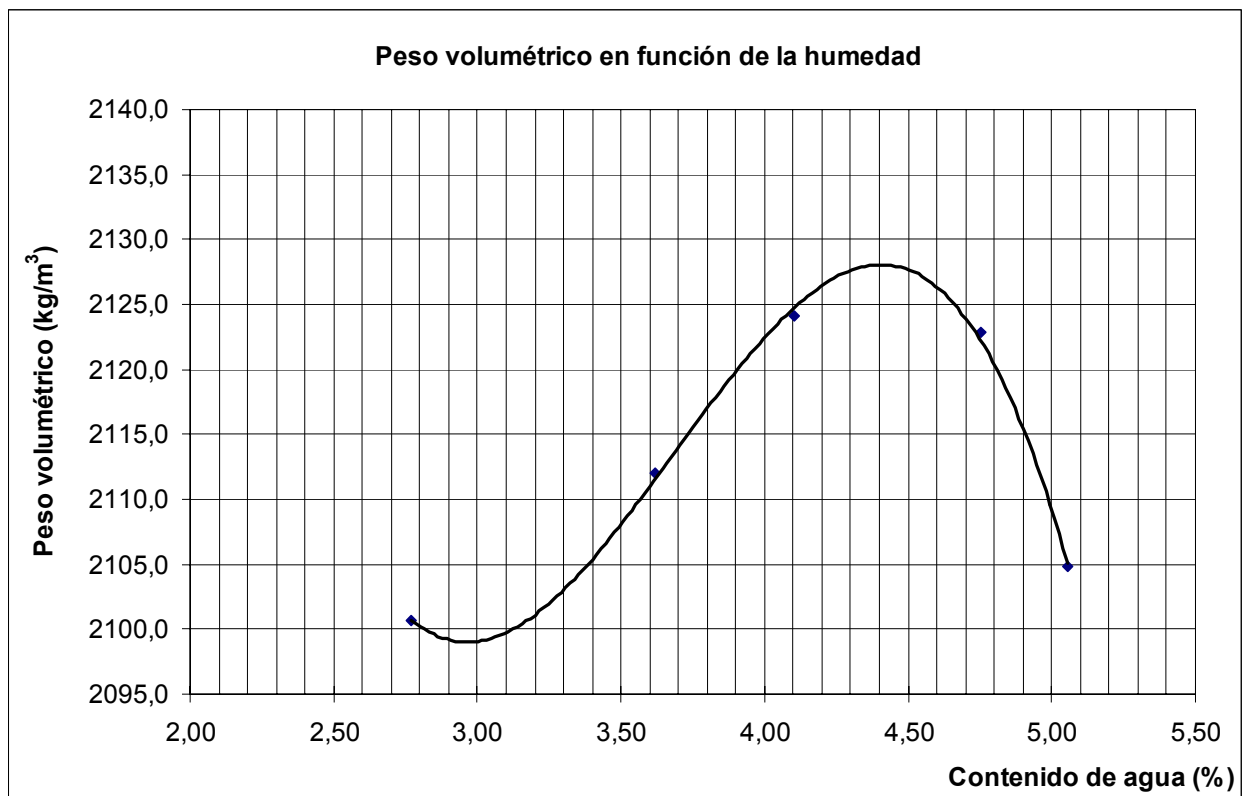


Figura 41: Gráfico de la relación densidad y contenido de agua para el material **M4**.

6.1.5 Resultados para el material M5

Para el material **M5** se presentan de manera resumida los resultados en la Tabla 51 y la Figura 42.

Tabla 51: Resumen de resultados del ensayo de densidad máxima seca para el material **M5**.

| | |
|-------------------------------|------------------------|
| Contenido de agua óptimo | 6,75 % |
| Densidad seca máxima estándar | 2345 kg/m ³ |

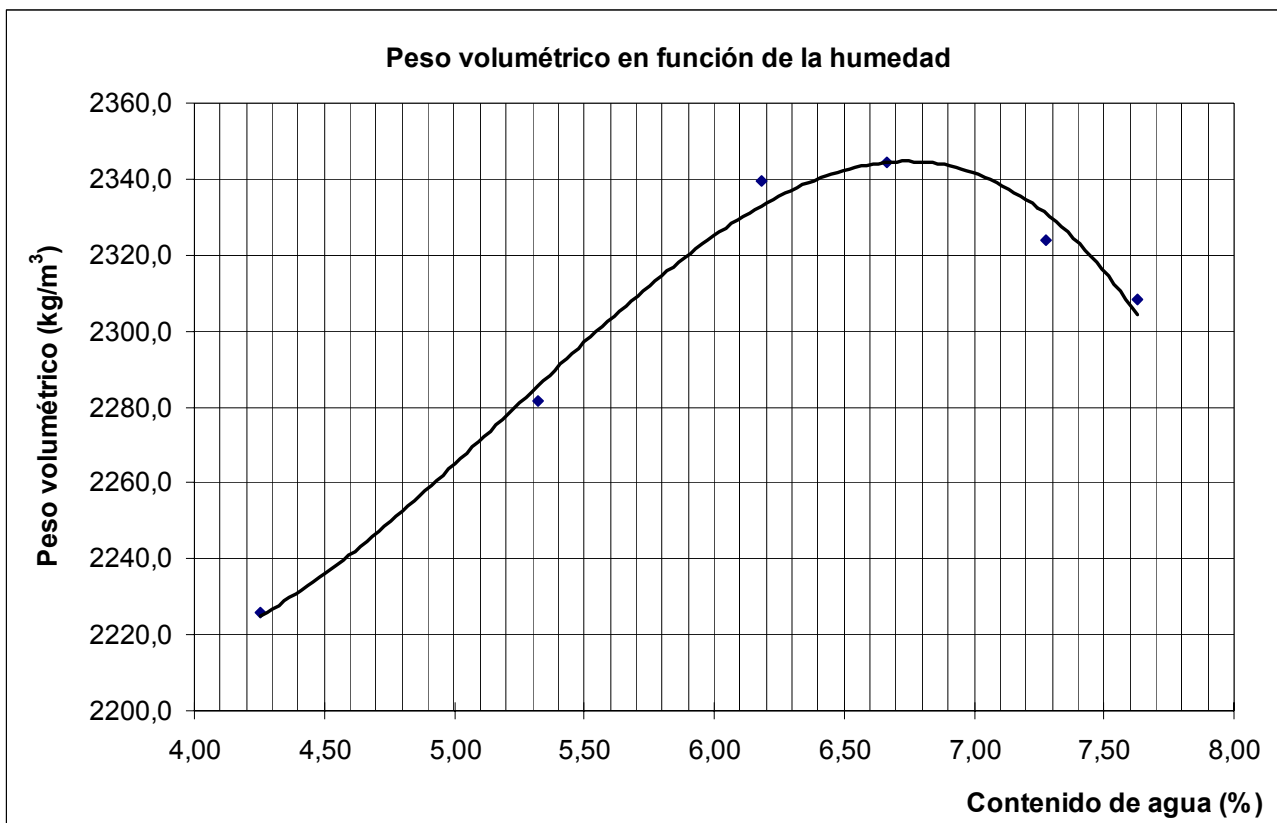


Figura 42: Gráfico de la relación densidad y contenido de agua para el material **M5**.

A continuación, se presenta la Tabla 52 donde se resumen de las densidades máximas secas y contenidos de agua óptimos para los cinco materiales.

Tabla 52: Resumen de resultados de densidad máxima seca y contenido de agua para todos los materiales.

| Material | Densidad seca máxima (kg/m³) | Contenido de agua óptimo (%) |
|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| M1 | 1831 | 3,85 |
| M2 | 2107 | 3,30 |
| M3 | 2095 | 2,85 |
| M4 | 2127 | 4,40 |
| M5 | 2345 | 6,75 |

6.2 Ensayo de módulo resiliente

Se procedió a fabricar los especímenes de 101.6 mm de diámetro y 203 mm de altura aproximadamente con el contenido de agua óptimo. Se compactaron con el mazo Próctor

modificado en 5 capas con 56 golpes por capa. Por cada material se compactaron 6 especímenes. A continuación se presentan los resultados para cada material.

6.2.1 Material M1

En la Tabla 53 se resumen las densidades obtenidas y los contenidos de agua para los especímenes del material M1. En la Tabla 54 se resumen los resultados de módulo resiliente.

Tabla 53: Resumen de las densidades húmeda y seca con los contenidos de agua para el material M1.

| Pastilla | % Wa | γ_w (kg/m ³) | γ_s (kg/m ³) |
|-----------------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 3,7 | 1962,1 | 1892,1 |
| 2 | 4,1 | 1943,0 | 1866,4 |
| 3 | 4,4 | 1942,2 | 1860,4 |
| 4 | 3,8 | 1931,6 | 1861,6 |
| 5 | 3,6 | 1939,3 | 1872,5 |
| 6 | 4,0 | 1939,7 | 1864,2 |
| Promedio | 3,93 | 1943,0 | 1869,5 |

Tabla 54: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material M1.

| Secuencia | $\sigma_{m\acute{a}x}$ (kPa) | σ_d (kPa) | $\sigma_{contacto}$ (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|------------------------------|------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------------------|----------|
| 1-0 | 103,40 | 92,99 | 16,40 | 0,129 | 646,57 | 143,82 |
| 1-1 | 20,71 | 18,51 | 3,31 | 0,074 | 368,86 | 50,18 |
| 1-2 | 20,71 | 37,25 | 5,34 | 0,132 | 658,50 | 56,57 |
| 1-3 | 20,70 | 55,82 | 7,40 | 0,171 | 855,58 | 65,24 |
| 1-4 | 34,50 | 30,89 | 5,51 | 0,091 | 454,67 | 67,94 |
| 1-5 | 34,50 | 61,93 | 8,92 | 0,154 | 769,20 | 80,51 |
| 1-6 | 34,50 | 93,02 | 12,32 | 0,206 | 1028,97 | 90,41 |
| 1-7 | 68,90 | 61,96 | 10,94 | 0,112 | 557,55 | 111,13 |
| 1-8 | 68,90 | 123,99 | 17,85 | 0,195 | 972,68 | 127,47 |
| 1-9 | 68,90 | 185,92 | 24,77 | 0,272 | 1360,34 | 136,67 |
| 1-10 | 103,40 | 61,87 | 13,00 | 0,094 | 470,97 | 131,37 |
| 1-11 | 103,40 | 92,97 | 16,40 | 0,135 | 673,54 | 138,04 |
| 1-12 | 103,40 | 185,88 | 26,80 | 0,231 | 1157,26 | 160,62 |
| 1-13 | 137,90 | 92,87 | 18,46 | 0,114 | 572,22 | 162,29 |
| 1-14 | 137,90 | 123,86 | 21,97 | 0,146 | 728,58 | 170,00 |
| 1-15 | 137,90 | 247,98 | 35,77 | 0,252 | 1258,40 | 197,06 |
| 2-0 | 103,40 | 92,92 | 16,54 | 0,166 | 832,28 | 111,65 |
| 2-1 | 20,70 | 18,52 | 3,32 | 0,099 | 497,44 | 37,23 |
| 2-2 | 20,70 | 37,30 | 5,28 | 0,162 | 809,24 | 46,10 |
| 2-3 | 20,70 | 55,70 | 7,43 | 0,202 | 1010,60 | 55,11 |
| 2-4 | 34,50 | 30,87 | 5,59 | 0,122 | 611,11 | 50,51 |
| 2-5 | 34,51 | 61,87 | 8,95 | 0,187 | 933,85 | 66,26 |

Tabla 54: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material M1.

| Secuencia | $\sigma_{\text{máx}}$ (kPa) | σ_d (kPa) | σ_{contacto} (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------|
| 2-6 | 34,48 | 92,97 | 12,37 | 0,237 | 1183,44 | 78,56 |
| 2-7 | 68,90 | 61,85 | 11,04 | 0,148 | 738,67 | 83,73 |
| 2-8 | 68,90 | 123,93 | 17,93 | 0,225 | 1124,97 | 110,17 |
| 2-9 | 68,90 | 185,97 | 24,83 | 0,296 | 1478,10 | 125,82 |
| 2-10 | 103,41 | 61,85 | 13,11 | 0,130 | 649,96 | 95,16 |
| 2-11 | 103,40 | 92,95 | 16,54 | 0,169 | 845,52 | 109,94 |
| 2-12 | 103,41 | 185,83 | 26,96 | 0,255 | 1276,22 | 145,61 |
| 2-13 | 137,90 | 92,95 | 18,61 | 0,150 | 749,00 | 124,10 |
| 2-14 | 137,91 | 123,87 | 22,11 | 0,178 | 890,46 | 139,10 |
| 2-15 | 137,90 | 247,91 | 35,89 | 0,273 | 1363,36 | 181,83 |
| 3-0 | 103,37 | 93,09 | 16,49 | 0,255 | 1276,74 | 72,91 |
| 3-1 | 20,70 | 18,48 | 3,18 | 0,218 | 1087,91 | 16,98 |
| 3-2 | 20,70 | 37,13 | 5,33 | 0,205 | 1022,94 | 36,30 |
| 3-3 | 20,70 | 55,78 | 7,44 | 0,222 | 1108,95 | 50,30 |
| 3-4 | 34,52 | 30,95 | 5,55 | 0,187 | 934,51 | 33,12 |
| 3-5 | 34,50 | 61,91 | 8,97 | 0,229 | 1147,26 | 53,97 |
| 3-6 | 34,51 | 93,04 | 12,35 | 0,260 | 1299,93 | 71,57 |
| 3-7 | 68,90 | 61,80 | 11,00 | 0,215 | 1073,54 | 57,57 |
| 3-8 | 68,90 | 123,95 | 17,91 | 0,265 | 1326,68 | 93,43 |
| 3-9 | 68,89 | 185,83 | 24,85 | 0,312 | 1560,17 | 119,11 |
| 3-10 | 103,40 | 61,81 | 13,09 | 0,200 | 998,03 | 61,93 |
| 3-11 | 103,37 | 92,99 | 16,50 | 0,231 | 1157,47 | 80,33 |
| 3-12 | 103,40 | 186,06 | 26,87 | 0,286 | 1428,04 | 130,29 |
| 3-13 | 137,90 | 92,77 | 18,56 | 0,211 | 1056,41 | 87,82 |
| 3-14 | 137,90 | 123,88 | 22,08 | 0,231 | 1155,64 | 107,20 |
| 3-15 | 137,90 | 247,95 | 35,89 | 0,295 | 1476,71 | 167,91 |
| 4-0 | 103,40 | 93,03 | 16,48 | 0,130 | 648,55 | 143,44 |
| 4-1 | 20,70 | 18,49 | 3,33 | 0,073 | 367,25 | 50,35 |
| 4-2 | 20,70 | 37,21 | 5,31 | 0,134 | 667,85 | 55,71 |
| 4-3 | 20,70 | 55,82 | 7,43 | 0,177 | 884,77 | 63,09 |
| 4-4 | 34,50 | 30,97 | 5,54 | 0,091 | 453,78 | 68,24 |
| 4-5 | 34,50 | 61,90 | 8,93 | 0,156 | 780,59 | 79,30 |
| 4-6 | 34,50 | 92,97 | 12,37 | 0,209 | 1043,69 | 89,08 |
| 4-7 | 68,90 | 61,88 | 11,02 | 0,111 | 553,14 | 111,86 |
| 4-8 | 68,89 | 123,98 | 17,91 | 0,194 | 969,49 | 127,88 |
| 4-9 | 68,90 | 185,97 | 24,79 | 0,271 | 1353,16 | 137,43 |
| 4-10 | 103,40 | 61,84 | 13,11 | 0,094 | 469,59 | 131,69 |
| 4-11 | 103,40 | 92,95 | 16,49 | 0,135 | 672,71 | 138,17 |
| 4-12 | 103,40 | 185,90 | 26,86 | 0,229 | 1143,39 | 162,59 |
| 4-13 | 137,90 | 92,98 | 18,56 | 0,114 | 571,05 | 162,82 |
| 4-14 | 137,90 | 123,85 | 22,09 | 0,145 | 724,59 | 170,93 |
| 4-15 | 137,90 | 247,92 | 35,84 | 0,250 | 1248,24 | 198,61 |
| 5-0 | 103,40 | 92,95 | 16,55 | 0,138 | 692,11 | 134,30 |
| 5-1 | 20,70 | 18,46 | 3,33 | 0,078 | 391,72 | 47,14 |
| 5-2 | 20,70 | 37,27 | 5,32 | 0,139 | 695,00 | 53,62 |
| 5-3 | 20,69 | 55,75 | 7,46 | 0,184 | 919,31 | 60,64 |
| 5-4 | 34,49 | 30,92 | 5,58 | 0,096 | 480,30 | 64,37 |
| 5-5 | 34,50 | 61,90 | 8,95 | 0,163 | 814,73 | 75,98 |

Tabla 54: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M1**.

| Secuencia | $\sigma_{\text{máx}}$ (kPa) | σ_d (kPa) | σ_{contacto} (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------|
| 5-6 | 34,49 | 92,98 | 12,37 | 0,218 | 1092,15 | 85,13 |
| 5-7 | 68,90 | 61,93 | 11,03 | 0,119 | 593,91 | 104,28 |
| 5-8 | 68,90 | 123,92 | 17,95 | 0,203 | 1015,43 | 122,03 |
| 5-9 | 68,90 | 186,01 | 24,85 | 0,284 | 1417,85 | 131,19 |
| 5-10 | 103,40 | 61,77 | 13,14 | 0,102 | 509,67 | 121,20 |
| 5-11 | 103,40 | 92,84 | 16,54 | 0,143 | 715,58 | 129,74 |
| 5-12 | 103,40 | 185,88 | 26,91 | 0,240 | 1201,23 | 154,74 |
| 5-13 | 137,89 | 92,82 | 18,58 | 0,123 | 612,81 | 151,46 |
| 5-14 | 137,89 | 123,82 | 22,11 | 0,154 | 769,37 | 160,94 |
| 5-15 | 137,89 | 248,09 | 35,90 | 0,263 | 1314,65 | 188,72 |
| 6-0 | 103,40 | 92,98 | 16,51 | 0,314 | 1567,79 | 59,31 |
| 6-1 | 20,70 | 18,05 | 3,36 | 0,346 | 1728,36 | 10,44 |
| 6-2 | 20,70 | 36,89 | 5,33 | 0,330 | 1652,15 | 22,33 |
| 6-3 | 20,71 | 55,59 | 7,44 | 0,347 | 1733,59 | 32,07 |
| 6-4 | 34,50 | 30,56 | 5,56 | 0,327 | 1635,51 | 18,69 |
| 6-5 | 34,50 | 61,73 | 8,95 | 0,344 | 1719,91 | 35,89 |
| 6-6 | 34,50 | 93,00 | 12,37 | 0,366 | 1831,58 | 50,78 |
| 6-7 | 68,89 | 61,50 | 11,07 | 0,337 | 1687,46 | 36,45 |
| 6-8 | 68,89 | 124,00 | 17,93 | 0,346 | 1728,64 | 71,73 |
| 6-9 | 68,90 | 185,99 | 24,84 | 0,369 | 1846,41 | 100,73 |
| 6-10 | 103,40 | 61,56 | 13,13 | 0,336 | 1679,41 | 36,65 |
| 6-11 | 103,40 | 92,91 | 16,51 | 0,337 | 1687,50 | 55,06 |
| 6-12 | 103,39 | 185,98 | 26,91 | 0,337 | 1683,08 | 110,50 |
| 6-13 | 137,90 | 92,93 | 18,57 | 0,316 | 1578,11 | 58,89 |
| 6-14 | 137,90 | 123,94 | 22,07 | 0,309 | 1546,08 | 80,17 |
| 6-15 | 137,90 | 247,87 | 35,88 | 0,330 | 1649,98 | 150,23 |

6.2.2 Material M2

En la Tabla **55** se resumen las densidades obtenidas y los contenidos de agua para los especímenes del material M2. En la Tabla **56** se resumen los resultados de módulo resiliente.

Tabla 55: Resumen de las densidades húmeda y seca con los contenidos de agua para el material **M2**.

| Pastilla | % W_a | γ_w (kg/m ³) | γ_s (kg/m ³) |
|-----------------|------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 4,0 | 2257,4 | 2169,8 |
| 2 | 4,3 | 2254,6 | 2160,8 |
| 3 | 4,3 | 2273,2 | 2180,1 |
| 4 | 3,9 | 2229,5 | 2145,9 |
| 5 | 4,2 | 2227,2 | 2138,4 |
| 6 | 4,0 | 2224,3 | 2138,5 |
| Promedio | 4,1 | 2244,4 | 2155,6 |

Tabla 56: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M2**.

| Secuencia | $\sigma_{\text{máx}}$ (kPa) | σ_d (kPa) | σ_{contacto} (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------|
| 1-0 | 103,40 | 92,87 | 16,50 | 0,109 | 547,11 | 169,74 |
| 1-1 | 20,70 | 18,55 | 3,31 | 0,059 | 294,66 | 62,95 |
| 1-2 | 20,70 | 37,22 | 5,34 | 0,108 | 538,17 | 69,16 |
| 1-3 | 20,69 | 55,80 | 7,46 | 0,145 | 726,99 | 76,76 |
| 1-4 | 34,50 | 30,86 | 5,56 | 0,075 | 377,04 | 81,85 |
| 1-5 | 34,50 | 61,88 | 8,94 | 0,132 | 659,06 | 93,90 |
| 1-6 | 34,50 | 92,97 | 12,38 | 0,180 | 901,32 | 103,15 |
| 1-7 | 68,90 | 61,85 | 11,03 | 0,096 | 480,24 | 128,80 |
| 1-8 | 68,90 | 123,83 | 17,95 | 0,169 | 845,47 | 146,46 |
| 1-9 | 68,90 | 185,87 | 24,84 | 0,238 | 1188,68 | 156,37 |
| 1-10 | 103,38 | 61,77 | 13,14 | 0,081 | 406,67 | 151,88 |
| 1-11 | 103,41 | 93,03 | 16,51 | 0,118 | 588,35 | 158,12 |
| 1-12 | 103,42 | 185,94 | 26,94 | 0,202 | 1010,05 | 184,09 |
| 1-13 | 137,90 | 92,77 | 18,59 | 0,100 | 501,56 | 184,97 |
| 1-14 | 137,90 | 123,72 | 22,11 | 0,128 | 639,53 | 193,45 |
| 1-15 | 137,89 | 247,81 | 35,91 | 0,221 | 1103,72 | 224,52 |
| 2-0 | 103,40 | 92,78 | 16,53 | 0,122 | 609,60 | 152,19 |
| 2-1 | 20,69 | 18,51 | 3,34 | 0,063 | 314,72 | 58,80 |
| 2-2 | 20,70 | 37,22 | 5,34 | 0,110 | 550,33 | 67,64 |
| 2-3 | 20,70 | 55,78 | 7,44 | 0,146 | 728,25 | 76,59 |
| 2-4 | 34,50 | 30,89 | 5,56 | 0,079 | 396,52 | 77,90 |
| 2-5 | 34,50 | 61,89 | 8,97 | 0,133 | 665,29 | 93,03 |
| 2-6 | 34,50 | 93,00 | 12,35 | 0,180 | 900,95 | 103,22 |
| 2-7 | 68,90 | 61,76 | 11,04 | 0,103 | 515,99 | 119,69 |
| 2-8 | 68,90 | 123,86 | 17,93 | 0,173 | 865,17 | 143,16 |
| 2-9 | 68,89 | 185,87 | 24,84 | 0,242 | 1208,05 | 153,86 |
| 2-10 | 103,40 | 61,72 | 13,12 | 0,092 | 461,60 | 133,71 |
| 2-11 | 103,40 | 92,81 | 16,50 | 0,127 | 632,82 | 146,66 |
| 2-12 | 103,40 | 185,75 | 26,90 | 0,208 | 1039,99 | 178,61 |
| 2-13 | 137,90 | 92,83 | 18,59 | 0,111 | 556,77 | 166,73 |
| 2-14 | 137,90 | 123,80 | 22,11 | 0,137 | 685,36 | 180,63 |
| 2-15 | 137,89 | 248,01 | 35,89 | 0,228 | 1140,26 | 217,50 |
| 3-0 | 103,39 | 92,90 | 16,64 | 0,110 | 551,72 | 168,39 |
| 3-1 | 20,69 | 18,46 | 3,39 | 0,059 | 294,25 | 62,75 |
| 3-2 | 20,69 | 37,15 | 5,36 | 0,108 | 537,90 | 69,07 |
| 3-3 | 20,70 | 55,72 | 7,45 | 0,143 | 717,50 | 77,65 |
| 3-4 | 34,50 | 30,92 | 5,61 | 0,074 | 370,42 | 83,49 |
| 3-5 | 34,49 | 61,87 | 9,02 | 0,130 | 648,27 | 95,43 |
| 3-6 | 34,49 | 92,96 | 12,41 | 0,177 | 884,86 | 105,06 |
| 3-7 | 68,91 | 61,87 | 11,11 | 0,095 | 473,48 | 130,67 |
| 3-8 | 68,91 | 123,91 | 18,01 | 0,166 | 832,15 | 148,90 |
| 3-9 | 68,91 | 185,88 | 24,92 | 0,235 | 1173,03 | 158,47 |
| 3-10 | 103,40 | 61,92 | 13,20 | 0,082 | 408,63 | 151,53 |
| 3-11 | 103,40 | 92,93 | 16,65 | 0,117 | 583,52 | 159,25 |
| 3-12 | 103,39 | 185,87 | 27,05 | 0,199 | 995,09 | 186,78 |
| 3-13 | 137,89 | 92,91 | 18,74 | 0,101 | 504,40 | 184,21 |
| 3-14 | 137,90 | 123,93 | 22,25 | 0,128 | 638,75 | 194,02 |

Tabla 56: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M2**.

| Secuencia | $\sigma_{\text{máx}}$ (kPa) | σ_d (kPa) | σ_{contacto} (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------|
| 3-15 | 137,90 | 248,08 | 36,02 | 0,220 | 1099,24 | 225,69 |
| 4-0 | 103,40 | 92,81 | 16,54 | 0,106 | 530,26 | 175,02 |
| 4-1 | 20,70 | 18,49 | 3,33 | 0,057 | 282,63 | 65,42 |
| 4-2 | 20,70 | 37,21 | 5,31 | 0,103 | 516,27 | 72,08 |
| 4-3 | 20,70 | 55,74 | 7,43 | 0,139 | 693,37 | 80,38 |
| 4-4 | 34,50 | 30,83 | 5,55 | 0,071 | 356,68 | 86,43 |
| 4-5 | 34,54 | 61,91 | 8,94 | 0,126 | 629,68 | 98,33 |
| 4-6 | 34,50 | 92,96 | 12,36 | 0,171 | 855,14 | 108,70 |
| 4-7 | 68,90 | 61,79 | 11,02 | 0,092 | 458,48 | 134,77 |
| 4-8 | 68,90 | 123,91 | 17,91 | 0,161 | 806,42 | 153,66 |
| 4-9 | 68,89 | 185,90 | 24,83 | 0,227 | 1136,17 | 163,62 |
| 4-10 | 103,40 | 61,81 | 13,09 | 0,078 | 391,05 | 158,07 |
| 4-11 | 103,41 | 92,90 | 16,51 | 0,113 | 566,28 | 164,05 |
| 4-12 | 103,41 | 185,78 | 26,91 | 0,193 | 962,54 | 193,01 |
| 4-13 | 137,90 | 92,91 | 18,57 | 0,098 | 487,93 | 190,43 |
| 4-14 | 137,90 | 123,91 | 22,08 | 0,124 | 619,52 | 200,00 |
| 4-15 | 137,90 | 247,88 | 35,87 | 0,211 | 1057,13 | 234,49 |
| 5-0 | 103,41 | 92,87 | 16,51 | 0,108 | 537,94 | 172,64 |
| 5-1 | 20,69 | 18,52 | 3,36 | 0,056 | 282,33 | 65,60 |
| 5-2 | 20,70 | 37,27 | 5,31 | 0,104 | 519,65 | 71,72 |
| 5-3 | 20,70 | 55,72 | 7,44 | 0,140 | 698,11 | 79,82 |
| 5-4 | 34,50 | 30,86 | 5,58 | 0,070 | 352,32 | 87,58 |
| 5-5 | 34,50 | 61,85 | 8,97 | 0,125 | 623,80 | 99,15 |
| 5-6 | 34,50 | 92,99 | 12,37 | 0,173 | 863,78 | 107,65 |
| 5-7 | 68,89 | 61,81 | 11,04 | 0,090 | 450,03 | 137,35 |
| 5-8 | 68,90 | 123,86 | 17,94 | 0,163 | 816,33 | 151,72 |
| 5-9 | 68,90 | 185,90 | 24,85 | 0,231 | 1156,32 | 160,77 |
| 5-10 | 103,40 | 61,74 | 13,14 | 0,079 | 393,15 | 157,04 |
| 5-11 | 103,40 | 92,84 | 16,54 | 0,114 | 568,35 | 163,34 |
| 5-12 | 103,39 | 185,76 | 26,92 | 0,196 | 981,03 | 189,35 |
| 5-13 | 137,91 | 92,79 | 18,61 | 0,098 | 489,24 | 189,66 |
| 5-14 | 137,90 | 123,84 | 22,09 | 0,124 | 620,91 | 199,45 |
| 5-15 | 137,90 | 247,98 | 35,91 | 0,216 | 1080,46 | 229,51 |
| 6-0 | 103,42 | 92,86 | 16,54 | 0,124 | 619,09 | 149,99 |
| 6-1 | 20,71 | 18,30 | 3,34 | 0,084 | 417,80 | 43,80 |
| 6-2 | 20,71 | 37,18 | 5,35 | 0,107 | 535,90 | 69,37 |
| 6-3 | 20,69 | 55,68 | 7,46 | 0,144 | 720,31 | 77,29 |
| 6-4 | 34,50 | 30,89 | 5,56 | 0,081 | 407,06 | 75,89 |
| 6-5 | 34,50 | 61,85 | 8,96 | 0,128 | 642,07 | 96,32 |
| 6-6 | 34,50 | 92,98 | 12,37 | 0,175 | 873,68 | 106,42 |
| 6-7 | 68,90 | 61,82 | 11,04 | 0,105 | 522,61 | 118,29 |
| 6-8 | 68,90 | 123,82 | 17,93 | 0,164 | 821,31 | 150,77 |
| 6-9 | 68,90 | 185,95 | 24,85 | 0,23 | 1151,87 | 161,43 |
| 6-10 | 103,40 | 61,72 | 13,11 | 0,101 | 504,13 | 122,44 |
| 6-11 | 103,40 | 92,81 | 16,52 | 0,127 | 635,28 | 146,09 |
| 6-12 | 103,41 | 185,85 | 26,94 | 0,194 | 971,98 | 191,21 |
| 6-13 | 137,89 | 92,76 | 18,59 | 0,116 | 579,60 | 160,05 |
| 6-14 | 137,91 | 123,69 | 22,10 | 0,135 | 672,80 | 183,84 |

Tabla 56: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M2**.

| Secuencia | $\sigma_{\text{máx}}$ (kPa) | σ_d (kPa) | σ_{contacto} (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------|
| 6-15 | 137,89 | 247,90 | 35,93 | 0,213 | 1064,41 | 232,90 |

6.2.3 Material M3

En la Tabla **57** se resumen las densidades obtenidas y los contenidos de agua para los especímenes del material M3. En la Tabla **58** se resumen los resultados de módulo resiliente.

Tabla 57: Resumen de las densidades húmeda y seca con los contenidos de agua para el material **M3**.

| Pastilla | % Wa | γ_w (kg/m ³) | γ_s (kg/m ³) |
|-----------------|------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 3,7 | 2222,7 | 2142,4 |
| 2 | 4,1 | 2212,7 | 2124,9 |
| 3 | 3,9 | 2194,5 | 2111,8 |
| 4 | 4,1 | 2219,0 | 2131,6 |
| 5 | 3,5 | 2212,1 | 2138,2 |
| 6 | 4,0 | 2204,1 | 2119,7 |
| Promedio | 3,9 | 2210,8 | 2128,1 |

Tabla 58: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M3**.

| Secuencia | $\sigma_{\text{máx}}$ (kPa) | σ_d (kPa) | σ_{contacto} (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------|
| 1-0 | 103,44 | 92,91 | 16,51 | 0,114 | 567,77 | 163,63 |
| 1-1 | 20,70 | 18,49 | 3,35 | 0,056 | 277,97 | 66,52 |
| 1-2 | 20,70 | 37,24 | 5,31 | 0,100 | 502,41 | 74,12 |
| 1-3 | 20,70 | 55,82 | 7,43 | 0,133 | 665,79 | 83,84 |
| 1-4 | 34,50 | 30,82 | 5,58 | 0,069 | 345,68 | 89,17 |
| 1-5 | 34,50 | 61,84 | 8,96 | 0,118 | 588,39 | 105,10 |
| 1-6 | 34,50 | 92,88 | 12,36 | 0,163 | 814,09 | 114,09 |
| 1-7 | 68,90 | 61,85 | 11,03 | 0,091 | 453,66 | 136,34 |
| 1-8 | 68,90 | 123,93 | 17,92 | 0,153 | 766,22 | 161,75 |
| 1-9 | 68,90 | 185,83 | 24,82 | 0,217 | 1083,96 | 171,44 |
| 1-10 | 103,40 | 61,70 | 13,08 | 0,094 | 470,75 | 131,07 |
| 1-11 | 103,41 | 92,94 | 16,51 | 0,120 | 601,56 | 154,50 |
| 1-12 | 103,39 | 185,75 | 26,92 | 0,182 | 909,62 | 204,21 |
| 1-13 | 137,90 | 92,97 | 18,57 | 0,113 | 565,61 | 164,37 |
| 1-14 | 137,89 | 123,97 | 22,08 | 0,131 | 657,49 | 188,55 |
| 1-15 | 137,90 | 247,98 | 35,90 | 0,201 | 1003,21 | 247,19 |
| 2-0 | 103,39 | 92,90 | 16,49 | 0,098 | 489,81 | 189,67 |
| 2-1 | 20,68 | 18,52 | 3,33 | 0,051 | 256,27 | 72,27 |
| 2-2 | 20,71 | 37,20 | 5,32 | 0,092 | 461,02 | 80,70 |
| 2-3 | 20,68 | 55,75 | 7,43 | 0,124 | 618,23 | 90,18 |

Tabla 58: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M3**.

| Secuencia | $\sigma_{\text{máx}}$ (kPa) | σ_d (kPa) | σ_{contacto} (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------|
| 2-4 | 34,50 | 30,86 | 5,55 | 0,065 | 322,54 | 95,67 |
| 2-5 | 34,50 | 61,90 | 8,97 | 0,111 | 557,12 | 111,10 |
| 2-6 | 34,50 | 92,96 | 12,37 | 0,152 | 760,13 | 122,29 |
| 2-7 | 68,90 | 61,86 | 11,04 | 0,083 | 414,40 | 149,29 |
| 2-8 | 68,90 | 123,77 | 17,93 | 0,145 | 722,54 | 171,30 |
| 2-9 | 68,90 | 185,92 | 24,83 | 0,203 | 1015,99 | 183,00 |
| 2-10 | 103,41 | 61,75 | 13,12 | 0,072 | 359,54 | 171,75 |
| 2-11 | 103,39 | 92,83 | 16,51 | 0,101 | 503,80 | 184,25 |
| 2-12 | 103,39 | 185,81 | 26,95 | 0,171 | 855,81 | 217,11 |
| 2-13 | 137,90 | 92,90 | 18,57 | 0,087 | 432,75 | 214,69 |
| 2-14 | 137,90 | 123,79 | 22,08 | 0,109 | 543,38 | 227,82 |
| 2-15 | 137,90 | 247,80 | 35,85 | 0,189 | 944,32 | 262,41 |
| 3-0 | 103,397 | 92,9 | 16,5 | 0,099 | 495,4 | 187,4 |
| 3-1 | 20,705 | 18,485 | 3,3 | 0,063 | 316,668 | 58,4 |
| 3-2 | 20,676 | 37,211 | 5,3 | 0,091 | 452,828 | 82,2 |
| 3-3 | 20,709 | 55,781 | 7,436 | 0,122 | 607,9 | 91,8 |
| 3-4 | 34,501 | 30,93 | 5,534 | 0,063 | 314,3 | 98,408 |
| 3-5 | 34,5 | 61,8 | 9,0 | 0,109 | 546,247 | 113,186 |
| 3-6 | 34,5 | 92,873 | 12,335 | 0,149 | 746,722 | 124,4 |
| 3-7 | 68,897 | 61,8 | 11,0 | 0,081 | 407,4 | 151,7 |
| 3-8 | 68,891 | 123,9 | 17,9 | 0,144 | 721,6 | 171,7 |
| 3-9 | 68,896 | 186,089 | 24,829 | 0,204 | 1018,84 | 182,648 |
| 3-10 | 103,397 | 61,809 | 13,1 | 0,071 | 356,6 | 173,352 |
| 3-11 | 103,39 | 92,838 | 16,52 | 0,099 | 496,5 | 186,976 |
| 3-12 | 103,408 | 185,94 | 26,9 | 0,173 | 864,38 | 215,113 |
| 3-13 | 137,913 | 92,814 | 18,574 | 0,086 | 429,44 | 216,128 |
| 3-14 | 137,884 | 123,8 | 22,123 | 0,109 | 546,1 | 226,6 |
| 3-15 | 137,882 | 248,0 | 35,901 | 0,192 | 958,6 | 258,7 |
| 4-0 | 103,42 | 92,95 | 16,48 | 0,095 | 475,70 | 195,40 |
| 4-1 | 20,69 | 18,49 | 3,35 | 0,051 | 252,64 | 73,19 |
| 4-2 | 20,71 | 37,16 | 5,36 | 0,094 | 471,37 | 78,84 |
| 4-3 | 20,68 | 55,65 | 7,47 | 0,126 | 627,94 | 88,62 |
| 4-4 | 34,50 | 30,91 | 5,55 | 0,063 | 316,16 | 97,77 |
| 4-5 | 34,50 | 61,79 | 8,97 | 0,111 | 555,19 | 111,30 |
| 4-6 | 34,50 | 92,95 | 12,34 | 0,153 | 766,22 | 121,30 |
| 4-7 | 68,90 | 61,88 | 11,02 | 0,079 | 395,39 | 156,49 |
| 4-8 | 68,90 | 123,92 | 17,91 | 0,143 | 717,42 | 172,74 |
| 4-9 | 68,90 | 185,88 | 24,83 | 0,202 | 1008,62 | 184,29 |
| 4-10 | 103,41 | 61,75 | 13,10 | 0,070 | 347,78 | 177,55 |
| 4-11 | 103,42 | 92,87 | 16,50 | 0,098 | 489,98 | 189,54 |
| 4-12 | 103,42 | 185,94 | 26,94 | 0,169 | 845,66 | 219,87 |
| 4-13 | 137,90 | 92,89 | 18,58 | 0,086 | 431,41 | 215,32 |
| 4-14 | 137,89 | 124,04 | 22,06 | 0,108 | 538,38 | 230,39 |
| 4-15 | 137,89 | 247,95 | 35,87 | 0,186 | 930,23 | 266,54 |
| 5-0 | 103,39 | 92,91 | 16,51 | 0,104 | 519,74 | 178,76 |
| 5-1 | 20,72 | 18,53 | 3,32 | 0,053 | 263,89 | 70,22 |
| 5-2 | 20,73 | 37,17 | 5,36 | 0,097 | 486,04 | 76,47 |
| 5-3 | 20,68 | 55,83 | 7,42 | 0,131 | 656,60 | 85,03 |

Tabla 58: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M3**.

| Secuencia | $\sigma_{\text{máx}}$ (kPa) | σ_d (kPa) | σ_{contacto} (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------|
| 5-4 | 34,50 | 30,83 | 5,59 | 0,067 | 336,63 | 91,57 |
| 5-5 | 34,49 | 61,88 | 8,98 | 0,119 | 594,24 | 104,13 |
| 5-6 | 34,50 | 92,97 | 12,37 | 0,162 | 811,88 | 114,52 |
| 5-7 | 68,89 | 61,90 | 11,04 | 0,087 | 437,10 | 141,62 |
| 5-8 | 68,90 | 123,98 | 17,94 | 0,155 | 772,82 | 160,43 |
| 5-9 | 68,90 | 185,95 | 24,85 | 0,213 | 1067,04 | 174,26 |
| 5-10 | 103,40 | 61,81 | 13,15 | 0,074 | 371,00 | 166,60 |
| 5-11 | 103,40 | 92,87 | 16,51 | 0,105 | 527,25 | 176,15 |
| 5-12 | 103,40 | 185,82 | 26,94 | 0,181 | 903,71 | 205,61 |
| 5-13 | 137,89 | 92,91 | 18,60 | 0,091 | 455,78 | 203,84 |
| 5-14 | 137,91 | 123,75 | 22,11 | 0,116 | 578,55 | 213,89 |
| 5-15 | 137,88 | 247,87 | 35,91 | 0,199 | 995,68 | 248,95 |
| 6-0 | 103,41 | 92,95 | 16,49 | 0,097 | 486,40 | 191,10 |
| 6-1 | 20,69 | 18,50 | 3,33 | 0,048 | 239,77 | 77,17 |
| 6-2 | 20,69 | 37,08 | 5,33 | 0,090 | 448,68 | 82,64 |
| 6-3 | 20,69 | 55,75 | 7,40 | 0,121 | 606,51 | 91,92 |
| 6-4 | 34,50 | 30,92 | 5,56 | 0,061 | 305,98 | 101,04 |
| 6-5 | 34,50 | 61,80 | 9,00 | 0,110 | 548,80 | 112,61 |
| 6-6 | 34,50 | 92,95 | 12,38 | 0,151 | 755,22 | 123,08 |
| 6-7 | 68,90 | 61,79 | 11,01 | 0,081 | 402,61 | 153,48 |
| 6-8 | 68,90 | 123,99 | 17,95 | 0,145 | 725,88 | 170,81 |
| 6-9 | 68,90 | 185,88 | 24,81 | 0,205 | 1024,88 | 181,37 |
| 6-10 | 103,40 | 61,65 | 13,11 | 0,068 | 339,26 | 181,73 |
| 6-11 | 103,38 | 92,93 | 16,50 | 0,099 | 493,96 | 188,14 |
| 6-12 | 103,42 | 185,79 | 26,91 | 0,175 | 873,19 | 212,77 |
| 6-13 | 137,90 | 92,85 | 18,57 | 0,086 | 427,56 | 217,17 |
| 6-14 | 137,88 | 123,91 | 22,06 | 0,110 | 550,53 | 225,08 |
| 6-15 | 137,90 | 247,90 | 35,87 | 0,194 | 972,41 | 254,93 |

6.2.4 Material M4

En la Tabla 59 se resumen las densidades obtenidas y los contenidos de agua para los especímenes del material M4. En la Tabla 60 se resumen los resultados de módulo resiliente.

Tabla 59: Resumen de las densidades húmeda y seca con los contenidos de agua para el material **M4**.

| Pastilla | % Wa | γ_w (kg/m ³) | γ_s (kg/m ³) |
|----------|------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 5,6 | 2280,0 | 2158,3 |
| 2 | 5,8 | 2326,1 | 2197,7 |
| 3 | 5,5 | 2302,9 | 2181,9 |
| 4 | 5,9 | 2296,6 | 2168,3 |
| 5 | 5,9 | 2294,3 | 2167,1 |

| | | | |
|-----------------|------------|---------------|---------------|
| 6 | 5,7 | 2296,4 | 2173,0 |
| Promedio | 5,7 | 2299,4 | 2174,4 |

Tabla 60: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M4**.

| Secuencia | $\sigma_{\text{máx}}$ (kPa) | σ_d (kPa) | σ_{contacto} (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------|
| 1-0 | 103,39 | 93,01 | 16,49 | 0,106 | 528,14 | 176,12 |
| 1-1 | 20,70 | 16,56 | 3,38 | 0,053 | 267,12 | 111,18 |
| 1-2 | 20,71 | 37,15 | 5,35 | 0,105 | 523,47 | 70,98 |
| 1-3 | 20,72 | 55,75 | 7,43 | 0,140 | 701,31 | 79,49 |
| 1-4 | 34,49 | 30,82 | 5,58 | 0,070 | 348,22 | 88,51 |
| 1-5 | 34,50 | 61,81 | 8,97 | 0,124 | 618,05 | 100,01 |
| 1-6 | 34,48 | 92,99 | 12,36 | 0,169 | 846,48 | 109,86 |
| 1-7 | 68,90 | 61,79 | 11,06 | 0,089 | 447,37 | 138,11 |
| 1-8 | 68,90 | 123,86 | 17,97 | 0,160 | 798,46 | 155,12 |
| 1-9 | 68,90 | 185,92 | 24,85 | 0,225 | 1123,85 | 165,43 |
| 1-10 | 103,37 | 61,80 | 13,13 | 0,076 | 381,42 | 162,02 |
| 1-11 | 103,39 | 92,91 | 16,54 | 0,110 | 548,12 | 169,51 |
| 1-12 | 103,37 | 185,95 | 26,92 | 0,190 | 951,74 | 195,38 |
| 1-13 | 137,89 | 92,92 | 18,60 | 0,094 | 469,35 | 197,97 |
| 1-14 | 137,88 | 123,77 | 22,11 | 0,120 | 599,56 | 206,43 |
| 1-15 | 137,90 | 247,99 | 35,91 | 0,211 | 1055,65 | 234,92 |
| 2-0 | 103,40 | 92,90 | 16,59 | 0,104 | 520,57 | 178,46 |
| 2-1 | 20,72 | 18,46 | 3,36 | 0,054 | 270,04 | 68,37 |
| 2-2 | 20,70 | 37,19 | 5,38 | 0,098 | 488,12 | 76,19 |
| 2-3 | 20,70 | 55,79 | 7,46 | 0,129 | 646,12 | 86,34 |
| 2-4 | 34,50 | 30,81 | 5,61 | 0,068 | 341,56 | 90,21 |
| 2-5 | 34,50 | 61,91 | 9,00 | 0,118 | 588,31 | 105,24 |
| 2-6 | 34,50 | 92,89 | 12,39 | 0,159 | 794,42 | 116,93 |
| 2-7 | 68,90 | 61,79 | 11,08 | 0,087 | 437,24 | 141,33 |
| 2-8 | 68,89 | 123,85 | 17,99 | 0,154 | 769,22 | 161,00 |
| 2-9 | 68,90 | 185,92 | 24,89 | 0,217 | 1086,59 | 171,10 |
| 2-10 | 103,40 | 61,83 | 13,18 | 0,076 | 381,90 | 161,91 |
| 2-11 | 103,40 | 92,91 | 16,59 | 0,109 | 545,96 | 170,17 |
| 2-12 | 103,40 | 185,92 | 27,00 | 0,186 | 930,38 | 199,83 |
| 2-13 | 137,90 | 92,83 | 18,71 | 0,094 | 471,26 | 196,98 |
| 2-14 | 137,90 | 123,83 | 22,19 | 0,120 | 598,52 | 206,88 |
| 2-15 | 137,91 | 247,94 | 36,01 | 0,206 | 1032,23 | 240,20 |
| 3-0 | 103,40 | 92,83 | 16,48 | 0,097 | 487,14 | 190,56 |
| 3-1 | 20,71 | 18,52 | 3,32 | 0,050 | 252,48 | 73,36 |
| 3-2 | 20,67 | 37,25 | 5,31 | 0,094 | 469,79 | 79,28 |
| 3-3 | 20,70 | 55,68 | 7,46 | 0,127 | 635,55 | 87,61 |
| 3-4 | 34,50 | 30,91 | 5,55 | 0,065 | 324,70 | 95,20 |
| 3-5 | 34,50 | 61,88 | 8,95 | 0,115 | 575,68 | 107,49 |
| 3-6 | 34,50 | 92,98 | 12,38 | 0,158 | 788,50 | 117,92 |
| 3-7 | 68,90 | 61,84 | 11,01 | 0,085 | 423,02 | 146,18 |

Tabla 60: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M4**.

| Secuencia | $\sigma_{\text{máx}}$ (kPa) | σ_d (kPa) | σ_{contacto} (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------|
| 3-8 | 68,90 | 123,97 | 17,93 | 0,149 | 747,32 | 165,89 |
| 3-9 | 68,89 | 185,90 | 24,83 | 0,212 | 1058,59 | 175,61 |
| 3-10 | 103,41 | 61,82 | 13,09 | 0,072 | 357,91 | 172,72 |
| 3-11 | 103,40 | 92,88 | 16,50 | 0,103 | 514,53 | 180,52 |
| 3-12 | 103,38 | 185,70 | 26,92 | 0,180 | 897,91 | 206,81 |
| 3-13 | 137,89 | 92,94 | 18,60 | 0,088 | 441,24 | 210,62 |
| 3-14 | 137,90 | 123,87 | 22,11 | 0,113 | 564,87 | 219,29 |
| 3-15 | 137,89 | 247,97 | 35,89 | 0,200 | 998,10 | 248,45 |
| 4-0 | 103,43 | 92,88 | 16,52 | 0,106 | 528,24 | 175,83 |
| 4-1 | 20,71 | 18,49 | 3,35 | 0,053 | 264,93 | 69,78 |
| 4-2 | 20,69 | 37,23 | 5,33 | 0,095 | 476,07 | 78,21 |
| 4-3 | 20,70 | 55,80 | 7,44 | 0,128 | 638,29 | 87,42 |
| 4-4 | 34,50 | 30,92 | 5,57 | 0,067 | 337,33 | 91,66 |
| 4-5 | 34,50 | 61,81 | 8,98 | 0,116 | 577,65 | 107,00 |
| 4-6 | 34,50 | 92,98 | 12,39 | 0,156 | 781,39 | 118,99 |
| 4-7 | 68,89 | 61,78 | 11,04 | 0,087 | 433,46 | 142,53 |
| 4-8 | 68,90 | 123,98 | 17,94 | 0,152 | 759,05 | 163,34 |
| 4-9 | 68,90 | 185,99 | 24,83 | 0,215 | 1074,97 | 173,02 |
| 4-10 | 103,40 | 61,80 | 13,12 | 0,084 | 422,03 | 146,44 |
| 4-11 | 103,40 | 92,82 | 16,53 | 0,11 | 551,02 | 168,45 |
| 4-12 | 103,39 | 185,80 | 26,93 | 0,185 | 927,34 | 200,36 |
| 4-13 | 137,89 | 92,86 | 18,60 | 0,103 | 515,60 | 180,11 |
| 4-14 | 137,89 | 123,78 | 22,10 | 0,122 | 610,45 | 202,77 |
| 4-15 | 137,89 | 248,04 | 35,90 | 0,207 | 1035,77 | 239,47 |
| 5-0 | 103,39 | 92,91 | 16,54 | 0,111 | 553,19 | 167,95 |
| 5-1 | 20,68 | 18,60 | 3,36 | 0,060 | 300,33 | 61,82 |
| 5-2 | 20,71 | 37,16 | 5,34 | 0,102 | 509,73 | 72,90 |
| 5-3 | 20,71 | 55,78 | 7,44 | 0,135 | 677,11 | 82,37 |
| 5-4 | 34,50 | 30,85 | 5,58 | 0,073 | 365,18 | 84,48 |
| 5-5 | 34,50 | 61,85 | 8,99 | 0,123 | 615,39 | 100,50 |
| 5-6 | 34,50 | 92,98 | 12,38 | 0,163 | 817,11 | 113,79 |
| 5-7 | 68,90 | 61,82 | 11,07 | 0,092 | 461,09 | 134,07 |
| 5-8 | 68,90 | 123,94 | 17,97 | 0,157 | 786,20 | 157,65 |
| 5-9 | 68,90 | 185,78 | 24,85 | 0,216 | 1082,21 | 171,67 |
| 5-10 | 103,39 | 61,66 | 13,16 | 0,080 | 398,84 | 154,59 |
| 5-11 | 103,41 | 92,95 | 16,52 | 0,112 | 561,77 | 165,46 |
| 5-12 | 103,38 | 185,85 | 26,96 | 0,188 | 939,84 | 197,75 |
| 5-13 | 137,89 | 92,86 | 18,63 | 0,098 | 488,48 | 190,09 |
| 5-14 | 137,90 | 123,77 | 22,12 | 0,123 | 612,71 | 202,01 |
| 5-15 | 137,90 | 248,07 | 35,94 | 0,208 | 1042,50 | 237,95 |
| 6-0 | 103,42 | 93,00 | 16,52 | 0,110 | 549,46 | 169,26 |
| 6-1 | 20,68 | 18,47 | 3,34 | 0,071 | 352,67 | 52,37 |
| 6-2 | 20,70 | 37,22 | 5,34 | 0,102 | 507,79 | 73,29 |
| 6-3 | 20,69 | 55,77 | 7,45 | 0,132 | 661,07 | 84,36 |
| 6-4 | 34,50 | 30,86 | 5,57 | 0,073 | 366,86 | 84,12 |
| 6-5 | 34,50 | 61,94 | 8,97 | 0,119 | 593,61 | 104,34 |
| 6-6 | 34,50 | 93,02 | 12,37 | 0,161 | 804,46 | 115,63 |
| 6-7 | 68,90 | 61,86 | 11,04 | 0,094 | 471,04 | 131,32 |

Tabla 60: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M4**.

| Secuencia | $\sigma_{\text{máx}}$ (kPa) | σ_d (kPa) | σ_{contacto} (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------|
| 6-8 | 68,90 | 123,95 | 17,95 | 0,154 | 770,00 | 160,97 |
| 6-9 | 68,90 | 185,96 | 24,84 | 0,216 | 1080,02 | 172,19 |
| 6-10 | 103,40 | 61,90 | 13,13 | 0,089 | 444,41 | 139,28 |
| 6-11 | 103,40 | 92,97 | 16,53 | 0,113 | 564,67 | 164,64 |
| 6-12 | 103,38 | 185,87 | 26,94 | 0,185 | 927,07 | 200,49 |
| 6-13 | 137,88 | 92,93 | 18,62 | 0,099 | 495,82 | 187,42 |
| 6-14 | 137,88 | 123,90 | 22,13 | 0,121 | 605,27 | 204,71 |
| 6-15 | 137,88 | 247,99 | 35,90 | 0,206 | 1029,28 | 240,94 |

6.2.5 Material M5

En la Tabla **61** se resumen las densidades obtenidas y los contenidos de agua para los especímenes del material M5. En la Tabla **62** se resumen los resultados de módulo resiliente.

Tabla 61: Resumen de las densidades húmeda y seca con los contenidos de agua para el material **M5**.

| Pastilla | % Wa | γ_w (kg/m ³) | γ_s (kg/m ³) |
|-----------------|------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 7,0 | 2460,5 | 2298,6 |
| 2 | 7,6 | 2482,9 | 2308,4 |
| 3 | 7,6 | 2545,3 | 2365,4 |
| 4 | 6,8 | 2510,7 | 2351,7 |
| 5 | 7,3 | 2517,4 | 2345,9 |
| 6 | 7,0 | 2511,5 | 2347,3 |
| Promedio | 7,2 | 2504,7 | 2336,2 |

Tabla 62: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M5**.

| Secuencia | $\sigma_{\text{máx}}$ (kPa) | σ_d (kPa) | σ_{contacto} (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------|
| 1-0 | 103,40 | 92,87 | 16,52 | 0,094 | 470,69 | 197,31 |
| 1-1 | 20,68 | 18,53 | 3,34 | 0,048 | 241,16 | 76,82 |
| 1-2 | 20,72 | 37,20 | 5,32 | 0,089 | 444,28 | 83,74 |
| 1-3 | 20,66 | 55,62 | 7,44 | 0,120 | 600,89 | 92,57 |
| 1-4 | 34,50 | 30,91 | 5,56 | 0,062 | 309,64 | 99,83 |
| 1-5 | 34,50 | 61,79 | 8,95 | 0,108 | 540,76 | 114,27 |
| 1-6 | 34,50 | 92,99 | 12,37 | 0,148 | 741,17 | 125,47 |
| 1-7 | 68,90 | 61,77 | 11,03 | 0,080 | 397,92 | 155,22 |
| 1-8 | 68,90 | 123,82 | 17,96 | 0,140 | 699,45 | 177,03 |
| 1-9 | 68,89 | 185,85 | 24,85 | 0,197 | 983,65 | 188,94 |
| 1-10 | 103,40 | 61,74 | 13,12 | 0,069 | 345,87 | 178,50 |
| 1-11 | 103,39 | 92,79 | 16,53 | 0,098 | 490,03 | 189,37 |
| 1-12 | 103,40 | 185,73 | 26,92 | 0,167 | 834,87 | 222,46 |

Tabla 62: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M5**.

| Secuencia | $\sigma_{\text{máx}}$ (kPa) | σ_d (kPa) | σ_{contacto} (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|------------------|---|--|--|---------------------------------------|--|---------------------|
| 1-13 | 137,89 | 92,75 | 18,61 | 0,084 | 422,50 | 219,54 |
| 1-14 | 137,91 | 123,67 | 22,14 | 0,107 | 533,02 | 232,03 |
| 1-15 | 137,90 | 247,79 | 35,93 | 0,184 | 920,34 | 269,23 |
| 2-0 | 103,39 | 92,89 | 16,50 | 0,099 | 492,68 | 188,54 |
| 2-1 | 20,69 | 18,46 | 3,33 | 0,051 | 252,55 | 73,08 |
| 2-2 | 20,68 | 37,16 | 5,34 | 0,092 | 460,96 | 80,62 |
| 2-3 | 20,70 | 55,71 | 7,44 | 0,123 | 613,02 | 90,87 |
| 2-4 | 34,50 | 30,86 | 5,56 | 0,066 | 328,28 | 94,02 |
| 2-5 | 34,50 | 61,83 | 8,96 | 0,113 | 562,73 | 109,87 |
| 2-6 | 34,50 | 92,97 | 12,37 | 0,152 | 761,61 | 122,07 |
| 2-7 | 68,90 | 61,82 | 11,02 | 0,085 | 422,94 | 146,17 |
| 2-8 | 68,90 | 123,84 | 17,94 | 0,147 | 733,53 | 168,82 |
| 2-9 | 68,90 | 185,97 | 24,83 | 0,204 | 1020,50 | 182,23 |
| 2-10 | 103,42 | 61,77 | 13,11 | 0,074 | 367,77 | 167,94 |
| 2-11 | 103,40 | 92,83 | 16,50 | 0,104 | 519,13 | 178,81 |
| 2-12 | 103,41 | 185,80 | 26,93 | 0,176 | 878,88 | 211,40 |
| 2-13 | 137,89 | 92,91 | 18,59 | 0,091 | 456,23 | 203,65 |
| 2-14 | 137,89 | 123,80 | 22,08 | 0,115 | 575,01 | 215,30 |
| 2-15 | 137,89 | 247,91 | 35,89 | 0,196 | 979,14 | 253,19 |
| 3-0 | 103,39 | 92,90 | 16,63 | 0,100 | 498,69 | 186,29 |
| 3-1 | 20,68 | 18,47 | 3,37 | 0,050 | 251,32 | 73,47 |
| 3-2 | 20,68 | 37,15 | 5,38 | 0,093 | 462,99 | 80,23 |
| 3-3 | 20,69 | 55,73 | 7,46 | 0,123 | 613,50 | 90,83 |
| 3-4 | 34,50 | 30,90 | 5,60 | 0,065 | 326,59 | 94,60 |
| 3-5 | 34,50 | 61,90 | 9,00 | 0,113 | 566,94 | 109,17 |
| 3-6 | 34,50 | 92,92 | 12,40 | 0,153 | 763,75 | 121,66 |
| 3-7 | 68,90 | 61,88 | 11,12 | 0,084 | 418,76 | 147,78 |
| 3-8 | 68,90 | 123,98 | 17,98 | 0,147 | 733,94 | 168,93 |
| 3-9 | 68,90 | 185,88 | 24,91 | 0,208 | 1038,87 | 178,92 |
| 3-10 | 103,40 | 61,80 | 13,21 | 0,071 | 355,94 | 173,63 |
| 3-11 | 103,40 | 92,93 | 16,61 | 0,102 | 512,43 | 181,35 |
| 3-12 | 103,40 | 185,88 | 27,01 | 0,176 | 881,06 | 210,97 |
| 3-13 | 137,90 | 92,99 | 18,71 | 0,088 | 438,98 | 211,84 |
| 3-14 | 137,90 | 123,96 | 22,22 | 0,112 | 557,67 | 222,29 |
| 3-15 | 137,90 | 247,95 | 36,01 | 0,194 | 971,84 | 255,14 |
| 4-0 | 103,39 | 92,92 | 16,62 | 0,100 | 500,60 | 185,62 |
| 4-1 | 20,69 | 18,49 | 3,35 | 0,051 | 253,00 | 73,08 |
| 4-2 | 20,72 | 37,24 | 5,35 | 0,094 | 468,02 | 79,57 |
| 4-3 | 20,69 | 55,84 | 7,46 | 0,124 | 617,67 | 90,40 |
| 4-4 | 34,50 | 30,92 | 5,59 | 0,065 | 326,44 | 94,71 |
| 4-5 | 34,50 | 61,93 | 9,00 | 0,113 | 566,12 | 109,39 |
| 4-6 | 34,50 | 92,94 | 12,40 | 0,154 | 769,97 | 120,70 |
| 4-7 | 68,90 | 61,77 | 11,10 | 0,085 | 424,40 | 145,55 |
| 4-8 | 68,89 | 124,02 | 18,01 | 0,150 | 748,13 | 165,77 |
| 4-9 | 68,89 | 185,87 | 24,92 | 0,211 | 1057,14 | 175,82 |
| 4-10 | 103,39 | 61,79 | 13,23 | 0,074 | 371,45 | 166,36 |
| 4-11 | 103,39 | 92,97 | 16,62 | 0,106 | 532,14 | 174,71 |
| 4-12 | 103,40 | 185,86 | 27,00 | 0,181 | 905,73 | 205,21 |

Tabla 62: Resumen del ensayo de módulo resiliente para el material **M5**.

| Secuencia | $\sigma_{\text{máx}}$ (kPa) | σ_d (kPa) | σ_{contacto} (kPa) | δ_r (mm) | ϵ_r ($\times 10^{-6}$) | MR (MPa) |
|-----------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------|
| 4-13 | 137,90 | 92,98 | 18,75 | 0,093 | 465,70 | 199,66 |
| 4-14 | 137,90 | 123,87 | 22,24 | 0,118 | 591,27 | 209,51 |
| 4-15 | 137,90 | 248,07 | 36,04 | 0,201 | 1005,51 | 246,71 |
| 5-0 | 103,40 | 92,87 | 16,64 | 0,100 | 500,18 | 185,68 |
| 5-1 | 20,69 | 18,46 | 3,35 | 0,053 | 264,85 | 69,69 |
| 5-2 | 20,68 | 37,17 | 5,34 | 0,093 | 466,45 | 79,69 |
| 5-3 | 20,67 | 55,64 | 7,47 | 0,123 | 615,89 | 90,35 |
| 5-4 | 34,43 | 30,87 | 5,60 | 0,067 | 334,41 | 92,32 |
| 5-5 | 34,49 | 61,66 | 9,00 | 0,113 | 566,59 | 108,82 |
| 5-6 | 34,50 | 92,95 | 12,41 | 0,154 | 768,91 | 120,89 |
| 5-7 | 68,90 | 61,73 | 11,12 | 0,086 | 429,41 | 143,75 |
| 5-8 | 68,90 | 123,92 | 17,99 | 0,149 | 743,87 | 166,59 |
| 5-9 | 68,90 | 185,96 | 24,90 | 0,209 | 1046,53 | 177,69 |
| 5-10 | 103,40 | 61,77 | 13,24 | 0,077 | 387,39 | 159,46 |
| 5-11 | 103,41 | 92,86 | 16,64 | 0,108 | 542,24 | 171,25 |
| 5-12 | 103,40 | 185,76 | 27,04 | 0,181 | 907,03 | 204,80 |
| 5-13 | 137,91 | 92,87 | 18,77 | 0,096 | 481,05 | 193,05 |
| 5-14 | 137,91 | 123,76 | 22,23 | 0,120 | 601,06 | 205,91 |
| 5-15 | 137,89 | 247,84 | 36,03 | 0,201 | 1005,75 | 246,43 |
| 6-0 | 103,40 | 92,83 | 16,53 | 0,089 | 442,59 | 209,74 |
| 6-1 | 20,70 | 18,50 | 3,34 | 0,046 | 228,93 | 80,82 |
| 6-2 | 20,69 | 37,14 | 5,36 | 0,086 | 428,53 | 86,66 |
| 6-3 | 20,68 | 55,74 | 7,46 | 0,116 | 580,82 | 95,98 |
| 6-4 | 34,50 | 30,86 | 5,58 | 0,060 | 297,62 | 103,69 |
| 6-5 | 34,49 | 61,89 | 8,96 | 0,105 | 523,87 | 118,15 |
| 6-6 | 34,50 | 92,92 | 12,36 | 0,142 | 708,99 | 131,06 |
| 6-7 | 68,90 | 61,90 | 11,05 | 0,076 | 382,17 | 161,96 |
| 6-8 | 68,90 | 123,82 | 17,94 | 0,137 | 683,12 | 181,25 |
| 6-9 | 68,90 | 185,96 | 24,87 | 0,199 | 994,73 | 186,94 |
| 6-10 | 103,40 | 61,78 | 13,14 | 0,068 | 338,94 | 182,27 |
| 6-11 | 103,42 | 92,84 | 16,54 | 0,097 | 485,51 | 191,21 |
| 6-12 | 103,40 | 185,76 | 26,94 | 0,171 | 855,24 | 217,20 |
| 6-13 | 137,92 | 92,92 | 18,62 | 0,086 | 428,32 | 216,95 |
| 6-14 | 137,91 | 123,94 | 22,12 | 0,109 | 545,01 | 227,40 |
| 6-15 | 137,91 | 1,64 | 36,42 | 0,001 | 6,79 | 246,78 |

A continuación se presenta la Tabla 63 resumen de los contenidos de agua, densidades secas y porcentaje de compactación.

Tabla 63: Resumen de resultados de densidad máxima seca, contenido de agua y compactación para todos los materiales.

| Material | Densidad seca máxima (kg/m ³) | Contenido de agua al cálculo (%) | Densidad seca máxima (kg/m ³) | Contenido de agua óptimo obtenido | Compactación agua al cálculo (%) | Compactación al óptimo (%) |
|----------|--|-------------------------------------|--|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
|----------|--|-------------------------------------|--|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|

| | | | | (%) | | |
|----|------|-----|------|-----|------|-----|
| M1 | 1744 | 8,8 | 1870 | 3,9 | 95,0 | 102 |
| M2 | 2054 | 4,6 | 2156 | 4,1 | 97,5 | 102 |
| M3 | 2014 | 6,2 | 2128 | 3,9 | 96,1 | 102 |
| M4 | 2121 | 5,0 | 2174 | 5,7 | 99,7 | 102 |
| M5 | 2233 | 5,0 | 2336 | 7,2 | 95,2 | 100 |

Aquí quedé

CAPÍTULO 7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS OBTENIDOS

En este estudio se utilizó la técnica de la regresión lineal múltiple (RLM) para el análisis de los datos obtenidos del ensayo de módulo resiliente. La relación que se estudia es la que existe entre el módulo resiliente y el estado de esfuerzos que actúa en el espécimen de material de base sin estabilizar. Se utilizó el programa computacional *JMP versión 4* para realizar el análisis estadístico de los datos.

La RLM es una técnica estadística para modelar e investigar la relación entre dos o más variables, descrita por una relación lineal entre la variable respuesta y y las variables regresoras x_i . El modelo de regresión contiene parámetros de regresión β_i que se encuentran a través del método de mínimos cuadrados. Finalmente, el modelo se utiliza para predecir futuras observaciones o para estimar la respuesta media para un nivel particular de x_i .

La significancia estadística de la regresión se determina a través de una prueba F comparando la varianza del modelo de regresión y la varianza del error, para establecer si existe una relación lineal entre la variable respuesta y un subconjunto de variables regresoras x_k .

También hay técnicas para medir la adecuación del modelo de RLM, como el coeficiente de determinación múltiple (R^2) que es una medida de la cantidad de variabilidad del valor de y_{predicho} obtenido al utilizar las variables regresoras x_k . El valor de R^2 está entre 0 y 1. Se debe destacar que R^2 no implica necesariamente que el modelo de regresión es adecuado pues no toma en cuenta la presencia de variables redundantes, ya que la agregar una variable al modelo incrementará siempre el R^2 independientemente de que la variable adicional sea estadísticamente significativa o no. Por las razones anteriores, es conveniente utilizar el coeficiente de determinación ajustado R^2_{ajustado} para la selección del modelo pues toma en cuenta el número de variables regresoras y el tamaño de la muestra a través de los grados de libertad. Para la selección del modelo se utilizan los siguientes criterios, el R^2 , el R^2_{ajustado} , el MS_E (cuadrado medio del error) y el estadístico de Mallows C_p .

7.1 Selección de las variables para el modelo de RLM

Para la selección de un conjunto adecuado de variables regresoras que incluya todas las variables importantes para poder modelar la variable respuesta de manera adecuada, se utilizan los siguientes criterios, que R^2 y el $R^2_{ajustado}$ sean máximos y que MS_E sea un mínimo. El criterio de C_p para un subconjunto de términos p del modelo (incluyendo el intercepto) es una medida del cuadrado medio de error total que se calcula por medio de la suma de la varianza del error del modelo y el sesgo que se introduce al no tomar en cuenta las variables importantes. Entonces se escoge como la mejor ecuación de regresión el modelo con C_p mínimo o cuando $C_p \cong p$. Por último, otro criterio es el de Información de Akaike (AIC) el cual tiene que ser también un mínimo para las variables regresoras consideradas significativas.

Para todo análisis de regresión lineal múltiple hay que verificar que las asunciones teóricas se cumplen para el conjunto de datos del experimento para evitar conclusiones erróneas o incompletas.

Los parámetros que se asumen para una RLM son:

- Los parámetros del modelo están correctamente especificados, la gráfica de los residuales contra x_i se utiliza para detectar la necesidad de incluir términos cuadráticos de una o más variables de predicción.
- Los residuales de la regresión son independientes con media cero, una varianza constante y con distribución normal, la gráfica de probabilidad normal se usa para verificar la distribución normal de los residuos. El gráfico de los residuos contra el valor de y predicho se usa para chequear que la varianza sea constante.
- Hay ausencia de valores influyentes, se usa la medida de distancia de Cook D_i para determinar si hay valores influyentes, un valor de $D_i > 1$ indica que el punto es influyente. También para el cuadrado del residual studentizado.
- La colinealidad múltiple no está presente, el Factor de inflación de la varianza VIF se utiliza para detectar multicolinealidad entre las variables regresoras. Un valor de $VIF > 10$ se considera como el límite donde se puede presentar el problema de colinealidad.

7.2 Regresión lineal múltiple para los datos del material M1

7.2.1 Agua al cálculo

Para el análisis estadístico en el programa JMP, se consideraron las siguientes variables. Ver la Tabla 64.

Tabla 64: Variables de entrada consideradas para el análisis de regresión.

| Nombre de las variables | Valor de la variable |
|-------------------------|---|
| Y1 | LOG(MR/Pa) |
| X1 | LOG(σ_3 /Pa) |
| X2 | LOG(θ /Pa) |
| X3 | LOG(σ_d /Pa) |
| X4 | LOG(τ_{oct} /Pa) |
| X5 | LOG((τ_{oct} /Pa)+1) |
| X6 | (LOG(τ_{oct} /Pa)) ² X6 = X4 ² |

Primero se hizo el análisis de regresión por pasos hacia delante para escoger el modelo de predicción con las variables más significativas. La evaluación se hizo basados en los criterios descritos con anterioridad: el Cp de Mallows, MS_E, R² y AIC.

Según los datos anteriores las variables más significativas son X2 y X5 que forman la ecuación constitutiva universal (Ver Figura 43). Por lo que el modelo de regresión sería:

$$Y1 = \beta_0 + \beta_1 X2 + \beta_5 X5$$

donde

$$\beta_0 = \log k_1$$

$$\beta_1 = k_2$$

$$\beta_5 = k_3$$

El modelo de regresión lineal que queda para un R²_{ajustado} = 0,886881:

$$Y1 = 2,82661275 + 0,43498054 \times X2 - 0,4473813 \times X5$$

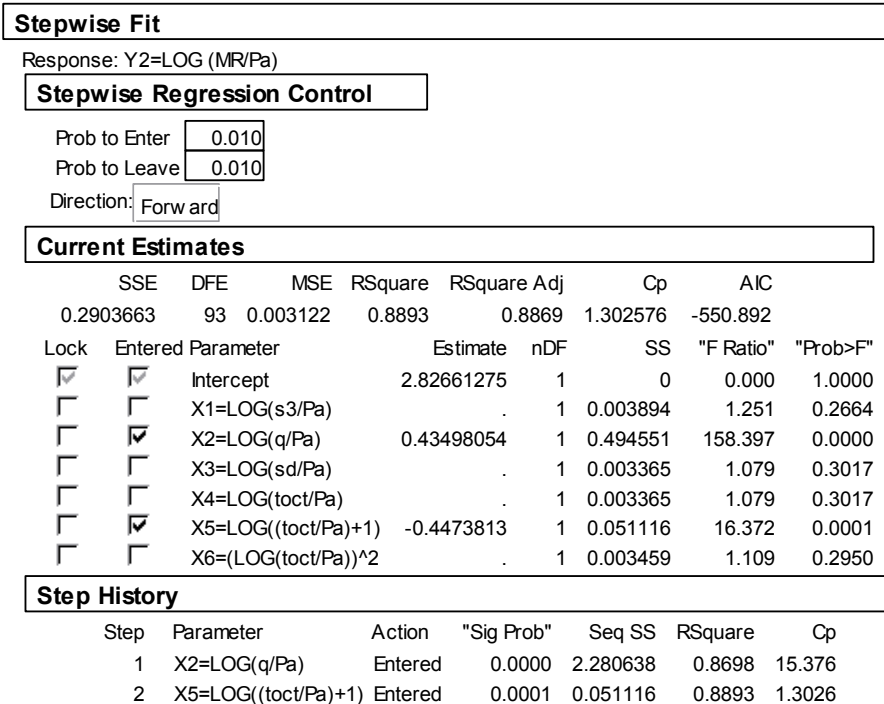


Figura 43: Salida luego de realizar la regresión por pasos del material **M1** con el agua calculada.

El modelo universal constitutivo de módulo resiliente para el material **M1** queda:

$$MR = 670,8304999 \cdot Pa \cdot \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,4349805} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-0,4473813}$$

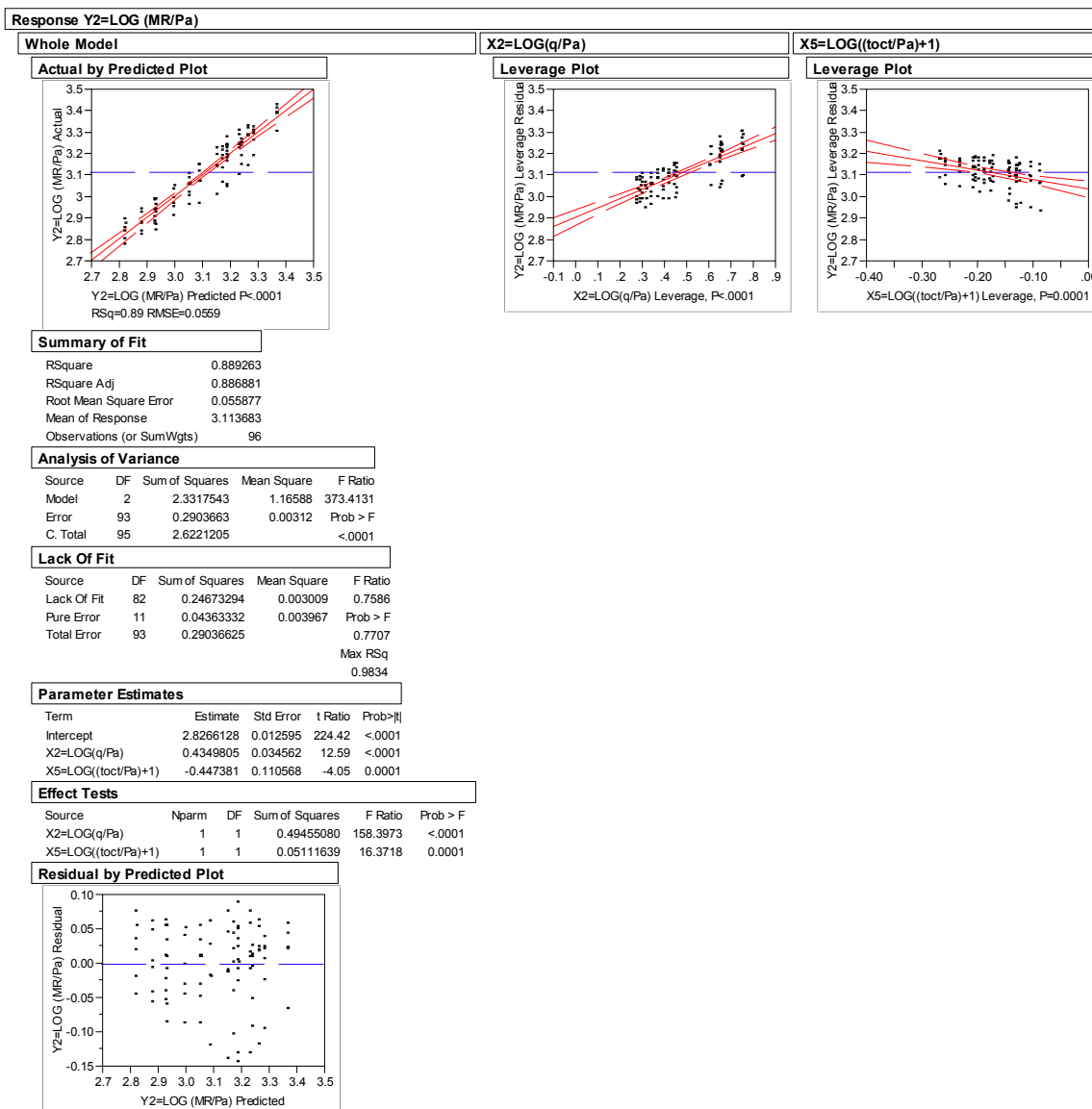


Figura 44: Resultados de la regresión lineal para el material **M1** agua calculada.

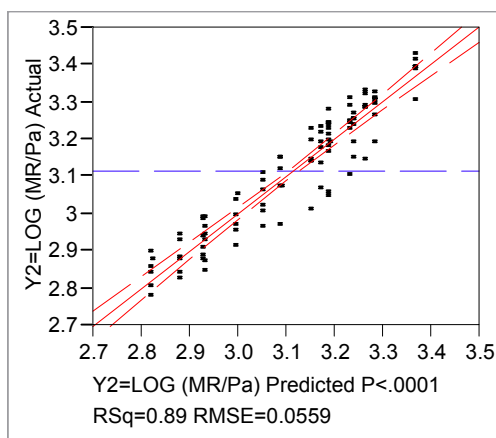


Figura 45: Gráfico de módulo real contra el predicho para el material **M1** agua calculada.

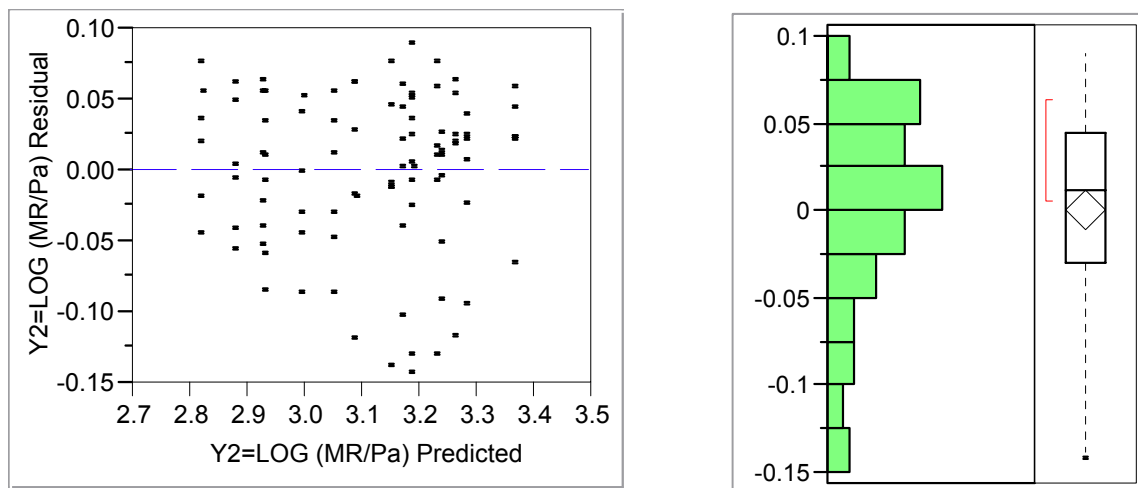


Figura 46: Gráfico de residuales y su distribución para el material **M1 agua calculada**.

7.2.2 Agua al óptimo

Antes de realizar este análisis se eliminaron de los datos las secuencias 3 y 6 pues daban valores de módulo muy distintos a los datos de las otras secuencias, por lo tanto, el análisis estadístico, la variable más significativa es X_2 que forma el primer término de la ecuación constitutiva universal (Ver **Figura 47**). Por lo que el modelo de regresión sería:

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 X_2$$

donde

$$\beta_0 = \log k_1$$

$$\beta_1 = k_2$$

El modelo de regresión lineal que queda para un $R^2_{ajustado} = 0,952161$:

$$Y_1 = 2,7455761 + 0,6566123 \times X_2$$

Stepwise Fit

Response: Y2=LOG (MR/Pa)

Stepwise Regression Control

Prob to Enter 0.010

Prob to Leave 0.010

Direction: Forward

Current Estimates

| | SSE | DFE | MSE | RSquare | RSquare Adj | Cp | AIC | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|------------|---------|-------------|-----------|----------|--|
| | 0.1064633 | 62 | 0.001717 | 0.9529 | 0.9522 | 2.996326 | -405.526 | |
| Lock | Entered | Parameter | Estimate | nDF | SS | "F Ratio" | "Prob>F" | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Intercept | 2.74557611 | 1 | 0 | 0.000 | 1.0000 | |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | X1=LOG(s3/Pa) | . | 1 | 0.006496 | 3.964 | 0.0510 | |
| <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | X2=LOG(q/Pa) | 0.65661233 | 1 | 2.154889 | 1254.922 | 0.0000 | |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | X3=LOG(sd/Pa) | . | 1 | 0.007497 | 4.621 | 0.0356 | |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | X4=LOG(toct/Pa) | . | 1 | 0.007497 | 4.621 | 0.0356 | |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | X5=LOG((toct/Pa)+1) | . | 1 | 0.006767 | 4.141 | 0.0462 | |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | X6=(LOG(toct/Pa))^2 | . | 1 | 0.002958 | 1.743 | 0.1917 | |

Step History

| Step | Parameter | Action | "Sig Prob" | Seq SS | RSquare | Cp | p |
|------|--------------|---------|------------|----------|---------|--------|---|
| 1 | X2=LOG(q/Pa) | Entered | 0.0000 | 2.154889 | 0.9529 | 2.9963 | 2 |

Figura 47: Salida luego de realizar la regresión por pasos del material **M1** con el **óptimo**.

El modelo de módulo resiliente para el material **M1** queda:

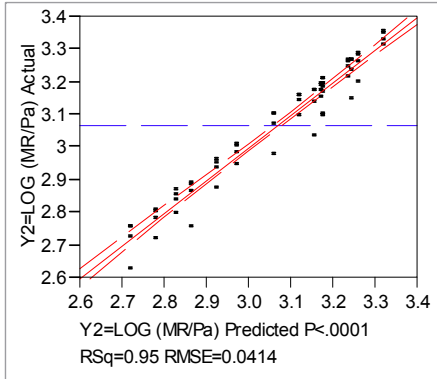
$$MR = 556,642164297 \cdot Pa \cdot \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,6566123}$$

Response Y2=LOG (MR/Pa)

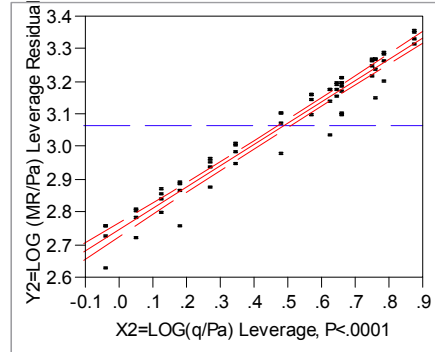
Whole Model

X2=LOG(q/Pa)

Actual by Predicted Plot



Leverage Plot



Summary of Fit

| | |
|----------------------------|----------|
| RSquare | 0.952921 |
| RSquare Adj | 0.952161 |
| Root Mean Square Error | 0.041439 |
| Mean of Response | 3.064822 |
| Observations (or Sum Wgts) | 64 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Ratio |
|----------|----|----------------|-------------|----------|
| Model | 1 | 2.1548887 | 2.15489 | 1254.922 |
| Error | 62 | 0.1064633 | 0.00172 | Prob > F |
| C. Total | 63 | 2.2613520 | | <.0001 |

Parameter Estimates

| Term | Estimate | Std Error | t Ratio | Prob> t |
|--------------|-----------|-----------|---------|---------|
| Intercept | 2.7455761 | 0.010394 | 264.14 | <.0001 |
| X2=LOG(q/Pa) | 0.6566123 | 0.018535 | 35.42 | <.0001 |

Effect Tests

| Source | Nparm | DF | Sum of Squares | F Ratio | Prob > F |
|--------------|-------|----|----------------|----------|----------|
| X2=LOG(q/Pa) | 1 | 1 | 2.1548887 | 1254.922 | <.0001 |

Residual by Predicted Plot

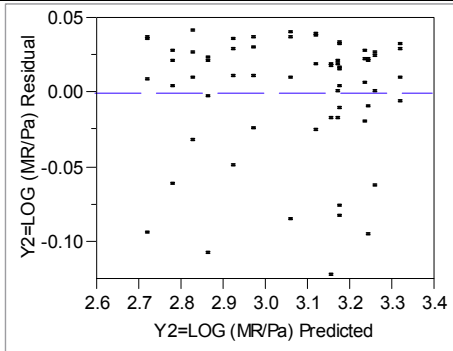


Figura 48: Resultados de la regresión lineal para el material **M1** con el óptimo.

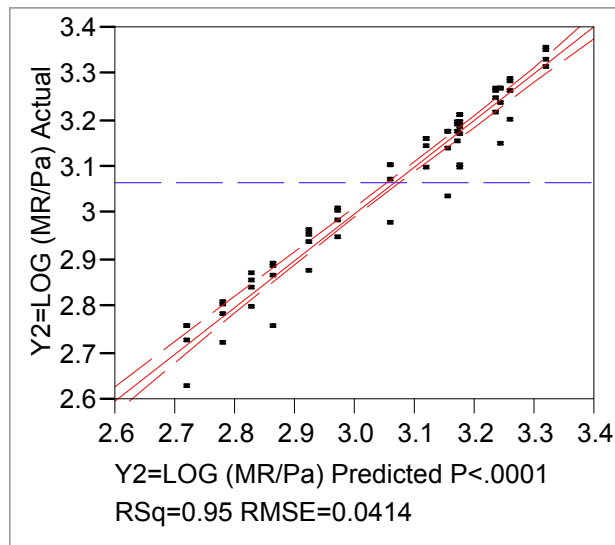


Figura 49: Gráfico de módulo real contra el predicho para el material **M1 con el óptimo.**

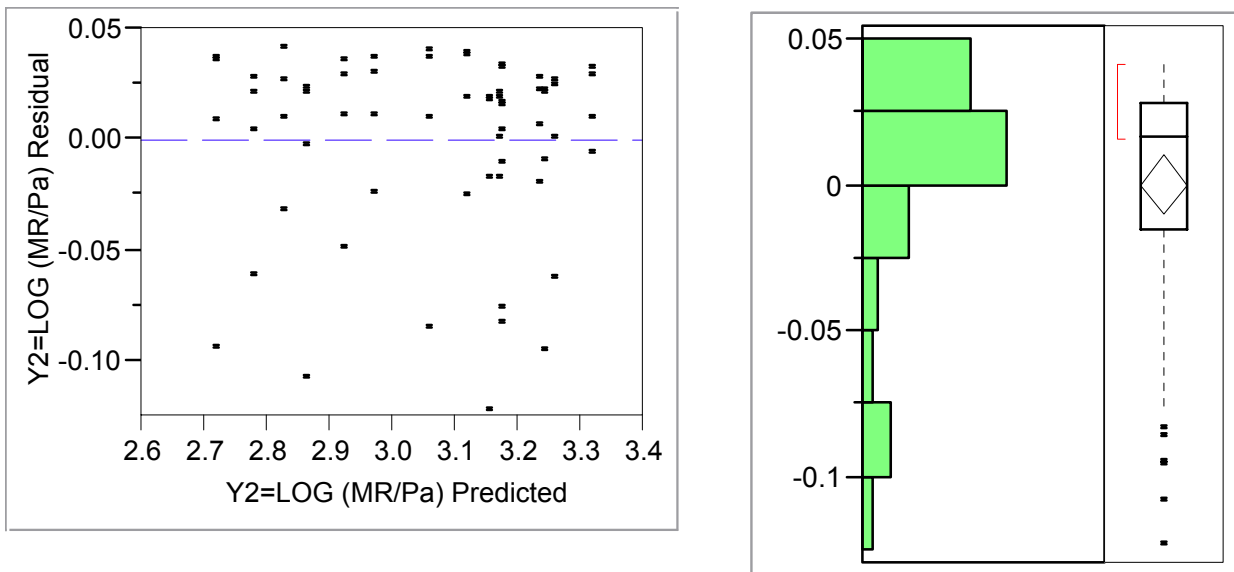


Figura 50: Gráfico de residuales y su distribución para el material **M1 con el óptimo.**

7.3 Regresión lineal múltiple para los datos del material M2

7.3.1. Agua al cálculo

Para el análisis estadístico en el programa JMP, se consideraron las mismas variables. Ver la **Tabla 64.**

Primero se hizo el análisis de regresión por pasos hacia delante para escoger el modelo de predicción con las variables más significativas. La evaluación se hizo basados en los criterios descritos con anterioridad: el Cp de Mallows, MS_E , R^2 y AIC.

Según los datos anteriores las variables más significativas son X2 y X5 que forman la ecuación constitutiva universal (Ver Figura 51). Por lo que el modelo de regresión sería:

$$Y1 = \beta_0 + \beta_1 X2 + \beta_5 X5$$

donde

$$\beta_0 = \log k_1$$

$$\beta_1 = k_2$$

$$\beta_5 = k_3$$

El modelo de regresión lineal que queda para un $R^2_{ajustado} = 0,817952$:

$$Y1 = 2,9483322 + 0,4469284 \times X2 - 0,4242848 \times X5$$

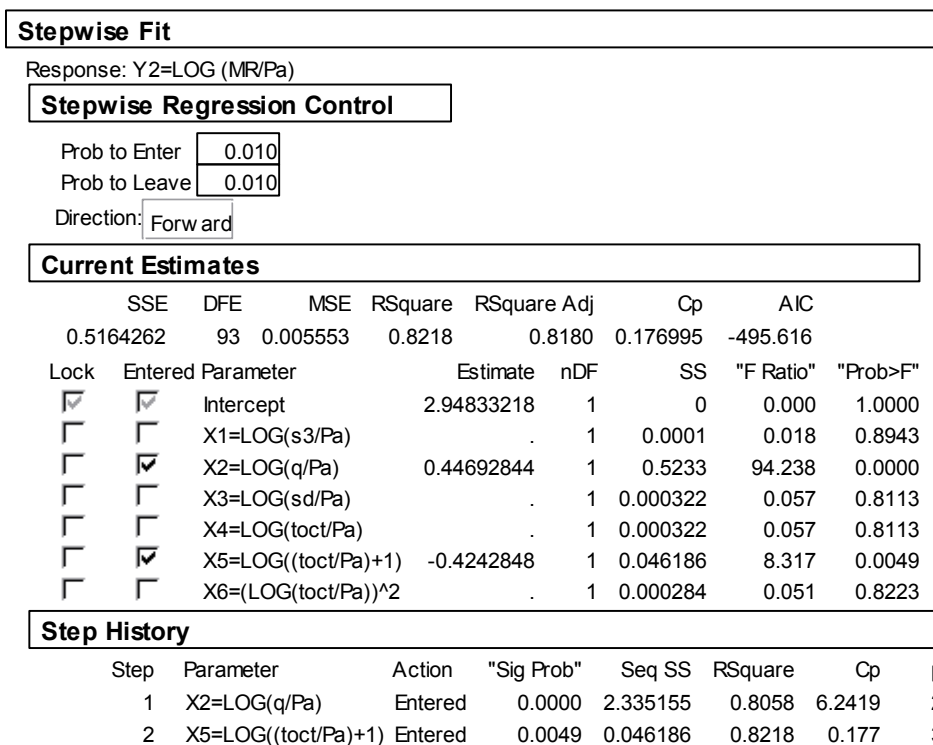


Figura 51: Segunda salida luego de realizar la regresión por pasos del material M2 agua al cálculo.

El modelo universal constitutivo de módulo resiliente para el material **M2** queda:

$$MR = 887,8348739 \cdot Pa \cdot \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,4469284} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-0,4242848}$$

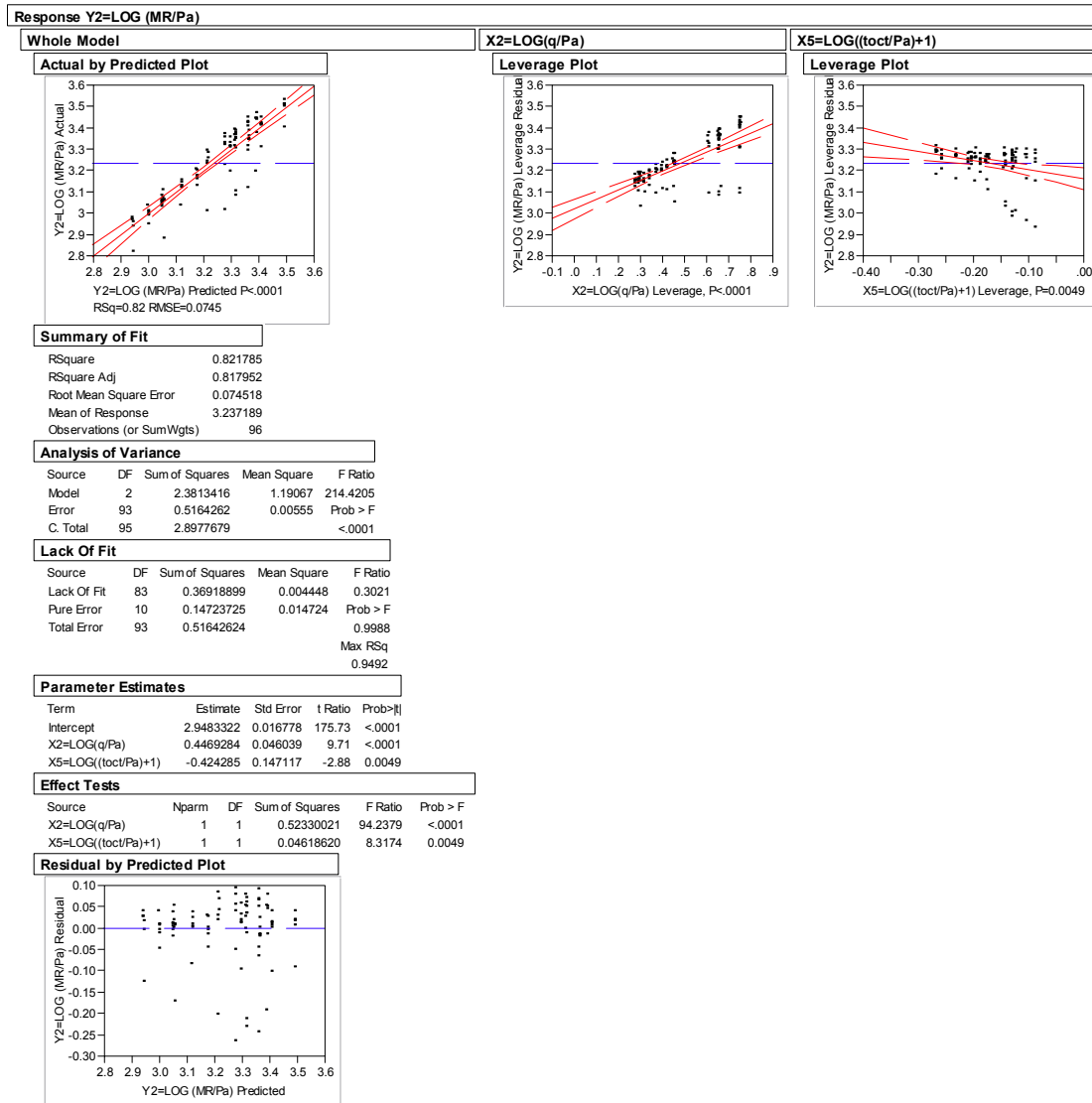


Figura 52: Resultados de la regresión lineal para el material **M2** agua al cálculo.

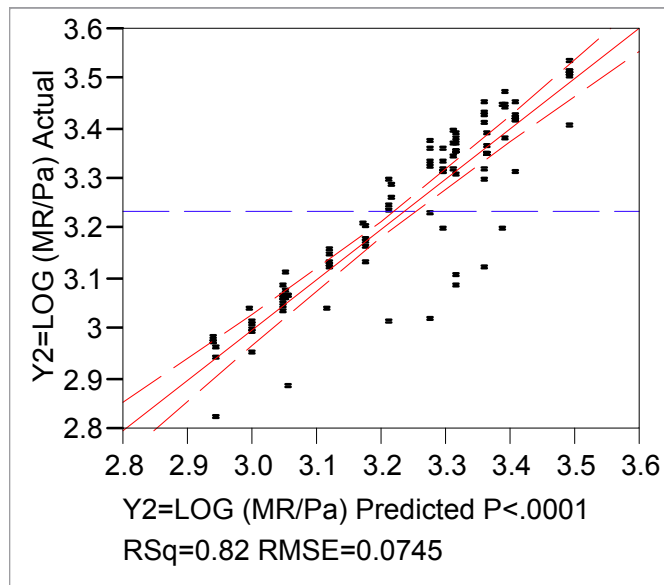


Figura 53: Gráfico de módulo real contra el predicho para el material **M2 agua al cálculo.**

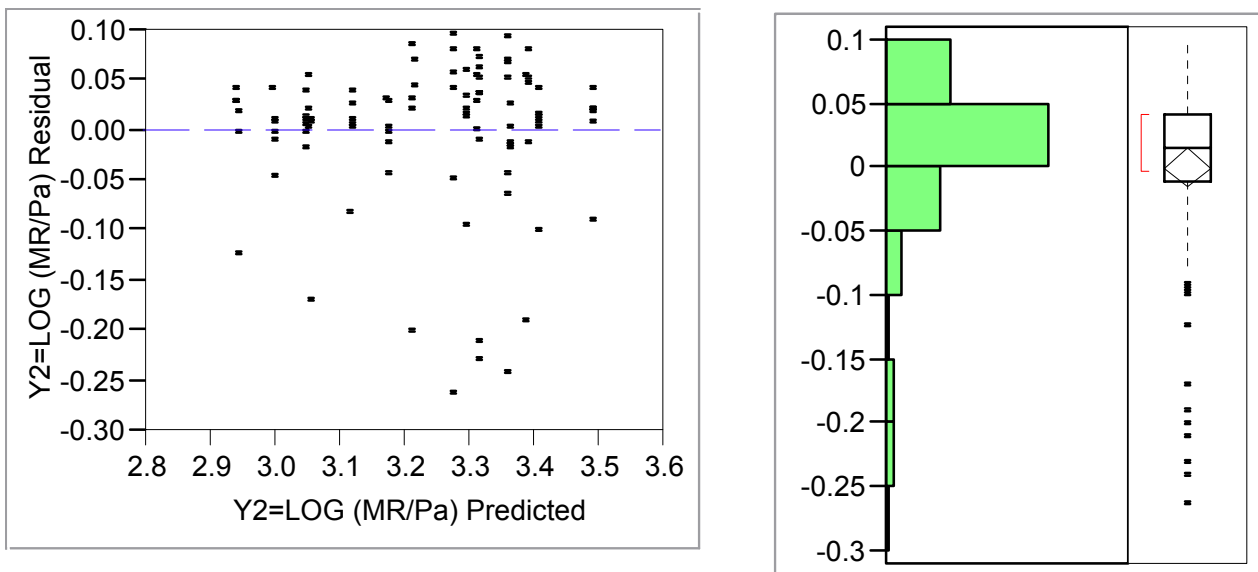


Figura 54: Gráfico de residuales y su distribución para el material **M2 agua al cálculo.**

7.3.2 Agua al óptimo

El análisis estadístico, la variable más significativa es X2 que forma el primer término de la ecuación constitutiva universal (Ver Figura 55). Por lo que el modelo de regresión sería:

$$Y1 = \beta_0 + \beta_1 X2$$

donde

$$\beta_0 = \log k_1$$

$$\beta_1 = k_2$$

El modelo de regresión lineal que queda para un $R^2_{ajustado} = 0,975011$:

$$Y_1 = 2,8633186 + 0,6073287 \times X_2$$

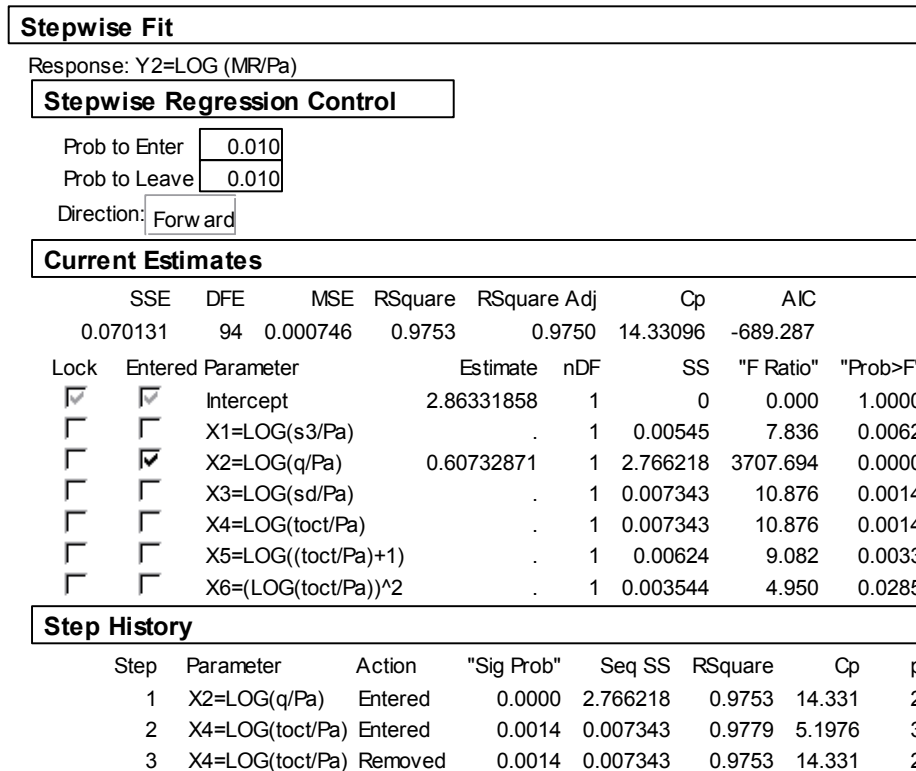


Figura 55: Salida luego de realizar la regresión por pasos del material **M2** con el **óptimo**.

El modelo universal constitutivo de módulo resiliente para el material **M2** queda:

$$MR = 729,992839254 \cdot Pa \cdot \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,6073287}$$

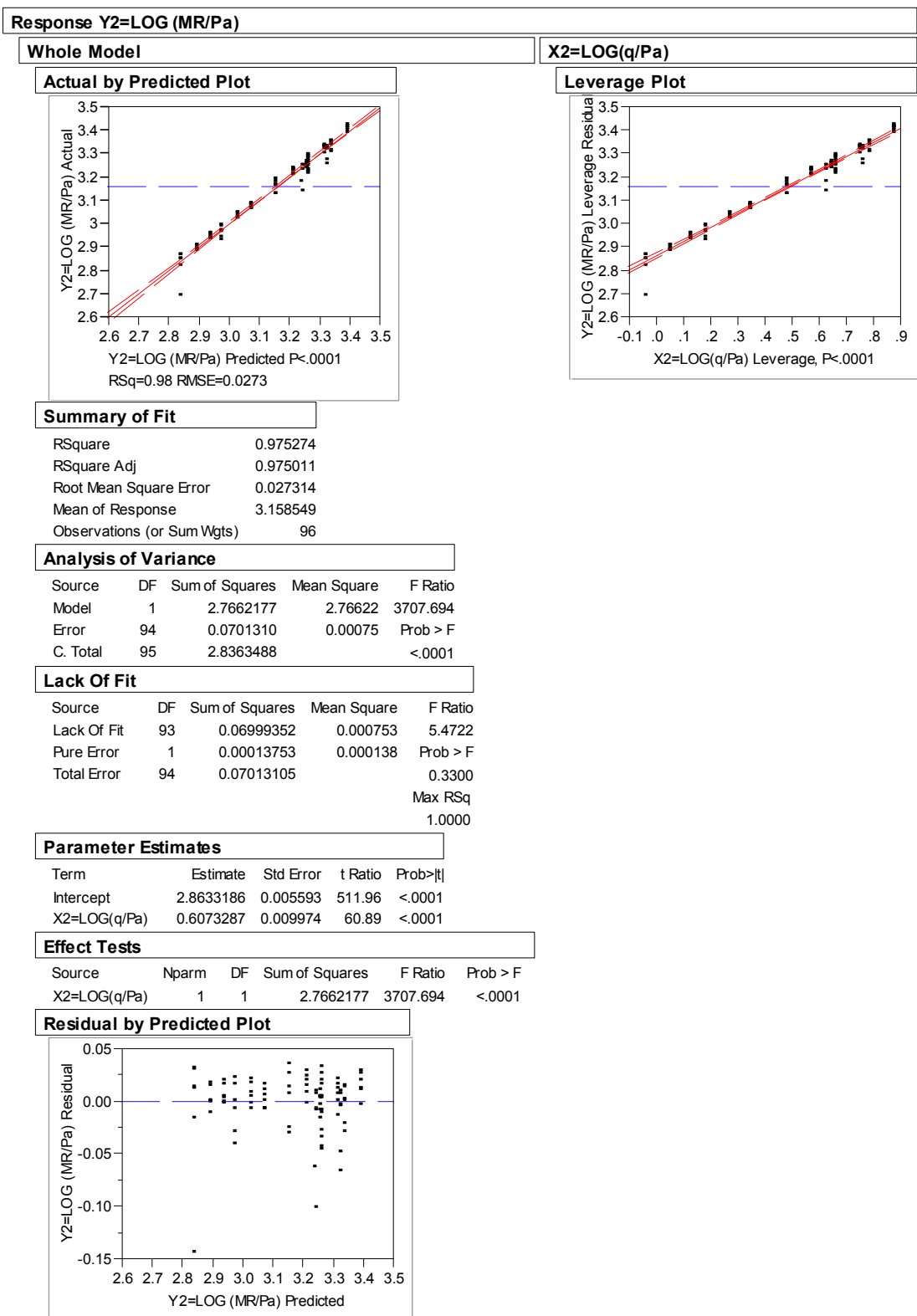


Figura 56: Resultados de la regresión lineal para el material **M2** con el óptimo.

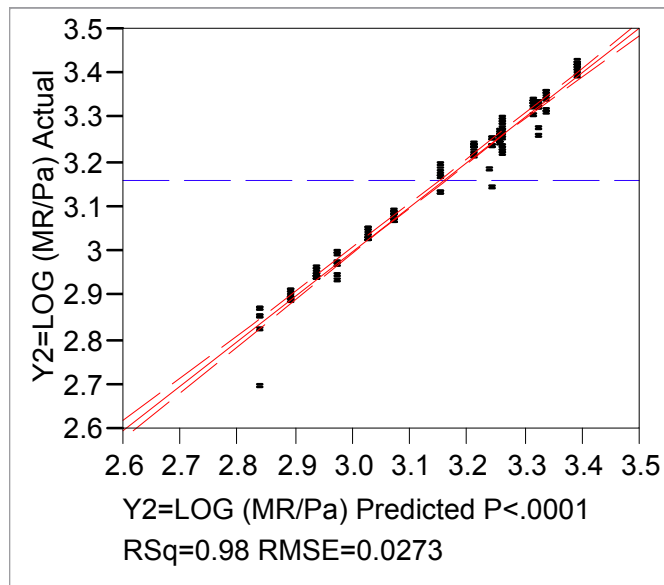


Figura 57: Gráfico de módulo real contra el predicho para el material **M2 con el óptimo.**

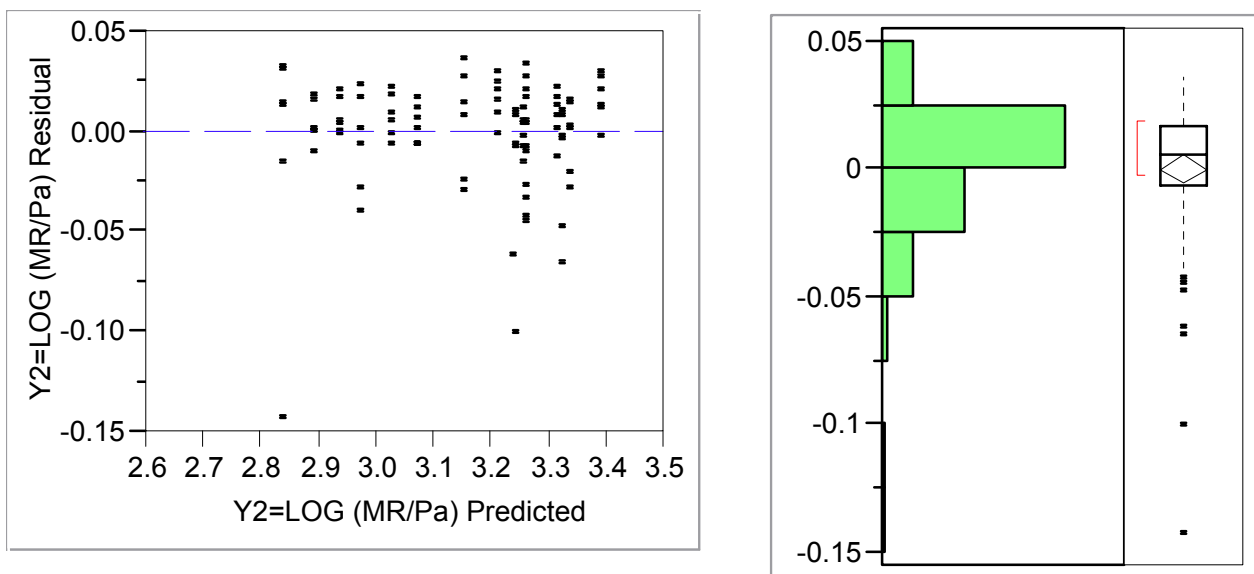


Figura 58: Gráfico de residuales y su distribución para el material **M2 con el óptimo.**

7.4 Regresión lineal múltiple para los datos del material M3

7.4.1. Agua al cálculo

Para el análisis estadístico en el programa JMP, se consideraron las mismas variables. Ver la **Tabla 64.**

Primero se hizo el análisis de regresión por pasos hacia delante para escoger el modelo de predicción con las variables más significativas. La evaluación se hizo basados en los criterios descritos con anterioridad: el Cp de Mallows, MS_E , R^2 y AIC.

Según los datos anteriores las variables más significativas son X2 y X5 que forman la ecuación constitutiva universal (Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Por lo que el modelo de regresión sería:

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 X_2 + \beta_5 X_5$$

donde

$$\beta_0 = \log k_1$$

$$\beta_1 = k_2$$

$$\beta_5 = k_3$$

El modelo de regresión lineal que queda para un $R^2_{ajustado} = 0,866519$:

$$Y_1 = 3,04879484 + 0,44049634 \times X_2 - 0,3111992 \times X_5$$

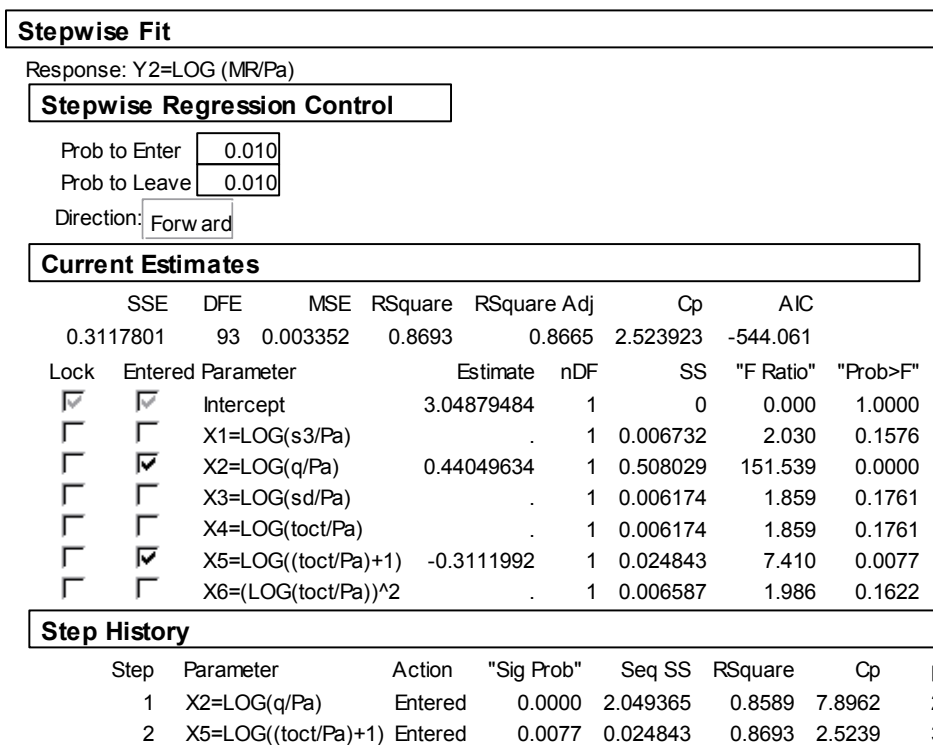


Figura 59: Segunda salida luego de realizar la regresión por pasos del material M3

agua al cálculo.

El modelo universal constitutivo de módulo resiliente para el material **M3** queda:

$$MR = 1118,9090847 \cdot Pa \cdot \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,44049634} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-0,3111992}$$

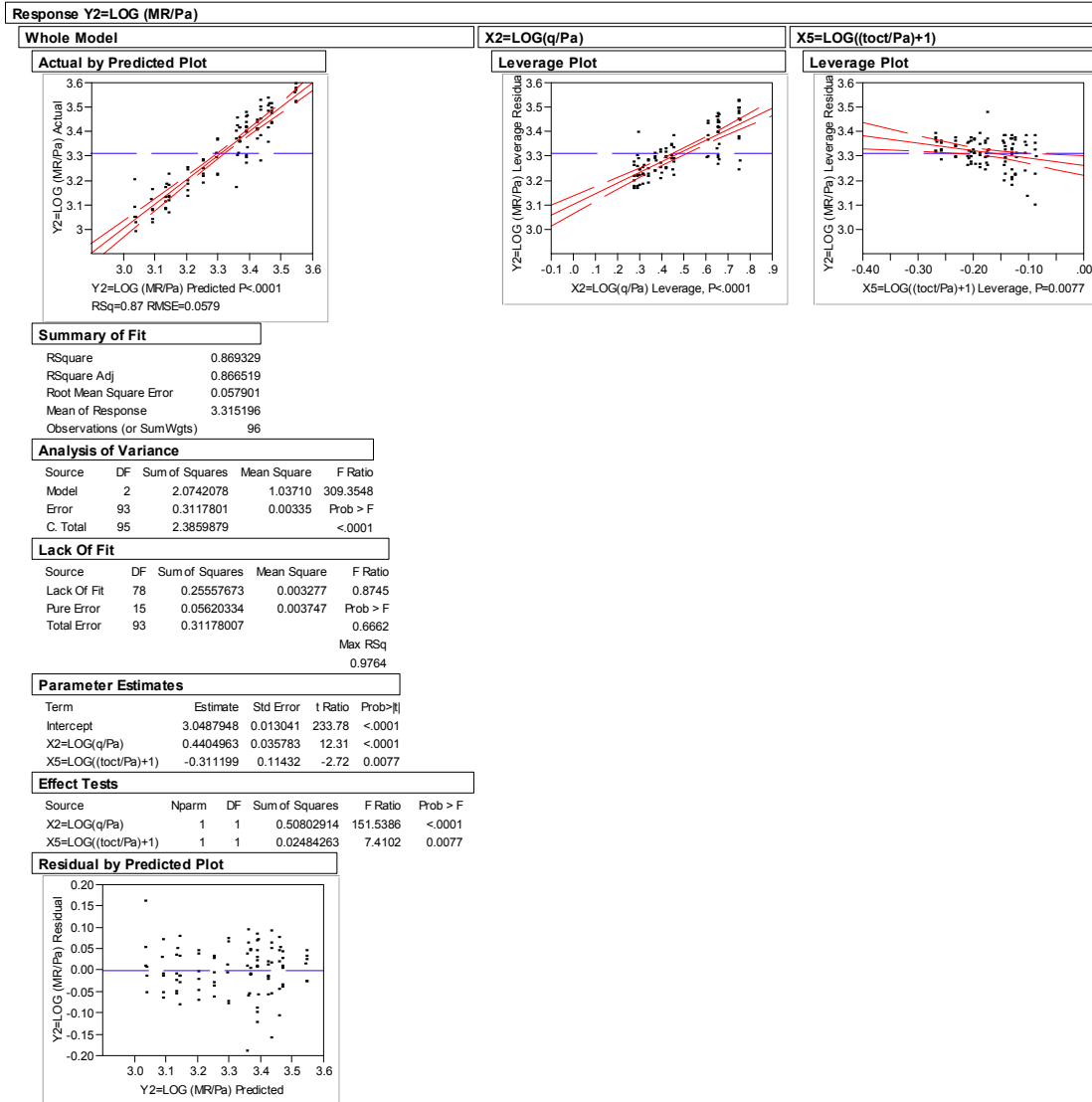


Figura 60: Resultados de la regresión lineal para el material **M3** agua al cálculo.

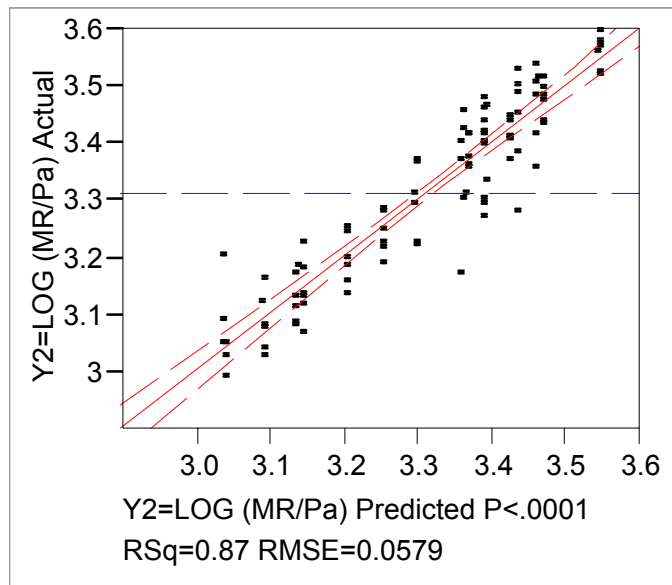


Figura 61: Gráfico de módulo real contra el predicho para el material **M3 agua al cálculo.**

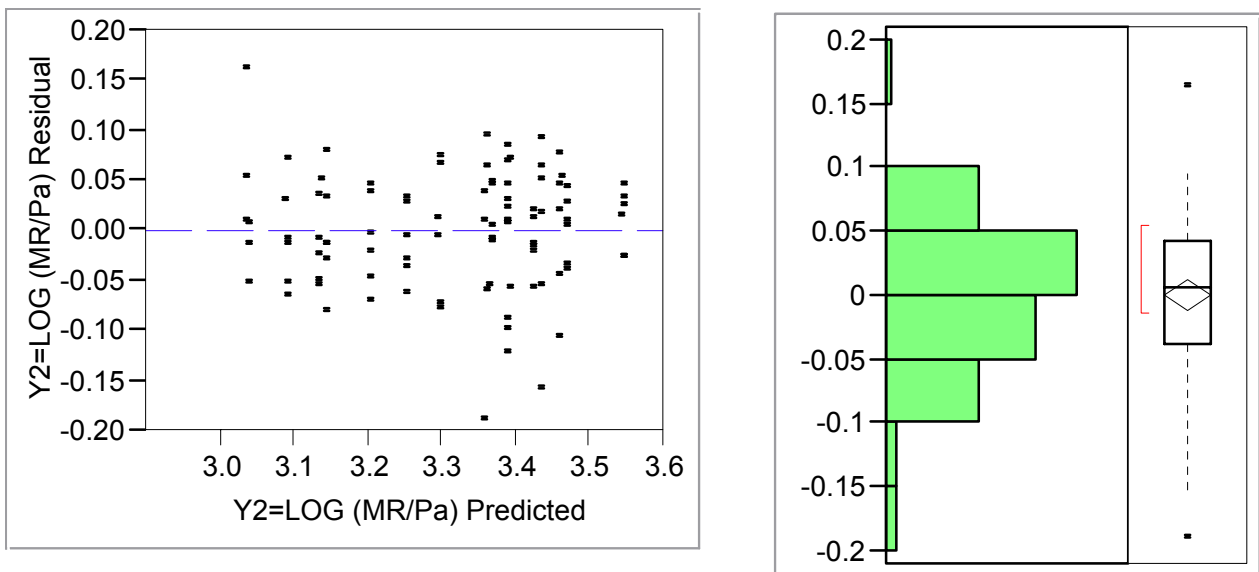


Figura 62: Gráfico de residuales y su distribución para el material **M3 agua al cálculo.**

7.4.2 Agua al óptimo

El análisis estadístico, la variable más significativa es X2 que forma el primer término de la ecuación constitutiva universal (Ver **Figura 63**). Por lo que el modelo de regresión sería:

$$Y1 = \beta_0 + \beta_1 X2$$

donde

$$\beta_0 = \log k_1$$

$$\beta_1 = k_2$$

El modelo de regresión lineal que queda para un $R^2_{ajustado} = 0,973659$:

$$Y_1 = 2,92417493 + 0,59916491 \times X_2$$

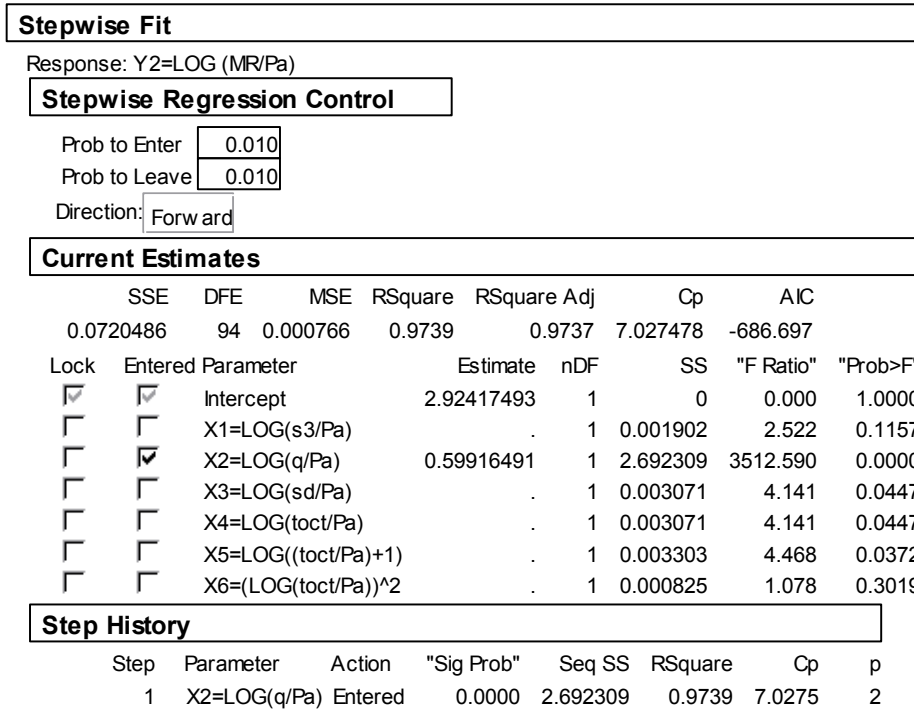


Figura 63: Salida luego de realizar la regresión por pasos del material **M3** con el **óptimo**.

El modelo universal constitutivo de módulo resiliente para el material **M3** queda:

$$MR = 839,79818173 \cdot Pa \cdot \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,59916491}$$

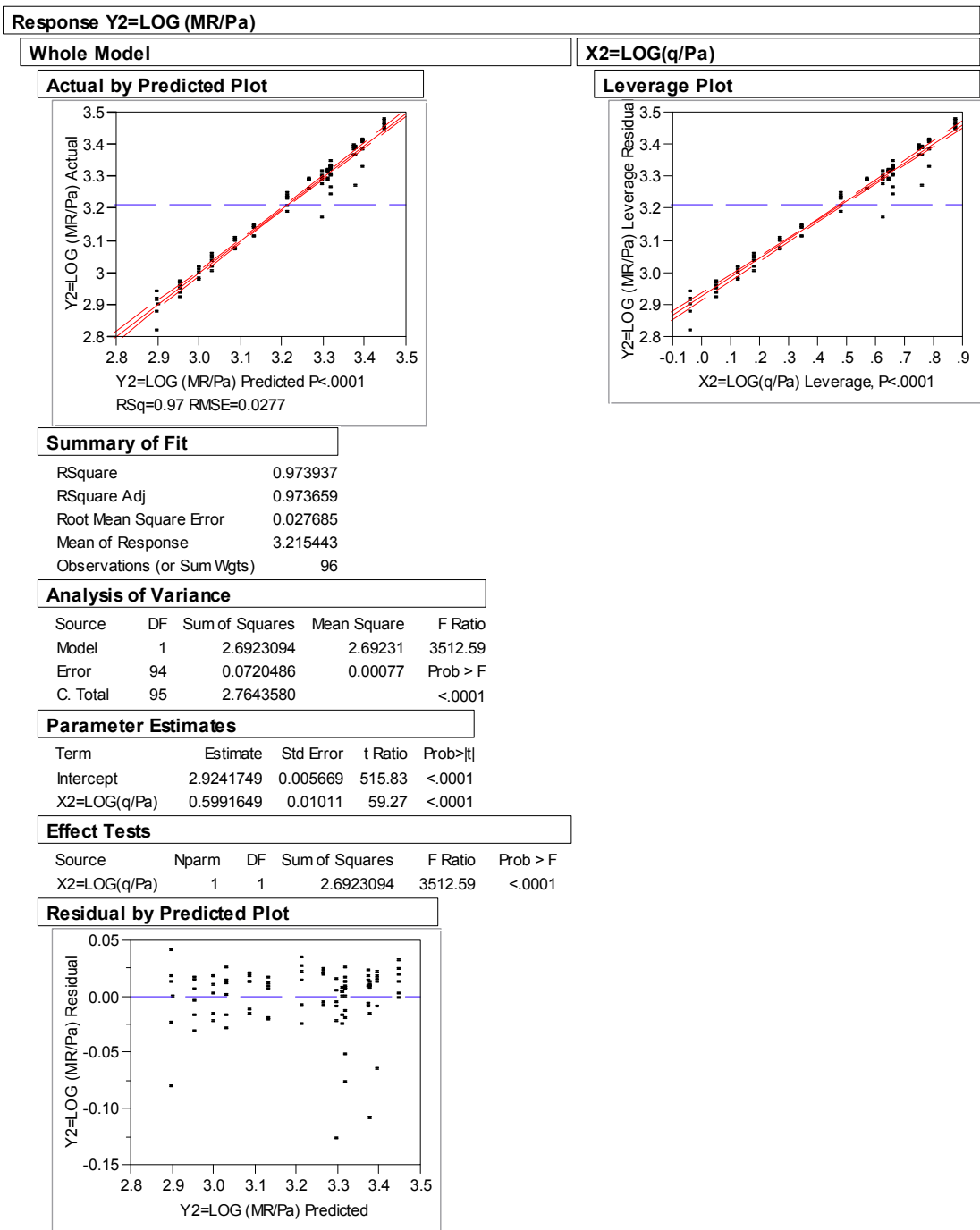


Figura 64: Resultados de la regresión lineal para el material **M3** con el **óptimo**.

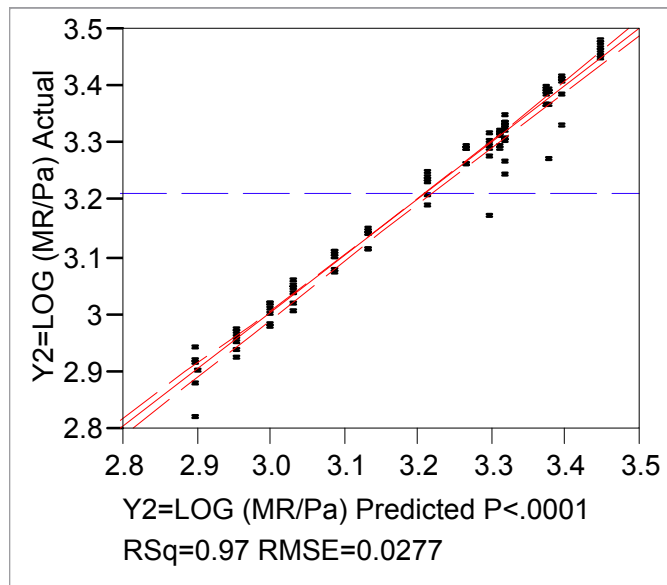


Figura 65: Gráfico de módulo real contra el predicho para el material **M3 con el óptimo.**

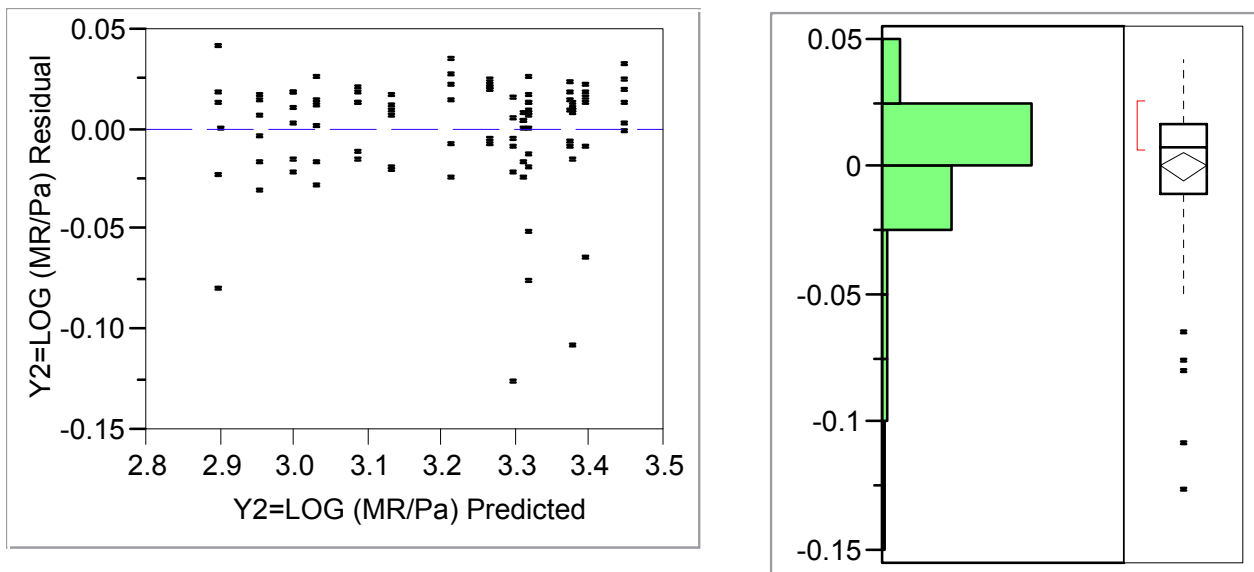


Figura 66: Gráfico de residuales y su distribución para el material **M3 con el óptimo.**

7.5 Regresión lineal múltiple para los datos del material M4

7.5.1. Agua al cálculo

Para el análisis estadístico en el programa JMP, se consideraron las mismas variables. Ver la **Tabla 64.**

Primero se hizo el análisis de regresión por pasos hacia delante para escoger el modelo de predicción con las variables más significativas. La evaluación se hizo basados en los criterios descritos con anterioridad: el Cp de Mallows, MS_E , R^2 y AIC.

Según los datos anteriores las variables más significativas son X2 y X5 que forman la ecuación constitutiva universal (Ver **Figura 67**). Por lo que el modelo de regresión sería:

$$Y1 = \beta_0 + \beta_1 X2 + \beta_5 X5$$

donde

$$\beta_0 = \log k_1$$

$$\beta_1 = k_2$$

$$\beta_5 = k_3$$

El modelo de regresión lineal que queda para un $R^2_{ajustado} = 0,931125$:

$$Y1 = 3,09027987 + 0,46082271X2 - 0,2376733X5$$

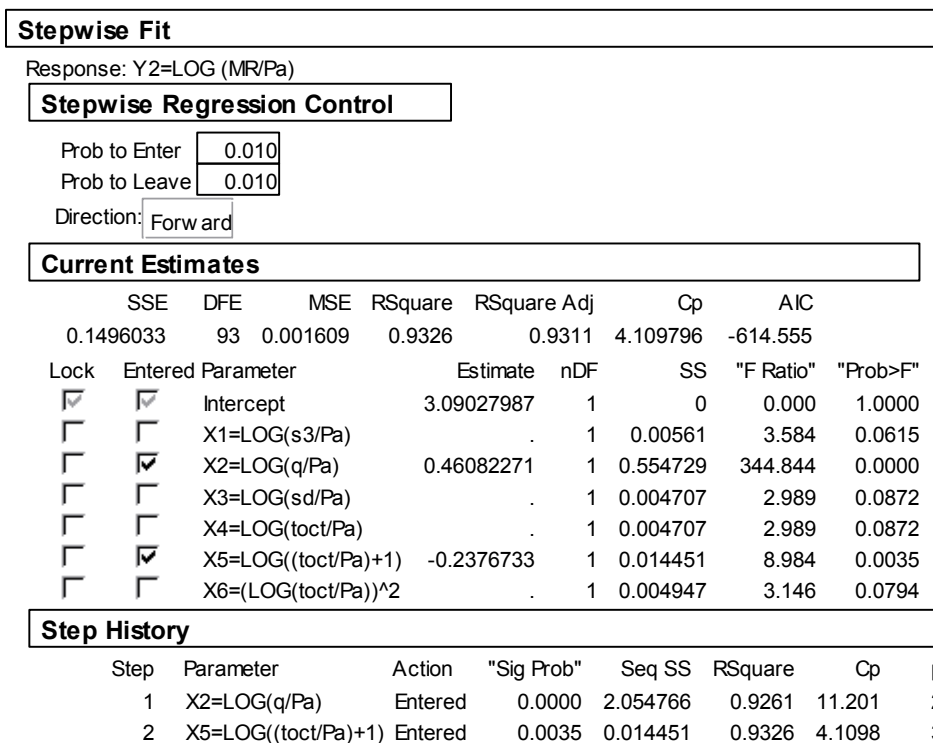


Figura 67: Segunda salida luego de realizar la regresión por pasos del material **M4** agua al cálculo.

El modelo universal constitutivo de módulo resiliente para el material **M4** queda:

$$MR = 1231,0619267 \cdot Pa \cdot \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,46082271} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-0,2376733}$$

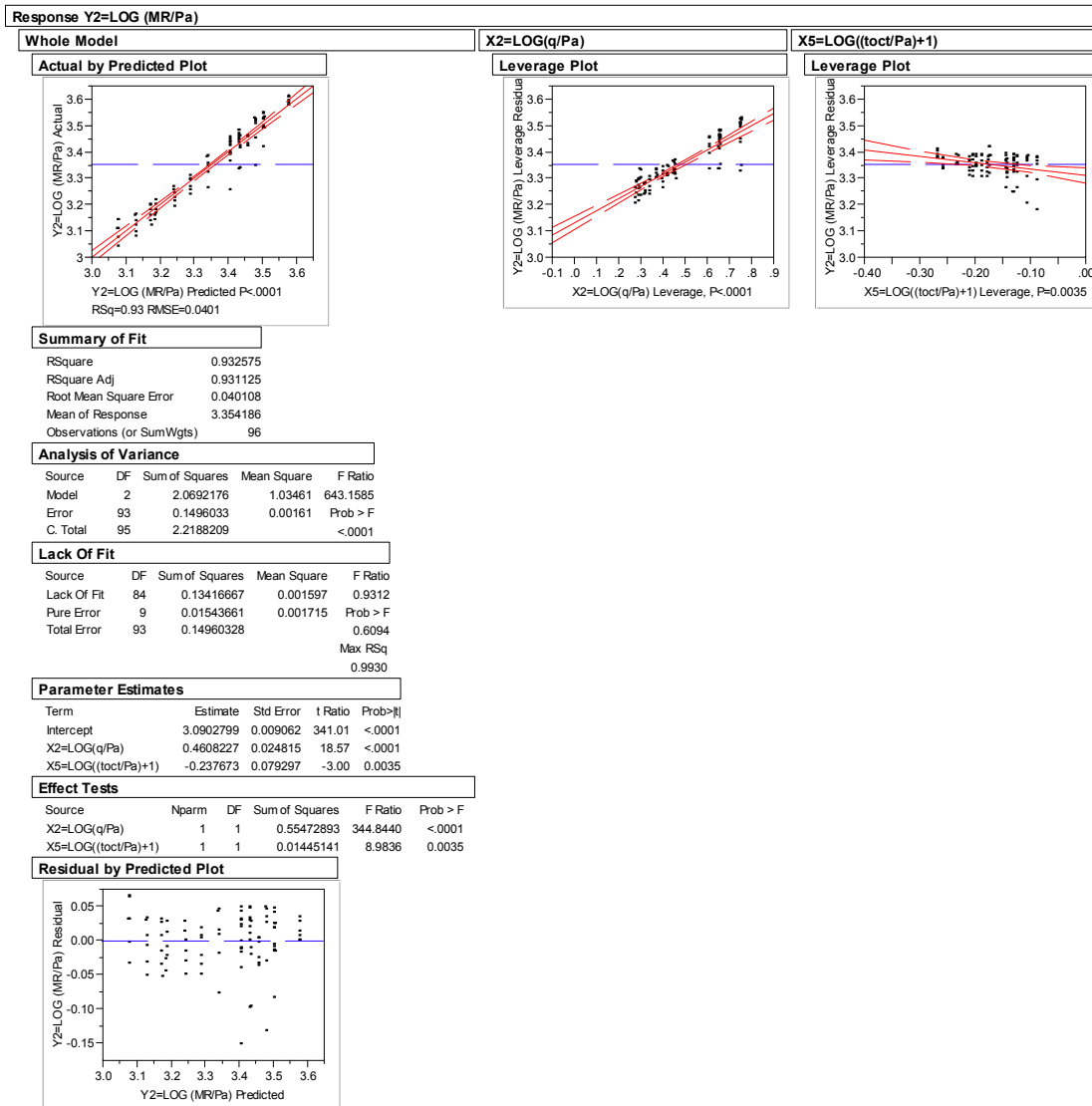


Figura 68: Resultados de la regresión lineal para el material **M4** agua al cálculo.

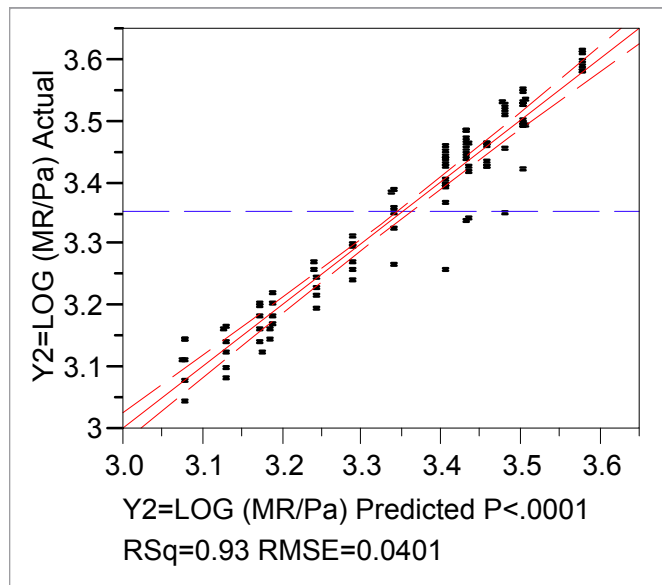


Figura 69: Gráfico de módulo real contra el predicho para el material **M4 agua al cálculo**.

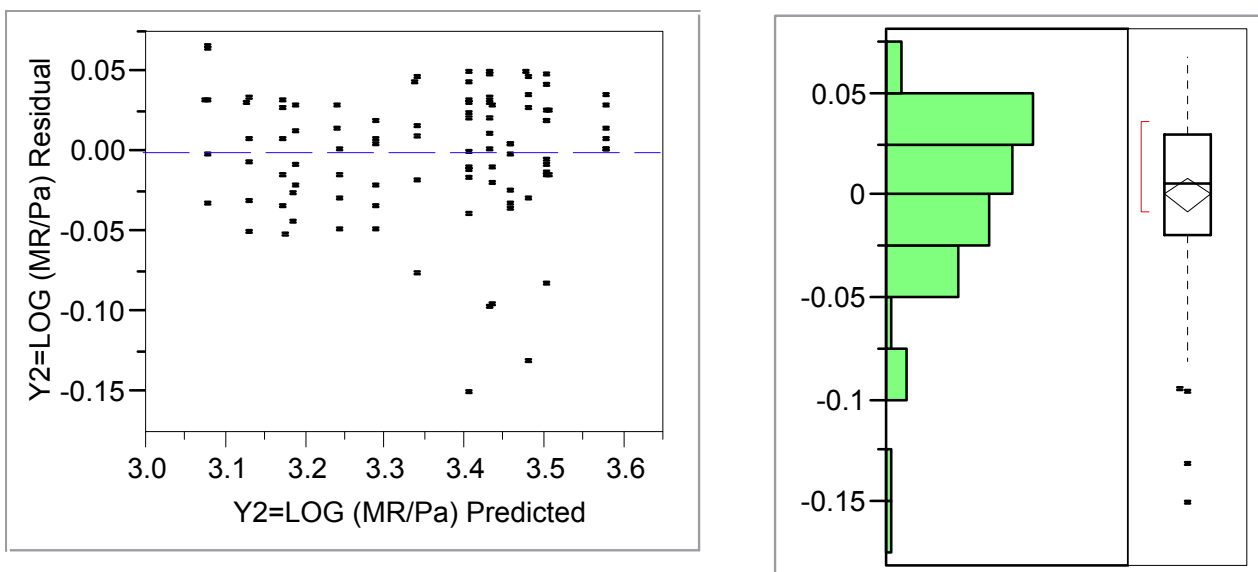


Figura 70: Gráfico de residuales y su distribución para el material **M4 agua al cálculo**.

7.5.2 Agua al óptimo

El análisis estadístico, la variable más significativa es X2 que forma el primer término de la ecuación constitutiva universal (Ver **Figura 71**). Por lo que el modelo de regresión sería:

$$Y1 = \beta_0 + \beta_1 X2$$

donde

$$\beta_0 = \log k_1$$

$$\beta_1 = k_2$$

El modelo de regresión lineal que queda para un $R^2_{ajustado} = 0,962796$:

$$Y_1 = 2,91059907 + 0,58333157 \times X_2$$

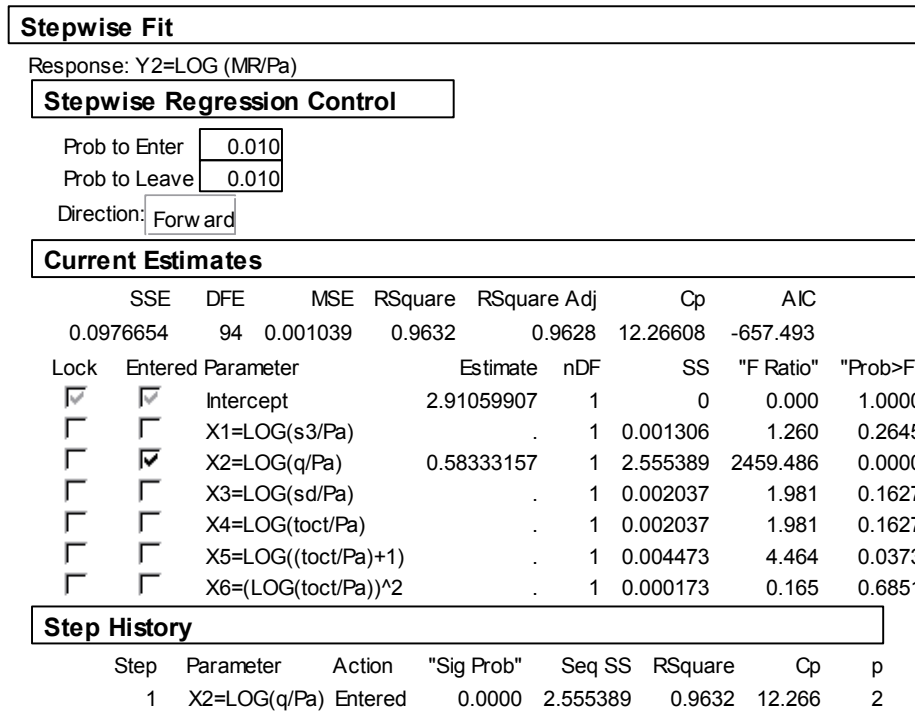


Figura 71: Salida luego de realizar la regresión por pasos del material **M4** con el **óptimo**.

El modelo universal constitutivo de módulo resiliente para el material **M4** queda:

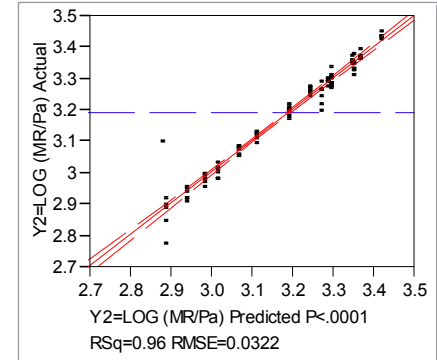
$$MR = 813,952516094 \cdot Pa \cdot \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,58333157}$$

Response Y2=LOG (MR/Pa)

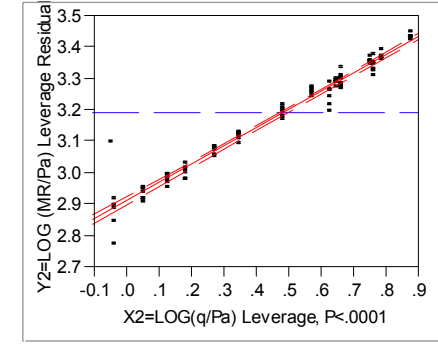
Whole Model

X2=LOG(q/Pa)

Actual by Predicted Plot



Leverage Plot



Summary of Fit

| | |
|----------------------------|----------|
| RSquare | 0.963188 |
| RSquare Adj | 0.962796 |
| Root Mean Square Error | 0.032233 |
| Mean of Response | 3.194114 |
| Observations (or Sum Wgts) | 96 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Ratio |
|----------|----|----------------|-------------|----------|
| Model | 1 | 2.5553890 | 2.55539 | 2459.486 |
| Error | 94 | 0.0976654 | 0.00104 | Prob > F |
| C. Total | 95 | 2.6530543 | | <.0001 |

Lack Of Fit

| Source | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Ratio |
|-------------|----|----------------|-------------|----------|
| Lack Of Fit | 93 | 0.09719144 | 0.001045 | 2.2052 |
| Pure Error | 1 | 0.00047392 | 0.000474 | Prob > F |
| Total Error | 94 | 0.09766535 | | 0.4976 |
| | | | | Max RSq |
| | | | | 0.9998 |

Parameter Estimates

| Term | Estimate | Std Error | t Ratio | Prob> t |
|--------------|-----------|-----------|---------|---------|
| Intercept | 2.9105991 | 0.006596 | 441.28 | <.0001 |
| X2=LOG(q/Pa) | 0.5833316 | 0.011762 | 49.59 | <.0001 |

Effect Tests

| Source | Nparm | DF | Sum of Squares | F Ratio | Prob > F |
|--------------|-------|----|----------------|----------|----------|
| X2=LOG(q/Pa) | 1 | 1 | 2.5553890 | 2459.486 | <.0001 |

Residual by Predicted Plot

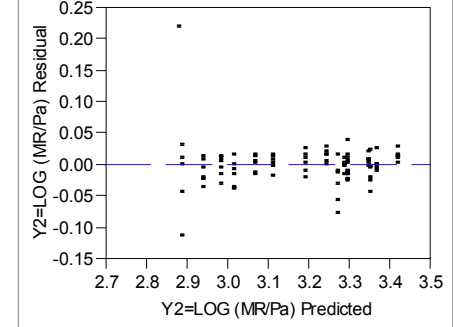


Figura 72: Resultados de la regresión lineal para el material **M4** con el óptimo.

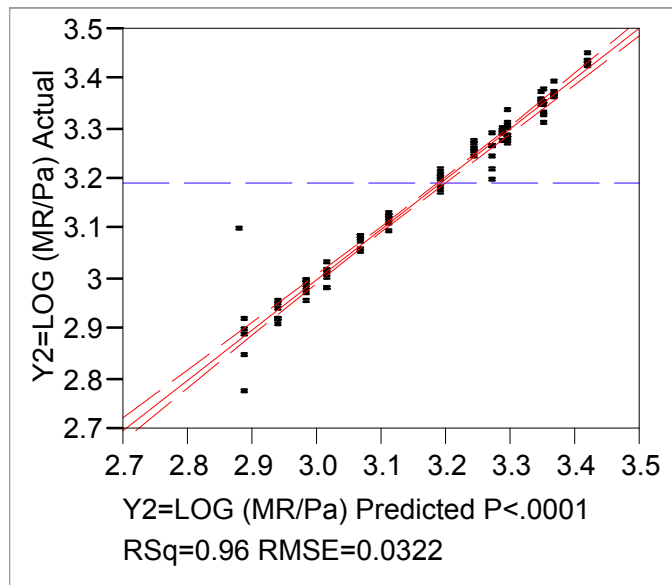


Figura 73: Gráfico de módulo real contra el predicho para el material **M4 con el óptimo.**

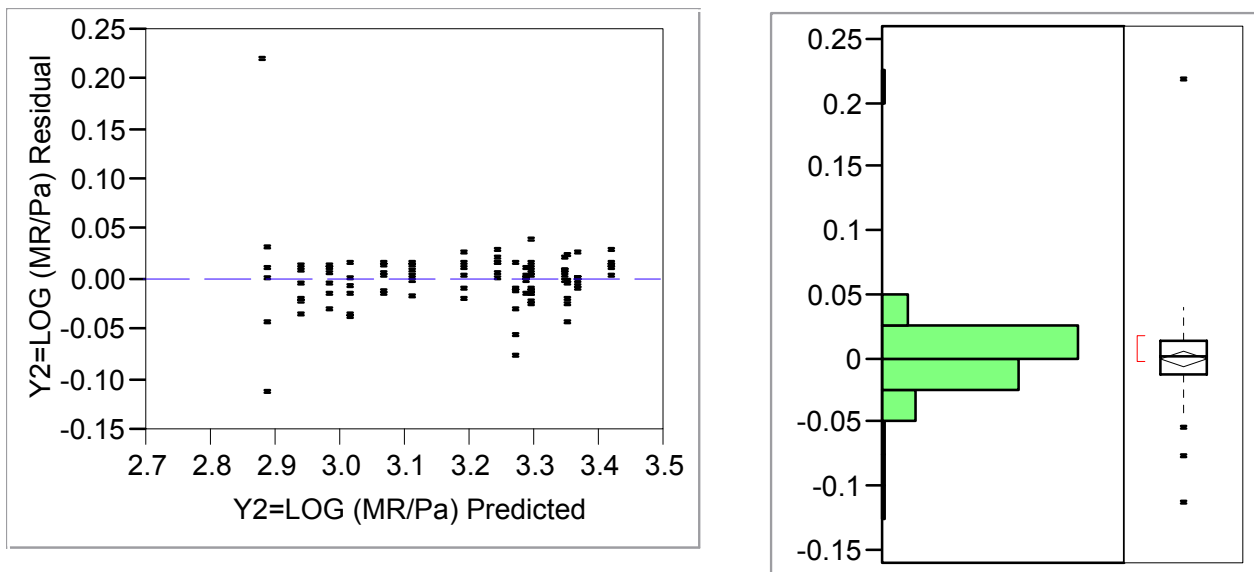


Figura 74: Gráfico de residuales y su distribución para el material **M4 con el óptimo.**

7.6 Regresión lineal múltiple para los datos del material M5

7.6.1. Agua al cálculo

Para el análisis estadístico en el programa JMP, se consideraron las mismas variables. Ver la **Tabla 64.**

Primero se hizo el análisis de regresión por pasos hacia delante para escoger el modelo de predicción con las variables más significativas. La evaluación se hizo basados en los criterios descritos con anterioridad: el Cp de Mallows, MS_E , R^2 y AIC.

Según los datos anteriores las variables más significativas son X2 y X5 que forman la ecuación constitutiva universal (Ver **Figura 75**). Por lo que el modelo de regresión sería:

$$Y1 = \beta_0 + \beta_1 X2 + \beta_5 X5$$

donde

$$\beta_0 = \log k_1$$

$$\beta_1 = k_2$$

$$\beta_5 = k_3$$

El modelo de regresión lineal que queda para un $R^2_{ajustado} = 0,978496$:

$$Y1 = 3,06251436 + 0,53916931X2 - 0,1876631X5$$

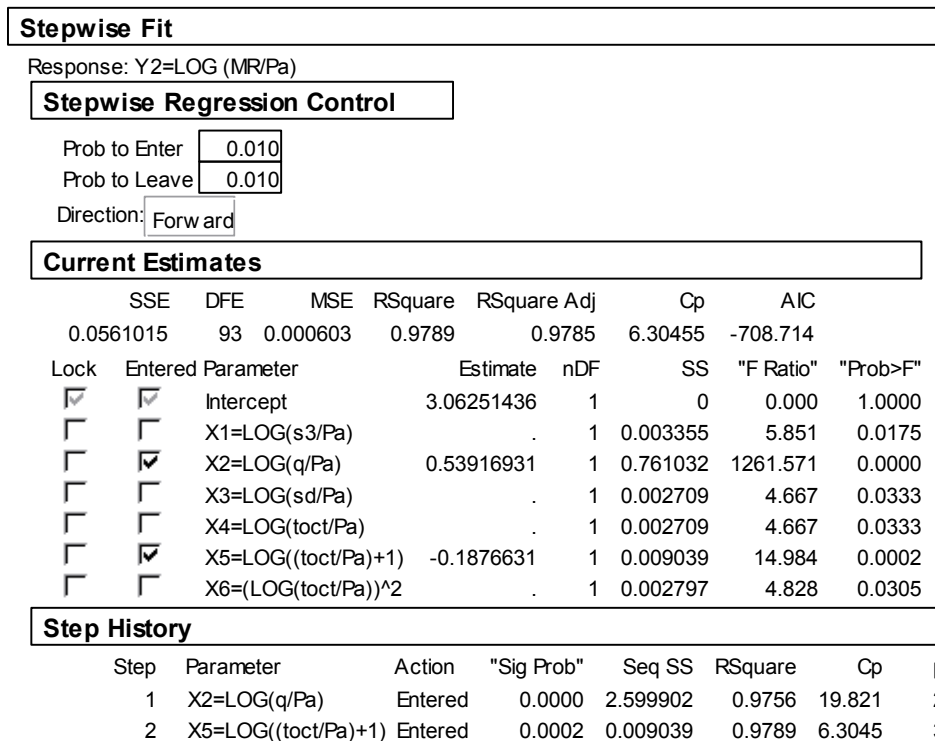


Figura 75: Segunda salida luego de realizar la regresión por pasos del material **M5** agua al cálculo.

El modelo universal constitutivo de módulo resiliente para el material **M5** queda:

$$MR = 1154,8202747 \cdot Pa \cdot \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,53916931} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{-0,1876631}$$

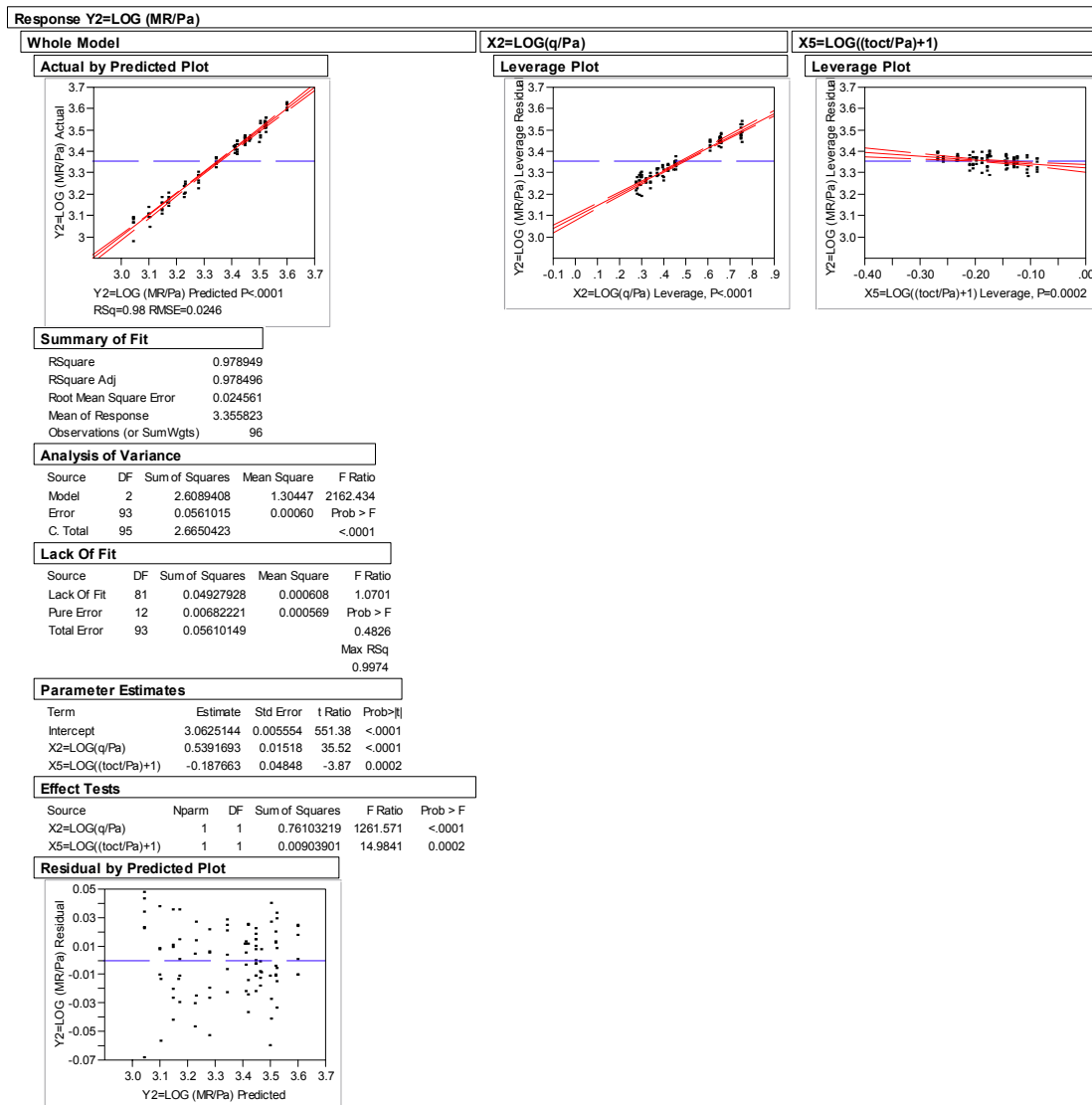


Figura 76: Resultados de la regresión lineal para el material **M5** agua al cálculo.

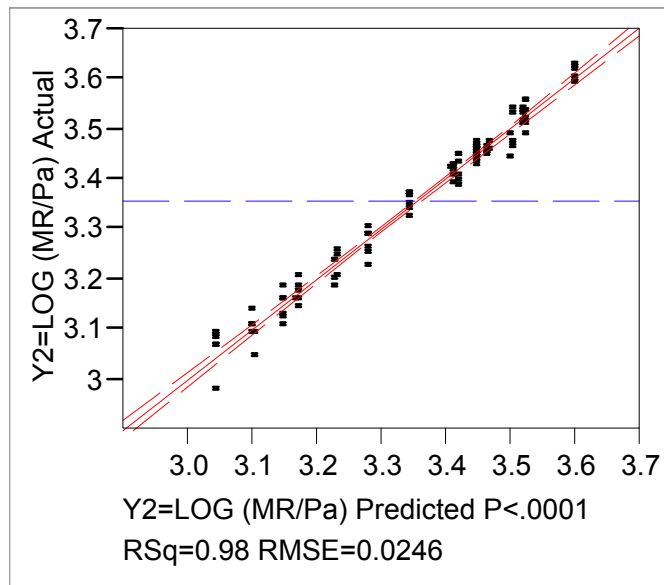


Figura 77: Gráfico de módulo real contra el predicho para el material **M5 agua al cálculo.**

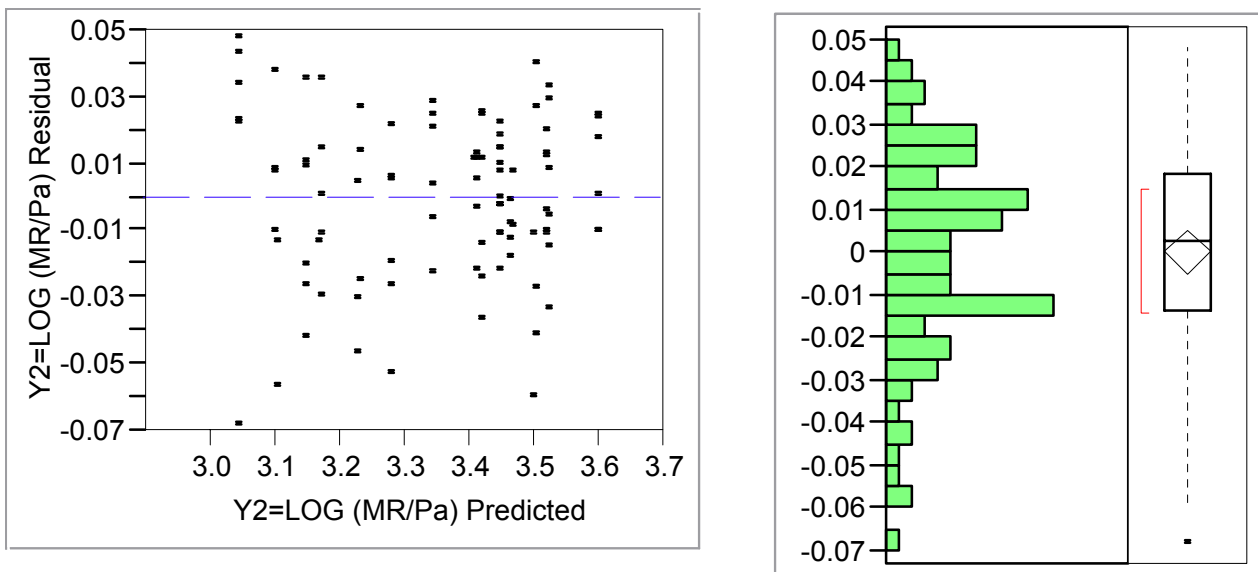


Figura 78: Gráfico de residuales y su distribución para el material **M5 agua al cálculo.**

7.6.2 Agua al óptimo

El análisis estadístico, la variable más significativa es X2 que forma el primer término de la ecuación constitutiva universal (Ver). Por lo que el modelo de regresión sería:

$$Y1 = \beta_0 + \beta_1 X2$$

donde

$$\beta_0 = \log k_1$$

$$\beta_1 = k_2$$

El modelo de regresión lineal que queda para un $R^2_{ajustado} = 0,981958$:

$$Y_1 = 2,94294984 + 0,58121113 \times X_2$$

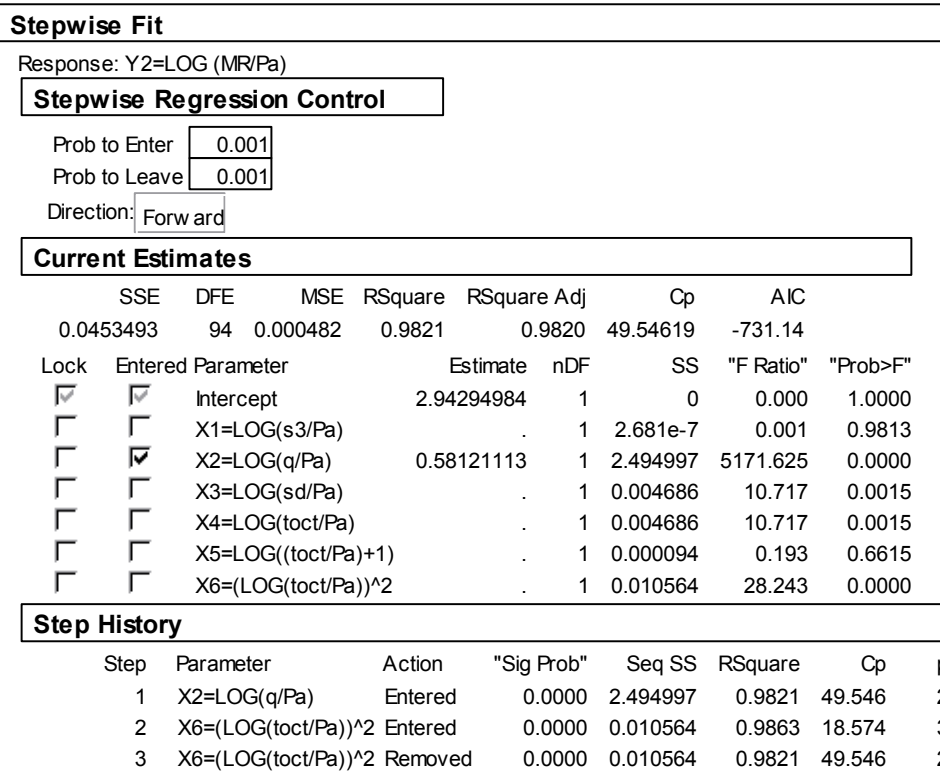


Figura 79: Salida luego de realizar la regresión por pasos del material **M5** con el **óptimo**.

El modelo universal constitutivo de módulo resiliente para el material **M5** queda:

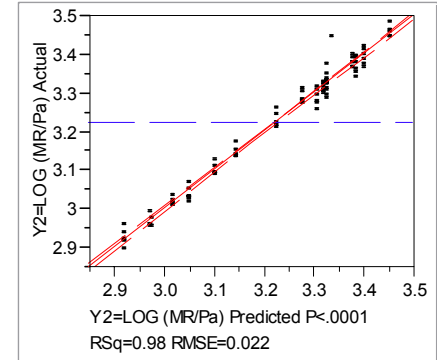
$$MR = 876,899535443 \cdot Pa \cdot \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{0,58121113}$$

Response Y2=LOG (MR/Pa)

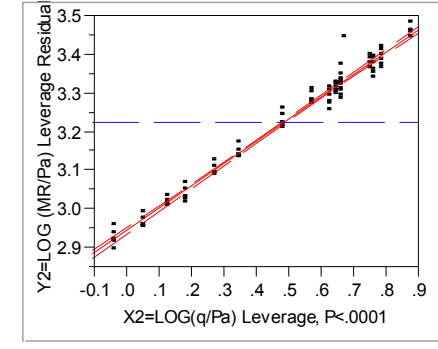
Whole Model

X2=LOG(q/Pa)

Actual by Predicted Plot



Leverage Plot



Summary of Fit

| | |
|----------------------------|----------|
| RSquare | 0.982148 |
| RSquare Adj | 0.981958 |
| Root Mean Square Error | 0.021965 |
| Mean of Response | 3.224231 |
| Observations (or Sum Wgts) | 96 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Ratio |
|----------|----|----------------|-------------|----------|
| Model | 1 | 2.4949966 | 2.49500 | 5171.625 |
| Error | 94 | 0.0453493 | 0.00048 | Prob > F |
| C. Total | 95 | 2.5403459 | | <.0001 |

Lack Of Fit

| Source | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Ratio |
|-------------|----|----------------|-------------|----------|
| Lack Of Fit | 93 | 0.04500143 | 0.000484 | 1.3909 |
| Pure Error | 1 | 0.00034789 | 0.000348 | Prob > F |
| Total Error | 94 | 0.04534932 | | 0.6013 |
| | | | | Max RSq |
| | | | | 0.9999 |

Parameter Estimates

| Term | Estimate | Std Error | t Ratio | Prob> t |
|--------------|-----------|-----------|---------|---------|
| Intercept | 2.9429498 | 0.004508 | 652.79 | <.0001 |
| X2=LOG(q/Pa) | 0.5812111 | 0.008082 | 71.91 | <.0001 |

Effect Tests

| Source | Nparm | DF | Sum of Squares | F Ratio | Prob > F |
|--------------|-------|----|----------------|----------|----------|
| X2=LOG(q/Pa) | 1 | 1 | 2.4949966 | 5171.625 | <.0001 |

Residual by Predicted Plot

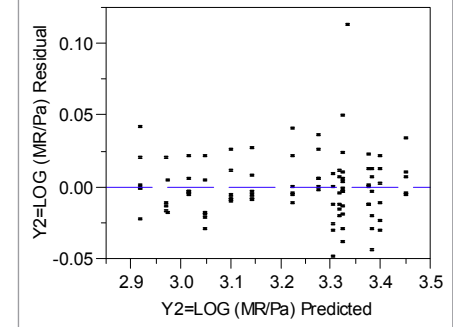


Figura 80: Resultados de la regresión lineal para el material M5 con el óptimo.

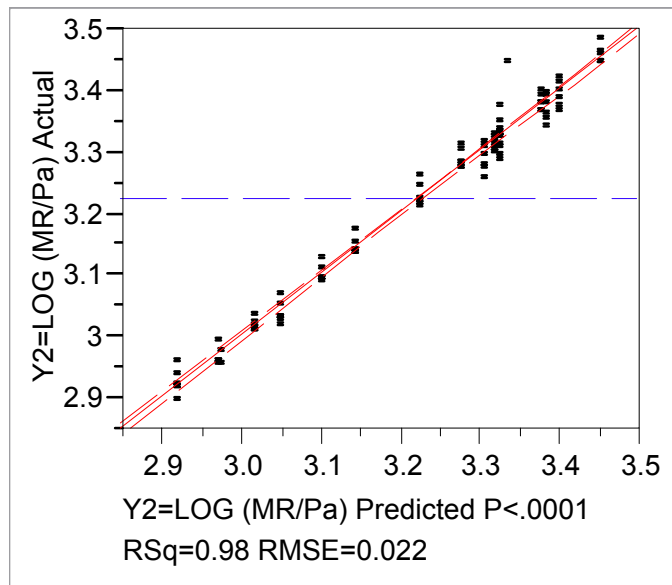


Figura 81: Gráfico de módulo real contra el predicho para el material **M5 con el óptimo.**

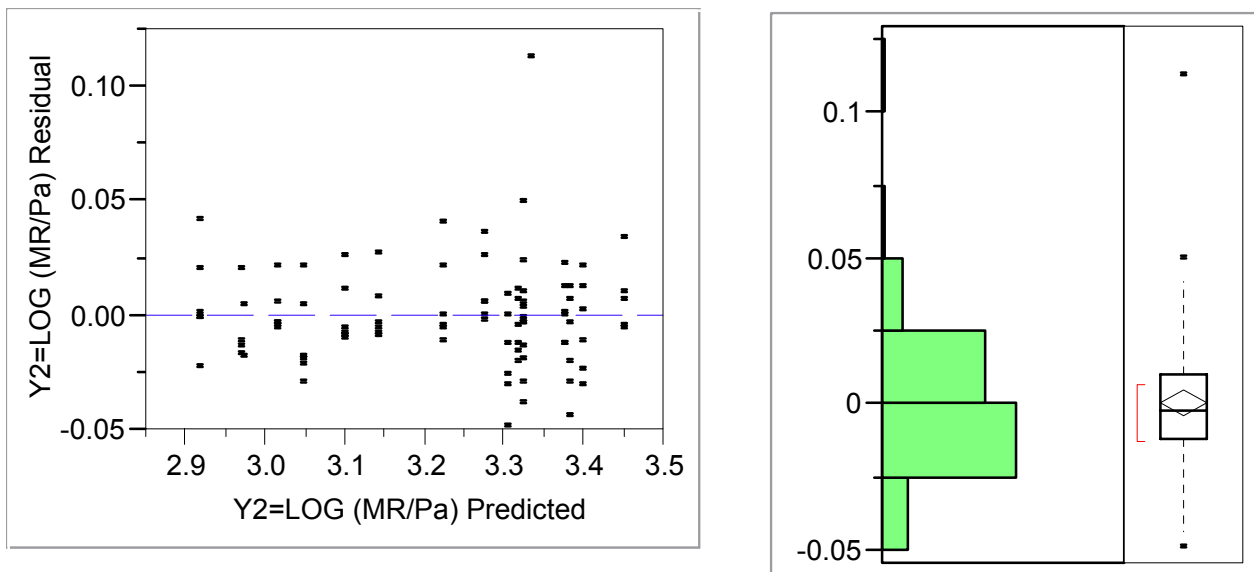


Figura 82: Gráfico de residuales y su distribución para el material **M5 con el óptimo.**

Con la observación de los gráficos de leverage de los análisis para los materiales con contenido de agua mayor al óptimo (%OMC) se puede concluir que no hay colinealidad entre las variables.

Los modelos finales obtenidos para cada material no fueron revisados tomando en cuenta valores de influencia o "outliers". Como resultado del análisis estadístico el modelo sugerido en la Guía mecánica-empírica para el diseño de pavimentos se estableció como el mejor modelo para la predicción del módulo resiliente para los 5 materiales granulares estudiados en la condición de menor porcentaje de compactación. Donde la ecuación generalizada está dada por:

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

Los parámetros estimados en la regresión se resumen en la Tabla 65 para cada material. Observando esta tabla el coeficiente k_1 es positivo lo cual es congruente con la teoría pues este parámetro es proporcional al módulo de Young. Cuando los esfuerzos brutos (θ) aumentan se produce el endurecimiento del material lo que produce un mayor módulo resiliente, por lo tanto, el parámetro k_2 debe ser positivo; con los resultados obtenidos podemos observar que los parámetros k_2 obtenidos son consistentes con esta teoría.

En cuanto al parámetro k_3 este debería ser negativo pues al aumentar los esfuerzos de cortante octaédricos se produce el ablandamiento del material, al observar los parámetros obtenidos, todos los k_3 resultaron ser negativos. Lo que hace que el material produzca valores de módulo resiliente menores, podemos observar que los parámetros k_3 obtenidos son consistentes con esta teoría.

Tabla 65: Resumen de resultados para los parámetros de la regresión para todos los materiales.

| Material | Parámetros estimados | | | R ² ajustado |
|----------|----------------------|----------------|----------------|-------------------------|
| | k ₁ | k ₂ | k ₃ | |
| M1 | 670,8304999 | 0,4349805 | -0,4473813 | 0,886881 |
| M2 | 887,8348739 | 0,4469284 | -0,4242848 | 0,817952 |
| M3 | 1118,9090847 | 0,4404963 | -0,3111992 | 0,866519 |
| M4 | 1231,0619267 | 0,4608227 | -0,2376733 | 0,931125 |
| M5 | 1154,8202747 | 0,5391693 | -0,1876631 | 0,978496 |

Se realizó una comparación entre los 5 materiales, por medio de la técnica estadística de análisis de varianza de una sola dirección (ANOVA), donde la prueba F es la que permite distinguir diferencias significativas. Se utilizó además la técnica gráfica de diamantes para en donde se genera una línea en el centro que representa el promedio del grupo, los puntos extremos representan el intervalo de confianza al 95%. Si los promedios no son muy distintos entonces los grupos estarán muy cerca de la línea que representa al gran promedio; si los intervalos de confianza no se traslapan, quiere decir que los promedios son significativamente distintos. Finalmente, se realizó la prueba de Tukey-Kramer HSD para no declarar una diferencia significativa cuando no la hay debido al Error de Tipo I.

Para los materiales conteniendo agua al cálculo el resultado obtenido se puede observar en la Figura XX.

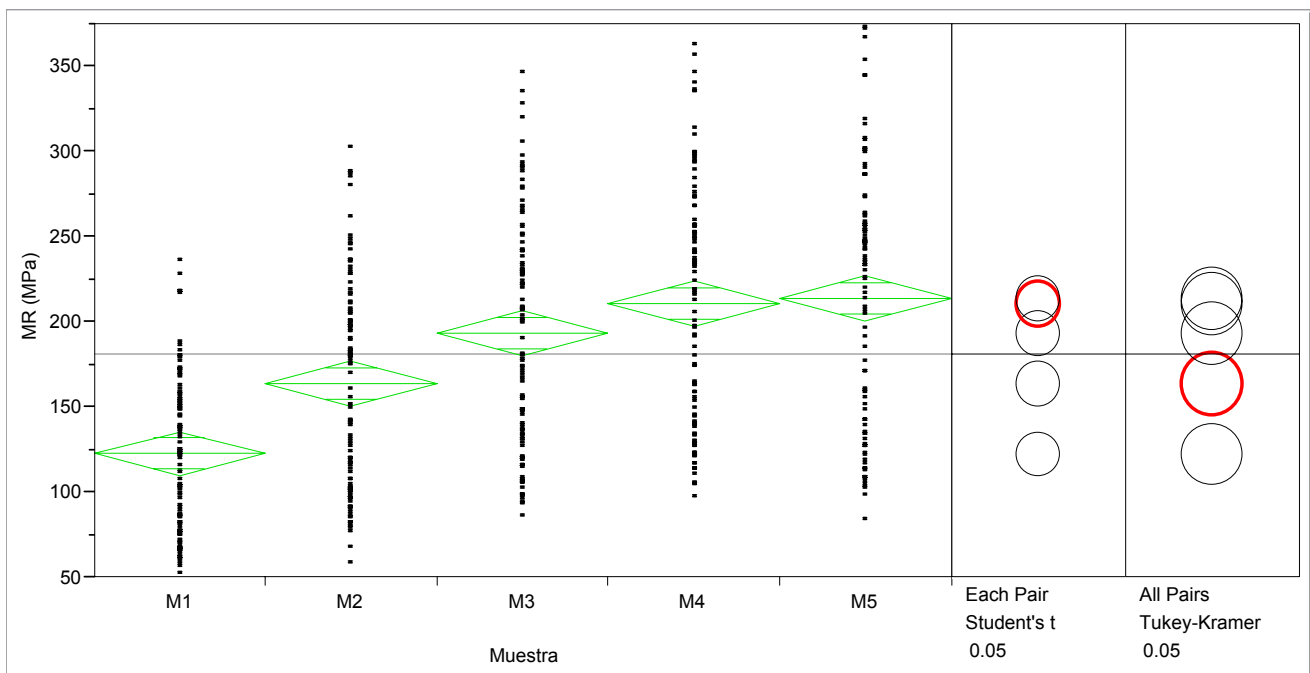


Figura 83: Gráfico de comparaciones para **todos los materiales con agua al cálculo.**

Estableciendo un nivel de confianza del 95 % para encontrar diferencias, se muestra la prueba T en la Tabla XX y la prueba Tukey-Kramer en la Tabla XX, donde se puede observar que, los valores positivos significan diferencias significativas.

Para la prueba T se resume que el M1 es distinto a todos, M2 es distinto a M3, M4 y M5, finalmente M3 es distinto a M5.

Tabla 66: Resumen de la comparación para la prueba T.

| | M5 | M4 | M3 | M2 | M1 |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| M5 | -18,412 | -15,429 | 1,795 | 31,563 | 72,901 |
| M4 | -15,429 | -18,412 | -1,188 | 28,581 | 69,919 |
| M3 | 1,795 | -1,188 | -18,412 | 11,357 | 52,695 |
| M2 | 31,563 | 28,581 | 11,357 | -18,412 | 22,926 |
| M1 | 72,901 | 69,919 | 52,695 | 22,926 | -18,412 |

Para la prueba Tukey-Kramer se resume que el M1 es distinto a todos, M2 es distinto a M3, M4 y M5, pero a diferencia del análisis anterior M3 deja de ser distinto a M5.

Tabla 67: Resumen de la comparación para la prueba Tukey-Kramer.

| | M5 | M4 | M3 | M2 | M1 |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| M5 | -25,658 | -22,675 | -5,452 | 24,317 | 65,655 |
| M4 | -22,675 | -25,658 | -8,434 | 21,335 | 62,672 |
| M3 | -5,452 | -8,434 | -25,658 | 4,111 | 45,448 |
| M2 | 24,317 | 21,335 | 4,111 | -25,658 | 15,680 |
| M1 | 65,655 | 62,672 | 45,448 | 15,680 | -25,658 |

Por lo tanto, no se recomienda realizar un análisis para obtener un solo modelo para todos los materiales.

Con respecto a la condición del contenido de agua óptimo no se realizó la prueba para alcanzar el 95% de compactación Próctor por lo que los especímenes ensayados tuvieron un grado de compactación mayor al 100 %. Por esta razón particular se considera que esto es significativo pues al realizar de nuevo el análisis estadístico para escoger el mejor modelo de módulo resiliente, el que mejor correlaciona con los datos es el modelo de $k-\theta$ desarrollado por Seed:

$$M_r = k_1 \cdot \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2}$$

Los parámetros estimados en la regresión se resumen en la **Tabla 68** para cada material.

Tabla 68: Resumen de resultados para los parámetros de la regresión para todos los materiales.

| Material | Parámetros estimados | | R ² _{ajustado} |
|----------|----------------------|----------------|------------------------------------|
| | k ₁ | k ₂ | |
| M1 | 48,9804821267 | 0,6566123 | 0,952161 |
| M2 | 64,2340870114 | 0,6073287 | 0,975011 |
| M3 | 73,8961625054 | 0,5991649 | 0,973659 |
| M4 | 71,6219309704 | 0,58333157 | 0,962796 |
| M5 | 77,1608131355 | 0,58121113 | 0,981958 |

De la revisión bibliográfica se encontró la **Tabla 69** con valores de k₁ y k₂ donde se puede observar que los valores obtenidos de k₁ son mayores que los presentes en la tabla mientras que los valores de k₂ están dentro de la mayoría de los rangos.

Tabla 69: Resumen de otros valores de k₁ y k₂ de distintas referencias.

| Referencias | Material | k ₁ (MPa) | k ₂ |
|----------------------------|--|----------------------|----------------|
| Hicks (1970) | Grava parcialmente triturada, roca triturada | 11,03-34,48 | 0,57-0,73 |
| Hicks y Finn (1973) | Base no tratada, tramo de prueba (San Diego) | 14,48-37,23 | 0,61 |
| Allen (1973) | Grava, roca triturada | 12,41-55,16 | 0,32-0,70 |
| Kalcheff y Hicks (1973) | Roca triturada | 27,58-62,06 | 0,46-0,64 |
| Boyce et al (1976) | Caliza triturada bien graduada | 55,16 | 0,67 |
| Monismith y Witzack (1980) | Materiales de base y subbase en servicio | 20,00-53,44 | 0,46-0,65 |

Tomado de: Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares del Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica N° 142, 2001

Para los materiales conteniendo agua al cálculo el resultado obtenido se puede observar en la Figura XX.

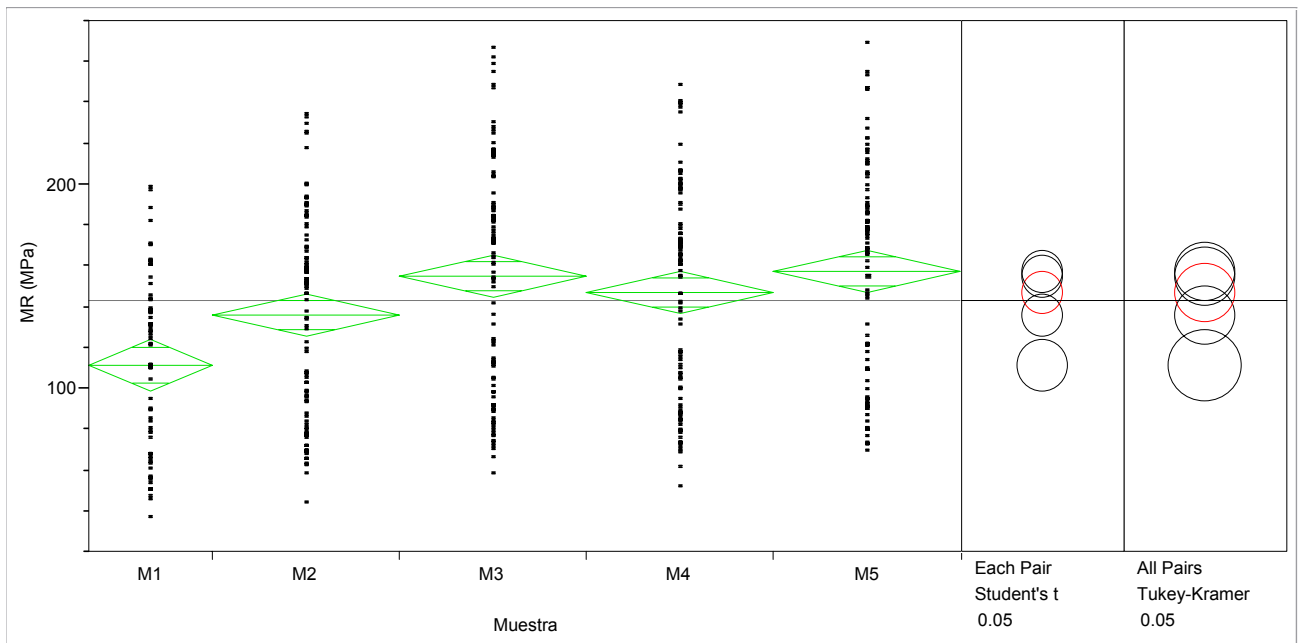


Figura 84: Gráfico de comparaciones para **todos los materiales** con **agua al óptimo**.

Estableciendo un nivel de confianza del 95 % para encontrar diferencias, se muestra la prueba T en la Tabla XX y la prueba Tukey-Kramer en la Tabla XX, donde se puede observar que, los valores positivos significan diferencias significativas.

Para la prueba T se resume que el M1 es distinto a todos y M2 es distinto a M4 y M5.

Tabla 70: Resumen de la comparación para la prueba T.

| | M5 | M4 | M3 | M2 | M1 |
|-----------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| M5 | -14,491 | -12,210 | -4,306 | 6,643 | 29,870 |
| M4 | -12,210 | -14,491 | -6,586 | 4,363 | 27,590 |
| M3 | -4,306 | -6,586 | -14,491 | -3,542 | 19,685 |
| M2 | 6,643 | 4,363 | -3,542 | -14,491 | 8,737 |
| M1 | 29,870 | 27,590 | 19,685 | 8,737 | -17,747 |

Para la prueba Tukey-Kramer se resume que el M1 es distinto a todos, pero a diferencia del análisis anterior M2 deja de ser distinto a M4.

Tabla 71: Resumen de la comparación para la prueba Tukey-Kramer.

| | M5 | M4 | M3 | M2 | M1 |
|-----------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| M5 | -20,195 | -17,915 | -10,010 | 0,938 | 23,492 |
| M4 | -17,915 | -20,195 | -12,290 | -1,342 | 21,212 |
| M3 | -10,010 | -12,290 | -20,195 | -9,247 | 13,307 |
| M2 | 0,938 | -1,342 | -9,247 | -20,195 | 2,359 |
| M1 | 23,492 | 21,212 | 13,307 | 2,359 | -24,734 |

Por lo tanto, no se recomienda realizar un análisis para obtener un solo modelo para todos los materiales.

Se presenta una Figura XX donde se muestran los gráficos de M_r medido en función del M_r predicho para cada material.

Se pueden sacar las siguientes observaciones:

- Los materiales M1, M2 y M3 presentan una mayor influencia de los esfuerzos cortantes octaédricos que los materiales M4 y M5, pues presentan este comportamiento para mayores contenidos de agua que el óptimo.
- Los materiales M4 y M5 presentan una menor influencia de los esfuerzos de cortante en la condición de más agua y más compactación que el porcentaje de compactación estándar.

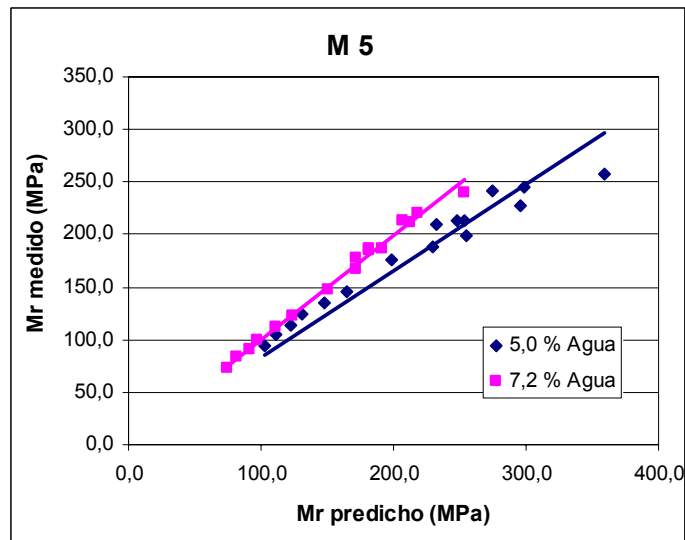
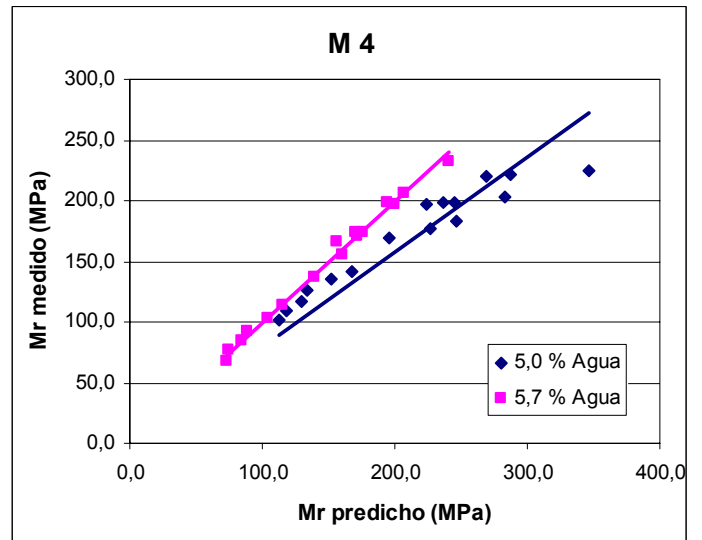
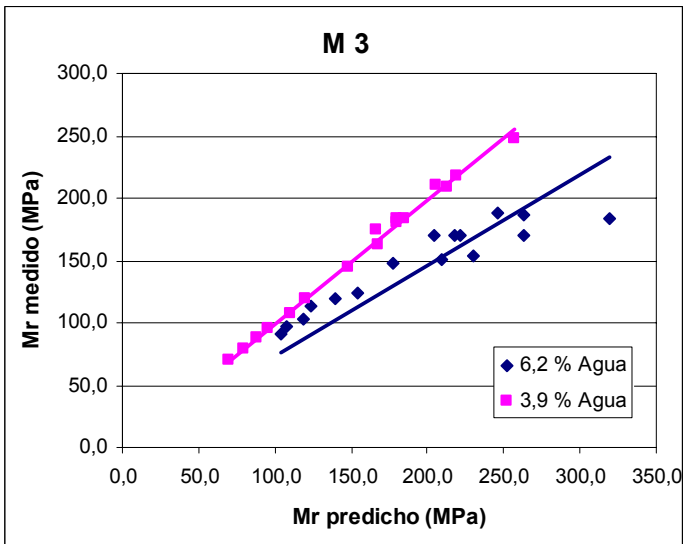
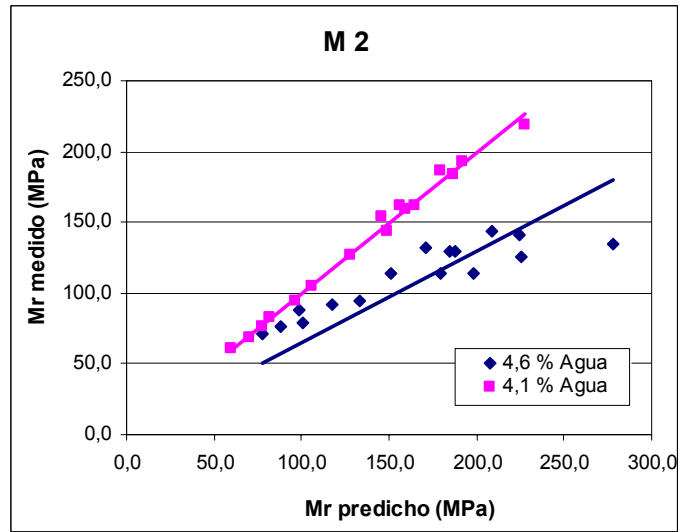
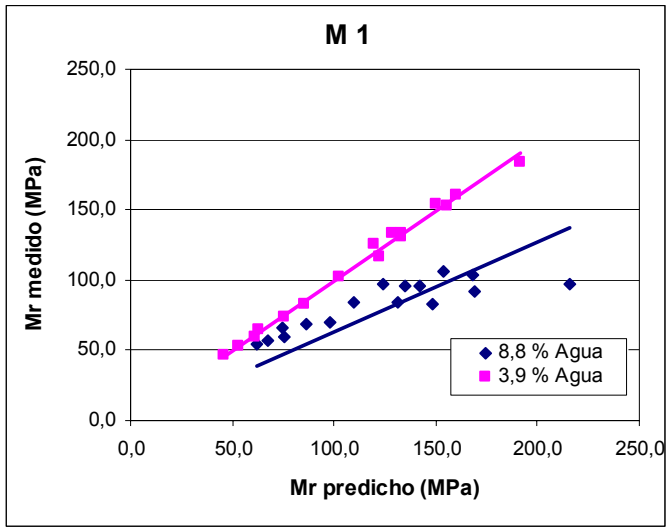


Figura 85: Gráfico de Mr medido contra Mr predicho para cada material.

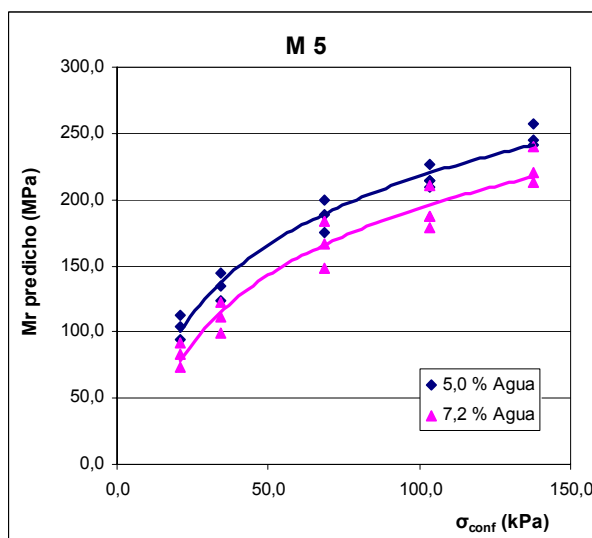
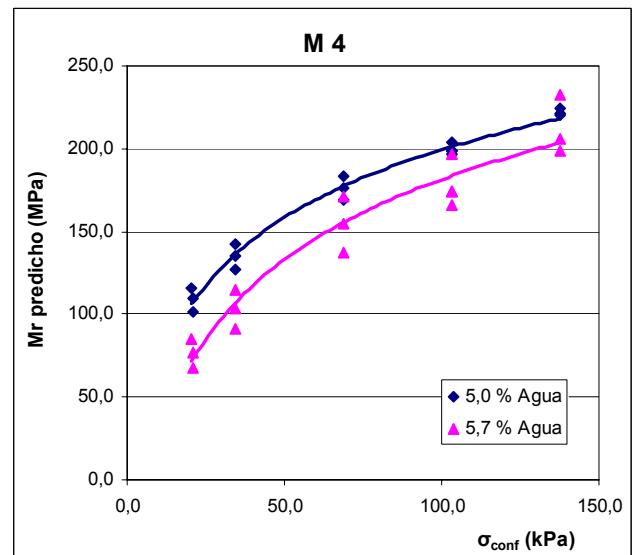
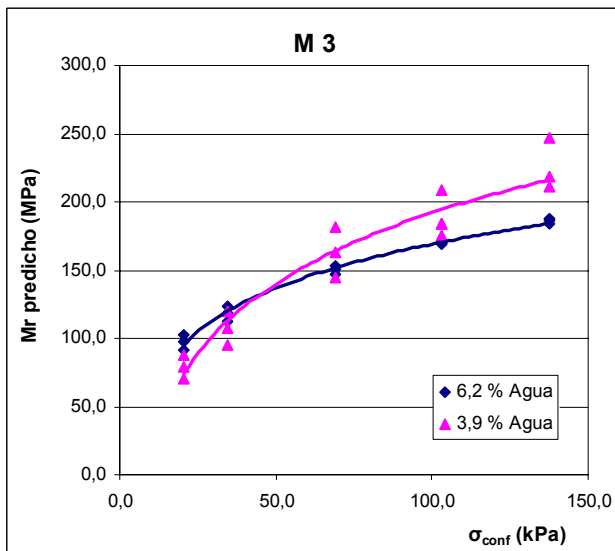
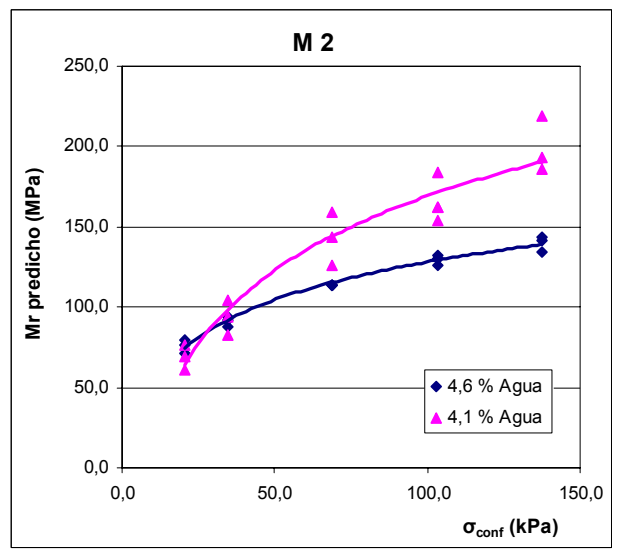
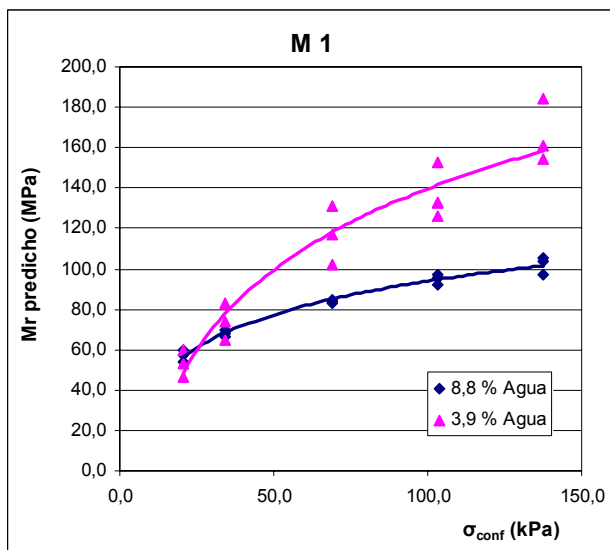


Figura 86: Gráfico de Mr predicho para cada material en función del esfuerzo de confinamiento.

De la Figura XX se pueden sacar las siguientes observaciones:

- Los materiales M1, M2 y M3 presentan un menor módulo para la condición de más agua y menos compactación.
- El material M4 presenta un módulo mayor para menos agua pero menos compactación que la otra condición que es más agua y más compactación.
- El material M5 presenta para la condición de más agua del óptimo y mayor compactación presenta un módulo menor que la condición de menos agua del óptimo y menor compactación.

CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y COMENTARIOS FINALES

8.1 Conclusiones

Se logró implementar el ensayo de módulo resiliente en materiales granulares basados en la norma AASHTO T 307. Con la limitante de la compactación con el martillo Próctor pues no se probaron métodos alternativos de compactación como la estática o la vibratoria recomendadas en la norma AASHTO. Al realizar este estudio también se logró capacitar a los técnicos de laboratorio en la realización del mismo en la Máquina Universal Dinámica (UTM).

A pesar de que los especímenes de aproximadamente 152 mm de diámetro no alcanzaron una buena densidad para soportar los estados de esfuerzos del ensayo de módulo, se logró alcanzar densidades razonables para los 5 materiales una vez que el material retenido en el tamiz de 19,0 mm (Nº 3/4) fue descartado de la granulometría original de los materiales.

Luego del análisis estadístico de regresión lineal múltiple, *para la condición de más contenido de agua y menor compactación*, se pudo establecer que el modelo universal constitutivo es el más significativo para poder predecir los módulos resilientes para los materiales estudiados, basados en el criterio del $R^2_{ajustado}$ que tuvo como valor mínimo 0,817952 y como máximo 0,978496, los cuales son valores excelentes de regresión para explicar la variabilidad de los modelos modelos. En la Tabla 72 se resumen los valores obtenidos para cada material.

Tabla 72: Resumen de resultados para los parámetros de la regresión para todos los materiales.

| Material | Parámetros estimados | | |
|----------|----------------------|-----------|------------|
| | K1 | K2 | K3 |
| M1 | 670,8304999 | 0,4349805 | -0,4473813 |
| M2 | 887,8348739 | 0,4469284 | -0,4242848 |
| M3 | 1118,9090847 | 0,4404963 | -0,3111992 |
| M4 | 1231,0619267 | 0,4608227 | -0,2376733 |
| M5 | 1154,8202747 | 0,5391693 | -0,1876631 |

Para la condición de menos agua y mayor compactación, se pudo establecer que el modelo de Seed es el más significativo para poder predecir los módulos resilientes para los materiales estudiados, donde el efecto de los esfuerzos cortantes no fueron significativos para un nivel de confianza del 99 %, basados en el criterio del $R^2_{ajustado}$ que tuvo como valor mínimo 0,952161 y como máximo 0,981958, los cuales son valores excelentes de regresión para explicar la variabilidad de los modelos modelos. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** 73 se resumen los valores obtenidos para cada material.

Tabla 73: Resumen de resultados para los parámetros de la regresión para todos los materiales.

| Material | Parámetros estimados | |
|----------|----------------------|------------|
| | K1 | K2 |
| M1 | 48,9804821267 | 0,6566123 |
| M2 | 64,2340870114 | 0,6073287 |
| M3 | 73,8961625054 | 0,5991649 |
| M4 | 71,6219309704 | 0,58333157 |
| M5 | 77,1608131355 | 0,58121113 |

El módulo resiliente para estos materiales se ve afectado por el estado de esfuerzos, es decir, el módulo aumenta conforme aumenta el esfuerzo aplicado (Ver Figura 86). Con el análisis de comparación estadístico (ANOVA) podemos concluir que el módulo se ve influenciado por la naturaleza de los agregados, así como también por el peso volumétrico, pues a mayor peso volumétrico mayor módulo (M5).

El módulo resiliente disminuye para las condiciones de mayor cantidad de agua y menor compactación (materiales M1, M2 y M3) consistente con la teoría, esto porque los esfuerzos de cortante octaédricos se vuelven significativamente más influyentes en el comportamiento de los materiales granulares, de aquí la importancia de una buena compactación y de no sobrepasar el contenido de agua del óptimo de diseño a la hora de construir las capas de base en el pavimento.

Para los materiales M4 y M5, el grado de compactación parece no ser tan significativo como sí lo es un mayor contenido de agua, lo que hace la diferencia en el resultado de módulo resiliente, donde se sigue cumpliendo que más agua dentro del material lo debilita.

Rada y Witczac (citados en Ping Tiam, et al) evaluaron 271 resultados de pruebas obtenidos de 10 diferentes agencias de investigación y encontraron que las variables que más influyen en el módulo de resiliencia de los materiales granulares son: el estado de esfuerzo, el grado de saturación y el grado de compactación. Para materiales triturados angulosos, un incremento en el contenido de agua conduce a una disminución del módulo de resiliencia. Especímenes con alto peso volumétrico seco tendrán altos valores de módulo de resiliencia.

La escogencia del valor adecuado de módulo resiliente a utilizar en el diseño de pavimentos depende de la metodología de diseño. En la Guía AASHTO 93 no se establece ninguna recomendación con respecto a cuál dato utilizar. En la nueva guía MEPDG para el nivel 1 se requiere como dato de entrada los valores k del modelo, por lo tanto, para los análisis elásticos, el dato de módulo resiliente a utilizar debería considerar los factores de estado de esfuerzos, saturación y compactación para los materiales granulares para obtener una capa base que no falle por cortante. Como ejemplo de la variación del módulo tenemos un rango de módulos entre 46,2 MPa (6700 psi) como mínimo y un máximo de 257,1 MPa (37300 psi) entre los 5 materiales utilizados en este estudio.

8.2 Recomendaciones

Se podrían probar otros métodos de compactación para los especímenes para asegurar una mayor uniformidad en la densidad del material granular que posee tamaños muy gruesos y pocos finos que hacen que el material no posea una buena cohesión y poder manipularlos para la realización del ensayo de módulo resiliente.

Para mejorar los valores de regresión R^2 y R^2 ajustado de los modelos desarrollados en este estudio es recomendable realizar el análisis de puntos influyentes y "outliers" para determinar si tienen una gran influencia sobre los parámetros de regresión o no y así optimizar los valores obtenidos hasta este momento.

Se podrían realizar ensayos de módulo resiliente tomando en cuenta distintos estados de compactación y contenido de agua para así obtener si estos parámetros se podrían incluir en el modelo de módulo, para modelar de manera más realista el módulo resiliente que se da en los pavimentos ya construidos donde el contenido de humedad cambia ya sea por la época del año, o por la presencia de agua que no fue adecuadamente drenada, o por presencia de un nivel freático inesperado.

CAPÍTULO 9 REFERENCIAS

1. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T 307-99 (2003). Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. XXVII ed., AASHTO, EUA, 2007.
2. Instituto Mexicano de Transporte. "Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares." Publicación Técnica N° 142, México, 2001.
3. JMP, A Business Unit of SAS Institute, Inc. "Statistics and Graphics Guide", Release 7, Capítulo 19 JMP documentos en línea. 2007.
<http://www.jmp.com/support/downloads/documentation.shtml>.
4. Montgomery D. y Runger G. "Probabilidad y Estadística aplicadas a la Ingeniería", 2da Edición, Capítulos 10 y 11, México, 2006.
5. National Cooperative Highway Research Program, "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures", Reporte Final, NCHRP Project 1-37A, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., Febrero 2004.
6. National Cooperative Highway Research Program, "Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design", Reporte Final, NCHRP Web Document 14, Project 1-28, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., Junio 1997.
7. Sall J., Lehman A. y Creighton L. "JMP Start Statistics a Guide to Statistics and Data Analysis Using JMP® and JMP IN® Software". Segunda Edición, SAS Institute, Inc. 2001.
8. Thurairajah, A. "Unbound Materials Resilient Modulus Testing for Truckee Meadows Area", Tesis de Maestría, Universidad de Nevada Reno, Nevada, Agosto 2007.