

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL



Análisis del efecto del mejoramiento de la subrasante y su potencial impacto en el diseño y construcción de pavimentos

Proyecto de graduación para optar por el grado académico de

Maestría en Ingeniería Vial

Realizado por:

José David Coto Sánchez

Cartago, Setiembre del 2022

ACTA DE APROBACIÓN DE PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

Con fundamento en lo establecido por la Maestría en Ingeniería Vial, el Tribunal Examinador del Proyecto Final de Graduación denominado:

Análisis del efecto de la estabilización de la subrasante y su potencial impacto en el diseño y construcción de pavimentos.

Y, habiendo analizado el resultado del trabajo presentado por el(los) estudiante(s):

Primer Apellido	Segundo Apellido	Nombre	No. de carné
COTO	SANCHEZ	JOSE DAVID	201236214

Se emite el siguiente dictamen el día 06 de setiembre del 2022:

<input checked="" type="checkbox"/> Aprobado	<input type="checkbox"/> Reprobado <input type="checkbox"/> Se recomienda <input type="checkbox"/> No se recomienda <i>Brindarle una nueva oportunidad para Defensa Pública.</i> Nueva fecha: _____
---	---

Dando fé de lo acá expuesto firmamos,

Ing. Sergio Hernández Cerdas, Profesor Tutor	Ing. José Pablo Aguiar Moya, Profesor Lector
Ing. Gustavo Rojas Moya, Director Escuela de Ingeniería en Construcción	Ing. Irving Pizarro Marchena, Coordinador Unidad de Posgrado

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	7
ABSTRACT	7
INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN	9
1.1 Antecedentes	9
1.2 Planteamiento del problema.....	10
1.3 Justificación del Estudio	12
1.4 Objetivos	13
1.5 Alcance y limitaciones	14
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 Definiciones	16
2.2 Estabilización con aditivos.....	18
2.3 Normativa.....	20
2.4 Efectos positivos y negativos.....	23
2.5 Ensayos de laboratorio	24
CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO	26
3.1 Tipo de investigación.....	26
3.2 Fuentes y sujetos de información	26
3.3 Técnicas e instrumentos de investigación.....	27
3.4 Procesamiento y análisis de datos	28
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	29
4.1 Proyecto	29
4.2 Diseño de pavimento	30
4.3 Materiales.....	32
4.4 Parámetros de diseño	33
4.5 Verificación de diseño de pavimento.....	44
4.6 Resultados de los ensayos de laboratorio.....	48
5.1 Dosificación empleada	62
5.2 Módulo resiliente de suelos	63

5.3	Resistencia a la compresión	81
5.4	Diseño nuevo de pavimento.....	82
5.5	Análisis de costos	85
5.6	Análisis de resultados	88
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		92
5.1	Conclusiones.....	92
5.2	Recomendaciones	93
CAPÍTULO 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		95
CAPÍTULO 7. APÉNDICES.....		98
7.1	Apéndice: Toma de datos y cálculos previos para el ensayo de módulo resiliente.....	98
7.2	Apéndice: Resultados del ensayo de módulo resiliente por secuencia (datos sin procesar) ...	104
7.3	Apéndice: Estructura de costos por actividad para diseño de pavimento original.....	110
7.4	Apéndice: Estructura de costos por actividad para diseño de pavimento nuevo.....	113
7.5	Apéndice: Cálculo de Módulo Resiliente para combinación de suelo sin estabilizar	117
7.6	Apéndice: Cálculo de Módulo Resiliente para combinación de suelo con cal	129
7.7	Apéndice: Cálculo de Módulo Resiliente para combinación de suelo con cemento hidráulico	141
7.8	Apéndice: Cálculo de Módulo Resiliente para combinación de suelo con emulsión asfáltica .	153
7.9	Apéndice: Cálculo de Módulos Resilientes Finales (Resultados en Apartado 4.8)	165
7.10	Apéndice: Revisión de propuesta de diseño de pavimento por ejes equivalentes, modelo de fatiga y deformación (PitraPave LanammeUCR)	168
CAPÍTULO 8. ANEXOS		172
8.1	Anexo: Informe LGC 13-R002-2022.....	172
8.2	Anexo: Informe LGC 13-R004-2022.....	183
8.3	Anexo: Ficha técnica Cemento hidráulico CEMEX UG.....	187
8.4	Anexo: Certificado de emulsión asfáltica rompimiento lento	188

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 4.1. Propiedades de la subrasante.	32
Cuadro 4.2. Propiedades de la subbase granular.	32
Cuadro 4.3. Propiedades de la base estabilizada.	33
Cuadro 4.4. Coeficientes estructurales de las capas del pavimento.	41
Cuadro 4.5. Resumen de datos considerados para el diseño de pavimento.	41
Cuadro 4.6. Memoria de cálculo para diseño de pavimento del tronco principal.	45
Cuadro 4.7. Memoria de cálculo para diseño de pavimento de la marginal.	46
Cuadro 4.8. Resultados de ensayos realizados al suelo sin estabilizar.	52
Cuadro 4.9. Límites de plasticidad de las combinaciones con cal.	53
Cuadro 4.10. Relaciones Densidad – Humedad de las combinaciones con cal.	53
Cuadro 4.11. CBR de las combinaciones con cal.	54
Cuadro 4.12. Límites de plasticidad de las combinaciones con cemento hidráulico.	56
Cuadro 4.13. Relaciones Densidad – Humedad de las combinaciones con cemento hidráulico.	56
Cuadro 4.14. CBR de las combinaciones con cemento hidráulico.	57
Cuadro 4.15. Límites de plasticidad de las combinaciones con emulsión asfáltica.	59
Cuadro 4.16. Relaciones Densidad – Humedad de las combinaciones con emulsión asfáltica.	59
Cuadro 4.17. CBR de las combinaciones con emulsión asfáltica.	60
Cuadro 4.18. Dosificaciones para las combinaciones de suelo con aditivo.	63
Cuadro 4.19. Dosificaciones para las combinaciones de suelo con aditivo para moldeo y compactación.	66
Cuadro 4.20. Dosificaciones para las combinaciones de suelo con aditivo para moldeo y compactación.	74
Cuadro 4.21. Resultados de módulo resiliente por modelo para suelo sin estabilizar.	74
Cuadro 4.22. Resultados de módulo resiliente por modelo para suelo combinado con cal.	74
Cuadro 4.23. Resultados de módulo resiliente por modelo para suelo combinado con cemento hidráulico.	75
Cuadro 4.24. Resultados de módulo resiliente por modelo para suelo combinado con emulsión asfáltica.	75
Cuadro 4.25. Relación del ajuste entre el modelo y sus datos para suelo sin estabilizar.	75
Cuadro 4.26. Relación del ajuste entre el modelo y sus datos para suelo combinado con cal.	76
Cuadro 4.27. Relación del ajuste entre el modelo y sus datos para suelo combinado con cemento hidráulico.	76
Cuadro 4.28. Relación del ajuste entre el modelo y sus datos para suelo combinado con emulsión.	76
Cuadro 4.29. Resultados de módulo resiliente a partir del modelo seleccionado.	79
Cuadro 4.30. Resultados de módulos resilientes definitivos y porcentaje de mejora según el aditivo utilizado.	80
Cuadro 4.31. Resistencia a la compresión de especímenes suelo – aditivo.	81
Cuadro 4.32. Memoria de cálculo para diseño de pavimento del tronco principal.	83
Cuadro 4.33. Memoria de cálculo para diseño de pavimento de la marginal.	84

Cuadro 4.34. Dimensiones consideradas para la estimación de costos del pavimento original.....	85
Cuadro 4.35. Dimensiones consideradas para la estimación de costos del pavimento nuevo.....	86
Cuadro 4.36. Estimación de costos para pavimento son subrasante sin mejora.....	87
Cuadro 4.37. Estimación de costos para pavimento son subrasante sin mejora.....	87
Cuadro 7.1. Datos para módulo resiliente, Suelo sin estabilizar.....	98
Cuadro 7.2. Datos para módulo resiliente, Suelo combinado con cemento hidráulico.....	99
Cuadro 7.3. Datos para módulo resiliente, Suelo combinado con cal.....	100
Cuadro 7.4. Datos para módulo resiliente, Suelo combinado con emulsión asfáltica.....	101
Cuadro 7.5. Densidades, humedades y compactación, Suelo sin estabilizar.....	102
Cuadro 7.6. Densidades, humedades y compactación, Suelo combinado con cemento hidráulico.....	102
Cuadro 7.7. Densidades, humedades y compactación, Suelo combinado con cal.....	103
Cuadro 7.8. Densidades, humedades y compactación, Suelo combinado con emulsión asfáltica.....	103
Cuadro 7.9. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo sin estabilizar, Muestra #1.....	104
Cuadro 7.10. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo sin estabilizar, Muestra #2.....	104
Cuadro 7.11. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo sin estabilizar, Muestra #3.....	105
Cuadro 7.12. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo combinado con cal, Muestra #1.....	105
Cuadro 7.13. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo combinado con cal, Muestra #2.....	106
Cuadro 7.14. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo combinado con cal, Muestra #3.....	106
Cuadro 7.15. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo combinado con cemento hidráulico, Muestra #1.....	107
Cuadro 7.16. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo combinado con cemento hidráulico, Muestra #2.....	107
Cuadro 7.17. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo combinado con cemento hidráulico, Muestra #3.....	108
Cuadro 7.18. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo combinado con emulsión asfáltica, Muestra #1.....	108
Cuadro 7.19. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo combinado con emulsión asfáltica, Muestra #2.....	109
Cuadro 7.20. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo combinado con emulsión asfáltica, Muestra #3.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Estructura de pavimento, Subrasante.	10
Figura 1.2. Árbol de problemas.	11
Figura 2.1. Capas de un determinado pavimento.	16
Figura 2.2. Estabilización de suelo mediante aplicación de polímero.	17
Figura 2.3. Proceso de mezclado de suelo con cemento hidráulico.	18
Figura 2.4. Pasos de la estabilización de suelos (de derecha a izquierda).	19
Figura 2.5. Selección de estabilizante.	20
Figura 2.6. Requerimientos de resistencia para mezclas estabilizadas.	21
Figura 2.7. Requisitos mínimos de muestreo y ensayo.	22
Figura 4.1. Ubicación del proyecto en estudio.	30
Figura 4.2. Recomendaciones para el período de análisis según tipo de ruta.	30
Figura 4.3. Distribución del Tránsito Promedio Diario para el año 2015, Sección 60230.	31
Figura 4.4. Factor de Distribución por Dirección.	33
Figura 4.5. Factor de Distribución por Carril.	34
Figura 4.6. Factores Camión.	34
Figura 4.7. Valores recomendados de Confiabilidad.	35
Figura 4.8. Valores de Z_R	35
Figura 4.9. Valores de S_0	36
Figura 4.10. Niveles de Drenaje de Estructuras de Pavimento.	37
Figura 4.11. Coeficientes de Drenaje, m_i	37
Figura 4.12. Coeficiente Estructural para Carpeta Asfáltica, a_1	38
Figura 4.13. Coeficiente Estructural para Base Estabilizada, a_2	39
Figura 4.14. Coeficiente Estructural para Subbase Granular, a_3	40
Figura 4.15. Estructura de pavimento del diseño original para tronco principal, espesores en cm.	43
Figura 4.16. Estructura de pavimento del diseño original para marginales, espesores en cm.	43
Figura 4.17. Estructura verificada para tronco principal, espesores en cm.	47
Figura 4.18. Estructura verificada para marginales, espesores en cm.	47
Figura 4.19. Sitio de muestreo de material de subrasante.	48
Figura 4.20. Sitio de muestreo de material de subrasante.	49
Figura 4.21. Sitio de muestreo de material de subrasante.	49
Figura 4.22. Sitio de muestreo de material de subrasante.	50
Figura 4.23. Ensayo de CBR en sitio con DCP al material de subrasante.	50
Figura 4.24. Extendido y secado de material de subrasante previo a los ensayos.	51
Figura 4.25. Límites de plasticidad de las combinaciones con cal.	54
Figura 4.26. Relaciones Densidad – Humedad de las combinaciones con cal.	55

Figura 4.27. CBR de las combinaciones con cal.	55
Figura 4.28. Límites de plasticidad de las combinaciones con cemento hidráulico.	57
Figura 4.29. Relaciones Densidad – Humedad de las combinaciones con cemento hidráulico.	58
Figura 4.30. CBR de las combinaciones con cemento hidráulico.	58
Figura 4.31. Límites de plasticidad de las combinaciones con cemento hidráulico.	60
Figura 4.32. Relaciones Densidad – Humedad de las combinaciones con emulsión asfáltica.	61
Figura 4.33. CBR de las combinaciones con emulsión asfáltica.	61
Figura 4.34. Requerimientos de resistencia para mezclas de suelo estabilizadas.	62
Figura 4.35. Proceso de mezclado de suelo, aditivo y agua.	64
Figura 4.36. Adición de agua y aditivo para la posterior homogenización de la mezcla.	64
Figura 4.37. Compactación de los especímenes por medio de compactador mecánico, mazo estándar 5,5 lb, 6 capas.	65
Figura 4.38. Molde de compactación de 4 in de diámetro (sin membrana).	65
Figura 4.39. Especímenes moldeados para ensayo de módulo resiliente.	66
Figura 4.40. Curado de especímenes de suelo combinado con cemento hidráulico en cuarto húmedo.	67
Figura 4.41. Curado de especímenes de suelo combinado con cal en horno a 40°C.	68
Figura 4.42. Remojo capilar de especímenes de suelo combinado con cal por 24 horas.	68
Figura 4.43. Curado de especímenes de suelo combinado con emulsión asfáltica en horno a 40°C.	69
Figura 4.44. Preparación del espécimen previo al ensayo de módulo resiliente.	70
Figura 4.45. Especimen listo para colocarlo dentro de la cámara triaxial.	71
Figura 4.46. Cámara triaxial instalada en la máquina de carga.	72
Figura 4.47. Equipo para ensayo de módulo resiliente de subrasantes.	72
Figura 4.48. Especímenes ensayados luego de la determinación de su peso seco.	73
Figura 4.49. Resultados de módulo resiliente por modelo para suelo sin estabilizar.	77
Figura 4.50. Resultados de módulo resiliente por modelo para suelo combinado con cal.	77
Figura 4.51. Resultados de módulo resiliente por modelo para suelo combinado con cemento hidráulico.	78
Figura 4.52. Resultados de módulo resiliente por modelo para suelo combinado con emulsión asfáltica.	78
Figura 4.53. Estructura de pavimento de diseño nuevo con subrasante mejorada para tronco principal, espesores en cm.	82
Figura 4.54. Estructura de pavimento de diseño nuevo con subrasante mejoradas para marginales, espesores en cm.	82
Figura 4.55. Especímenes compactados para ensayo MR de suelo combinado con cal.	89

RESUMEN

La subrasante no solamente se debe ver como una fundación para el pavimento, sino que también puede dar un aporte estructural a las capas superiores del paquete del pavimento; no es del todo verdadero que siempre la opción más conveniente es sustituir el suelo propio del sitio del proyecto. Es por esto que se pretende demostrar el efecto del mejoramiento de la subrasante para una estructura de pavimento semirrígido determinada, utilizando aditivos como cal, cemento hidráulico y emulsión asfáltica. A partir de estas combinaciones de suelo – aditivo, se realizan ensayos de desempeño (CBR, Módulo Resiliente, Resistencia a la Compresión) para poder comparar el efecto de cada aditivo sobre el suelo, ejecutando además el ensayo de Módulo Resiliente para cada una de estas mezclas, posteriormente seleccionando el aditivo más eficiente (mayor rigidez, durabilidad y capacidad de soporte) a partir de su comparación y poder diseñar el pavimento con el módulo resiliente elegido. Con el dato de nuevo módulo de la subrasante, se realiza de nuevo el diseño y se compara con la estructura de pavimento propuesta originalmente, para luego considerar un estudio económico analizando los beneficios y ahorro obtenidos con la mejora propuesta.

Palabras clave: Subrasante, suelo, mejoramiento, cemento hidráulico, cal, emulsión asfáltica, módulo resiliente.

ABSTRACT

The subgrade should not only be seen as a foundation for the pavement, otherwise it can also provide a structural contribution to the upper layers of the pavement package; it is not entirely true that the most convenient option is always to replace the soil of the project location. This is why it is intended to demonstrate the effect of improving the subgrade for a given semi-rigid pavement structure, using additives such as lime, hydraulic cement and asphalt emulsion. Based on these soil-additive combinations, performance tests (CBR, Resilient Modulus, Compressive Strength) are carried out to compare the effect of each additive on the soil, also executing the Resilient Modulus test for each of these mixtures, subsequently selecting the most efficient additive (increased rigidity, durability and support capacity) based on its comparison and be able to design the pavement with the chosen resilient modulus. With the new modulus data of the subgrade, the design is carried out again and it is compared with the originally proposed pavement structure, to then consider an economic study analyzing the benefits and savings obtained with the proposed improvement.

Keywords: Subgrade, soil, improvement, hydraulic cement, lime, asphalt emulsion, resilient modulus.

INTRODUCCIÓN

El proceso de estabilización de una determinada capa de la estructura de pavimento, consiste en combinar un material granular con un agente estabilizante (cal, cemento hidráulico, aditivos como cenizas volantes, enzimas, melaza, etc.), para mejorar distintas propiedades mecánicas como su rigidez y durabilidad. Esto ocasiona que el pavimento tenga más capacidad para soportar una carga de tránsito mayor, además de que con la estabilización es posible disminuir el espesor de las demás capas del pavimento. En nuestro país es común que la estabilización se le realice a una capa granular estructural, pero no se le ha dado tanta importancia de utilizar este proceso a un suelo propio de la subrasante.

Por su geología, Costa Rica cuenta mayoritariamente con suelos arcillosos y limosos, siendo predominantes los suelos clasificados como A-7-5 o A-7-6, identificados como arcillas limosas de alta compresibilidad y alto cambio de volumen según la clasificación de suelos AASHTO (Chinchilla, R. et al, 2016). Quizá, esta es una de las principales razones por las cuales, en los proyectos viales se decide siempre evitar estos materiales y no utilizarlos del todo, o hacerlo en algún relleno fuera del paquete estructural si posee alguna presencia de un material más grueso. El problema que presentan los suelos finos con presencia de material arcilloso o limoso es que al estar con contacto con agua reaccionan con cambios de volumen, causando asentamientos, elevaciones o alguna deformación de la estructura que esté por encima de ellos, ocasionado su deterioro. Además, de que son tipos de suelos “stress-softening”, cuyo módulo disminuye conforme incrementa el esfuerzo desviador aplicado (carga de tránsito), causando que la estructura de pavimento sea más susceptible a deformaciones plásticas que puedan reflejarse a las capas estructurales.

Debido al efecto anterior, es que en la mayoría de las ocasiones en que se encuentra este tipo de suelos, se prefiere realizar una sustitución por algún material más grueso y de mejor calidad, como por ejemplo un préstamo, teniendo una fundación más estable y confiable para el paquete del pavimento. Esto a su vez conlleva actividades de excavación y acarreo para remover el material de sitio, junto con actividades de acarreo, colocación, extendido y compactación del material de sustitución, lo cual claramente aumenta los costos de construcción, además de contemplar el costo propio del material de sustitución.

Así entonces, se desea demostrar el efecto de la estabilización del suelo de la subrasante utilizando aditivos como cal, cemento hidráulico y emulsión asfáltica, realizando una comparación entre ellos de acuerdo con el aporte de cada uno en las propiedades del suelo, y las modificaciones que se tendría en el espesor de las demás capas del pavimento. Además, estas modificaciones al paquete estructural conllevarían cambios económicos del acuerdo al tipo de pavimento a analizar, por lo que también se pretende realizar una comparación económica teniendo en cuenta los beneficios que se tendrían con la estabilización, como omitir las actividades de excavación, acarreo y colocación del material de sustitución mencionadas anteriormente.

Lo anterior, tiene como finalidad demostrar la factibilidad del uso de estabilizaciones en la subrasante y analizar cada uno de los beneficios que se tendrían, como rapidez en la construcción, disminución de costos y actividades, además de hacer conciencia para tener presente la actividad de estabilización de la subrasante en futuras licitaciones u ofertas, dependiendo del tipo de proyecto vial a desarrollar.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Antecedentes

Los procesos de mejoramiento de las propiedades mecánicas de la subrasante, han sido estudiados ampliamente en otros países (se mencionan algunos ejemplos a continuación), utilizando diferentes materiales, aditivos y procedimientos obteniendo resultados positivos.

Una de las razones por las que se han realizado estos estudios, es debido a que la sustitución del suelo por un material de préstamo no siempre es lo más viable según relación beneficio/costo (Cuelho, E. et al, 2021). Otra razón, es que algunos de los agentes estabilizantes más utilizados provocan una disminución de la plasticidad en los suelos, por lo que sería un motivo para considerar la viabilidad del procedimiento en estudio. Por esto, es importante conocer que existen diversidad de agentes estabilizadores para utilizar en la subrasante, como asfaltos, polímeros, electrolitos, bioquímicos, geosintéticos, cal y cemento hidráulico; aunque también se debe tener en cuenta la disponibilidad de estos aditivos a la hora de planificar una estabilización de este tipo, debido a que la obtención de la mayoría de ellos puede ser complicada, a excepción del cemento hidráulico, que se consigue fácilmente.

En otras latitudes como en Estados Unidos, se ha incursionado en la estabilización de subrasantes utilizando geogrillas o geosintéticos, propiamente en los estados de Montana y en Pensilvania. En estos estados, específicamente el Departamento del Transporte de Montana (Cuelho, E. et al, 2021) y el Instituto de Transporte de Pensilvania (Tang, X. et al, 2021), donde diversos estudios que han realizado demuestran una mayor adherencia ente las capas, mayor resistencia al cortante, mayor resistencia a la deformación vertical, entre otras. Incluso, están en busca de actualizar sus especificaciones para abarcar materiales con los que han tenido buenos resultados, así como también abrir la aplicación de nuevos materiales (Cuelho, E. et al, 2021). Otro ejemplo es Qatar, donde se han hecho estudios sobre la mejora de los suelos típicos de la región con la ayuda de polímeros, donde se han tenido resultados más favorables que los que brinda el cemento hidráulico, lo cual ha sido clave específicamente en pavimentos perpetuos debido al alto crecimiento del tránsito pesado en los últimos años (Iyengar, S. et al, 2013). Otro de los aditivos que se han utilizado en otros países, es la ceniza volante, utilizada en la carretera estatal 32 en Wisconsin, obteniendo resultados de mejor resistencia a la fricción, mayor rigidez y resistencia al cortante del suelo (Trzebiatowski, B., et al, 2021). Finalmente, no cabe de más mencionar el aprovechamiento de los recursos, como en Ohio que se ha utilizado como aditivo los lodos de cal (Zhang, B. & Yu, X., 2021), o materiales reciclados como polvo de cemento de horno, polvo de cal de horno o finos de concreto (Bandara, N., et al, 2021).

En nuestro país es muy escasa la información acerca de proyectos viales en los cuales se ha utilizado este procedimiento de estabilización, por lo que no hay una experiencia documentada. Por esto es por lo que se decide investigar un poco más sobre este procedimiento y analizar su factibilidad en el país, e ir generando documentación técnica y fundamentada que contribuya a su implementación.

1.2 Planteamiento del problema

La subrasante consiste en la base o la fundación del paquete estructural del pavimento, sobre la cual se soportan las capas granulares superiores y la capa de rodadura. Por esta razón, es importante que la subrasante está constituida de manera ideal, por un material homogéneo, uniforme y estable, lo cual es complicado de encontrar en los suelos típicos de nuestro país.

Debido al gran contenido de finos plásticos con los que cuentan los suelos en el territorio nacional, constituidos mayoritariamente por finos arcillosos y limosos, es muy probable que sea peligroso o riesgoso utilizar estos materiales para apoyar la estructura de pavimento. Estos riesgos pueden comprender desde puntos de vista económicos, debido a la pérdida considerable de recursos al dañarse el pavimento, o incluso hasta dañar de forma significativa a los vehículos; hasta poner en peligro la vida de las personas causando accidentes por los asentamientos o deformaciones que se puedan presentar. Lo anterior es debido al contenido de finos plásticos en los suelos que podrían formar la subrasante, ya que, al estar con contacto con humedad, estos suelos van a tender a cambiar de volumen ocasionando que la estructura de pavimento por encima de ellos tenga asentamientos, depresiones, elevaciones, o algún tipo de deformación, originando un acelerado deterioro.



Figura 1.1. Estructura de pavimento, Subrasante.

Es por lo anterior, que la solución más común y buscada es realizar una sustitución de suelos, removiendo el suelo natural de sitio por un suelo de mayor calidad constituido por un contenido mayor de partículas gruesas, como un material de préstamo granular. Como ya se ha mencionado anteriormente, con esto se aumenta el número de las actividades a realizar para la construcción del pavimento, ya que existirán actividades como excavación y acarreo para remover el material de sitio, junto con actividades de acarreo, colocación, extendido y compactación del material de sustitución. Con esto, una posibilidad es que se aumenten los costos de construcción considerando materiales,

maquinaria, mano de obra, y además incrementando el tiempo de construcción, comparado a otros métodos de construcción como el mejoramiento de estos suelos en sitio, lo cual podría mejorar estos parámetros antes mencionados. Esto anterior no quiere decir que siempre se dé de esta forma, sino que es importante realizar primero un estudio de factibilidad e inclinarse por la opción más viable, dependiendo del tipo de proyecto vial.

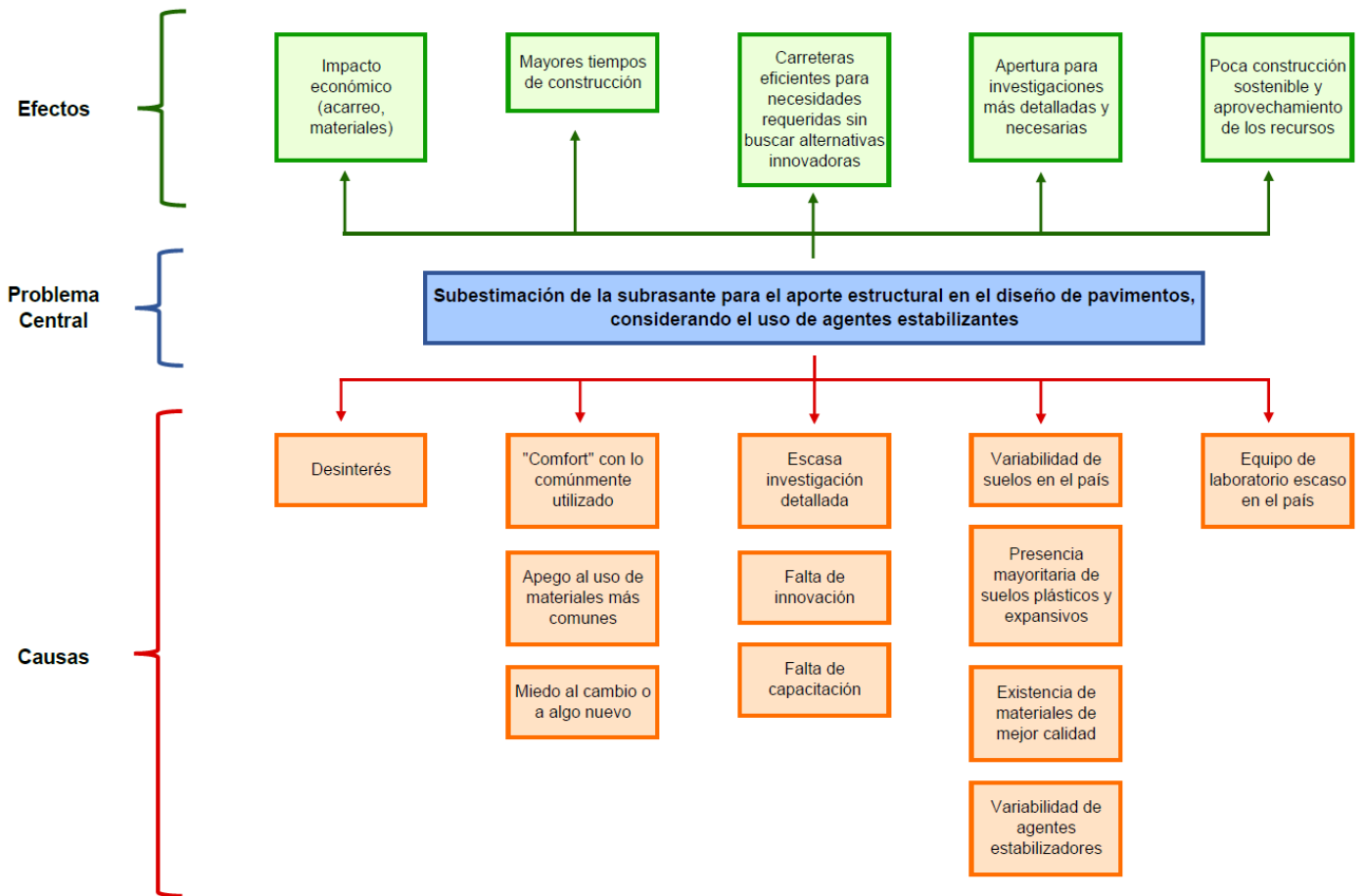


Figura 1.2. Árbol de problemas.

1.3 Justificación del Estudio

La gran mayoría de los proyectos viales en nuestro país, refiriéndose a las ofertas y licitaciones de cada uno de ellos, han considerado realizar una sustitución de suelos para obtener una subrasante relativamente más firme, estable y homogénea, ya sea que el diseño contemple una base granular o una base estabilizada.

Si bien es cierto, hay ocasiones en que, dependiendo del material encontrado en sitio, la única solución es la sustitución de suelos por las pésimas propiedades que este presenta, pero esta situación no es la que se da siempre, pudiendo haber otras alternativas en las que se pueda utilizar y aprovechar de alguna manera el suelo encontrado en el sitio. Una de las causas por las cuales la estabilización de suelos es viable, que no se mencionó anteriormente, es la del aprovechamiento de los recursos y la disminución en la contaminación ambiental, debido a que en una sustitución del suelo de la subrasante se deben sumar más actividades para la remoción del suelo de sitio y la colocación del suelo nuevo, provocando que haya una mayor contaminación al ambiente (contaminación sónica y del aire), y aumentando la cantidad de vehículos en las vías principales ocasionando más congestiones de tránsito. Lo anterior, comparado a una estabilización de suelos, serían varias desventajas del método de sustitución frente al método de estabilización, ya que este último solo conlleva los viajes del agente estabilizador utilizado hacia la ubicación de interés, aprovechando el material encontrado en el sitio.

En nuestro país, es poco lo que se conoce y lo que se ha hecho respecto a la estabilización de la subrasante en los proyectos viales, y a pesar de que en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes CR-2020 existe una sección correspondiente a esto (Sección 213), no es una actividad considerada dentro de los carteles, ofertas y diseños de proyectos de carreteras. Además, tampoco resulta sencillo llevar el debido control de calidad del proceso de estabilización de suelos actualmente en Costa Rica, esto es debido a que uno de los principales ensayos a realizar a materiales de subrasante estabilizadas es la prueba de módulo resiliente, ensayo que actualmente solo lo realiza el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). Los principales laboratorios de control de calidad de carreteras del país no poseen el equipo necesario para realizar esta prueba, debido a que en este momento la estabilización de la subrasante es una actividad poco considerada, y también porque es un ensayo relativamente costoso.

La finalidad de la realización de este proyecto, es demostrar los beneficios que se tendrían con la inclusión del procedimiento de estabilización de la subrasante en los diseños de proyecto viales y su inclusión en las respectivas licitaciones y ofertas, ya que en la actualidad no tiene una importancia significativa o no se considera como un método de importancia para la construcción de carreteras. Con los resultados obtenidos de este proyecto de investigación, podrían constituir en un impulso para cambiar la mentalidad actual, y analizar cada uno de los beneficios que se obtendrían con el método estudiado que se podría complementar bien con proyectos de caminos municipales por citar a un ejemplo, por sus condiciones y dimensiones. Otra de las finalidades es contar con fundamentos técnicos para incluir o no a la subrasante en diseños considerados, definiendo el estabilizante más eficiente. En caso de concluir un aporte positivo de la subrasante, los resultados obtenidos considerarían diseños más económicos y rapidez en la construcción de carreteras. Con esto, se abren puertas para investigaciones futuras según el tema a desarrollar, ya que no ha sido un tema de relevancia en el país.

Algunos de los beneficios anteriormente mencionados que se podrán obtener son la reducción de las actividades en la construcción de carreteras, disminución de tiempos de construcción, ahorro económico de acarreo y colocación de materiales de sustitución, capas de la estructura de pavimento con menor espesor, ahorro económico en la compra de materiales granulares, disminución de contaminación sónica y del aire, aprovechamiento de los recursos del sitio, entre otros. Estos aspectos se mencionarán con mejor detalle más adelante, pero se aclara que no serán objeto de estudio para el presente proyecto, aunque serían temas interesantes para desarrollar en proyectos futuros.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General:

- 1.4.1.1 Determinar el efecto de la estabilización sobre las propiedades físicas y mecánicas de un suelo típico en Costa Rica, con el fin de estimar su potencial impacto en el diseño y construcción de estructuras de pavimento.

1.4.2 Objetivos Específicos:

- 1.4.2.1 Comparar la estabilización de un suelo típico de subrasante utilizando agentes estabilizantes, como cemento hidráulico, cal y emulsión asfáltica, respecto a las mejoras en las propiedades físicas y mecánicas que le aportaría cada estabilizante al suelo.
- 1.4.2.2 Evaluar la factibilidad de la estabilización de la subrasante en nuestro medio (rutas nacionales o incluso cantonales), por medio del diseño de un determinado pavimento con subrasante estabilizada con una igualdad de condiciones del mismo pavimento sin estabilizar la subrasante.
- 1.4.2.3 Realizar un análisis costo - beneficio del procedimiento de estabilización considerando la opción del aditivo con mejores resultados, para un pavimento con subrasante estabilizada contra uno no estabilizado.

1.5 Alcance y limitaciones

1.5.1 Alcances

El proyecto pretende evaluar el aporte estructural que le podría dar la subrasante al pavimento, con la utilización de cemento hidráulico, cal hidratada, y emulsión asfáltica, teniendo un criterio para incluir la subrasante en los diseños futuros de proyectos viales, principalmente con la reducción de los espesores de las demás capas por encima de la subrasante.

Se desea demostrar el efecto de un aditivo estabilizante sobre la rigidez de la subrasante, además de comparar las mejoras en sus propiedades con diferentes tipos de estabilizantes, demostrar la factibilidad que podría tener esta técnica de estabilización sobre la técnica de sustitución de suelos, además de realizar un estudio económico considerando el efecto de la estabilización sobre las demás capas del pavimento.

Se trabajó con un suelo típico del país, para lo cual se tiene pensado aprovechar el proyecto en ejecución de la Ampliación y Rehabilitación de la Ruta Interamericana Norte Sección Barranca – Limonal para la obtención de las muestras de suelo y los demás materiales a utilizar, incluyendo los estabilizantes a utilizar. Con esto, se contó con la disposición del equipo y personal del laboratorio LGC Ingeniería de Pavimentos S.A. para desarrollar las pruebas de laboratorio necesarias para la obtención de los ensayos de interés, además de solicitar la colaboración del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) de la Universidad de Costa Rica por el requerimiento de ensayos que no tenga el primer laboratorio dentro de su alcance.

Es importante mencionar que el alcance de esta investigación es solamente de laboratorio, no comprende la realización de tramos de prueba para instrumentación, la cual podría ser una fase aparte para otro proyecto de investigación.

Posteriormente se utilizará la metodología AASHTO 93 y revisión de parámetros de deformación, con los cuales se obtendrán los diseños finales según los datos de entrada obtenidos de los resultados de los ensayos de laboratorio, para posteriormente utilizar datos de precios unitarios, manos de obra y materiales del proyecto vial en ejecución para estimar los costos de construcción de cada una de las técnicas a comparar.

Se destaca que, en el Capítulo 4 Resultados, se detalló y verificó el diseño de pavimento para el tronco principal del tramo de carretera seleccionado, así como la marginal respectiva. Además, se realizó el diseño de pavimento nuevo considerando la mejora de la subrasante tanto para la sección del tronco principal como la de la marginal. Se aclara que el análisis de costos realizado, para observar y analizar las diferencias obtenidas entre el diseño de pavimento original y el diseño nuevo contemplando la mejora de la subrasante, solo se realizó para la sección del tronco principal.

1.5.2 Limitaciones

La limitación más importante será la del equipo de laboratorio disponible, ya que, según las normas de referencia para fabricar y ensayar especímenes de suelo con algún tipo de estabilizante, el equipo empleado no es muy común en el país, por lo que habría que hacer adaptaciones o modificaciones justificadas o acudir al LanammeUCR. El Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, es el único laboratorio en el país que cuenta con el equipo para realizar el ensayo de módulo resiliente de suelos.

Además, es importante tener en cuenta las actividades de construcción y avances del proyecto de RN1 Barranca – Limonal, así como el trabajo diario de laboratorio, lo que podría eventualmente atrasar las actividades planeadas para la realización de la investigación. Para el caso de este proyecto, existió un atraso con respecto a la obtención de los resultados obtenidos del suelo sin estabilizar y del suelo combinado con cada uno de los aditivos, producto del trabajo diario del laboratorio y del personal técnico disponible. Sin embargo, este atraso no perjudicó la ejecución de este proyecto.

Otra limitación importante a tener en cuenta, fue a la hora de realizar el cálculo del resultado definitivo de Módulo Resiliente de la subrasante, ya que se calcularon distintos modelos para la determinación de este valor. Para la escogencia del modelo más adecuado o el que mejor se ajustaba con respecto a lo calculado, se basó en los valores de los coeficientes de determinación R^2 debido a que consiste en una medida práctica. Sin embargo, al tener regresiones múltiples de dos o más variables, más aún cuando se construyen modelos, existen otros parámetros más convenientes para determinar la relación que existe entre las variables del modelo calculado, y así poder seleccionar el modelo que mejor se ajusta a lo requerido.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se detallará sobre generalidades acerca del tema en estudio, conceptos, diferentes proyectos y resultados a nivel nacional e internacional, normativas, efectos positivos y negativos del proceso de estabilización, y ensayos de laboratorio necesarios con sus respectivos resultados.

2.1 Definiciones

2.1.1 Subrasante

La subrasante consiste en el terreno natural sobre el cual se apoya la estructura de pavimento, sirviendo como fundación del mismo, esta no constituye una capa más de la estructura de pavimento, pero sí se deben de considerar sus propiedades para el diseño de pavimentos (Department of the Army, the Navy and the Air Force, 1994). Esto último es debido a que la capacidad de soporte de la subrasante es un parámetro que afecta directamente los espesores totales de las capas superiores del pavimento.

Su función es resistir las cargas de tránsito que transmite el pavimento, transmitir y distribuir las cargas al terraplén, evitar que los materiales finos plásticos del terraplén contaminen el pavimento y también economizar los espesores de las demás capas.

Está conformada por suelos naturales de sitio, suelos seleccionados o suelos triturados, producto de los cortes cercanos a la zona de construcción o de la extracción de fuentes de agregados.



Figura 2.1. Capas de un determinado pavimento.

Fuente: <https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-suelos-y-sus-principales-caracteristicas-1645.html>

2.1.2 Aditivos

Un aditivo es un elemento sólido o un fluido que, al combinarse con un determinado material, modifica las propiedades mecánicas originales de este (Department of the Army, the Navy and the Air Force, 1994). Los aditivos más comunes que se utilizan para la estabilización de suelos son la cal, el cemento hidráulico, emulsiones asfálticas, polímeros, bioquímicos, electrolitos, entre otros.



Figura 2.2. Estabilización de suelo mediante aplicación de polímero.

Fuente: <https://construyendomejoresproyectos.blogspot.com/2020/06/tratamientos-quimicos-y-estabilizacion.html>

2.1.3 Estabilización

Consiste en el proceso de incorporación de uno de los aditivos mencionados anteriormente, a una subrasante en su condición existente o incluyendo la adición de un material granular, con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas de la subrasante y aportar más capacidad de soporte a las capas superiores (Elizondo, F., 2008). Entre los tipos de estabilización que existen, están los siguientes:

- 2.1.3.1 Estabilización física: Consiste en el cambio de propiedades de la subrasante por medio de mezclas en los suelos o con un material sintético, como por ejemplo una combinación de un suelo con mejores propiedades o con un geotextil aumentando la resistencia al cortante, además de controlar la erosión del mismo. Otro método es la vibración, lo cual se utiliza para aumentar la densidad del suelo provocando un mejor acomodo de las partículas.
- 2.1.3.2 Estabilización mecánica: Es aquella con la que se logra mejorar considerablemente las propiedades de un suelo sin que se produzcan reacciones químicas, como por ejemplo la compactación del suelo o por impacto (compactación dinámica).

- 2.1.3.3 Estabilización química: Esta estabilización utiliza sustancias químicas que se combinan con el suelo modificando sus propiedades al hacer reacción. Estas sustancias químicas se mencionan en el punto 2.1.2 Aditivos.



Figura 2.3. Proceso de mezclado de suelo con cemento hidráulico.
Fuente: <https://www.seceyco.com/mejoramiento-de-suelos>

2.2 Estabilización con aditivos

La estabilización de suelos es un método que se ha implementado con distintos agentes químicos, alterando las propiedades del suelo de manera positiva según las condiciones requeridas, permitiendo aprovechar los materiales de menor calidad propios del sitio sin el requerimiento de extracción y/o acarreo de materiales de mayor calidad, como cuando ocurre el proceso de sustitución.

Este proceso incluye la mezcla entre diversos tipos de suelos alcanzando una graduación deseada (estabilización mecánica) o la combinación del suelo con aditivos (estabilización física y/o química), que puedan mejorar su graduación, textura, plasticidad, capacidad de soporte, rigidez, durabilidad, etc. Con esto anterior, se desea principalmente aumentar la resistencia mecánica, haciendo que el suelo presente mayor trabazón entre las partículas, logrando una adecuada estabilidad ante las cargas, durabilidad de la capa y una variación volumétrica mínima.

Según un estudio realizado por LanammeUCR (Elizondo, F. 2009. Subrasantes: Estabilización y mejoramiento de rutas no pavimentadas), los factores que deben ser considerados en la selección de un estabilizador son, el tipo de suelo a estabilizar, el propósito para el cual la capa será utilizada, el tipo de mejora que se desea del suelo (objetivo de la estabilización), la resistencia requerida y durabilidad

de la capa estabilizada, las condiciones ambientales y el costo (Elizondo, F. 2009). Existen varios estabilizantes para la mejora de las propiedades de un tipo de suelo específico, sin embargo, se debe de considerar el tipo de aditivo a utilizar según la granulometría, plasticidad o textura del suelo.

El cemento hidráulico es uno de los más utilizados en muchos tipos de suelos, y es importante que esté bien mezclado especialmente con las partículas finas del suelo, por lo que los materiales plásticos se deben evitar. Por lo anterior, los materiales bien graduados que posean suficientes finos son los más deseados para estabilizar con cemento hidráulico. Por otro lado, la cal se utiliza para suelos con plasticidad considerable y de baja resistencia, causando una reducción en la primera propiedad, provocando a su vez aumento de trabajabilidad, disminución de expansión y aumento de resistencia. Incluso, se puede combinar el cemento hidráulico junto con la cal para lograr una estabilización más completa.

Por otro lado, los materiales bituminosos son empleados para impermeabilizar y aumentar la resistencia, generalmente para suelos arenosos y con materiales granulares, ya que se requiere que las partículas de suelo queden completamente cubiertas.

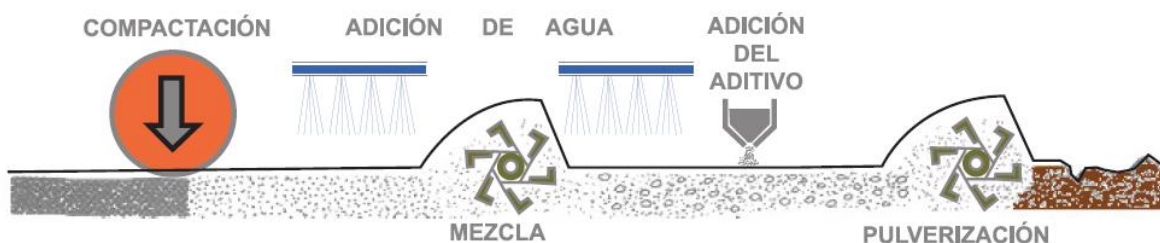


Figura 2.4. Pasos de la estabilización de suelos (de derecha a izquierda).
Fuente: Elizondo, F. 2009. Subrasantes: estabilización y mejoramiento de rutas no pavimentadas.

2.3 Normativa

Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR-2020)

La normativa vigente en nuestro país para la actividad de estabilización de subrasantes, corresponde a la sección 213. En esta sección contempla la incorporación de un aditivo a una subrasante, de manera que el producto estabilizado pueda ser utilizada como capa de ruedo para rutas de bajo volumen de tránsito (TPD menor a 500), o para formar parte de una estructura de pavimento en sustitución de materiales de préstamo o como mejorador de las propiedades mecánicas de capas granulares. Además, para materiales contempla especificaciones para cal (725.03), cemento portland (701.01), aditivos químicos (725.09), agua (725.01), emulsión asfáltica (702.03), y material de secado (703.13).

En esta sección se hace una recomendación para la escogencia del tipo de estabilizador a utilizar, dependiendo de las propiedades físicas de la subrasante existente, lo cual se muestra en la siguiente figura:

Tabla 213-01

Requisitos para selección de estabilizador

Aditivo Estabilizador	Tipo de suelo	IP (AASHTO T90)	% material pasando la Malla N°. 200 (AASHTO T27)	LL (AASHTO T89)
Cal Hidratada	Granular ⁽¹⁾	12 mín ⁽³⁾	12 mín	-
	Fino ⁽²⁾		-	
Cemento hidráulico	Granular ⁽¹⁾	12 máx	-	40 máx
	Fino ⁽²⁾		-	
Aditivos químicos	Todos		Definido por el fabricante	

Notas:

- (1) El material granular es aquel que tiene 50 % o menos de la muestra pasando la malla N°. 200.
- (2) El material fino es aquel que tiene más del 50 % de la muestra pasando la malla N°. 200.
- (3) Materiales con valores de IP menores a 12 podrán ser estabilizados con cal, siempre y cuando los resultados de la estabilización cumplan con lo especificado en la Tabla 213-02 Requisitos de resistencia mínimos requeridos para mezclas de estabilización.

Figura 2.5. Selección de estabilizante.
Fuente: Tabla 213-01, CR-2020.

Se definen además parámetros de resistencia a la compresión mínima de especímenes cilíndricos del material estabilizado, requisitos de curado, condicionamiento y el CBR mínimo. lo anterior se muestra en la siguiente figura:

Tabla 213-02

Requisitos de resistencia mínimos requeridos para mezclas de estabilización

Aditivo Estabilizador	Procedimiento para la resistencia a la compresión	Resistencia a la Compresión a los 7 días (min.)	CBR (min.) (AASHTO T193)
Cal Hidratada	ASTM D5102 (B) ⁽¹⁾	0,30 MPa	15
Cemento hidráulico	ASTM D1633 ⁽²⁾	1 MPa	
Aditivos químicos	ASTM D5102 (B) ⁽³⁾	0,30 MPa (para materiales con un 12 % mínimo pasando la malla N° 200)	
	ASTM D1633 ⁽³⁾	1 MPa (para materiales con un 50 % máximo pasando la malla N° 200)	

Notas:

Previamente a la falla se permite (cuando se requiera) un curado inicial del espécimen dentro de una bolsa impermeable por un periodo máximo de 24 horas para evitar la pérdida de humedad, posterior se deberá realizar el curado de acuerdo con lo siguiente:

(1) Curar los especímenes por 7 días a 40 °C dentro de una bolsa impermeable, someter los especímenes por 24 horas a un remojo por capilaridad (cubrir el espécimen con una tela absorbente y colocar sobre una piedra porosa u oasis. El nivel del agua debe alcanzar la parte superior de la piedra porosa y estar en contacto con la tela para lograr la absorción por capilaridad, pero el espécimen de suelo no debe estar en contacto directo con el agua), de acuerdo con el método de la Asociación Americana de la Cal (NLA, por sus siglas en inglés).

(2) 7 días de curado en cuarto húmedo, seguidos por saturación por inmersión durante 4 h, de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM D1633.

(3) El curado deberá estar de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

Figura 2.6. Requerimientos de resistencia para mezclas estabilizadas.

Fuente: Tabla 213-02, CR-2020.

Para la preparación de la superficie, *se escarificará la subrasante hasta una profundidad mínima de 15 cm. El material de la subrasante se conformará en camellones o en capas delgadas extendidas, si el espesor de la capa a estabilizar es superior a los 20 cm, entonces deberá realizarse en varias capas. Se determinará el contenido de humedad óptima y la densidad máxima de la mezcla (suelo más aditivo) de acuerdo con la norma AASHTO T99 para materiales finos o AASHTO T180 para materiales granulares. Se deberán extraer todas las partículas mayores a 10 cm (sobretamaños) (CR-2020, Sección 213.05, Pág. 300).*

Antes del comienzo de la producción del material estabilizado, se deberá realizar un tramo de prueba para verificar el diseño propuesto, y a partir de ahí demostrar que se ha logrado alcanzar la capacidad de soporte (CBR mínimo) y resistencia a la compresión deseada, densificación final y homogeneidad.

Respecto a la aplicación del aditivo, en este caso cal o cemento hidráulico, se realizará cuando el material de la subrasante tenga una humedad de al menos 3% por debajo del contenido de humedad óptimo. En caso de aditivos químicos se deberán seguir todas las recomendaciones del fabricante para una correcta aplicación.

Para el posterior proceso de compactación y acabado, esta se debe realizar inmediatamente después de haber colocado la mezcla final, la cual deberá compactarse mínimo al 95% de la densidad máxima obtenida de la mezcla estabilizada en laboratorio según sea el ensayo (AASHTO T-99 o T-180.). El equipo a utilizar debe asegurar que se dé la compactación en la totalidad del espesor de la capa. Si el espesor total de la capa a estabilizar es mayor a 20 cm se deberá estabilizar y compactar en varias capas que no superen dicho valor o bien, utilizar un equipo adecuado que garantice la densidad en toda su profundidad.

Para el curado de la mezcla de suelo-aditivo, se realizará manteniendo la superficie húmeda por 7 días, o utilizando una membrana de curado para retención de humedad. Para mezclas que contengan otros aditivos estabilizadores, el curado se realizará de acuerdo con lo especificado por el fabricante.

La aceptación final de la colocación de la mezcla estabilizada se realizará de acuerdo al control de calidad requerido, para el cual se define la siguiente figura:

Tabla 213-03

Requisitos mínimos de muestreo, ensayo y aceptación para la estabilización de la subrasante

Material o Producto (Subsección)	Tipo de aceptación (Subsección)	Propiedades o Características	Categoría	Métodos de ensayo o especificación	Frecuencia	Punto del muestreo
Fuente						
Material de subrasante sin estabilizar	Conformidad determinada o ensayada (107.04)	Límites de Atterberg	-	AASHTO T89 y 90	1 cada 2500 m ²	Material en sitio
		CBR	I	AASHTO T193	1 cada 2500 m ²	Material antes de la compactación final
		Densidad y Humedad	-	AASHTO T99 y T180	1 cada 2500 m ²	Laboratorio
		Granulometría ⁽¹⁾	-	AASHTO T27	1 cada 2500 m ²	Material en sitio
Producción						
Material de subrasante estabilizado	Conformidad determinada o ensayada (107.04)	Límites de Atterberg	-	AASHTO T89 y 90	1 cada 2500 m ²	Material en sitio
		Compresión Inconfinada	I	De acuerdo con Tabla 213-02	1 cada 2500 m ² o 1 cada día de trabajo	Material procesado antes de la compactación final
		CBR	I	AASHTO T193	1 cada 2500 m ² o 1 cada día de trabajo	Material mezclado y homogenizado antes de la compactación final
		Densidad en sitio y contenido de humedad	-	AASHTO T310 u otro procedimiento aprobado	1 cada 100 m	Subrasante compactada

Notas:

(1) Verificar el cumplimiento de la granulometría especificada en los casos en los que se requiera la inclusión de material de aporte.

Figura 2.7. Requisitos mínimos de muestreo y ensayo.

Fuente: Tabla 213-03, CR-2020.

2.4 Efectos positivos y negativos

De acuerdo con el proceso de estabilización de subrasantes utilizando agentes estabilizadores, se derivan aspectos positivos y negativos con su utilización, comparados a otros métodos de tratamiento de la subrasante. Esto según el Manual de Estabilización de Suelos con Cemento o Cal, del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (2008).

2.4.1 Aspectos positivos:

2.4.1.1 Menor tiempo en construcción:

Con el proceso de estabilización en sitio de la subrasante, es posible ignorar ciertas actividades que involucra la sustitución de suelos, como actividades de excavación y acarreo para remover el material de sitio, junto con actividades de acarreo, colocación, extendido y compactación del material de sustitución. Con la estabilización en sitio solo se requiere transportar el agente estabilizante al sitio, sin pensar en extraer y acarrear el material hasta un sitio de relleno o botadero, además de traer al sitio el material de sustitución.

2.4.1.2 Ahorro económico:

Al no realizar más cantidad de actividades como las descritas anteriormente, se ahorra costos económicos en el transporte del acarreo del material de excavación, transporte del material de sustitución al sitio, en la maquinaria de excavación y colocación que se requiere y en el costo del volumen total del material de sustitución a emplear. Además, al tener una subrasante más rígida, los espesores resultantes de las capas superiores según el diseño de pavimento serán menores, y por lo tanto menos costosas.

2.4.1.3 Menores espesores de las capas de pavimento:

Luego del proceso de estabilización de la subrasante, se mejorarán sus propiedades de capacidad soportante, por lo que el diseño de pavimentos arrojará espesores menores de las capas superiores debido a una fundación de mejor calidad y con mejor capacidad de soportar y distribuir los esfuerzos de tránsito.

2.4.1.4 Menos contaminación:

Al tener menor cantidad de actividades producto de la estabilización de la subrasante en sitio, se tendrán que utilizar menos cantidad de camiones y viajes de transporte para excavación y acarreo de materiales, por lo cual significará menos contaminación sónica y del aire, y menos congestiones viales.

2.4.1.5 Mayor aprovechamiento de los recursos:

Al realizar la estabilización de la subrasante en sitio, es posible aprovechar los recursos disponibles en el mismo proyecto, evitando excavar y transportar material de sitio hacia un botadero o relleno.

2.4.2 Aspectos negativos:

2.4.2.1 Variabilidad de los suelos:

Al estar formado nuestro país mayoritariamente por suelos con alto contenido de finos plásticos, va a haber ocasiones en que la estabilización de la subrasante no va a ser lo más viable, teniendo probablemente resultados insatisfactorios.

2.5 Ensayos de laboratorio

Debido a la naturaleza del proyecto de investigación, se necesitará de varios parámetros del suelo estabilizado y sin estabilizar, fundamentales para llegar a los resultados requeridos, por medio de ensayos de calidad como los siguientes:

2.5.1 Índice de Soporte de California (CBR) (AASHTO T 193):

Consiste en un índice de resistencia al esfuerzo cortante de un suelo en condiciones de humedad y compactación determinadas, asociado a un período de saturación en agua. Se expresa como el porcentaje de la carga necesaria para introducir un pistón cilíndrico en una muestra de suelo, comparada a la carga necesaria para introducir el mismo pistón penetre la misma profundidad en una muestra patrón definida por el ensayo.

2.5.2 Compactación de suelos (Próctor estándar / modificado) (AASHTO T 99 / T 180):

El objetivo del ensayo es la relación que existe entre el grado de humedad y el peso volumétrico máximo para un material y una energía de compactación determinados, con el fin de valorar el aumento en la resistencia y reducción de compresibilidad. Consiste en la determinación del peso por unidad de volumen de un material compactado por un procedimiento definido para diferentes contenidos de humedad.

2.5.3 Módulo resiliente de suelos (AASHTO T 307):

El módulo resiliente es una medida de la capacidad de un material de almacenar o absorber energía sin que este experimente deformación permanente (Múnica, J. & Aguiar, J., 2019). Consiste en una prueba triaxial, donde se aplica una presión de confinamiento a la muestra, a la vez que se aplica un esfuerzo desviador en forma repetida. Los resultados obtenidos indican propiedades básicas del material que pueden ser utilizadas en el análisis mecánico de sistema de multicapas en estructuras de pavimentos.

2.5.4 Análisis granulométrico (AASHTO T 11 y T 27):

Se determina cuantitativamente la distribución por tamaños de las partículas del material, con respecto a los pesos que se retienen y pasan a través de tamices estandarizados por tamaños previamente definidos.

2.5.5 Límites de Plasticidad (AASHTO T 89 y T 90):

Se determina la plasticidad del material. La plasticidad es la propiedad que presentan los suelos para poder deformarse hasta cierto límite sin romperse. Los límites de Atterberg los constituyen el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

2.5.6 Resistencia a la compresión inconfiada de materiales estabilizados (ASTM D 1633):

El principio es determinar la resistencia al corte del espécimen basado en los resultados de la prueba de compresión simple o prueba de compresión axial no confinada. Se analizará el comportamiento del material en una condición seca (espécimen mezclado y compactado con el contenido de humedad óptimo), y bajo una condición saturada (los especímenes son sometido por 24 horas a un remojo por capilaridad: el espécimen debe de cubrirse en una tela absorbente y deben de colocarse sobre una piedra porosa. El nivel del agua debe alcanzar la parte superior de la piedra y estar en contacto con la tela para lograr la absorción por capilaridad, pero el espécimen no debe de estar en contacto directo con el agua).

CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO

En el siguiente capítulo, se tratarán y detallarán las actividades que se realizaron para llevar a cabo esta investigación y lograr los objetivos propuestos. Para esto se describirá el tipo de investigación a realizar, las fuentes y orígenes de toda la información requerida, los procedimientos ejecutados para llegar hasta los resultados propuestos y los criterios para demostrar y verificar los objetivos planteados para esta investigación.

3.1 Tipo de investigación

El presente estudio tuvo como finalidad analizar el efecto que tiene el procedimiento de estabilización de la subrasante respecto al diseño de pavimentos, realizar una comparación entre aditivos definidos previamente utilizando un tipo de suelo específico, y a partir de ahí elegir el aditivo con el cual se obtuvieron mejores resultados, determinando posteriormente un diseño de pavimentos utilizando esta estabilización y comparándola con un diseño de pavimento que no toma en cuenta este procedimiento.

Como se mencionó anteriormente en el Capítulo 1, específicamente en la sección de Antecedentes, existe una escasa información en nuestro país acerca de este procedimiento de estabilización de la subrasante en el diseño de pavimentos, se toman en cuenta algunas especificaciones en el CR-2020, pero no se cuenta con información de proyectos ejecutados en el país contemplando esta estabilización. Por lo cual, con esta investigación se pretende ir generando información técnica ante la escasez de referencias, y que sea como una base para futuras investigaciones. Es por esto que este estudio se clasifica como Exploratorio.

Por otro lado, esta investigación también contempló la realización de ensayos de calidad a los materiales en análisis con el fin de caracterizarlos y determinar las propiedades mecánicas y físicas requeridas, comparando los resultados de la estabilización y evaluándolos en un determinado diseño de pavimento. Por lo anterior, este estudio también se clasifica como Descriptivo.

3.2 Fuentes y sujetos de información

La información base es la partida del proyecto de investigación, ya que sobre esta se derivaron los demás resultados. Dentro de la recolección de los datos se seleccionó un pavimento específico ya construido o en proceso de construcción, del cual se obtuvo una sección definida con su respectivo diseño. Además, también se tuvo información de las cantidades, materiales y costos de referencia utilizados en las estimaciones del proyecto dentro del cual está la sección de pavimento elegido. Para lograr esto, se aprovechó la facilidad de obtención de toda la información necesaria del proyecto en ejecución Ampliación y Rehabilitación de la Ruta Interamericana Norte Sección Barranca – Limonal Ruta Nacional N°1. Esta información fue útil para obtención de los datos necesarios para realizar el diseño optimizado considerando la estabilización de la subrasante, después de tener los resultados necesarios,

y además de poder realizar un análisis costo-beneficio entre la alternativa del diseño contemplando el proceso en estudio con el diseño original de la sección de pavimento escogida.

Se contó con el apoyo y colaboración de ingenieros tanto de la parte del Contratista como de la Unidad Supervisora del proyecto mencionado Ruta Nacional N°1 Sección Barranca-Limonal, además de la guía y asesoría del profesor Ing. Sergio Fernández Cerdas, M.Sc.

3.3 Técnicas e instrumentos de investigación

Una vez disponiendo de toda la información base mencionada anteriormente, se procedió con la toma de muestras requeridas y las técnicas a realizar para llegar a los resultados que se necesitaron, y elaborar el diseño considerando la estabilización de la subrasante. Dentro de las técnicas e instrumentos de investigación se tienen los siguientes:

3.3.1 Muestreo

Para la obtención de los materiales requeridos, se tuvo total acceso al proyecto mencionado anteriormente, del cual se tomaron las muestras del suelo o subrasante elegida para realizar la investigación. Este material se tomó de la capa de subrasante hacia abajo dentro del ancho de la vía del pavimento nuevo y el existente.

De igual manera para los aditivos a considerar, los cuales fueron cemento hidráulico, cal hidratada y emulsión asfáltica, los cuales se obtuvieron por medio del Laboratorio de Verificación de Calidad del Proyecto y de la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE).

3.3.2 Pruebas de calidad

Una vez obtenidas las muestras necesarias de suelo y aditivos, se procedió a realizar la respectiva combinación suelo - aditivo en laboratorio, utilizando varias dosificaciones de cada uno de los aditivos al momento de mezclarlo con el tipo de suelo determinado, para luego determinar la cantidad óptima.

Como primer paso, se le hicieron ensayos de caracterización al material de subrasante virgen, como límites de plasticidad, clasificación de suelos, Índice de Soporte de California (CBR), relación densidad-humedad y módulo resiliente. Posteriormente, se realizaron distintas dosificaciones de cada uno de los aditivos para la combinación con la muestra de suelo, y se le ejecutaron los mismos ensayos de calidad que se le hicieron al material de suelo virgen, para luego agregar los ensayos de módulo resiliente y resistencia a la compresión fabricando previamente especímenes cilíndricos para su posterior falla. Todo este proceso de combinación y ensayos de calidad, tanto para el material de suelo virgen como para una de las combinaciones

del suelo con los aditivos, se realizaron con la colaboración y apoyo de equipo y personal del LGC Ingeniería de Pavimentos S.A.

Cabe mencionar que, para el ensayo de Módulo Resiliente, se hizo la solicitud respectiva al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) para su realización, tres ensayos por cada combinación de aditivo y suelo, y tres para el suelo virgen.

3.4 Procesamiento y análisis de datos

Una vez obtenidos todos los resultados de las pruebas de calidad realizadas en laboratorio, se procedió a comparar y analizar cada uno de ellos de la siguiente manera:

3.4.1 Comparación de resultados

Se realizó una comparación de cada uno de los resultados de los ensayos realizados tanto al material virgen como de las combinaciones de suelo y aditivo realizadas, determinando la cantidad óptima para cada una de ellas. Teniendo estos resultados, se evaluó el efecto positivo o negativo que provocaron los aditivos al material de subrasante, determinando a su vez el aditivo más eficaz según los resultados obtenidos más favorables.

3.4.2 Diseño

Teniendo de manera definitiva el aditivo más eficaz según la comparación de resultados realizada anteriormente, se tomaron estos datos como base para proseguir con el diseño nuevo de la sección elegida de pavimento. Para esto, se hizo conforme a la metodología de diseño de pavimentos AASHTO 1993, y su correspondiente revisión de parámetros de deformación. Una vez realizado este diseño, se comparó con el diseño de pavimentos original, determinando las mejorías correspondientes según los beneficios que se obtienen con este procedimiento respecto a las referencias consultadas.

3.4.3 Análisis Costo – Beneficio

Teniendo la comparación de los diseños de pavimentos, las diferencias entre cada uno de ellos y las mejorías obtenidas, se realizó un análisis costo – beneficio considerando la información recolectada al principio del proyecto de investigación. De este análisis, se pudo tener una base sólida para determinar la factibilidad del proceso de estabilización de subrasante en el diseño de pavimentos. Se menciona que, para este análisis, se realizó únicamente teniendo en cuenta la subrasante mejorada con el aditivo que aportó resultados más favorables de módulo resiliente.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

En este capítulo se detalla la información requerida y los resultados obtenidos del estudio y de las pruebas consideradas para llevar a cabo los objetivos planteados para este proyecto. A continuación, se explicará paso a paso el diseño de pavimentos elegido para esta investigación, se verificarán los espesores indicados en el diseño según los parámetros considerados, y luego se procederá a realizar de nuevo el diseño considerando un nuevo módulo resiliente de la subrasante para observar las diferencias obtenidos en los espesores de las capas de pavimento. En los siguientes puntos, se indicará lo necesario para el posterior análisis de resultados a partir del contenido de este capítulo.

4.1 Proyecto

Para el desarrollo del presente proyecto, se seleccionó un tramo del proyecto en ejecución Ampliación y rehabilitación de la Ruta Nacional N°1 Sección Barranca – Limonal. A partir del diseño del pavimento de este proyecto, se extraerá la información para calcular el nuevo diseño considerado para posteriormente realizar la comparación respectiva. El tramo de carretera seleccionado es debido a la ubicación del muestreo de suelo, tal y como se menciona en el apartado 4.6.1; esta ubicación de muestreo se seleccionó porque específicamente en las cercanías de la estación 114+000, estaba preparado el nivel de subrasante para proseguir con la colocación de la capa inmediata superior. Para el proceso de muestreo del material, se utilizó un “back hoe” para excavar y extraer material de la capa preparada de subrasante, y un técnico de laboratorio para tomar, almacenar y transportar el material de suelo.

El proyecto se ubica entre las provincias de Guanacaste y Puntarenas, atravesando los cantones de Montes de Oro, Puntarenas y Abangares. La carretera tiene una longitud aproximada de 49.4 km, y se compone de una estructura existente en general de carpeta asfáltica de 15.0 cm, una base granular de 20.0 cm, una subbase granular de 30.0 cm y una capa de material de préstamo que oscila entre 0.0 a 120.0 cm.

A lo largo del proyecto se presenta, en su gran mayoría, una ruta de un ancho de 50 metros (derecho de vía) que permite el paso de al menos dos carriles por sentido y sus respectivas marginales.

La carretera en estudio evidencia el recorrido de vehículos pesados (aproximadamente el 30% del TPD) debido a la producción desarrollada en la zona (caña de azúcar, piña, ganadería, etc.) y ser la vía principal entre Peñas Blancas y Caldera, así como conexión a otras rutas importantes como lo son las Rutas Nacionales No. 17, No. 23, No. 27, entre otras. También se prevé que con la ampliación y el mejoramiento de esta vía se dará una mayor afluencia vehicular en la zona, más que todo de vehículos livianos, puesto que esta ruta lleva a sectores en los cuales se desarrolla fuertemente el turismo (Nicoya, Santa Cruz, Liberia) (Diseño de Pavimento Ruta Nacional No.1 Carretera Interamericana Norte, Sección Barranca-Limonal, MOPT, 2021).



Figura 4.1. Ubicación del proyecto en estudio.
Fuente: Google Maps.

4.2 Diseño de pavimento

4.2.1 Metodología y Período de Diseño

Para el proyecto seleccionado, se utilizó la Metodología de Diseño establecida en la Guía AASHTO 1993 para diseño de pavimento flexible, basándose en un período de diseño de 15 años (rural de alto volumen), según lo recomendado en la siguiente figura:

Condiciones de la ruta	Periodo de análisis (años)
Urbana de alto volumen	15 -20
Rural de alto volumen	10 -15
Pavimentada de bajo volumen	8 - 12
Superficie de agregados de bajo volumen	5 - 8

Figura 4.2. Recomendaciones para el período de análisis según tipo de ruta.
Fuente: Informe LM-PI-GM-INF-22-14, LanammeUCR.

4.2.2 Ejes Equivalentes

Debido a la variabilidad del tránsito últimamente a causa de la situación de la pandemia del COVID-19, y a la extensión del tramo de carretera, se consideraron las secciones más críticas (mayor porcentaje de vehículos pesados) ubicadas a lo largo de este tramo y se les aplicó una tasa de crecimiento para buscar una optimización del diseño. La información del Tránsito Promedio Diario fue tomada de datos oficiales de la Unidad Logística de la dirección de Planificación del MOPT, las cuales son mediciones de campo realizadas en este tramo para el año del 2015. Se adjunta la distribución del TPD para el tramo en análisis.

Estación: 506 **Ruta:** 1 **Sección:** 60230
Tramo: RÍO SAN MIGUEL (LTE CANTONAL) - CEBADILLA (QUEB. PALO)(LTE CANTONAL)
Ubicación: PUENTE RÍO NARANJO
Comentario:

Año	TPDA	Liviano	Carga Liv.	Bus	C. 2 ejes	C. 3 ejes	C. 4 ejes	C. 5/6 ejes
1987	2520	39.57	35.16	5.85	10.11	2.71	0.32	6.28
1988	2760	37.67	34.97	6.43	10.21	3.73	0	6.99
1989	3120	39.96	32.91	6.23	11.81	1.87	0.13	7.09
1990	2405	36.48	32.13	6.96	10.88	3.66	0.21	9.68
1992	2535	35.99	32.5	5.5	12.14	2.41	0.13	11.33
1995	4850	37.78	28.69	5.28	13.87	1.52	0	12.86
2006	11461	51.52	19.9	3.72	10.75	3.92	0	10.19
2009	10935	54.24	19.72	4	9.96	1.94	0	10.14
2012	11376	52.94	20.66	4.07	9.69	2.02	0	10.62
2015	14094	43.38	28.8	3.12	11.53	3.82	0.89	8.46

Figura 4.3. Distribución del Tránsito Promedio Diario para el año 2015, Sección 60230.
Fuente: Unidad Logística de la Dirección de Planificación del MOPT.

A partir de la información anterior, se calculó la tasa de crecimiento a lo largo de los años obteniendo un valor de 4.3%. Con los valores de TPD obtenidos para el 2015, calculados en un TPD presente del año 2022, un período de diseño de 15 años, un factor de carril de 0.5 y un factor de distribución de carril de 0.9, se obtiene que el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas proyectados es de 26 862 236 (tronco principal).

Para las marginales y rampas a construir a lo largo del proyecto, por criterio del diseñador se estima un 15% de la cantidad de ejes equivalentes del tronco principal. Por lo tanto, los ejes equivalentes de 8.2 toneladas proyectados para marginales y rampas es de 4 029 335.

4.3 Materiales

Para los materiales de las capas del pavimento, se consideraron las siguientes características para el diseño existente.

4.3.1 Subrasante

Se consideraron las siguientes propiedades para la subrasante según los estudios y pruebas realizadas en campo, tanto para el tronco principal como para las rampas y marginales.

Cuadro 4.1. Propiedades de la subrasante.

SECCIÓN	CBR (%) AL 91%	MÓDULO (psi)	ESTACIÓN
Tronco principal	3	4 500	107+500 a 121+000 / 96+005 a 99+000
	4	6 000	99+000 a 107+500
Marginales	4	6 000	---

Fuente: Diseño de Pavimento Ruta Nacional No.1 Carretera Interamericana Norte, Sección Barranca-Limonal, MOPT, 2021.

4.3.2 Subbase granular

Para el diseño considerado, en lo referente al módulo de la subbase, se está utilizando el valor mínimo del Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos, Carreteras y Puentes CR-2010.

Cuadro 4.2. Propiedades de la subbase granular.

SECCIÓN	CBR DISEÑO	MÓDULO (psi)
Tronco y marginales	30	15 000

Fuente: Diseño de Pavimento Ruta Nacional No.1 Carretera Interamericana Norte, Sección Barranca-Limonal, MOPT, 2021.

4.3.3 Base estabilizada con cemento hidráulico

Para el diseño considerado, en lo referente al módulo de la base estabilizada, se está utilizando el valor para una BE-25 (3 MPa) del Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos, Carreteras y Puentes CR-2010.

Cuadro 4.3. Propiedades de la base estabilizada.

SECCIÓN	RESISTENCIA DE DISEÑO (MPa)	MÓDULO (psi)
Tronco y marginales	3.0	620 000

Fuente: Diseño de Pavimento Ruta Nacional No.1 Carretera Interamericana Norte, Sección Barranca-Limonal, MOPT, 2021.

4.3.4 Mezcla asfáltica

Se propone para el presente diseño la utilización de una carpeta asfáltica que presente un módulo aproximado de 580 000 psi (mezcla asfáltica modificada con polímero), conforme a lo recomendado en el oficio LM-PI-055-2017 del LanammeUCR, tanto para el tronco principal como para las marginales.

4.4 Parámetros de diseño

De acuerdo con los datos de las secciones 4.2 y 4.3, la Metodología de Diseño para pavimentos flexibles de AASHTO 93, se consideran los siguientes parámetros de diseño para la de estructura de pavimento estudiada:

4.4.1 Factor de Distribución por Dirección

Generalmente se admite que en cada dirección circula el 50% del tránsito total, por lo que en el diseño de pavimento considerado se utilizó un valor de 0.5 para el Factor de Distribución por Dirección para el tránsito correspondiente al eje principal.

Número de carriles en ambas direcciones	LD ¹⁰
2	50
4	45
6 o más	40

Figura 4.4. Factor de Distribución por Dirección.

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento AASHTO 1993.

4.4.2 Factor de Distribución por Carril

Para carreteras de dos o más carriles por sentido, la Guía AASHTO 1993 recomienda utilizar los siguientes valores:

Número de carriles en una sola dirección	LC¹¹
1	1.00
2	0.80 – 1.00
3	0.60 – 0.80
4	0.50 – 0.75

Figura 4.5. Factor de Distribución por Carril.

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento AASHTO 1993.

En este caso en particular, para el diseño del pavimento del eje principal, por tratarse de una ruta de dos carriles por sentido, se establece para el cálculo de los ESALs de diseño del presente proyecto, un factor de distribución por carril de 0.9.

4.4.3 Factores camión para diseño estructural

Se usaron los valores máximos de la figura siguiente. Para vehículos tipo T3-S3 se aplicó el mismo valor de T3-S2.

Vehículo	Factor camión		
	Mínimo	Máximo	Promedio
<i>Pick-up</i>	0.01	0.02	0.01
<i>C2 – eje simple trasero</i>	0.01	0.07	0.26
<i>C2 – eje tandem trasero (*)</i>	0.26	0.63	0.47
<i>C3</i>	0.99	1.28	1.10
<i>Bus</i>	1.25	2.29	1.71
<i>T3-S2</i>	1.51	2.38	1.71

Figura 4.6. Factores Camión.

Fuente: Oficio DVOP-5170-07, 2007 MOPT.

4.4.4 Confiabilidad

La confiabilidad (R) puede definirse como la probabilidad de que la estructura tenga un comportamiento real igual o mejor que el previsto durante la vida de diseño adoptada. En la siguiente figura se presentan valores recomendados de confiabilidad para diferentes tipos de vías.

Tipo de carretera	Niveles de confiabilidad R	
	Suburbanas	Rurales
Autopista Regional	85 – 99.9	80 – 99.9
Troncales	80 - 99	75 – 95
Colectoras	80 - 95	50 - 80

Figura 4.7. Valores recomendados de Confiabilidad.

Fuente: Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales, SIECA, 2001.

Considerando este proyecto, de acuerdo a la figura anterior, el eje principal como una autopista regional, se establece para el presente diseño una confiabilidad del 90% para los carriles principales. Esta confiabilidad está asociada estadísticamente a un valor de desviación normal estándar (Z_R), que AASHTO muestra en la siguiente figura:

Table 4.1. Standard Normal Deviate (Z_R) Values Corresponding to Selected Levels of Reliability

Reliability, R (percent)	Standard Normal Deviate, Z_R
50	-0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

Figura 4.8. Valores de Z_R .

Fuente: Guía para Diseño de Estructuras de Pavimento, AASHTO 1993.

Para este diseño, considerando una confiabilidad del 90%, se le asocia un coeficiente de desviación normal estándar de $Z_R = -1.282$.

4.4.5 Desviación Estándar S_0

Este valor representa la desviación estándar conjunta, e incluye la desviación estándar de la ley de predicción del tránsito en el período de diseño con la desviación estándar de ley de predicción del comportamiento del pavimento, es decir, el número de ejes que puede soportar un pavimento hasta que su índice de serviciabilidad descienda por debajo de un determinado P_t (índice de serviciabilidad final). Los valores de S_0 , recomendados en la guía AASHTO 1993 son los siguientes:

Pavimentos flexibles	0.40 – 0.45
Construcción nueva	0.45
Sobrecapa	0.49

Figura 4.9. Valores de S_o .

Fuente: Guía para Diseño de Estructuras de Pavimento, AASHTO 1993.

Considerando las recomendaciones anteriores, se establece un valor de 0.45 para el pavimento flexible (“semirrígido”).

4.4.6 Serviciabilidad

La medida principal de la serviciabilidad es el Índice de Serviciabilidad del Pavimento, que varía entre 0 (pavimentos en muy mal estado) y 5 (pavimentos en perfecto estado). La selección del menor Índice de Serviciabilidad del Pavimento (PSI) permisible o Índice de Serviciabilidad Final (Pt) estará basado en el menor valor permitido antes que una rehabilitación, recarpeteo o reconstrucción sea necesaria.

Los índices inicial y final deberán estar acordes con la función de la estructura de pavimento diseñada y la calidad de construcción. Los índices de serviciabilidad final o terminal recomendados son con frecuencia del orden de 2.5 o más para vías de gran importancia y de 2 a 2.5 para las menos importantes y los iniciales del orden de 4.2 a 4.5 dependiendo de la estructura (flexible o rígida).

Para este caso en particular, por tratarse una ruta primaria catalogada para efectos de diseño, como una carretera interestatal rural, se diseñará para un índice de serviciabilidad inicial de 4.2 y final de 2.5, obteniendo un Δ PSI de 1.7. Lo anterior en concordancia también con el oficio DVOP-6152-07, MOPT.

4.4.7 Coeficiente de Drenaje

El valor del coeficiente de drenaje utilizado en el diseño de pavimento está dado por variables que son:

- a) La calidad del drenaje, que viene determinado por el tiempo que tarda el agua infiltrada en ser evacuada de la estructura del pavimento.
- b) Exposición a la saturación, que es el porcentaje de tiempo durante el año en que un pavimento está expuesto a niveles de humedad que se aproximan a la saturación. Este porcentaje depende de la precipitación media anual y de las condiciones de drenaje.

La Guía AASHTO 1993 relaciona el tiempo en que tarda el agua en ser evacuado con la calidad del drenaje de acuerdo con la siguiente figura:

Calidad del Drenaje	50% saturación	85% saturación
Excelente	2 horas	2 horas
Bueno	1 día	2 a 5 horas
Regular	1 semana	5 a 10 horas
Pobre	1 mes	de 10 a 15 horas
Muy pobre	El agua no drena	mayor de 15 horas

Figura 4.10. Niveles de Drenaje de Estructuras de Pavimento.

Fuente: Guía para Diseño de Estructuras de Pavimento, AASHTO 1993.

Además en la figura siguiente, se presentan los valores de coeficientes de drenaje (m_i), en función de la calidad del drenaje y el porcentaje de tiempo durante el año que la estructura de pavimento podría estar expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación.

Calidad del drenaje	P = % del tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación			
	< 1%	1% - 5%	5% - 25%	> 25%
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bueno	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Regular	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Pobre	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy pobre	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

Figura 4.11. Coeficientes de Drenaje, m_i .

Fuente: Guía para Diseño de Estructuras de Pavimento, AASHTO 1993.

A partir de las anteriores figuras, se establece un coeficiente de drenaje (m_i) de 1.0 para m_1 y m_2 , y de 0.9 para m_3 . Siendo m_1 el coeficiente para la carpeta asfáltica, m_2 para la capa de base estabilizada y m_3 para la capa de subbase granular.

4.4.8 Coeficiente Estructural

Para el cálculo de los coeficientes estructurales de las capas del pavimento consideradas, se tomó como base el valor de Modulo de Rigidez determinado anteriormente para cada una de estas capas. A partir de los gráficos de la Guía para Diseño de Estructuras de Pavimento AASHTO 1993, se tomó el valor de cada coeficiente estructural de la siguiente manera:

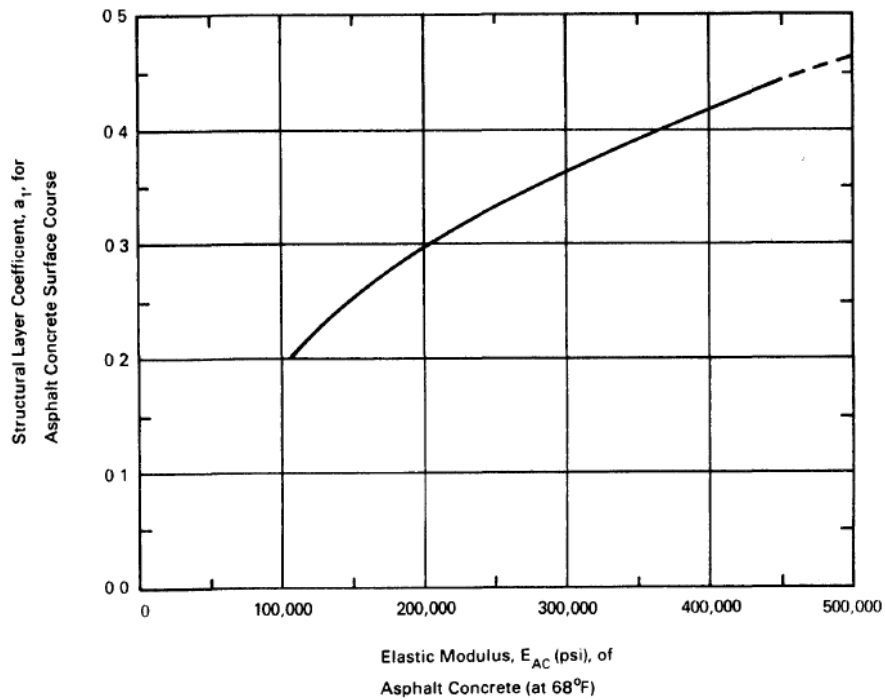
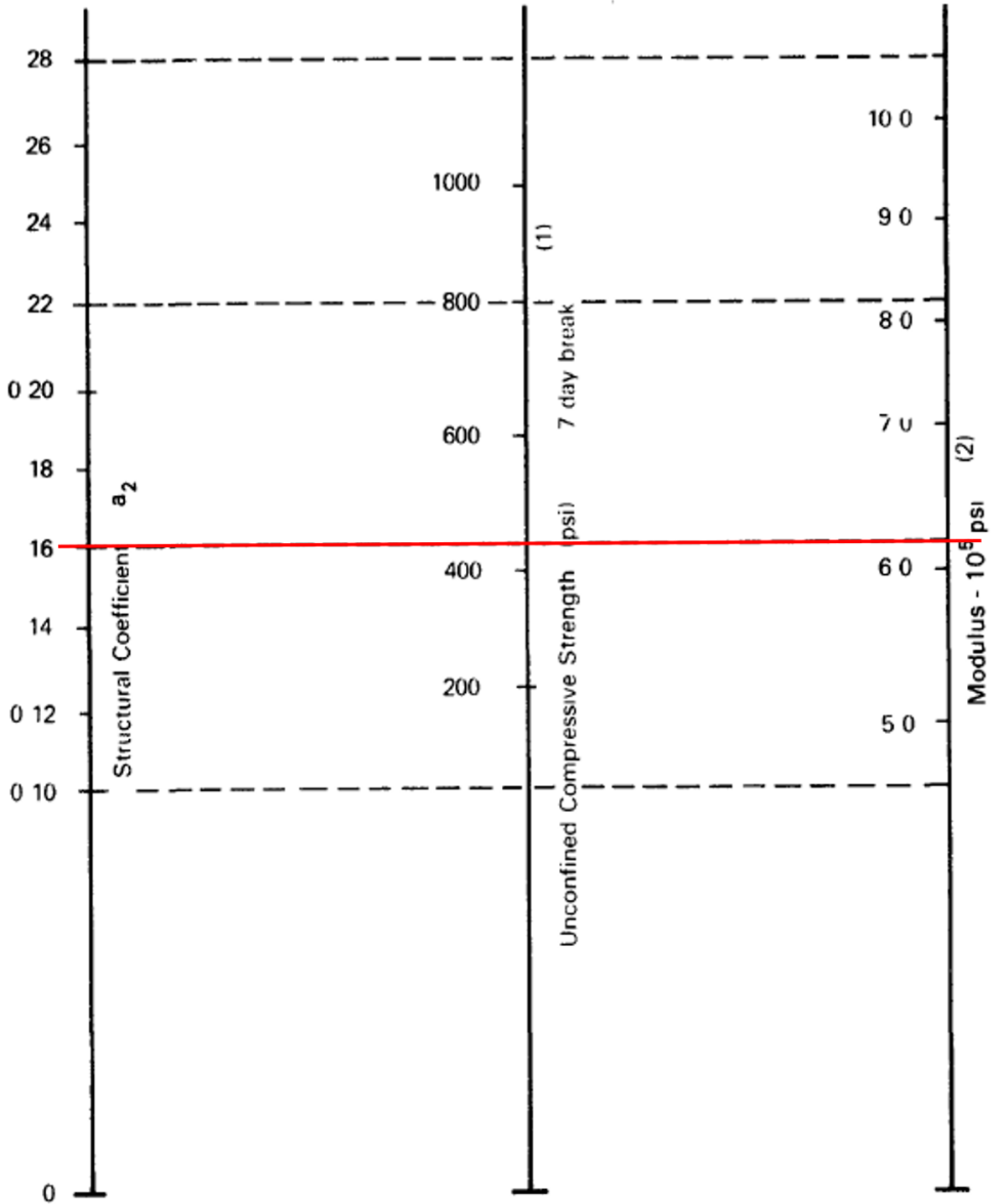
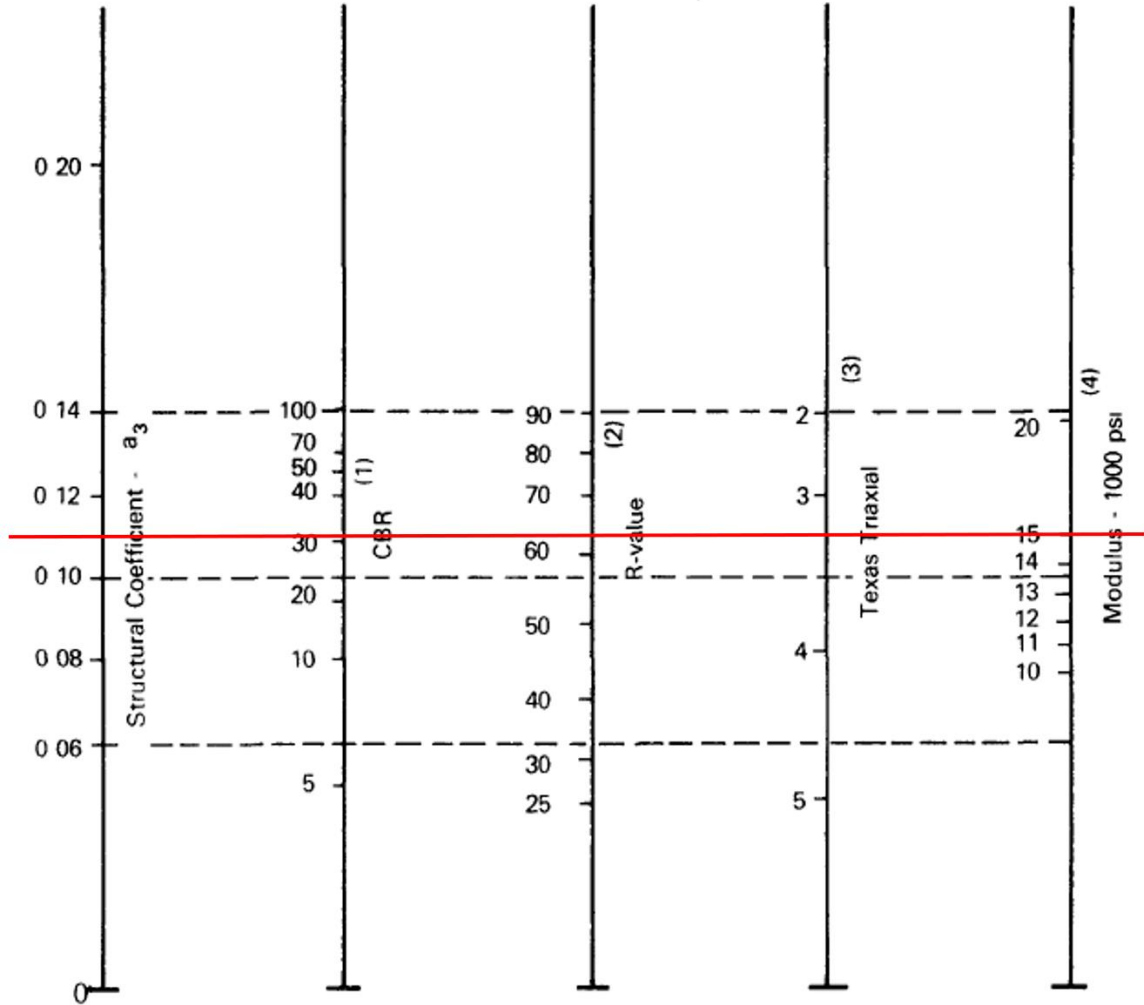


Figura 4.12. Coeficiente Estructural para Carpeta Asfáltica, a_1 .
Fuente: Guía para Diseño de Estructuras de Pavimento, AASHTO 1993.



- (1) Scale derived by averaging correlations from Illinois Louisiana and Texas
- (2) Scale derived on NCHRP project (3)

Figura 4.13. Coeficiente Estructural para Base Estabilizada, a_2 .
 Fuente: Guía para Diseño de Estructuras de Pavimento, AASHTO 1993.



- (1) Scale derived from correlations from Illinois
- (2) Scale derived from correlations obtained from The Asphalt Institute, California, New Mexico and Wyoming
- (3) Scale derived from correlations obtained from Texas
- (4) Scale derived on NCHRP project (3)

Figura 4.14. Coeficiente Estructural para Subbase Granular, a₃.
 Fuente: Guía para Diseño de Estructuras de Pavimento, AASHTO 1993.

A partir de las figuras anteriores, se obtienen los siguientes coeficientes estructurales determinados para cada una de las capas del pavimento a diseñar:

Cuadro 4.4. Coeficientes estructurales de las capas del pavimento.

CAPA	M_R : MÓDULO (psi)	COEFICIENTE ESTRUCTURAL (a)
Carpeta asfáltica	580 000	0,54
Base estabilizada	620 000	0,16
Subbase granular	15 000	0,11
Subrasante Tronco Principal	4 500	---
Subrasante Marginales	6 000	---

Fuente: Diseño de Pavimento Ruta Nacional No.1 Carretera Interamericana Norte, Sección Barranca-Limonal, MOPT, 2021.

Para el coeficiente estructural de la carpeta asfáltica, no se utilizó la Figura 4.12 para la determinación de este valor, ya que esta figura considera como máximo un valor de módulo de 500.000 psi. El coeficiente estructural para esta capa se determinó según el Oficio LM-PI-055-2017 del LanammeUCR, con fecha del 05 de junio del 2017, en donde se recomienda un valor de coeficiente estructural de 0.54 para mezclas asfálticas modificadas con polímero.

4.4.9 Resumen de datos

En el siguiente cuadro se realiza un resumen de todos los datos indicados anteriormente necesarios para el diseño de pavimento.

Cuadro 4.5. Resumen de datos considerados para el diseño de pavimento.

PARÁMETROS DE DISEÑO		
ESAL's Tronco	EJES EQUIVALENTES TRONCO PRINCIPAL (W_{18})	26 862 236
ESAL's Marginal	EJES EQUIVALENTES MARGINALES (W_{18})	4 029 335
F dirección	FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR DIRECCIÓN	0,5
F carril	FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR CARRIL	0,9
R	CONFIABILIDAD	0,9
Z_R	COEFICIENTE DE DESVIACIÓN NORMAL ESTÁNDAR	-1,282

PARÁMETROS DE DISEÑO		
S ₀	DESVIACIÓN ESTÁNDAR SEMIRRÍGIDO	0,45
PSI _i	SERVICIABILIDAD INICIAL	4,2
PSI _f	SERVICIABILIDAD FINAL	2,5
ΔPSI	DIFERENCIA SERVICIABILIDAD	1,7
m ₁	COEFICIENTE DE DRENAJE CARPETA ASFÁLTICA	1,0
m ₂	COEFICIENTE DE DRENAJE BASE ESTABILIZADA	1,0
m ₃	COEFICIENTE DE DRENAJE SUBBASE GRANULAR	0,9
a ₁	COEFICIENTE ESTRUCTURAL CARPETA ASFÁLTICA	0,54
a ₂	COEFICIENTE ESTRUCTURAL BASE ESTABILIZADA	0,16
a ₃	COEFICIENTE ESTRUCTURAL SUBBASE GRANULAR	0,11

Fuente: Diseño de Pavimento Ruta Nacional No.1 Carretera Interamericana Norte, Sección Barranca-Limonal, MOPT, 2021.

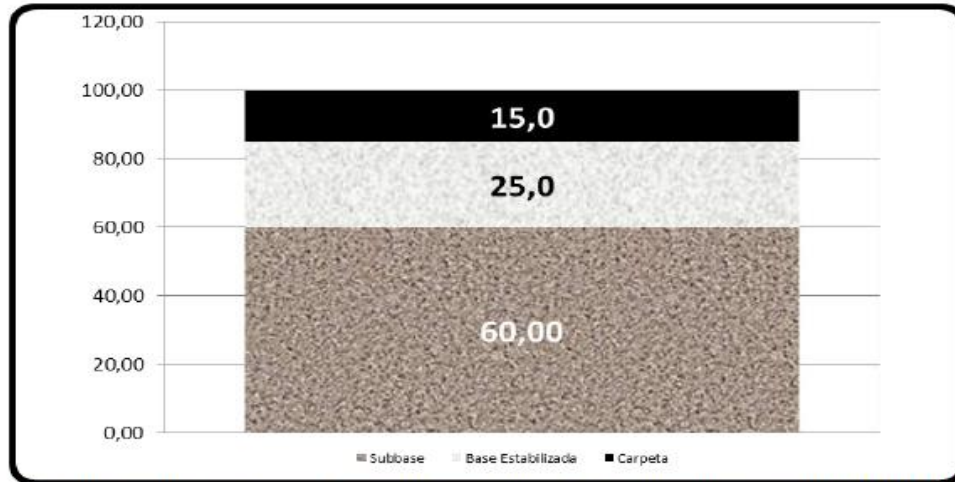
4.4.10 Espesores de las capas de pavimento

Para el cálculo de los espesores de las capas de pavimento, se utilizó la ecuación siguiente para determinar el Número Estructural (SN) de cada una de ellas. Esta ecuación es según la Guía para Diseño de Estructuras de Pavimento, AASHTO 1993.

$$\log_{18}W_{18} = Z_R * S_0 + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\left(\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)\right)}{0.40 + \left(\frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}\right)} + 2.32 * \log_{10}M_R - 8.07$$

Ecuación 4.1. Ecuación general diseño de pavimentos AASHTO 93.
Fuente: Guía para Diseño de Estructuras de Pavimento, AASHTO 1993.

A partir de la ecuación anterior y de los números estructurales calculados,. Se determinaron los espesores de cada una de las capas del pavimento, tanto para el tronco principal como de las marginales. En las siguientes figuras se muestran los espesores resultantes:



La estructura anterior se propone para el tramo 3 (Barranca – Judas de Chomes) del km 96+005 (inicio de proyecto) al km 99+000 y del km 107+500 al km 121+000.

Figura 4.15. Estructura de pavimento del diseño original para tronco principal, espesores en cm.

Fuente: Diseño de Pavimento Ruta Nacional No.1 Carretera Interamericana Norte, Sección Barranca-Limonal, MOPT, 2021.

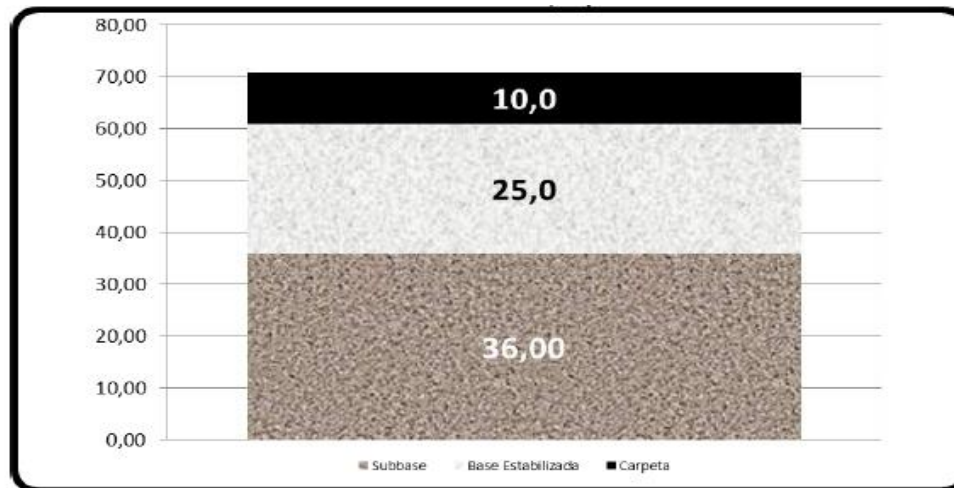


Figura 4.16. Estructura de pavimento del diseño original para marginales, espesores en cm.

Fuente: Diseño de Pavimento Ruta Nacional No.1 Carretera Interamericana Norte, Sección Barranca-Limonal, MOPT, 2021.

Para el caso del tronco principal, se trabajará únicamente con los espesores indicados en la Figura 4.15, que comprenden el tramo de la estación 107+500 a la 121+000, tramo del cual se tomó la muestra de suelo (114+000) para la realización de los ensayos considerados en el presente estudio. Para las marginales, son los mismos espesores de la Figura 4.16 para toda la longitud de la carretera.

Respecto a las capas del diseño de pavimento original aprobado para el proyecto, es importante aclarar que no hubo capa de material de préstamo dentro del paquete estructural, pero este si se utilizó en secciones donde la subrasante tuviera malas condiciones, donde se realizó la sustitución con material de préstamo hasta el nivel de subrasante.

4.5 Verificación de diseño de pavimento

Como parte de la revisión del diseño de referencia, detallado anteriormente, se realizó la verificación de este siguiendo todo el procedimiento de cálculo establecido por la Guía para Diseño de Estructuras de Pavimento, AASHTO 1993, utilizando los mismos datos iniciales indicados anteriormente.

Para la determinación de los espesores finales de cada una de las capas de pavimento, en función del número estructural iterado y el correspondiente coeficiente estructural por capa, se utilizarán las siguientes ecuaciones:

$$SN_1 = a_1 * h_1$$

$$SN_2 = a_1 * h_1 + a_2 * m_2 * h_2$$

$$SN_3 = a_1 * h_1 + a_2 * m_2 * h_2 + a_3 * m_3 * h_3$$

Ecuación 4.2. Determinación del número estructural (SN).

Fuente: Guía para Diseño de Estructuras de Pavimento, AASHTO 1993.

Para facilitar el proceso de cálculo e iteración con la finalidad de determinar los números estructurales de cada una de las capas del pavimento, se dividirá la Ecuación 1 de la siguiente forma:

$$\log_{18} W_{18} = \underbrace{Z_R}_{\text{Ec.1}} * \underbrace{S_0}_{\text{Ec.2}} + \underbrace{9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.20}_{\text{Ec.3}} + \underbrace{\frac{\left(\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)\right)}{0.40 + \left(\frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}\right)}}_{\text{Ec.4}} + \underbrace{2.32 * \log_{10} M_R - 8.07}_{\text{Ec.5}}$$

Ecuación 4.1. Ecuación general diseño de pavimentos AASHTO 93.

Fuente: Guía para Diseño de Estructuras de Pavimento, AASHTO 1993.

$$Ec. 1 = Ec. 2 + Ec. 3 + Ec. 4 + Ec. 5$$

Ecuación 4.3. Simplificación de la Ecuación 1.

Con la simplificación de la Ecuación 1, resulta más sencillo desarrollar los cálculos e iterar de una manera más eficiente, para así poder generar la siguiente memoria de cálculo para la verificación de los espesores de pavimento, tanto para el tronco principal como para la marginal.

Cuadro 4.6. Memoria de cálculo para diseño de pavimento del tronco principal.

TRONCO PRINCIPAL

DATOS GENERALES	
W18 Tronco	26.862.236
ZR	-1,282
S0	0,45
Δ PSI	1,7
Mód. CA (psi)	580.000
Mód. BE (psi)	620.000
Mód. SB (psi)	15.000
Mód. SR (psi)	4.500

SN1	1,0133
SN2	4,5285
SN3	6,6472

CARPETA ASFÁLTICA		BASE ESTABILIZADA		SUBBASE GRANULAR	
Módulo 1 (psi)	620.000	Módulo 2 (psi)	15.000	Módulo 3 (psi)	4.500
a (1)	0,54	a (2)	0,16	a (3)	0,11
m (1)	1,00	m (2)	1,00	m (3)	0,90
SN (1)	1,01	SN (2)	4,53	SN (3)	6,65
ECUACIÓN		ECUACIÓN		ECUACIÓN	
Ec.1	7,4291	Ec.1	7,4291	Ec.1	7,4291
Ec.2	-0,5769	Ec.2	-0,5769	Ec.2	-0,5769
Ec.3	2,6446	Ec.3	6,7508	Ec.3	8,0696
Ec.4	-0,0068	Ec.4	-0,3633	Ec.4	-0,4690
Ec.5	5,3683	Ec.5	1,6185	Ec.5	0,4055
\sum Ec.2 a 5	7,4292	\sum Ec.2 a 5	7,4292	\sum Ec.2 a 5	7,4292
Ec.1 - \sum Ec	0,0000	Ec.1 - \sum Ec	0,0000	Ec.1 - \sum Ec	0,0000
CUMPLE	SI	CUMPLE	SI	CUMPLE	SI
ESPESOR CALCULADO		ESPESOR CALCULADO		ESPESOR CALCULADO	
h (1) (in)	1,88	h (2) (in)	8,37	h (3) (in)	19,02
h (1) (cm)	4,77	h (2) (cm)	21,26	h (3) (cm)	48,32
ESPESOR PROPUESTO		ESPESOR PROPUESTO		ESPESOR PROPUESTO	
h (1) (in)	5,91	h (2) (in)	9,84	h (3) (in)	19,69
h (1) (cm)	15,00	h (2) (cm)	25,00	h (3) (cm)	50,00

Cuadro 4.7. Memoria de cálculo para diseño de pavimento de la marginal.

MARGINALES

DATOS GENERALES	
W18 Marginal	4.029.335
ZR	-1,282
S0	0,45
ΔPSI	1,7
Mód. CA (psi)	580.000
Mód. BE (psi)	620.000
Mód. SB (psi)	15.000
Mód. SR (psi)	6.000

SN1	0,6421
SN2	3,3540
SN3	4,6848

CARPETA ASFÁLTICA		BASE ESTABILIZADA		SUBBASE GRANULAR	
Módulo 1 (psi)	620.000	Módulo 2 (psi)	15.000	Módulo 3 (psi)	6.000
a (1)	0,54	a (2)	0,16	a (3)	0,11
m (1)	1,00	m (2)	1,00	m (3)	0,90
SN (1)	0,64	SN (2)	3,35	SN (3)	4,68
ECUACIÓN		ECUACIÓN		ECUACIÓN	
Ec.1	6,6052	Ec.1	6,6052	Ec.1	6,6052
Ec.2	-0,5769	Ec.2	-0,5769	Ec.2	-0,5769
Ec.3	1,8161	Ec.3	5,7800	Ec.3	6,8641
Ec.4	-0,0024	Ec.4	-0,2163	Ec.4	-0,3773
Ec.5	5,3683	Ec.5	1,6185	Ec.5	0,6953
∑ Ec.2 a 5	6,6052	∑ Ec.2 a 5	6,6053	∑ Ec.2 a 5	6,6052
Ec.1 - ∑ Ec	0,0000	Ec.1 - ∑ Ec	0,0000	Ec.1 - ∑ Ec	0,0000
CUMPLE	SI	CUMPLE	SI	CUMPLE	SI
ESPESOR CALCULADO		ESPESOR CALCULADO		ESPESOR CALCULADO	
h (1) (in)	1,19	h (2) (in)	7,68	h (3) (in)	9,94
h (1) (cm)	3,02	h (2) (cm)	19,49	h (3) (cm)	25,25
ESPESOR PROPUESTO		ESPESOR PROPUESTO		ESPESOR PROPUESTO	
h (1) (in)	3,94	h (2) (in)	9,84	h (3) (in)	13,78
h (1) (cm)	10,00	h (2) (cm)	25,00	h (3) (cm)	35,00



Figura 4.17. Estructura verificada para tronco principal, espesores en cm.



Figura 4.18. Estructura verificada para marginales, espesores en cm.

En el caso de la estructura verificada del tronco principal, el espesor de subbase granular es suficiente con 50 cm de espesor, debido a que el requerimiento son 48.32 cm. Por la cercanía entre estos dos valores de espesor, se decide utilizar 10 cm más para esta capa, para un total de 60 cm. Para el caso de las marginales, para mantener un espesor de base estabilizada igual (con 20 cm es suficiente pero se decide utilizar 25 cm) al del tronco principal para evitar complicaciones a la hora de los procesos constructivos, y un espesor mínimo aceptable de 10 cm para carpeta asfáltica, el espesor de subbase granular suficiente es de 30 cm contra un valor mínimo calculado de 25.25 cm, sin embargo, se decide utilizar 5 cm más del espesor suficiente como un tipo de factor de seguridad o sobrediseño.

4.6 Resultados de los ensayos de laboratorio

En esta sección, se presentan los ensayos realizados al material de suelo tomado del proyecto, junto con los ensayos realizados a este mismo material junto con los aditivos considerados para su mejoramiento (cemento hidráulico, cal hidratada y emulsión asfáltica). Entre los ensayos realizados destacan Análisis Granulométrico, Límites de Plasticidad o de Atterberg, Relaciones Densidad – Humedad e Índice de Soporte de California (CBR).

4.6.1 Suelo Natural

La muestra de suelo tomada en el proyecto para realizar el análisis de mejoramiento con aditivos se extrajo específicamente en la estación 114+000 aproximadamente, cuando en dicho sector se encontraba a nivel de subrasante, previo a la colocación de material de subbase granular. Se adjuntan fotografías del proceso de muestreo.



Figura 4.19. Sitio de muestreo de material de subrasante.



Figura 4.20. Sitio de muestreo de material de subrasante.



Figura 4.21. Sitio de muestreo de material de subrasante.



Figura 4.22. Sitio de muestreo de material de subrasante.



Figura 4.23. Ensayo de CBR en sitio con DCP al material de subrasante.



Figura 4.24. Extendido y secado de material de subrasante previo a los ensayos.

Luego del muestreo del material y de su correspondiente reducción, se procedió a realizarle ensayos para determinar propiedades importantes como Índice de Soporte de California (CBR), Relación Densidad – Humedad, Límites de plasticidad y Granulometría, y poder caracterizar de una mejor manera la muestra de suelo. Los resultados se muestran a continuación:

Cuadro 4.8. Resultados de ensayos realizados al suelo sin estabilizar.

SUELO (MATERIAL DE SUBRASANTE)			
Fecha de Muestreo			2022-02-11
Número de Muestra			13-1875-2022
Referencia	Ensayo	Resultados	
		LGC	
AASHTO T 11 / AASHTO T 27	Análisis Granulométrico	N° Tamiz	% Pasando
		25,4 mm	100
		19,0 mm	100
		12,7 mm	97
		9,5 mm	96
		4,75 mm	96
		2,00 mm	95
		0,425 mm	92
		0,075 mm	83,6
AASHTO T 193	Índice de Soporte de California	CBR 0,1 in, 91% compactación	3,5%
		CBR 0,1 in, 95% compactación	5,9%
AASHTO T 99	Relación Densidad - Humedad (Esfuerzo Estándar)	Densidad	1490 kg/m ³
		Humedad	25,8%
AASHTO T 89 / AASHTO T 90	Límites de Plasticidad	LL (%)	61,0
		LP (%)	33,0
		IP (%)	28,0
AASHTO T 145 / ASTM D 2487	Clasificación de Suelos	AASHTO	A-7-5 (20)
		SUCS	MH

Fuente: Informe LGC 13-R002-2022, Anexo 8.1.

Posterior al proceso de muestreo y de los ensayos realizados al material de suelo sin estabilizar, se procedió con la preparación de la muestra para su combinación con los aditivos considerados para el análisis del presente documento. Como parte de la obtención de datos para el análisis y comparación de las combinaciones, se utilizaron porcentajes de aditivo (cal hidratada, cemento hidráulico, emulsión) del 2%, 4%, 6%, y 8%. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

4.6.2 Combinación de suelo con cal hidratada

El proceso de incorporación de la cal hidratada fue por peso (porcentaje), dependiendo de la cantidad de suelo que se utilizó para cada una de las combinaciones. Por ejemplo, para un 3% de cal hidratada teniendo 4000 g de suelo, se adicionan 120 g de cal.

Cuadro 4.9. Límites de plasticidad de las combinaciones con cal.

LÍMITES DE PLASTICIDAD			
Referencia	AASHTO T 89 / AASHTO T 90		
Aditivo	CAL		
Contenido (%)	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
0	61	33	28
2	57	36	21
4	53	35	18
6	51	35	16
8	45	32	13

Fuente: Informe LGC 13-R002-2022, Anexo 8.1.

Cuadro 4.10. Relaciones Densidad – Humedad de las combinaciones con cal.

RELACIÓN DENSIDAD - HUMEDAD (PRÓCTOR)		
Referencia	AASHTO T 99	
Aditivo	CAL	
Contenido (%)	Densidad (kg/m³)	Humedad (%)
0	1490	25,8
2	1429	27,2
4	1403	31,5
6	1387	29,1
8	1313	31,3

Fuente: Informe LGC 13-R002-2022, Anexo 8.1.

Cuadro 4.11. CBR de las combinaciones con cal.

ÍNDICE DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)		
Referencia	AASHTO T 193	
Aditivo	CAL HIDRATADA	
Contenido (%)	CBR 0,1'' (%) 91% de compactación	CBR 0,1'' (%) 95% de compactación
0	3,5	5,9
2	3,8	6,3
4	13,7	21,9
6	21,0	36,0
8	29,0	46,0

Fuente: Informe LGC 13-R002-2022, Anexo 8.1.

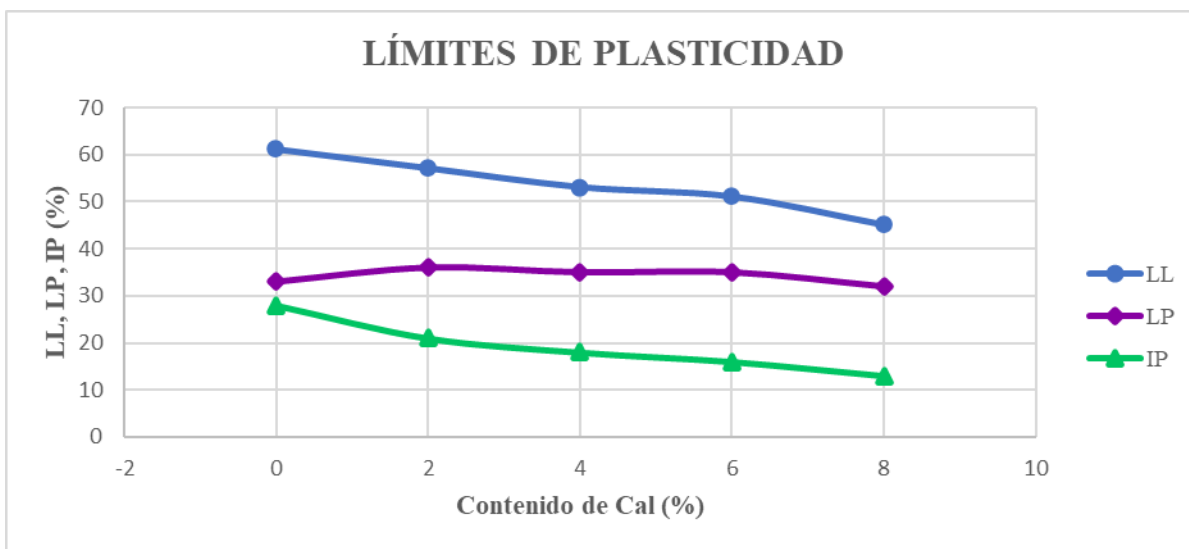


Figura 4.25. Límites de plasticidad de las combinaciones con cal.

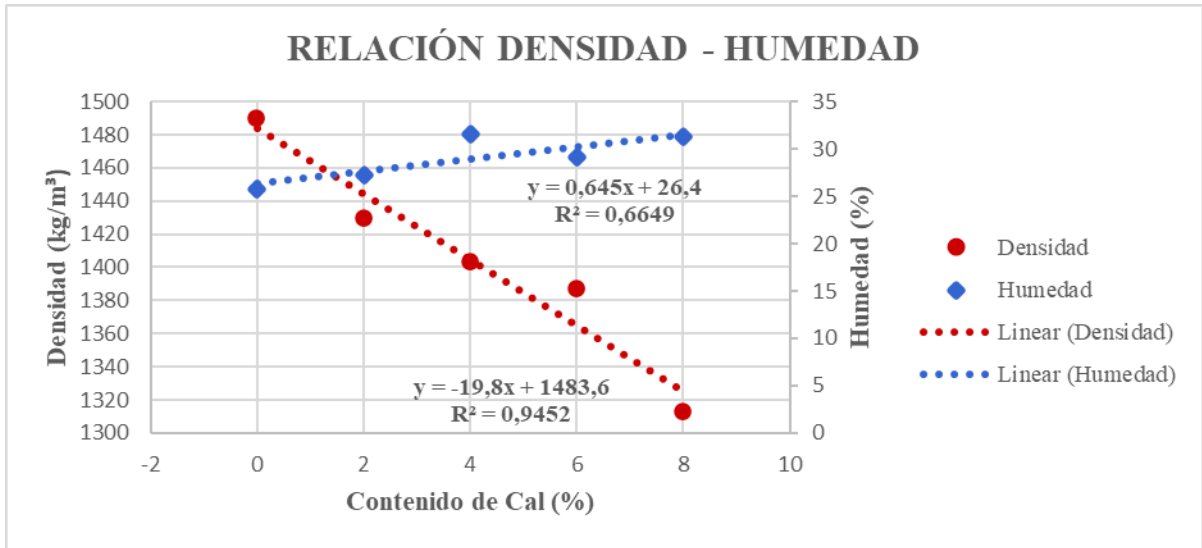


Figura 4.26. Relaciones Densidad – Humedad de las combinaciones con cal.

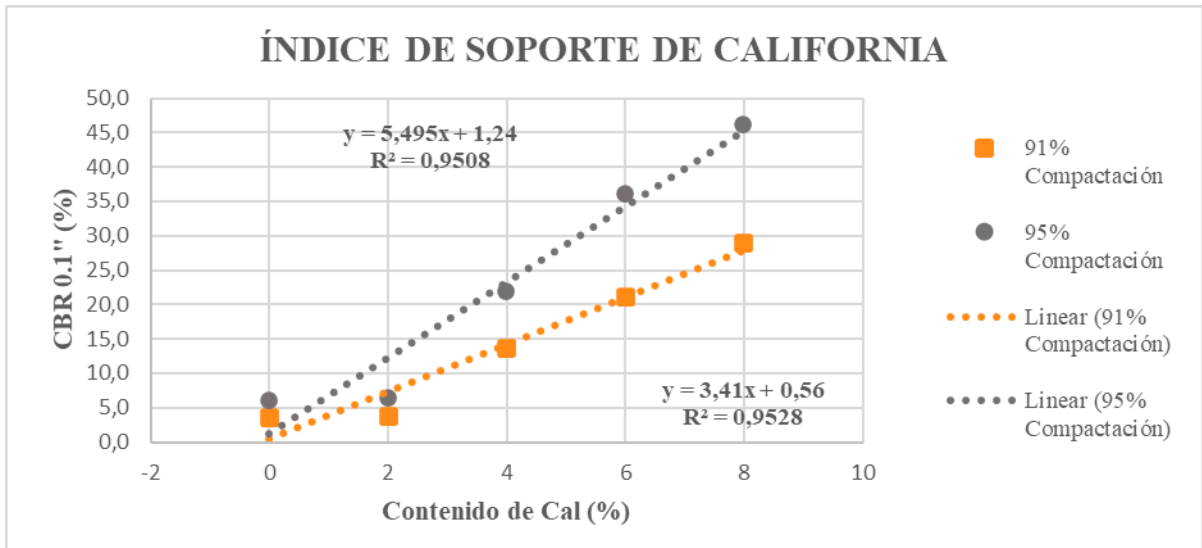


Figura 4.27. CBR de las combinaciones con cal.

4.6.3 Combinación de suelo con cemento hidráulico CEMEX UG

El proceso de incorporación del cemento hidráulico fue por peso (porcentaje), dependiendo de la cantidad de suelo que se utilizó para cada una de las combinaciones. Por ejemplo, para un 3% de cemento hidráulico teniendo 4000 g de suelo, se adicionan 120 g de cemento hidráulico.

Cuadro 4.12. Límites de plasticidad de las combinaciones con cemento hidráulico.

LÍMITES DE PLASTICIDAD			
Referencia	AASHTO T 89 / AASHTO T 90		
Aditivo	CEMENTO HIDRÁULICO		
Contenido (%)	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
0	61	33	28
2	49	29	20
4	47	31	16
6	44	32	12
8	42	35	7

Fuente: Informe LGC 13-R002-2022, Anexo 8.1.

Cuadro 4.13. Relaciones Densidad – Humedad de las combinaciones con cemento hidráulico.

RELACIÓN DENSIDAD - HUMEDAD (PRÓCTOR)		
Referencia	AASHTO T 99	
Aditivo	CEMENTO HIDRÁULICO	
Contenido (%)	Densidad (kg/m³)	Humedad (%)
0	1490	25,8
2	1515	20,4
4	1498	23,0
6	1482	24,8
8	1476	22,0

Fuente: Informe LGC 13-R002-2022, Anexo 8.1.

Cuadro 4.14. CBR de las combinaciones con cemento hidráulico.

ÍNDICE DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)		
Referencia	AASHTO T 193	
Aditivo	CEMENTO HIDRÁULICO	
Contenido (%)	CBR 0,1" (%) 91% de compactación	CBR 0,1" (%) 95% de compactación
0	3,5	5,9
2	4,1	6,7
4	14,7	24,9
6	23,0	37,0
8	43,0	72,0

Fuente: Informe LGC 13-R002-2022, Anexo 8.1.

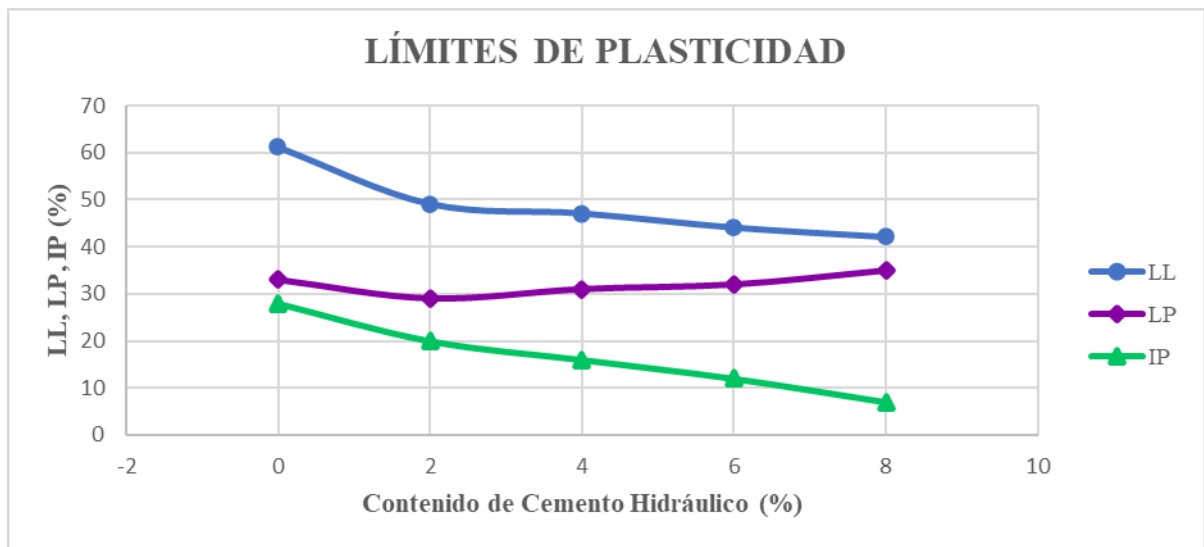


Figura 4.28. Límites de plasticidad de las combinaciones con cemento hidráulico.

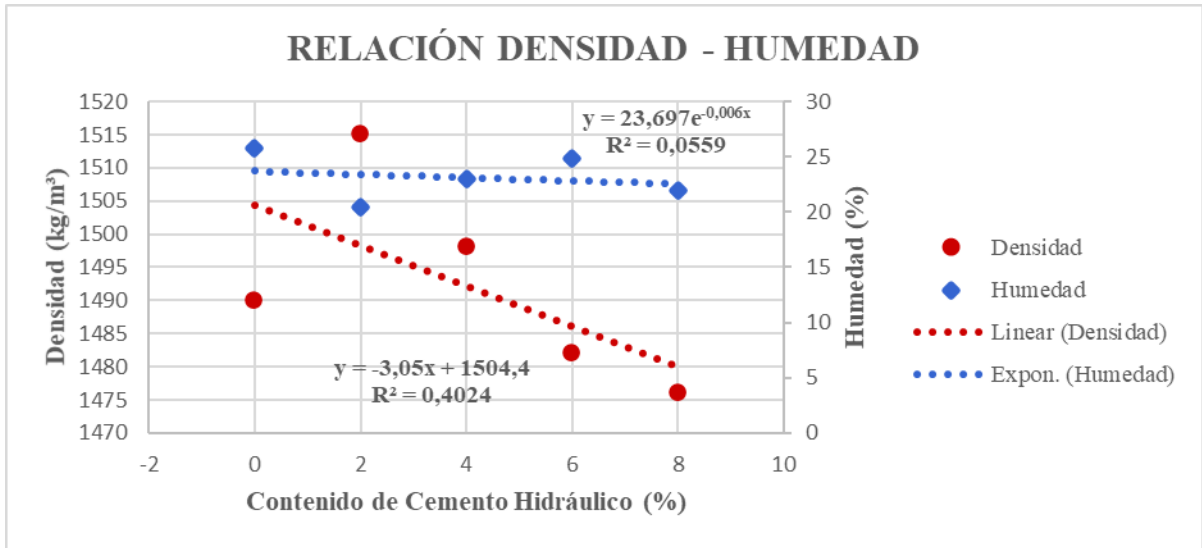


Figura 4.29. Relaciones Densidad – Humedad de las combinaciones con cemento hidráulico.

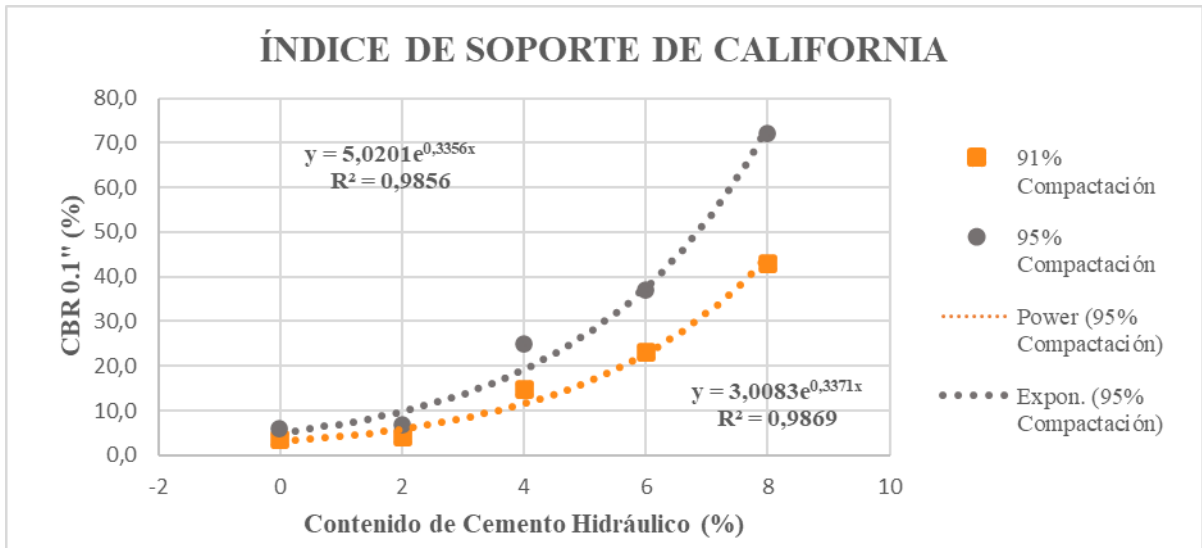


Figura 4.30. CBR de las combinaciones con cemento hidráulico.

4.6.4 Combinación de suelo con emulsión asfáltica de rompimiento lento

Cuadro 4.15. Límites de plasticidad de las combinaciones con emulsión asfáltica.

LÍMITES DE PLASTICIDAD			
Referencia	AASHTO T 89 / AASHTO T 90		
Aditivo	EMULSIÓN ASFÁLTICA		
Contenido (%)	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
0	61	33	28
2	---	---	---
4	---	---	---
6	---	---	---
8	---	---	---

5 Fuente: Informe LGC 13-R002-2022, Anexo 8.1.

Respecto a la realización de los ensayos de límites de plasticidad para la combinación del suelo con emulsión asfáltica de rompimiento lento, el técnico de laboratorio encargado de las pruebas indicó que, en el momento de mezclar el suelo con la emulsión asfáltica para este ensayo, la mezcla se comportaba de una manera muy poco trabajable, por lo que el ensayo no se pudo ejecutar en su totalidad. Por lo que únicamente se muestran los resultados de densidades y de CBR obtenidos.

Cuadro 4.16. Relaciones Densidad – Humedad de las combinaciones con emulsión asfáltica.

RELACIÓN DENSIDAD - HUMEDAD (PRÓCTOR)		
Referencia	AASHTO T 99	
Aditivo	EMULSIÓN ASFÁLTICA	
Contenido (%)	Densidad (kg/m³)	Humedad (%)
0	1490	25,8
2	1476	26,0
4	1452	27,5
6	1396	32,5
8	1325	32,2

Fuente: Informe LGC 13-R002-2022, Anexo 8.1.

Cuadro 4.17. CBR de las combinaciones con emulsión asfáltica.

ÍNDICE DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR)		
Referencia	AASHTO T 193	
Aditivo	EMULSIÓN ASFÁLTICA	
Contenido (%)	CBR 0,1" (%) 91% de compactación	CBR 0,1" (%) 95% de compactación
0	3,5	5,9
2	2,6	4,2
4	3,3	4,2
6	3,6	5,8
8	3,6	6,2

Fuente: Informe LGC 13-R002-2022, Anexo 8.1.

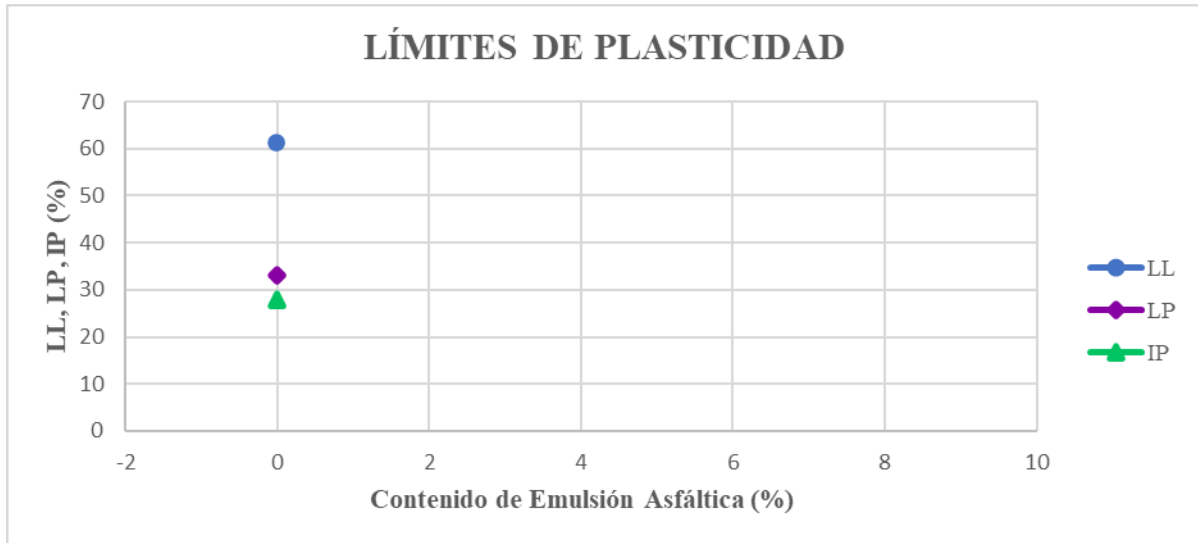


Figura 4.31. Límites de plasticidad de las combinaciones con cemento hidráulico.

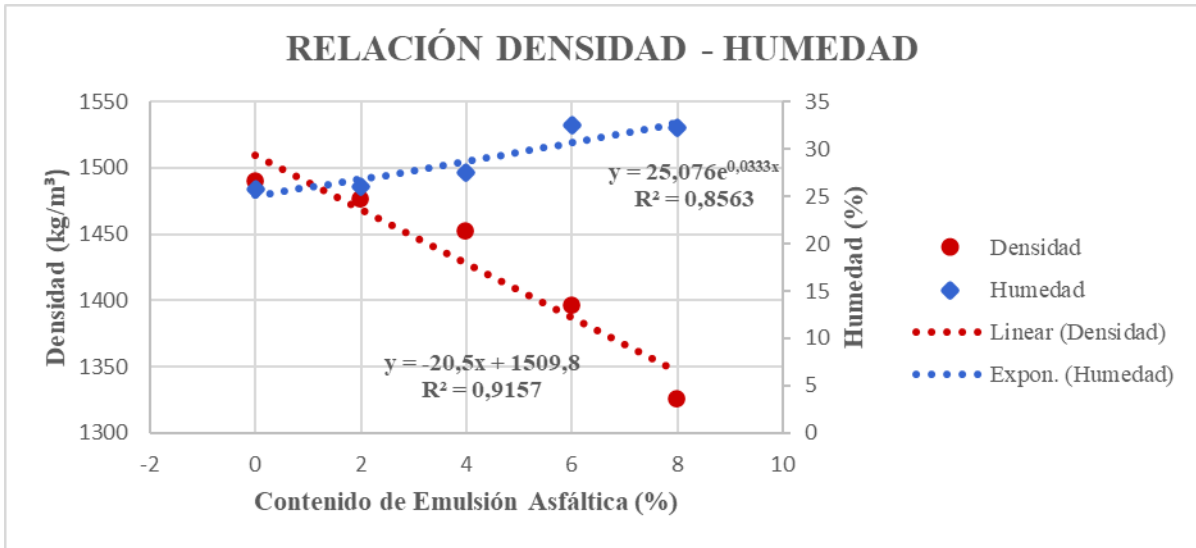


Figura 4.32. Relaciones Densidad – Humedad de las combinaciones con emulsión asfáltica.

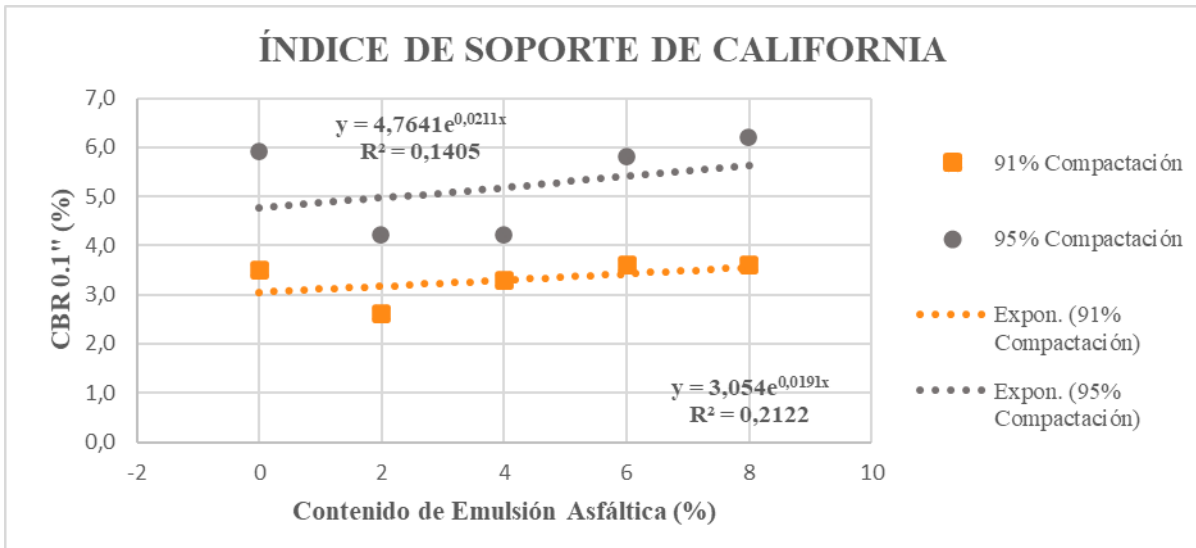


Figura 4.33. CBR de las combinaciones con emulsión asfáltica.

En la figura anterior, se observa que los resultados obtenidos de CBR utilizando contenidos de emulsión asfáltica de 2%, 4%, 6% y 8%, no variaron en gran medida como sí ocurrió con los otros aditivos considerados en este proyecto, no hubo un aporte significativo con este aditivo para este caso. Esto se pudo deber al proceso de sumergido en agua al cual se someten los especímenes para el ensayo de CBR (96 horas), y que esto haya afectado a la reacción de la emulsión asfáltica combinada con el material de suelo; o una ocurrencia temprana del rompimiento de la emulsión.

El proceso de incorporación de la emulsión asfáltica fue por peso (porcentaje), dependiendo de la cantidad de suelo que se utilizó para cada una de las combinaciones. Al momento del mezclado de los componentes, se tuvo el cuidado de incorporar la cantidad correcta de agua considerando el agua que contiene la emulsión (en el certificado de calidad de la emulsión se indica el porcentaje de agua). El rompimiento de la emulsión asfáltica se identifica fácilmente cuando la mezcla cambia de un color oscuro a uno más claro.

5.1 Dosificación empleada

Con base en los resultados de los ensayos mostrados en la sección anterior, se determinó un porcentaje o contenido único de aditivo para fabricar los especímenes para el ensayo de módulo resiliente. Por tal razón se generaron graficas de dispersión de mejor ajuste para llegar a un contenido de aditivo base. Estas gráficas se aprecian entre las figuras 4.25 y 4.33.

Las gráficas fabricadas con los ensayos realizados de CBR fueron las bases principales para determinar los contenidos óptimos de aditivo, según la siguiente figura:

Tabla 213-02

Requisitos de resistencia mínimos requeridos para mezclas de estabilización

Aditivo Estabilizador	Procedimiento para la resistencia a la compresión	Resistencia a la Compresión a los 7 días (mín.)	CBR (mín.) (AASHTO T193)
Cal Hidratada	ASTM D5102 (B) ⁽¹⁾	0,30 MPa	15
Cemento hidráulico	ASTM D1633 ⁽²⁾	1 MPa	
Aditivos químicos	ASTM D5102 (B) ⁽³⁾	0,30 MPa (para materiales con un 12 % mínimo pasando la malla N° 200)	
	ASTM D1633 ⁽³⁾	1 MPa (para materiales con un 50 % máximo pasando la malla N° 200)	

Notas:

Previamente a la falla se permite (cuando se requiera) un curado inicial del espécimen dentro de una bolsa impermeable por un periodo máximo de 24 horas para evitar la pérdida de humedad, posterior se deberá realizar el curado de acuerdo con lo siguiente:

(1) Curar los especímenes por 7 días a 40 °C dentro de una bolsa impermeable, someter los especímenes por 24 horas a un remojo por capilaridad (cubrir el espécimen con una tela absorbente y colocar sobre una piedra porosa u oasis. El nivel del agua debe alcanzar la parte superior de la piedra porosa y estar en contacto con la tela para lograr la absorción por capilaridad, pero el espécimen de suelo no debe estar en contacto directo con el agua), de acuerdo con el método de la Asociación Americana de la Cal (NLA, por sus siglas en inglés).

(2) 7 días de curado en cuarto húmedo, seguidos por saturación por inmersión durante 4 h, de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM D1633.

(3) El curado deberá estar de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

Figura 4.34. Requerimientos de resistencia para mezclas de suelo estabilizadas.

Fuente: Tabla 213-2, CR-2020.

Utilizando la figura anterior, se estableció como valor mínimo un CBR de 15%. Por lo que en las gráficas generadas a partir de los ensayos de CBR, se asoció el contenido de aditivo con el cual se obtiene un CBR de 15%, obteniendo los siguientes porcentajes:

Cuadro 4.18. Dosificaciones para las combinaciones de suelo con aditivo.

Aditivo	Contenido para CBR de 15% (%)	Humedad para CBR de 15% (%)	Densidad para CBR de 15% (kg/m ³)
Cal hidratada	4,23	29,13	1399,75
Cemento hidráulico	4,77	23,03	1489,86
Emulsión asfáltica	6,00(*)	30,62	1386,80

(*) Para el porcentaje de dosificación de emulsión asfáltica, se decidió utilizar 6.00%, debido a que fue el contenido con el que se obtuvo un CBR mayor.

5.2 Módulo resiliente de suelos

El módulo resiliente es una medida de la capacidad de un material de almacenar o absorber energía sin que este experimente deformación permanente (Múnera, J. & Aguiar, J., 2019). Consiste en una prueba triaxial, donde se aplica una presión de confinamiento a la muestra, a la vez que se aplica un esfuerzo desviador en forma repetida durante varios ciclos o secuencias de carga y descarga.

Parte del este proyecto de investigación, consistió en la realización del ensayo de módulo resiliente para los materiales en análisis: suelo sin estabilizar, suelo combinado con cal hidratada, suelo combinado con cemento hidráulico y suelo combinado con emulsión asfáltica. Esto se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), ya que es la única institución en el país que cuenta con el equipo para la realización de esta prueba.

5.2.1 Moldeo y compactación de los especímenes

Para la fabricación y compactación de los especímenes, se utilizó la dosificación mencionada previamente, además de utilizar el mazo estándar (5,5 lb) para compactar cada uno de los especímenes, en 6 capas con 25 golpes cada una, según la normativa de referencia NCHRP No.285 “Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design” (National Cooperative Highway Research Program).



Figura 4.35. Proceso de mezclado de suelo, aditivo y agua.



Figura 4.36. Adición de agua y aditivo para la posterior homogenización de la mezcla.



Figura 4.37. Compactación de los especímenes por medio de compactador mecánico, mazo estándar 5,5 lb, 6 capas.



Figura 4.38. Molde de compactación de 4 in de diámetro (sin membrana).

Los especímenes se moldearon a partir de 4.000 g de suelo cada uno, y a partir de esa masa se adicionó la cantidad de agua y aditivo para su posterior homogenización. La dosificación utilizada se realizó de la siguiente forma para cada una de las combinaciones suelo – aditivo:

Cuadro 4.19. Dosificaciones para las combinaciones de suelo con aditivo para moldeo y compactación.

DOSIFICACIONES PARA ESPECÍMENES				
Material	Contenido	Peso	Agua actual	Agua a agregar
	(%)	(g)	(g)	(g)
Suelo	---	4000,0	---	---
Suelo seco		3666,8	333,2	612,8
Humedad actual	8,33	---	---	--
Humedad óptima	25,80	946,0	---	---
Cemento hidráulico	4,77	174,8	---	---
Agua a adicionar	23,03	884,7	333,2	551,5
Cal hidratada	4,23	155,3	---	---
Agua a adicionar	29,13	1113,4	333,2	780,2
Emulsión	6,00	220,0	---	---
Asfalto	60,60	133,3	---	---
Agua	39,40	86,7	86,7	---
Agua a adicionar	25,80	946,0	333,2	526,2



Figura 4.39. Especímenes moldeados para ensayo de módulo resiliente.

5.2.2 Procedimientos de curado utilizados

Una vez terminada la fabricación de los especímenes de mezclas de suelo sin aditivo y con aditivos, se procedió a someterlos a procesos de curado previo a realizarles el ensayo de módulo resiliente.

Para los especímenes de suelo combinados con cemento hidráulico, se decidió realizar el proceso de curado establecido en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes CR-2020, específicamente en la Tabla 213-2 de la Sección 213 Estabilización de la Subrasante (Ver Figura 2.6). Este procedimiento consiste en colocar los especímenes en un cuarto húmedo durante 7 días previo a los ensayos, lo cual se muestra en la siguiente figura.



Figura 4.40. Curado de especímenes de suelo combinado con cemento hidráulico en cuarto húmedo.

Para el curado de los especímenes de suelo combinados con cal hidratada, se siguió lo establecido en el documento “Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil (Step 5, Page 4)” de la Asociación Nacional de la Cal de los Estados Unidos (National Lime Association, Octubre 2006). En este documento se indica que el proceso de curado para suelos mejorados con cal debe ser el siguiente:

“Inmediatamente después de la fabricación de las muestras de prueba, envuélvalas en una envoltura de plástico y séllelas en una bolsa hermética a prueba de humedad. Curar las muestras durante 7 días en horno a 40°C. Someta las muestras a un remojo capilar de 24 horas antes de la prueba.”

Este procedimiento se aprecia en las Figuras 4.42 y 4.43.



Figura 4.41. Curado de especímenes de suelo combinado con cal en horno a 40°C.



Figura 4.42. Remojo capilar de especímenes de suelo combinado con cal por 24 horas.

Con respecto al proceso de curado para los especímenes de suelo combinados con emulsión asfáltica, no existe una especificación o procedimiento como tal, por lo que se decidió utilizar el procedimiento establecido en la Guía de Diseño para Materiales Estabilizados con Asfalto, del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LanammeUCR. El procedimiento indica que después de la compactación, se deben colocar los especímenes en un horno a 40°C por 72 horas hasta masa constante. De igual manera, el Manual “Wirtgen Cold Recycling Technology” 2012, establece el mismo procedimiento en la sección de Procedimiento de Diseño de estabilización Asfalto Espumado (Página 256).



Figura 4.43. Curado de especímenes de suelo combinado con emulsión asfáltica en horno a 40°C.

Para los especímenes moldeados con suelo sin ningún tipo de aditivo, no requieren procedimiento de curado, por lo que el ensayo de Módulo Resiliente comienza una vez terminada la compactación de los especímenes.

5.2.3 Procedimiento de ensayo de módulo resiliente

Una vez finalizado el procedimiento de cura de cada uno de los especímenes según su combinación, se procedió a realizarles el ensayo de módulo resiliente. Como primer paso se debe de preparar el espécimen previo a su colocación dentro de la cámara triaxial, por lo que debe estar rodeado por una membrana, piedras porosas, papel filtro y tapas de muestra, tal y como se muestra en la Figura 4.45.



Figura 4.44. Preparación del espécimen previo al ensayo de módulo resiliente.



Figura 4.45. Espécimen listo para colocarlo dentro de la cámara triaxial.

Posteriormente, el espécimen se introduce dentro de la cámara triaxial, la cual a su vez se coloca dentro de la máquina de carga. Sobre la cámara triaxial se colocan los LVDT (linear variable differential transducers), para poder determinar las variaciones de las deformaciones que va teniendo el espécimen conforme se le aplican las cargas respectivas, y midiendo a su vez la deformación recuperable correspondiente. Además, a la cámara triaxial se le debe de conectar una entrada de aire a presión para simular las variaciones del esfuerzo de confinamiento sobre el espécimen.

El procedimiento de la aplicación de la carga consiste en 15 secuencias o ciclos de carga axial variable, de 100 aplicaciones de carga cada una. Cada aplicación de carga dura 1 segundo, dividido en 0,1 segundos de aplicación de carga y 0,9 segundos de descarga. Sumado a lo anterior, se debe considerar un ciclo previo de acondicionamiento del espécimen de entre 500 y 1000 aplicaciones de carga.



Figura 4.46. Cámara triaxial instalada en la máquina de carga.



Figura 4.47. Equipo para ensayo de módulo resiliente de subrasantes.

Cuando el ensayo finaliza, se desmonta todo el equipo, y se lleva el espécimen ensayado a determinarle el porcentaje de humedad con el cual se realizó el ensayo de módulo resiliente, como se observa en la siguiente figura:



Figura 4.48. Especímenes ensayados luego de la determinación de su peso seco.

5.2.4 Datos obtenidos para el ensayo de módulo resiliente y resultados finales.

Durante el ensayo de módulo resiliente, se deben de tomar datos importantes de los especímenes ensayados, tales como dimensiones, pesos y porcentajes de humedad, necesarios para los resultados finales de módulo. Estos datos recolectados se muestran en el Apéndice 7.1.

Una vez finalizado el ensayo de módulo, se obtienen los datos promedios para cada uno de los 15 ciclos o secuencias en un archivo de Excel suministrado por LanammeUCR, además del esfuerzo de confinamiento y el esfuerzo desviador para cada una de estas secuencias. Estos resultados se muestran en el Apéndice 7.2.

A partir de estos datos, es que se inicia el proceso de cálculo de módulo resiliente definitivo utilizando distintos modelos o ecuaciones (Cuadro 4.20), los cuales se desarrollan hasta obtener el valor de módulo resiliente para cada uno de los modelos y para cada una de las muestras o especímenes fabricados. El desarrollo de estos modelos se muestra desde el Apéndice 7.5 al 7.9. En los cuadros siguientes, es posible observar los resultados finales de módulo para cada uno de los modelos utilizados (calculados a partir de valores de esfuerzos de confinamiento y esfuerzo

desviador obtenidos del ensayo de laboratorio de módulo resiliente), así como la respectiva medida del ajuste de estos modelos a los valores empleados.

Cuadro 4.20. Dosificaciones para las combinaciones de suelo con aditivo para moldeo y compactación.

Modelos de cálculo de Módulo Resiliente	
1	Presión de confinamiento
2	K- θ
3	K- σ_d
4	May-Witczak
5	Esfuerzo cortante octaédrico (Universal)
6	Guía de diseño 2002
7	Programa de desempeño a largo plazo de pavimentos (LTPP)

(*) Ecuaciones y cálculo de modelos mostrado en Apéndices 7.5, 7.6, 7.7, 7.8 y 7.9.

Cuadro 4.21. Resultados de módulo resiliente por modelo para suelo sin estabilizar.

Modelo	Módulo Resiliente (psi)		
	Suelo sin estabilizar		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Modelo 1	10 393,54	15 566,92	9 080,12
Modelo 2	15 223,35	21 516,28	16 221,02
Modelo 3	22 785,64	19 694,34	25 231,54
Modelo 4	15 809,03	21 914,01	17 252,08
Modelo 5	15 809,03	21 914,01	17 252,08
Modelo 6	12 427,61	19 494,62	12 188,24
Modelo 7	7 159,67	10 136,26	9 130,46

Cuadro 4.22. Resultados de módulo resiliente por modelo para suelo combinado con cal.

Modelo	Módulo Resiliente (psi)		
	Suelo con cal hidratada		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Modelo 1	917,70	1 429,56	1 132,64
Modelo 2	1 102,63	1 635,47	1 394,30
Modelo 3	10 537,38	11 417,32	12 430,50
Modelo 4	1 203,90	1 751,20	1 516,97
Modelo 5	1 203,90	1 751,20	1 516,97
Modelo 6	779,23	1 229,07	984,16
Modelo 7	1 605,93	2 133,20	1 775,12

Cuadro 4.23. Resultados de módulo resiliente por modelo para suelo combinado con cemento hidráulico.

Modelo	Módulo Resiliente (psi)		
	Suelo con cemento hidráulico		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Modelo 1	4 169,22	4 177,31	15 804,20
Modelo 2	5 902,53	6 049,63	13 822,04
Modelo 3	22 252,56	20 530,39	18 893,63
Modelo 4	6 288,29	6 430,80	13 727,17
Modelo 5	6 288,29	6 430,80	13 727,17
Modelo 6	4 372,35	4 526,95	14 284,19
Modelo 7	4 896,43	5 119,62	13 512,41

Cuadro 4.24. Resultados de módulo resiliente por modelo para suelo combinado con emulsión asfáltica.

Modelo	Módulo Resiliente (psi)		
	Suelo con emulsión		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Modelo 1	13 791,56	21 313,19	16 015,91
Modelo 2	12 330,14	19 853,35	16 619,70
Modelo 3	37 017,09	32 104,03	32 901,32
Modelo 4	12 554,74	19 907,20	16 911,70
Modelo 5	12 554,74	19 907,20	16 911,70
Modelo 6	11 324,24	19 497,54	15 335,82
Modelo 7	11 782,85	16 378,94	14 445,14

Cuadro 4.25. Relación del ajuste entre el modelo y sus datos para suelo sin estabilizar.

Modelo	Coeficientes R ²		
	Suelo sin estabilizar		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Modelo 1	0,2493	0,0000	0,1401
Modelo 2	0,0030	0,1346	0,0101
Modelo 3	0,5696	0,2835	0,8110
Modelo 4	0,7351	0,1858	0,9065
Modelo 5	0,7351	0,1858	0,9065
Modelo 6	0,8865	0,2814	0,9737
Modelo 7	0,9337	0,3621	0,9736

Cuadro 4.26. Relación del ajuste entre el modelo y sus datos para suelo combinado con cal.

Modelo	Coeficientes R ²		
	Suelo con cal hidratada		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Modelo 1	0,7977	0,8453	0,8061
Modelo 2	0,4734	0,5353	0,4694
Modelo 3	0,1035	0,0721	0,1082
Modelo 4	0,9384	0,9374	0,9474
Modelo 5	0,9384	0,9374	0,9474
Modelo 6	0,8943	0,9000	0,9106
Modelo 7	0,9372	0,9347	0,9443

Cuadro 4.27. Relación del ajuste entre el modelo y sus datos para suelo combinado con cemento hidráulico.

Modelo	Coeficientes R ²		
	Suelo con cemento hidráulico		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Modelo 1	0,7090	0,6776	0,4569
Modelo 2	0,2889	0,2519	0,7016
Modelo 3	0,2597	0,2860	0,3613
Modelo 4	0,9601	0,9315	0,7289
Modelo 5	0,9601	0,9315	0,7289
Modelo 6	0,9502	0,9192	0,7226
Modelo 7	0,9641	0,9325	0,7066

Cuadro 4.28. Relación del ajuste entre el modelo y sus datos para suelo combinado con emulsión.

Modelo	Coeficientes R ²		
	Suelo con emulsión		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Modelo 1	0,9573	0,7810	0,9170
Modelo 2	0,8847	0,7997	0,6591
Modelo 3	0,0106	0,0878	0,0017
Modelo 4	0,9940	0,7741	0,8023
Modelo 5	0,9940	0,7741	0,8023
Modelo 6	0,9925	0,7827	0,8132
Modelo 7	0,9943	0,7866	0,7977

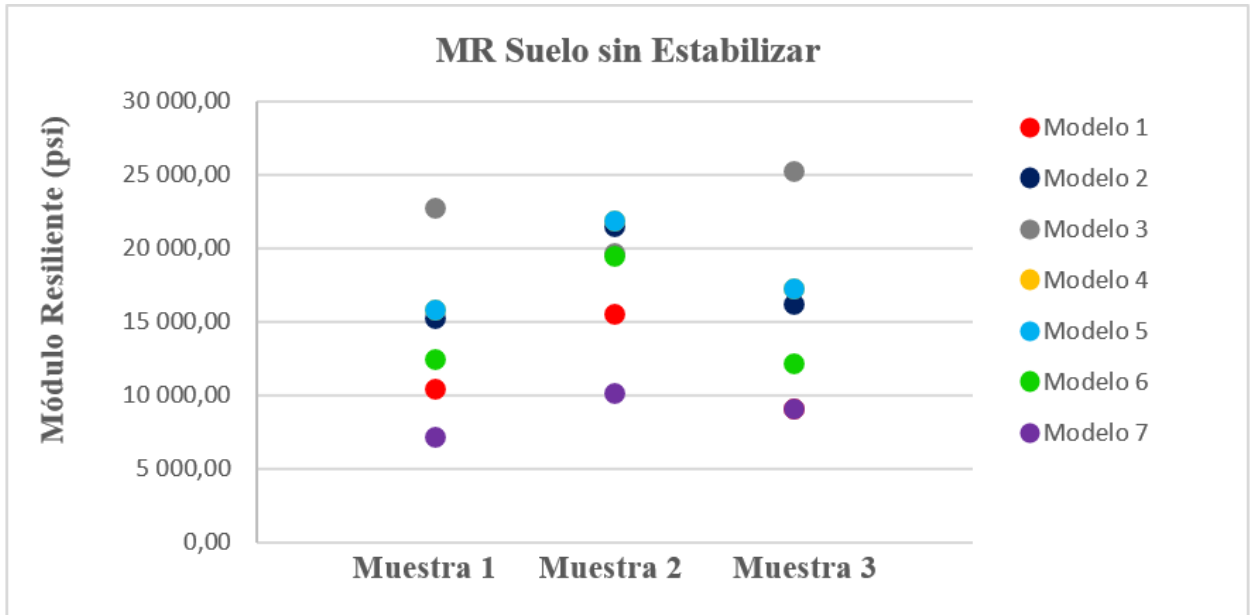


Figura 4.49. Resultados de módulo resiliente por modelo para suelo sin estabilizar.

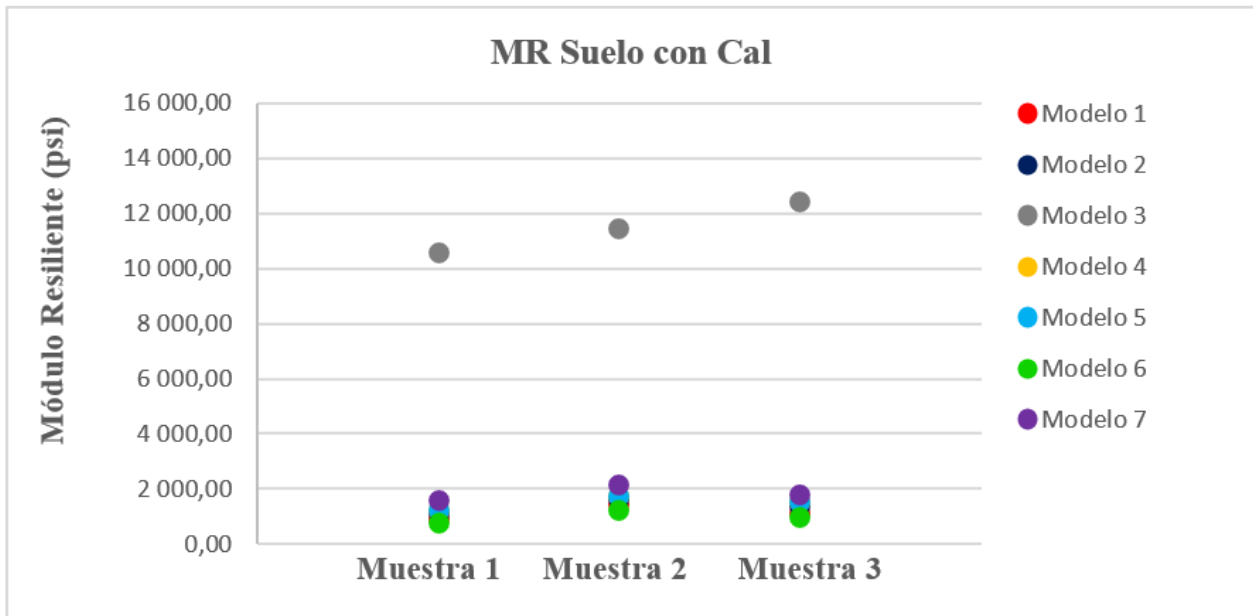


Figura 4.50. Resultados de módulo resiliente por modelo para suelo combinado con cal.

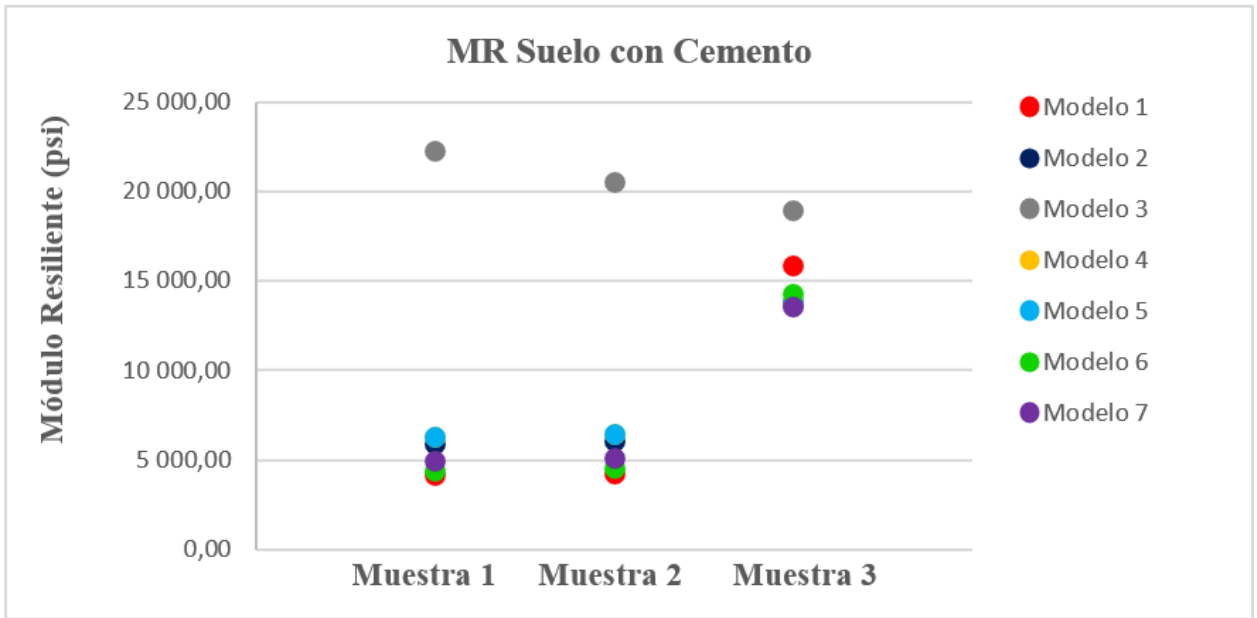


Figura 4.51. Resultados de módulo resiliente por modelo para suelo combinado con cemento hidráulico.

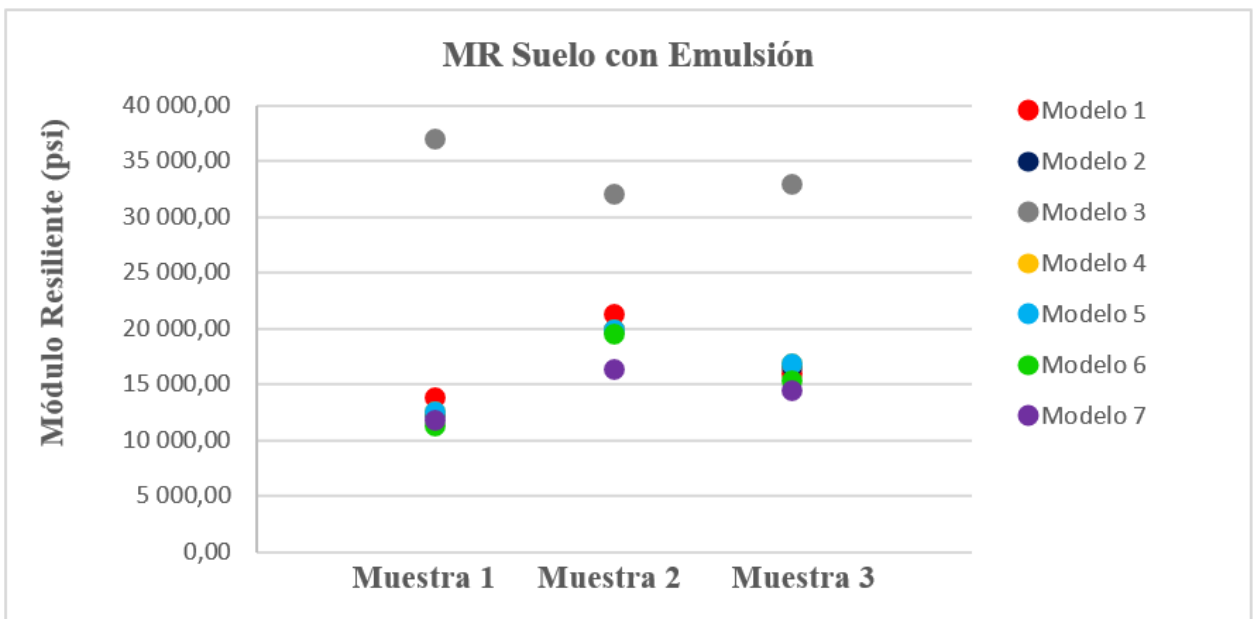


Figura 4.52. Resultados de módulo resiliente por modelo para suelo combinado con emulsión asfáltica.

A partir de los resultados de módulo resiliente anteriores utilizando los modelos antes mencionados, y analizando los coeficientes de determinación R^2 obtenidos para cada uno de esos modelos, se determina que el modelo con un mejor ajuste o relación entre las variables corresponde al #7 Programa de desempeño a largo plazo de pavimentos (LTPP), por lo que se utilizarán los resultados asociados a este.

Es importante destacar que, para seleccionar el modelo que mejor se ajusta a los datos obtenidos, se utilizó el coeficiente de determinación R^2 debido a que es una alternativa práctica, sencilla y rápida de tener una idea del grado de fuerza de la relación entre las variables y el grado de ajuste del modelo calculado. Sin embargo, existen otros métodos para determinar la relación que existe entre las variables y el ajuste de los modelos, más cuando se trata de modelos de regresión exponencial que incluyen la relación entre dos o más variables; como por ejemplo el R cuadrado ajustado o el R cuadrado de predicción. Lo anterior se decidió realizarlo de esa manera, a causa del tiempo disponible de realización y desarrollo de este proyecto, además de que este tema no era uno de los objetivos principales, por lo que se quiso enfocar y dar más importancia al desarrollo de los diseños y análisis económicos.

Cuadro 4.29. Resultados de módulo resiliente a partir del modelo seleccionado.

MODELO 7	Programa desempeño a largo plazo de pavimentos (LTPP)		
Material	Módulo Resiliente (psi)		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Suelo sin estabilizar	7 159,67	10 136,26	9 130,46
Suelo con cal hidratada	1 605,93	2 133,20	1 775,12
Suelo con cemento hidráulico	4 896,43	5 119,62	13 512,41
Suelo con emulsión	11 782,85	16 378,94	14 445,14

Cuadro 4.30. Resultados de módulos resilientes definitivos y porcentaje de mejora según el aditivo utilizado.

Módulos Resilientes Subrasante			
Material	MR (psi)	Mejora VT (%)	Mejora SSE (%)
Valor teórico	4 500	---	---
Suelo sin estabilizar	7 160	59,10	---
Suelo con cal hidratada	2 133	-52,60	-70,21
Suelo con cemento hidráulico	13 512	200,28	88,73
Suelo con emulsión	11 783	161,84	64,57

**Mejora VT: A partir del valor teórico.

**Mejora SSE: A partir del suelo sin estabilizar.

En el Cuadro 4.30, se observan los resultados de módulo resiliente definitivos a utilizar; para el suelo sin estabilizar se toma como referencia el resultado de MR de la muestra 1, para el suelo combinado con cal se toma como referencia el resultado de MR de la muestra 2, para el suelo combinado con cemento hidráulico se toma como referencia el resultado de MR de la muestra 3, y para el suelo combinado con emulsión asfáltica se toma referencia el resultado de MR de la muestra 1. Esta selección se analiza en el apartado 4.12.

A partir de estos resultados provenientes del cálculo del modelo seleccionado, se elige el módulo resiliente del material de suelo combinado con cemento hidráulico, resultando mayor que las demás combinaciones. Por lo tanto, el valor de módulo resiliente del suelo mejorado a utilizar en el nuevo diseño de pavimento será de 13 512 psi para el material de subrasante.

5.3 Resistencia a la compresión.

Luego de realizado el ensayo de módulo resiliente en suelos y obtener los resultados respectivos, se decide realizar el ensayo de resistencia a la compresión de especímenes de suelo – aditivo y poder observar el comportamiento de cada uno de los aditivos y dosificaciones empleadas (Cuadro 4.18) , lo anterior con el fin de poder tener otro criterio de selección de aditivo y también poder realizar una comparación según lo que está establecido en la normativa nacional, indicada en la Figura 2.6 de este documento.

Los resultados de resistencia a la compresión son los siguientes:

Cuadro 4.31. Resistencia a la compresión de especímenes suelo – aditivo.

Aditivo	Especimen	Fecha de moldeo	Fecha de falla	Edad (días)	Diámetro promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga (kg)	Resistencia a la compresión		Resistencia de referencia (*)	
								(kg/cm ²)	(MPa)	(kg/cm ²)	(MPa)
Cemento hidráulico	#1	25/03/2022	01/04/2022	7	101,48	8087,38	908,00	11,23	1,10	10,20	1,00
	#2	25/03/2022	01/04/2022	7	101,33	8064,29	932,00	11,56	1,13	10,20	1,00
	#3	25/03/2022	01/04/2022	7	101,68	8119,29	895,00	11,02	1,08	10,20	1,00
Cal hidratada	#1	25/03/2022	02/04/2022	8	101,29	8057,13	203,00	2,52	0,25	3,06	0,30
	#2	25/03/2022	02/04/2022	8	101,26	8052,35	219,00	2,72	0,27	3,06	0,30
	#3	25/03/2022	02/04/2022	8	101,34	8065,08	197,00	2,44	0,24	3,06	0,30
Emulsión asfáltica	#1	25/03/2022	01/04/2022	7	101,23	8047,58	726,00	9,02	0,88	3,06	0,30
	#2	25/03/2022	01/04/2022	7	101,36	8068,27	741,00	9,18	0,90	3,06	0,30
	#3	25/03/2022	01/04/2022	7	101,46	8084,20	712,00	8,81	0,86	3,06	0,30

(*) La resistencia de referencia es con respecto a la Figura 2.6.

Fuente: Informe 13-R004-2022, Anexo 8.2.

5.4 Diseño nuevo de pavimento

De igual manera que en el apartado 4.5 de este documento, se realizó el cálculo del nuevo diseño siguiendo todo el procedimiento de cálculo establecido por la Guía para Diseño de Estructuras de Pavimento, AASHTO 1993, utilizando los mismos datos iniciales utilizados en el diseño original, con la única diferencia del nuevo valor de módulo resiliente de la subrasante mejorada. Los espesores finales de las capas de pavimento del nuevo diseño se muestran en los siguientes cuadros correspondientes a la memoria de cálculo realizada.

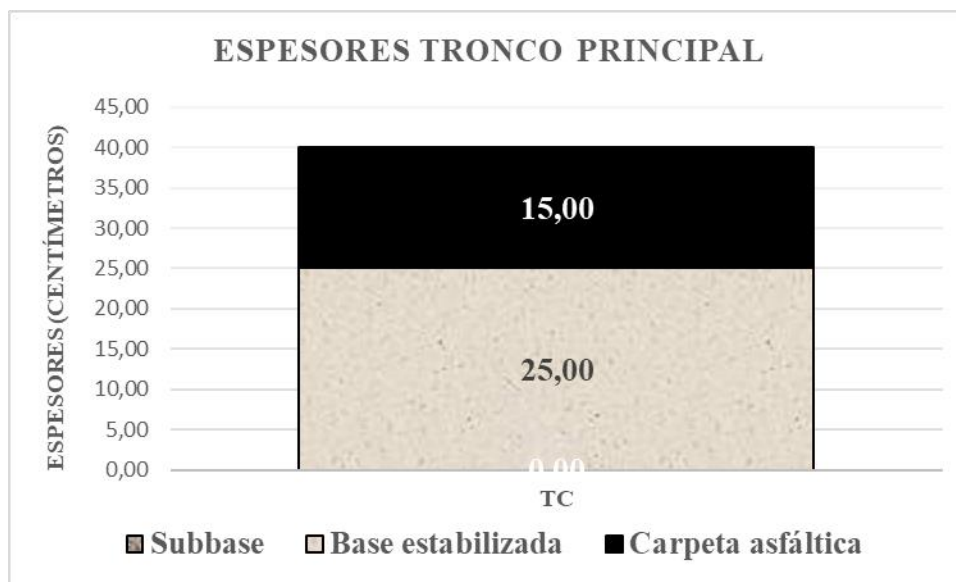


Figura 4.53. Estructura de pavimento de diseño nuevo con subrasante mejorada para tronco principal, espesores en cm.

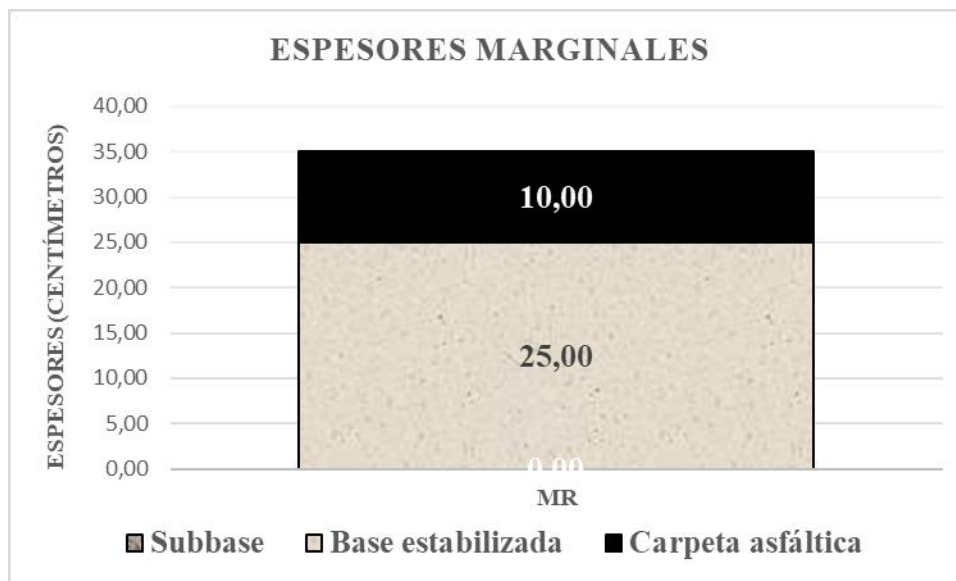


Figura 4.54. Estructura de pavimento de diseño nuevo con subrasante mejoradas para marginales, espesores en cm.

Cuadro 4.32. Memoria de cálculo para diseño de pavimento del tronco principal.

TRONCO PRINCIPAL

DATOS GENERALES	
W18 Tronco	26 862 236
ZR	-1,282
S0	0,45
ΔPSI	1,7
Mód. CA (psi)	750 000
Mód. BE (psi)	620 000
Mód. SB (psi)	15 000
Mód. SR (psi)	13 512

SN1	1,0133
SN2	4,5285
SN3	4,6943

TRONCO PRINCIPAL

CARPETA ASFÁLTICA		BASE ESTABILIZADA		SUBBASE GRANULAR	
Módulo 1 (psi)	620 000	Módulo 2 (psi)	15 000	Módulo 3 (psi)	13 512
a (1)	0,54	a (2)	0,16	a (3)	0,11
m (1)	1,00	m (2)	1,00	m (3)	0,90
SN (1)	1,01	SN (2)	4,53	SN (3)	4,69
ECUACIÓN		ECUACIÓN		ECUACIÓN	
Ec.1	7,4291	Ec.1	7,4291	Ec.1	7,4291
Ec.2	-0,5769	Ec.2	-0,5769	Ec.2	-0,5769
Ec.3	2,6446	Ec.3	6,7508	Ec.3	6,8709
Ec.4	-0,0068	Ec.4	-0,3633	Ec.4	-0,3782
Ec.5	5,3683	Ec.5	1,6185	Ec.5	1,5133
∑ Ec.2 a 5	7,4292	∑ Ec.2 a 5	7,4291	∑ Ec.2 a 5	7,4291
Ec.1 - ∑ Ec	0,0000	Ec.1 - ∑ Ec	0,0000	Ec.1 - ∑ Ec	0,0000
CUMPLE	SI	CUMPLE	SI	CUMPLE	SI
ESPESOR CALCULADO		ESPESOR CALCULADO		ESPESOR CALCULADO	
h (1) (in)	1,88	h (2) (in)	8,37	h (3) (in)	-0,70
h (1) (cm)	4,77	h (2) (cm)	21,26	h (3) (cm)	-1,78
ESPESOR PROPUESTO		ESPESOR PROPUESTO		ESPESOR PROPUESTO	
h (1) (in)	5,91	h (2) (in)	9,84	h (3) (in)	0,00
h (1) (cm)	15,00	h (2) (cm)	25,00	h (3) (cm)	0,00

Cuadro 4.33. Memoria de cálculo para diseño de pavimento de la marginal.

MARGINALES

DATOS GENERALES	
W18 Marginal	4 029 335
ZR	-1,282
S0	0,45
ΔPSI	1,7
Mód. CA (psi)	750 000
Mód. BE (psi)	620 000
Mód. SB (psi)	15 000
Mód. SR (psi)	13 512

SN1	0,6421
SN2	3,3540
SN3	3,4900

MARGINALES

CARPETA ASFÁLTICA		BASE ESTABILIZADA		SUBBASE GRANULAR	
Módulo 1 (psi)	620 000	Módulo 2 (psi)	15 000	Módulo 3 (psi)	13 512
a (1)	0,54	a (2)	0,16	a (3)	0,11
m (1)	1,00	m (2)	1,00	m (3)	0,90
SN (1)	0,64	SN (2)	3,35	SN (3)	3,49
ECUACIÓN		ECUACIÓN		ECUACIÓN	
Ec.1	6,6052	Ec.1	6,6052	Ec.1	6,6052
Ec.2	-0,5769	Ec.2	-0,5769	Ec.2	-0,5769
Ec.3	1,8161	Ec.3	5,7800	Ec.3	5,9050
Ec.4	-0,0024	Ec.4	-0,2163	Ec.4	-0,2362
Ec.5	5,3683	Ec.5	1,6185	Ec.5	1,5133
∑ Ec.2 a 5	6,6052	∑ Ec.2 a 5	6,6053	∑ Ec.2 a 5	6,6052
Ec.1 - ∑ Ec	0,0000	Ec.1 - ∑ Ec	0,0000	Ec.1 - ∑ Ec	0,0000
CUMPLE	SI	CUMPLE	SI	CUMPLE	SI
ESPESOR CALCULADO		ESPESOR CALCULADO		ESPESOR CALCULADO	
h (1) (in)	1,19	h (2) (in)	7,68	h (3) (in)	-2,13
h (1) (cm)	3,02	h (2) (cm)	19,49	h (3) (cm)	-5,41
ESPESOR PROPUESTO		ESPESOR PROPUESTO		ESPESOR PROPUESTO	
h (1) (in)	3,94	h (2) (in)	9,84	h (3) (in)	0,00
h (1) (cm)	10,00	h (2) (cm)	25,00	h (3) (cm)	0,00

Según los cálculos para el nuevo diseño de pavimento se tiene que, para el caso del tronco principal, se mantienen los espesores de la carpeta asfáltica y de la base estabilizada (15 cm y 25 cm respectivamente), y prácticamente se podría descartar la capa de subbase granular, siendo innecesaria según la comprobación realizada en el cuadro 4.32. En el caso de las marginales, sucede lo mismo con la capa de subbase granular, manteniendo los espesores de la carpeta asfáltica (10 cm) y de la base estabilizada (25 cm), según se observa en el cuadro 4.33.

5.5 Análisis de costos

Para poder realizar una estimación del efecto del mejoramiento de la subrasante en el diseño y construcción de pavimentos, se hará por medio de un control de costos de diferentes actividades para la construcción de un pavimento típico. Se tomarán en cuenta solo actividades que se realizan para el firme o paquete estructural, ya que será los rubros que se diferenciarán de un pavimento con subrasante sin mejorar a un pavimento con subrasante mejorada.

Todos los precios contemplados en este análisis fueron con respecto al proyecto de graduación de Licenciatura en Ingeniería en Construcción “*Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a carreteras de tránsito pesado*”, realizado en el año 2016 por mi persona (Tecnológico de Costa Rica). Si bien los costos utilizados corresponden a valores de hace 6 años, y que actualmente esos valores son diferentes, se tomaron estos costos de referencia debido a que el fin de este análisis es obtener una diferencia porcentual entre el pavimento original y el pavimento con el mejoramiento de subrasante, y el resultado final no variará. Únicamente se variaron los costos de la mano de obra, para los cuales se tomó como referencia lo indicado en la Lista de Salarios Mínimos del 2022, publicado por el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social.

Para realizar esta estructura de costos, se tomará una longitud no significativa, ya que lo que se requiere es determinar las posibles mejoras o diferencias que se pueden tener entre un pavimento y otro. Por lo tanto, se consideran los valores siguientes como la base de la estructura de costos realizada.

Cuadro 4.34. Dimensiones consideradas para la estimación de costos del pavimento original.

DIMENSIONES DE TRAMO	
Longitud (m)	100,0
Ancho (m)	7,5
Carriles	2

PAVIMENTO ACTUAL	
Capa	Espesor (cm)
Carpeta asfáltica	15
Base estabilizada	25
Subbase granular	60
Subrasante	---

PAVIMENTO ACTUAL		
Material	Área (m ²)	Volumen (m ³)
Carpeta asfáltica	750	112,50
Base estabilizada	750	187,50
Subbase granular	750	450,00
Subrasante	750	---

Cuadro 4.35. Dimensiones consideradas para la estimación de costos del pavimento nuevo.

DIMENSIONES DE TRAMO	
Longitud (m)	100,0
Ancho (m)	7,5
Carriles	2

PAVIMENTO CON SUBRASANTE MEJORADA CON CEMENTO HIDRÁULICO	
Capa	Espesor (cm)
Carpeta asfáltica	15
Base estabilizada	25
Subbase granular	0
Subrasante mejorada	---

PAVIMENTO CON SUBRASANTE MEJORADA CON CEMENTO HIDRÁULICO		
Material	Área (m²)	Volumen (m³)
Carpeta asfáltica	750	112,50
Base estabilizada	750	187,50
Subbase granular	0	0,00
Subrasante	750	225,00

Para el cálculo de la estructura de costos, se toman como referencia actividades para la colocación, conformación, recuperado y compactación de una estructura de pavimentos, utilizando costos y rendimientos iguales para el cálculo de ambos pavimentos. Realizando lo anterior, será posible tener una diferencia o comparación de costos entre ambos pavimentos, con solo considerar el mejoramiento de la subrasante con el aditivo seleccionado, que en este caso es el cemento hidráulico. A continuación, se muestran los apartados o secciones donde se detallan los resultados finales resumidos totales y por actividad para cada uno de los pavimentos en análisis; los costos detallados se muestran en los Apéndices 7.3 y 7.4.

5.5.1 Pavimento con subrasante sin mejora

Cuadro 4.36. Estimación de costos para pavimento con subrasante sin mejora.

PAVIMENTO SEMI RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (15 AÑOS) DISEÑO ORIGINAL					
N°	DESCRIPCIÓN	U/M	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	MONTO TOTAL
CR 301.06	Subbase de agregados, graduación B	m3	₡ 20 181,12	450,00	₡ 9 081 503,28
CR 414.01	Riego de liga (tipo CRS-1 capa de liga)	lt	₡ 984,06	562,50	₡ 553 534,58
CR 413.02	Riego de imprimación	lt	₡ 984,06	900,00	₡ 885 655,32
CR 413.03	Material de secado	m3	₡ 21 995,91	7,50	₡ 164 969,31
CR 302.01 (a)	Base estabilizada con cemento hidráulico Portland tipo BE-25, 25 cm espesor	m2	₡ 7 100,86	750,00	₡ 5 325 642,78
CR 401.01 (a)	Pavimento de concreto asfáltico en caliente con TMN 19 mm, de 15 cm de espesor compactado	m2	₡ 22 795,83	750,00	₡ 17 096 874,18
TOTAL					₡ 33 108 179,45

5.5.2 Pavimento con subrasante mejorada

Cuadro 4.37. Estimación de costos para pavimento con subrasante sin mejora.

PAVIMENTO SEMI RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (15 AÑOS) DISEÑO NUEVO					
N°	DESCRIPCIÓN	U/M	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	MONTO TOTAL
CR 213.01	Mejoramiento de subrasante, Recuperado de 30 cm	m2	₡ 5 055,32	750,00	₡ 3 791 489,71
CR 301.06	Subbase de agregados, graduación B	m3	₡ -	37,50	₡ -
CR 414.01	Riego de liga (tipo CRS-1 capa de liga)	lt	₡ 984,06	562,50	₡ 553 534,58
CR 413.02	Riego de imprimación	lt	₡ 984,06	900,00	₡ 885 655,32
CR 413.03	Material de secado	m3	₡ 21 995,91	7,50	₡ 164 969,31
CR 302.01 (a)	Base estabilizada con cemento hidráulico Portland tipo BE-25, 25 cm espesor	m2	₡ 7 100,86	750,00	₡ 5 325 642,78
CR 401.01 (a)	Pavimento de concreto asfáltico en caliente con TMN 19 mm, de 15 cm de espesor compactado	m2	₡ 22 795,83	750,00	₡ 17 096 874,18
TOTAL					₡ 27 818 165,87

5.6 Análisis de resultados

Respecto a los resultados obtenidos a lo largo del Capítulo 4, en este apartado se explica y analiza la razón de la selección y cálculo de cada uno de los resultados finales definitivos.

Para analizar el efecto del mejoramiento de la subrasante, según lo mencionado en el apartado 4.6 de este documento, se tiene un suelo clasificado como A-7-5 (20) o MH (arcilla limosa de alta compresibilidad o limo de alta plasticidad) que se combinó con cal hidratada, cemento hidráulico y emulsión asfáltica. En el apartado 4.7 se explica el porqué de la escogencia del contenido de cada aditivo para las combinaciones de materiales realizadas.

Además, en el apartado 4.6 se muestran los resultados obtenidos de límites de plasticidad, CBR y densidad máxima obtenidos del suelo con cada uno de los aditivos considerados para el análisis. En el caso del mejoramiento realizado con cal, se aprecia una disminución en la plasticidad del suelo, entre más cantidad de cal mezclada con el suelo la plasticidad disminuía de la misma forma siendo inversamente proporcionales; respecto al CBR, se obtuvo una importante mejora en este valor incrementando la cantidad de cal combinada con el suelo y a su vez aumentando la estabilidad de la mezcla. Respecto a la combinación realizada con el cemento hidráulico, al igual que la cal, se observa una disminución importante de la plasticidad entre más cantidad de cemento hidráulico se le agregue a la mezcla, y un CBR mucho mayor dando como resultado una mezcla más estable. Con el aditivo de la emulsión asfáltica, no fue posible analizar los resultados de plasticidad debido a problemas de la trabajabilidad de la mezcla discutidos en el apartado 4.6.4; para el CBR no se obtuvo una importante mejora con la combinación con este aditivo. Está bien claro que la emulsión asfáltica es un aditivo más delicado que el cemento hidráulico y que la cal, debido a que puede perder su estabilidad o “romper” antes del mezclado, según las condiciones de almacenamiento y manipulación que se le dé. Dentro de la escogencia del aditivo para el mejoramiento de la subrasante, es válido la combinación de estos y no utilizar uno solo, dependiendo de los objetivos que se deseen, ya que cada aditivo puede aportar en un aspecto más que los otros.

Respecto al apartado 4.8, en el cual se muestran los resultados de módulo resiliente de cada una de las combinaciones de suelo – aditivo realizadas, se selecciona los valores calculados por el modelo #7 del Programa de desempeño a largo plazo de pavimentos (LTPP), ya que fueron los valores que presentaron un valor mayor de coeficiente de determinación (R^2), indicando un mejor ajuste entre el modelo utilizado y sus datos, según se observa en los cuadros 4.25, 4.26, 4.27 y 4.28.

De los resultados de módulo resiliente obtenidos con el modelo seleccionado, se tienen 3 resultados diferentes por cada muestra de cada una de las combinaciones de suelo – aditivo. A partir de estos resultados no se seleccionó el valor promedio de los 3 valores para cada combinación, sino que se seleccionó uno de ellos debido a diferencias significativas entre los valores, y a las condiciones que se dieron durante el proceso de humedecido y compactación.

Según se aprecia en los cuadros 4.29 y 4.30, para los especímenes de suelo combinado con cal, se obtienen resultados de módulo resiliente bajos comparados con las demás combinaciones de suelo – aditivo, incluso estos resultados son menores que los datos de módulo resiliente obtenidos para los

especímenes de suelo sin estabilizar. Esto se pudo deber a que, en el momento de la combinación de suelo con cal previo a la fabricación y compactación de los especímenes, se le agregó más agua de la humedad óptima correspondiente, lo cual se verifica en el Apéndice 7.1. Esto se concluye debido a que las muestras compactadas presentaron ranuras a su alrededor, debido a que producto de esta mayor humedad, la membrana que cubre al espécimen se resbalaba y se deformaba en el proceso de compactación. Este fenómeno se aprecia en la siguiente figura:



Figura 4.55. Especímenes compactados para ensayo MR de suelo combinado con cal.

Con respecto a los especímenes de suelo combinado con cemento hidráulico, se tuvo el mismo problema comentado anteriormente en las primeras dos muestras compactadas, ya que presentaban ranuras muy similares mostradas en la figura anterior, pero en una menor proporción, por tal razón los valores de módulo resiliente de esas muestras son bajos con respecto a los resultados obtenidos para el suelo sin estabilizar. Para el tercer espécimen de suelo combinado con cemento hidráulico, el resultado obtenido de módulo resiliente fue mucho más coherente, además de que para esta muestra no ocurrió el fenómeno de las ranuras comentado para los especímenes anteriores.

Para los especímenes de suelo combinado con emulsión asfáltica, se tuvo una incongruencia en el proceso de compactación para las muestras 2 y 3. Para este paso de fabricación de los especímenes, se utilizó un compactador mecánico con contador automático (esfuerzo estándar 5.5 lb, 25 golpes por capa, 6 capas), con el inconveniente de que para las muestras mencionadas el contador no se detuvo en los 25 golpes y continuó con el proceso, lo que generó una sobre compactación de estos especímenes. Es importante tener claro, como se dijo anteriormente, que la emulsión asfáltica es un aditivo más de cuidado de los otros aditivos, ya que esta es más flexible y tiene más resiliencia que el cemento

hidráulico y la cal, además su estabilidad y rompimiento pueden variar o modificarse según las condiciones ambientales, condiciones de almacenamiento o condiciones de manipulación, afectando los resultados del mejoramiento.

Debido a lo anteriormente comentado, es que se deciden utilizar como referencia los valores de módulo resiliente mostrados en el cuadro 4.30; para el suelo combinado con cal se selecciona la muestra 2, para el suelo combinado con cemento hidráulico se escoge la muestra 3, y para el suelo combinado con emulsión asfáltica se elige la muestra 1. Por lo tanto, entre los 3 resultados de módulo resiliente obtenidos con cada combinación de aditivo, se decide inclinarse por la opción de mejoramiento con cemento hidráulico, resultando un módulo resiliente de 13 512 psi.

Además de los ensayos de CBR, límites de plasticidad, relación densidad – humedad y módulo resiliente, como un agregado importante se realizó también el ensayo de resistencia a la compresión utilizando 3 especímenes para cada combinación de suelo – aditivo, utilizando las dosificaciones definidas en el cuadro 4.18, según las indicaciones y procedimiento establecido en la figura 2.6 correspondiente a la Tabla 213-2 Requisitos mínimos requeridos para mezclas de estabilización del CR-2020. Para los resultados mostrados en el cuadro 4.31, se obtuvo una resistencia a la compresión promedio de 11,27 kg/cm² (1,10 MPa) para la combinación de suelo con cemento hidráulico, una resistencia promedio de 2,56 kg/cm² (0,25 MPa) para la combinación de suelo con cal, y una resistencia promedio de 9,00 kg/cm² (0,88 MPa). Al hacer la comparación de estos resultados respecto a lo que se establece en la normativa nacional, la resistencia a la compresión obtenida de la combinación de suelo con cemento hidráulico es la única que cumple con lo establecido, exceptuando a la combinación de suelo con emulsión asfáltica, debido a que la normativa no hace mención para este aditivo.

De acuerdo con el valor seleccionado de módulo resiliente de la subrasante, se realiza nuevamente todo el procedimiento que conlleva el diseño de pavimento semi-rígido detallado en los apartados 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 de este documento. El diseño de pavimento resultante, detallado en el apartado 4.10, permite afirmar que se puede utilizar una menor cantidad de materiales respecto al diseño de pavimento original, debido a que, en el caso del pavimento del tronco principal, la capa de subbase se ve reducida prácticamente al máximo (Ver cuadros 4.32 y 4.33); para la carpeta asfáltica se utiliza el mismo espesor de 15 cm. Para el caso del pavimento de las marginales sucede lo mismo que el caso del tronco principal, la subbase se podría reducir al máximo, manteniendo los 25 cm de espesor para la capa de base estabilizada y los 10 cm de carpeta asfáltica. Lo anterior únicamente se realiza con el fin de demostrar el efecto de la reducción que se puede tener incluyendo el mejoramiento de la subrasante con algún aditivo, y además para poder tener un valor numérico respecto a los costos que se podrían ahorrar con esta reducción.

Además, con los datos arrojados por el nuevo diseño de pavimento considerando la mejora de la subrasante, se verificó este diseño por medio del software desarrollado por el LanammeUCR PitraPave, en el cual se introducen los espesores de las capas del pavimento, dando como resultado deformaciones y esfuerzos en cada una de ellas. Con estos resultados, fue posible calcular modelos de deterioro por fatiga y por deformación obteniendo la cantidad de ciclos de carga o ejes equivalentes admisibles que soportaría la estructura de pavimento, siendo esta verificación satisfactoria. Esto se muestra en el Apéndice 7.10.

Posterior a la verificación del diseño de pavimentos, en el apartado 4.11 se realiza una estimación de los costos que tendría la construcción de estos pavimentos según los cálculos realizados, concentrándose únicamente en las actividades para la construcción del firme o paquete estructural del pavimento. Para esto, se toma una longitud y ancho base o modelo que no sean tan significativos, para estimar cuantitativamente el beneficio que se podría obtener al considerar esta técnica de mejoramiento en el diseño de pavimentos. Como resultados finales de costos, según lo indicado en los cuadros resumen 4.36 y 4.37, se tiene que con la técnica del mejoramiento de la subrasante se tendría un costo total de ₡ 5 290 013.58 menos que según lo contemplado en el diseño de pavimentos original, esto correspondería a un 15,98% menos del costo total para el pavimento original. Las dimensiones base para el cálculo de costos para ambos pavimentos se detallan en los cuadros 4.34 y 4.35, y las actividades propuestas detalladas se aprecian en los Apéndices 7.3 y 7.4.

Finalmente, la escogencia del tipo de aditivo para el mejoramiento de la subrasante, además de lo comentado con anterioridad a partir de los resultados obtenidos, se debe realizar de acuerdo con la finalidad que se busca para el mejoramiento. Si el objetivo es reducirle un poco la plasticidad, debe evaluarse con más detalle la utilización de la cal, o por el contrario si se desea que la subrasante sea más rígida lo más conveniente es utilizar el cemento hidráulico (o el cemento asfáltico según los resultados de esta investigación). Además, se debe tener presente la disponibilidad del aditivo a utilizar para el mejoramiento en la zona del proyecto, ya que este debe tener una facilidad de obtención, y así no se incrementen los costos teniendo que traerlo desde otra zona del país o fuera de este; lo más conveniente es que el aditivo a utilizar debe tener una facilidad de obtención en la zona del proyecto. Por último, es importante tener presente la trabajabilidad de la mezcla suelo – aditivo, ya que en el campo se colocará este material con maquinaria pesada, por lo que la mezcla deberá tener facilidad para combinarse, conformarse y compactarse.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

De acuerdo con las pruebas de calidad y de desempeño realizadas de Índice de Soporte de California, Resistencia a la Compresión, y Módulo Resiliente de cada una de las combinaciones de suelo – aditivo, la mezcla que resultó más eficiente fue el suelo combinado con el cemento hidráulico. Además, con la combinación de suelo con emulsión asfáltica, también se logró una mejora respecto al desempeño del suelo solo, pero al final no le elige debido a que el cemento hidráulico es un aditivo más fácil de obtener, más accesible en la mayor parte del país y más trabajable en cuanto a la distribución, mezclado, conformación y compactación en campo.

Esto último discutido anteriormente, se concluye de la experiencia en la realización del ensayo de módulo resiliente, ya que, en el momento de la fabricación de los especímenes, fue más complicado el proceso de dosificación, mezclado y homogenización para la combinación de suelo con emulsión asfáltica que para la combinación con cemento hidráulico.

Primeramente, es necesario destacar y aclarar que el diseño de pavimento realizado teniendo en cuenta la mejora de la subrasante, fue para demostrar el efecto en el diseño de pavimento que puede tener la incorporación de un aditivo (en este caso cemento hidráulico) y combinarlo con el material de la subrasante, el objetivo no fue realizar una mejora del diseño original o como una alternativa definitiva.

Con la mejora realizada con cemento hidráulico, fue posible obtener un paquete estructural más reducido a la hora de llevar a cabo el diseño de pavimento, es decir, se obtuvieron espesores de capas menores con este cambio, específicamente en la capa de subbase granular. Para tener aún más clara la comparación, se realizó un estudio económico de lo que podría costar la estructura de pavimento con una longitud y ancho previamente definidos, tanto para la estructura de pavimento original como para la estructura de pavimento con la mejora de la subrasante. Esta comparación económica dio como resultado un ahorro de aproximadamente un 16% utilizando la mejora del suelo con el cemento hidráulico, considerando únicamente materiales, maquinaria y mano de obra.

Por otro lado, los costos asociados al transporte y acarreo de los materiales no están contemplados en el estudio anterior, pero es claro que estos se reducirían de igual manera realizando una mejora de la subrasante como la comentada. Lo anterior es debido a que, al requerir una menor cantidad de materiales para las capas del pavimento, se va a requerir menos transporte desde las fuentes de los materiales hasta el sitio del proyecto, ahorrando en combustible, aceites, llantas, lubricantes, entre otros. Este aspecto también repercute positivamente en cuanto a la reducción de la contaminación del aire, del sonido y menores congestiones en las carreteras.

5.2 Recomendaciones

Debido a las variaciones presentes en los suelos (plasticidad, clasificación, humedad), antes de realizar un proceso de mejoramiento de subrasante siempre es importante la identificación del suelo (características, propiedades y clasificación), y un análisis de desempeño empleando varios tipos de aditivos, para posteriormente seleccionar el más eficiente según los resultados obtenidos, como resistencias, deformaciones, densidades, humedades óptimas, etc.; esto debido a que podría suceder que un aditivo arroje mejores resultados para un tipo de suelo que con otro. Por tal motivo, solamente realizando las pruebas o ensayos de laboratorio, resultará que el cemento hidráulico, o la cal hidratada, o la emulsión (en el caso de este estudio), sea el aditivo más eficiente.

Otro aspecto relevante que se debe tomar en cuenta, son los tiempos de construcción asociados, debido a que con la medida del mejoramiento de la subrasante y al requerir una menor cantidad de materiales de construcción, es probable que el tiempo de construcción disminuya, al aprovechar los materiales de sitio en lugar de traerlos desde otra fuente. Además, con estos aspectos anteriores es importante recalcar la contribución con el ambiente con el aprovechamiento de los recursos y la reducción de emisiones de contaminantes del aire que se lograría, al considerar la necesidad de un menor transporte de acarreo y utilización de los materiales del sitio. Debido al interés que puede tener esta información, podría ser el tema principal de una futura investigación y así tener mediciones cuantitativas de lo comentado.

Al tener resultados favorables, vale la pena señalar que esto no siempre puede suceder, ya que se deben de analizar de la mejor manera las condiciones de los suelos presentes en el sitio de proyecto, debido a que la subrasante constituye un material muy variable en todo sentido. Un aspecto relevante que hay que controlar es la humedad, por lo que las condiciones de la subrasante en sitio no siempre son favorables, no siempre se pueden iniciar los trabajos a como se encuentra el material. Esto es debido a que la humedad puede variar dependiendo del tipo de suelo y de la estación del año presente en el momento, lo cual se debe de controlar de la mejor manera para siempre realizar la dosificación correcta del suelo con el agua y el aditivo seleccionado.

Además, antes de determinar la viabilidad de la técnica de mejoramiento de la subrasante, es importante la proposición de tramos homogéneos en la subrasante según su comportamiento, ya que esta será siempre variable. Una práctica para realizar esto es con el uso del FWD (Falling Weight Deflectometer) identificando zonas con comportamientos del suelo similares, verificando si la técnica del mejoramiento es viable, siempre y cuando el suelo no presente una variabilidad significativa.

En el apartado 5.2.4, se discutió acerca de la escogencia del valor de módulo resiliente de la subrasante a utilizar. Es importante tener en cuenta que esta escogencia del mejor modelo, basada en la estadística, se puede mejorar realizando un análisis más detallado. Como se mencionó en el apartado indicado, es posible determinar de una mejor manera la relación existente entre las variables de los modelos calculados, por medio de métodos como R cuadrado ajustado o R cuadrado de predicción, al tratarse de regresiones exponenciales de dos o más variables. Además de esto anterior, es importante realizar otros análisis y determinar de una mejor manera el comportamiento de los modelos calculados; análisis como pruebas de parametricidad, estadística descriptiva, análisis de datos inusuales, análisis de residuales, entre otros (hasta

es probable que otro modelo calculado tenga un mejor ajuste de las variables que el modelo seleccionado). Así las cosas, el coeficiente de determinación R^2 es una medida práctica y sencilla pero no lo explica todo.

En caso de realizar la técnica de mejoramiento o estabilización de la subrasante en un determinado proyecto vial, es recomendable evaluar la durabilidad que podría tener esta capa durante su vida útil, bajo las cargas de tránsito, el peso de las demás capas del pavimento y la acción del intemperismo. Como aún no existe alguna especificación en la normativa nacional sobre la durabilidad de la capa de suelo estabilizado, se podría implementar la prueba de ciclos de humedecido y secado (AASHTO T-135) para determinar la pérdida de masa o porcentaje de desgaste y definir un valor máximo, prueba que se utiliza para las capas de base estabilizada.

En el apartado 5.6 de Análisis de Resultados, se detalla la situación que ocurrió con los especímenes de la combinación de suelo con cal hidratada, sobre la dosificación del agua y sus consecuencias. Es importante, en caso de que este proyecto sirva de base o referencia para otras investigaciones, que se considere la realización de los procedimientos adecuados y ensayos requeridos para obtener un valor más robusto y confiable de módulo resiliente de la subrasante combinada con cal.

Finalmente, antes del inicio de todo proyecto carretero, se recalca la importancia de considerar dentro del diseño de pavimento la posibilidad de agregar la actividad de mejoramiento de la subrasante, con el análisis respectivo para la selección adecuado del aditivo, determinando si sería factible o no para el proyecto desde el punto de vista económico e ingenieril. Es importante mencionar además que esta técnica debería ser considerada aún con más detalle en los proyectos municipales, los cuales podrían ser un buen comienzo para determinar el desempeño de la mejora de la subrasante en estas vías, como un modelo de prueba, debido a que estas rutas tienen un TPD menor que una ruta nacional primaria, y resultaría más sencillo en cuanto a la realización del diseño previo y estudio económico correspondiente.

CAPÍTULO 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Elizondo, F., Navas, A., Sibaja, D. (2010). *Efecto de la cal en la estabilización de subrasantes*. Ingeniería 20 (1 y 2): 83-108. Universidad de Costa Rica.

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/7268>

Ministerio de Obras Públicas y Transportes (2017). *Oficialización de modificaciones, actualizaciones y creaciones de algunas-secciones y subsecciones del Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR-2010)*. Actualizaciones Decreto Ejecutivo DE-41286-MOPT.

<http://repositorio.mopt.go.cr:8080/xmlui/handle/123456789/4077>

Ministerio de Obras Públicas y Transportes (2022). *CR-2020 Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes*. Decreto No. 43397. Oficialización De La Actualización del Manual De Especificaciones Generales para La Construcción De Carreteras, Caminos Y Puentes De Costa Rica (CR-2020). San José, Costa Rica.

<http://repositorio.mopt.go.cr:8080/xmlui/handle/123456789/4694>

Unidad de Materiales y Pavimentos (2014). *Evaluación de aditivos químicos como agentes estabilizadores de materiales granulares y suelos en subrasantes para su utilización como superficies de rodamiento en carreteras de bajo volumen vehicular*. Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1360/LM-PI-UMP-011-14%20Propuesta%20de%20Investigaci%C3%B3n-Evaluaci%C3%B3n%20de%20Aditivos%20Qu%C3%ADmicos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Elizondo, F., Sibaja, D. (2009). *Subrasantes: Estabilización y mejoramiento de rutas no pavimentadas*. Infraestructura Vial No 21, Febrero 2009: 49-55.

<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/506>

Wirtgen GmbH. (2012). *Wirtgen Cold Recycling Technology*. Primera edición. Windhagen, Alemania: Wirtgen GmbH. 100:161-p.

American Association of State Highway and Transportation Officials (1999). *T 307 Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. Technical Subcommittee: 1a, Soil and Unbound Recycled Materials, USA.

National Cooperative Highway Research Program (2004). *Number 285 Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design*.

Ulloa, A. & Múnera, J. (2020). *Guía de diseño para materiales estabilizados con asfalto*. Centro de Transferencia Tecnológica, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos estructurales, Universidad de Costa Rica, San José, costa Rica.

https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/2063/Guia_diseno_materiales_asfalto_estabilizado.pdf?sequence=1&isAllowed=y

National Lime Association (2006). *Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil*. Technical Brief: Lime, the Versatile Chemical, USA.

https://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/tech-brief-2006-v2.pdf

Coto, J. (2016). *Comparación de las estructuras de pavimento rígido y flexible por medio de un análisis de ciclo de vida, enfocado a carreteras de tránsito pesado*. Tesis de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

<https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6792>

Chinchilla, R., Vásquez, A. & Rosales, A. (2016). *El Mapa de los Suelos en Costa Rica con la Leyenda WRB*. Artículo Técnico, Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica. San José, Costa Rica.

<http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/av-1630.pdf>

Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (2016). *Suelos de Costa Rica*. Boletines Técnicos, Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica. San José, Costa Rica.

<https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/biblioteca-index.html>

Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (2008). *Manual de Estabilización de Suelos con Cemento o Cal*. Colaboración de Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España (ANCADE), Asociación Nacional Técnica de Estabilizados de Suelos y Reciclado de Firmes (ANTER) e Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). Madrid, España.

<https://www.ieca.es/producto/manual-de-estabilizacion-de-suelos-con-cemento-o-cal/>

Department of the Army, the Navy, and the Air Force (1994). *Soil Stabilization for Pavements*. Joint Departments of the Army and Air Force, USA, TM 5-822-14/AFMAN 32-8010, Soil Stabilization for Pavements. Government of the United States of America.

https://www.wbdg.org/FFC/ARMYCOE/COETM/ARCHIVES/tm_5_822_14.pdf

Unidad de Materiales y Pavimentos (2017). *Guía para la Selección de Agentes Estabilizadores para Suelos y Materiales Granulares*. Proyecto Informe LM-PI-UMP-055-R1, Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR. San José, Costa Rica.

<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1533?show=full>

Zhang, B., & Yu, X. (2021). *Experimental Evaluation of Lime Sludge Performance in Subgrade Stabilization*. In *GeoCongress 2012* (pp. 3775–3785). <https://doi.org/doi:10.1061/9780784412121.387>

D., T. B., B., E. T., & H., B. C. (2021). *Case Study of Subgrade Stabilization Using Fly Ash: State Highway 32, Port Washington, Wisconsin*. In *Recycled Materials in Geotechnics* (pp. 123–136). [https://doi.org/doi:10.1061/40756\(149\)8](https://doi.org/doi:10.1061/40756(149)8)

Iyengar, S. et al (2013). *Pavement Subgrade Stabilization Using Polymers: Characterization and Performance*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE. 25 April, 472–483.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000612](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000612)

Daniels, J. & Janardhanam, R. (2021). *Cold Weather Subgrade Stabilization*. In Soil Improvement (pp. 1–10). [https://doi.org/doi:10.1061/40916\(235\)8](https://doi.org/doi:10.1061/40916(235)8)

Bandara, N. et al (2021). *Pavement Subgrade Stabilization Using Recycled Materials*. In Airfield and Highway Pavements 2015 (pp. 605–616).
<https://doi.org/doi:10.1061/9780784479216.054>

Qubain, B., Heirendt, K., & Li, J. (2021). *Quality Assurance and Quality Control Requirements for Lime and Cement Subgrade Stabilization*. In Pavement Mechanics and Performance (pp. 229–238).
[https://doi.org/doi:10.1061/40866\(198\)29](https://doi.org/doi:10.1061/40866(198)29)

Cuelho, E., Perkins, S., & von Maubeuge, K. (2021). *Full-Scale Field Study of Geosynthetics Used As Subgrade Stabilization*. In Geo-Frontiers 2011 (pp. 4703–4712).
[https://doi.org/doi:10.1061/41165\(397\)481](https://doi.org/doi:10.1061/41165(397)481)

Tang, X., et al. (2021). *Laboratory Study on Effects of Geogrid Properties on Subgrade Stabilization of Flexible Pavements*. In GeoCongress 2008 (pp. 1089–1096).
[https://doi.org/doi:10.1061/40971\(310\)136](https://doi.org/doi:10.1061/40971(310)136)

CAPÍTULO 7. APÉNDICES

7.1 Apéndice: Toma de datos y cálculos previos para el ensayo de módulo resiliente.

Cuadro 7.1. Datos para módulo resiliente, Suelo sin estabilizar.

TOMA DE DATOS PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS										
Fecha	22/03/2022			Balanza	BZ-091					
No. Muestra	0404-22			Horno	HN-047					
Hora inicio	8:39			Pie de rey	PR-061					
Hora final	16:30			Técnicos	JDC, JCM					
Material	Suelo sin estabilizar									
Compactación	Impacto									
No. Golpes	25									
Cantidad de capas	6									
Compactación	Und.	Especímen								
		1			2			3		
Masa de molde	g	6291,70			6291,70			6291,70		
Masa molde + espécimen	g	9324,20			9325,30			9323,40		
Masa de espécimen	g	3032,50			3033,60			3031,70		
Humedades										
Mc (especímen MR)	g	955,40			848,10			966,90		
Mc+h (especímen MR)	g	4008,50			3906,90			4017,30		
Mc+s (especímen MR)	g	3392,90			3413,80			3298,40		
Humedad (especímen MR)	%	25,26			19,22			30,83		
Mc (material suelto)	g	66,18			66,49			66,95		
Mc+h (material suelto)	g	747,66			683,62			648,37		
Mc+s (material suelto)	g	599,86			548,47			522,59		
Humedad (compactación)	%	27,69			28,04			27,61		
Ensayo MR										
Diámetro superior	mm	101,70			101,91			102,05		
Diámetro intermedio	mm	101,35			101,53			101,66		
Diámetro inferior	mm	101,92			101,62			101,85		
Espesor de membrana	mm	0,63 (x2)			0,63 (x2)			0,63 (x2)		
Diámetro neto	mm	100,44	100,09	100,66	100,65	100,27	100,36	100,79	100,40	100,59
Altura espécimen, tapa y base	mm	269,04	269,06	269,06	269,57	269,70	269,62	269,91	270,28	270,25
Altura de tapa y base	mm	63,95			63,95			63,95		
Altura inicial	mm	205,09	205,11	205,11	205,62	205,75	205,67	205,96	206,33	206,30
Secuencias ejecutadas	---	15-15			15-15			15-15		

Fuente: Elaboración propia (Formato de LanammeUCR).

Cuadro 7.2. Datos para módulo resiliente, Suelo combinado con cemento hidráulico.

TOMA DE DATOS PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS										
Fecha	28/03/2022			Balanza	BZ-091					
No. Muestra	0404-22			Horno	HN-047					
Hora inicio	8:00			Pie de rey	PR-061					
Hora final	13:00			Técnicos	JDC, JCM					
Material	Suelo combinado con cemento hidráulico									
Compactación	Impacto									
No. Golpes	25									
Cantidad de capas	6									
Compactación	Und.	Especimen								
		1			2			3		
Masa de molde	g	6291,70			6291,70			6291,70		
Masa molde + espécimen	g	9171,00			9162,90			9250,00		
Masa de espécimen	g	2879,30			2871,20			2958,30		
Humedades										
Mc (especimen MR)	g	955,20			848,10			967,30		
Mc+h (especimen MR)	g	4040,70			3931,50			4058,50		
Mc+s (especimen MR)	g	3312,20			3192,50			3345,80		
Humedad (especimen MR)	%	30,91			31,52			29,96		
Mc (material suelto)	g	66,24			96,20			66,83		
Mc+h (material suelto)	g	601,98			441,47			590,32		
Mc+s (material suelto)	g	496,11			371,99			480,57		
Humedad (compactación)	%	24,63			25,19			26,53		
Ensayo MR										
Diámetro superior	mm	102,35			102,41			102,20		
Diámetro intermedio	mm	102,45			102,58			101,77		
Diámetro inferior	mm	102,83			103,02			102,76		
Espesor de membrana	mm	0,63 (x2)			0,63 (x2)			0,63 (x2)		
Diámetro neto	mm	101,09	101,19	101,57	101,15	101,32	101,76	100,94	100,51	101,50
Altura espécimen, tapa y base	mm	271,40	271,43	271,37	272,79	272,65	272,61	270,43	270,72	270,81
Altura de tapa y base	mm	63,95			63,95			63,95		
Altura inicial	mm	207,45	207,48	207,42	208,84	208,70	208,66	206,48	206,77	206,86
Secuencias ejecutadas	---	15-15			15-15			15-15		

Fuente: Elaboración propia (Formato de LanammeUCR).

Cuadro 7.3. Datos para módulo resiliente, Suelo combinado con cal.

TOMA DE DATOS PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS				
Fecha	29/03/2022	Balanza	BZ-091	
No. Muestra	0404-22	Horno	HN-047	
Hora inicio	7:45	Pie de rey	PR-061	
Hora final	12:00	Técnicos	JDC, JCM	
Material	Suelo combinado con cal			
Compactación	Impacto			
No. Golpes	25			
Cantidad de capas	6			
Compactación	Und.	Especimen		
		1	2	3
Masa de molde	g	6291,70	6291,70	6291,70
Masa molde + espécimen	g	9263,40	9274,30	9266,10
Masa de espécimen	g	2971,70	2982,60	2974,40
Humedades				
Mc (especimen MR)	g	922,60	856,90	845,10
Mc+h (especimen MR)	g	3915,90	3857,20	3846,00
Mc+s (especimen MR)	g	3207,20	3162,40	3136,60
Humedad (especimen MR)	%	31,02	30,14	30,96
Mc (material suelto)	g	65,44	66,74	66,63
Mc+h (material suelto)	g	507,61	586,84	656,55
Mc+s (material suelto)	g	399,32	456,13	509,25
Humedad (compactación)	%	32,43	33,57	33,28
Ensayo MR				
Diámetro superior	mm	101,46	101,77	101,55
Diámetro intermedio	mm	101,68	101,77	101,75
Diámetro inferior	mm	102,08	101,81	101,71

Fuente: Elaboración propia (Formato de LanammeUCR).

Cuadro 7.4. Datos para módulo resiliente, Suelo combinado con emulsión asfáltica.

TOMA DE DATOS PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS										
Fecha	30/03/2022			Balanza	BZ-091					
No. Muestra	0404-22			Horno	HN-047					
Hora inicio	7:40			Pie de rey	PR-061					
Hora final	12:00			Técnicos	JDC, JCM					
Material	Suelo combinado con emulsión asfáltica									
Compactación	Impacto									
No. Golpes	25									
Cantidad de capas	6									
Compactación	Und.	Especimen								
		1			2			3		
Masa de molde	g	6291,70			6291,70			6291,70		
Masa molde + espécimen	g	9190,30			9159,20			9156,90		
Masa de espécimen	g	2898,60			2867,50			2865,20		
Humedades										
Mc (especimen MR)	g	847,00			841,20			845,30		
Mc+h (especimen MR)	g	3621,40			3594,60			3599,50		
Mc+s (especimen MR)	g	3165,50			3145,60			3148,90		
Humedad (especimen MR)	%	19,66			19,48			19,56		
Mc (material suelto)	g	66,87			66,62			66,24		
Mc+h (material suelto)	g	588,51			633,31			599,80		
Mc+s (material suelto)	g	473,09			509,63			485,50		
Humedad (compactación)	%	28,41			27,92			27,26		
Ensayo MR										
Diámetro superior	mm	99,53			99,75			99,75		
Diámetro intermedio	mm	99,55			100,18			100,01		
Diámetro inferior	mm	100,13			100,48			100,25		
Espesor de membrana	mm	0,63 (x2)			0,63 (x2)			0,63 (x2)		
Diámetro neto	mm	98,27	98,29	98,87	98,49	98,92	99,22	98,49	98,75	98,99
Altura espécimen, tapa y base	mm	266,68	265,03	265,27	266,99	266,67	265,69	266,65	266,05	266,34
Altura de tapa y base	mm	63,95			63,95			63,95		
Altura inicial	mm	202,73	201,08	201,32	203,04	202,72	201,74	202,70	202,10	202,39
Secuencias ejecutadas	---	15-15			15-15			15-15		

Fuente: Elaboración propia (Formato de LanammeUCR).

Cuadro 7.5. Densidades, humedades y compactación, Suelo sin estabilizar.

DENSIDADES, PORCENTAJES DE HUMEDAD Y COMPACTACIÓN					
Material	Suelo sin estabilizar				
Ítem	Unidades	Espécimen			
		1	2	3	Promedio
Humedad óptima	%	25,80	25,80	25,80	25,80
Humedad MR	%	25,26	19,22	30,83	25,10
Humedad de compactación	%	27,69	28,04	27,61	27,78
Masa húmeda	kg	3,03	3,03	3,03	3,03
Volúmen del espécimen	mm ³	1623682,79	1629221,16	1638739,49	1630547,81
	m ³	0,00162	0,00163	0,00164	0,00163
Densidad máxima seca	kg/m ³	1490,00	1490,00	1490,00	1490,00
Densidad húmeda	kg/m ³	1867,67	1861,99	1850,02	1859,89
Densidad seca	kg/m ³	1462,61	1454,22	1449,80	1455,54
Compactación	%	98,16	97,60	97,30	97,69

Cuadro 7.6. Densidades, humedades y compactación, Suelo combinado con cemento hidráulico.

DENSIDADES, PORCENTAJES DE HUMEDAD Y COMPACTACIÓN					
Material	Suelo combinado con cemento hidráulico				
Ítem	Unidades	Espécimen			
		1	2	3	Promedio
Humedad óptima	%	23,03	23,03	23,03	23,03
Humedad MR	%	30,91	31,52	29,96	30,80
Humedad de compactación	%	24,63	25,19	26,53	25,45
Masa húmeda	kg	2,88	2,87	2,96	2,90
Volúmen del espécimen	mm ³	1671395,75	1685944,43	1655528,90	1670956,36
	m ³	0,00167	0,00169	0,00166	0,00167
Densidad máxima seca	kg/m ³	1489,86	1489,86	1489,86	1489,86
Densidad húmeda	kg/m ³	1722,69	1703,02	1786,92	1737,55
Densidad seca	kg/m ³	1382,26	1360,32	1412,29	1384,96
Compactación	%	92,78	91,30	94,79	92,96

Cuadro 7.7. Densidades, humedades y compactación, Suelo combinado con cal.

DENSIDADES, PORCENTAJES DE HUMEDAD Y COMPACTACIÓN					
Material	Suelo combinado con cal				
Ítem	Unidades	Espécimen			
		1	2	3	Promedio
Humedad óptima	%	29,13	29,13	29,13	29,13
Humedad MR	%	31,02	30,14	30,96	30,71
Humedad de compactación	%	32,43	33,57	33,28	33,09
Masa húmeda	kg	2,97	2,98	2,97	2,98
Volúmen del espécimen	mm ³	1629921,23	1640374,88	1630924,01	1633740,04
	m ³	0,00163	0,00164	0,00163	0,00163
Densidad máxima seca	kg/m ³	1399,75	1399,75	1399,75	1399,75
Densidad húmeda	kg/m ³	1823,22	1818,24	1823,75	1821,74
Densidad seca	kg/m ³	1376,70	1361,29	1368,37	1368,79
Compactación	%	98,35	97,25	97,76	97,79

Cuadro 7.8. Densidades, humedades y compactación, Suelo combinado con emulsión asfáltica.

DENSIDADES, PORCENTAJES DE HUMEDAD Y COMPACTACIÓN					
Material	Suelo combinado con emulsión asfáltica				
Ítem	Unidades	Espécimen			
		1	2	3	Promedio
Humedad óptima	%	30,62	30,62	30,62	30,62
Humedad MR	%	19,66	19,48	19,56	19,57
Humedad de compactación	%	28,41	27,92	27,26	27,86
Masa húmeda	kg	2,90	2,87	2,87	2,88
Volúmen del espécimen	mm ³	1536328,16	1554900,28	1549918,30	1547048,91
	m ³	0,00154	0,00155	0,00155	0,00155
Densidad máxima seca	kg/m ³	1386,80	1386,80	1386,80	1386,80
Densidad húmeda	kg/m ³	1886,71	1844,17	1848,61	1859,83
Densidad seca	kg/m ³	1469,25	1441,68	1452,60	1454,51
Compactación	%	105,95	103,96	104,74	104,88

7.2 Apéndice: Resultados del ensayo de módulo resiliente por secuencia (datos sin procesar)

Cuadro 7.9. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo sin estabilizar, Muestra #1.

N° Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)
0	41,400	25,057	126 114
1	41,395	12,644	119 863
2	41,397	25,037	127 732
3	41,395	37,360	117 816
4	41,397	50,009	108 457
5	41,402	62,041	99 958
6	27,597	12,600	122 063
7	27,597	25,066	120 174
8	27,596	37,459	113 149
9	27,598	49,940	104 479
10	27,598	62,377	96 483
11	13,803	12,521	117 362
12	13,803	24,963	110 547
13	13,792	37,622	102 366
14	13,803	50,069	95 497
15	13,802	62,505	88 949

Fuente: LanammeUCR, Excel de resultados.

Cuadro 7.10. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo sin estabilizar, Muestra #2.

N° Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)
0	41,394	24,953	110 038
1	41,403	12,711	94 060
2	41,400	24,948	113 050
3	41,401	37,323	111 519
4	41,398	50,078	108 982
5	41,390	62,182	101 203
6	27,601	12,602	123 097
7	27,597	25,056	126 920
8	27,600	37,323	117 042
9	27,600	50,014	107 374
10	27,600	62,290	98 203
11	13,796	12,587	124 342
12	13,799	25,150	116 235
13	13,803	37,624	106 979
14	13,793	49,925	98 013
15	13,803	62,577	90 993

Fuente: LanammeUCR, Excel de resultados.

Cuadro 7.11. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo sin estabilizar, Muestra #3.

N° Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)
0	41,398	24,914	113 100
1	41,401	12,600	118 778
2	41,402	25,028	114 865
3	41,401	37,470	101 882
4	41,402	49,824	92 888
5	41,401	62,365	86 159
6	27,598	12,649	121 899
7	27,604	25,018	110 412
8	27,600	37,278	99 005
9	27,598	49,775	89 618
10	27,600	62,232	82 175
11	13,797	12,580	111 872
12	13,802	25,111	100 504
13	13,799	37,613	90 387
14	13,803	49,898	81 618
15	13,799	62,522	75 361

Fuente: LanammeUCR, Excel de resultados.

Cuadro 7.12. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo combinado con cal, Muestra #1.

N° Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)
0	41,400	25,104	75 813
1	41,401	12,599	82 881
2	41,401	25,094	75 944
3	41,389	37,505	65 801
4	41,400	50,143	61 556
5	41,391	62,367	59 012
6	27,594	12,648	58 622
7	27,594	25,311	47 137
8	27,597	37,456	44 895
9	27,606	49,838	47 081
10	27,599	62,491	49 686
11	13,803	12,761	41 457
12	13,794	25,395	33 440
13	13,795	37,988	33 989
14	13,793	50,395	37 294
15	13,800	62,175	40 355

Fuente: LanammeUCR, Excel de resultados.

Cuadro 7.13. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo combinado con cal, Muestra #2.

N° Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)
0	41,402	24,905	85 186
1	41,397	12,608	87 923
2	41,399	24,954	85 946
3	41,393	37,581	77 385
4	41,394	49,987	72 410
5	41,399	62,318	70 163
6	27,607	12,667	67 733
7	27,598	25,136	57 008
8	27,599	37,704	55 165
9	27,592	50,115	57 561
10	27,601	62,387	60 413
11	13,799	12,701	50 915
12	13,799	25,264	42 167
13	13,796	37,709	42 331
14	13,800	50,263	45 867
15	13,796	62,437	49 656

Fuente: LanammeUCR, Excel de resultados.

Cuadro 7.14. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo combinado con cal, Muestra #3.

N° Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)
0	41,400	25,015	88 363
1	41,402	12,631	94 734
2	41,396	24,833	88 467
3	41,409	37,656	78 131
4	41,404	49,818	71 588
5	41,386	62,439	68 425
6	27,602	12,740	69 392
7	27,595	25,134	55 961
8	27,594	37,676	53 840
9	27,594	50,075	55 476
10	27,598	62,089	57 454
11	13,801	12,666	48 992
12	13,797	25,233	40 259
13	13,797	37,854	40 528
14	13,797	50,184	43 564
15	13,800	62,425	46 972

Fuente: LanammeUCR, Excel de resultados.

Cuadro 7.15. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo combinado con cemento hidráulico, Muestra #1.

N° Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)
0	41,396	25,042	132 858
1	41,397	12,545	138 222
2	41,408	24,989	134 062
3	41,397	37,500	119 431
4	41,401	50,026	110 609
5	41,398	62,246	105 677
6	27,598	12,637	119 152
7	27,600	25,120	105 322
8	27,599	37,422	96 360
9	27,599	49,948	94 062
10	27,595	62,503	93 866
11	13,806	12,613	96 640
12	13,802	25,018	85 283
13	13,799	37,660	80 263
14	13,793	50,196	79 264
15	13,801	62,551	79 811

Fuente: LanammeUCR, Excel de resultados.

Cuadro 7.16. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo combinado con cemento hidráulico, Muestra #2.

N° Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)
0	41,401	24,984	120 465
1	41,405	12,645	121 209
2	41,402	25,033	121 791
3	41,389	37,493	109 429
4	41,394	49,794	101 130
5	41,408	62,216	97 202
6	27,597	12,635	109 676
7	27,598	25,192	95 534
8	27,602	37,527	87 854
9	27,599	49,978	85 458
10	27,605	62,192	85 253
11	13,795	12,519	92 950
12	13,801	25,086	79 899
13	13,804	37,634	73 863
14	13,794	50,157	72 611
15	13,797	62,550	73 374

Fuente: LanammeUCR, Excel de resultados.

Cuadro 7.17. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo combinado con cemento hidráulico, Muestra #3.

N° Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)
0	41,394	24,908	156 025
1	41,395	12,493	141 550
2	41,400	24,932	157 230
3	41,395	37,494	164 108
4	41,404	50,006	168 301
5	41,406	62,196	171 727
6	27,604	12,527	145 711
7	27,600	24,981	151 079
8	27,605	37,596	154 534
9	27,596	50,079	158 723
10	27,599	62,367	162 191
11	13,797	12,561	143 010
12	13,803	24,908	141 507
13	13,802	37,596	144 284
14	13,801	49,962	145 221
15	13,808	62,235	148 115

Fuente: LanammeUCR, Excel de resultados.

Cuadro 7.18. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo combinado con emulsión asfáltica, Muestra #1.

N° Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)
0	41,398	25,078	314 265
1	41,400	12,644	313 885
2	41,398	24,955	311 647
3	41,394	37,563	311 277
4	41,392	50,002	312 294
5	41,397	62,200	309 885
6	27,603	12,557	274 243
7	27,599	25,016	273 647
8	27,599	37,512	278 649
9	27,604	49,930	284 106
10	27,603	62,287	286 733
11	13,805	12,613	214 039
12	13,793	25,047	219 350
13	13,803	37,389	228 638
14	13,799	49,863	237 804
15	13,802	62,220	246 191

Fuente: LanammeUCR, Excel de resultados.

Cuadro 7.19. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo combinado con emulsión asfáltica, Muestra #2.

N° Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)
0	41,397	24,896	257 534
1	41,405	12,557	230 792
2	41,402	24,972	258 179
3	41,403	37,489	263 589
4	41,397	49,995	262 931
5	41,399	62,186	263 703
6	27,605	12,608	243 586
7	27,594	24,967	243 149
8	27,595	37,499	248 563
9	27,600	49,817	249 272
10	27,604	62,242	249 740
11	13,792	12,552	217 160
12	13,797	25,084	220 282
13	13,795	37,463	221 259
14	13,800	49,944	222 949
15	13,803	62,288	225 425

Fuente: LanammeUCR, Excel de resultados.

Cuadro 7.20. Datos de módulo resiliente por secuencia para suelo combinado con emulsión asfáltica, Muestra #3.

N° Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)
0	41,402	25,075	243 697
1	41,395	12,658	226 186
2	41,404	24,846	243 009
3	41,403	37,330	245 137
4	41,400	49,742	244 797
5	41,400	62,201	244 866
6	27,605	12,591	234 072
7	27,598	24,948	230 227
8	27,600	37,509	228 247
9	27,600	49,926	226 785
10	27,600	62,313	224 774
11	13,800	12,637	204 813
12	13,793	25,035	196 657
13	13,801	37,442	194 434
14	13,804	49,799	193 765
15	13,806	62,170	194 268

Fuente: LanammeUCR, Excel de resultados.

7.3 Apéndice: Estructura de costos por actividad para diseño de pavimento original.

PROYECTO: AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN BARRANCA - LIMONAL PROPUESTA TÉCNICA: PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (15 AÑOS)																											
INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD																											
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad																								
CR 301.06	Sub base de agregados, graduación B	m3	450,00																								
MAQUINARIA																											
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Cargador CAT 938H, 172 HP	1,00	36,20	m³/hora	12,43	€ 32.000,00	€ 397.790,06																					
Vagoneta 12 m³ Volvo	1,00	6,75	m³/hora	66,67	€ 19.000,00	€ 1.266.666,67																					
Niveladora CAT 12H, 145 HP	1,00	36,20	m³/hora	12,43	€ 28.000,00	€ 348.066,30																					
Tanque de agua	1,00	64,10	m³/hora	7,02	€ 15.000,00	€ 105.304,21																					
Compactador CAT 533 rodillo simple , 120 HP	1,00	77,70	m³/hora	5,79	€ 22.000,00	€ 127.413,13																					
Subtotal						€ 2.245.240,36																					
MANO DE OBRA																											
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Operador de equipo	1,00	-	m³/hora	97,32	€ 1.517,38	€ 147.671,86																					
Chofer	1,00	-	m³/hora	7,02	€ 1.775,64	€ 12.465,50																					
Peón	3,00	25,00	m³/hora	18,00	€ 1.359,39	€ 73.407,06																					
Encargado	1,00	30,00	m³/hora	15,00	€ 1.775,64	€ 26.634,62																					
Subtotal						€ 260.179,04																					
MATERIALES																											
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unidad	Monto total																							
Agregado para sub-base	450,00	m3	€ 11.250,00	€ 5.062.500,00																							
Subtotal						€ 5.062.500,00																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Rubro</th> <th>Porcentaje</th> <th>Monto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Subtotal</td> <td></td> <td>€ 7.567.919,40</td> </tr> <tr> <td>Subtotal precio unitario</td> <td></td> <td>€ 16.817,60</td> </tr> <tr> <td>Imprevistos</td> <td>5,00%</td> <td>€ 840,88</td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>5,00%</td> <td>€ 840,88</td> </tr> <tr> <td>Utilidad</td> <td>10,00%</td> <td>€ 1.681,76</td> </tr> <tr> <td>Precio unitario</td> <td></td> <td>€ 20.181,12</td> </tr> </tbody> </table>							Rubro	Porcentaje	Monto	Subtotal		€ 7.567.919,40	Subtotal precio unitario		€ 16.817,60	Imprevistos	5,00%	€ 840,88	Administración	5,00%	€ 840,88	Utilidad	10,00%	€ 1.681,76	Precio unitario		€ 20.181,12
Rubro	Porcentaje	Monto																									
Subtotal		€ 7.567.919,40																									
Subtotal precio unitario		€ 16.817,60																									
Imprevistos	5,00%	€ 840,88																									
Administración	5,00%	€ 840,88																									
Utilidad	10,00%	€ 1.681,76																									
Precio unitario		€ 20.181,12																									

PROYECTO: AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN BARRANCA - LIMONAL PROPUESTA TÉCNICA: PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (15 AÑOS)																											
INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD																											
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad																								
CR 414.01	Riego de liga (tipo CRS-1 capa de liga)	lt	562,50																								
MAQUINARIA																											
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Barredora	1,00	151,52	L/hora	3,71	€ 15.000,00	€ 55.685,72																					
Camión distribuidor de asfalto	1,00	151,52	L/hora	3,71	€ 22.000,00	€ 81.672,39																					
Tanque de agua	1,00	1000,00	L/hora	0,56	€ 15.000,00	€ 8.437,50																					
Subtotal						€ 145.795,60																					
MANO DE OBRA																											
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Chofer	1,00	-	L/hora	0,56	€ 1.775,64	€ 998,80																					
Operador de equipo	1,00	-	L/hora	7,42	€ 1.517,38	€ 11.266,21																					
Peón	3,00	70,00	L/hora	8,04	€ 1.359,39	€ 32.771,01																					
Subtotal						€ 45.036,02																					
MATERIALES																											
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unidad	Monto total																							
Emulsión asfáltica litro	562,50	L	€ 480,80	€ 270.447,19																							
Subtotal						€ 270.447,19																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Rubro</th> <th>Porcentaje</th> <th>Monto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Subtotal</td> <td></td> <td>€ 461.278,81</td> </tr> <tr> <td>Subtotal precio unitario</td> <td></td> <td>€ 820,05</td> </tr> <tr> <td>Imprevistos</td> <td>5,00%</td> <td>€ 41,00</td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>5,00%</td> <td>€ 41,00</td> </tr> <tr> <td>Utilidad</td> <td>10,00%</td> <td>€ 82,01</td> </tr> <tr> <td>Precio unitario</td> <td></td> <td>€ 984,06</td> </tr> </tbody> </table>							Rubro	Porcentaje	Monto	Subtotal		€ 461.278,81	Subtotal precio unitario		€ 820,05	Imprevistos	5,00%	€ 41,00	Administración	5,00%	€ 41,00	Utilidad	10,00%	€ 82,01	Precio unitario		€ 984,06
Rubro	Porcentaje	Monto																									
Subtotal		€ 461.278,81																									
Subtotal precio unitario		€ 820,05																									
Imprevistos	5,00%	€ 41,00																									
Administración	5,00%	€ 41,00																									
Utilidad	10,00%	€ 82,01																									
Precio unitario		€ 984,06																									

PROYECTO: AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN BARRANCA - LIMONAL
PROPUESTA TÉCNICA: PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (15 AÑOS)

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD																												
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad																									
CR 413.02	Riego de imprimación	lt	900,00																									
MAQUINARIA																												
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																						
Barredora	1,00	151,52	L/hora	5,94	€ 15.000,00	€ 89.097,15																						
Camión distribuidor de asfalto	1,00	151,52	L/hora	5,94	€ 22.000,00	€ 130.675,82																						
Tanque de agua	1,00	1000,00	L/hora	0,90	€ 15.000,00	€ 13.500,00																						
Subtotal						€ 233.272,97																						
MANO DE OBRA																												
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																						
Chofer	1,00	-	L/hora	0,90	€ 1.775,64	€ 1.598,08																						
Operador de equipo	1,00	-	L/hora	11,88	€ 1.517,38	€ 18.025,94																						
Peón	3,00	70,00	L/hora	12,86	€ 1.359,39	€ 52.433,61																						
Subtotal						€ 72.057,63																						
MATERIALES																												
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total																								
Emulsión asfáltica litro	900,00	L	€ 480,80	€ 432.715,50																								
Subtotal				€ 432.715,50																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Rubro</th> <th>Porcentaje</th> <th>Monto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Subtotal</td> <td></td> <td>€ 738.046,10</td> </tr> <tr> <td>Subtotal precio unitario</td> <td></td> <td>€ 820,05</td> </tr> <tr> <td>Imprevistos</td> <td>5,00%</td> <td>€ 41,00</td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>5,00%</td> <td>€ 41,00</td> </tr> <tr> <td>Utilidad</td> <td>10,00%</td> <td>€ 82,01</td> </tr> <tr> <td>Precio unitario</td> <td></td> <td>€ 984,06</td> </tr> </tbody> </table>								Rubro	Porcentaje	Monto	Subtotal		€ 738.046,10	Subtotal precio unitario		€ 820,05	Imprevistos	5,00%	€ 41,00	Administración	5,00%	€ 41,00	Utilidad	10,00%	€ 82,01	Precio unitario		€ 984,06
Rubro	Porcentaje	Monto																										
Subtotal		€ 738.046,10																										
Subtotal precio unitario		€ 820,05																										
Imprevistos	5,00%	€ 41,00																										
Administración	5,00%	€ 41,00																										
Utilidad	10,00%	€ 82,01																										
Precio unitario		€ 984,06																										

PROYECTO: AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN BARRANCA - LIMONAL
PROPUESTA TÉCNICA: PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (15 AÑOS)

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD																												
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad																									
CR 413.03	Material de secado	m3	7,50																									
MAQUINARIA																												
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																						
Distribuidor de agregados	1,00	7,00	m³/hora	1,07	€ 20.000,00	€ 21.428,57																						
Vagoneta 12 m³ Volvo	1,00	5,49	m³/hora	1,37	€ 19.000,00	€ 25.956,28																						
Cargador CAT 938H, 172 HP	1,00	46,34	m³/hora	0,16	€ 32.000,00	€ 5.179,11																						
Compactador doble rodillo CB534, 107 HP	1,00	14,00	m³/hora	0,54	€ 20.000,00	€ 10.714,29																						
Subtotal						€ 63.278,25																						
MANO DE OBRA																												
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																						
Operador de equipo	1,00	-	m³/hora	3,14	€ 1.517,38	€ 4.757,17																						
Rastrillero	1,00	4,00	m³/hora	1,88	€ 1.517,38	€ 2.845,09																						
Peón	2,00	7,17	m³/hora	1,05	€ 1.359,39	€ 2.843,91																						
Subtotal						€ 10.446,17																						
MATERIALES																												
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total																								
Polvo de piedra (material de secado)	7,50	m3	€ 8.500,00	€ 63.750,00																								
Subtotal				€ 63.750,00																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Rubro</th> <th>Porcentaje</th> <th>Monto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Subtotal</td> <td></td> <td>€ 137.474,42</td> </tr> <tr> <td>Subtotal precio unitario</td> <td></td> <td>€ 18.329,92</td> </tr> <tr> <td>Imprevistos</td> <td>5,00%</td> <td>€ 916,50</td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>5,00%</td> <td>€ 916,50</td> </tr> <tr> <td>Utilidad</td> <td>10,00%</td> <td>€ 1.832,99</td> </tr> <tr> <td>Precio unitario</td> <td></td> <td>€ 21.995,91</td> </tr> </tbody> </table>								Rubro	Porcentaje	Monto	Subtotal		€ 137.474,42	Subtotal precio unitario		€ 18.329,92	Imprevistos	5,00%	€ 916,50	Administración	5,00%	€ 916,50	Utilidad	10,00%	€ 1.832,99	Precio unitario		€ 21.995,91
Rubro	Porcentaje	Monto																										
Subtotal		€ 137.474,42																										
Subtotal precio unitario		€ 18.329,92																										
Imprevistos	5,00%	€ 916,50																										
Administración	5,00%	€ 916,50																										
Utilidad	10,00%	€ 1.832,99																										
Precio unitario		€ 21.995,91																										

PROYECTO: AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN BARRANCA - LIMONAL
PROPUESTA TÉCNICA: PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (15 AÑOS)

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD						
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad			
CR 302.01 (a)	Base estabilizada con cemento hidraulico, 25 cm espesor	m2	750,00			
MAQUINARIA						
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Recuperadora CAT RM350, 467 HP	1,00	161,62	m²/hora	4,64	€ 70.000,00	€ 324.836,04
Cargador CAT 938H, 172 HP	1,00	161,62	m²/hora	4,64	€ 32.000,00	€ 148.496,47
Compactador CAT 533 rodillo simple, 120 HP	1,00	161,62	m²/hora	4,64	€ 22.000,00	€ 102.091,33
Compactador CAT PS-200B neumáticos, 77 HP	1,00	161,62	m²/hora	4,64	€ 22.000,00	€ 102.091,33
Tanque de agua	1,00	192,31	m²/hora	3,90	€ 15.000,00	€ 58.499,30
Vagoneta 12 m³ Volvo	1,00	35,61	m²/hora	21,06	€ 19.000,00	€ 400.168,49
Cabezal	1,00	161,62	m²/hora	4,64	€ 15.000,00	€ 69.607,72
Carreta plana	1,00	161,62	m²/hora	4,64	€ 5.000,00	€ 23.202,57
					Subtotal	€ 1.228.993,24
MANO DE OBRA						
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Operador de equipo	1,00	-	m²/hora	43,52	€ 1.517,38	€ 66.041,87
Chofer	1,00	-	m²/hora	4,64	€ 1.517,38	€ 7.041,44
Peón	4,00	65,00	m²/hora	11,54	€ 1.359,39	€ 62.741,08
Encargado	1,00	161,62	m²/hora	4,64	€ 1.775,64	€ 8.239,89
					Subtotal	€ 144.064,28
MATERIALES						
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total		
Cemento	135,00	sacos	€ 6.115,00	€ 825.525,00		
Agregados para base estabilizada	182,81	m3	€ 12.250,00	€ 2.239.453,13		
					Subtotal	€ 3.064.978,13
Rubro	Porcentaje	Monto				
Subtotal		€ 4.438.035,65				
Subtotal precio unitario		€ 5.917,38				
Imprevistos	5,00%	€ 295,87				
Administración	5,00%	€ 295,87				
Utilidad	10,00%	€ 591,74				
Precio unitario		€ 7.100,86				

PROYECTO: AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN BARRANCA - LIMONAL
PROPUESTA TÉCNICA: PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (15 AÑOS)

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD						
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad			
CR 401.01 (a)	Pavimento de concreto asfáltico en caliente 19,0 TMN, de 15 cm de espesor compactado para superficie de ruedo	m2	750,00			
MAQUINARIA						
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Vagoneta 12 m³ Volvo	1,00	38,24	m²/hora	19,61	€ 19.000,00	€ 372.646,44
Pavimentadora CAT AP600, 165 HP	1,00	290,21	m²/hora	2,58	€ 50.000,00	€ 129.216,77
Compactador BOMAG BW190AD doble rodillo, 134	1,00	290,21	m²/hora	2,58	€ 28.000,00	€ 72.361,39
Compactador BOMAG BW24RH neumáticos, 100 HP	1,00	290,21	m²/hora	2,58	€ 22.000,00	€ 56.855,38
Barredora	1,00	552,60	m²/hora	1,36	€ 15.000,00	€ 20.358,31
					Subtotal	€ 651.438,30
MANO DE OBRA						
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Operador de equipo	1,00	-	m²/hora	28,72	€ 1.517,38	€ 43.584,11
Encargado	1,00	290,21	m²/hora	2,58	€ 1.775,64	€ 4.588,85
Peón	6,00	145,10	m²/hora	5,17	€ 1.359,39	€ 42.158,89
					Subtotal	€ 90.331,86
MATERIALES						
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total		
Mezcla asfáltica	276	ton	€ 49.000,00	€ 13.505.625,00		
					Subtotal	€ 13.505.625,00
Rubro	Porcentaje	Monto				
Subtotal		€ 14.247.395,15				
Subtotal precio unitario		€ 18.996,53				
Imprevistos	5,00%	€ 949,83				
Administración	5,00%	€ 949,83				
Utilidad	10,00%	€ 1.899,65				
Precio unitario		€ 22.795,83				

7.4 Apéndice: Estructura de costos por actividad para diseño de pavimento nuevo.

PROYECTO: AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN BARRANCA - LIMONAL PROPUESTA TÉCNICA: PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (15 AÑOS)							
INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD							
Rubro	Actividad			Unidad	Cantidad		
---	Mejoramiento de subrasante (Recuperado de 30 cm)			m2	750,00		
MAQUINARIA							
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total	
Recuperadora CAT RM350, 467 HP	1,00	161,62	m³/hora	4,64	€ 70 000,00	€ 324 836,04	
Cargador CAT 938H, 172 HP	1,00	161,62	m³/hora	4,64	€ 32 000,00	€ 148 496,47	
Compactador CAT 533 rodillo simple, 120 HP	1,00	161,62	m³/hora	4,64	€ 22 000,00	€ 102 091,33	
Tanque de agua	1,00	192,31	m³/hora	3,90	€ 15 000,00	€ 58 499,30	
Vagoneta 12 m³ Volvo	1,00	35,61	m³/hora	21,06	€ 19 000,00	€ 400 168,49	
Cabezal	1,00	161,62	m³/hora	4,64	€ 15 000,00	€ 69 607,72	
Carreta plana	1,00	161,62	m³/hora	4,64	€ 5 000,00	€ 23 202,57	
Subtotal						€ 1 126 901,92	
MANO DE OBRA							
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total	
Operador de equipo	1,00	-	m³/hora	38,88	€ 1 517,38	€ 59 000,43	
Chofer	1,00	-	m³/hora	4,64	€ 1 517,38	€ 7 041,44	
Peón	4,00	65,00	m³/hora	11,54	€ 1 359,39	€ 62 741,08	
Encargado	1,00	161,62	m³/hora	4,64	€ 1 775,64	€ 8 239,89	
Subtotal						€ 137 022,84	
MATERIALES							
Descripción			Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total	
Cemento			310,00	sacos	€ 6 115,00	€ 1 895 650,00	
Subtotal						€ 1 895 650,00	
Rubro		Porcentaje	Monto				
Subtotal			€ 3 159 574,76				
Subtotal precio unitario			€ 4 212,77				
Imprevistos		5,00%	€ 210,64				
Administración		5,00%	€ 210,64				
Utilidad		10,00%	€ 421,28				
Precio unitario			€ 5 055,32				

PROYECTO: AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN BARRANCA - LIMONAL PROPUESTA TÉCNICA: PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (15 AÑOS)							
INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD							
Rubro	Actividad			Unidad	Cantidad		
CR 301.06	Sub base de agregados, graduación B			m3	0,00		
MAQUINARIA							
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total	
Cargador CAT 938H, 172 HP	1,00	36,20	m³/hora	0,00	€ 32 000,00	€ -	
Vagoneta 12 m³ Volvo	1,00	6,75	m³/hora	0,00	€ 19 000,00	€ -	
Niveladora CAT 12H, 145 HP	1,00	36,20	m³/hora	0,00	€ 28 000,00	€ -	
Tanque de agua	1,00	64,10	m³/hora	0,00	€ 15 000,00	€ -	
Compactador CAT 533 rodillo simple, 120 HP	1,00	77,70	m³/hora	0,00	€ 22 000,00	€ -	
Subtotal						€ -	
MANO DE OBRA							
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total	
Operador de equipo	1,00	-	m³/hora	0,00	€ 1 517,38	€ -	
Chofer	1,00	-	m³/hora	0,00	€ 1 775,64	€ -	
Peón	3,00	25,00	m³/hora	0,00	€ 1 359,39	€ -	
Encargado	1,00	30,00	m³/hora	0,00	€ 1 775,64	€ -	
Subtotal						€ -	
MATERIALES							
Descripción			Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total	
Agregado para sub-base			0,00	m3	€ 11 250,00	€ -	
Subtotal						€ -	
Rubro		Porcentaje	Monto				
Subtotal			€ -				
Subtotal precio unitario			---				
Imprevistos		5,00%	---				
Administración		5,00%	---				
Utilidad		10,00%	---				
Precio unitario			---				

PROYECTO: AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN BARRANCA - LIMONAL
PROPUESTA TÉCNICA: PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (15 AÑOS)

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD

Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad
CR 414.01	Riego de liga (tipo CRS-1 capa de liga)	lt	562,50

MAQUINARIA

Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Barredora	1,00	151,52	L/hora	3,71	€ 15 000,00	€ 55 685,72
Camión distribuidor de asfalto	1,00	151,52	L/hora	3,71	€ 22 000,00	€ 81 672,39
Tanque de agua	1,00	1000,00	L/hora	0,56	€ 15 000,00	€ 8 437,50
Subtotal						€ 145 795,60

MANO DE OBRA

Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Chofer	1,00	-	L/hora	0,56	€ 1 775,64	€ 998,80
Operador de equipo	1,00	-	L/hora	7,42	€ 1 517,38	€ 11 266,21
Peón	3,00	70,00	L/hora	8,04	€ 1 359,39	€ 32 771,01
Subtotal						€ 45 036,02

MATERIALES

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unidad	Monto total
Emulsión asfáltica litro	562,50	L	€ 480,80	€ 270 447,19
Subtotal				€ 270 447,19

Rubro	Porcentaje	Monto
Subtotal		€ 461 278,81
Subtotal precio unitario		€ 820,05
Imprevistos	5,00%	€ 41,00
Administración	5,00%	€ 41,00
Utilidad	10,00%	€ 82,01
Precio unitario		€ 984,06

PROYECTO: AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN BARRANCA - LIMONAL
PROPUESTA TÉCNICA: PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (15 AÑOS)

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD

Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad
CR 413.02	Riego de imprimación	lt	900,00

MAQUINARIA

Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Barredora	1,00	151,52	L/hora	5,94	€ 15 000,00	€ 89 097,15
Camión distribuidor de asfalto	1,00	151,52	L/hora	5,94	€ 22 000,00	€ 130 675,82
Tanque de agua	1,00	1000,00	L/hora	0,90	€ 15 000,00	€ 13 500,00
Subtotal						€ 233 272,97

MANO DE OBRA

Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Chofer	1,00	-	L/hora	0,90	€ 1 775,64	€ 1 598,08
Operador de equipo	1,00	-	L/hora	11,88	€ 1 517,38	€ 18 025,94
Peón	3,00	70,00	L/hora	12,86	€ 1 359,39	€ 52 433,61
Subtotal						€ 72 057,63

MATERIALES

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unidad	Monto total
Emulsión asfáltica litro	900,00	L	€ 480,80	€ 432 715,50
Subtotal				€ 432 715,50

Rubro	Porcentaje	Monto
Subtotal		€ 738 046,10
Subtotal precio unitario		€ 820,05
Imprevistos	5,00%	€ 41,00
Administración	5,00%	€ 41,00
Utilidad	10,00%	€ 82,01
Precio unitario		€ 984,06

PROYECTO: AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN BARRANCA - LIMONAL
PROPUESTA TÉCNICA: PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (15 AÑOS)

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD																											
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad																								
CR 413.03	Material de secado	m3	7,50																								
MAQUINARIA																											
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Distribuidor de agregados	1,00	7,00	m³/hora	1,07	€ 20 000,00	€ 21 428,57																					
Vagoneta 12 m³ Volvo	1,00	5,49	m³/hora	1,37	€ 19 000,00	€ 25 956,28																					
Cargador CAT 938H, 172 HP	1,00	46,34	m³/hora	0,16	€ 32 000,00	€ 5 179,11																					
Compactador doble rodillo CB534, 107 HP	1,00	14,00	m³/hora	0,54	€ 20 000,00	€ 10 714,29																					
Subtotal						€ 63 278,25																					
MANO DE OBRA																											
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Operador de equipo	1,00	-	m³/hora	3,14	€ 1 517,38	€ 4 757,17																					
Rastrillero	1,00	4,00	m³/hora	1,88	€ 1 517,38	€ 2 845,09																					
Peón	2,00	7,17	m³/hora	1,05	€ 1 359,39	€ 2 843,91																					
Subtotal						€ 10 446,17																					
MATERIALES																											
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total																							
Polvo de piedra (material de secado)	7,50	m3	€ 8 500,00	€ 63 750,00																							
Subtotal						€ 63 750,00																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Rubro</th> <th>Porcentaje</th> <th>Monto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Subtotal</td> <td></td> <td>€ 137 474,42</td> </tr> <tr> <td>Subtotal precio unitario</td> <td></td> <td>€ 18 329,92</td> </tr> <tr> <td>Imprevistos</td> <td>5,00%</td> <td>€ 916,50</td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>5,00%</td> <td>€ 916,50</td> </tr> <tr> <td>Utilidad</td> <td>10,00%</td> <td>€ 1 832,99</td> </tr> <tr> <td>Precio unitario</td> <td></td> <td>€ 21 995,91</td> </tr> </tbody> </table>							Rubro	Porcentaje	Monto	Subtotal		€ 137 474,42	Subtotal precio unitario		€ 18 329,92	Imprevistos	5,00%	€ 916,50	Administración	5,00%	€ 916,50	Utilidad	10,00%	€ 1 832,99	Precio unitario		€ 21 995,91
Rubro	Porcentaje	Monto																									
Subtotal		€ 137 474,42																									
Subtotal precio unitario		€ 18 329,92																									
Imprevistos	5,00%	€ 916,50																									
Administración	5,00%	€ 916,50																									
Utilidad	10,00%	€ 1 832,99																									
Precio unitario		€ 21 995,91																									

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD																											
Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad																								
CR 302.01 (a)	Base estabilizada con cemento hidraulico, 25 cm espesor	m2	750,00																								
MAQUINARIA																											
Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Recuperadora CAT RM350, 467 HP	1,00	161,62	m²/hora	4,64	€ 70 000,00	€ 324 836,04																					
Cargador CAT 938H, 172 HP	1,00	161,62	m²/hora	4,64	€ 32 000,00	€ 148 496,47																					
Compactador CAT 533 rodillo simple, 120 HP	1,00	161,62	m²/hora	4,64	€ 22 000,00	€ 102 091,33																					
Compactador CAT PS-200B neumáticos, 77 HP	1,00	161,62	m²/hora	4,64	€ 22 000,00	€ 102 091,33																					
Tanque de agua	1,00	192,31	m²/hora	3,90	€ 15 000,00	€ 58 499,30																					
Vagoneta 12 m³ Volvo	1,00	35,61	m²/hora	21,06	€ 19 000,00	€ 400 168,49																					
Cabezal	1,00	161,62	m²/hora	4,64	€ 15 000,00	€ 69 607,72																					
Carreta plana	1,00	161,62	m²/hora	4,64	€ 5 000,00	€ 23 202,57																					
Subtotal						€ 1 228 993,24																					
MANO DE OBRA																											
Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total																					
Operador de equipo	1,00	-	m²/hora	43,52	€ 1 517,38	€ 66 041,87																					
Chofer	1,00	-	m²/hora	4,64	€ 1 517,38	€ 7 041,44																					
Peón	4,00	65,00	m²/hora	11,54	€ 1 359,39	€ 62 741,08																					
Encargado	1,00	161,62	m²/hora	4,64	€ 1 775,64	€ 8 239,89																					
Subtotal						€ 144 064,28																					
MATERIALES																											
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total																							
Cemento	135,00	sacos	€ 6 115,00	€ 825 525,00																							
Agregados para base estabilizada	182,81	m3	€ 12 250,00	€ 2 239 453,13																							
Subtotal						€ 3 064 978,13																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Rubro</th> <th>Porcentaje</th> <th>Monto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Subtotal</td> <td></td> <td>€ 4 438 035,65</td> </tr> <tr> <td>Subtotal precio unitario</td> <td></td> <td>€ 5 917,38</td> </tr> <tr> <td>Imprevistos</td> <td>5,00%</td> <td>€ 295,87</td> </tr> <tr> <td>Administración</td> <td>5,00%</td> <td>€ 295,87</td> </tr> <tr> <td>Utilidad</td> <td>10,00%</td> <td>€ 591,74</td> </tr> <tr> <td>Precio unitario</td> <td></td> <td>€ 7 100,86</td> </tr> </tbody> </table>							Rubro	Porcentaje	Monto	Subtotal		€ 4 438 035,65	Subtotal precio unitario		€ 5 917,38	Imprevistos	5,00%	€ 295,87	Administración	5,00%	€ 295,87	Utilidad	10,00%	€ 591,74	Precio unitario		€ 7 100,86
Rubro	Porcentaje	Monto																									
Subtotal		€ 4 438 035,65																									
Subtotal precio unitario		€ 5 917,38																									
Imprevistos	5,00%	€ 295,87																									
Administración	5,00%	€ 295,87																									
Utilidad	10,00%	€ 591,74																									
Precio unitario		€ 7 100,86																									

PROYECTO: AMPLIACIÓN Y REHABILITACIÓN CARRETERA INTERAMERICANA NORTE, SECCIÓN BARRANCA - LIMONAL
PROPUESTA TÉCNICA: PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO DE CONCRETO ASFÁLTICO (15 AÑOS)

INFORMACIÓN DE LA ACTIVIDAD

Rubro	Actividad	Unidad	Cantidad
CR 401.01 (a)	Pavimento de concreto asfáltico en caliente 19,0 TMN, de 15 cm de espesor compactado para superficie de ruedo	m2	750,00

MAQUINARIA

Equipo	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Vagoneta 12 m³ Volvo	1,00	38,24	m²/hora	19,61	€ 19 000,00	€ 372 646,44
Pavimentadora CAT AP600, 165 HP	1,00	290,21	m²/hora	2,58	€ 50 000,00	€ 129 216,77
Compactador BOMAG BW190AD doble rodillo, 13	1,00	290,21	m²/hora	2,58	€ 28 000,00	€ 72 361,39
Compactador BOMAG BW24RH neumáticos, 100 H	1,00	290,21	m²/hora	2,58	€ 22 000,00	€ 56 855,38
Barredora	1,00	552,60	m²/hora	1,36	€ 15 000,00	€ 20 358,31
Subtotal						€ 651 438,30

MANO DE OBRA

Personal	Cantidad	Rendimiento	Unidad	Horas	Costo / hora	Monto total
Operador de equipo	1,00	-	m²/hora	28,72	€ 1 517,38	€ 43 584,11
Encargado	1,00	290,21	m²/hora	2,58	€ 1 775,64	€ 4 588,85
Peón	6,00	145,10	m²/hora	5,17	€ 1 359,39	€ 42 158,89
Subtotal						€ 90 331,86

MATERIALES

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo / unid	Monto total
Mezcla asfáltica	276	ton	€ 49 000,00	€ 13 505 625,00
Subtotal				€ 13 505 625,00

Rubro	Porcentaje	Monto
Subtotal		€ 14 247 395,15
Subtotal precio unitario		€ 18 996,53
Imprevistos	5,00%	€ 949,83
Administración	5,00%	€ 949,83
Utilidad	10,00%	€ 1 899,65
Precio unitario		€ 22 795,83

7.5 Apéndice: Cálculo de Módulo Resiliente para combinación de suelo sin estabilizar

MÓDULO RESILIENTE

Material Suelo sin estabilizar
Especímen #1

Presión atmosférica
Pa (kPa) 101,325

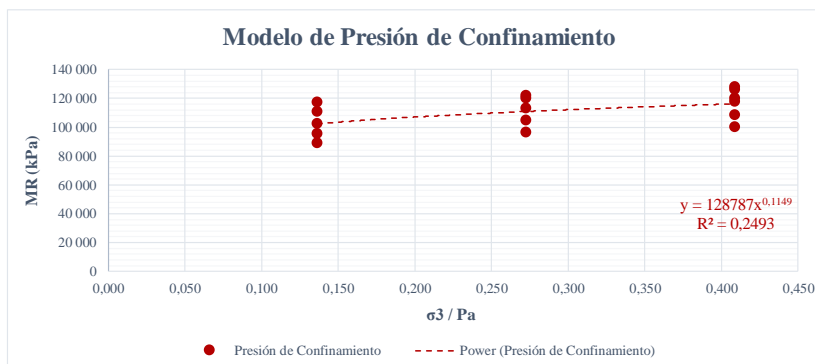
N° Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MIR (kPa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	θ Inv. Esf. (kPa)	τ Oct. (kPa)	σ_3 / Pa	θ / Pa	σ Desv. / Pa	τ Oct. / Pa	$(\tau_{Oct}/Pa)^{-1}$	MIR / Pa	log(MIR/Pa)	log(θ/Pa)	log($\sigma_{Desv.}/Pa$)	log($(\tau_{Oct}/Pa)^2$)	log($(\tau_{Oct}/Pa)^{-1}$)	
0	41,400	25,057	126,114	66,457	41,400	149,257	11,812	0,409	1,473	0,247	0,117	1,117	1,244,645	3,095	0,168	-0,607	-0,933	0,87124	0,048
1	41,395	12,644	119,863	54,039	41,395	136,828	5,961	0,409	1,350	0,125	0,059	1,059	1,182,958	3,073	0,130	-0,904	-1,230	1,51395	0,025
2	41,397	25,037	127,732	66,433	41,397	149,226	11,802	0,409	1,473	0,247	0,116	1,116	1,260,613	3,101	0,168	-0,607	-0,934	0,87188	0,048
3	41,395	37,360	117,816	78,755	41,395	161,544	17,612	0,409	1,594	0,369	0,174	1,174	1,162,750	3,065	0,203	-0,433	-0,760	0,57747	0,070
4	41,397	50,009	108,457	91,407	41,397	174,202	23,575	0,409	1,719	0,494	0,233	1,233	1,070,390	3,030	0,235	-0,307	-0,633	0,40103	0,091
5	41,402	62,041	99,958	103,443	41,402	186,247	29,246	0,409	1,838	0,612	0,289	1,289	986,504	2,994	0,264	-0,213	-0,540	0,29121	0,110
6	27,597	12,600	122,063	40,197	27,597	95,390	5,940	0,272	0,941	0,124	0,059	1,059	1,204,669	3,081	-0,026	-0,905	-1,232	1,51772	0,025
7	27,597	25,066	120,174	52,663	27,597	107,857	11,816	0,272	1,064	0,247	0,117	1,117	1,186,026	3,074	0,027	-0,607	-0,933	0,87092	0,048
8	27,596	37,459	113,149	65,055	27,596	120,246	17,658	0,272	1,187	0,370	0,174	1,174	1,116,691	3,048	0,074	-0,432	-0,759	0,57573	0,070
9	27,598	49,940	104,479	77,538	27,598	132,733	23,542	0,272	1,310	0,493	0,232	1,232	1,031,125	3,013	0,117	-0,307	-0,634	0,40179	0,091
10	27,598	62,377	96,483	89,975	27,598	145,170	29,405	0,272	1,433	0,616	0,290	1,290	952,210	4,984	0,156	-0,211	-0,537	0,28869	0,111
11	13,803	12,521	117,362	26,323	13,803	53,928	5,902	0,136	0,532	0,124	0,058	1,058	1,158,275	5,070	3,064	-0,274	-0,908	1,52446	0,025
12	13,803	24,963	110,547	38,766	13,803	66,373	11,768	0,136	0,655	0,246	0,116	1,116	1,091,017	5,044	3,038	-0,184	-0,608	0,87428	0,048
13	13,792	37,622	102,366	51,414	13,792	78,999	17,735	0,136	0,780	0,371	0,175	1,175	1,010,278	5,010	3,004	-0,108	-0,430	0,57287	0,070
14	13,803	50,069	95,497	63,872	13,803	91,479	23,603	0,136	0,903	0,494	0,233	1,233	942,480	4,980	2,974	-0,044	-0,306	0,40038	0,091
15	13,802	62,505	88,949	76,307	13,802	103,910	29,465	0,136	1,026	0,617	0,291	1,291	877,859	4,949	2,943	-0,210	-0,536	0,28773	0,111

Modelos Mecánicos para el Cálculo del Módulo Resiliente

MODELO PRESIÓN DE CONFINAMIENTO

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

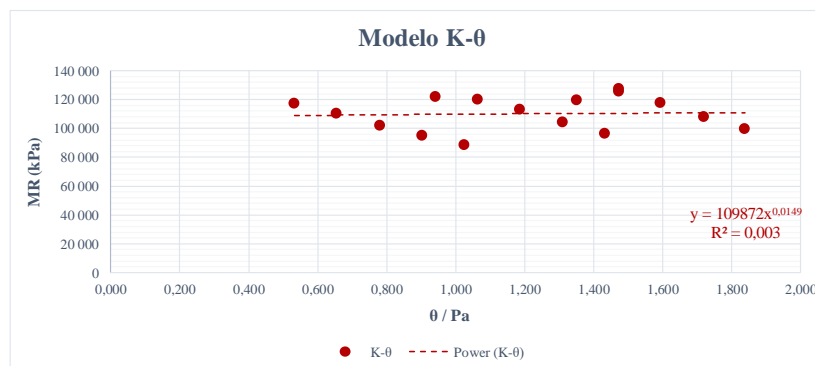
Coeficientes k	
k1	128787
k2	0,1149
R2	
	0,2493



MODELO K-θ

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

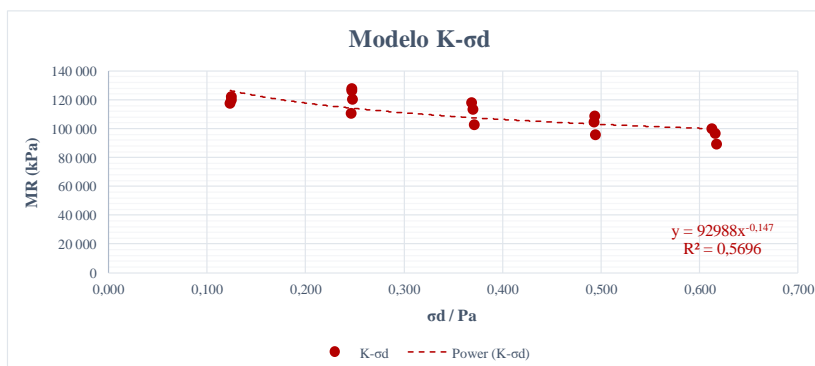
Coeficientes k	
k1	109872
k2	0,0149
R2	
	0,003



MODELO K-σd

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

Coeficientes k	
k1	92988
k2	-0,147
R2	
	0,5696



MODELO MAY-WITCZAK

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

$$\log(M_R) = \log(k_3) + k_4 \log\left(\frac{\theta}{Pa}\right) + k_5 \log\left(\frac{\sigma_d}{Pa}\right)$$

Coeficientes k	
log(k3)	4,941
k3	87325,240
k4	0,143
k5	-0,185
R2	0,7351

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,877728633
Coefficiente de	0,770407553
R^2 ajustado	0,735085638
Error típico	0,024230966
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrado	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,02561225	0,012806125	21,81103583	7,01818E-05
Residuos	13	0,007632816	0,00058714		
Total	15	0,033245066			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	4,94113979	0,016460435	300,1828187	2,34888E-26	4,905579182	4,976700398	4,905579182	4,976700398
Variable X 1	0,142731992	0,045061818	3,16747076	0,007417891	0,045381852	0,240082132	0,045381852	0,240082132
Variable X 2	-0,184921445	0,028041671	-6,594522988	1,72997E-05	-0,245501793	-0,124341098	-0,245501793	-0,124341098

MODELO ESFUERZO CORTANTE OCTAÉDRICO (UNIVERSAL)

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

$$\log(M_R) = \log(k_1 Pa) + k_2 \log\left(\frac{\theta}{Pa}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{Pa}\right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	4,881
k1	749,940
k2	0,143
k3	-0,185
R2	0,7351

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,877728633
Coefficiente de	0,770407553
R^2 ajustado	0,735085638
Error típico	0,024230966
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrado	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,02561225	0,012806125	21,81103583	7,01818E-05
Residuos	13	0,007632816	0,00058714		
Total	15	0,033245066			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	4,880743289	0,025137431	194,1623707	6,76398E-24	4,82643717	4,935049408	4,82643717	4,935049408
Variable X 1	0,142731992	0,045061818	3,16747076	0,007417891	0,045381852	0,240082132	0,045381852	0,240082132
Variable X 2	-0,184921445	0,028041671	-6,594522988	1,72997E-05	-0,245501793	-0,124341098	-0,245501793	-0,124341098

MODELO DE LA GUÍA DE DISEÑO 2002

$$M_R = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

$$\log(M_R) = \log(k_1 P_a) + k_2 \log \left(\frac{\theta}{P_a} \right) + k_3 \log \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	5,141
k1	1364,897
k2	0,149
k3	-1,596
R2	
	0,8865

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,949531091
Coefficiente de	0,901609293
R^2 ajustado	0,886472261
Error típico	0,015862402
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	MS	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,02997406	0,01498703	59,56314952	2,84578E-07
Residuos	13	0,003271006	0,000251616		
Total	15	0,033245066			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	5,140816374	0,010104881	508,7458445	2,46952E-29	5,118986106	5,162646643	5,118986106	5,162646643
Variable X 1	0,149129169	0,029339519	5,082877165	0,000209957	0,085744993	0,212513346	0,085744993	0,212513346
Variable X 2	-1,595909717	0,146411996	-10,90012954	6,56084E-08	-1,912213603	-1,279605831	-1,912213603	-1,279605831

MODELO DEL PROGRAMA DE DESEMPEÑO A LARGO PLAZO DE PAVIMENTOS (LTPP)

$$\log \left(\frac{M_R}{P_a} \right) = k_1 + k_2 \log \left(\frac{\theta}{P_a} \right) + k_3 \log \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} \right) + k_4 \left(\log \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} \right) \right)^2$$

Coeficientes k	
k1	2,601
k2	0,141
k3	-0,854
k4	-0,378
R2	
	0,9337

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,973126465
Coefficiente de	0,946975117
R^2 ajustado	0,933718896
Error típico	0,012120285
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	MS	F	Valor crítico de F
Regresión	3	0,03148225	0,010494083	71,43628093	6,3684E-08
Residuos	12	0,001762816	0,000146901		
Total	15	0,033245066			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	2,601438894	0,045069769	57,72026259	4,82792E-16	2,503240304	2,699637485	2,503240304	2,699637485
Variable X 1	0,140569019	0,022542437	6,235750774	4,34638E-05	0,091453268	0,18968477	0,091453268	0,18968477
Variable X 2	-0,854481347	0,106845949	-7,997320942	3,77281E-06	-1,087278672	-0,621684022	-1,087278672	-0,621684022
Variable X 3	-0,377748605	0,059758081	-6,321297418	3,82425E-05	-0,507950279	-0,247546931	-0,507950279	-0,247546931

MÓDULO RESILIENTE

Material Suelo sin estabilizar Presión atmosférica
Especímen #2 Pa (kPa) 101.325

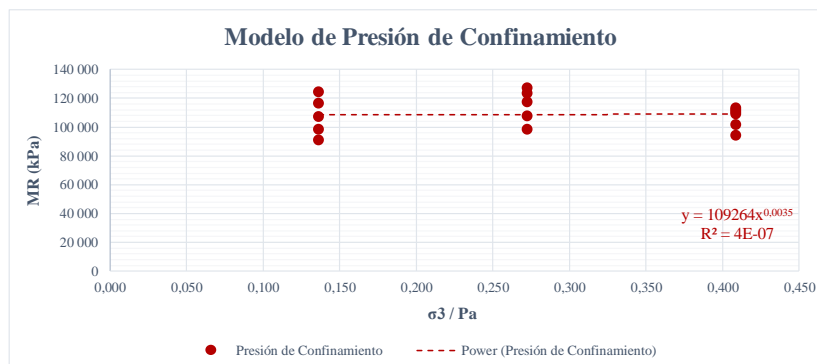
Nº Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	0 Inv. Esf. (kPa)	τ Oct. (kPa)	σ_3 / Pa	θ / Pa	σ Desv. / Pa	τ Oct. / Pa	$(\tau \text{ Oct.} / Pa) + 1$	MR / Pa	log(MR)	log (MR/Pa)	log (θ /Pa)	log (σ Desv./Pa)	log (τ Oct./Pa)	log ($(\tau \text{ Oct.}/Pa)^2$)	log ($(\tau \text{ Oct.}/Pa)+1$)
0	41,394	24,953	110,038	66,346	41,394	149,134	11,763	0,409	1,472	0,246	0,116	1,116	1,085,988	5,042	3,036	0,168	-0,609	-0,935	0,87461	0,048
1	41,403	12,711	94,060	54,114	41,403	136,920	5,992	0,409	1,351	0,125	0,059	1,059	928,300	4,973	2,968	0,131	-0,902	-1,228	1,50835	0,025
2	41,400	24,948	113,050	66,348	41,400	149,148	11,760	0,409	1,472	0,246	0,116	1,116	1,115,717	5,053	3,048	0,168	-0,609	-0,935	0,87477	0,048
3	41,401	37,323	111,519	78,724	41,401	161,526	17,594	0,409	1,594	0,368	0,174	1,174	1,100,607	5,047	3,042	0,203	-0,434	-0,760	0,57813	0,070
4	41,398	50,078	108,982	91,477	41,398	174,273	23,607	0,409	1,720	0,494	0,233	1,233	1,075,573	5,037	3,032	0,236	-0,306	-0,633	0,40028	0,091
5	41,390	62,182	101,203	103,572	41,390	186,352	29,313	0,408	1,839	0,614	0,289	1,289	998,795	5,005	2,999	0,265	-0,212	-0,539	0,29015	0,110
6	27,601	12,602	123,097	40,204	27,601	95,406	5,941	0,272	0,942	0,124	0,059	1,059	1,214,868	5,090	3,085	-0,026	-0,905	-1,232	1,51752	0,025
7	27,597	25,056	126,920	52,653	27,597	107,847	11,812	0,272	1,064	0,247	0,117	1,117	1,252,604	5,104	3,098	0,027	-0,607	-0,933	0,87124	0,048
8	27,600	37,323	117,042	64,922	27,600	120,121	17,594	0,272	1,186	0,368	0,174	1,174	1,155,118	5,068	3,063	0,074	-0,434	-0,760	0,57813	0,070
9	27,600	50,014	107,374	77,614	27,600	132,813	23,577	0,272	1,311	0,494	0,233	1,233	1,059,696	5,031	3,025	0,118	-0,307	-0,633	0,40098	0,091
10	27,600	62,290	98,203	89,890	27,600	145,089	29,364	0,272	1,432	0,615	0,290	1,290	969,188	4,992	2,986	0,156	-0,211	-0,538	0,28934	0,111
11	13,796	12,587	124,342	26,384	13,796	53,976	5,934	0,136	0,533	0,124	0,059	1,059	1,227,158	5,095	3,089	-0,274	-0,906	-1,232	1,51878	0,025
12	13,799	25,150	116,235	38,949	13,799	66,547	11,856	0,136	0,657	0,248	0,117	1,117	1,147,150	5,065	3,060	-0,183	-0,605	-0,932	0,86822	0,048
13	13,803	37,624	106,979	51,427	13,803	79,034	17,736	0,136	0,780	0,371	0,175	1,175	1,055,802	5,029	3,024	-0,108	-0,430	-0,757	0,57283	0,070
14	13,793	49,925	98,013	63,718	13,793	91,305	23,535	0,136	0,901	0,493	0,232	1,232	967,315	4,991	2,986	-0,045	-0,307	-0,634	0,40196	0,091
15	13,803	62,577	90,993	76,379	13,803	103,984	29,499	0,136	1,026	0,618	0,291	1,291	898,033	4,959	2,953	0,011	-0,209	-0,536	0,28720	0,111

Modelos Mecánicos para el Cálculo del Módulo Resiliente

MODELO PRESIÓN DE CONFINAMIENTO

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

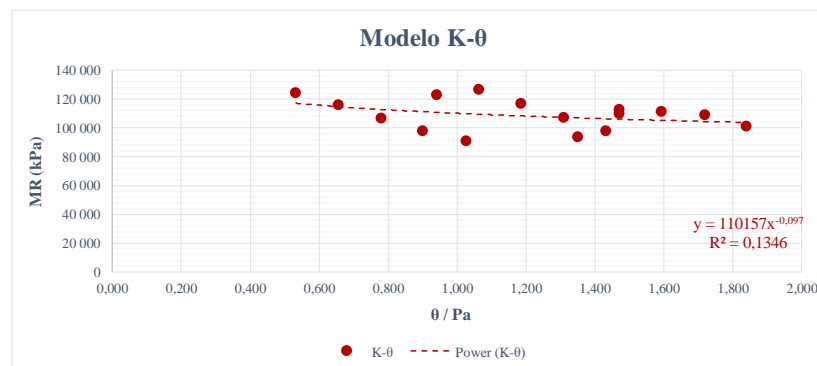
Coeficientes k	
k1	109264
k2	0,0035
R2	
	4,00E-07



MODELO K- θ

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

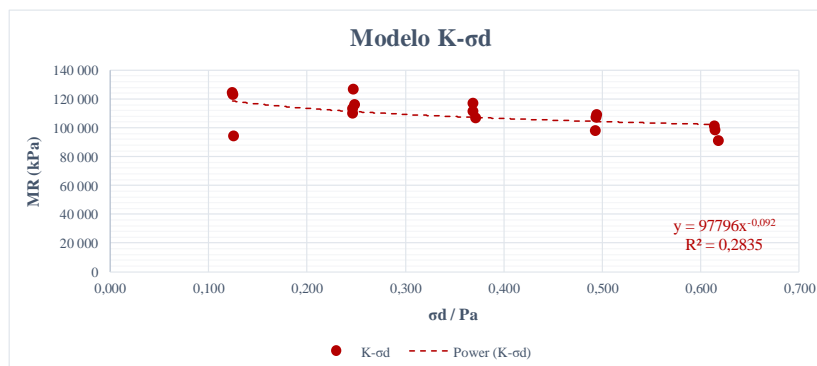
Coeficientes k	
k1	110157
k2	-0,097
R2	
	0,1346



MODELO K- σ_d

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

Coeficientes k	
k1	97796
k2	-0,092
R2	
	0,2835



MODELO MAY-WITCZAK

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

$$\log(M_R) = \log(k_3) + k_4 \log\left(\frac{\theta}{Pa}\right) + k_5 \log\left(\frac{\sigma_d}{Pa}\right)$$

Coeficientes k	
log(k3)	4,998
k3	99588,246
k4	-0,041
k5	-0,081
R2	0,1858

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,542572917
Coefficiente de	0,294385371
R^2 ajustado	0,185829274
Error típico	0,039048893
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,008270075	0,004135038	2,711827149
Residuos	13	0,019822608	0,001524816	
Total	15	0,028092684		

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	4,998208082	0,026531345	188,388796	1,00133E-23	4,940890596	5,055525567	4,940890596	5,055525567
Variable X 1	-0,041361782	0,072616075	-0,569595391	0,578662337	-0,198239274	0,115515711	-0,198239274	0,115515711
Variable X 2	-0,08126615	0,045229739	-1,796741499	0,095637467	-0,178979061	0,016446762	-0,178979061	0,016446762

MODELO ESFUERZO CORTANTE OCTAÉDRICO (UNIVERSAL)

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

$$\log(M_R) = \log(k_1 Pa) + k_2 \log\left(\frac{\theta}{Pa}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{Pa}\right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	4,972
k1	924,591
k2	-0,041
k3	-0,081
R2	0,1858

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,542572917
Coefficiente de	0,294385371
R^2 ajustado	0,185829274
Error típico	0,039048893
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,008270075	0,004135038	2,711827149
Residuos	13	0,019822608	0,001524816	
Total	15	0,028092684		

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	4,971666049	0,040526965	122,6755073	2,63712E-21	4,884112863	5,059219235	4,884112863	5,059219235
Variable X 1	-0,041361782	0,072616075	-0,569595391	0,578662337	-0,198239274	0,115515711	-0,198239274	0,115515711
Variable X 2	-0,08126615	0,045229739	-1,796741499	0,095637467	-0,178979061	0,016446762	-0,178979061	0,016446762

MODELO DE LA GUÍA DE DISEÑO 2002

$$M_R = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

$$\log(M_R) = \log(k_1 P_a) + k_2 \log\left(\frac{\theta}{P_a}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	5,091
k1	1217,572
k2	-0,031
k3	-0,786
R2	0,2814

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,614191444
Coefficiente de	0,37723113
R^2 ajustado	0,281420535
Error típico	0,036684988
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrado	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,010597435	0,005298717	3,937259015	0,046038887
Residuos	13	0,017495249	0,001345788		
Total	15	0,028092684			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	5,091211416	0,02336617	217,8881417	1,51181E-24	5,040731875	5,141690958	5,040731875	5,141690958
Variable X 1	-0,03131339	0,0678764	-0,461329572	0,652186078	-0,177951437	0,115324656	-0,177951437	0,115324656
Variable X 2	-0,78554771	0,338450498	-2,321012123	0,037179199	-1,516725559	-0,054369861	-1,516725559	-0,054369861

MODELO DEL PROGRAMA DE DESEMPEÑO A LARGO PLAZO DE PAVIMENTOS (LTPP)

$$\log\left(\frac{M_R}{P_a}\right) = k_1 + k_2 \log\left(\frac{\theta}{P_a}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right) + k_4 \left(\log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right)\right)^2$$

Coeficientes k	
k1	2,701
k2	-0,043
k3	-0,730
k4	-0,366
R2	0,3621

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,699758485
Coefficiente de	0,489661937
R^2 ajustado	0,362077421
Error típico	0,034564873
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrado	F	Valor crítico de F
Regresión	3	0,013755918	0,004585306	3,837941732	0,038801197
Residuos	12	0,014336766	0,00119473		
Total	15	0,028092684			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	2,701087066	0,128704735	20,98669535	7,94367E-11	2,420663538	2,981510594	2,420663538	2,981510594
Variable X 1	-0,043114821	0,064282712	-0,670706324	0,515109499	-0,183174818	0,096945176	-0,183174818	0,096945176
Variable X 2	-0,729920227	0,305345847	-2,39047046	0,034106021	-1,395211675	-0,064628778	-1,395211675	-0,064628778
Variable X 3	-0,366323479	0,17095352	-2,142825017	0,053321691	-0,738799201	0,006152243	-0,738799201	0,006152243

MÓDULO RESILIENTE

Material Suelo sin estabilizar Presión atmosférica
Especímen #3 Pa (kPa) 101,325

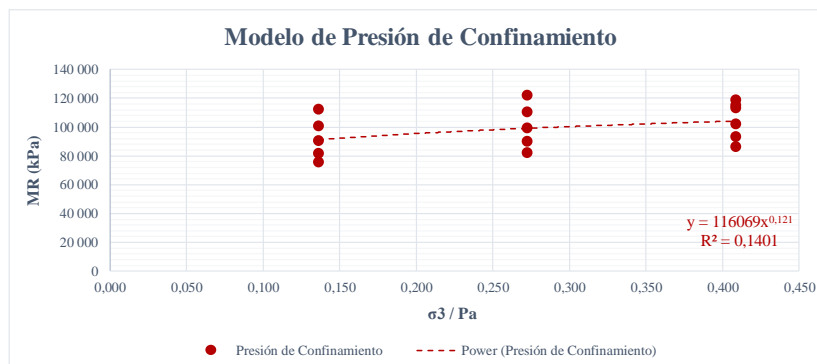
Nº Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	0 Inv. Esf. (kPa)	τ Oct. (kPa)	σ_3 / Pa	θ / Pa	σ Desv. / Pa	τ Oct. / Pa	$(\tau \text{ Oct.} / Pa) + 1$	MR / Pa	log(MR)	log (MR/Pa)	log (θ /Pa)	log (σ Desv./Pa)	log (τ Oct./Pa)	log ($(\tau \text{ Oct.}/Pa)^{-2}$)	log ($(\tau \text{ Oct.}/Pa)+1$)
0	41,398	24,914	113 100	66,313	41,398	149,109	11,745	0,409	1,472	0,246	0,116	1,116	1 116,211	5,053	3,048	0,168	-0,609	-0,936	0,87586	0,048
1	41,401	12,600	118 778	54,001	41,401	136,803	5,940	0,409	1,350	0,124	0,059	1,059	1 172,249	5,075	3,069	0,130	-0,905	-1,232	1,51772	0,025
2	41,402	25,028	114 865	66,430	41,402	149,234	11,798	0,409	1,473	0,247	0,116	1,116	1 133,632	5,060	3,054	0,168	-0,607	-0,934	0,87218	0,048
3	41,401	37,470	101 882	78,871	41,401	161,673	17,664	0,409	1,596	0,370	0,174	1,174	1 005,493	5,008	3,002	0,203	-0,432	-0,759	0,57553	0,070
4	41,402	49,824	92 888	91,226	41,402	174,030	23,487	0,409	1,718	0,492	0,232	1,232	916,729	4,968	2,962	0,235	-0,308	-0,635	0,40308	0,091
5	41,401	62,365	86 159	103,766	41,401	186,568	29,399	0,409	1,841	0,615	0,290	1,290	850,323	4,935	2,930	0,265	-0,211	-0,537	0,28878	0,111
6	27,598	12,649	121 899	40,247	27,598	95,442	5,963	0,272	0,942	0,125	0,059	1,059	1 203,046	5,086	3,080	-0,026	-0,904	-1,230	1,51355	0,025
7	27,604	25,018	110 412	52,622	27,604	107,830	11,793	0,272	1,064	0,247	0,116	1,116	1 089,680	5,043	3,037	0,027	-0,607	-0,934	0,87250	0,048
8	27,600	37,278	99 005	64,878	27,600	120,079	17,573	0,272	1,185	0,368	0,173	1,173	977,100	4,996	2,990	0,074	-0,434	-0,761	0,57892	0,069
9	27,598	49,775	89 618	77,372	27,598	132,568	23,464	0,272	1,308	0,491	0,232	1,232	884,459	4,952	2,947	0,117	-0,309	-0,635	0,40363	0,090
10	27,600	62,232	82 175	89,831	27,600	145,030	29,336	0,272	1,431	0,614	0,290	1,290	811,004	4,915	2,909	0,156	-0,212	-0,538	0,28978	0,110
11	13,797	12,580	111 872	26,377	13,797	53,971	5,930	0,136	0,533	0,124	0,059	1,059	1 104,088	5,049	3,043	-0,274	-0,906	-1,233	1,51939	0,025
12	13,802	25,111	100 504	38,913	13,802	66,516	11,838	0,136	0,656	0,248	0,117	1,117	991,897	5,002	2,996	-0,183	-0,606	-0,932	0,86947	0,048
13	13,799	37,613	90 387	51,411	13,799	79,009	17,731	0,136	0,780	0,371	0,175	1,175	892,054	4,956	2,950	-0,108	-0,430	-0,757	0,57303	0,070
14	13,803	49,898	81 618	63,700	13,803	91,305	23,522	0,136	0,901	0,492	0,232	1,232	805,509	4,912	2,906	-0,045	-0,308	-0,634	0,40226	0,091
15	13,799	62,522	75 361	76,321	13,799	103,919	29,473	0,136	1,026	0,617	0,291	1,291	743,751	4,877	2,871	0,011	-0,210	-0,536	0,28761	0,111

Modelos Mecánicos para el Cálculo del Módulo Resiliente

MODELO PRESIÓN DE CONFINAMIENTO

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

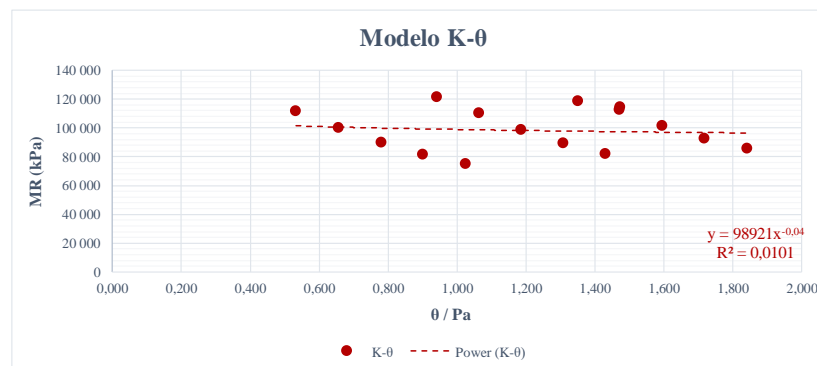
Coeficientes k	
k1	116069
k2	0,121
R2	
	0,1401



MODELO K-θ

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

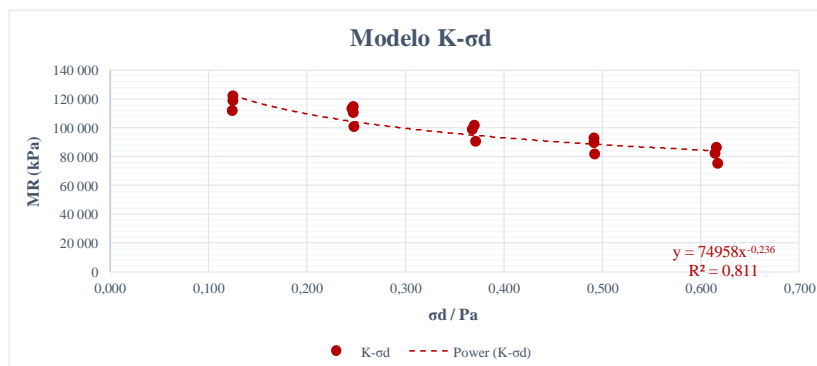
Coeficientes k	
k1	98921
k2	-0,040
R2	
	0,0101



MODELO K-σd

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

Coeficientes k	
k1	74958
k2	-0,236
R2	
	0,8110



MODELO MAY-WITCZAK

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

$$\log(M_R) = \log(k_3) + k_4 \log \left(\frac{\theta}{Pa} \right) + k_5 \log \left(\frac{\sigma_d}{Pa} \right)$$

Coeficientes k	
log(k3)	4,846
k3	70212,134
k4	0,149
k5	-0,276
R2	
	0,9065

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,95861645
Coefficiente de	0,918945497
R^2 ajustado	0,906475574
Error típico	0,019745887
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,057465771	0,028732886	73,692954
Residuos	13	0,0050687	0,0003899	8,07331E-08
Total	15	0,062534472		

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	4,846412171	0,013412691	361,3303449	2,10978E-27	4,817435814	4,875388528	4,817435814	4,875388528
Variable X 1	0,149135355	0,036701555	4,063461534	0,00134202	0,069846467	0,228424244	0,069846467	0,228424244
Variable X 2	-0,276055553	0,02285424	-12,07896462	1,93158E-08	-0,325429137	-0,22668197	-0,325429137	-0,22668197

MODELO ESFUERZO CORTANTE OCTAÉDRICO (UNIVERSAL)

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

$$\log(M_R) = \log(k_1 Pa) + k_2 \log \left(\frac{\theta}{Pa} \right) + k_3 \log \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	4,756
k1	563,033
k2	0,149
k3	-0,276
R2	
	0,9065

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,95861645
Coefficiente de	0,918945497
R^2 ajustado	0,906475574
Error típico	0,019745887
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,057465771	0,028732886	73,692954
Residuos	13	0,0050687	0,0003899	8,07331E-08
Total	15	0,062534472		

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	4,7562507	0,020484494	232,1878548	6,61771E-25	4,711996642	4,800504759	4,711996642	4,800504759
Variable X 1	0,149135355	0,036701555	4,063461534	0,00134202	0,069846467	0,228424244	0,069846467	0,228424244
Variable X 2	-0,276055553	0,02285424	-12,07896462	1,93158E-08	-0,325429137	-0,22668197	-0,325429137	-0,22668197

MODELO DE LA GUÍA DE DISEÑO 2002

$$M_R = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

$$\log(M_R) = \log(k_1 P_a) + k_2 \log\left(\frac{\theta}{P_a}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	5.137
k1	1354,330
k2	0,150
k3	-2,271
R2	0,9737

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,988549235
Coefficiente de	0,97722959
R^2 ajustado	0,97372645
Error típico	0,010465826
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,061110536	0,030555268	278,9581891
Residuos	13	0,001423936	0,000109534	
Total	15	0,062534472		

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	5,137441039	0,006665581	770,7417087	1,11528E-31	5,123040927	5,151841151	5,123040927	5,151841151
Variable X 1	0,150025882	0,019361211	7,748786184	3,1655E-06	0,108198529	0,191853234	0,108198529	0,191853234
Variable X 2	-2,271132235	0,096610516	-23,50812653	4,89955E-12	-2,479846565	-2,062417904	-2,479846565	-2,062417904

MODELO DEL PROGRAMA DE DESEMPEÑO A LARGO PLAZO DE PAVIMENTOS (LTPP)

$$\log\left(\frac{M_R}{P_a}\right) = k_1 + k_2 \log\left(\frac{\theta}{P_a}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right) + k_4 \left(\log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right)\right)^2$$

Coeficientes k	
k1	2,532
k2	0,148
k3	-0,812
k4	-0,302
R2	0,9736

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,989398709
Coefficiente de	0,978909805
R^2 ajustado	0,973637257
Error típico	0,010483575
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	0,061215607	0,020405202	185,6615961
Residuos	12	0,001318864	0,000109905	
Total	15	0,062534472		

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	2,531615207	0,039024952	64,87170504	1,19356E-16	2,44658714	2,616643274	2,44658714	2,616643274
Variable X 1	0,148190744	0,019486426	7,604819082	6,29105E-06	0,105733469	0,190648019	0,105733469	0,190648019
Variable X 2	-0,811600242	0,092484576	-8,775519973	1,44044E-06	-1,013106822	-0,610093662	-1,013106822	-0,610093662
Variable X 3	-0,30215615	0,051729073	-5,841128231	7,94691E-05	-0,414864118	-0,189448181	-0,414864118	-0,189448181

7.6 Apéndice: Cálculo de Módulo Resiliente para combinación de suelo con cal

MÓDULO RESILIENTE

Material Suelo combinado con cal
Especimen #1 Presión atmosférica Pa (kPa) 101,325

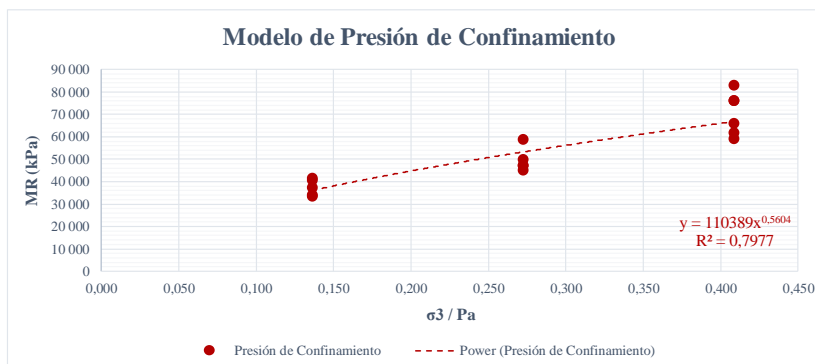
N° Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MIR (kPa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	θ Inv. Esf. (kPa)	τ Oct. (kPa)	σ_3 / Pa	θ / Pa	σ Desv. / Pa	τ Oct. / Pa	$(\tau_{Oct.} / Pa)^{-1}$	MIR / Pa	log(MIR/Pa)	log(θ /Pa)	log(σ Desv./Pa)	log($\tau_{Oct.}/Pa$)	log($(\tau_{Oct.}/Pa)^2$)	log(($\tau_{Oct.}/Pa$)+1)	
0	41,400	25,104	75,813	66,504	41,400	149,304	11,834	0,409	1,474	0,248	0,117	1,117	748,211	4,880	2,874	0,168	-0,606	-0,933	0,86971	0,048
1	41,401	12,599	82,881	54,000	41,401	136,802	5,939	0,409	1,350	0,124	0,059	1,059	817,973	4,918	2,913	0,130	-0,905	-1,232	1,51782	0,025
2	41,401	25,094	75,944	66,495	41,401	149,297	11,829	0,409	1,473	0,248	0,117	1,117	749,511	4,880	2,875	0,168	-0,606	-0,933	0,87003	0,048
3	41,389	37,505	65,801	78,894	41,389	161,673	17,680	0,408	1,596	0,370	0,174	1,174	649,401	4,818	2,813	0,203	-0,432	-0,758	0,57491	0,070
4	41,400	50,143	61,556	91,544	41,400	174,344	23,638	0,409	1,721	0,495	0,233	1,233	607,508	4,789	2,784	0,236	-0,306	-0,632	0,39956	0,091
5	41,391	62,367	59,012	103,758	41,391	186,540	29,400	0,408	1,841	0,616	0,290	1,290	582,406	4,771	2,765	0,265	-0,211	-0,537	0,28876	0,111
6	27,594	12,648	58,622	40,242	27,594	95,430	5,962	0,272	0,942	0,125	0,059	1,059	578,558	4,768	2,762	-0,026	-0,904	-1,230	1,51364	0,025
7	27,594	25,311	47,137	52,905	27,594	108,093	11,932	0,272	1,067	0,250	0,118	1,118	465,207	4,673	2,668	0,028	-0,602	-0,929	0,86307	0,048
8	27,597	37,456	44,895	65,053	27,597	120,246	17,657	0,272	1,187	0,370	0,174	1,174	443,080	4,652	2,646	0,074	-0,432	-0,759	0,57578	0,070
9	27,606	49,838	47,081	77,444	27,606	132,655	23,494	0,272	1,309	0,492	0,232	1,232	464,656	4,673	2,667	0,117	-0,308	-0,635	0,40293	0,091
10	27,599	62,491	49,686	90,089	27,599	145,286	29,458	0,272	1,434	0,617	0,291	1,291	490,362	4,696	2,691	0,157	-0,210	-0,537	0,28784	0,111
11	13,803	12,761	41,457	26,564	13,803	54,169	6,016	0,136	0,535	0,126	0,059	1,059	409,148	4,618	2,612	-0,272	-0,900	-1,226	1,50411	0,025
12	13,794	25,395	33,440	39,189	13,794	66,777	11,971	0,136	0,659	0,251	0,118	1,118	330,031	4,524	2,519	-0,181	-0,601	-0,928	0,86041	0,048
13	13,795	37,988	33,989	51,784	13,795	79,374	17,908	0,136	0,783	0,375	0,177	1,177	335,448	4,531	2,526	-0,106	-0,426	-0,753	0,56651	0,071
14	13,793	50,395	37,294	64,188	13,793	91,775	23,756	0,136	0,906	0,497	0,234	1,234	368,067	4,572	2,566	-0,043	-0,303	-0,630	0,39682	0,091
15	13,800	62,175	40,355	75,975	13,800	103,574	29,310	0,136	1,022	0,614	0,289	1,289	398,268	4,606	2,600	0,010	-0,212	-0,539	0,29021	0,110

Modelos Mecánicos para el Cálculo del Módulo Resiliente

MODELO PRESIÓN DE CONFINAMIENTO

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

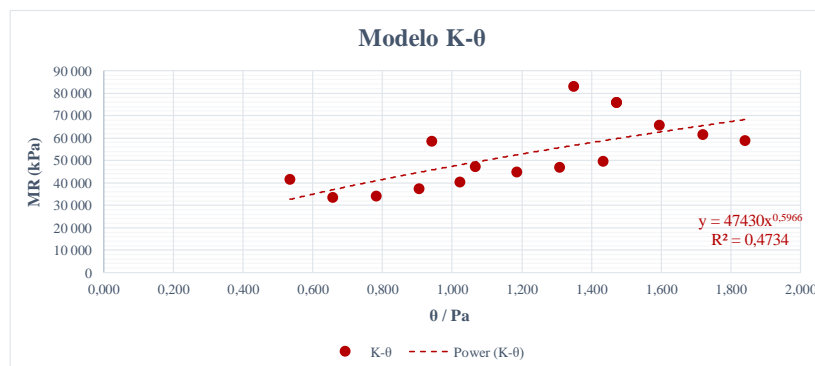
Coeficientes k	
k1	110389
k2	0,5604
R2	
	0,7977



MODELO K-θ

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

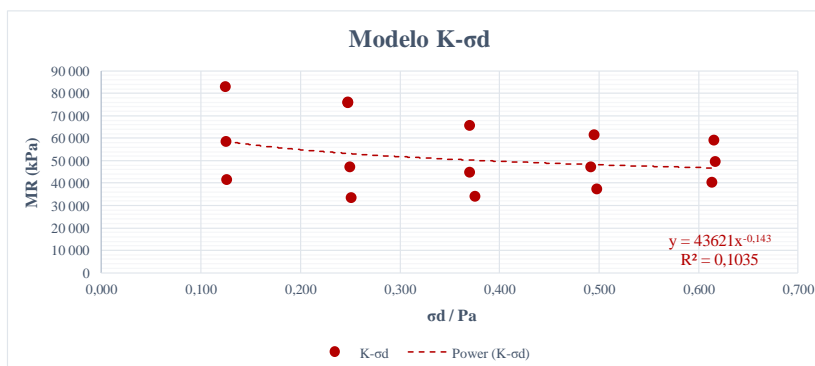
Coeficientes k	
k1	47430
k2	0,5966
R2	
	0,4734



MODELO K-σd

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

Coeficientes k	
k1	43621
k2	-0,143
R2	
	0,1035



MODELO MAY-WITCZAK

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

$$\log(M_R) = \log(k_3) + k_4 \log\left(\frac{\theta}{Pa}\right) + k_5 \log\left(\frac{\sigma_d}{Pa}\right)$$

Coeficientes k	
log(k3)	4,480
k3	30175,364
k4	0,846
k5	-0,366
<hr/>	
R2	0,9384

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,972947873
Coefficiente de	0,946627564
R^2 ajustado	0,93841642
Error típico	0,031232451
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,224914575	0,112457287	115,2857097
Residuos	13	0,012681058	0,000975466	
Total	15	0,237595632		

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	4,47965252	0,021162986	211,6739376	2,20199E-24	4,433932669	4,525372371	4,433932669	4,525372371
Variable X 1	0,845579628	0,058125217	14,54755219	2,01318E-09	0,720007731	0,971151525	0,720007731	0,971151525
Variable X 2	-0,365562103	0,036167285	-10,10753508	1,58903E-07	-0,443696772	-0,287427433	-0,443696772	-0,287427433

MODELO ESFUERZO CORTANTE OCTAÉDRICO (UNIVERSAL)

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

$$\log(M_R) = \log(k_1 Pa) + k_2 \log\left(\frac{\theta}{Pa}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{Pa}\right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	4,360
k1	226,225
k2	0,846
k3	-0,366
<hr/>	
R2	0,9384

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,972947873
Coefficiente de	0,946627564
R^2 ajustado	0,93841642
Error típico	0,031232451
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,224914575	0,112457287	115,2857097
Residuos	13	0,012681058	0,000975466	
Total	15	0,237595632		

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	4,36025765	0,032349214	134,7871295	7,76144E-22	4,290371423	4,430143878	4,290371423	4,430143878
Variable X 1	0,845579628	0,058125217	14,54755219	2,01318E-09	0,720007731	0,971151525	0,720007731	0,971151525
Variable X 2	-0,365562103	0,036167285	-10,10753508	1,58903E-07	-0,443696772	-0,287427433	-0,443696772	-0,287427433

MODELO DE LA GUÍA DE DISEÑO 2002

$$M_R = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

$$\log(M_R) = \log(k_1 P_a) + k_2 \log\left(\frac{\theta}{P_a}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	4,851
k1	699,517
k2	0,829
k3	-2,777
R2	0,8943

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,953095497
Coefficiente de	0,908391027
R^2 ajustado	0,894297339
Error típico	0,040918203
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,21582974	0,10791487	64,45374828
Residuos	13	0,021765892	0,001674299	1,78895E-07
Total	15	0,237595632		

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	4,850515037	0,026139828	185,5603306	1,21886E-23	4,794043373	4,906986701	4,794043373	4,906986701
Variable X 1	0,828667736	0,075848814	10,92525641	6,38491E-08	0,664806337	0,992529135	0,664806337	0,992529135
Variable X 2	-2,777321823	0,377614125	-7,354920377	5,54385E-06	-3,593107543	-1,961536103	-3,593107543	-1,961536103

MODELO DEL PROGRAMA DE DESEMPEÑO A LARGO PLAZO DE PAVIMENTOS (LTPP)

$$\log\left(\frac{M_R}{P_a}\right) = k_1 + k_2 \log\left(\frac{\theta}{P_a}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right) + k_4 \left(\log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right)\right)^2$$

Coeficientes k	
k1	2,453
k2	0,846
k3	-0,125
k4	0,136
R2	0,9372

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,974570459
Coefficiente de	0,949787579
R^2 ajustado	0,937234474
Error típico	0,031530741
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	0,22566538	0,075221793	75,66156487
Residuos	12	0,011930252	0,000994188	4,59798E-08
Total	15	0,237595632		

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	2,452995149	0,117906433	20,8045913	8,79652E-11	2,1960991	2,709891198	2,1960991	2,709891198
Variable X 1	0,845617084	0,058680367	14,41056222	6,14136E-09	0,717763547	0,973470622	0,717763547	0,973470622
Variable X 2	-0,12460614	0,279667041	-0,445551753	0,663852798	-0,733948277	0,484735996	-0,733948277	0,484735996
Variable X 3	0,136040836	0,156545161	0,869019747	0,401883488	-0,205041769	0,477123442	-0,205041769	0,477123442

MODULO RESILIENTE

Material Suelo combinado con cal **Presión atmosférica**
Especimen #2 **Pa (kPa)** 101,325

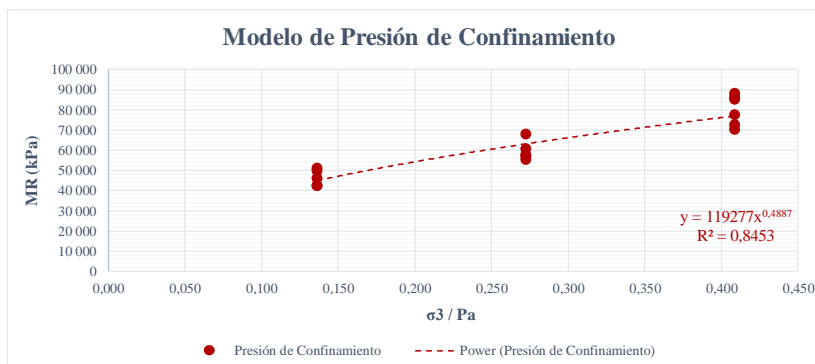
N° Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	θ Inv. Esf. (kPa)	τ Oct. (kPa)	σ_3 / Pa	θ / Pa	σ Desv. / Pa	τ Oct. / Pa	$(\tau_{Oct.}/Pa) + 1$	MR / Pa	log(MR)	log (MR/Pa)	log (θ /Pa)	log (σ Desv./Pa)	log (τ Oct./Pa)	log ($(\tau_{Oct.}/Pa)^2$)	log ($(\tau_{Oct.}/Pa)+1$)
0	41,402	24,905	85,186	66,307	41,402	149,111	11,740	0,409	1,472	0,246	0,116	1,116	840,720	4,930	2,925	0,168	-0,609	-0,936	0,87617	0,048
1	41,397	12,608	87,923	54,004	41,397	136,797	5,943	0,409	1,350	0,124	0,059	1,059	867,736	4,944	2,938	0,130	-0,905	-1,232	1,51706	0,025
2	41,399	24,954	85,946	66,353	41,399	149,152	11,763	0,409	1,472	0,246	0,116	1,116	848,218	4,934	2,929	0,168	-0,609	-0,935	0,87457	0,048
3	41,393	37,581	77,385	78,974	41,393	161,760	17,716	0,409	1,596	0,371	0,175	1,175	763,732	4,889	2,883	0,203	-0,431	-0,757	0,57358	0,070
4	41,394	49,987	72,410	91,381	41,394	174,168	23,564	0,409	1,719	0,493	0,233	1,233	714,635	4,860	2,854	0,235	-0,307	-0,633	0,40128	0,091
5	41,399	62,318	70,163	103,718	41,399	186,516	29,377	0,409	1,841	0,615	0,290	1,290	692,459	4,846	2,840	0,265	-0,211	-0,538	0,28913	0,111
6	27,607	12,667	67,733	40,274	27,607	95,487	5,971	0,272	0,942	0,125	0,059	1,059	668,477	4,831	2,825	-0,026	-0,903	-1,230	1,51206	0,025
7	27,598	25,136	57,008	52,734	27,598	107,929	11,849	0,272	1,065	0,248	0,117	1,117	562,629	4,756	2,750	0,027	-0,605	-0,932	0,86866	0,048
8	27,599	37,704	55,165	65,303	27,599	120,500	17,774	0,272	1,189	0,372	0,175	1,175	544,439	4,742	2,736	0,075	-0,429	-0,756	0,57143	0,070
9	27,592	50,115	57,561	77,707	27,592	132,891	23,624	0,272	1,312	0,495	0,233	1,233	568,084	4,760	2,754	0,118	-0,306	-0,632	0,39987	0,091
10	27,601	62,387	60,413	89,989	27,601	145,191	29,410	0,272	1,433	0,616	0,290	1,290	596,228	4,781	2,775	0,156	-0,211	-0,537	0,28861	0,111
11	13,799	12,701	50,915	26,500	13,799	54,098	5,987	0,136	0,534	0,125	0,059	1,059	502,494	4,707	2,701	-0,273	-0,902	-1,228	1,50916	0,025
12	13,799	25,264	42,167	39,063	13,799	66,661	11,910	0,136	0,658	0,249	0,118	1,118	416,152	4,625	2,619	-0,182	-0,603	-0,930	0,86455	0,048
13	13,796	37,709	42,331	51,505	13,796	79,098	17,776	0,136	0,781	0,372	0,175	1,175	417,772	4,627	2,621	-0,108	-0,429	-0,756	0,57135	0,070
14	13,800	50,263	45,867	64,062	13,800	91,662	23,694	0,136	0,905	0,496	0,234	1,234	452,672	4,662	2,656	-0,044	-0,304	-0,631	0,39826	0,091
15	13,796	62,437	49,656	76,233	13,796	103,825	29,433	0,136	1,025	0,616	0,290	1,290	490,064	4,696	2,690	0,011	-0,210	-0,537	0,28824	0,111

Modelos Mecánicos para el Cálculo del Módulo Resiliente

MODELO PRESIÓN DE CONFINAMIENTO

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

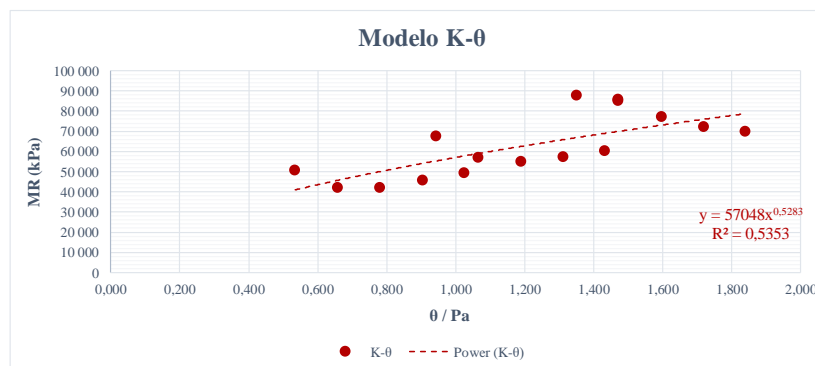
Coeficientes k	
k1	119277
k2	0,4887
R2	
	0,8453



MODELO K-θ

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

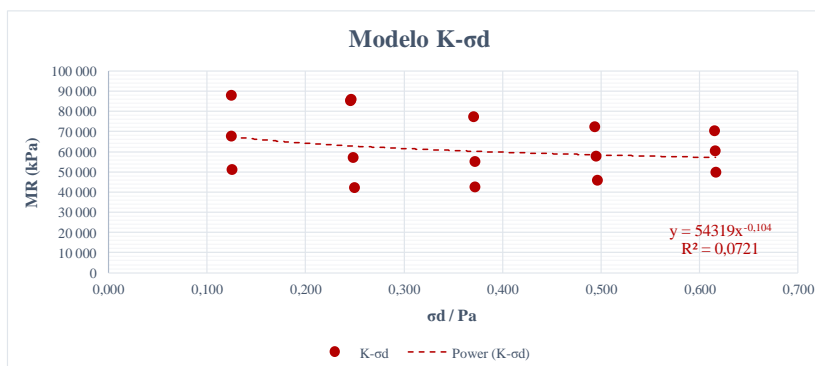
Coeficientes k	
k1	57048
k2	0,5283
R2	
	0,5353



MODELO K-σd

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

Coeficientes k	
k1	54319
k2	-0,104
R2	
	0,0721



MODELO MAY-WITCZAK

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

$$\log(M_R) = \log(k_3) + k_4 \log \left(\frac{\theta}{Pa} \right) + k_5 \log \left(\frac{\sigma_d}{Pa} \right)$$

Coeficientes k	
log(k3)	4,596
k3	39460,018
k4	0,732
k5	-0,298
R2	0,9374

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,972495196
Coefficiente de	0,945746905
R^2 ajustado	0,937400275
Error típico	0,026959631
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,164710637	0,082355319	113,3088339
Residuos	13	0,009448682	0,000726822	
Total	15	0,17415932		

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	4,596157283	0,018267201	251,607095	2,3298E-25	4,556693395	4,63562117	4,556693395	4,63562117
Variable X 1	0,731826031	0,050140795	14,59542143	1,93346E-09	0,62350343	0,840148633	0,62350343	0,840148633
Variable X 2	-0,297557128	0,031178689	-9,543606251	3,08517E-07	-0,36491459	-0,230199667	-0,36491459	-0,230199667

MODELO ESFUERZO CORTANTE OCTAÉDRICO (UNIVERSAL)

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

$$\log(M_R) = \log(k_1 Pa) + k_2 \log \left(\frac{\theta}{Pa} \right) + k_3 \log \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	4,499
k1	311,356
k2	0,732
k3	-0,298
R2	0,9374

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,972495196
Coefficiente de	0,945746905
R^2 ajustado	0,937400275
Error típico	0,026959631
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,164710637	0,082355319	113,3088339
Residuos	13	0,009448682	0,000726822	
Total	15	0,17415932		

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	4,498973263	0,02791085	161,1908373	7,59476E-23	4,438675538	4,559270988	4,438675538	4,559270988
Variable X 1	0,731826031	0,050140795	14,59542143	1,93346E-09	0,62350343	0,840148633	0,62350343	0,840148633
Variable X 2	-0,297557128	0,031178689	-9,543606251	3,08517E-07	-0,36491459	-0,230199667	-0,36491459	-0,230199667

MODELO DE LA GUÍA DE DISEÑO 2002

$$M_R = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

$$\log(M_R) = \log(k_1 P_a) + k_2 \log\left(\frac{\theta}{P_a}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	4,898
k1	781,223
k2	0,718
k3	-2,267
R2	0,9000

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,95567669
Coefficiente de	0,913317935
R^2 ajustado	0,899982233
Error típico	0,034077389
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrado	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,15906283	0,079531415	68,48667691	1,24894E-07
Residuos	13	0,015096489	0,001161268		
Total	15	0,17415932			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	4,89849173	0,021717548	225,5545503	9,64523E-25	4,851573821	4,94540964	4,851573821	4,94540964
Variable X 1	0,718365966	0,063111286	11,38252774	3,92764E-08	0,582022321	0,85470961	0,582022321	0,85470961
Variable X 2	-2,266853913	0,313926286	-7,220975166	6,7375E-06	-2,945050421	-1,588657405	-2,945050421	-1,588657405

MODELO DEL PROGRAMA DE DESEMPEÑO A LARGO PLAZO DE PAVIMENTOS (LTPP)

$$\log\left(\frac{M_R}{P_a}\right) = k_1 + k_2 \log\left(\frac{\theta}{P_a}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right) + k_4 \left(\log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right)\right)^2$$

Coeficientes k	
k1	2,561
k2	0,732
k3	-0,132
k4	0,093
R2	0,9347

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,973536556
Coefficiente de	0,947773427
R^2 ajustado	0,934716783
Error típico	0,027531413
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrado	F	Valor crítico de F
Regresión	3	0,165063575	0,055021192	72,58936345	5,81644E-08
Residuos	12	0,009095744	0,000757979		
Total	15	0,17415932			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	2,560681216	0,102838138	24,90011272	1,06561E-11	2,336616163	2,784746269	2,336616163	2,784746269
Variable X 1	0,731951948	0,051204555	14,29466479	6,7328E-09	0,620386807	0,843517089	0,620386807	0,843517089
Variable X 2	-0,132432139	0,244072891	-0,54259258	0,597343541	-0,664221285	0,399357006	-0,664221285	0,399357006
Variable X 3	0,093262101	0,136673635	0,682370825	0,507962913	-0,204524168	0,39104837	-0,204524168	0,39104837

MÓDULO RESILIENTE

Material Suelo combinado con cal **Presión atmosférica**
Especímen #3 **Pa (kPa)** 101.325

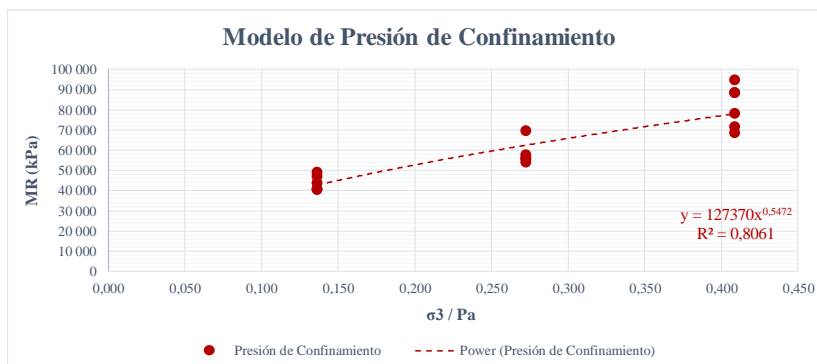
N° Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	θ Inv. Esf. (kPa)	τ Oct. (kPa)	σ_3 / Pa	θ / Pa	σ Desv. / Pa	τ Oct. / Pa	$(\tau \text{ Oct.} / Pa) + 1$	MR / Pa	log(MR)	log (MR/Pa)	log (σ Desv./Pa)	log (τ Oct./Pa)	log ($(\tau \text{ Oct.} / Pa)^2$)	log ($(\tau \text{ Oct.} / Pa) + 1$)
0	41,400	25,015	88,363	66,415	41,400	149,216	11,792	0,409	1,473	0,247	0,116	1,116	872,071	4,946	2,941	0,168	-0,608	0,87257	0,048
1	41,402	12,631	94,734	54,033	41,402	136,837	5,954	0,409	1,350	0,125	0,059	1,059	934,951	4,977	2,971	0,130	-0,904	1,51507	0,025
2	41,396	24,833	88,467	66,228	41,396	149,019	11,706	0,409	1,471	0,245	0,116	1,116	873,102	4,947	2,941	0,168	-0,611	0,87853	0,047
3	41,409	37,656	78,131	79,066	41,409	161,884	17,751	0,409	1,598	0,372	0,175	1,175	771,093	4,893	2,887	0,203	-0,430	0,57227	0,070
4	41,404	49,818	71,588	91,222	41,404	174,030	23,485	0,409	1,718	0,492	0,232	1,232	706,515	4,855	2,849	0,235	-0,308	0,40314	0,091
5	41,386	62,439	68,425	103,825	41,386	186,596	29,434	0,408	1,842	0,616	0,290	1,290	675,304	4,835	2,829	0,265	-0,210	0,28822	0,111
6	27,602	12,740	69,392	40,342	27,602	95,547	6,006	0,272	0,943	0,126	0,059	1,059	684,851	4,841	2,836	-0,026	-0,901	1,50593	0,025
7	27,595	25,134	55,961	52,729	27,595	107,919	11,848	0,272	1,065	0,248	0,117	1,117	552,292	4,748	2,742	0,027	-0,605	0,86874	0,048
8	27,594	37,676	53,840	65,270	27,594	120,458	17,761	0,272	1,189	0,372	0,175	1,175	531,364	4,731	2,725	0,075	-0,430	0,57193	0,070
9	27,594	50,075	55,476	77,669	27,594	132,857	23,606	0,272	1,311	0,494	0,233	1,233	547,505	4,744	2,738	0,118	-0,306	0,40031	0,091
10	27,598	62,089	57,454	89,687	27,598	144,882	29,269	0,272	1,430	0,613	0,289	1,289	567,027	4,759	2,754	0,155	-0,213	0,29085	0,110
11	13,801	12,666	48,992	26,466	13,801	54,068	5,971	0,136	0,534	0,125	0,059	1,059	483,518	4,690	2,684	-0,273	-0,903	1,51215	0,025
12	13,797	25,233	40,259	39,030	13,797	66,624	11,895	0,136	0,658	0,249	0,117	1,117	397,330	4,605	2,599	-0,182	-0,604	0,86557	0,048
13	13,797	37,854	40,528	51,651	13,797	79,245	17,844	0,136	0,782	0,374	0,176	1,176	399,984	4,608	2,602	-0,107	-0,428	0,56884	0,070
14	13,797	50,184	43,564	63,981	13,797	91,575	23,657	0,136	0,904	0,495	0,233	1,233	429,945	4,639	2,633	-0,044	-0,305	0,39912	0,091
15	13,800	62,425	46,972	76,224	13,800	103,824	29,427	0,136	1,025	0,616	0,290	1,290	463,577	4,672	2,666	0,011	-0,210	0,28833	0,111

Modelos Mecánicos para el Cálculo del Módulo Resiliente

MODELO PRESIÓN DE CONFINAMIENTO

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

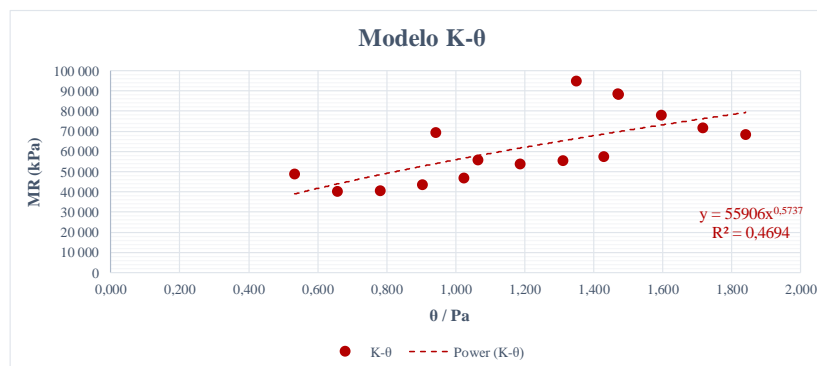
Coeficientes k	
k1	127370
k2	0,5472
R2	
	0,8061



MODELO K-θ

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

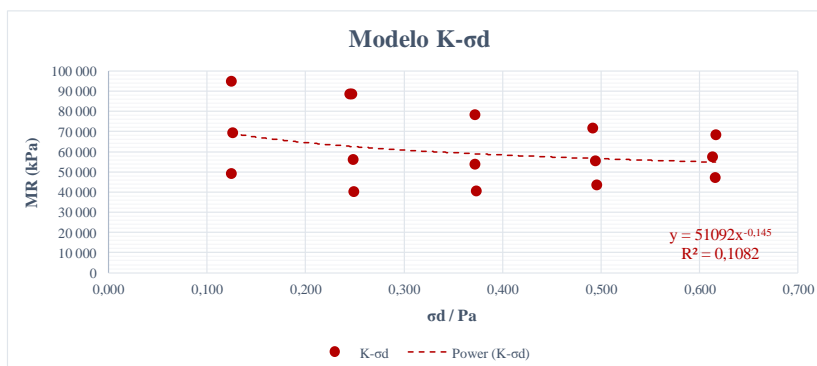
Coeficientes k	
k1	55906
k2	0,5737
R2	
	0,4694



MODELO K-σd

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

Coeficientes k	
k1	51092
k2	-0,145
R2	
	0,1082



MODELO MAY-WITCZAK

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

$$\log(M_R) = \log(k_3) + k_4 \log\left(\frac{\theta}{Pa}\right) + k_5 \log\left(\frac{\sigma_d}{Pa}\right)$$

Coeficientes k	
log(k3)	4,552
k3	35680,560
k4	0,821
k5	-0,363
R2	0,9474

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,976959595
Coefficiente de	0,95445005
R^2 ajustado	0,947442365
Error típico	0,02803433
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,214086361	0,10704318	136,2004849
Residuos	13	0,010217007	0,000785924	1,90621E-09
Total	15	0,224303368		

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	4,552431667	0,019019774	239,3525603	4,45824E-25	4,511341943	4,593521391	4,511341943	4,593521391
Variable X 1	0,821364407	0,052149405	15,75021618	7,54969E-10	0,708702467	0,934026348	0,708702467	0,934026348
Variable X 2	-0,36255094	0,032475446	-11,16384773	4,94492E-08	-0,432709876	-0,292392003	-0,432709876	-0,292392003

MODELO ESFUERZO CORTANTE OCTAÉDRICO (UNIVERSAL)

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

$$\log(M_R) = \log(k_1 Pa) + k_2 \log\left(\frac{\theta}{Pa}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{Pa}\right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	4,434
k1	268,104
k2	0,821
k3	-0,363
R2	0,9474

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,976959595
Coefficiente de	0,95445005
R^2 ajustado	0,947442365
Error típico	0,02803433
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,214086361	0,10704318	136,2004849
Residuos	13	0,010217007	0,000785924	1,90621E-09
Total	15	0,224303368		

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	4,434020261	0,029066227	152,548875	1,55406E-22	4,371226495	4,496814028	4,371226495	4,496814028
Variable X 1	0,821364407	0,052149405	15,75021618	7,54969E-10	0,708702467	0,934026348	0,708702467	0,934026348
Variable X 2	-0,36255094	0,032475446	-11,16384773	4,94492E-08	-0,432709876	-0,292392003	-0,432709876	-0,292392003

MODELO DE LA GUÍA DE DISEÑO 2002

$$M_R = k_1 P a \left(\frac{\theta}{P a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P a} + 1 \right)^{k_3}$$

$$\log(M_R) = \log(k_1 P a) + k_2 \log\left(\frac{\theta}{P a}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{P a} + 1\right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	4,922
k1	824,487
k2	0,806
k3	-2,780
R2	0,9106

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,960478451
Coefficiente de	0,922518854
R^2 ajustado	0,910598678
Error típico	0,036563203
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrada	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,206924086	0,103462043	77,39137682	6,02246E-08
Residuos	13	0,017379282	0,001336868		
Total	15	0,224303368			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	4,921900538	0,023329808	210,9704735	2,29935E-24	4,871499553	4,972301523	4,871499553	4,972301523
Variable X 1	0,806134313	0,06770809	11,90602654	2,29629E-08	0,659859878	0,952408748	0,659859878	0,952408748
Variable X 2	-2,780169138	0,33736489	-8,240837204	1,61373E-06	-3,509001673	-2,051336604	-3,509001673	-2,051336604

MODELO DEL PROGRAMA DE DESEMPEÑO A LARGO PLAZO DE PAVIMENTOS (LTPP)

$$\log\left(\frac{M_R}{P a}\right) = k_1 + k_2 \log\left(\frac{\theta}{P a}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{P a}\right) + k_4 \left(\log\left(\frac{\tau_{oct}}{P a}\right)\right)^2$$

Coeficientes k	
k1	2,482
k2	0,822
k3	-0,231
k4	0,074
R2	0,9443

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,977467436
Coefficiente de	0,955442589
R^2 ajustado	0,944303236
Error típico	0,028859397
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrada	F	Valor crítico de F
Regresión	3	0,214308991	0,07143633	85,77182254	2,2507E-08
Residuos	12	0,009994377	0,000832865		
Total	15	0,224303368			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	2,482058657	0,108191429	22,94136129	2,79521E-11	2,246329784	2,71778753	2,246329784	2,71778753
Variable X 1	0,821575864	0,053685752	15,30342484	3,09029E-09	0,70460466	0,938547068	0,70460466	0,938547068
Variable X 2	-0,230883577	0,256852521	-0,898895508	0,38639023	-0,790517144	0,32874999	-0,790517144	0,32874999
Variable X 3	0,074386172	0,143875789	0,517016607	0,614540672	-0,239092243	0,387864588	-0,239092243	0,387864588

7.7 Apéndice: Cálculo de Módulo Resiliente para combinación de suelo con cemento hidráulico

MÓDULO RESILIENTE

Material Suelo combinado con cemento Presión atmosférica
Especimen #1 101.325 Pa (kPa)

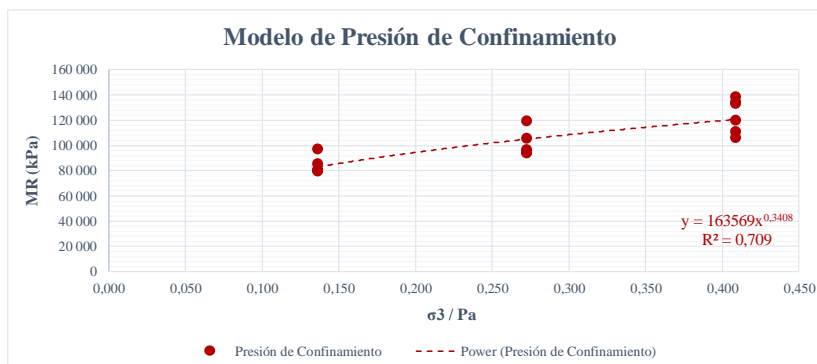
N° Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	θ Inv. Est. (kPa)	τ Oct. (kPa)	σ_3 / Pa	θ / Pa	σ Desv. / Pa	τ Oct. / Pa	$(\tau \text{ Oct.} / Pa) + 1$	MR / Pa	log(MR)	log (MIR/Pa)	log (θ/Pa)	log (σ Desv./Pa)	log (τ Oct./Pa)	log ($(\tau \text{ Oct.} / Pa)^2$)	log (($\tau \text{ Oct.} / Pa$)+1)
0	41,396	25,042	132,858	66,438	41,396	149,229	11,805	0,409	1,473	0,247	0,117	1,117	1,311,207	5,123	3,118	0,168	-0,607	-0,934	0,87171	0,048
1	41,397	12,545	138,222	53,942	41,397	136,735	5,914	0,409	1,349	0,124	0,058	1,058	1,364,140	5,141	3,135	0,130	-0,907	-1,234	1,52237	0,025
2	41,408	24,989	134,062	66,397	41,408	149,214	11,780	0,409	1,473	0,247	0,116	1,116	1,325,088	5,127	3,122	0,168	-0,608	-0,935	0,87344	0,048
3	41,397	37,500	119,431	78,897	41,397	161,692	17,678	0,409	1,596	0,370	0,174	1,174	1,178,696	5,077	3,071	0,203	-0,432	-0,758	0,57501	0,070
4	41,401	50,026	110,609	91,427	41,401	174,229	23,582	0,409	1,720	0,494	0,233	1,233	1,091,624	5,044	3,038	0,235	-0,307	-0,633	0,40085	0,091
5	41,398	62,246	105,677	103,644	41,398	186,441	29,343	0,409	1,840	0,614	0,290	1,290	1,042,946	5,024	3,018	0,265	-0,212	-0,538	0,28967	0,110
6	27,598	12,637	119,152	40,235	27,598	95,430	5,957	0,272	0,942	0,125	0,059	1,059	1,175,941	5,076	3,070	-0,026	-0,904	-1,231	1,51453	0,025
7	27,600	25,120	105,322	52,720	27,600	107,921	11,841	0,272	1,065	0,248	0,117	1,117	1,039,443	5,023	3,017	0,027	-0,606	-0,932	0,86920	0,048
8	27,599	37,422	96,360	65,021	27,599	120,218	17,641	0,272	1,186	0,369	0,174	1,174	950,995	4,984	2,978	0,074	-0,433	-0,759	0,57638	0,070
9	27,599	49,948	94,062	77,547	27,599	132,744	23,546	0,272	1,310	0,493	0,232	1,232	928,321	4,973	2,968	0,117	-0,307	-0,634	0,40171	0,091
10	27,595	62,503	93,866	90,098	27,595	145,288	29,464	0,272	1,434	0,617	0,291	1,291	926,385	4,973	2,967	0,157	-0,210	-0,536	0,28775	0,111
11	13,806	12,613	96,640	26,419	13,806	54,032	5,946	0,136	0,533	0,124	0,059	1,059	953,761	4,985	2,979	-0,273	-0,905	-1,231	1,51659	0,025
12	13,802	25,018	85,283	38,819	13,802	66,422	11,793	0,136	0,656	0,247	0,116	1,116	841,680	4,931	2,925	-0,183	-0,607	-0,934	0,87250	0,048
13	13,799	37,660	80,263	51,459	13,799	79,057	17,753	0,136	0,780	0,372	0,175	1,175	792,133	4,905	2,899	-0,108	-0,430	-0,756	0,57221	0,070
14	13,793	50,196	79,264	63,989	13,793	91,576	23,662	0,136	0,904	0,495	0,234	1,234	782,278	4,899	2,893	-0,044	-0,305	-0,632	0,39899	0,091
15	13,801	62,551	79,811	76,352	13,801	103,954	29,487	0,136	1,026	0,617	0,291	1,291	787,674	4,902	2,896	0,011	-0,209	-0,536	0,28739	0,111

Modelos Mecánicos para el Cálculo del Módulo Resiliente

MODELO PRESIÓN DE CONFINAMIENTO

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

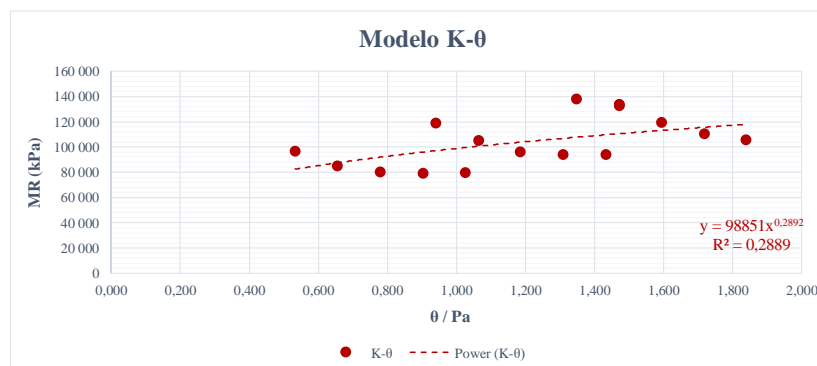
Coeficientes k	
k1	163569
k2	0,3408
R2	
	0,7090



MODELO K-θ

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

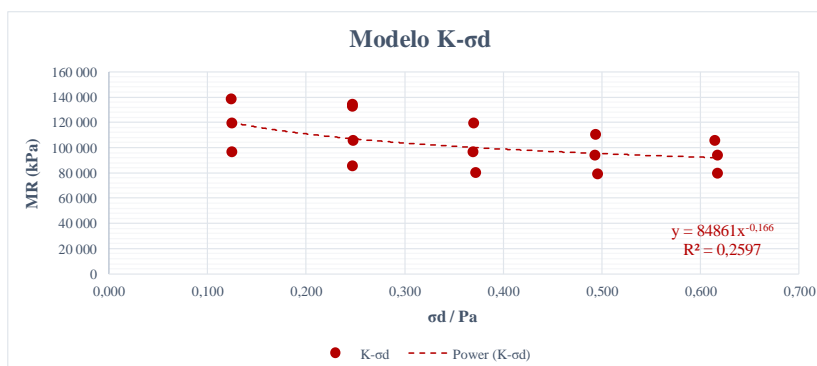
Coeficientes k	
k1	98851
k2	0,2892
R2	
	0,2889



MODELO K-σd

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

Coeficientes k	
k1	84861
k2	-0,166
R2	
	0,2597



MODELO MAY-WITCZAK

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

$$\log(M_R) = \log(k_3) + k_4 \log \left(\frac{\theta}{Pa} \right) + k_5 \log \left(\frac{\sigma_d}{Pa} \right)$$

Coeficientes k	
log(k3)	4,835
k3	68332,190
k4	0,494
k5	-0,298
R2	0,9601

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,982564403
Coefficiente de	0,965432807
R^2 ajustado	0,960114777
Error típico	0,01625578
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrado	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,095943798	0,047971899	181,5395645	3,17188E-10
Residuos	13	0,003435255	0,00026425		
Total	15	0,099379053			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	4,834625341	0,011019573	438,7307445	1,6924E-28	4,810819002	4,858431681	4,810819002	4,858431681
Variable X 1	0,494134729	0,030224399	16,34886837	4,7508E-10	0,428838883	0,559430574	0,428838883	0,559430574
Variable X 2	-0,297526765	0,018779153	-15,8434604	7,01688E-10	-0,338096659	-0,256956872	-0,338096659	-0,256956872

MODELO ESFUERZO CORTANTE OCTAÉDRICO (UNIVERSAL)

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

$$\log(M_R) = \log(k_1 Pa) + k_2 \log \left(\frac{\theta}{Pa} \right) + k_3 \log \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	4,737
k1	539,181
k2	0,494
k3	-0,298
R2	0,9601

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,982564403
Coefficiente de	0,965432807
R^2 ajustado	0,960114777
Error típico	0,01625578
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrado	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,095943798	0,047971899	181,5395645	3,17188E-10
Residuos	13	0,003435255	0,00026425		
Total	15	0,099379053			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	4,737451238	0,016828651	281,5110522	5,41232E-26	4,701095148	4,773807328	4,701095148	4,773807328
Variable X 1	0,494134729	0,030224399	16,34886837	4,7508E-10	0,428838883	0,559430574	0,428838883	0,559430574
Variable X 2	-0,297526765	0,018779153	-15,8434604	7,01688E-10	-0,338096659	-0,256956872	-0,338096659	-0,256956872

MODELO DE LA GUÍA DE DISEÑO 2002

$$M_R = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

$$\log(M_R) = \log(k_1 P_a) + k_2 \log\left(\frac{\theta}{P_a}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	5.143
k1	1370,700
k2	0,488
k3	-2,357
R2	0,9502

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,978180723
Coefficiente de	0,956837527
R^2 ajustado	0,950197147
Error típico	0,018164728
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrada	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,095089608	0,047544804	144,0937817	1,34336E-09
Residuos	13	0,004289446	0,000329957		
Total	15	0,099379053			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	5,142658918	0,01155937	444,8909463	1,41185E-28	5,117686418	5,167631418	5,117686418	5,167631418
Variable X 1	0,487645198	0,033618387	14,50531213	2,08646E-09	0,415017088	0,560273307	0,415017088	0,560273307
Variable X 2	-2,356577966	0,167289003	-14,08686719	2,98842E-09	-2,717983884	-1,995172047	-2,717983884	-1,995172047

MODELO DEL PROGRAMA DE DESEMPEÑO A LARGO PLAZO DE PAVIMENTOS (LTPP)

$$\log\left(\frac{M_R}{P_a}\right) = k_1 + k_2 \log\left(\frac{\theta}{P_a}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right) + k_4 \left(\log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right)\right)^2$$

Coeficientes k	
k1	2,646
k2	0,494
k3	-0,508
k4	-0,119
R2	0,9641

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,985533823
Coefficiente de	0,971276917
R^2 ajustado	0,964096146
Error típico	0,015423123
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrada	F	Valor crítico de F
Regresión	3	0,096524581	0,03217486	135,2608151	1,6264E-09
Residuos	12	0,002854473	0,000237873		
Total	15	0,099379053			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	2,645817643	0,057256363	46,21001922	6,88662E-15	2,521066744	2,770568542	2,521066744	2,770568542
Variable X 1	0,493875141	0,028676721	17,22216221	7,93167E-10	0,431393933	0,556356348	0,431393933	0,556356348
Variable X 2	-0,507803963	0,13574735	-3,740802027	0,002817841	-0,803572032	-0,212035895	-0,803572032	-0,212035895
Variable X 3	-0,118649989	0,0759335	-1,562551312	0,144132695	-0,284094872	0,046794894	-0,284094872	0,046794894

MÓDULO RESILIENTE

Material Suelo combinado con cemento
Especimen #2 **Presión atmosférica**
Pa (kPa) 101.325

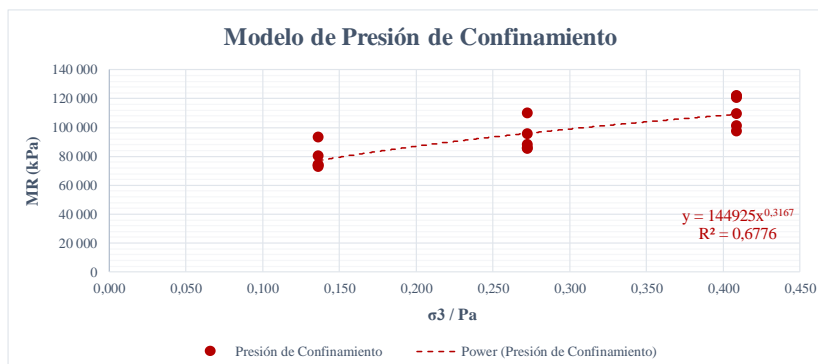
N° Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Devs. (kPa)	MR (kPa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	θ Inv. Esf. (kPa)	τ Oct. (kPa)	σ_3 / Pa	θ / Pa	σ Devs. / Pa	τ Oct. / Pa	$(\tau_{Oct.}/Pa) + 1$	MR / Pa	log(MR)	log (θ /Pa)	log (σ Devs./Pa)	log ($\tau_{Oct.}/Pa$)	log ($(\tau_{Oct.}/Pa)^2$)	log ($(\tau_{Oct.}/Pa)+1$)
0	41,401	24,984	120,465	66,385	41,401	149,188	11,778	0,409	1,472	0,247	0,116	1,116	1,188,896	5,081	0,168	-0,608	-0,935	0,87358	0,048
1	41,405	12,645	121,209	54,049	41,405	136,859	5,961	0,409	1,351	0,125	0,059	1,059	1,196,241	5,084	0,131	-0,904	-1,230	1,51393	0,025
2	41,402	25,033	121,791	66,435	41,402	149,239	11,801	0,409	1,473	0,247	0,116	1,116	1,201,986	5,086	0,168	-0,607	-0,934	0,87201	0,048
3	41,389	37,493	109,429	78,883	41,389	161,661	17,675	0,408	1,595	0,370	0,174	1,174	1,079,983	5,039	0,203	-0,432	-0,758	0,57512	0,070
4	41,394	49,794	101,130	91,188	41,394	173,976	23,473	0,409	1,717	0,491	0,232	1,232	998,078	5,005	0,235	-0,309	-0,635	0,40341	0,090
5	41,408	62,216	97,202	103,625	41,408	186,441	29,329	0,409	1,840	0,614	0,289	1,289	959,313	4,988	0,265	-0,212	-0,538	0,28990	0,110
6	27,597	12,635	109,676	40,232	27,597	95,425	5,956	0,272	0,942	0,125	0,059	1,059	1,082,415	5,040	0,304	-0,904	-1,231	1,51474	0,025
7	27,598	25,192	95,534	52,790	27,598	107,985	11,876	0,272	1,066	0,249	0,117	1,117	942,850	4,980	0,028	-0,604	-0,931	0,86686	0,048
8	27,602	37,527	87,854	65,130	27,602	120,334	17,691	0,272	1,188	0,370	0,175	1,175	867,049	4,944	0,075	-0,431	-0,758	0,57453	0,070
9	27,599	49,978	85,458	77,577	27,599	132,774	23,560	0,272	1,310	0,493	0,233	1,233	843,401	4,932	0,117	-0,307	-0,634	0,40138	0,091
10	27,605	62,192	85,253	89,797	27,605	145,007	29,318	0,272	1,431	0,614	0,289	1,289	841,382	4,931	0,156	-0,212	-0,539	0,29008	0,110
11	13,795	12,519	92,950	26,314	13,795	53,904	5,901	0,136	0,532	0,124	0,058	1,058	917,342	4,968	-0,274	-0,908	-1,235	1,52464	0,025
12	13,801	25,086	79,899	38,887	13,801	66,488	11,826	0,136	0,656	0,248	0,117	1,117	788,538	4,903	-0,183	-0,606	-0,933	0,87029	0,048
13	13,804	37,634	75,863	51,438	13,804	79,047	17,741	0,136	0,780	0,371	0,175	1,175	728,973	4,868	-0,108	-0,430	-0,757	0,57266	0,070
14	13,794	50,157	72,611	63,952	13,794	91,540	23,644	0,136	0,903	0,495	0,233	1,233	716,618	4,861	-0,044	-0,305	-0,632	0,39941	0,091
15	13,797	62,550	73,374	76,347	13,797	103,941	29,486	0,136	1,026	0,617	0,291	1,291	724,144	4,866	0,011	-0,209	-0,536	0,28740	0,111

Modelos Mecánicos para el Cálculo del Módulo Resiliente

MODELO PRESIÓN DE CONFINAMIENTO

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

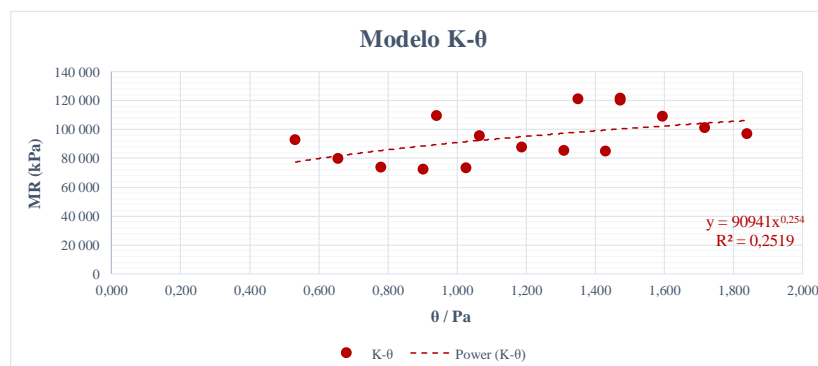
Coeficientes k	
k1	144925
k2	0,3167
R2	
	0,6776



MODELO K-θ

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

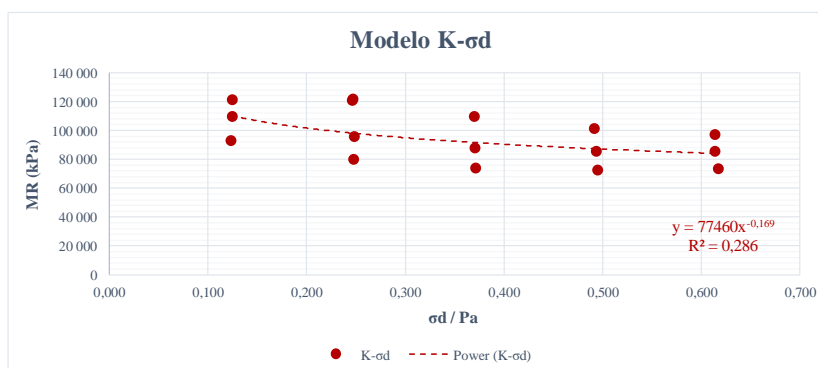
Coeficientes k	
k1	90941
k2	0,2540
R2	
	0,2519



MODELO K-σd

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

Coeficientes k	
k1	77460
k2	-0,169
R2	
	0,2860



MODELO MAY-WITCZAK

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

$$\log(M_R) = \log(k_3) + k_4 \log \left(\frac{\theta}{Pa} \right) + k_5 \log \left(\frac{\sigma_d}{Pa} \right)$$

Coeficientes k	
log(k3)	4,802
k3	63448,327
k4	0,454
k5	-0,290
R2	0,9315

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,969882964
Coefficiente de	0,940672964
R^2 ajustado	0,931545727
Error típico	0,020384308
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,085648806	0,042824403	103,0621897
Residuos	13	0,00540176	0,00041552	
Total	15	0,091050567		

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	4,802420176	0,013841886	346,9484009	3,57708E-27	4,772516599	4,832323752	4,772516599	4,832323752
Variable X 1	0,453966549	0,037911867	11,97425998	2,14428E-08	0,37206294	0,535870157	0,37206294	0,535870157
Variable X 2	-0,290042663	0,023594744	-12,29268114	1,56437E-08	-0,341016008	-0,239069318	-0,341016008	-0,239069318

MODELO ESFUERZO CORTANTE OCTAÉDRICO (UNIVERSAL)

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

$$\log(M_R) = \log(k_1 Pa) + k_2 \log \left(\frac{\theta}{Pa} \right) + k_3 \log \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	4,708
k1	503,470
k2	0,454
k3	-0,290
R2	0,9315

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,969882964
Coefficiente de	0,940672964
R^2 ajustado	0,931545727
Error típico	0,020384308
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,085648806	0,042824403	103,0621897
Residuos	13	0,00540176	0,00041552	
Total	15	0,091050567		

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	4,707690427	0,021142293	222,66698	1,14036E-24	4,662015281	4,753365573	4,662015281	4,753365573
Variable X 1	0,453966549	0,037911867	11,97425998	2,14428E-08	0,37206294	0,535870157	0,37206294	0,535870157
Variable X 2	-0,290042663	0,023594744	-12,29268114	1,56437E-08	-0,341016008	-0,239069318	-0,341016008	-0,239069318

MODELO DE LA GUÍA DE DISEÑO 2002

$$M_R = k_1 Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{k_3}$$

$$\log(M_R) = \log(k_1 Pa) + k_2 \log \left(\frac{\theta}{Pa} \right) + k_3 \log \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	5.103
k1	1249,801
k2	0,446
k3	-2,295
R2	0,9192

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,964352954
Coefficiente de	0,92997662
R^2 ajustado	0,919203792
Error típico	0,02214579
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrada	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,084674898	0,042337449	86,3261386	3,11946E-08
Residuos	13	0,006375668	0,000490436		
Total	15	0,091050567			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	5,102557509	0,0141172	361,4425911	2,10128E-27	5,072059152	5,133055867	5,072059152	5,133055867
Variable X 1	0,446497678	0,040964778	10,89955084	6,56495E-08	0,357998656	0,5349967	0,357998656	0,5349967
Variable X 2	-2,294990688	0,204420305	-11,22682354	4,62582E-08	-2,736613907	-1,853367469	-2,736613907	-1,853367469

MODELO DEL PROGRAMA DE DESEMPEÑO A LARGO PLAZO DE PAVIMENTOS (LTPP)

$$\log \left(\frac{M_R}{Pa} \right) = k_1 + k_2 \log \left(\frac{\theta}{Pa} \right) + k_3 \log \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right) + k_4 \left(\log \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right) \right)^2$$

Coeficientes k	
k1	2,623
k2	0,453
k3	-0,483
k4	-0,109
R2	0,9325

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,972627167
Coefficiente de	0,946003607
R^2 ajustado	0,932504509
Error típico	0,020241052
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrada	F	Valor crítico de F
Regresión	3	0,086134164	0,028711388	70,07902202	7,09825E-08
Residuos	12	0,004916402	0,0004097		
Total	15	0,091050567			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	2,623229872	0,075331202	34,82262061	2,00555E-13	2,459097282	2,787362462	2,459097282	2,787362462
Variable X 1	0,453312492	0,037650227	12,04009995	4,65943E-08	0,371279695	0,535345289	0,371279695	0,535345289
Variable X 2	-0,482776257	0,178619082	-2,702825771	0,019208689	-0,871953804	-0,09359871	-0,871953804	-0,09359871
Variable X 3	-0,108750476	0,099915557	-1,088423851	0,297784941	-0,326447774	0,108946823	-0,326447774	0,108946823

MÓDULO RESILIENTE

Material Suelo combinado con cemento **Presión atmosférica**
Especímen #3 **Pa (kPa)** 101,325

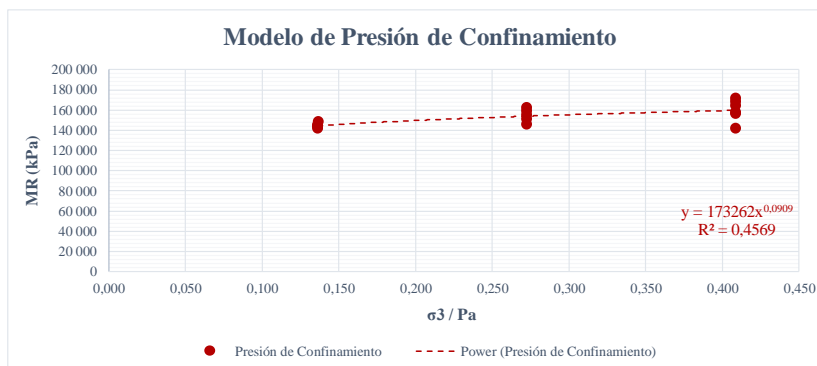
Nº Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	θ Inv. Esf. (kPa)	τ Oct. (kPa)	σ_3 / Pa	θ / Pa	σ Desv. / Pa	τ Oct. / Pa	$(\tau \text{ Oct.} / Pa) + 1$	MR / Pa	log(MR)	log (MR/Pa)	log (θ /Pa)	log (σ Desv./Pa)	log (τ Oct./Pa)	$(\log (\tau \text{ Oct.} / Pa)) \times 2$	log $(\tau \text{ Oct.} / Pa) + 1$
0	41,394	24,908	156,025	66,302	41,394	149,089	11,742	0,409	1,471	0,246	0,116	1,116	1,539,845	5,193	3,187	0,168	-0,609	-0,936	0,87607	0,048
1	41,395	12,493	141,550	53,888	41,395	136,677	5,889	0,409	1,349	0,123	0,058	1,058	1,396,990	5,151	3,145	0,130	-0,909	-1,236	1,52685	0,025
2	41,400	24,932	157,230	66,332	41,400	149,133	11,753	0,409	1,472	0,246	0,116	1,116	1,551,736	5,197	3,191	0,168	-0,609	-0,936	0,87528	0,048
3	41,395	37,494	164,108	78,888	41,395	161,678	17,675	0,409	1,596	0,370	0,174	1,174	1,619,617	5,215	3,209	0,203	-0,432	-0,758	0,57512	0,070
4	41,404	50,006	168,301	91,410	41,404	174,218	23,573	0,409	1,719	0,494	0,233	1,233	1,661,005	5,226	3,220	0,235	-0,307	-0,633	0,40107	0,091
5	41,406	62,196	171,727	103,602	41,406	186,413	29,320	0,409	1,840	0,614	0,289	1,289	1,694,813	5,235	3,229	0,265	-0,212	-0,539	0,29005	0,110
6	27,604	12,527	145,711	40,131	27,604	95,339	5,905	0,272	0,941	0,124	0,058	1,058	1,438,060	5,163	3,158	-0,026	-0,908	-1,234	1,52392	0,025
7	27,600	24,981	151,079	52,581	27,600	107,782	11,776	0,272	1,064	0,247	0,116	1,116	1,491,032	5,179	3,173	0,027	-0,608	-0,935	0,87369	0,048
8	27,605	37,596	154,534	65,201	27,605	120,411	17,723	0,272	1,188	0,371	0,175	1,175	1,525,136	5,189	3,183	0,075	-0,431	-0,757	0,57332	0,070
9	27,596	50,079	158,723	77,675	27,596	132,867	23,608	0,272	1,311	0,494	0,233	1,233	1,566,474	5,201	3,195	0,118	-0,306	-0,633	0,40027	0,091
10	27,599	62,367	162,191	89,966	27,599	145,163	29,400	0,272	1,433	0,616	0,290	1,290	1,600,696	5,210	3,204	0,156	-0,211	-0,537	0,28876	0,111
11	13,797	12,561	143,010	26,358	13,797	53,952	5,921	0,136	0,532	0,124	0,058	1,058	1,411,401	5,155	3,150	-0,274	-0,907	-1,233	1,52100	0,025
12	13,803	24,908	141,507	38,711	13,803	66,318	11,742	0,136	0,655	0,246	0,116	1,116	1,396,562	5,151	3,145	-0,184	-0,609	-0,936	0,87607	0,048
13	13,802	37,596	144,284	51,398	13,802	79,001	17,723	0,136	0,780	0,371	0,175	1,175	1,423,968	5,159	3,154	-0,108	-0,431	-0,757	0,57332	0,070
14	13,801	49,962	145,221	63,763	13,801	91,364	23,552	0,136	0,902	0,493	0,232	1,232	1,433,219	5,162	3,156	-0,045	-0,307	-0,634	0,40155	0,091
15	13,808	62,235	148,115	76,043	13,808	103,659	29,338	0,136	1,023	0,614	0,290	1,290	1,461,779	5,171	3,165	0,010	-0,212	-0,538	0,28975	0,110

Modelos Mecánicos para el Cálculo del Módulo Resiliente

MODELO PRESIÓN DE CONFINAMIENTO

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

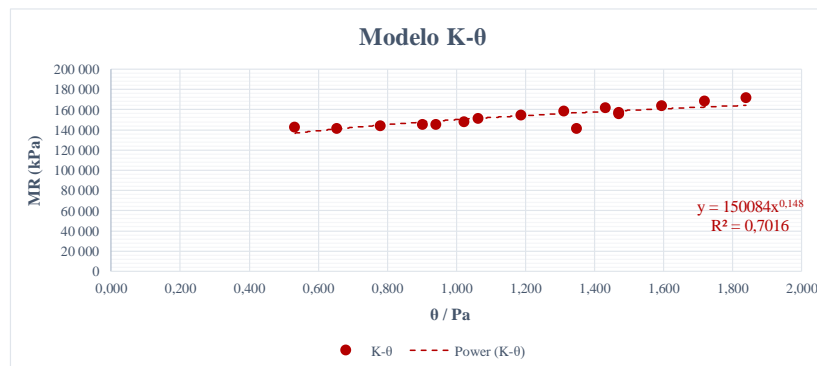
Coeficientes k	
k1	173262
k2	0,0909
R2	
	0,4569



MODELO K-θ

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

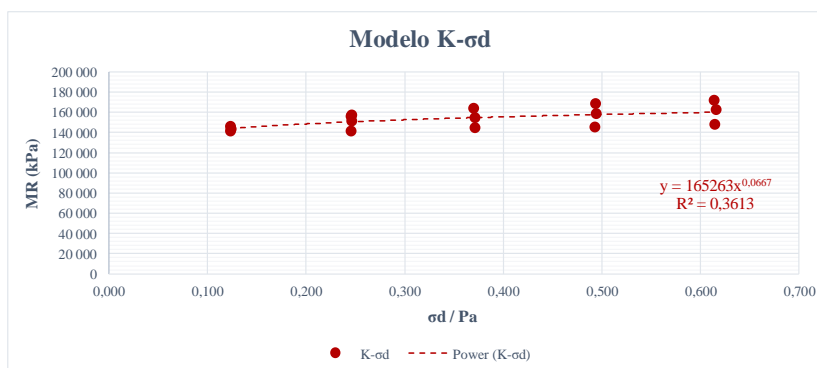
Coeficientes k	
k1	150084
k2	0,1480
R2	
	0,7016



MODELO K-σd

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

Coeficientes k	
k1	165263
k2	0,0667
R2	
	0,3613



MODELO MAY-WITCZAK

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

$$\log(M_R) = \log(k_3) + k_4 \log\left(\frac{\theta}{Pa}\right) + k_5 \log\left(\frac{\sigma_d}{Pa}\right)$$

Coeficientes k	
log(k3)	5,194
k3	156456,707
k4	0,125
k5	0,033
R2	0,7289

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,874670743
Coefficiente de	0,765048908
R^2 ajustado	0,728902586
Error típico	0,014274338
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrado	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,008625158	0,004312579	21,16533215	8,15368E-05
Residuos	13	0,002648838	0,000203757		
Total	15	0,011273996			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	5,194394185	0,009669114	537,2151294	1,21678E-29	5,173505335	5,215283036	5,173505335	5,215283036
Variable X 1	0,124915438	0,02650844	4,71228938	0,000406109	0,067647436	0,18218344	0,067647436	0,18218344
Variable X 2	0,03344404	0,01644652	2,033502543	0,062939381	-0,002086506	0,068974587	-0,002086506	0,068974587

MODELO ESFUERZO CORTANTE OCTAÉDRICO (UNIVERSAL)

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

$$\log(M_R) = \log(k_1 Pa) + k_2 \log\left(\frac{\theta}{Pa}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{Pa}\right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	5,205
k1	1583,436
k2	0,125
k3	0,033
R2	0,7289

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,874670743
Coefficiente de	0,765048908
R^2 ajustado	0,728902586
Error típico	0,014274338
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrado	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,008625158	0,004312579	21,16533215	8,15368E-05
Residuos	13	0,002648838	0,000203757		
Total	15	0,011273996			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	5,205317218	0,014756526	352,7467903	2,88377E-27	5,173437682	5,237196755	5,173437682	5,237196755
Variable X 1	0,124915438	0,02650844	4,71228938	0,000406109	0,067647436	0,18218344	0,067647436	0,18218344
Variable X 2	0,03344404	0,01644652	2,033502543	0,062939381	-0,002086506	0,068974587	-0,002086506	0,068974587

MODELO DE LA GUÍA DE DISEÑO 2002

$$M_R = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

$$\log(M_R) = \log(k_1 P_a) + k_2 \log\left(\frac{\theta}{P_a}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	5,160
k1	1427,246
k2	0,126
k3	0,258
R2	0,7226

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,871550526
Coefficiente de	0,75960032
R^2 ajustado	0,722615754
Error típico	0,014438903
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	MS	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,008563731	0,004281865	20,53830554	9,4639E-05
Residuos	13	0,002710265	0,000208482		
Total	15	0,011273996			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	5,160215566	0,009181653	562,0137638	6,76765E-30	5,14037981	5,180051323	5,14037981	5,180051323
Variable X 1	0,126297696	0,026699113	4,730407935	0,000393057	0,068617769	0,183977623	0,068617769	0,183977623
Variable X 2	0,257643005	0,133103614	1,935657474	0,074961835	-0,02990987	0,545195881	-0,02990987	0,545195881

MODELO DEL PROGRAMA DE DESEMPEÑO A LARGO PLAZO DE PAVIMENTOS (LTPP)

$$\log\left(\frac{M_R}{P_a}\right) = k_1 + k_2 \log\left(\frac{\theta}{P_a}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right) + k_4 \left(\log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right)\right)^2$$

Coeficientes k	
k1	3,194
k2	0,125
k3	0,020
k4	-0,007
R2	0,7066

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,874788893
Coefficiente de	0,765255607
R^2 ajustado	0,706569509
Error típico	0,014850666
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	MS	F	Valor crítico de F
Regresión	3	0,008627488	0,002875829	13,03981061	0,000438503
Residuos	12	0,002646507	0,000220542		
Total	15	0,011273996			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	3,194147795	0,055223581	57,84028732	4,70945E-16	3,073825949	3,314469642	3,073825949	3,314469642
Variable X 1	0,124907802	0,027578819	4,529120706	0,000690767	0,064818716	0,184996888	0,064818716	0,184996888
Variable X 2	0,020125294	0,13069392	0,15398799	0,880178599	-0,264632295	0,304882883	-0,264632295	0,304882883
Variable X 3	-0,007499105	0,072953692	-0,102792679	0,91982534	-0,166451545	0,151453334	-0,166451545	0,151453334

7.8 Apéndice: Cálculo de Módulo Resiliente para combinación de suelo con emulsión asfáltica

MÓDULO RESILIENTE

Suelo combinado con emulsión asfáltica
 Presión atmosférica
 Pa (kPa) 101,325

Material
 Espécimen #1

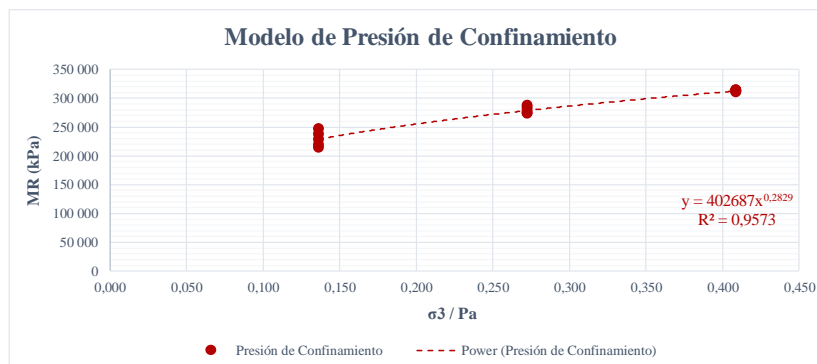
N° Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	θ Inv. Est. (kPa)	τ Oct. (kPa)	σ_3 / Pa	θ / Pa	σ Desv. / Pa	τ Oct. / Pa	$(\tau \text{ Oct.} / Pa) + 1$	MR / Pa	log(MR)	log (MIR/Pa)	log (θ/Pa)	log (σ Desv./Pa)	log (τ Oct./Pa)	log ($(\tau \text{ Oct.}/Pa)^2$)	log $((\tau \text{ Oct.}/Pa)+1)$
0	41,398	25,078	314,265	66,476	41,398	149,273	11,822	0,409	1,473	0,248	0,117	1,117	3 101,532	5,497	3,492	0,168	-0,606	-0,933	0,87055	0,048
1	41,400	12,644	313,885	54,044	41,400	136,845	5,961	0,409	1,351	0,125	0,059	1,059	3 097,808	5,497	3,491	0,131	-0,904	-1,230	1,51396	0,025
2	41,398	24,955	311,647	66,353	41,398	149,150	11,764	0,409	1,472	0,246	0,116	1,116	3 075,715	5,494	3,488	0,168	-0,609	-0,935	0,87454	0,048
3	41,394	37,563	311,277	78,957	41,394	161,744	17,707	0,409	1,596	0,371	0,175	1,175	3 072,062	5,493	3,487	0,203	-0,431	-0,758	0,57390	0,070
4	41,392	50,002	312,294	91,394	41,392	174,178	23,571	0,409	1,719	0,493	0,233	1,233	3 082,097	5,495	3,489	0,235	-0,307	-0,633	0,40111	0,091
5	41,397	62,200	309,885	103,597	41,397	186,392	29,321	0,409	1,840	0,614	0,289	1,289	3 058,330	5,491	3,485	0,265	-0,212	-0,539	0,29002	0,110
6	27,603	12,557	274,243	40,160	27,603	95,366	5,919	0,272	0,941	0,124	0,058	1,058	2 706,572	5,438	3,432	-0,026	-0,907	-1,233	1,52137	0,025
7	27,599	25,016	273,647	52,615	27,599	107,812	11,793	0,272	1,064	0,247	0,116	1,116	2 700,682	5,437	3,431	0,027	-0,607	-0,934	0,87254	0,048
8	27,599	37,512	278,649	65,110	27,599	120,308	17,683	0,272	1,187	0,370	0,175	1,175	2 750,055	5,445	3,439	0,075	-0,432	-0,758	0,57480	0,070
9	27,604	49,930	284,106	77,534	27,604	132,742	23,537	0,272	1,310	0,493	0,232	1,232	2 803,905	5,453	3,448	0,117	-0,307	-0,634	0,40191	0,091
10	27,603	62,287	286,733	89,890	27,603	145,096	29,362	0,272	1,432	0,615	0,290	1,290	2 829,830	5,457	3,452	0,156	-0,211	-0,538	0,28937	0,111
11	13,805	12,613	214,039	26,419	13,805	54,029	5,946	0,136	0,533	0,124	0,059	1,059	2 112,396	5,330	3,325	-0,273	-0,905	-1,231	1,51637	0,025
12	13,793	25,047	219,350	38,841	13,793	66,427	11,807	0,136	0,656	0,247	0,117	1,117	2 164,816	5,341	3,335	-0,183	-0,607	-0,934	0,87154	0,048
13	13,803	37,389	228,638	51,191	13,803	78,796	17,625	0,136	0,778	0,369	0,174	1,174	2 256,485	5,359	3,353	-0,109	-0,433	-0,760	0,57697	0,070
14	13,799	49,863	237,804	63,662	13,799	91,260	23,506	0,136	0,901	0,492	0,232	1,232	2 346,944	5,376	3,371	-0,045	-0,308	-0,635	0,40264	0,091
15	13,802	62,220	246,191	76,022	13,802	103,625	29,331	0,136	1,023	0,614	0,289	1,289	2 429,719	5,391	3,386	0,010	-0,212	-0,538	0,28987	0,110

Modelos Mecánicos para el Cálculo del Módulo Resiliente

MODELO PRESIÓN DE CONFINAMIENTO

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

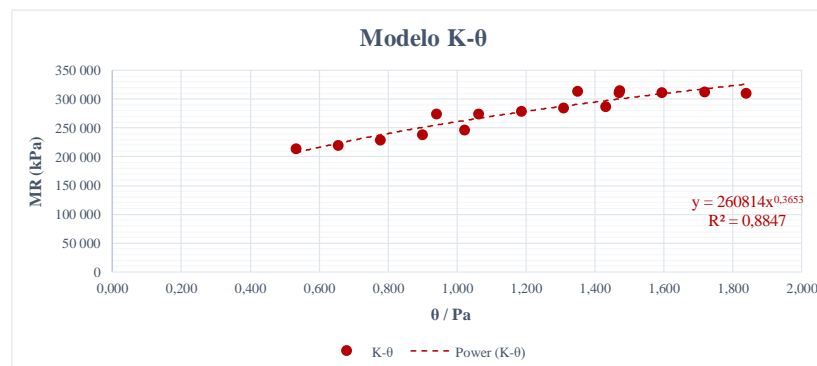
Coeficientes k	
k1	402687
k2	0,2829
R2	
	0,9573



MODELO K-θ

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

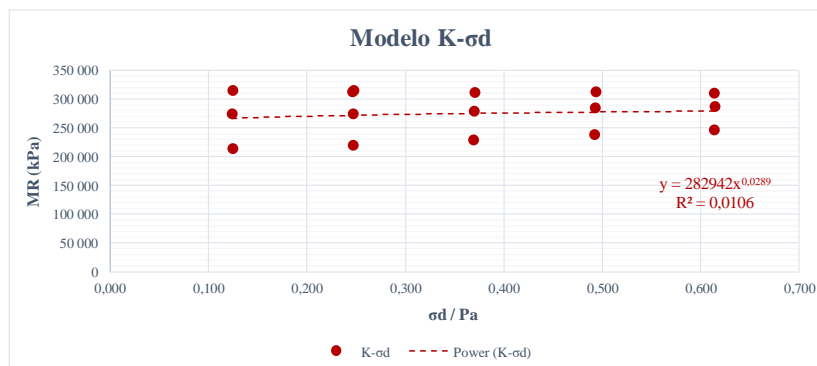
Coeficientes k	
k1	260814
k2	0,3653
R2	
	0,8847



MODELO K-σd

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

Coeficientes k	
k1	282942
k2	0,0289
R2	
	0,0106



MODELO MAY-WITCZAK

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

$$\log(M_R) = \log(k_3) + k_4 \log\left(\frac{\theta}{Pa}\right) + k_5 \log\left(\frac{\sigma_d}{Pa}\right)$$

Coeficientes k	
log(k3)	5,371
k3	234882,633
k4	0,423
k5	-0,084
R2	0,9940

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,997385128
Coefficiente de	0,994777093
R^2 ajustado	0,993973569
Error típico	0,004612653
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrada	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,052681536	0,026340768	1238,017664	1,467E-15
Residuos	13	0,000276595	2,12766E-05		
Total	15	0,052958132			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	5,370850907	0,003135077	1713,148073	3,45073E-36	5,364077986	5,377623829	5,364077986	5,377623829
Variable X 1	0,423338204	0,008569793	49,39888536	3,50699E-16	0,404824292	0,441852115	0,404824292	0,441852115
Variable X 2	-0,084338117	0,005343066	-15,78459254	7,34837E-10	-0,095881109	-0,072795125	-0,095881109	-0,072795125

MODELO ESFUERZO CORTANTE OCTAÉDRICO (UNIVERSAL)

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

$$\log(M_R) = \log(k_1 Pa) + k_2 \log\left(\frac{\theta}{Pa}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{Pa}\right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	5,343
k1	2175,650
k2	0,423
k3	-0,084
R2	0,9940

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,997385128
Coefficiente de	0,994777093
R^2 ajustado	0,993973569
Error típico	0,004612653
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrada	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,052681536	0,026340768	1238,017664	1,467E-15
Residuos	13	0,000276595	2,12766E-05		
Total	15	0,052958132			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	5,343305551	0,004788564	1115,847232	9,08589E-34	5,332960488	5,353650614	5,332960488	5,353650614
Variable X 1	0,423338204	0,008569793	49,39888536	3,50699E-16	0,404824292	0,441852115	0,404824292	0,441852115
Variable X 2	-0,084338117	0,005343066	-15,78459254	7,34837E-10	-0,095881109	-0,072795125	-0,095881109	-0,072795125

MODELO DE LA GUÍA DE DISEÑO 2002

$$M_R = k_1 P a \left(\frac{\theta}{P a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P a} + 1 \right)^{k_3}$$

$$\log(M_R) = \log(k_1 P a) + k_2 \log\left(\frac{\theta}{P a}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{P a} + 1\right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	5,458
k1	2834,683
k2	0,422
k3	-0,669
R2	0,9925

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,996754944
Coefficiente de	0,993520419
R^2 ajustado	0,992523561
Error típico	0,005137692
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,052614985	0,026307493	996,6513197
Residuos	13	0,000343146	2,63959E-05	
Total	15	0,052958132		

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	5,458221139	0,003277539	1665,341531	4,98541E-36	5,451140448	5,465301831	5,451140448	5,465301831
Variable X 1	0,421580837	0,009503278	44,36162471	1,40868E-15	0,401050253	0,44211142	0,401050253	0,44211142
Variable X 2	-0,669290974	0,047527203	-14,08227156	3,0004E-09	-0,771967253	-0,566614695	-0,771967253	-0,566614695

MODELO DEL PROGRAMA DE DESEMPEÑO A LARGO PLAZO DE PAVIMENTOS (LTPP)

$$\log\left(\frac{M_R}{P a}\right) = k_1 + k_2 \log\left(\frac{\theta}{P a}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{P a}\right) + k_4 \left(\log\left(\frac{\tau_{oct}}{P a}\right)\right)^2$$

Coeficientes k	
k1	3,316
k2	0,423
k3	-0,138
k4	-0,030
R2	0,9943

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,997735638
Coefficiente de	0,995476403
R^2 ajustado	0,994345504
Error típico	0,004468046
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	0,052718571	0,017572857	880,2521229
Residuos	12	0,000239561	1,99634E-05	
Total	15	0,052958132		

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	3,315744102	0,016695817	198,5972987	1,78642E-22	3,279367042	3,352121162	3,279367042	3,352121162
Variable X 1	0,423285703	0,008301218	50,99079202	2,12499E-15	0,405198902	0,441372505	0,405198902	0,441372505
Variable X 2	-0,137735687	0,039544822	-3,483027074	0,004521071	-0,223896453	-0,051574921	-0,223896453	-0,051574921
Variable X 3	-0,030107467	0,022105003	-1,362020472	0,198211905	-0,078270131	0,018055198	-0,078270131	0,018055198

MÓDULO RESILIENTE

Material Suelo combinado con emulsión
Especímen asfáltica #2
Pa (kPa) 101,325

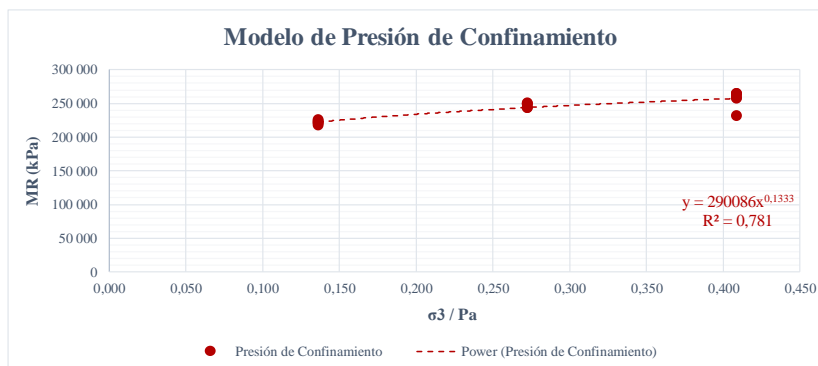
Nº Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	θ Inv. Esf. (kPa)	τ Oct. (kPa)	σ_3 / Pa	σ / Pa	σ Desv. / Pa	τ Oct. / Pa	$(\tau \text{ Oct.} / Pa) + 1$	MR / Pa	log(MR)	log (MR/Pa)	log (σ Desv./Pa)	log (τ Oct./Pa)	log ($(\tau \text{ Oct.} / Pa)^2$)	log ($(\tau \text{ Oct.} / Pa) + 1$)
0	41,397	24,896	257,534	66,292	41,397	149,085	11,736	0,409	1,471	0,246	0,116	1,116	2,541,664	5,411	3,405	0,168	-0,610	0,87646	0,048
1	41,405	12,557	230,792	53,962	41,405	136,772	5,920	0,409	1,350	0,124	0,058	1,058	2,277,740	5,363	3,358	0,130	-0,907	1,52133	0,025
2	41,402	24,972	258,179	66,374	41,402	149,178	11,772	0,409	1,472	0,246	0,116	1,116	2,548,028	5,412	3,406	0,168	-0,608	0,87397	0,048
3	41,403	37,489	263,589	78,892	41,403	161,698	17,672	0,409	1,596	0,370	0,174	1,174	2,601,417	5,421	3,415	0,203	-0,432	0,57520	0,070
4	41,397	49,995	262,931	91,393	41,397	174,188	23,568	0,409	1,719	0,493	0,233	1,233	2,594,930	5,420	3,414	0,235	-0,307	0,40119	0,091
5	41,399	62,186	263,703	103,585	41,399	186,384	29,315	0,409	1,839	0,614	0,289	1,289	2,602,544	5,421	3,415	0,265	-0,212	0,29012	0,110
6	27,605	12,608	243,586	40,213	27,605	95,423	5,944	0,272	0,942	0,124	0,059	1,059	2,404,004	5,387	3,381	-0,026	-0,905	1,51700	0,025
7	27,594	24,967	243,149	52,561	27,594	107,749	11,770	0,272	1,063	0,246	0,116	1,116	2,399,694	5,386	3,380	0,027	-0,608	0,87414	0,048
8	27,595	37,499	248,563	65,094	27,595	120,284	17,677	0,272	1,187	0,370	0,174	1,174	2,453,130	5,395	3,390	0,074	-0,432	0,57502	0,070
9	27,600	49,817	249,272	77,417	27,600	132,616	23,484	0,272	1,309	0,492	0,232	1,232	2,460,125	5,397	3,391	0,117	-0,308	0,40315	0,091
10	27,604	62,242	249,740	89,846	27,604	145,054	29,341	0,272	1,432	0,614	0,290	1,290	2,464,739	5,397	3,392	0,156	-0,212	0,28970	0,110
11	13,792	12,552	217,160	26,344	13,792	53,927	5,917	0,136	0,532	0,124	0,058	1,058	2,143,204	5,337	3,331	-0,274	-0,907	1,52177	0,025
12	13,797	25,084	220,282	38,881	13,797	66,475	11,825	0,136	0,656	0,248	0,117	1,117	2,174,017	5,343	3,337	-0,183	-0,606	0,87054	0,048
13	13,795	37,463	221,259	51,259	13,795	78,849	17,660	0,136	0,778	0,370	0,174	1,174	2,183,659	5,345	3,339	-0,109	-0,432	0,57565	0,070
14	13,800	49,944	222,949	63,744	13,800	91,344	23,544	0,136	0,901	0,493	0,232	1,232	2,200,335	5,348	3,342	-0,045	-0,307	0,40175	0,091
15	13,803	62,288	225,425	76,090	13,803	103,695	29,363	0,136	1,023	0,615	0,290	1,290	2,224,775	5,353	3,347	0,010	-0,211	0,28936	0,111

Modelos Mecánicos para el Cálculo del Módulo Resiliente

MODELO PRESIÓN DE CONFINAMIENTO

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

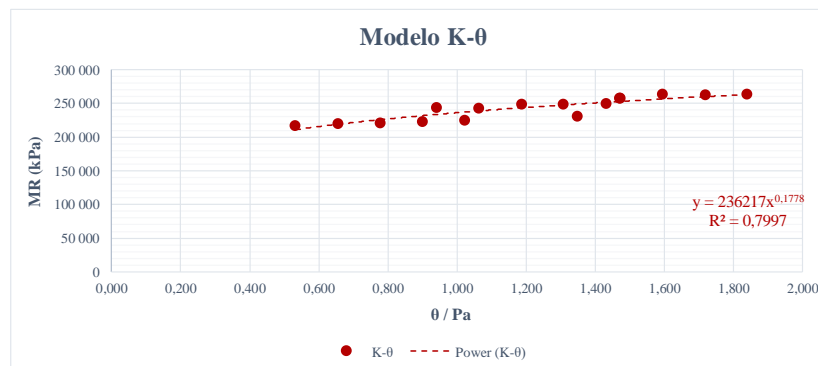
Coeficientes k	
k1	290086
k2	0,1333
R2	
	0,7810



MODELO K- θ

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

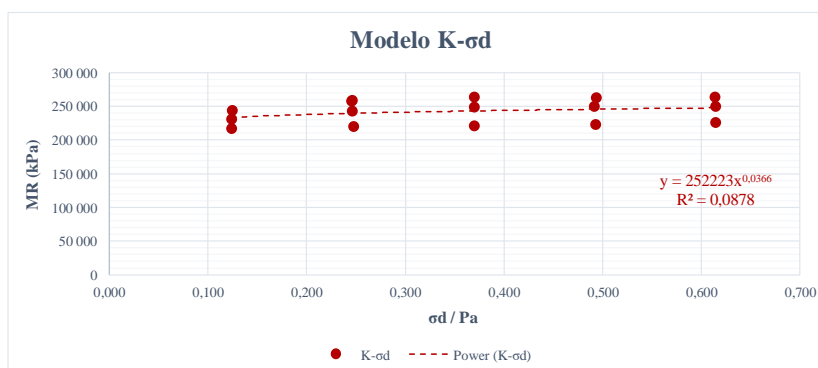
Coeficientes k	
k1	236217
k2	0,1778
R2	
	0,7997



MODELO K- σ_d

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

Coeficientes k	
k1	252223
k2	0,0366
R2	
	0,0878



MODELO MAY-WITCZAK

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

$$\log(M_R) = \log(k_3) + k_4 \log \left(\frac{\theta}{Pa} \right) + k_5 \log \left(\frac{\sigma_d}{Pa} \right)$$

Coeficientes k	
log(k3)	5,366
k3	232372,830
k4	0,187
k5	-0,013
R2	0,7741

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,896804041
Coefficiente de	0,804257488
R^2 ajustado	0,774143256
Error típico	0,014581088
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrada	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,011356204	0,005678102	26,70688975	2,48859E-05
Residuos	13	0,002763906	0,000212608		
Total	15	0,01412011			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	5,366185347	0,009896399	542,236147	1,07818E-29	5,344805477	5,387565218	5,344805477	5,387565218
Variable X 1	0,186920131	0,027078872	6,902803362	1,08067E-05	0,128419784	0,245420478	0,128419784	0,245420478
Variable X 2	-0,01320359	0,016850898	-0,783554057	0,447342987	-0,049607743	0,023200563	-0,049607743	0,023200563

MODELO ESFUERZO CORTANTE OCTAÉDRICO (UNIVERSAL)

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

$$\log(M_R) = \log(k_1 Pa) + k_2 \log \left(\frac{\theta}{Pa} \right) + k_3 \log \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	5,362
k1	2270,682
k2	0,187
k3	-0,013
R2	0,7741

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,896804041
Coefficiente de	0,804257488
R^2 ajustado	0,774143256
Error típico	0,014581088
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrada	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,011356204	0,005678102	26,70688975	2,48859E-05
Residuos	13	0,002763906	0,000212608		
Total	15	0,01412011			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	5,361872972	0,015110268	354,8496271	2,66936E-27	5,329229223	5,394516722	5,329229223	5,394516722
Variable X 1	0,186920131	0,027078872	6,902803362	1,08067E-05	0,128419784	0,245420478	0,128419784	0,245420478
Variable X 2	-0,01320359	0,016850898	-0,783554057	0,447342987	-0,049607743	0,023200563	-0,049607743	0,023200563

MODELO DE LA GUÍA DE DISEÑO 2002

$$M_R = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

$$\log(M_R) = \log(k_1 P_a) + k_2 \log\left(\frac{\theta}{P_a}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	5,382
k1	2379,385
k2	0,190
k3	-0,142
R2	0,7827

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coficiente de	0,900944859
Coficiente de	0,811701638
R^2 ajustado	0,78273266
Error típico	0,014301139
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	de cuadrados	de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,011461316	0,005730658	28,01968431	1,93421E-05
Residuos	13	0,002658794	0,000204523		
Total	15	0,01412011			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	5,382181256	0,009108764	590,8794588	3,52917E-30	5,362502969	5,401859543	5,362502969	5,401859543
Variable X 1	0,189738125	0,026439979	7,176182915	7,19517E-06	0,132618023	0,246858226	0,132618023	0,246858226
Variable X 2	-0,141783721	0,132089528	-1,073391086	0,302616808	-0,427145797	0,143578354	-0,427145797	0,143578354

MODELO DEL PROGRAMA DE DESEMPEÑO A LARGO PLAZO DE PAVIMENTOS (LTPP)

$$\log\left(\frac{M_R}{P_a}\right) = k_1 + k_2 \log\left(\frac{\theta}{P_a}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right) + k_4 \left(\log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right)\right)^2$$

Coeficientes k	
k1	3,289
k2	0,187
k3	-0,178
k4	-0,093
R2	0,7866

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coficiente de	0,910654813
Coficiente de	0,829292189
R^2 ajustado	0,786615236
Error típico	0,014172782
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	de cuadrados	de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	0,011709697	0,003903232	19,43185105	6,70487E-05
Residuos	12	0,002410413	0,000200868		
Total	15	0,01412011			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	3,288806407	0,052851166	62,2276979	1,96385E-16	3,173653608	3,403959206	3,173653608	3,403959206
Variable X 1	0,186715987	0,026321048	7,093790114	1,2585E-05	0,129367351	0,244064623	0,129367351	0,244064623
Variable X 2	-0,177783622	0,12513945	-1,420684058	0,180868174	-0,450439063	0,094871818	-0,450439063	0,094871818
Variable X 3	-0,092746005	0,069913345	-1,326585137	0,209338483	-0,245074098	0,059582089	-0,245074098	0,059582089

MÓDULO RESILIENTE

Material Suelo combinado con emulsión asfáltica
 Presión atmosférica Pa (kPa) 101,325
 Especimen #3

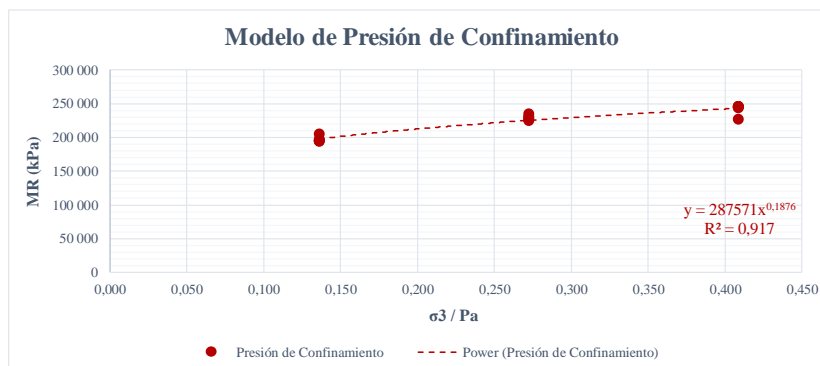
N° Secuencia	σ_3 Conf. (kPa)	σ Desv. (kPa)	MR (kPa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	0 Inv. Esf. (kPa)	τ Oct. (kPa)	σ_3 / Pa	θ / Pa	σ Desv. / Pa	τ Oct. / Pa	$(\tau \text{ Oct.} / Pa) + 1$	MR / Pa	log(MR)	log (MR/Pa)	log (θ /Pa)	log (σ Desv./Pa)	log (τ Oct./Pa)	log ($(\tau \text{ Oct.}/Pa)^{-2}$)	log ($(\tau \text{ Oct.}/Pa)+1$)
0	41,402	25,075	243 697	66,477	41,402	149,282	11,821	0,409	1,473	0,247	0,117	1,117	2 405,101	5,387	3,381	0,168	-0,606	-0,933	0,87063	0,048
1	41,395	12,658	226 186	54,052	41,395	136,842	5,967	0,409	1,351	0,125	0,059	1,059	2 232,278	5,354	3,349	0,131	-0,903	-1,230	1,51282	0,025
2	41,404	24,846	243 009	66,250	41,404	149,057	11,712	0,409	1,471	0,245	0,116	1,116	2 398,313	5,386	3,380	0,168	-0,610	-0,937	0,87810	0,048
3	41,403	37,330	245 137	78,733	41,403	161,539	17,597	0,409	1,594	0,368	0,174	1,174	2 419,314	5,389	3,384	0,203	-0,434	-0,760	0,57801	0,070
4	41,400	49,742	244 797	91,143	41,400	173,943	23,449	0,409	1,717	0,491	0,231	1,231	2 415,954	5,389	3,383	0,235	-0,309	-0,636	0,40398	0,090
5	41,400	62,201	244 866	103,601	41,400	186,402	29,322	0,409	1,840	0,614	0,289	1,289	2 416,640	5,389	3,383	0,265	-0,212	-0,539	0,29001	0,110
6	27,605	12,591	234 072	40,196	27,605	95,406	5,936	0,272	0,942	0,124	0,059	1,059	2 310,107	5,369	3,364	-0,026	-0,906	-1,232	1,51844	0,025
7	27,598	24,948	230 227	52,545	27,598	107,741	11,761	0,272	1,063	0,246	0,116	1,116	2 272,166	5,362	3,356	0,027	-0,609	-0,935	0,87477	0,048
8	27,600	37,509	228 247	65,109	27,600	120,310	17,682	0,272	1,187	0,370	0,175	1,175	2 252,627	5,358	3,353	0,075	-0,432	-0,758	0,57486	0,070
9	27,600	49,926	226 785	77,527	27,600	132,728	23,535	0,272	1,310	0,493	0,232	1,232	2 238,194	5,356	3,350	0,117	-0,307	-0,634	0,40195	0,091
10	27,600	62,313	224 774	89,914	27,600	145,115	29,375	0,272	1,432	0,615	0,290	1,290	2 218,344	5,352	3,346	0,156	-0,211	-0,538	0,28917	0,111
11	13,800	12,637	204 813	26,437	13,800	54,037	5,957	0,136	0,533	0,125	0,059	1,059	2 021,345	5,311	3,306	-0,273	-0,904	-1,231	1,51455	0,025
12	13,793	25,035	196 657	38,828	13,793	66,415	11,801	0,136	0,655	0,247	0,116	1,116	1 940,854	5,294	3,288	-0,183	-0,607	-0,934	0,87195	0,048
13	13,801	37,442	194 434	51,243	13,801	78,844	17,650	0,136	0,778	0,370	0,174	1,174	1 918,918	5,289	3,283	-0,109	-0,432	-0,759	0,57602	0,070
14	13,804	49,799	193 765	63,603	13,804	91,212	23,475	0,136	0,900	0,491	0,232	1,232	1 912,313	5,287	3,282	-0,046	-0,308	-0,635	0,40336	0,090
15	13,806	62,170	194 268	75,977	13,806	103,589	29,307	0,136	1,022	0,614	0,289	1,289	1 917,276	5,288	3,283	0,010	-0,212	-0,539	0,29024	0,110

Modelos Mecánicos para el Cálculo del Módulo Resiliente

MODELO PRESIÓN DE CONFINAMIENTO

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

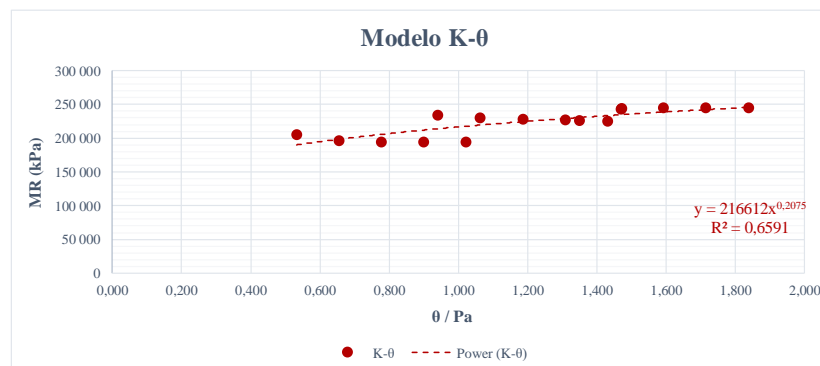
Coeficientes k	
k1	287571
k2	0,1876
R2	
	0,9170



MODELO K- θ

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

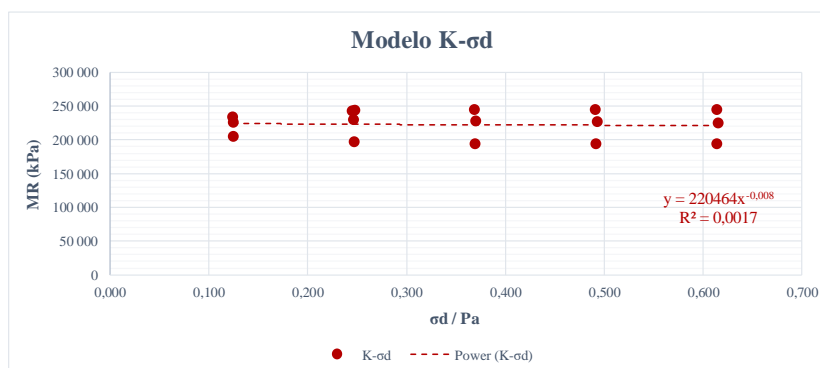
Coeficientes k	
k1	216612
k2	0,2075
R2	
	0,6591



MODELO K- σ_d

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

Coeficientes k	
k1	220464
k2	-0,008
R2	
	0,0017



MODELO MAY-WITCZAK

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

$$\log(M_R) = \log(k_3) + k_4 \log \left(\frac{\theta}{Pa} \right) + k_5 \log \left(\frac{\sigma_d}{Pa} \right)$$

Coeficientes k	
log(k3)	5,294
k3	196615,852
k4	0,261
k5	-0,078
R2	0,8023

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,910317914
Coefficiente de	0,828678705
R^2 ajustado	0,802321583
Error típico	0,017744443
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrado	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,019798985	0,009899493	31,44040908	1,04658E-05
Residuos	13	0,004093248	0,000314865		
Total	15	0,023892234			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	5,29361853	0,012068357	438,6362175	1,69715E-28	5,267546429	5,31969063	5,267546429	5,31969063
Variable X 1	0,260923008	0,032958228	7,916778915	2,50694E-06	0,189721084	0,332124932	0,189721084	0,332124932
Variable X 2	-0,077985426	0,020566614	-3,79184566	0,002241796	-0,122416893	-0,033553958	-0,122416893	-0,033553958

MODELO ESFUERZO CORTANTE OCTAÉDRICO (UNIVERSAL)

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

$$\log(M_R) = \log(k_1 Pa) + k_2 \log \left(\frac{\theta}{Pa} \right) + k_3 \log \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	5,268
k1	1829,917
k2	0,261
k3	-0,078
R2	0,8023

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,910317914
Coefficiente de	0,828678705
R^2 ajustado	0,802321583
Error típico	0,017744443
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrado	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,019798985	0,009899493	31,44040908	1,04658E-05
Residuos	13	0,004093248	0,000314865		
Total	15	0,023892234			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	5,268148002	0,018433576	285,7908783	4,44845E-26	5,228324681	5,307971322	5,228324681	5,307971322
Variable X 1	0,260923008	0,032958228	7,916778915	2,50694E-06	0,189721084	0,332124932	0,189721084	0,332124932
Variable X 2	-0,077985426	0,020566614	-3,79184566	0,002241796	-0,122416893	-0,033553958	-0,122416893	-0,033553958

MODELO DE LA GUÍA DE DISEÑO 2002

$$M_R = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$$

$$\log(M_R) = \log(k_1 P_a) + k_2 \log\left(\frac{\theta}{P_a}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)$$

Coeficientes k	
log(k1*Pa)	5,376
k1	2343,469
k2	0,261
k3	-0,638
R2	0,8132

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,915501756
Coefficiente de	0,838143465
R^2 ajustado	0,81324246
Error típico	0,017247328
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrado	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,020025119	0,01001256	33,65902113	7,23347E-06
Residuos	13	0,003867114	0,00029747		
Total	15	0,023892234			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	5,375575742	0,01099703	488,8206967	4,15115E-29	5,351818103	5,39933338	5,351818103	5,39933338
Variable X 1	0,260885669	0,031891614	8,180384608	1,75032E-06	0,191988026	0,329783313	0,191988026	0,329783313
Variable X 2	-0,6377709	0,159547157	-3,99738179	0,001519553	-0,982451577	-0,293090223	-0,982451577	-0,293090223

MODELO DEL PROGRAMA DE DESEMPEÑO A LARGO PLAZO DE PAVIMENTOS (LTPP)

$$\log\left(\frac{M_R}{P_a}\right) = k_1 + k_2 \log\left(\frac{\theta}{P_a}\right) + k_3 \log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right) + k_4 \left(\log\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right)\right)^2$$

Coeficientes k	
k1	3,208
k2	0,261
k3	-0,211
k4	-0,075
R2	0,7977

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de	0,915526475
Coefficiente de	0,838188726
R^2 ajustado	0,797735908
Error típico	0,017949078
Observaciones	16

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media Cuadrado	F	Valor crítico de F
Regresión	3	0,020026201	0,0066754	20,72015644	4,88492E-05
Residuos	12	0,003866033	0,000322169		
Total	15	0,023892234			

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	3,208227566	0,067182967	47,75358583	4,65187E-15	3,061848456	3,354606676	3,061848456	3,354606676
Variable X 1	0,260748693	0,03333896	7,821140635	4,73562E-06	0,18810934	0,333388046	0,18810934	0,333388046
Variable X 2	-0,210520611	0,159182453	-1,322511411	0,210649765	-0,557349382	0,13630816	-0,557349382	0,13630816
Variable X 3	-0,074768259	0,089030805	-0,839802126	0,417437225	-0,268749719	0,119213201	-0,268749719	0,119213201

7.9 Apéndice: Cálculo de Módulos Resilientes Finales (Resultados en Apartado 4.8)

MÓDULO RESILIENTE

ESPEORES DE PAVIMENTO

Material	Espesor (cm)	Espesor (in)	Módulo (psi)	Módulo (kPa)	Módulo (Pa)	Módulo de Poisson
Carpeta asfáltica	15.00	5.91	580.000	3.998.961	3.998.960.800	0.35
Base estabilizada	25.00	9.84	620.000	4.274.751	4.274.751.200	0.25
Subbase granular	60.00	23.62	15.000	103.421	103.421.400	0.40
Subrasante	***	***	4.500	31.026	31.026.420	0.45
	100,00	39,37				

Conversiones	
psi	kPa
1	6.89476
psi	Pa
1	0.000145038
cm	in
2,54	1

CARGAS CONSIDERADAS

Tipo	Carga (lb)	Carga (N)	Presión (psi)	Presión (Pa)
Simple	9.000	40.034	100	689.474

DATOS DE SALIDA DE PITRA PAVE

Sistema Multicapa
 Numero de Capas: 4
 Numero de Cargas: 1
 Numero de Puntos: 1

Preferencias
 Analisis: General Estático Lineal
 Union entre Capas: Ligadas
 Cargas: General Circular Uniforme
 Puntos: General

Capas	ID	Modulo E (Pa)	Poisson v (1)	Espesor (m)	Descripcion	Tipo
1	1	3.9990e+09	3.5000e-01	1.5000e-01	CA	Elastica
2	2	4.2748e+09	2.5000e-01	2.5000e-01	BE	Elastica
3	3	1.0342e+08	4.0000e-01	6.0000e-01	SB	Elastica
4	4	3.1026e+07	4.5000e-01	1.2340e+03	SR	Elastica

Cargas	ID	Carga (N)	Presion (Pa)	X (m)	Y (m)
1	1	4.0034e+04	6.8947e+05	0.0000e+00	0.0000e+00

Puntos	ID	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	1	0.0000e+00	0.0000e+00	1.0500e+00

Resultados

ID	dx (m)	dy (m)	dz (m)	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Eyz (1)	Sxx (Pa)	Syy (Pa)	Szz (Pa)	Sxy (Pa)	Sxz (Pa)	Syz (Pa)
1	0,000E+00	0,000E+00	2,900E-04	-3,95E-05	-3,95E-05	9,42E-05	0,00E+00	0,00E+00	6,17E+02	6,17E+02	3,48E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

DE LOS DATOS ANTERIORES SE TIENE LO SIGUIENTE:

σ_1 (kPa)	3.4766
σ_2 (kPa)	0.6166
σ_3 (kPa)	0.6166
σ_d (kPa)	2.8601
θ (kPa)	4.7097
τ_{oct} (kPa)	1.3482
P_a (kPa)	101.3250

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad \sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_d \quad \sigma_3 \approx \sigma_2$$

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

CÁLCULO DE MÓDULOS RESILIENTES

Modelo 1. Presión de Confinamiento

$$M_R = k_1 \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{k_2}$$

Material	Suelo sin estabilizar			Suelo con cal			Suelo con cemento			Suelo con emulsión		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Muestra												
k1	128 787	109 264	116 069	110 389	119 277	127 370	163 569	144 925	173 262	402 687	290 086	287 571
k2	0.1149	0.0035	0.1210	0.5604	0.4887	0.5472	0.3408	0.3167	0.0909	0.2829	0.1333	0.1876
MR (kPa)	71 660,95	107 330,21	62 605,24	6 327,33	9 856,45	7 809,26	28 745,77	28 801,55	108 966,20	95 089,47	146 949,30	110 425,84
MR (psi)	10 393,54	15 566,92	9 080,12	917,70	1 429,56	1 132,64	4 169,22	4 177,31	15 804,20	13 791,56	21 313,19	16 015,91

Modelo 2. K-0

$$M_R = k_1 \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2}$$

Material	Suelo sin estabilizar			Suelo con cal			Suelo con cemento			Suelo con emulsión		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Muestra												
k1	109 872	110 157	98 921	47 430	57 048	55 906	98 851	90 941	150 084	260 814	236 217	216 612
k2	0.0149	-0.0970	-0.0400	0.5966	0.5283	0.5737	0.2892	0.2540	0.1480	0.3653	0.1778	0.2075
MR (kPa)	104 961,36	148 349,56	111 840,07	7 602,39	11 276,20	9 613,36	40 696,54	41 710,75	95 299,66	85 013,33	136 884,08	114 588,86
MR (psi)	15 223,35	21 516,28	16 221,02	1 102,63	1 635,47	1 394,30	5 902,53	6 049,63	13 822,04	12 330,14	19 853,35	16 619,70

Modelo 3. K- σ_d

$$M_R = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2}$$

Material	Suelo sin estabilizar			Suelo con cal			Suelo con cemento			Suelo con emulsión		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Muestra												
k1	92 988	97 796	74 958	43 621	54 319	51 092	84 861	77 460	165 263	282 942	252 223	220 464
k2	-0.1470	-0.0920	-0.2360	-0.1430	-0.1040	-0.1450	-0.1660	-0.1690	0.0667	0.0289	0.0366	-0.0080
MR (kPa)	157 101,50	135 787,77	173 965,42	72 652,68	78 719,70	85 705,29	153 426,04	141 552,15	130 267,01	255 223,94	221 349,60	226 846,68
MR (psi)	22 785,64	19 694,34	25 231,54	10 537,38	11 417,32	12 430,50	22 252,56	20 530,39	18 893,63	37 017,09	32 104,03	32 901,32

Modelo 4. May-Witzczak

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

Material	Suelo sin estabilizar			Suelo con cal			Suelo con cemento			Suelo con emulsión		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Muestra	87.325,2404	99.588,2456	70.212,1337	30.175,3642	39.460,0183	35.680,5604	68.332,1902	63.448,3271	156.456,7070	234.882,6334	232.372,8300	196.615,8520
k3	0,1427	-0,0414	0,1491	0,8456	0,7318	0,8214	0,4941	0,4540	0,1249	0,4233	0,1869	0,2609
k4	-0,1849	-0,0813	-0,2761	-0,3656	-0,2976	-0,3626	-0,2975	-0,2900	0,0334	-0,0843	-0,0132	-0,0780
MR (kPa)	108.999,44	151.091,85	118.948,98	8.300,61	12.074,07	10.459,14	43.356,22	44.338,80	94.645,54	86.561,92	137.255,39	116.602,14
MR (psi)	15.809,03	21.914,01	17.252,08	1.203,90	1.751,20	1.516,97	6.288,29	6.430,80	13.727,17	12.554,74	19.907,20	16.911,70

Modelo 5. Esfuerzo cortante octaédrico (Universal)

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

Material	Suelo sin estabilizar			Suelo con cal			Suelo con cemento			Suelo con emulsión		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Muestra	749,9403	924,5905	563,0333	226,2252	311,3556	268,1042	539,1811	503,4703	1.583,4363	2.175,6495	2.270,6822	1.829,9170
k1	0,1427	-0,0414	0,1491	0,8456	0,7318	0,8214	0,4941	0,4540	0,1249	0,4233	0,1869	0,2609
k2	-0,1849	-0,0813	-0,2761	-0,3656	-0,2976	-0,3626	-0,2975	-0,2900	0,0334	-0,0843	-0,0132	-0,0780
MR (kPa)	108.999,44	151.091,85	118.948,98	8.300,61	12.074,07	10.459,14	43.356,22	44.338,80	94.645,54	86.561,92	137.255,39	116.602,14
MR (psi)	15.809,03	21.914,01	17.252,08	1.203,90	1.751,20	1.516,97	6.288,29	6.430,80	13.727,17	12.554,74	19.907,20	16.911,70

Modelo 6. Guía de diseño 2002

$$M_R = k_1 Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{k_3}$$

Material	Suelo sin estabilizar			Suelo con cal			Suelo con cemento			Suelo con emulsión		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Muestra	1.364,8966	1.217,5724	1.354,3298	699,5172	781,2232	824,4872	1.370,6997	1.249,8011	1.427,2464	2.834,6832	2.379,3846	2.343,4685
k1	0,1491	-0,0313	0,1500	0,8287	0,7184	0,8061	0,4876	0,4465	0,1263	0,4216	0,1897	0,2609
k2	-1,5959	-0,7855	-2,2711	-2,7773	-2,2669	-2,7802	-2,3566	-2,2950	0,2576	-0,6693	-0,1418	-0,6378
MR (kPa)	85.685,41	134.410,73	84.035,01	5.372,63	8.474,14	6.785,57	30.146,33	31.212,23	98.486,05	78.077,94	134.430,83	105.736,78
MR (psi)	12.427,61	19.494,62	12.188,24	779,23	1.229,07	984,16	4.372,35	4.526,95	14.284,19	11.324,24	19.497,54	15.335,82

Modelo 7. Programa de desempeño a largo plazo de pavimentos (LTPP)

$$\log \left(\frac{M_R}{Pa} \right) = k_1 + k_2 \log \left(\frac{\theta}{Pa} \right) + k_3 \log \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right) + k_4 \left(\log \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right) \right)^2$$

Material	Suelo sin estabilizar			Suelo con cal			Suelo con cemento			Suelo con emulsión		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Muestra	2.6014	2.7011	2.5316	2.4530	2.5607	2.4821	2.6458	2.6232	3.1941	3.3157	3.2888	3.2082
k1	0,1406	-0,0431	0,1482	0,8456	0,7320	0,8216	0,4939	0,4533	0,1249	0,4233	0,1867	0,2607
k2	-0,8545	-0,7299	-0,8116	-0,1246	-0,1324	-0,2309	-0,5078	-0,4828	0,0201	-0,1377	-0,1778	-0,2105
k3	-0,3777	-0,3663	-0,3022	0,1360	0,0933	0,0744	-0,1186	-0,1088	-0,0075	-0,0301	-0,0927	-0,0748
k4	2,6877	2,8387	2,7933	2,0385	2,1618	2,0820	2,5227	2,5420	2,9635	2,9041	3,0471	2,9925
log(MR/Pa)	49.364,20	69.887,07	62.952,34	11.072,50	14.707,91	12.239,02	33.759,69	35.298,56	93.164,85	81.239,90	112.928,85	99.595,77
MR (kPa)	7.159,67	10.136,26	9.130,46	1.605,93	2.133,20	1.775,12	4.896,43	5.119,62	13.512,41	11.782,85	16.378,94	14.445,14

7.10 Apéndice: Revisión de propuesta de diseño de pavimento por ejes equivalentes, modelo de fatiga y deformación (PitraPave LanammeUCR)

DISEÑO DE PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO - METODOLOGÍA MECANÍSTICA EMPÍRICA (NUEVO)

DATOS DE ENTRADA

Capa	Coeficiente de Poisson	Espesor de diseño		Módulo de rigidez		
		(cm)	(in)	(psi)	(kPa)	(Pa)
Carpeta asfáltica	0,35	15,00	5,91	580 000	3 998 961	3 998 960 800
Base estabilizada	0,25	25,00	9,84	620 000	4 274 751	4 274 751 200
Subbase granular	0,40	0,00	0,00	15 000	103 421	103 421 400
Subrasante	0,45	---	---	13 512	93 162	93 161 997
Profundidad inferior BE	---	40,00	15,75	---		
Profundidad hasta subrasante	---	40,00	15,75	---		

Conversiones	
psi	kPa
1	6,89476
psi	Pa
1	0,000145038
cm	in
2,54	1

ESAL's de diseño	26 862 236
------------------	------------

ESAL's	
TR	26 862 236
MR	4 029 335

Presión (psi)	Presión (Pa)
100	689 474

CARGAS Y PUNTOS DE ANÁLISIS

Ubicación y cantidad de cargas, para la mitad de eje simple dual (Datos para Pitrapave)			
Carga	P (lb)	x (in)	y (in)
1	4500	0,00	0,00
3	4500	0,00	13,50

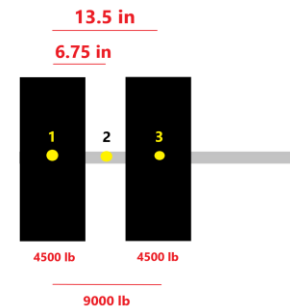


Diagrama en planta de la mitad del eje simple dual

* En los puntos 1 y 3 van ubicadas las cargas.

* En los puntos 1 y 2 van ubicadas las zonas de análisis.

Ubicación y cantidad de puntos de estudio, para la mitad de eje simple dual (Datos para Pitrapave)					
Punto	x (in)	y (in)	z (in)	Material	Deflexión
1	0,00	0,00	5,91	MAC	Tensión
2	0,00	6,75	5,91	MAC	Tensión
1	0,00	0,00	15,75	BE-25	Tensión
2	0,00	6,75	15,75	BE-25	Tensión
1	0,00	0,00	15,751	Subrasante	Compresión
2	0,00	6,75	15,751	Subrasante	Compresión

RESULTADOS DEL PITRAPAVE

Resultados de deflexiones y esfuerzos del software Pitrapave (adjunto)					
Material	Ubicación	Resultados			
MAC	Fibra inferior	εt (in)			E-06
BE-25	Fibra inferior	εt (in)	4,56E-05	045,63E-06	45,63 E-06
Subrasante	Fibra superior	εv (in)	1,01E-04	100,64E-06	100,64 E-06
BE-25	Fibra inferior	σt (psi)	3,51E+01	35,1450	---

EJES EQUIVALENTES ANTE DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN SUBRASANTE

Modelo Instituto de Asfalto

$$N_r = 1,365 \times 10^{-9} (\epsilon_v)^{-4,477}$$

Deformación a la compresión en fibra superior de subrasante	εv (in)	100,64E-06
Ejes equivalentes	Nr (ciclos)	1 073 318 338

Cumple

EJES EQUIVALENTES ANTE FATIGA EN BASE ESTABILIZADA

$$N_f = \left(\frac{\beta_{c4}}{M_{rup}} \right)^{\beta_{c3} + 20}$$

β c3 = 1,0259 para granular / 0,6052 para finos	β c3	1,0259
β c4 = 1,1368 para granular / 2,1154 para finos	β c4	1,1368
Módulo de ruptura a 28 días	Mrup (psi)	105
Esfuerzo a la tensión en la fibra inferior de BE-25	σt (psi)	3,51E+01
Ejes equivalentes	Nf (ciclos)	78 570 480 953

Cumple

Datos de PitraPave

Sistema Multicapa		3														
Numero de Capas:		2														
Numero de Cargas:		6														
Numero de Puntos:		6														
Preferencias																
Analisis:		Lineal														
Union entre Capas:		Estatico														
Cargas:		Circular														
Puntos:		Uniforme														
Capas																
ID	Modulo E (psi)	Poisson v (1)	Descripcion	Tipo												
1	5.8000e+05	3.5000e-01	5.9100e+00 CA	Elastica												
2	6.2000e+05	2.5000e-01	9.8400e+00 BE	Elastica												
3	1.3512e+04	4.5000e-01	1.2340e+03 SR	Elastica												
Cargas																
ID	Carga (lb)	Presion (psi)	X (in)	Y (in)												
1	4.5000e+03	1.0000e+02	0.0000e+00	0.0000e+00												
2	4.5000e+03	1.0000e+02	0.0000e+00	1.3500e+01												
Puntos																
ID	X (in)	Y (in)	Z (in)													
1	0.0000e+00	0.0000e+00	5.9100e+00													
2	0.0000e+00	6.7500e+00	5.9100e+00													
3	0.0000e+00	0.0000e+00	1.5750e+01													
4	0.0000e+00	6.7500e+00	1.5750e+01													
5	0.0000e+00	0.0000e+00	1.5751e+01													
6	0.0000e+00	6.7500e+00	1.5751e+01													
Resultados																
ID	dx (in)	dy (in)	dz (in)	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)	Sxx (psi)	Syy (psi)	Szz (psi)	Sxy (psi)	Sxz (psi)	Syz (psi)	
1	5.59E-21	3.04E-05	7.03E-03	-1,29E-05	-1,02E-05	5,40E-05	-1,00E-21	-3,47E-21	-3,47E-21	-1,89E-05	9,89E+00	1,11E+01	3,86E+01	2,15E-16	-7,45E-16	-4,06E+00
2	-2,88E-21	0,00E+00	7,11E-03	-6,97E-06	1,75E-05	1,01E-05	6,00E-21	-6,17E-21	0,00E+00	0,00E+00	7,37E+00	1,79E+01	1,47E+01	1,29E-15	-1,33E-15	0,00E+00
3	-4,35E-20	-2,37E-04	6,72E-03	-4,39E-05	-3,26E-05	2,79E-05	4,14E-21	-1,43E-22	-7,80E-07	-7,80E-07	-3,38E+01	-2,82E+01	1,79E+00	1,03E-15	-3,55E-17	-1,93E-01
4	-1,89E-20	0,00E+00	6,90E-03	-4,56E-05	-3,37E-05	2,89E-05	2,92E-21	-8,68E-23	0,00E+00	0,00E+00	-3,51E+01	-2,92E+01	1,83E+00	7,23E-16	-2,15E-17	0,00E+00
5	-4,35E-20	-2,37E-04	6,72E-03	-4,39E-05	-3,26E-05	9,75E-05	4,14E-21	-7,63E-21	-4,15E-05	-4,15E-05	4,73E-01	5,78E-01	1,79E+00	1,93E-17	-3,55E-17	-1,93E-01
6	-1,89E-20	0,00E+00	6,90E-03	-4,56E-05	-3,37E-05	1,01E-04	2,92E-21	-4,62E-21	0,00E+00	0,00E+00	4,67E-01	5,78E-01	1,83E+00	1,36E-17	-2,15E-17	0,00E+00

DISEÑO DE PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO - METODOLOGÍA MECANÍSTICA EMPÍRICA (NUEVO)

DATOS DE ENTRADA

Capa	Coeficiente de Poisson	Espesor de diseño		Módulo de rigidez		
		(cm)	(in)	(psi)	(kPa)	(Pa)
Carpeta asfáltica	0,35	15,00	5,91	580 000	3 998 961	3 998 960 800
Base estabilizada	0,25	25,00	9,84	620 000	4 274 751	4 274 751 200
Subbase granular	0,40	0,00	0,00	15 000	103 421	103 421 400
Subrasante	0,45	---	---	13 512	93 162	93 161 997
Profundidad inferior BE	---	40,00	15,75	---		
Profundidad hasta subrasante	---	40,00	15,75	---		

Conversiones	
psi	kPa
1	6,89476
psi	Pa
1	0,000145038
cm	in
2,54	1

ESAL's de diseño	26 862 236
------------------	------------

ESAL's	
TR	26 862 236
MR	4 029 335

Presión (psi)	Presión (Pa)
100	689 474

CARGAS Y PUNTOS DE ANÁLISIS

Ubicación y cantidad de cargas, para la mitad de eje simple dual (Datos para PitraPave)			
Carga	P (lb)	x (in)	y (in)
1	9000	0,00	0,00

Ubicación y cantidad de puntos de estudio, para la mitad de eje simple dual (Datos para PitraPave)					
Punto	x (in)	y (in)	z (in)	Material	Deflexión
1	0,00	0,00	5,91	MAC	Tensión
1	0,00	0,00	15,75	BE-25	Tensión
1	0,00	0,00	15,751	Subrasante	Compresión

RESULTADOS DEL PITRAPAVE

Resultados de deflexiones y esfuerzos del software PitraPave (adjunto)						
Material	Ubicación	Resultados				
MAC	Fibra inferior	ϵ_t (in)				E-06
BE-25	Fibra inferior	ϵ_t (in)	5,17E-05	051,74E-06	51,74	E-06
Subrasante	Fibra superior	ϵ_v (in)	1,26E-04	126,17E-06	126,17	E-06
BE-25	Fibra inferior	σ_t (psi)	4,21E+01	42,0640		---

EJES EQUIVALENTES ANTE DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN SUBRASANTE

Modelo Instituto de Asfalto

$$N_r = 1,365 \times 10^{-9} (\epsilon_p)^{-4,477}$$

Deformación a la compresión en fibra superior de subrasa	ϵ_v (in)	126,17E-06
Ejes equivalentes	Nr (ciclos)	390 078 647

Cumple

EJES EQUIVALENTES ANTE FATIGA EN BASE ESTABILIZADA

$$N_f = \left(\frac{\beta c^4}{\frac{\sigma_t}{M_{rup}}} \right)^{\beta c^3 + 20}$$

$\beta c^3 = 1,0259$ para granular / 0,6052 para finos	βc^3	1,0259
$\beta c^4 = 1,1368$ para granular / 2,1154 para finos	βc^4	1,1368
Módulo de ruptura a 28 días	M_{rup} (psi)	105
Esfuerzo a la tensión en la fibra inferior de BE-25	σ_t (psi)	4,21E+01
Ejes equivalentes	Nf (ciclos)	1 967 390 783

Cumple

Datos de PitraPave

Sistema Multicapa		3												
Numero de Capas:		1												
Numero de Puntos:		3												
Preferencias														
Analisis:	General	Estatico	Lineal											
Union entre Capas:	Ligadas	Circular	Uniforme											
Cargas:	General													
Puntos:	General													
Capas														
ID	Modulo E (psi)	Poisson v (1)	Espesor (in)	Descripcion	Tipo									
1	5.8000e+05	3.5000e-01	5.9100e+00	CA	Elastica									
2	6.2000e+05	2.5000e-01	9.8400e+00	BE	Elastica									
3	1.3512e+04	4.5000e-01	1.2340e+03	SR	Elastica									
Cargas														
ID	Carga (lb)	Presion (psi)	X (in)	Y (in)										
1	9.0000e+03	1.0000e+02	0.0000e+00	0.0000e+00										
Puntos														
ID	X (in)	Y (in)	Z (in)											
1	0.0000e+00	0.0000e+00	5.9100e+00											
2	0.0000e+00	0.0000e+00	1.5750e+01											
3	0.0000e+00	0.0000e+00	1.5751e+01											
Resultados														
ID	dx (in)	dy (in)	dz (in)	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)	Sxx (psi)	Syy (psi)	Szz (psi)	Sxy (psi)	Syz (psi)
1	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-1,61E-05	-1,61E-05	7,68E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,54E+01	1,54E+01	5,53E+01	0,00E+00	0,00E+00
2	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-5,17E-05	-5,17E-05	3,74E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-4,21E+01	-4,21E+01	2,13E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-5,17E-05	-5,17E-05	1,26E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,70E-01	4,70E-01	2,13E+00	0,00E+00	0,00E+00

CAPÍTULO 8. ANEXOS

8.1 Anexo: Informe LGC 13-R002-2022

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 1 de 11
		N° Informe 13-R002-2022

San José, Costa Rica, 29 de marzo del 2022

Proyecto: Proyecto de graduación TEC

Señor:

Ing. José David Coto S.
 (+506) 8551-1384
 jdcoto@gmail.com
 Cartago, Costa Rica

Estimado Señor:



A continuación, le presento el resultado de los ensayos realizados al material de subrasante sin estabilizar y estabilizado utilizando distintos aditivos.

Información de la muestra

Fecha de recepción de la muestra: 2022-02-14
 Identificación de la muestra: 13-1875-2022
 Descripción: Subrasante, Cal, Cemento hidráulico, Emulsión asfáltica

Muestreo (s)

(X) Cliente
 (-) Personal del laboratorio

Ingreso de Muestra:

(X) RC-05: 23114
 (-) RC-84: No hay

Método de Muestreo: Aplica (ver tabla de Ensayos realizados) No Aplica

Plan de Muestreo: según en RC-101 "Trabajos diarios en campo"

Fecha de realización del muestreo: 2022-02-11
 Lugar del muestreo: Ruta Nacional N°1 Sección Barranca – Limonal, Est. 114+000 LI, Sardinal, Puntarenas, Costa Rica.
 Lugar de realización del ensayo: En sitio, Laboratorio 13 LGC Ingeniería de Pavimento S.A.

Ensayos Realizados:

Nombre del Ensayo	Método de Ensayo	Ensayo Acreditado (*)	Ensayo No Acreditado (**)
Método de ensayo para el Análisis granulométrico de agregados	AASHTO T-11 AASHTO T-27	X	-
Método de ensayo para el Límite líquido límite plástico e índice de plasticidad en agregados y suelos	AASHTO T-89 AASHTO T-90	X	-
Método de ensayo para la Relación Densidad – Humedad de agregados y suelos - Proctor estándar	AASHTO T-99	X	-
Método de ensayo para la Reducción de muestras Método B Agregados	AASHTO R-76	X	-

LGC Ingeniería de Pavimentos S.A.
 Laboratorio y Control de Calidad de Materiales
 San Miguel de Desamparados, de la entrada de Casa Cuba, 400 metros este, Edificio, color terracota
 E-mail: lgingenieriadepavimentos@gmail.com / gestordecalidad@lgingenieria.net Teléfonos: 2270-5555 / 2270-5554

Laboratorio Acreditado: INTE ISO/ IEC 17025:2017, disponible en: www.eca.or.cr



	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 2 de 11
		Nº Informe 13-R002-2022

Nombre del Ensayo	Método de Ensayo	Ensayo Acreditado (*)	Ensayo No Acreditado (**)
Método de ensayo para el Índice de soporte California CBR de agregados y suelos compactados en laboratorio	AASHTO T-193	X	-
Método de ensayo para la clasificación de agregados y suelos	AASHTO M-145 ASTM D-2487	X	-

(Ampliar o reducir esta tabla según lo requerido)

Los ensayos acreditados se identifican con un asterisco (*) y la leyenda "Ensayo Acreditado". Y para los no acreditados se identifican con dos asteriscos (**) y la leyenda "Ensayo no acreditado".

Ensayo

El laboratorio realizó el ensayo de acuerdo con los procedimientos y registros que forman parte del sistema de gestión de calidad.

Observaciones: No hay.

Resultados de Ensayos

Anexo Nº	Descripción	Página (s)
1	Caracterización de suelo natural	4-5
2	Propiedades del suelo estabilizado con aditivos	6-11

Con la mejor disponibilidad para aclarar, ampliar o comentar el informe,

Atentamente,

ALEJANDRO GUASCH GARCIA (FIRMA)
 Firmado digitalmente por ALEJANDRO GUASCH GARCIA (FIRMA)
 Fecha: 2022.03.29 16:32:27 -06'00'

Ing. Alejandro Guasch García
 LGC Ingeniería de Pavimentos S.A.
 Encargado de elaborar el informe

ROMMEL ENRIQUE GONZALEZ GOMEZ (FIRMA)
 Firmado digitalmente por ROMMEL ENRIQUE GONZALEZ GOMEZ (FIRMA)
 Fecha: 2022.03.29 16:40:18 -06'00'

Ing. Rommel González Gómez
 Coordinador de Ingeniería
LGC Ingeniería de Pavimentos S.A.
Encargado de revisar el Informe

LUIS GUILLERMO CHAVARRIA BRAVO (FIRMA)
 Firmado digitalmente por LUIS GUILLERMO CHAVARRIA BRAVO (FIRMA)
 Fecha: 2022.03.29 16:39:48 -06'00'

Ing. Luis Chavarría Bravo, M.Sc.
 Gerente General
 LGC Ingeniería de Pavimentos S.A.
 Encargado de aprobar el Informe

-----Salto de página-----

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 3 de 11
		Nº Informe 13-R002-2022

Notas:

Nota1: Sin la aprobación de LGC Ingeniería de Pavimentos S.A. no se debe reproducir el informe, excepto cuando se reproduzca en su totalidad, para dar seguridad de que partes de un informe no se sacan de contexto.

Nota2: Estimado cliente cuando sea necesario, se le reportara la condición del ítem; en la casilla de observaciones. Por ejemplo, material contaminado, material muy húmedo tuvo que ser secado previo a las pruebas, etc.

Nota3: Los resultados obtenidos corresponden únicamente a los ítems ensayados.

Nota4: "La incertidumbre expandida reportada, se declara como la incertidumbre estándar de la medición multiplicada por un factor de cobertura k que corresponde a una probabilidad de cobertura aproximadamente del 95 %." La estimación de la incertidumbre se realiza con el "RC-37: Incertidumbre", se encuentra a disposición del cliente en el RC-78 Incertidumbres expandidas relativas para los métodos de ensayo".

Nota5: Los resultados de ensayo (s) que han sido por servicios externamente suministrados se encuentran identificados mediante el uso de paréntesis, cuadrados ([Resultado obtenido]).

Nota6: Cualquier observación o comentario sobre nuestros servicios, favor enviarlo a nuestro correo electrónico, lgcingeneriadepavimentos@gmail.com.

Nota7: Si desea formular una queja o reclamo, comunicarse con gestor de calidad o al correo gestordecalidad@lgcingeneria.net

Nota8: Si desea conocer el alcance del laboratorio puede visitar el sitio web del ECA www.eca.or.cr

Nota9: El símbolo de acreditación se utiliza en este registro únicamente si se incluyen resultados de ensayos dentro del alcance de acreditación de nuestro laboratorio.

C/c Archivo

-----Salto de página-----

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 4 de 11
		Nº Informe 13-R002-2022

Anexo N°1 Caracterización de suelo natural

Material: Subrasante
Fuente: Ruta Nacional N°1, Sección Barranca – Limonal, Est. 114+000 LI
Fecha: 2022-02-11

Tabla N°1
Material de suelo natural sin estabilizar

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	ENSAYOS	RESULTADOS			
01-1875-2022. Suelo natural. Fecha de muestreo: 2022-02-11	Inicio: 2022-03-05 Final: 2022-03-09	CBR de agregados y suelos (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	91% Comp.	2,54 mm	3,5	%
				5,08 mm	3,2	%
			95% Comp.	2,54 mm	5,9	%
				5,08 mm	5,6	%
	2022-03-04	Relación densidad-humedad (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	Densidad máxima		1490	kg/m³
			Humedad óptima		25,8	%
	2022-03-04	Límites de plasticidad	Límite Líquido (%)		61	%
			Índice Plástico (%)		28	%
	2022-02-14	Análisis granulométrico de agregados y suelos	Tamiz		Porcentaje Pasando	
			(in)	(mm)		
			3/4	19,0	100	%
			1/2	12,7	97	%
			3/8	9,5	96	%
			# 4	4,75	96	%
# 10			2,00	95	%	
# 40			0,425	92	%	
# 200	0,075	83,6	%			

LGC Ingeniería de Pavimentos S.A.
 Laboratorio y Control de Calidad de Materiales
 San Miguel de Desamparados, de la entrada de Casa Cuba, 400 metros este, Edificio, color terracota
 E-mail: lgcingenieriadepavimentos@gmail.com / gestordecalidad@lgcingenieria.net Teléfonos: 2270-5555 / 2270-5554

Laboratorio Acreditado: INTE ISO/ IEC 17025:2017, disponible en: www.eca.or.cr



CARBONO INVENTARIO
 Reconocida por el Gobierno de Costa Rica
 EXPEDIENTE DCC PP-011-2020
 Ver alcance y vigencia en www.cambiodematricogccr.com

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 5 de 11
		N° Informe 13-R002-2022

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	ENSAYOS	RESULTADOS	
	2022-03-04	Clasificación de agregados y suelos	AASHTO	Símbolo: A-7-5 (20) Descripción: Arcilla limosa de alta compresibilidad
			SUCS	Símbolo: MH Descripción: Limo de alta plasticidad

-----Salto de página-----

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 6 de 11
		Nº Informe 13-R002-2022

Anexo N°2

Propiedades del suelo estabilizado con aditivos

Tabla N°2
Material de suelo combinado con cal hidratada

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	ENSAYOS	RESULTADOS			
01-1875-2022. Suelo combinado con 2% de cal. Fecha de muestreo: 2022-02-11	Inicio: 2022-03-05 Final: 2022-03-09	CBR de agregados y suelos (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	91% Comp.	2,54 mm	3,8	%
				5,08 mm	3,4	%
			95% Comp.	2,54 mm	6,3	%
				5,08 mm	6,1	%
	2022-03-04	Relación densidad-humedad (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	Densidad máxima		1429	kg/m³
			Humedad óptima		27,2	%
	2022-03-04	Límites de plasticidad	Límite Líquido (%)		57	%
			Índice Plástico (%)		21	%
01-1875-2022. Suelo combinado con 4% de cal. Fecha de muestreo: 2022-02-11	Inicio: 2022-03-05 Final: 2022-03-09	CBR de agregados y suelos (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	91% Comp.	2,54 mm	13,7	%
				5,08 mm	11,6	%
			95% Comp.	2,54 mm	21,9	%
				5,08 mm	19,3	%
	2022-03-04	Relación densidad-humedad (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	Densidad máxima		1403	kg/m³
			Humedad óptima		31,5	%
	2022-03-04	Límites de plasticidad	Límite Líquido (%)		53	%
			Índice Plástico (%)		18	%
01-1875-2022. Suelo combinado con 6% de cal. Fecha de muestreo: 2022-02-11	Inicio: 2022-03-05 Final: 2022-03-09	CBR de agregados y suelos (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	91% Comp.	2,54 mm	21,0	%
				5,08 mm	19,0	%
			95% Comp.	2,54 mm	36,0	%
				5,08 mm	33,0	%
	2022-03-04	Relación densidad-humedad (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	Densidad máxima		1387	kg/m³
			Humedad óptima		29,1	%

LGC Ingeniería de Pavimentos S.A.
Laboratorio y Control de Calidad de Materiales
San Miguel de Desamparados, de la entrada de Casa Cuba, 400 metros este, Edificio, color terracota
E-mail: lgcingenieriadepavimentos@gmail.com / gestordecalidad@lgcingenieria.net Teléfonos: 2270-5555 / 2270-5554

Laboratorio Acreditado: INTE ISO/ IEC 17025:2017, disponible en: www.eca.or.cr



	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 7 de 11
		Nº Informe 13-R002-2022

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	ENSAYOS	RESULTADOS			
	2022-03-04	Límites de plasticidad	Límite Líquido (%)		51	%
			Índice Plástico (%)		16	%
01-1875-2022. Suelo combinado con 8% de cal. Fecha de muestreo: 2022-02-11	Inicio: 2022-03-05 Final: 2022-03-09	CBR de agregados y suelos (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	91% Comp.	2,54 mm	29,0	%
				5,08 mm	27,0	%
			95% Comp.	2,54 mm	46,0	%
				5,08 mm	43,0	%
	2022-03-04	Relación densidad-humedad (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	Densidad máxima		1313	kg/m ³
			Humedad óptima		31,3	%
2022-03-04	Límites de plasticidad	Límite Líquido (%)		45	%	
		Índice Plástico (%)		13	%	

-----Salto de página-----

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 8 de 11
		N° Informe 13-R002-2022

Tabla N°3
Material de suelo combinado con cemento hidráulico CEMEX UG

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	ENSAYOS	RESULTADOS			
01-1875-2022. Suelo combinado con 2% de cemento. Fecha de muestreo: 2022-02-11	Inicio: 2022-03-05 Final: 2022-03-09	CBR de agregados y suelos (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	91% Comp.	2,54 mm	4,1	%
				5,08 mm	3,6	%
			95% Comp.	2,54 mm	6,7	%
				5,08 mm	6,4	%
	2022-03-04	Relación densidad-humedad (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	Densidad máxima		1515	kg/m ³
			Humedad óptima		204	%
	2022-03-04	Límites de plasticidad	Límite Líquido (%)		49	%
			Índice Plástico (%)		20	%
01-1875-2022. Suelo combinado con 4% de cemento. Fecha de muestreo: 2022-02-11	Inicio: 2022-03-05 Final: 2022-03-09	CBR de agregados y suelos (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	91% Comp.	2,54 mm	14,7	%
				5,08 mm	13,1	%
			95% Comp.	2,54 mm	24,9	%
				5,08 mm	23,3	%
	2022-03-04	Relación densidad-humedad (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	Densidad máxima		1498	kg/m ³
			Humedad óptima		23	%
	2022-03-04	Límites de plasticidad	Límite Líquido (%)		47	%
			Índice Plástico (%)		16	%
01-1875-2022. Suelo combinado con 6% de cemento. Fecha de muestreo: 2022-02-11	Inicio: 2022-03-05 Final: 2022-03-09	CBR de agregados y suelos (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	91% Comp.	2,54 mm	23,0	%
				5,08 mm	21,0	%
			95% Comp.	2,54 mm	37,0	%
				5,08 mm	34,0	%
	2022-03-04	Relación densidad-humedad (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	Densidad máxima		1482	kg/m ³
			Humedad óptima		24,8	%
	2022-03-04	Límites de plasticidad	Límite Líquido (%)		44	%
			Índice Plástico (%)		12	%

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 9 de 11
		N° Informe 13-R002-2022

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	ENSAYOS	RESULTADOS			
01-1875-2022. Suelo combinado con 8% de cemento. Fecha de muestreo: 2022-02-11	Inicio: 2022-03-05 Final: 2022-03-09	CBR de agregados y suelos (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	91% Comp.	2,54 mm	43,0	%
				5,08 mm	38,0	%
			95% Comp.	2,54 mm	72,0	%
				5,08 mm	65,0	%
	2022-03-04	Relación densidad-humedad (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	Densidad máxima		1476	kg/m ³
			Humedad óptima		22	%
	2022-03-04	Límites de plasticidad	Límite Líquido (%)		42	%
			Índice Plástico (%)		7	%

-----Salto de página-----

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 10 de 11
		N° Informe 13-R002-2022

Tabla N°4
Material de suelo combinado con emulsión asfáltica de rompimiento lento

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	ENSAYOS	RESULTADOS			
01-1875-2022. Suelo combinado con 2% de emulsión asfáltica. Fecha de muestreo: 2022-02-11	Inicio: 2022-03-05 Final: 2022-03-09	CBR de agregados y suelos (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	91% Comp.	2,54 mm	2,6	%
				5,08 mm	2,5	%
			95% Comp.	2,54 mm	4,2	%
				5,08 mm	4,0	%
	2022-03-04	Relación densidad-humedad (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	Densidad máxima		1476	kg/m ³
			Humedad óptima		26,0	%
---	Límites de plasticidad	Límite Líquido (%)		---	%	
		Índice Plástico (%)		---	%	
01-1875-2022. Suelo combinado con 4% de emulsión asfáltica. Fecha de muestreo: 2022-02-11	Inicio: 2022-03-05 Final: 2022-03-09	CBR de agregados y suelos (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	91% Comp.	2,54 mm	3,3	%
				5,08 mm	3,0	%
			95% Comp.	2,54 mm	4,2	%
				5,08 mm	4,0	%
	2022-03-04	Relación densidad-humedad (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	Densidad máxima		1452	kg/m ³
			Humedad óptima		27,5	%
---	Límites de plasticidad	Límite Líquido (%)		---	%	
		Índice Plástico (%)		---	%	
01-1875-2022. Suelo combinado con 6% de emulsión asfáltica. Fecha de muestreo: 2022-02-11	Inicio: 2022-03-05 Final: 2022-03-09	CBR de agregados y suelos (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	91% Comp.	2,54 mm	3,6	%
				5,08 mm	3,3	%
			95% Comp.	2,54 mm	5,8	%
				5,08 mm	5,2	%
	2022-03-04	Relación densidad-humedad (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	Densidad máxima		1396	kg/m ³
			Humedad óptima		32,5	%
---	Límites de plasticidad	Límite Líquido (%)		---	%	
		Índice Plástico (%)		---	%	

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 11 de 11
		N° Informe 13-R002-2022

MUESTRA	FECHA(S) DE REALIZACIÓN	ENSAYOS	RESULTADOS			
01-1875-2022. Suelo combinado con 8% de emulsión asfáltica. Fecha de muestreo: 2022-02-11	Inicio: 2022-03-05 Final: 2022-03-09	CBR de agregados y suelos (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	91% Comp.	2,54 mm	3,6	%
				5,08 mm	3,2	%
			95% Comp.	2,54 mm	6,2	%
				5,08 mm	5,4	%
	2022-03-04	Relación densidad-humedad (Esfuerzo Modificado AASHTO T-180)	Densidad máxima		1325	kg/m ³
			Humedad óptima		32,2	%
	---	Límites de plasticidad	Límite Líquido (%)		---	%
			Índice Plástico (%)		---	%

-----Última línea-----

8.2 Anexo: Informe LGC 13-R004-2022

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 1 de 4
		Nº Informe 13-R004-2022

San José, Costa Rica, 10 de mayo del 2022

Proyecto: Proyecto de graduación TEC

Señor:

Ing. José David Coto S.
 (+506) 8551-1384
 jdcoto@gmail.com
 Cartago, Costa Rica

Estimado Señor:



A continuación, le presento el resultado de los ensayos realizados al material de subrasante combinada con distintos aditivos.

Información de la muestra

Fecha de recepción de la muestra: 2022-04-04
 Identificación de la muestra: 13-4301-2022, 13-4302-2022, 13-4303-2022, 13-4304-2022, 13-4305-2022, 13-4306-2022, 13-4307-2022, 13-4308-2022, 13-4309-2022
 Descripción: Subrasante, Cal, Cemento hidráulico, Emulsión asfáltica

Muestreo (s)

(X) Cliente
 (-) Personal del laboratorio

Ingreso de Muestra:

(X) RC-05: 24451
 (-) RC-84: No hay

Método de Muestreo: Aplica (ver tabla de Ensayos realizados) No Aplica

Plan de Muestreo: según en RC-101 "Trabajos diarios en campo"

Fecha de realización del muestreo: 2022-03-28
 Lugar del muestreo: Ruta Nacional N°1 Sección Barranca – Limonal, Est. 114+000 LI, Sardinal, Puntarenas, Costa Rica.
 Lugar de realización del ensayo: Laboratorio 13 LGC Ingeniería de Pavimento S.A.

Ensayos Realizados:

Nombre del Ensayo	Método de Ensayo	Ensayo Acreditado (*)	Ensayo No Acreditado (**)
Método de ensayo para la Resistencia a la compresión de especímenes de Suelo - Cemento	ASTM D-1633	X	-

(Ampliar o reducir esta tabla según lo requerido)

Los ensayos acreditados se identifican con un asterisco (*) y la leyenda "Ensayo Acreditado". Y para los no acreditados se identifican con dos asteriscos (**) y la leyenda "Ensayo no acreditado".

LGC Ingeniería de Pavimentos S.A.
 Laboratorio y Control de Calidad de Materiales
 San Miguel de Desamparados, de la entrada de Casa Cuba, 400 metros este, Edificio, color terracota
 E-mail: lgingenieriadepavimentos@gmail.com / gestordecualidad@lgcingenieria.net, Teléfonos: 2270-5555 / 2270-5554

Laboratorio Acreditado: INTE ISO/ IEC 17025:2017, disponible en: www.eca.or.cr



	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 2 de 4
		N° Informe 13-R004-2022

Ensayo

El laboratorio realizó el ensayo de acuerdo con los procedimientos y registros que forman parte del sistema de gestión de calidad.

Observaciones: No hay.

Resultados de Ensayos

Anexo N°	Descripción	Página (s)
1	Subrasante mejorada con aditivos	4

Con la mejor disponibilidad para aclarar, ampliar o comentar el informe,

Atentamente,

**ALEJANDRO
GUASCH
GARCIA
(FIRMA)**

Firmado digitalmente por
ALEJANDRO GUASCH
GARCIA (FIRMA)
Fecha: 2022.05.10
11:22:14 -06'00'

Ing. Alejandro Guasch García
LGC Ingeniería de Pavimentos S.A.
Encargado de elaborar el informe

**ROMMEL
ENRIQUE
GONZALEZ
GOMEZ (FIRMA)**

Firmado digitalmente
por ROMMEL
ENRIQUE GONZALEZ
GOMEZ (FIRMA)
Fecha: 2022.05.10
11:23:28 -06'00'

Ing. Rommel González Gómez
Coordinador de Ingeniería
LGC Ingeniería de Pavimentos S.A.
Encargado de revisar el Informe

**LUIS
GUILLERMO
CHAVARRIA
BRAVO (FIRMA)**

Firmado digitalmente
por LUIS GUILLERMO
CHAVARRIA BRAVO
(FIRMA)
Fecha: 2022.05.10
11:23:00 -06'00'

Ing. Luis Chavarría Bravo, M.Sc.
Gerente General
LGC Ingeniería de Pavimentos S.A.
Encargado de aprobar el Informe

-----Salto de página-----

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 3 de 4
		Nº Informe 13-R004-2022

Notas:

Nota1: Sin la aprobación de LGC Ingeniería de Pavimentos S.A. no se debe reproducir el informe, excepto cuando se reproduzca en su totalidad, para dar seguridad de que partes de un informe no se sacan de contexto.

Nota2: Estimado cliente cuando sea necesario, se le reportara la condición del ítem; en la casilla de observaciones. Por ejemplo, material contaminado, material muy húmedo tuvo que ser secado previo a las pruebas, etc.

Nota3: Los resultados obtenidos corresponden únicamente a los ítems ensayados.

Nota4: "La incertidumbre expandida reportada, se declara como la incertidumbre estándar de la medición multiplicada por un factor de cobertura k que corresponde a una probabilidad de cobertura aproximadamente del 95 %." La estimación de la incertidumbre se realiza con el "RC-37: Incertidumbre", se encuentra a disposición del cliente en el RC-78 Incertidumbres expandidas relativas para los métodos de ensayo".

Nota5: Los resultados de ensayo (s) que han sido por servicios externamente suministrados se encuentran identificados mediante el uso de paréntesis, cuadrados ([Resultado obtenido]).

Nota6: Cualquier observación o comentario sobre nuestros servicios, favor enviarlo a nuestro correo electrónico, lgingeneriadepavimentos@gmail.com.

Nota7: Si desea formular una queja o reclamo, comunicarse con gestor de calidad o al correo gestordecalidad@lgingeneria.net

Nota8: Si desea conocer el alcance del laboratorio puede visitar el sitio web del ECA www.eca.or.cr

Nota9: El símbolo de acreditación se utiliza en este registro únicamente si se incluyen resultados de ensayos dentro del alcance de acreditación de nuestro laboratorio.

C/c Archivo

-----Salto de página-----

	LGC INGENIERÍA DE PAVIMENTOS S.A. INFORME DE ENSAYO	RC-36 V.27
		Aprobado: 2021-09-16
		Página: 4 de 4
		Nº Informe 13-R004-2022

Anexo N°1

Subrasante mejorada con aditivos

Material: Suelo, Subrasante
Fuente: Ruta Nacional N°1, Sección Barranca – Limonal, Est. 114+000 LI
Fecha: 2022-02-11

Tabla N°1
Método de ensayo para la resistencia a la compresión de especímenes Suelo-Cemento

Muestra	Fecha de moldeo	Fecha de falla	Edad (días)	Diámetro promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga (kg)	Resistencia a la compresión		Observaciones
							(kg/cm ²)	(MPa)	
13-4301-2022	2022-03-25	2022-04-01	7	101,48	8087,38	908,00	11,23	1,10	Suelo combinado con 4,77% de cemento hidráulico
13-4302-2022	2022-03-25	2022-04-01	7	101,33	8064,29	932,00	11,56	1,13	
13-4303-2022	2022-03-25	2022-04-01	7	101,68	8119,29	895,00	11,02	1,08	
13-4304-2022	2022-03-25	2022-04-02	8	101,29	8057,13	203,00	2,52	0,25	Suelo combinado con 4,23% de cal
13-4305-2022	2022-03-25	2022-04-02	8	101,26	8052,35	219,00	2,72	0,27	
13-4306-2022	2022-03-25	2022-04-02	8	101,34	8065,08	197,00	2,44	0,24	
13-4307-2022	2022-03-25	2022-04-01	7	101,23	8047,58	726,00	9,02	0,88	Suelo combinado con 6,00% de emulsión asfáltica
13-4308-2022	2022-03-25	2022-04-01	7	101,36	8068,27	741,00	9,18	0,90	
13-4309-2022	2022-03-25	2022-04-01	7	101,46	8084,20	712,00	8,81	0,86	

-----Última línea-----

8.3 Anexo: Ficha técnica Cemento hidráulico CEMEX UG

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

COMPONENTES QUÍMICOS

	RTCR 479:2015 Tipo MM/B(P-C)-28	ASTM C1157 Cemento UG
Óxido de magnesio (MgO), % ASTM C114	6,0% máx	no indica
Trióxido de azufre (SO ₃), % ASTM C114	4,0% máx	no indica
Cromo Hexavalente (Cr VI), % INTE 06-11-24	0.0002% máx	no indica

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

COMPONENTES QUÍMICOS

	RTCR 479:2015 Tipo MM/B(P-C)-28	ASTM C1157 Cemento UG
Expansión en autoclave, % ASTM C151	0.80% máx	0.80% máx
Tiempo de fraguado inicial, min, ASTM C191	45 mín	45 mín
Tiempo de fraguado final, min, ASTM C191	420 máx	420 máx
Fraguado falso, % ASTM C451	50 mín	50 mín
Contenido de aire, % ASTM C185	12 máx	12 máx
Expansión en barras de mortero a 14 días, %, ASTM C1038	0.020 máx	0.020 máx
Resistencia a la compresión MPa, ASTM C109	≥13 MPa a 3 días ≥20 MPa a 7 días ≥28 MPa a 27 días	≥13 MPa a 3 días ≥20 MPa a 7 días ≥28 MPa a 27 días

www.cemexcostarica.com

CENTRO DE SERVICIO (506) 2201-2020

COMPONENTES

✓ CLINKER ✓ YESO ✓ PUZOLANA ✓ CALIZA

CERTIFICACIONES Y ACREDITACIONES

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD ACREDITADO POR ECA
Ente Costarricense de Acreditación

NORMA ISO 17025: Laboratorio de Control de Calidad

Proceso productivo certificado bajo el
SISTEMA INTEGRADO DE CALIDAD Y AMBIENTE

INTE/ISO 9001: 2008 - Sistemas de Gestión de Calidad

INTE/ISO 14001: 2004 - Sistemas de Gestión Ambiental

Producto certificado por el Instituto de
NORMAS TÉCNICAS DE COSTA RICA (INTECO)

Garantía de cumplimiento del
REGLAMENTO TÉCNICO DE CEMENTO RTCR 479:2015

USOS Y APLICACIONES

Especial para morteros y concretos de uso general. Ideal para estructuras que no requieren de alta resistencia inicial. Cemento especialmente diseñado para soportar las condiciones ambientales de Costa Rica. Sus componentes permiten que sea un producto de alta durabilidad, especialmente en zonas costeras y volcánicas. Bajo riesgo de fisuras y contracciones

RECOMENDACIONES DE USO

- Controle el agua de mezclado.
- El exceso reduce la resistencia a la compresión
- Verifique y controle las proporciones de los materiales en el diseño de mezcla del concreto.
- El curado con agua es fundamental para reponer el agua perdida por evaporación, principalmente durante los primeros 5 días.

CEMENTO HIDRÁULICO USO GENERAL

Tipo MM/B (P-C)-28, según RTCR 479:2015



Producto certificado por el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO); asegurando el cumplimiento del Reglamento Nacional de Cementos Hidráulicos RTCR 479:2015, como cemento Tipo MM/B(P-C)-28

Producido en nuestras Plantas de Cemento ubicadas en Colorado de Abangares y Guatuso de Patarrá. Procesos bajo el sistema de gestión integrado de Calidad y Ambiente:

- INTE/ISO 9001: 2008 - Sistemas de Gestión de Calidad
- INTE-ISO 14001:2004 - Sistema de Gestión Ambiental

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Cemento de uso general, ideal para estructuras que no demanden alta resistencia inicial. Cumple con el Reglamento Nacional como cemento Modificado Mixto, Tipo MM/B (P-C)-28. Adicionalmente cumple con la norma ASTM C1157, como cemento Tipo UG.

El cemento de Uso General tiene la propiedad de producir mezclas de excelente trabajabilidad, plasticidad y cohesividad, lo que evita la segregación y ayuda a minimizar el sangrado, facilitando el manejo y colocación.

SUMINISTRO

El cemento se suministra en granel o en sacos de 50 kg.

MANEJO DE CEMENTO A GRANEL

No utilice la unidad para transportar otros productos diferentes al cemento o, en su caso, elimine los residuos del material extraño antes de la carga del cemento

Antes de la carga asegúrese de que el interior de la tolva se encuentra limpia y seca. Después de la carga asegúrese de que los tapas de la tolva cierren herméticamente, mantenga el interior limpio y libre de adherencias. Incluya la limpieza del interior de la tolva y su hermeticidad en los programas de mantenimiento de la unidad.

MANEJO DE CEMENTO EN SACOS

Almacene los sacos en un lugar cerrado, limpio y libre de humedad. Almacénelos de tal forma que los primeros sacos que entran sean los primeros que salgan del almacén. Evite colocarlos en superficies dispares que puedan romperlos. Maneje con cuidado los sacos, transpórtelos y protéjalos de objetos que puedan causar su rotura (varillas, clavos, puntas de maderas, etc.). No los coloque directamente sobre el piso, utilice una tarima para separarlos al menos 10 cm del suelo y paredes. Evite que los sacos se mojen. No almacenar a la intemperie. Si el almacenamiento excede los 15 días, cubrir con lona impermeable.

PRECAUCIONES

Puede provocar irritaciones o quemaduras en la piel u ojos, utilice el equipo de protección personal adecuado.

En caso de contacto o ingestión, acuda inmediatamente al centro de salud más cercano o llame al 911.



Construyendo un mejor futuro para Costa Rica

8.4 Anexo: Certificado de emulsión asfáltica rompimiento lento



Informe N° 816A22

Rige a partir de
2022-01-10
Versión 2

INFORME DE ENSAYOS PT-09-06-038

Tipo de producto: Emulsión Asfáltica Lenta (CSS-1H)	Cliente: Producto Negro	Fecha de muestreo: 2022/03/15
Tanque N°: 173	Teléfono: 2284-2700	Fecha de recepción: 2022/03/15
Terminal: El Alto	Lote N°: 114-20220223-CSS1H	Volumen, m ³ : 35.00

Ensayo	Descripción	Resultado	Especificación	Analista	Fecha
*ASTM D-7496	Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C, SSF	22.0 ± 4.8	20.0 - 100.0	MARCELA-SS	2022/03/15
**ASTM D-6937	Densidad a 25 °C, kg/m ³	997.3 ± 0.3	Reportar	MARCELA-SS	2022/03/15
**ASTM D-6997	Residuo por destilación, fracción masa, % en masa	60.6 ± 1.2	Mínimo 57.0	MARCELA-SS	2022/03/15
	Fracción volumen aceite destilado, % volumen masa	1.0	Reportar	MARCELA-SS	2022/03/15
*ASTM D-5	Penetración residuo (25 °C, 100 g, 5 s), 1/10mm	50.0 ± 7.1	40.0 - 90.0	MARCELA-SS	2022/03/15
**ASTM D-6933	Fracción masa retenida en malla N°20, % en masa	0.01 ± 0.08	Máximo 0.10	MARCELA-SS	2022/03/15
**ASTM D-6930	Estabilidad 24h, fracción de asfalto, % en masa	1.0 ± 0.6	Máximo 1.0	MARCELA-SS	2022/03/16

Última línea

Muestreo realizado de acuerdo a **ASTM D-4057. Muestreado por: GUSTAVO-MF
REGULACIÓN: Los resultados de los análisis ejecutados CUMPLEN con la indicado en el Decreto Ejecutivo N°82812-COMEX-MINAEMRIC. Reglamento Técnico Centroamericano, RTCA 75.01.22.04. Especificaciones técnicas para Asfaltos y Emulsiones Asfálticas
OBSERVACIONES:

Acreditación de acuerdo a la Norma INTE-ISO/IEC 17025-2017, ver alcance de acreditación en www.eca.or.cr.

* Ensayo Acreditado. **Ensayo No acreditado. Todas las referencias ASTM marcadas con un asterisco (*) están asociadas al ensayo acreditado.



Químico(a):

José Francisco Morales Rivera (N.I. 2510)

2022/03/16

Nombre

Fecha de aprobación

JOSE FRANCISCO MORALES RIVERA (FIRMA) 19:06:33 -06'00'

Firmado digitalmente por JOSE FRANCISCO MORALES RIVERA (FIRMA) Fecha: 2022.03.16 19:06:33 -06'00'

Firma

Los resultados de los análisis no podrán ser reproducidos parcialmente sin previa autorización del laboratorio.

Los resultados informados en este documento solamente se relacionan con la muestra recolectada. El laboratorio no se hace responsable por la información suministrada por el cliente, relacionado a la muestra.

Se informa la incertidumbre expandida, con un factor de cobertura k=2, para un 95 % de confianza.

Ensayos realizados por el Laboratorio El Alto, ubicado en Kilómetro 12 km, Ruta 2, Ochoмого, San Nicolás, Cartago.

Apartado: 4351-1000

Tel: +(506) 2284-2700

e-mail: servicioalcliente@recope.go.cr

Referencia LDBS:
816A22
128-038