

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA CALCULAR EL MÓDULO
RESILIENTE EN MATERIALES GRANULARES ESTABILIZADOS CON
CEMENTO

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de
Posgrado en Ingeniería Civil para optar al grado y título de Maestría Académica en
Ingeniería del Transporte y Vías

ANDREA ULLOA CALDERÓN

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2021

Dedicatoria

A mi hija Isabella.

Por todo el tiempo de espera para retomar los juegos con ella.

A mis padres y esposo por la paciencia y apoyo.

Agradecimientos

A los técnicos a mi cargo: Walter Ramírez, Jose Sanabria y Juan Carlos Múnera, quienes estuvieron siempre colaborándome en algunos de los procesos de los ensayos que requerí realizar durante varios meses y por capacitarme en el paso a paso para el uso de los equipos y preparación de los materiales. Y porque siempre he recibido su apoyo.

A Francisco Fonseca de la Unidad de Auditoría Técnica quien se ha estado a cargo de auditar los avances en el proyecto de la ampliación de la ruta 32, por su colaboración en el muestreo del material que se requería para llevar a cabo las pruebas de laboratorio y colaborarme con algunos de los datos básicos del material de estudio.

A Francisco Villalobos y su técnico a cargo Denis Madrigal, por su colaboración en la implementación del ensayo de módulo elástico en bases estabilizadas con cemento.

A mis profesores asesores por su tiempo y colaboración al atender mis consultas durante todo el proceso.

Al LanammeUCR por brindarme la oportunidad de llevar a cabo todo el esquema experimental durante el año que tardó la realización de los ensayos, la colaboración del personal técnico y profesional que aportaron para que los mismos fueran realizados con calidad y aportaran resultados confiables.

“Esta Tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado de Maestría Académica en Ingeniería del Transporte y Vías.”

PhD. Jonathan Agüero Valverde
Representante del Decano
Sistema de Estudios de Posgrado

M.Sc. Wendy Sequeira Rojas
Directora de tesis

PhD. José Pablo Aguiar Moya
Asesor

M.Sc. Alonso Ulate Castillo
Asesor

PhD. Guillermo González Beltrán
Director
Programa de Posgrado de Ingeniería Civil

Andrea Ulloa Calderón
Candidata

Índice

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Hoja de aprobación.....	iv
Índice.....	v
Resumen	viii
Lista de Cuadros.....	ix
Lista de Figuras.....	xi
1. Introducción.....	1
1.1 Justificación	2
1.1.1 Problema específico	2
1.1.2 Importancia del estudio.....	3
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo General.....	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
1.3 Delimitación del problema.....	4
1.3.1 Hipótesis.....	4
1.3.2 Alcances.....	5
1.3.3 Limitaciones.....	6
1.4 Descripción de la metodología utilizada	6
1.4.1 Etapa 1: Investigación bibliográfica.....	8
1.4.2 Etapa 2: Muestreo y caracterización del material granular.....	8
1.4.3 Etapa 3: Ensayos de laboratorio al material estabilizado con cemento.....	9
1.4.4 Etapa 4: Estudio de variables para la estimación del modelo matemático	9
1.4.5 Etapa 5: Análisis de resultados y conclusiones.....	10
2. Marco teórico.....	11
2.1 Pavimentos semi-rígidos.....	11
2.2 Bases estabilizadas con cemento (BEC)	11
2.3 Módulo resiliente en materiales granulares y suelos.....	12
2.3.1 Onda de carga tipo haversiana.....	15
2.3.2 Máxima carga axial aplicada (P_{max}).....	15

2.3.3	Carga de contacto (P_{contacto})	15
2.3.4	Carga axial cíclica ($P_{\text{cíclica}}$).....	16
2.3.5	Máximo esfuerzo axial aplicado (S_{max})	16
2.3.6	Esfuerzo axial cíclico ($S_{\text{cíclico}}$)	16
2.3.7	Esfuerzo de contacto (S_{contacto}).....	16
2.3.8	Presión de confinamiento (S_3)	16
2.3.9	Deformación axial recuperable (resiliente) (e_r).....	17
2.3.10	Deformación axial recuperable (resiliente) unitaria (ϵ_r).....	17
2.3.11	El módulo resiliente M_r	17
2.3.12	Duración del pulso de carga	17
2.3.13	Período de reposo	17
2.4	Ensayos de laboratorio en bases estabilizadas.....	18
2.4.1	Resistencia a compresión inconfiada en suelo-cemento (UCS).....	18
2.4.2	Módulo de elasticidad (M_E)	20
2.4.3	Módulo resiliente en BEC	23
2.4.4	Protocolo de ensayo para módulo resiliente en BEC	24
2.4.5	Fatiga en bases estabilizadas con cemento.....	28
2.4.6	Módulo de ruptura M_{rup}	29
3.	Caracterización y preparación del material de estudio	30
3.1	Ubicación del lugar de muestreo.....	30
3.2	Ensayos de caracterización básica y datos relevantes del material granular	31
3.3	Descripción del cemento utilizado en el proyecto.....	35
3.4	Preparación de especímenes y condiciones de ensayo.....	36
3.4.1	Conformación de la muestra.....	36
3.4.2	Compactación en laboratorio	36
3.4.3	Periodo de curado	41
4.	Resultados de ensayos de laboratorio	42
4.1	Diseño de base estabilizada con cemento.....	42
4.2	Resistencia a la compresión inconfiada (UCS)	43
4.3	Módulo de elasticidad (M_E) en la base estabilizada.....	45
4.4	Módulo resiliente (M_r) en la base estabilizada (BEC)	48

4.4.1	Secuencia de esfuerzos proyectados	48
4.4.2	Resultados obtenidos en la medición del módulo resiliente de la BEC	49
5.	Modelación matemática para módulo resiliente en BEC	54
5.1	Sustentación estadística para el desarrollo del modelo.....	54
5.2	Modelo predictor del módulo resiliente MR en BEC	55
5.2.1	Modelos resultantes del análisis	57
5.2.2	Modelo de predicción propuesto	57
6.	Casos de aplicación.....	63
6.1	Diseño estructural de referencia	63
6.1.1	Caso de aplicación 1. Pavimento semi-rígido	63
6.1.2	Caso de aplicación 2. Camino de bajo volumen de tránsito	67
7.	Conclusiones y recomendaciones.....	72
7.1	Resultados y hallazgos relevantes.....	72
7.2	Recomendaciones	73
8.	Referencias bibliográficas.....	75
9.	Apéndices.....	80
A.1	Resultados de la UCS de la base estabilizada con cemento.....	80
A.2	Resultados del módulo de elasticidad M_E de la base estabilizada con cemento	81
A.3	Resultados del módulo de elasticidad M_r de la base estabilizada con cemento.	83
A.4	Resultados de las respuestas mecánicas de las estructuras para los casos de aplicación	111
10.	Anexos.....	113

Resumen

En climas con altos niveles de precipitación los pavimentos suelen tener menor durabilidad debido a que el exceso de agua tiende a reducir la capacidad de soporte ante las cargas del tránsito. La falta de drenajes adecuados agrava aún más la situación, por lo que la vida útil de la estructura se ve gravemente afectada, y reflejo de ello es la aparición de deterioros prematuros.

Es por esto, que el uso de estabilización de materiales que permitan minimizar el efecto negativo de la humedad dentro de la estructura del pavimento es de uso extendido por todo el mundo, y en Costa Rica no es la excepción. El costo beneficio es muy rentable, más aún cuando se dispone de pocos recursos, como lo es en la mayoría de los proyectos del país.

El cemento por muchos años ha sido el agente más empleado en la estabilización, sin embargo, el módulo resiliente del material cementante combinado con el agregado para capas de base en el pavimento suele únicamente estimarse, asumiendo valores que podrían ser imprecisos y alejados de los que realmente se requieren.

Por esta razón se pretende desarrollar un modelo matemático que facilite la obtención del módulo resiliente en materiales granulares estabilizados con cemento, donde la dosificación del agente sea la óptima para obtener un mejor desempeño como capa de base dentro del pavimento, ante las cargas del tránsito proyectadas y la acción del clima.

El material de estudio cuenta con la caracterización física básica y es típico para su utilización como capa de base en pavimentos flexibles o semi-rígidos. En la investigación se incluyó la propuesta de un protocolo para la implementación del ensayo en laboratorio de módulo resiliente en bases estabilizadas con cemento. Por lo que el material granular muestreado funcionó adecuadamente para este objetivo.

El resultado más destacado de la investigación es la comprobación sobre la influencia que tiene la aplicación de los esfuerzos sobre la respuesta mecánica de las BEC (Bases Estabilizadas con Cemento). Adicionalmente se varió el contenido de cemento entre 2 % y 5 %, la humedad de compactación entre 4,1 % y 7,6 % y el periodo de curado entre 7 días y 28 días, para lo cual el módulo resiliente resultó entre 815 MPa y 2091 MPa.

Por último, se pudo afirmar que la hipótesis planteada inicialmente se acepta. Lo que ofrecerá reducir el contenido de cemento, menores espesores en el diseño de espesores de la estructura y adecuados resultados de desempeño del pavimento a largo plazo. Esto implica una mejora en la calidad de vida de las personas y en la economía del país.

Palabras clave: Bases estabilizadas con cemento, módulo resiliente, módulo elástico, compresión inconfiada, pavimento semi-rígido.

Lista de Cuadros

Cuadro 1. Duración de pulsos de carga y periodo de reposo para materiales granulares	17
Cuadro 2. Secuencia de ensayo para materiales de base o subbase, materiales Tipo 1 (AASHTO, 2017)	18
Cuadro 3. Parámetros de diseño de las mezclas de agregados y cemento	20
Cuadro 4. Secuencia de ensayo propuesta para materiales de base estabilizada con cemento	25
Cuadro 6. Propiedades de las bases estabilizadas con cemento (PCA, 2006)	29
Cuadro 7. Graduación del material granular utilizado en el estudio ⁽¹⁾	32
Cuadro 8. Resultados del contenido de humedad y densidad máxima seca ⁽¹⁾	33
Cuadro 9. Resumen de características del agregado para ser usado en la preparación de la base estabilizada con cemento	34
Cuadro 10. Resumen de propiedades del cemento tipo UG utilizado en el estudio ⁽¹⁾	35
Cuadro 11. Resumen de métodos de compactación para los diferentes ensayos de la base estabilizada con cemento	37
Cuadro 12. Resultados del contenido de humedad y densidad máxima seca para 2 % de cemento	39
Cuadro 13. Resultados del contenido de humedad y densidad máxima seca para 3 % de cemento	39
Cuadro 14. Resultados del contenido de humedad y densidad máxima seca para 5 % de cemento	40
Cuadro 15. Resumen del contenido de humedad y densidad máxima seca para los tres diferentes contenidos de cemento	41
Cuadro 16. Resultados de resistencia a la compresión inconfiada para tres contenidos de cemento diferentes, 7 días de curado	42
Cuadro 17. Resistencia a la compresión inconfiada de la BEC para dos tiempos de curado (MPa)	44
Cuadro 18. Módulo de elasticidad de la BEC para dos tiempos de curado (MPa)	45
Cuadro 19. Módulo resiliente (MPa) de la BEC para $\sigma_d = 207$ kPa y dos tiempos de curado	49
Cuadro 20. Módulo resiliente (MPa) de la BEC para $\sigma_d = 335$ kPa y dos tiempos de curado	49
Cuadro 21. Módulo resiliente (MPa) de la BEC para $\sigma_d = 483$ kPa y dos tiempos de curado	50

Cuadro 23. Coeficientes de correlación Pearson entre variables	56
Cuadro 24. Resultado del análisis de multicolinealidad.....	59
Cuadro 25. Información del diseño para el caso de aplicación 1	64
Cuadro 27. Resumen de datos para el cálculo del del M_r estimado. Caso 1	66
Cuadro 28. Información del diseño para el caso de aplicación 2.....	68
Cuadro 29. Espesores, módulos y coeficientes estructurales por capa. Caso 2.....	68
Cuadro 30. Graduación del material granular del tramo 1 en la Isla de Chira ⁽¹⁾	69
Cuadro 31. Resumen de datos para el cálculo del del M_r estimado. Caso 2	70
Cuadro A.1. Resultados de la compresión inconfiada para ambos periodos de curado	80
Cuadro A.2. Resultados del cálculo del módulo de elasticidad para ambos periodos de curado.....	81
Cuadro A.3. Resultados del módulo resiliente para 7 días de curado	83
Cuadro A.4. Resultados del módulo resiliente para 28 días de curado	97

Lista de Figuras

Figura 1. Etapas de la metodología seguida	7
Figura 2. Esquema experimental para las condiciones y dosificaciones de cemento y humedad en la estimación del módulo resiliente en función de ensayos de laboratorio ...	10
Figura 3. Estabilización de capa de base con cemento (Wegman, Sabouri, Korzilius, & Kuehl, 2017)	12
Figura 4. Definición de un ciclo del módulo resiliente MR. (AASHTO, 2004)	13
Figura 5. Cámara triaxial típica con LVDT externos y celda de carga (AASHTO, 2017) ...	13
Figura 6. Definición de términos de módulo resiliente (AASHTO, 2017).....	15
Figura 7. Falla de especímenes a la resistencia a la compresión inconfiada.....	19
Figura 8. Máquina universal para la aplicación de cargas hasta la falla en cilindros de base estabilizada, tomada por la autora	21
Figura 9. Medición de las deformaciones a compresión para un espécimen de BEC (Lim & Zollinger, 2003).....	21
Figura 10. Curva esfuerzo-deformación para diferentes edades de curado en base estabilizada con cemento (Lim & Zollinger, 2003).....	22
Figura 11. Curva esfuerzo-deformación para una base estabilizada con cemento, a 7 días de curado en cámara húmeda	23
Figura 12. Resultados típicos de la prueba de aplicación de carga cíclica (Hanifa, Abu-Farsakh, & Gaut, 2015).....	26
Figura 13. Efectos de (a) contenido de cemento (b), y (c) relación de esfuerzos, sobre el módulo resiliente (Rashidi, Reza, Si, Izzo, & McDaniel, 2018)	27
Figura 14. Ubicación del Quebrador km 49, administrado por la empresa CHEC (CONAVI, 2019)	30
Figura 15. Apilamientos de agregado grueso y fino en el quebrador muestreado	31
Figura 16. Muestreo de material granular utilizado para preparar la BEC de estudio	31
Figura 17. Tamizado y almacenamiento del material granular	32
Figura 18. Curva granulométrica del material granular combinado 60 % fino - 40 % grueso	33
Figura 19. Gráfica de la relación densidad - humedad del material granular mediante método Próctor modificado, aportado por el Laboratorio de Geotecnia, LanammeUCR...	33
Figura 20. Combinación del material y homogenización	35
Figura 21. Almacenamiento del material tamizado y dividido en fracciones	36

Figura 22. Dosificación de cemento y agua para la determinación de la humedad-densidad mediante compactación vibratoria.....	37
Figura 23. Compactación de especímenes de ensayo a) Compactación para la humedad-densidad (Vibratorio) b) Compactación del diseño de BEC (PM) c) Compactación de módulo elástico (Vibratorio) d) Compactación de módulo resiliente (Vibratorio)	38
Figura 24. Gráfica de la relación densidad - humedad del material estabilizado con 2 % de cemento mediante compactación vibratoria	39
Figura 25. Gráfica de la relación densidad - humedad del material granular con 3 % de cemento mediante compactación vibratoria	40
Figura 26. Gráfica de la relación densidad - humedad del material granular con 5 % de cemento mediante compactación vibratoria	40
Figura 27. Curado de especímenes antes de cada ensayo de resistencia: 7 días y 28 días	41
Figura 28. Gráfica del porcentaje de cemento óptimo del diseño de base estabilizada ...	43
Figura 29. Proceso de ensayo de resistencia a la compresión inconfina da de la BEC	44
Figura 30. Desnudamiento en la base estabilizada debido a un rocío de los aspersores no uniforme sobre los especímenes en la cámara húmeda	45
Figura 31. Ensayo de módulo de elasticidad de la BEC para ambos periodos de curado	46
Figura 32. Complicaciones en la compactación de los especímenes con bajo contenido de humedad.....	46
Figura 33. Gráficas del módulo elástico para diferentes porcentajes de cemento, a 7 días de curado: (a) 2 % C y W_{opt} , (b) 3 % C y W_{opt} , y (c) 5 % C y W_{opt}	47
Figura 34. Tendencia de la relación entre el invariante de esfuerzos (θ) y los esfuerzos de confinamiento (σ_3).....	48
Figura 35. Preparación de especímenes utilizando membrana de acetato y medición de especímenes de módulo resiliente en bases estabilizadas con cemento posterior al curado	50
Figura 36. Ensayo de módulo resiliente en la BEC para ambos periodos de curado.....	51
Figura 37. Revisión y limpieza de caras planas de especímenes y control del RV durante el ensayo	52
Figura 38. Gráfica comparativa entre los resultados de módulo resiliente para diferentes materiales estabilizados.....	53
Figura 39. Esquema general para el análisis estadístico (Múnera, 2019).....	54
Figura 40. Relaciones entre variables explicativas para MR, (STATA 16.1).....	57
Figura 41. Resultados de la bondad de ajuste de la regresión lineal múltiple para el modelo lin-lin	58

Figura 42. Resultados de la prueba de homocedasticidad en STATA.....	59
Figura 43. Resultados de la RLM al aplicar la corrección por White.....	60
Figura 44. Resultados de la prueba de normalidad de los residuales.....	60
Figura 45. Gráfica de distribución de los errores con tendencia normal o campana de Gauss en STATA.....	61
Figura 46. Gráfica de módulo resiliente medido vs el estimado para bases estabilizadas con cemento.....	62
Figura 47. Estructura de pavimento de la ruta 32.....	63
Figura 48. Gráfica de relación entre el M_r estimado de la BEC y el θ medido.....	65
Figura 49. Estructura de pavimento de camino de bajo volumen en la Isla de Chira.....	67
Figura A 1. Esfuerzos, deformaciones y deflexiones resultantes del caso de aplicación 1.	111
Figura A 2. Esfuerzos, deformaciones y deflexiones resultantes del caso de aplicación 2.	112



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Andrea Ulloa Calderón, con cédula de identidad 1-1048-0065, en mi condición de autor del TFG titulado Desarrollo de un modelo matemático para calcular el módulo resiliente en materiales granulares estabilizados con cemento.

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

1. Introducción

A través de hallazgos detectados en las auditorías técnicas realizadas por el LanammeUCR, en muchos de los proyectos las resistencias a la compresión confinada de muestras de base estabilizada con cemento superan los 40 kg/cm², donde aproximadamente un 89% de los proyectos evaluados hasta el 2012 (Ávila, 2012), superaban la resistencia promedio, lo cual implica problemas como agrietamientos transversales, huecos y desprendimientos de material entre otros en dicha capa. Esta tendencia se ha mantenido en años recientes, donde se continúa evidenciando problemas asociados a la excesiva rigidez de las bases estabilizadas.

A pesar de que en Costa Rica aproximadamente un 88,5 % de las carreteras de la red vial en pavimento flexible se encuentran estructuralmente en una condición buena, según lo indica el último informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada (PITRA, 2019). Por otra parte, un 33% de los 7821 km de red vial nacional total no fue evaluado debido a que son caminos que mantienen su capa de rodadura sin asfaltar, en algunos casos las capas de base estabilizadas o mejoradas con cemento permanecen expuestas, ya sea porque aún se encuentran en etapas constructivas o por otras razones, y que en ciertas ocasiones manifiestan problemas relacionados con la reducción de módulos, debido a agrietamiento producto de una alta rigidez durante su construcción.

En muchas de las zonas rurales se considera necesario que una ruta en condiciones malas, pase de un estado de camino no pavimentado (grava/tierra) a una ruta pavimentada, donde se coloca una mezcla asfáltica sobre una base estabilizada, y cuya inversión ronda entre los \$600 mil a casi los \$2 millones de dólares por kilómetro (Garro, 2018). Sin embargo, se ha demostrado que algunos de los problemas presentes durante la construcción de la base se deben a la falta de diseños apropiados para este tipo de materiales, lo que termina causando deterioros prematuros en la capa asfáltica colocada encima.

Las bases estabilizadas con cemento forman parte de las estructuras del pavimento que son típicamente utilizadas en Costa Rica, dado que presentan mayor durabilidad y resistencia ante las cargas en comparación con una base granular convencional. Asimismo, este tipo de materiales permite incrementar la resistencia al daño por humedad. Por otro lado, en ocasiones las bases granulares no cumplen con los requerimientos mínimos solicitados por la normativa vigente para esta capa (como granulometría, plasticidad o capacidad de soporte), con lo cual la estabilización con cemento proporciona una solución adecuada en la mayoría de los casos.

En un pavimento las bases granulares y estabilizadas han sido usadas en miles de kilómetros de carreteras de importancia estratégica, al igual que en calles de menor importancia, caminos de bajo volumen de tránsito y áreas de parqueo (Leiva, Arce, & Castro, 2005).

En un diseño de estructura de pavimento nueva o rehabilitada donde las materiales in situ no brindan las características esperadas, tales como resistencia o se prevé poca

durabilidad, es muy común que se utilicen materiales granulares o suelos estabilizados con cemento para solventar este tipo de inconvenientes. Sin embargo, existe poca información sobre las verdaderas propiedades mecánicas de este tipo de materiales. Cuando se diseña se emplean correlaciones para estimar el módulo resiliente a partir de la resistencia a la compresión a los 7 días, que pueden variar dependiendo de los propios materiales, contenidos de cemento dosificado y el tiempo de curado, entre otros.

1.1 Justificación

1.1.1 Problema específico

Si bien es conocido que la adición de cemento en una base incrementa la durabilidad del material y la resistencia a las cargas de tránsito, una inadecuada adición de cemento puede presentar desventajas por "agrietamiento", debido a que en ocasiones la falta de hidratación del cemento y su posterior contracción durante el proceso de curado del material, podrían ocasionar el reflejo de grietas en la capa de rodadura (Flores, 2011). Generalmente se asume que el módulo resiliente del material estabilizado es constante en el tiempo, aunque puede presentarse un proceso de microagrietamiento que también podría llegar a influenciar sobre el desempeño de la capa durante su vida útil.

El módulo resiliente en materiales granules y suelos finos es posible determinarlo mediante la prueba estándar AASHTO T 307. Sin embargo, aún no existe ninguna metodología que permita obtener la respuesta de deformación ante los esfuerzos aplicados de forma dinámica (cíclica) para materiales estabilizados con cemento. Para el diseño estructural del pavimento se presentan modelos de predicción de falla por fatiga que aún muestran gran dispersión en los resultados. Por tanto, conviene calibrar un modelo propio que tome en consideración las características de los materiales y las condiciones propias del país (Arce M. , 2011).

El desconocer el módulo resiliente en bases estabilizadas genera una incertidumbre acerca de la respuesta mecánica dentro de la estructura, debido a que algunos comportamientos importantes como el agrietamiento excesivo por contracción, el reflejo de grietas en la superficie de ruedo, la pérdida de capacidad de soporte, deflexiones, asentamientos por erosión y otros que son difíciles de predecir a través de los modelos existentes para materiales sin estabilizar, por tanto, no para aquellos que son estabilizados no pueden ser detectados o predichos con los ensayos básicos que habitualmente se realizan. Existe además una limitante en las referencias literarias sobre resistencia y rigidez en los materiales granulares que, de menor calidad, requieren ser estabilizados con cemento o cal, en términos de módulo de ruptura, módulo resiliente y módulo a la flexión (Biswal, Sahoo, & Dash, 2018).

De esta manera, la presente propuesta muestra algunos de los antecedentes teóricos en el tema, así como una serie de actividades para investigar el comportamiento y uso de este material como capa de base en un pavimento.

1.1.2 Importancia del estudio

En las últimas décadas, la tecnología de estabilización con cemento se ha utilizado con éxito como un medio económico para la construcción de nuevas carreteras y la rehabilitación de los pavimentos existentes (Rashidi, Reza, Si, Izzo, & McDaniel, 2018). El cemento como agente estabilizador es uno de los más empleados, porque al combinarse con materiales granulares o suelos, permite mejorar la capacidad soportante ante las cargas y brinda mayor durabilidad en las capas de los pavimentos.

Los materiales estabilizados con cemento se caracterizan a partir de su resistencia a la compresión confinada a los 7 días. Este ensayo se realiza bajo una carga estática, que no representa fielmente el comportamiento de las cargas de tránsito, siendo estas por el contrario de tipo cíclico. Además, en una estructura de pavimento el material estabilizado se encuentra confinado.

Lo anterior demuestra que el módulo resiliente permite una modelación más cercana al comportamiento real, tanto de las cargas vehiculares, como el confinamiento al que se ve sometido el material estabilizado con cemento en una estructura de pavimento.

Otras propiedades como la resistencia a tensión, deformación permanente o el módulo resiliente no son frecuentemente medidas, a pesar de ser parámetros fundamentales que influyen directamente en el desempeño mecánico de este material. En algunos estudios se ha observado que las variables que más influyen en el comportamiento inicial de esas propiedades son el contenido de cemento, contenido de humedad, tiempo de curado y densidad máxima seca (Ismail, y otros, 2014).

Las bases estabilizadas con cemento ofrecen soluciones costo-efectivas en muchos de los casos de diseño o de rehabilitación, en los que se requiere reducir espesores o que las capas se encuentran sometidas a contenidos de humedad, donde un material granular o suelo no estabilizado reduce significativamente su capacidad de soporte. Aunque es importante entender también, que el uso del cemento incrementa los tiempos globales en la construcción de un proyecto, y que su alta rigidez puede ocasionar fisuras, que al final se ven reflejadas en la capa de rodadura colocada sobre ésta.

Por lo anterior, en esta investigación se pretende estudiar las propiedades resilientes de materiales estabilizados con cemento, a partir de la obtención de datos que permitan interpretar el comportamiento mecánico del material y de este modo determinar las variables que más influyen y contribuyen en el desarrollo de modelos mecánicos para predecir mejor el desempeño de bases estabilizadas en un pavimento. Esto ayudará a establecer mejores modelos de diseño, especificaciones técnicas y procesos de control de calidad en proyectos de construcción donde involucre este tipo de materiales.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Determinar un modelo matemático que permita obtener el módulo resiliente en materiales granulares estabilizados con cemento, a partir de la aplicación de esfuerzos de confinamiento estáticos y cargas cíclicas axiales establecidas inicialmente por métodos estándar existentes.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Investigar las propiedades físico-mecánicas de las bases estabilizadas con cemento establecidas en la bibliografía, normativas, especificaciones y procedimientos de ensayo vigentes, para la medición de las variables que influyen sobre el módulo resiliente.
- Determinar el contenido óptimo de cemento para una fuente de material granular típica en capas de base, con el fin de variar la dosificación del cemento y humedad de compactación respecto a este valor óptimo.
- Proponer un protocolo de ensayo para la medición del módulo resiliente en materiales granulares estabilizados con cemento, a diferentes contenidos de humedad y variando los contenidos de cemento, para establecer una relación con los resultados de módulo de elasticidad y compresión inconfinaada obtenidos en las mismas condiciones.
- Evaluar la respuesta en materiales estabilizados con cemento ante la aplicación de diferentes esfuerzos de confinamiento y cíclicos, para la medición de la influencia de estos sobre los resultados del módulo resiliente.
- Definir las variables explicativas del modelo estimador del módulo resiliente en bases estabilizadas con cemento, a través del análisis de los datos provenientes de los ensayos de laboratorio.
- Definir un modelo matemático que permita su uso en el diseño estructural de pavimentos y el análisis mecánico del material estabilizado como capa de base en pavimentos semi-rígidos, al variar los contenidos de cemento, contenido de humedad y edad del curado.
- Determinar las respuestas de transferencia mecanicista mediante la teoría de multicapa elástica en dos estructuras de pavimento típicas, utilizando el modelo estadístico propuesto para la estimación del módulo resiliente de la capa de base estabilizada con cemento de cada caso escenario.

1.3 Delimitación del problema

1.3.1 Hipótesis

En el diseño de capas de base estabilizada con cemento se requiere conocer el contenido de cemento y su respectivo contenido de humedad de compactación, de manera que éstas ofrezcan la respuesta mecánica más alta y al menor costo, sin embargo, actualmente estos materiales, se caracterizan con un módulo resiliente generalmente estimado por medio de

correlaciones a partir de la resistencia a la compresión inconfiada a los 7 días, con el inconveniente que la resistencia resultante es un parámetro de carga estática que no representa la carga real cíclica del tránsito, y además, no se incluye el confinamiento que tienen los materiales en la estructura de pavimento. Los modelos de módulo resiliente existentes sólo se consideran para materiales no ligados, lo que dificulta su aplicación en aquellos que sí lo están. Además, en la práctica se asumen módulos constantes en el tiempo, de modo que se pueda reducir los espesores, aunque la variación en el tiempo y la pérdida de rigidez es algo que todavía no se ha estudiado. Por tanto, se establece la siguiente hipótesis:

Es posible estimar la influencia en el módulo resiliente en un material de base estabilizada con cemento a partir de parámetros simples como el contenido de humedad, contenido de cemento, la propia resistencia a la compresión inconfiada y la aplicación de esfuerzos cíclicos, para un tipo de agregado característico.

1.3.2 Alcances

En la investigación se empleó un único material granular, este es proveniente de la extracción del Río Chirripó, cuyo origen es de rocas tipo ígneas del Pleistoceno y esporádicamente rocas sedimentarias marino someras del Mioceno (Rojas, 2011). Este material es uno de los más utilizados en todo el país para la conformación de capas de base en estructuras de pavimento flexible o rígidos, debido a que es considerado de buena calidad por sus propiedades durables y resistentes. Se obtuvo, por tanto, los ensayos básicos de laboratorio la densidad máxima seca, contenido de humedad óptima, mediante Próctor modificado y la granulometría; otros datos como la capacidad de soporte (CBR) o los límites de Atterberg fueron obtenidos de informes de laboratorio relacionados al propio proyecto de la ampliación de la carretera en la ruta nacional 32, en donde recientemente se está colocando.

El porcentaje de cemento y contenido de humedad óptimos del material estabilizado se determinó mediante el método de diseño de bases estabilizadas con cemento; y se dosificaron tres contenidos de cemento distintos, variando tres contenidos de humedad y dos periodos diferentes de curado para los tres ensayos de laboratorio aplicados: compresión inconfiada, módulo de elasticidad y módulo resiliente. No se llevaron a cabo pruebas para medir la fatiga, la durabilidad (pérdida de masa), ni el nivel real de agrietamiento.

Las pruebas de laboratorio y análisis de resultados son aplicables únicamente a un material de base granular o subbase que se desee estabilizar con cemento y no a materiales de suelo o subrasante mejorados con cemento.

En la modelación matemática para la determinación de las variables significativas se escogió el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) mediante una regresión lineal múltiple para estimar el módulo resiliente. Para el análisis estadístico se empleó el software estadístico STATA 16.0.

El modelo estimador para el módulo resiliente en bases estabilizadas con cemento es aplicable únicamente para el periodo de curado comprendido entre 7 y 28 días, que fueron los dos tiempos de medición en los que se valoró los ensayos de laboratorio, fuera de este periodo los módulos resilientes estimados deberán ser corroborados por calibraciones adicionales.

En esa misma línea, se aclara que el modelo de estimación para módulo resiliente se utilizaría propósitos de investigación y de diseño estructural, cuando el material aún no ha sido colocado en el proyecto, dado que aún no se cuenta con una calibración de los parámetros de la ecuación para otros materiales de diferente tipo y se desconoce si para verificación puede ser aplicado.

El cálculo de costos asociado a la construcción de las estructuras de pavimento como caso de aplicación, queda fuera del alcance de esta investigación.

1.3.3 Limitaciones

En la modelación no se contemplaron situaciones que pudieran afectar durante la fabricación de los especímenes de ensayo, tales como: agregado redondeado en la fuente de material seleccionado, pérdidas pequeñas de humedad al mezclar el material con el cemento o en la compactación, vibraciones durante las pruebas ajenas al equipo, etc.

Se asumió que los materiales son completamente uniformes, homogéneos e isotrópicos. Aunque al conformar las probetas estas resulten con algunos defectos que pudieran generar un efecto sobre los resultados registrados, estos no se contemplarán en la investigación debido a lo complejo que podría convertirse tanto el análisis como el procesamiento computacional.

El control de las humedades en cada espécimen será controlado durante la preparación de los especímenes mas no pequeñas pérdidas o ganancias de humedad que puedan presentarse durante la manipulación de éstos al transportarlos desde el lugar de acondicionamiento a los respectivos equipos de ensayo o durante la instalación para la prueba.

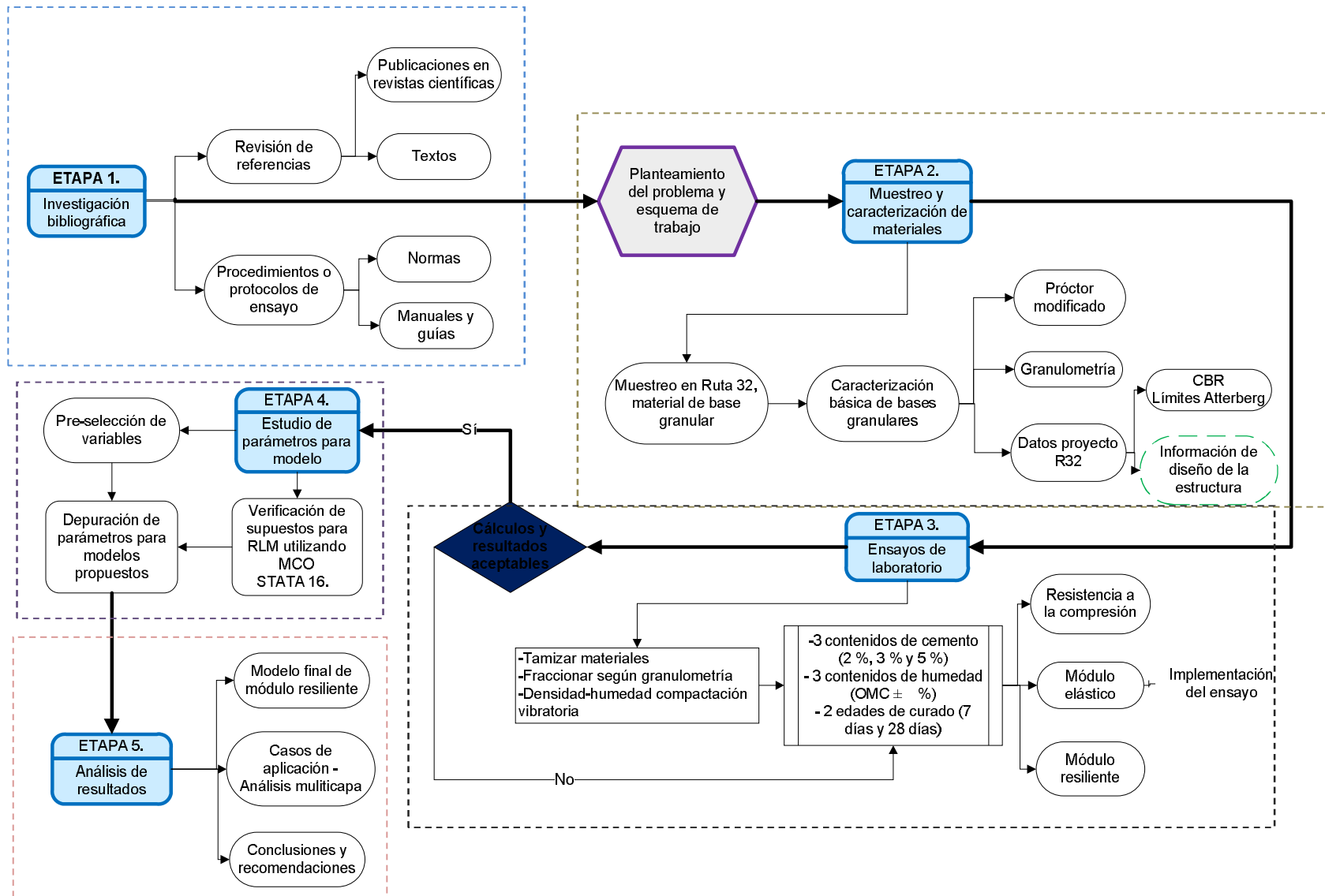
Los ensayos de módulo resiliente, módulo elástico y resistencia a la compresión confinada se limitaron de acuerdo a las capacidades de carga y control en la aplicación de esta, dado que son propias de cada equipo y software relacionado al mismo.

El desarrollo del modelo estimado del módulo resiliente se determina en función de los resultados obtenidos al ensayar el material de estudio, sin embargo, al replicarlo a otros materiales granulares, o en combinación con otros tipos de agente cementante, podrían arrojar discrepancia con los coeficientes de la ecuación propuesta en este trabajo.

1.4 Descripción de la metodología utilizada

La metodología convenida para el desarrollo de la investigación se dividió en 5 etapas, la cual se muestra en la Figura 1. Luego describe cada una de ellas.

Figura 1. Etapas de la metodología seguida



1.4.1 Etapa 1: Investigación bibliográfica

En esta etapa se efectuó una búsqueda de fuentes bibliográficas disponibles en los repositorios digitales, libros, revistas científicas e informes técnicos entre otros, que explicaran el comportamiento mecánico de las bases estabilizadas con cemento, o que permitieran conocer qué otras maneras es posible cuantificar los rangos de resistencia y deformación presenta un material granular combinado con ciertos contenidos de cemento y su efecto al reducirse o aumentarse el contenido de humedad en la mezcla. Por lo que se revisaron investigaciones publicadas, tanto en el ámbito nacional como internacional, relacionadas al diseño y desempeño de pavimentos semi-rígidos, normas vigentes y protocolos de ensayos que se han implementado en otros países para la medición del módulo resiliente en este tipo de materiales.

1.4.2 Etapa 2: Muestreo y caracterización del material granular

Como parte de los objetivos del estudio fue necesario analizar el comportamiento mecánico de al menos una fuente de material granular que fuera representativa de los materiales granulares colocados como capa de base en las estructuras de pavimento flexible en Costa Rica, o que suelen ser estabilizados con cemento para vías con altos volumen de tránsito. Por lo que se muestreó el material que se ha estado colocando en el proyecto de la ruta 32: quebrador CHEC ubicado en el km 49+000.

Posterior al muestreo, el material debía ser combinado en los porcentajes establecidos para el proyecto y homogenizado. Luego este material se caracterizó en los laboratorios del Área de Construcción del LanammeUCR, a través de los ensayos básicos necesarios para la determinación del contenido de humedad y densidad máxima seca óptimos:

- Proctor Modificado (AASHTO T,180)
- Granulometría para bases granulares (AASHTO T 11 y T27)

Las demás características físicas establecidas en el CR-2010 para que un material granular pueda cumplir como capa de base, se buscaron los informes de resultado de laboratorio para el control de calidad del proyecto del diseño, rehabilitación y ampliación de la ruta 32, donde se extraen los siguientes datos:

- Límites Atterberg (AASHTO T 89 y 90)
- California Bearing Ratio, CBR (AASHTO T-193)
- Gravedad Específica de Gruesos (AASHTO T-85)
- Gravedad Específica de Finos (AASHTO T-84)
- Caras fracturadas (ASTM D 5821)
- Peso Unitario de Agregados (ASTM C-29)
- Abrasión (INTE C64/C66)
- Índice de durabilidad (AAHTO T 210)

En cuanto al cemento se utilizará el cemento hidráulico de uso general; cemento tipo UG-RTCR. Este cemento y tipo es que también típicamente usado como agente estabilizador en proyectos tanto bajo como alto volumen de tránsito.

1.4.3 Etapa 3: Ensayos de laboratorio al material estabilizado con cemento

Fase 1: Preparación del material

Una vez se obtuvo las características del material, se procedió a confeccionar los baches mediante la separación por fracciones, de acuerdo con la graduación del material, donde se sustituyó todo aquel tamaño superior a los 3/4" (19,0 mm) en la malla de 1/2" (12,5 mm), de manera que la afectación por sobre tamaño no afecte la densidad y humedad del material al momento de la compactación y represente de mejor manera al material al momento de colocarse en la carretera, según las recomendaciones (Ulloa & Múnica, 2020). Además, se determinó el contenido de humedad para cada contenido de cemento.

Fase 2: Diseño de base estabilizada con cemento

Se preparó un conjunto de 9 especímenes cilíndricos de 101 mm de diámetro y 101 mm de altura compactados mediante Próctor modificado para la obtención del contenido óptimo de cemento requerido, de acuerdo a lo establecido en el procedimiento de la norma ASTM D 1633 (utilizando un mazo de 4,54 kg), para el contenido de humedad y densidad máxima seca óptimos hallados en la fase 1.

Fase 3: Ensayos para la obtención la respuesta del material estabilizado con cemento

La metodología para el diseño, verificación y control de calidad de las bases estabilizadas suele usarse únicamente el ensayo de resistencia a la compresión inconfiada (UCS, por sus siglas en inglés), por lo que el mismo también se consideró dentro de esta etapa.

En países como Suráfrica la estabilización de las bases con agentes cementantes como el cemento o la cal son frecuentemente utilizados, por lo que han desarrollado estudios en la implementación de ensayos de laboratorio que permitan la medición de las resistencias en dichos materiales, uno de ellos es el módulo elástico (M_E) (Lim & Zollinger, 2003). El ensayo se implementó con algunas adaptaciones para la obtención de ese parámetro.

En la realización del ensayo de módulo resiliente sobre una base estabilizada no existe un protocolo de ensayo, por lo que se tomó como base el procedimiento de la norma AASHTO T 307, pero aumentando la cantidad de secuencias para la aplicación de los esfuerzos de confinamiento y desviadores indicados en el estándar.

Mediante el método de Próctor modificado, se compactaron 36 especímenes cilíndricos de 101 mm de diámetro y 101 mm de altura, para determinar la resistencia a la compresión inconfiada, y un total de 72 especímenes para la evaluación de módulo resiliente y módulo elástico, sus dimensiones fueron de 102 mm de diámetro y 203 mm de altura, compactados con el compactador vibratorio. Para todos los ensayos, el material granular fue estabilizado con diferentes contenidos de cemento, tres diferentes contenidos de humedad y dos periodos de curado. El esquema de trabajo se resume en la Figura 2.

1.4.4 Etapa 4: Estudio de variables para la estimación del modelo matemático

A partir de los resultados de los ensayos realizados se estimaron los parámetros más significativas dentro de un modelo matemático para el módulo resiliente en materiales granulares estabilizados con cemento, determinado a partir de un análisis estadístico. El

software utilizado fue el STATA 16.1, para el cual se obtuvo una licencia que permite su uso por un año de manera gratuita.

Se analizó la interacción entre los seis principales parámetros involucrados en el cálculo (esfuerzos invariantes, efecto del contenido de cemento, contenido de humedad, módulo elástico, la resistencia a la compresión inconfiada y la edad del curado).

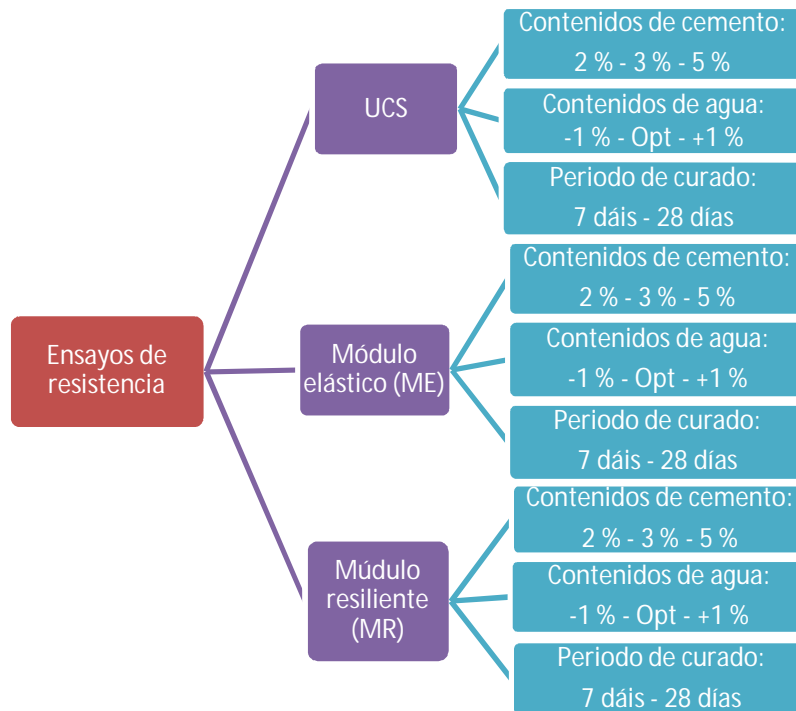
1.4.5 Etapa 5: Análisis de resultados y conclusiones

A partir de los resultados de los ensayos y de la escogencia de las variables a intervenir se procedió a analizar los datos mediante un modelo clásico de Regresión Lineal Múltiple (RLM), empleando el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) para hallar el modelo de predicción. Se generaron cinco modelos para estimar el módulo resiliente, de los cuáles se escoge finalmente el que mostró una mejor bondad de ajuste y que la interpretación de los parámetros mostraran la mayor significancia sobre la variable dependiente meta.

Una vez se estableció la ecuación del módulo resiliente (M_r), se procedió a analizar dos casos de estudio en los que se aplicó el modelo propuesto, el primer caso aplicado a una estructura de pavimento semi-rígido para una carretera de alto volumen de tránsito y un segundo para un camino cantonal donde transitan pocos vehículos. En esta evaluación se obtiene valores de módulo resiliente considerando características propias del diseño del material estabilizado en cada caso.

Esta etapa además comprende la elaboración de recomendaciones y conclusiones relacionadas al tema tratado.

Figura 2. Esquema experimental para las condiciones y dosificaciones de cemento y humedad en la estimación del módulo resiliente en función de ensayos de laboratorio



2. Marco teórico

En el diseño de pavimentos el uso de métodos empíricos es aún muy usado para el establecimiento de espesores, sin embargo, esta práctica no permite determinar cuándo o cómo fallará un pavimento. Mientras que un enfoque mecanístico del diseño de pavimentos aplica los principios de ingeniería para un diseño racional. Por lo que se deben caracterizar las propiedades fundamentales de los materiales para modelar su comportamiento ante la aplicación de cargas, donde se consideran además los factores del clima para predecir aproximadamente su falla.

Los procesos de diseño de una estructura de pavimento, por tanto, requieren las propiedades de los materiales, las cuales son complejas y varían en función de la humedad, la temperatura y la densidad entre otras. En pavimentos flexibles, por ejemplo, la susceptibilidad al daño por humedad o los cambios térmicos afectan considerablemente el desempeño de estos, por lo que conocer el comportamiento de las capas ante estos fenómenos y las cargas del tránsito cada vez mayores es importante para prever que su vida útil no se vea reducida.

Cuando dichas propiedades no son suficientes para soportar las cargas proyectadas del tránsito o las condiciones de humedad a las que estará sometido un material, es posible mejorar las propiedades de las capas de base, subbase o subrasante estabilizando con cemento, cal o algún otro tipo de aditivos. Ya sea en casos de un diseño previo a la construcción de un proyecto, o cuando se interviene una carretera existente y se hallan deterioros provocados por estas mismas circunstancias.

2.1 Pavimentos semi-rígidos

La mayoría de las investigaciones y referencias analizan de manera separada los dos tipos principales de pavimentos: rígidos y flexibles. La definición de un pavimento rígido es aquel con una capa superficial de concreto hidráulico, mientras que un pavimento flexible está asociado a pavimentos cuya capa superior es de mezcla asfáltica. Los pavimentos flexibles y rígidos convencionales difieren en la forma que se distribuyen las cargas verticales hasta la subrasante. La presencia de una capa estabilizada con cemento dentro de un pavimento flexible tiende a dispersar aún más la presión ejercida sobre la subrasante en comparación con un pavimento flexible convencional. A este tipo de pavimentos se le categoriza como pavimentos semirrígidos (Solanki & Zaman, 2016).

2.2 Bases estabilizadas con cemento (BEC)

Una Base Tratada con Cemento (CTB por sus siglas en inglés) es la mezcla de agregados o suelos con cemento Portland, que luego de compactada y curada forma una capa de pavimentación con un alto nivel de impermeabilización, resistente a las cargas y duradera (Halsted, Adaska, & McConnell, 2008). En la Figura 1 se observa el proceso de estabilización con cemento, mediante equipo especializado para este tipo de aplicaciones.

Figura 3. Estabilización de capa de base con cemento (Wegman, Sabouri, Korzilius, & Kuehl, 2017)



Otras descripciones tales como base de suelo-cemento, agregado tratado con cemento, plataforma estabilizada con cemento y cemento estabilizado, son también en ocasiones utilizados (PCA, 2006).

Como una consecuencia de la incorporación del cemento, el espesor de la base de agregados estabilizada con cemento es menor que el requerido para bases granulares que soporten el mismo tráfico, porque la rigidez de la base de agregados estabilizada con cemento hace que las cargas de tráfico se distribuyan sobre un área mayor (Villacreses, 2014). En la práctica se asumen módulos constantes en el tiempo, como resultado de esto es posible reducir los espesores, aunque la variación en el tiempo y la pérdida de rigidez es algo que todavía se está estudiando. Thompson, en un estudio pionero, desarrolló la relación entre el módulo resiliente y la resistencia a la compresión confinada (UCS) de subrasantes estabilizadas con cal. Investigó el esfuerzo cortante y las propiedades típicas de las mezclas de suelo-cal, para evaluar la influencia en el tipo de suelo y el tiempo de curado en esas propiedades, y de esta forma determinar si existía alguna relación entre los resultados de estos dos ensayos (Thompson, 1996).

2.3 Módulo resiliente en materiales granulares y suelos

El módulo resiliente de un material granular o de un suelo es determinado a partir de la respuesta ante ciclos repetidos de carga y descarga. Esto es posible medirlo mediante una prueba triaxial cíclica como se muestra en la Figura 4, en la cual el esfuerzo σ_a y ϵ_a son el esfuerzo y la deformación en la dirección axial (carga cíclica). El dispositivo de medición de carga axial debe ser una celda de carga electrónica ubicada entre un actuador y un vástago de pistón dentro de cámara apta para soportar las presiones de confinamiento, tal como se ejemplifica en la Figura 5.

En la prueba un espécimen cilíndrico del material es sometido inicialmente a una presión de confinamiento σ_c , que a su vez induce a una deformación inicial ϵ_c , (no se mide durante la prueba, aunque es la misma en todas las direcciones para comportamientos isotrópicos en el material). El esfuerzo axial se repite de manera cíclica con una magnitud constante

$\Delta\sigma$, lo que induce una deformación cíclica axial resiliente $\Delta\varepsilon$. Por lo que el módulo resiliente (MR) es entonces definido como la relación entre el esfuerzo cíclico y la deformación axial resiliente (AASHTO, 2004):

$$M_r = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad \text{Ecuación 1}$$

Figura 4. Definición de un ciclo del módulo resiliente MR. (AASHTO, 2004)

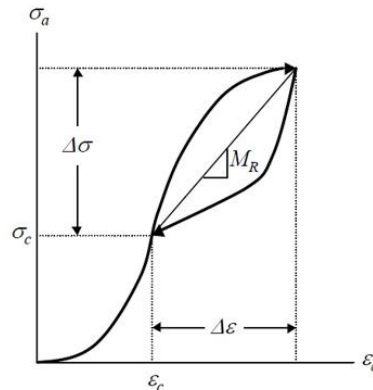
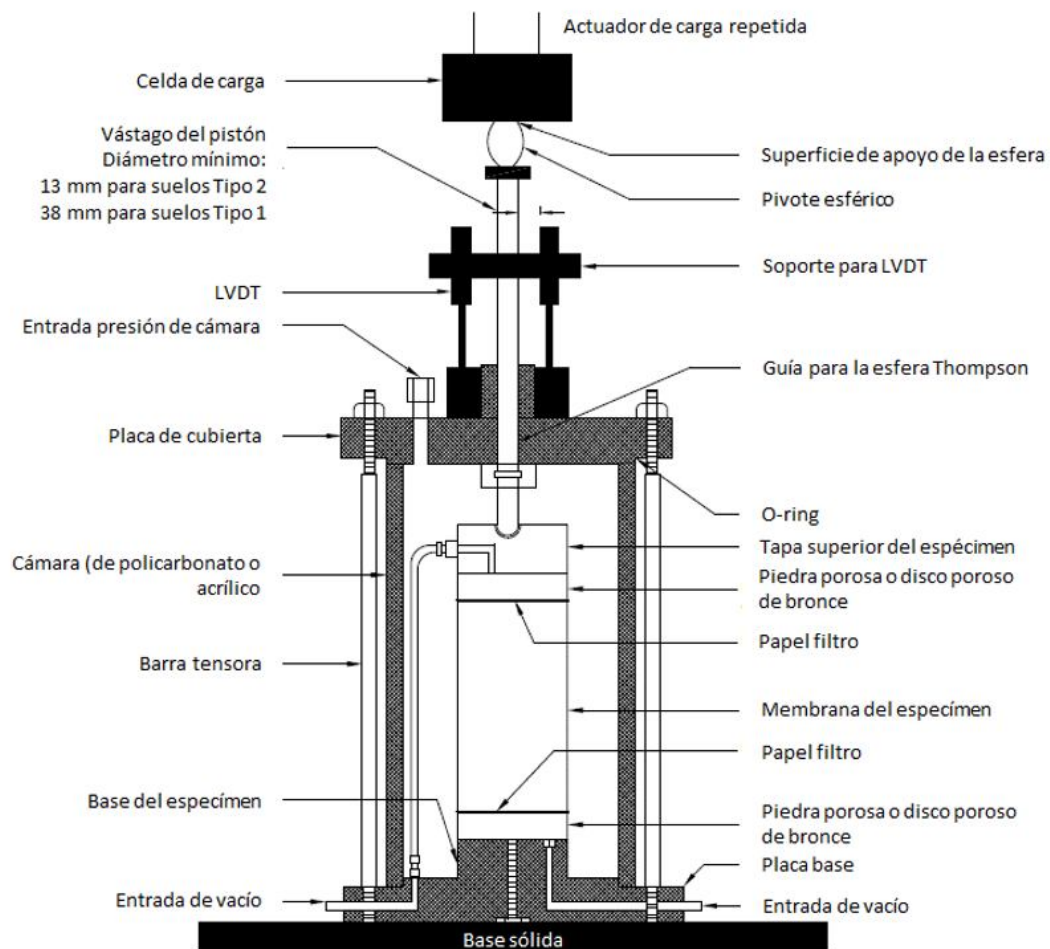


Figura 5. Cámara triaxial típica con LVDT externos y celda de carga (AASHTO, 2017)



Para la mayoría de los materiales no consolidados de los pavimentos el módulo resiliente es dependiente del esfuerzo. Por lo que muchos de los modelos no lineales incorporan los efectos del nivel de esfuerzo en el cálculo del módulo resiliente. El modelo general que es aplicado para la determinación del módulo resiliente es (Andrei, 1999):

$$M_r = k_1 p_a \left(\frac{\theta - 3k_6}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + k_7 \right)^{k_3} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde

M_r = módulo resiliente

θ = invariante de esfuerzos en el pico de la carga

$$= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

= $3\sigma_c + \Delta\sigma$ para la carga triaxial estándar a compresión

τ_{oct} = esfuerzo cortante octaédrico en el pico de la carga

$$= \left\{ \frac{1}{9} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_{yz})^2 + (\sigma_{xz} - \sigma_x)^2] + \frac{2}{3} [\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2] \right\}^2$$

= $\frac{\sqrt{2}}{3} \Delta\sigma$ para carga triaxial estándar a compresión

p_a = presión atmosférica (factor normalizado)

k_1 a k_7 = parámetros del material sujetos a las siguientes constantes:

$$k_1 > 0; k_2 \geq 0; k_3 \leq 0; k_6 \leq 0; k_7 \geq 1$$

Desde la Guía de Diseño en el 2002 (AASHTO, 2004) se había adoptado una versión simplificada de la Ecuación 2, con $k_6 = 0$ y $k_7 = 1$.

De acuerdo a lo anterior, la Ecuación 2 se simplificaría como sigue (AASHTO, 2008):

$$M_r = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad \text{Ecuación 3}$$

Y el esfuerzo τ_{oct} también se podría simplificar a:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_{yz})^2 + (\sigma_{xz} - \sigma_x)^2} \quad \text{Ecuación 4}$$

El módulo resiliente se utiliza para el análisis multicapa, y es una variable muy importante para predecir los esfuerzos resilientes (recuperables), deformaciones y deflexiones dentro de un pavimento flexible. Por lo que en los materiales granulares sin estabilizar se puede relacionar con la deformación permanente, aunque se desconoce para cuáles materiales estabilizados con contenidos de cemento específicos estos modelos es aplicable.

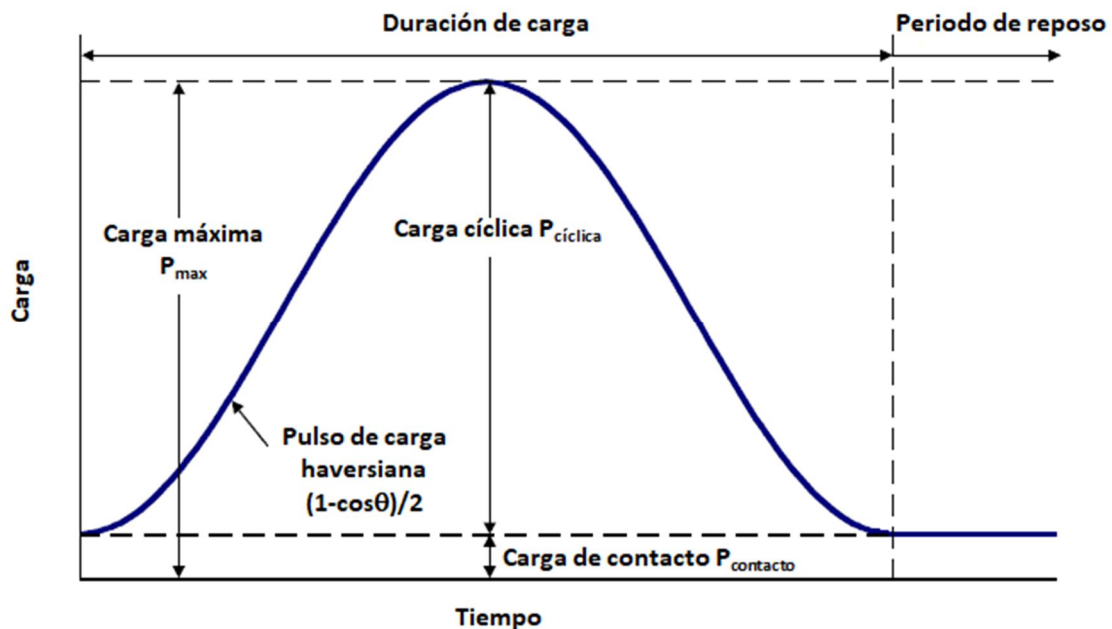
De esta forma, la medición de la resistencia ante carga dinámicas en un material estabilizado no se ha logrado medir de manera directa hasta el momento.

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

2.3.1 Onda de carga tipo haversiana

Los especímenes de ensayo son cargados utilizando un pulso de carga haversiana $(1-\cos\theta)/2$ como se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Definición de términos de módulo resiliente (AASHTO, 2017)



2.3.2 Máxima carga axial aplicada (P_{max})

Carga máxima aplicada al espécimen de ensayo que incluye la carga de contacto y la carga cíclica, Ecuación 5.

$$P_{max} = P_{contacto} + P_{cíclica} \quad \text{Ecuación 5}$$

2.3.3 Carga de contacto ($P_{contacto}$)

Carga vertical aplicada sobre el espécimen de ensayo para mantener el contacto positivo entre la tapa y el espécimen, Ecuación 6 y 7.

De acuerdo a la norma de ensayo T 307 (AASHTO, 2017):

$$P_{contacto} = 0,1 \cdot P_{max} \quad \text{Ecuación 6}$$

O según el protocolo de ensayo establecido en el 285 Apéndice 2 (NCHRP, 2004):

$$P_{contacto} = 0,2 \cdot S_3 \cdot A \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde A = área inicial de la sección transversal del espécimen y S_3 es el confinamiento de cámara.

2.3.4 Carga axial cíclica ($P_{cíclica}$)

Carga axial repetida aplicada al espécimen de ensayo, Ecuación 8:

$$P_{cíclica} = P_{max} - P_{contacto} \quad \text{Ecuación 8}$$

2.3.5 Máximo esfuerzo axial aplicado (S_{max})

Esfuerzo axial aplicado al espécimen de ensayo que incluye el esfuerzo de contacto y el esfuerzo cíclico (resiliente), Ecuación 9.

$$S_{max} = \frac{P_{max}}{A} \quad \text{Ecuación 9}$$

2.3.6 Esfuerzo axial cíclico ($S_{cíclico}$)

Esfuerzo axial cíclico (resiliente) aplicado, Ecuación 10:

$$S_{cíclico} = \frac{P_{cíclico}}{A} \quad \text{Ecuación 10}$$

2.3.7 Esfuerzo de contacto ($S_{contacto}$)

Esfuerzo axial aplicado al espécimen de ensayo para mantener un contacto positivo entre la tapa superior y el espécimen (Ecuación 11, 12 y 13):

$$S_{contacto} = \frac{P_{contacto}}{A} \quad \text{Ecuación 11}$$

De acuerdo a la norma de ensayo T 307 (AASHTO, 2017):

$$S_{contacto} = 0,1 \cdot S_{max} \quad \text{Ecuación 12}$$

O según el protocolo de ensayo establecido en el 285 Apéndice 2 (NCHRP, 2004):

$$\frac{S_{contacto} + S_3}{S_3} = 1,2 \Rightarrow S_{contacto} = 0,2 \cdot S_3 \quad \text{Ecuación 13}$$

2.3.8 Presión de confinamiento (S_3)

Es el esfuerzo total radial, es decir, la presión de confinamiento en la cámara triaxial (esfuerzo principal menor).

2.3.9 Deformación axial recuperable (resiliente) (e_r)

Es la deformación axial recuperable debida al esfuerzo cíclico $S_{ciclico}$.

2.3.10 Deformación axial recuperable (resiliente) unitaria (ε_r)

Es la deformación axial recuperable unitaria debida al esfuerzo cíclico $S_{ciclico}$, Ecuación 14.

$$\varepsilon_r = \frac{e_r}{L} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde L = la longitud original del espécimen.

2.3.11 El módulo resiliente M_r

Se define también como, Ecuación 15.

$$M_r = \frac{S_{ciclico}}{\varepsilon_r} \quad \text{Ecuación 15}$$

2.3.12 Duración del pulso de carga

Es el intervalo de tiempo en el cual el espécimen de ensayo es sujeto a la carga cíclica, de acuerdo el Cuadro 1.

Cuadro 1. Duración de pulsos de carga y periodo de reposo para materiales granulares

Procedimiento ensayo	Pulso de carga (s)	Periodo de reposo (s)
NCHRP 285	0,1	0,9
Apéndice 2		
AAHSTO	0,1	0,9
T 307		

2.3.13 Período de reposo

Es el intervalo de tiempo entre las sucesivas aplicaciones de esfuerzo cíclico.

Por último, se tienen las secuencias de esfuerzos que aplicadas para materiales granulares. Sin embargo, para este estudio se utilizaron secuencias creadas tomando como base las de la norma de referencia, pero proyectadas específicamente para medir la respuesta en materiales estabilizados con cemento. En el Cuadro 2, se presenta la secuencia para los materiales tipo 1, de acuerdo a la clasificación que la norma AASHTO T 307 establece para bases granulares y subbases. En el apartado 2.4.4 se presentan las secuencias propuestas para bases estabilizadas con cemento.

Cuadro 2. Secuencia de ensayo para materiales de base o subbase, materiales Tipo 1 (AASHTO, 2017)

N° secuencia	Presión de confinamiento S_3		Esfuerzo axial máximo S_{max}		Esfuerzo desviador cíclico $S_{cíclico}$		Esfuerzo de contacto, $S_{contacto}$		Cantidad de aplicaciones de carga
	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	
Acondicionamiento									1000
0	103,4	15	103,4	15	93,1	13,5	10,3	1,5	100
1	20,7	3	20,7	3	18,6	2,7	2,1	0,3	100
2	20,7	3	41,4	6	37,3	5,4	4,1	0,6	100
3	20,7	3	62,1	9	55,9	8,1	6,2	0,9	100
4	34,5	5	34,5	5	31,0	4,5	3,5	0,5	100
5	34,5	5	68,9	10	62,0	9,0	6,9	1,0	100
6	34,5	5	103,4	15	93,1	13,5	10,3	1,5	100
7	68,9	10	68,9	10	62,0	9,0	6,9	1,0	100
8	68,9	10	137,9	20	124,1	18,0	13,8	2,0	100
9	68,9	10	206,8	30	186,1	27,0	20,7	3,0	100
10	103,4	15	68,9	10	62,0	9,0	6,9	1,0	100
11	103,4	15	103,4	15	93,1	13,5	10,3	1,5	100
12	103,4	15	206,8	30	186,1	27,0	20,7	3,0	100
13	137,9	20	103,4	15	93,1	13,5	10,3	1,5	100
14	137,9	20	137,9	20	124,1	18,0	13,8	2,0	100
15	137,9	20	275,8	40	248,2	36,0	27,6	4,0	100

2.4 Ensayos de laboratorio en bases estabilizadas

Para el desarrollo del diseño estructural de un pavimento semi-rígido es necesario contar con los coeficientes estructurales de todas las capas que lo componen, a pesar de que la guía de diseño AASHTO 93 propone valores de coeficiente estructural, es realmente complejo establecer qué tan preciso son esos valores para diferentes capas de bases estabilizadas con cemento.

Al aplicar el método de diseño AASHTO 93, el diseñador de la carretera determina un número estructural (SN) al conocer factores como el nivel de tráfico del diseño, el soporte de subrasante, la confiabilidad deseada y la capacidad de serviciabilidad final; por lo tanto, una determinación precisa de los coeficientes de cada capa puede tener un impacto económico significativo con respecto al diseño de la estructura del pavimento (Richardson, 1996).

2.4.1 Resistencia a compresión inconfina en suelo-cemento (UCS)

Los coeficientes estructurales de cada capa se determinan más comúnmente en función de la resistencia relativa de los materiales o al considerar su rigidez; el ensayo más empleado

para ello es el método de la resistencia a la compresión en suelo-cemento, ASTM D 1633. Al igual que la del concreto hidráulico varía con el tiempo. Se ha encontrado una relación entre la resistencia y el tiempo de curado para el material estabilizado, de la siguiente forma (Leiva, Arce, & Castro, 2005):

$$UC_d = UC_{d_0} + K \cdot \text{Log} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde,

UC_d = Resistencia a la compresión inconfiada en “psi” en un tiempo “d” días.

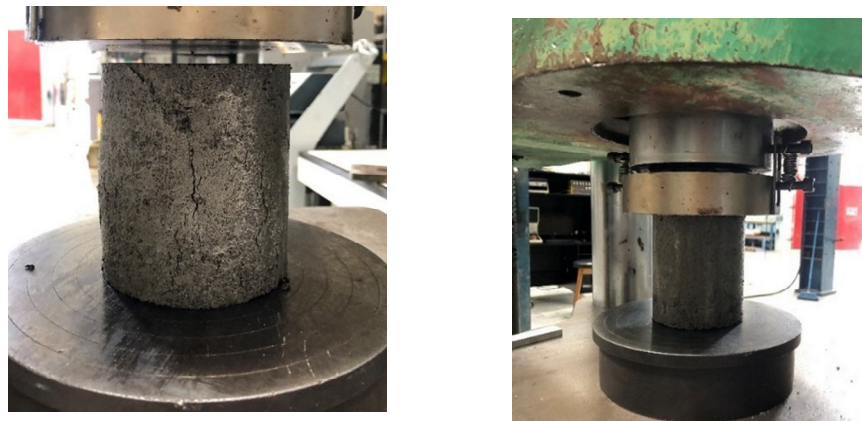
UC_{d_0} = Resistencia a la compresión inconfiada en “psi” en un tiempo “d₀” días.

K = 70 °C para suelos granulares y 10 °C para suelo fino

Se aplica por lo general un valor de 1,5 veces la resistencia a los 7 días para obtener la resistencia a los 28 días de un material estabilizado con cemento.

Esta prueba consiste en la compactación de especímenes cilíndricos de material granular o suelo estabilizado con cemento, donde son sometidos a una carga aplicada a una tasa constante de (1 mm)/min, ajustada en un rango de (140 ± 70) kPa/s (ASTM, 2017). Por lo que el equipo donde se mida esta resistencia deber tener la capacidad suficiente para llevar a la falla el material, tal como se observa en la Figura 7.

Figura 7. Falla de especímenes a la resistencia a la compresión inconfiada



Las propiedades estructurales de una base estabilizada con cemento (BEC) dependen del material a tratar, cantidad de cemento, condiciones de curado y edad falla. Los rangos típicos de resistencia a la compresión se encuentran entre de 2,1 MPa y 5,5 MPa, y módulos de ruptura desde 0,7 MPa a 1,7 MPa (PCA, 2006).

Dentro de las especificaciones vigentes en Costa Rica se cuenta con el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR 2010), donde se establecen los rangos mínimos de resistencia en las capas de base

estabilizadas con cemento. En el 2017 se actualizó de la Sección 302. Base granular estabilizada con cemento, donde se estableció un valor mínimo de la USC (resistencia a la compresión inconfiada) de 2,1 MPa y como máximo 3,9 MPa, con el fin de limitar la dosificación de cemento y así evitar el agrietamiento debido a contracción o fatiga prematura. En el Cuadro 3 se presenta un resumen de los valores vigentes establecidos para el país.

Cuadro 3. Parámetros de diseño de las mezclas de agregados y cemento

Material o propiedad	Requerimiento
Agregado	91 – 97 % ⁽¹⁾
Cemento Pórtland	3 - 9 % ⁽¹⁾
Pérdida de masa, AASHTO T 135 & T 136 (12 ciclos)	
A-1, A-2-4, A-2-5 & A-3 ⁽²⁾	14 %
A-2-6, A-2-7 ⁽²⁾	7 %
Resistencia a la compresión inconfiada (Falla a los 7 días), ASTM D-1633, método A ⁽³⁾	3,0 MPa Promedio

(1) Por masa de la mezcla total seca

(2) De acuerdo al sistema de clasificación de suelos de la AASHTO

(3) Utilizando el mazo de Proctor Modificado (4,54 Kg)

Nota: Tomado de la Tabla 302-1 y Tabla 302-2 de la Sección 302. Base granular estabilizada con cemento (MOPT, 2017).

2.4.2 Módulo de elasticidad (M_E)

Este ensayo originalmente fue pensado para materiales con alta rigidez, donde se desea obtener el módulo elástico y el coeficiente de Poisson, diseñado específicamente para cilindros moldeados de concreto hidráulico al aplicarse un esfuerzo longitudinal a compresión ASTM C 469 (ASTM, 2017). Sin embargo, se realizó una adaptación de este ensayo, el cual siguió un protocolo similar, en materiales estabilizados con cemento, para establecer el momento en que el material sobrepasa el rango elástico (Lim & Zollinger, 2003).

De esta forma, los valores del módulo elástico y el coeficiente de Poisson son aplicables dentro del rango típico de esfuerzos de trabajo (0 al 40% de la carga último del concreto). Cuya carga es aplicada a una tasa de 0,05 pulg/min (1,25 mm/min).

Se sabe que la magnitud de los módulos de elasticidad generalmente varía en función de la aplicación de la carga, serán menores bajo la aplicación de cargas rápidas (por ejemplo, cargas dinámicas con mayor frecuencia), y tienden a ser mayores cuando se aplican cargas lentas o de mayor duración (menor frecuencia).

El equipo donde se realiza el ensayo consiste en una máquina universal donde es posible medir todo el rango de cargas de trabajo en el material, hasta su falla, similar al de la Figura 8. Además, se emplean deformímetros capaces de registrar las deformaciones, en el eje axial y diametral. En la Figura 9 se observa una imagen de un espécimen de base estabilizada y los dispositivos para la medición de las deformaciones.

Figura 8. Máquina universal para la aplicación de cargas hasta la falla en cilindros de base estabilizada, tomada por la autora



Figura 9. Medición de las deformaciones a compresión para un espécimen de BEC (Lim & Zollinger, 2003)



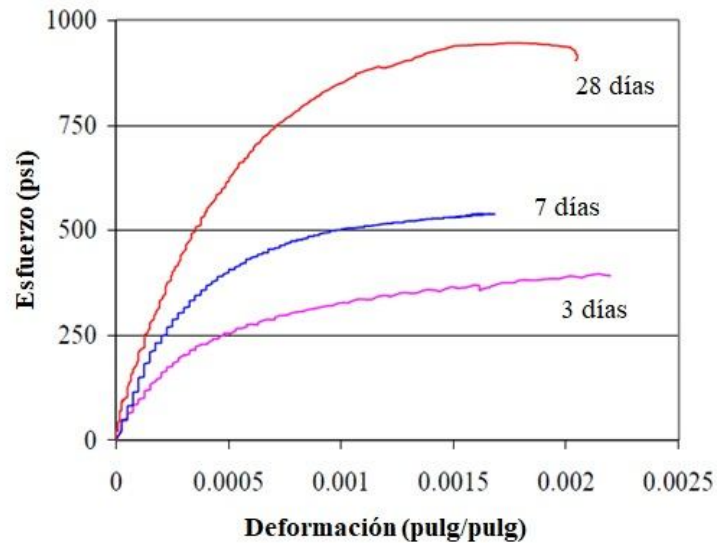
Para obtener una curva de esfuerzo-deformación es necesario tomar varias lecturas de puntos intermedios sin interrumpir la aplicación de la carga, o que los datos sean registrados continuamente mediante algún instrumento. Pero, es indispensable obtener al menos la carga al 40 % de la carga última y por interpolación su respectiva deformación.

De ser posible registrar puntos intermedios, es importante graficar la curva de esfuerzo-deformación, donde las deformaciones longitudinales se colocan en las abscisas y los esfuerzos a compresión en las ordenadas. Para calcular los esfuerzos se divide la carga aplicada registrada entre el área de la sección transversal del espécimen.

Ahora bien, el módulo elástico es determinado como el módulo secante al 25 % del esfuerzo último. Donde el módulo secante es la pendiente en la gráfica, desde el origen hasta el

esfuerzo último, el cual depende del tiempo de curado de la muestra como se observa en la Figura 10.

Figura 10. Curva esfuerzo-deformación para diferentes edades de curado en base estabilizada con cemento (Lim & Zollinger, 2003)



Por lo que el módulo secante se puede calcular como indica la Ecuación 17:

$$E_s = \frac{\sigma_{\text{último}}}{\epsilon_{\text{última}}} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

E_s = Esfuerzo secante, MPa

$\sigma_{\text{último}}$ = Esfuerzo último, MPa

$\epsilon_{\text{último}}$ = Deformación unitaria última, mm/mm

Siendo el esfuerzo último la relación entre la carga última en N entre el área de la sección transversal del espécimen en mm².

Posteriormente, se determina el 25 % del esfuerzo último y su correspondiente deformación unitaria, para calcular finalmente el módulo elástico de la Ecuación 18.

$$M_E = \frac{0,25 \cdot \sigma_{\text{últ}}}{\epsilon_{25\% \sigma_{\text{últ}}}} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

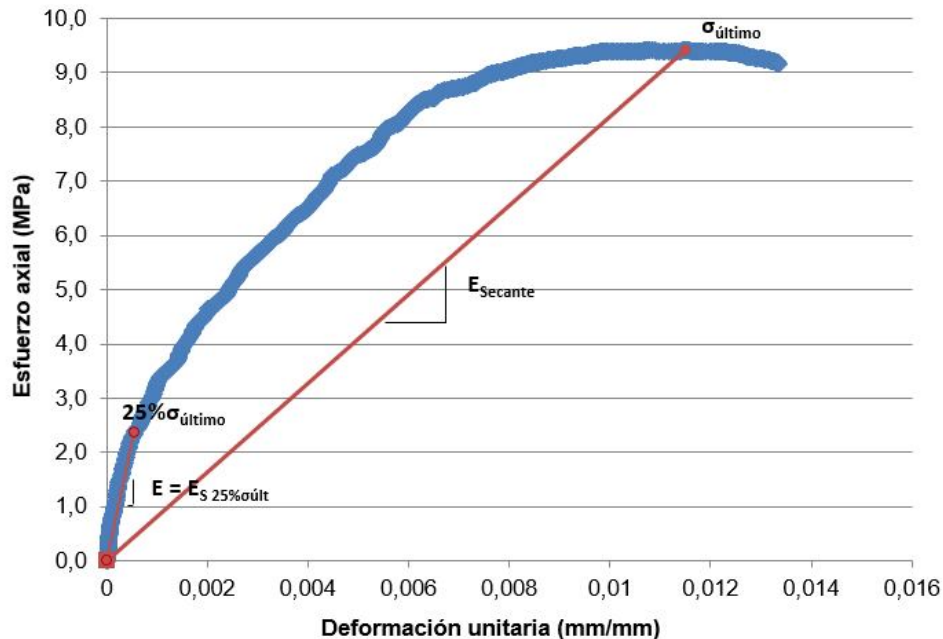
M_E = Módulo elástico, MPa

$\sigma_{\text{últ}}$ = Esfuerzo último, MPa

$\epsilon_{25\% \text{últ}}$ = Deformación unitaria al 25 % del esfuerzo último, mm/mm

En la Figura 11 se muestra un ejemplo del módulo secante y el módulo elástico de un material estabilizado con cemento.

Figura 11. Curva esfuerzo-deformación para una base estabilizada con cemento, a 7 días de curado en cámara húmeda



Estimación del módulo de elasticidad puede ser también estimado a partir de la densidad máxima seca (D_{max}) y la resistencia a la compresión inconfiada (UCS). El ACI (American Concrete Institute) propuso un modelo que generalmente ha sido usado para el cálculo del módulo elástico, el mismo se expresa en la ecuación 19, con el inconveniente que fue desarrollado para aplicaciones en concreto hidráulico. Por otro lado, en la investigación presentada en el TRB (Lim & Zollinger, 2003), se propone un modelo específico para la estimación del ME en bases estabilizadas con cemento, este se muestra en la ecuación 20.

$$E(t) = 33 \cdot w^{1.5} \cdot f_c(t)^{0.5} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$E(t) = 4,38 \cdot w^{1.5} \cdot f_c(t)^{0.75} \quad \text{Ecuación 20}$$

donde, $E(t)$ = Módulo de elasticidad en psi al tiempo t ,

w = densidad de la mezcla en pcf, y

$f_c(t)$ = esfuerzo a compresión en psi, al tiempo t .

2.4.3 Módulo resiliente en BEC

En la nueva guía diseño mecánico de pavimentos MEPDG (AASHTO, 2004) se solicita el uso de los módulos resilientes de cada una de las capas de la estructura, tanto para carreteras nuevas como para rehabilitación, sin embargo, en la mayoría de los casos no se

cuenta con el valor de módulo resiliente del material a emplear en la base granular ni de la subrasante, mucho menos, de la base estabilizada. Sea por que se suponen módulos a partir de nomogramas o porque los costos de estos ensayos en ocasiones no son considerados dentro del proyecto; aun cuando, la obtención de estos valores sea indispensable para el diseño estructural y el posterior control de calidad.

En Luisiana, Estados Unidos, así como en otras partes del mundo, el uso de bases granulares estabilizadas como capa de base de la estructura del pavimento, son ampliamente consideradas dentro del diseño. Los parámetros del contenido de humedad y la densidad máxima seca del material son evaluados en combinación con el contenido de cemento para los criterios de aceptación y control de calidad en campo. Actualmente el módulo resiliente no es considerado como un parámetro de diseño o de control en la construcción. A pesar de esto, existe la necesidad de determinar el módulo resiliente de diseño para los diferentes materiales en sus valores aceptables de humedad y densidad seca in-situ (incluido la variación que podría ocurrir). Estos valores pueden ser incluidos en el diseño de las estructuras del pavimento. (Hanifa, Abu-Farsakh, & Gaut, 2015).

El módulo resiliente para bases granulares se obtiene a partir del método de ensayo de la norma AASHTO T 307, como se explicó anteriormente. Debido a que este procedimiento de ensayo no mide la rigidez en materiales ligados, para implementarlo en bases estabilizadas, se debe aplicar una carga cíclica más alta y mayores presiones de confinamiento que exciten la respuesta del material, donde se espera una mayor rigidez comparada con los materiales sin estabilizar.

De este modo, se propone un protocolo de ensayo para las secuencias de esfuerzos aplicadas en la medición del módulo resiliente para bases estabilizadas con cemento o cualquier otro agente estabilizador en el que se esperen módulos resilientes superiores a los 2000 MPa (300 psi), establecido así como valor mínimo requerido para el diseño de este tipo de materiales (Scullion, Uzan, Hilbrich, & Chen, 2008).

2.4.4 Protocolo de ensayo para módulo resiliente en BEC

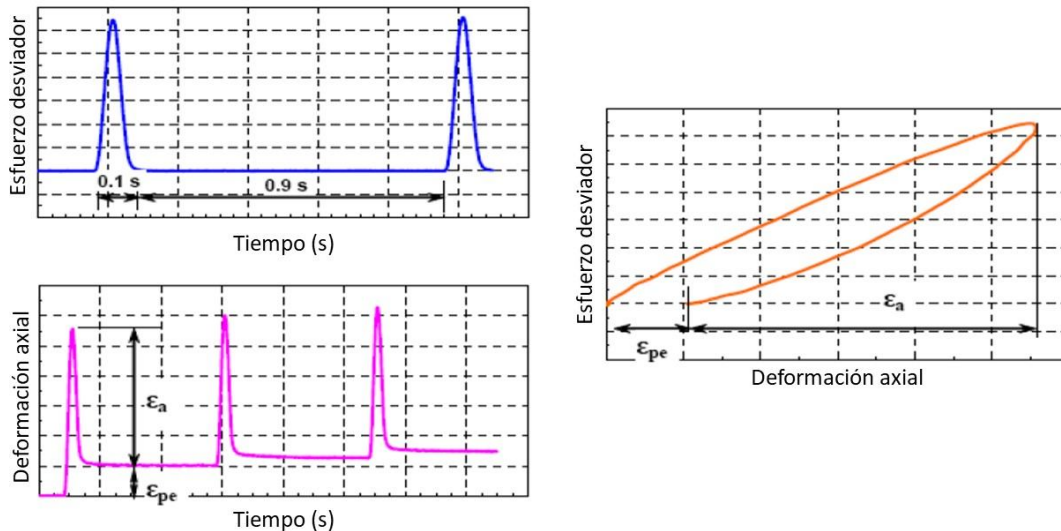
- a. Las muestras son primeramente acondicionadas por una aplicación de 1000 ciclos de carga para remover la mayoría de las irregularidades en la superficie superior e inferior del espécimen de ensayo y para suprimir la mayor parte de la etapa inicial de deformación permanente.
- b. De manera inmediata se continuará con la aplicación de 30 secuencias con combinaciones de presión de confinamiento (S_3) y esfuerzos desviadores cíclicos ($S_{ciclico}$), como se describe en el Cuadro 4; de manera que tal que el módulo resiliente se mida a diferentes niveles de esfuerzo normal y cortante.
- c. Para cada secuencia de esfuerzo, el valor de módulo resiliente es calculado para los últimos cinco ciclos aplicados y son subsecuentemente promediados.
- d. Los ciclos de carga consisten en pulsos repetitivos de forma haversiana. Estos pulsos tienen una duración de 0,1 segundos de carga y 0,9 segundos de periodo de descanso.

- e. En la Figura 12 se observa la forma en que se aplican estas pulsaciones y la manera en que las deformaciones axiales son recuperables (ϵ_a) y la acumulación de las deformaciones axiales permanentes (ϵ_{pe}) en cada ciclo de carga.

Cuadro 4. Secuencia de ensayo propuesta para materiales de base estabilizada con cemento

N° secuencia	Presión de confinamiento		Esfuerzo axial máximo		Esfuerzo desviador cíclico		Esfuerzo de contacto,		Cantidad de aplicaciones de carga
	S_3		S_{max}		$S_{cíclico}$		$S_{contacto}$		
	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	
Acondicionamiento									1000
0	103,4	15	103,4	15	93,1	13,5	10,3	1,5	100
1	20,7	3	20,7	3	18,6	2,7	2,1	0,3	100
2	20,7	3	41,4	6	37,3	5,4	4,1	0,6	100
3	20,7	3	62,1	9	55,9	8,1	6,2	0,9	100
4	34,5	5	34,5	5	31	4,5	3,5	0,5	100
5	34,5	5	68,9	10	62	9,0	6,9	1,0	100
6	34,5	5	103,4	15	93,1	13,5	10,3	1,5	100
7	68,9	10	68,9	10	62	9,0	6,9	1,0	100
8	68,9	10	137,9	20	124,1	18,0	13,8	2,0	100
9	68,9	10	206,8	30	186,1	27,0	20,7	3,0	100
10	103,4	15	68,9	10	62	9,0	6,9	1,0	100
11	103,4	15	103,4	15	93,1	13,5	10,3	1,5	100
12	103,4	15	206,8	30	186,1	27,0	20,7	3,0	100
13	137,9	20	103,4	15	93,1	13,5	10,3	1,5	100
14	137,9	20	137,9	20	124,1	18,0	13,8	2,0	100
15	137,9	20	275,8	40	248,2	36,0	27,6	4,0	100
16	172,3	25	172,3	25	207,1	30,0	20,7	3,0	100
17	172,3	25	344,6	50	238,1	34,5	23,8	3,5	100
18	172,3	25	344,6	50	362,2	52,5	36,2	5,3	100
19	206,7	30	206,7	30	273,3	39,6	27,3	4,0	100
20	206,7	30	413,4	60	304,3	44,1	30,4	4,4	100
21	206,7	30	413,4	60	428,4	62,1	42,8	6,2	100
22	241,1	35	241,1	35	339,4	49,2	33,9	4,9	100
23	241,1	35	482,2	70	370,4	53,7	37,0	5,4	100
24	241,1	35	482,2	70	494,5	71,7	49,4	7,2	100
25	275,5	40	275,5	40	405,5	58,8	40,6	5,9	100
26	275,5	40	551	80	436,5	63,3	43,7	6,3	100
27	275,5	40	551	80	560,6	81,3	56,1	8,1	100
28	309,9	45	309,9	45	471,6	68,4	47,2	6,8	100
29	309,9	45	619,8	90	502,6	72,9	50,3	7,3	100
30	309,9	45	619,8	90	626,7	90,9	62,7	9,1	100

Figura 12. Resultados típicos de la prueba de aplicación de carga cíclica (Hanifa, Abu-Farsakh, & Gaut, 2015)



Por otra parte, es conocido que la mayoría de los materiales en un pavimento no se comportan de manera elástica, pero por experiencia se manifiestan algunas deformaciones permanentes ante la aplicación de cargas. Sin embargo, si estas cargas son pequeñas en comparación con los esfuerzos de los materiales y las cargas son repetitivas por un gran número de veces, las deformaciones bajo la repetición de esas cargas serán completamente recuperables y proporcionales a la carga y, por tanto, podrían ser consideradas elásticas. Esta suposición es ciertamente verdadera para capas de base de suelo-cemento (Scullion, Uzan, Hilbrich, & Chen, 2008). A partir de 100 a 200 repeticiones, las deformaciones son prácticamente recuperables.

Ahora bien, las relaciones desarrolladas con respecto a otros parámetros para determinar el módulo resiliente son muy valiosas en el enfoque jerárquico del diseño de pavimentos para su incorporación en el diseño y análisis de nivel II. En una investigación publicada por la revista TRR (Rashidi, Reza, Si, Izzo, & McDaniel, 2018), menciona que el artículo realizado fue precisamente diseñado para proveer una serie de prácticas y relaciones robustas entre pruebas rutinarias de laboratorio y los parámetros necesarios para el diseño de pavimento. En el estudio se comparan parámetros como el contenido de cemento (C), la Resistencia a la Tracción Indirecta (IDT, por sus siglas en inglés), la resistencia a la compresión confinada (UCS), el Módulo Submáximo (o relación de esfuerzo, SR) y el módulo resiliente en bases estabilizadas con cemento. Las ecuaciones 21, 22, 23 y en la Figura 13, corresponden a los modelos del módulo resiliente (M_r) en función de los parámetros estudiados en dicha investigación.

$$M_r = 652,85 \times e^{0,4262 \times (C-1)} \quad (R^2 = 0,99) \quad \text{Ecuación 21}$$

donde, M_r = Módulo resiliente (ksi); y

C = Porcentaje de cemento en la mezcla (%)

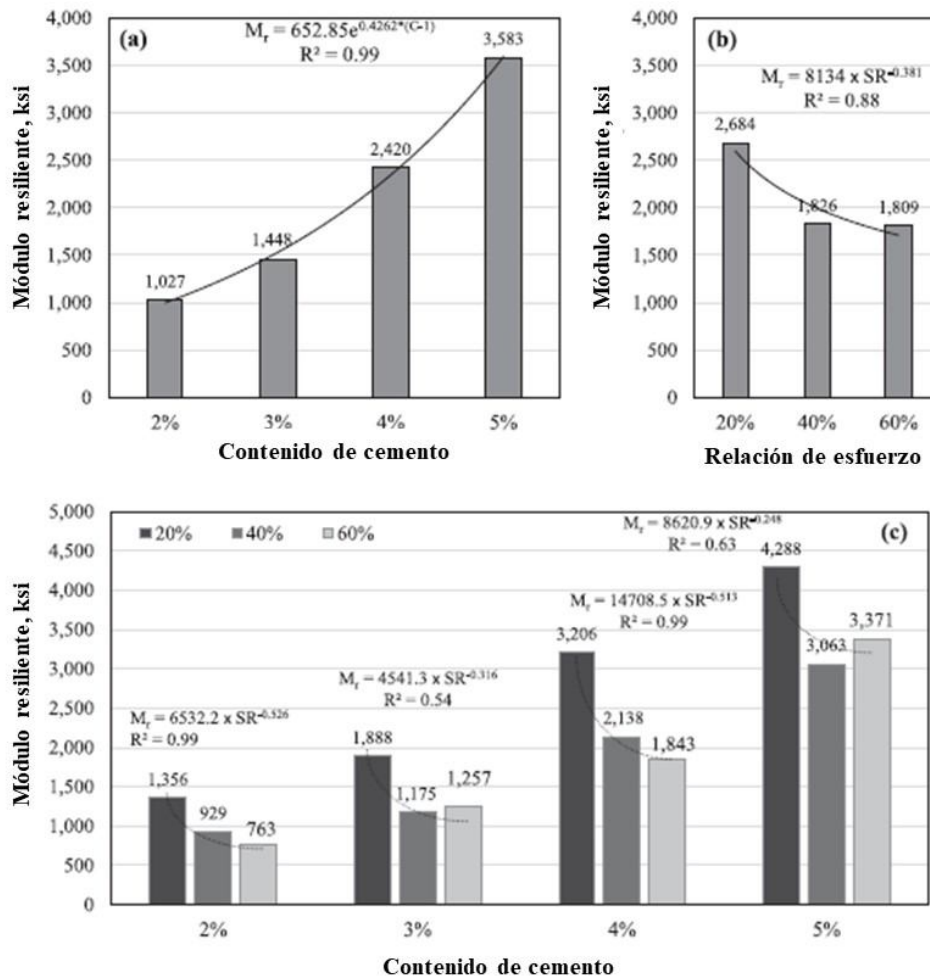
$$M_r = 10,33 \times UCS - 2622 \quad (R^2 = 0,53) \quad \text{Ecuación 22}$$

$$M_r = 7,40 \times UCS - 1940 \quad (R^2 = 0,81) \quad \text{Ecuación 23}$$

donde, M_r = Módulo resiliente (ksi); y

UCS = Resistencia a la compresión inconfiada – 7 días (psi)

Figura 13. Efectos de (a) contenido de cemento (b), y (c) relación de esfuerzos, sobre el módulo resiliente (Rashidi, Reza, Si, Izzo, & McDaniel, 2018)



Una de las preocupaciones más relevante del por qué conocer el módulo resiliente en las bases estabilizadas, es porque aparecen microagrietamientos por contracción. Con agregados de buena calidad se obtienen fácilmente altos valores de resistencia y de módulo aun utilizando bajos porcentajes de cemento, ambos parámetros están directamente ligados con el fenómeno del agrietamiento, pero no son los únicos. Dependiendo del espesor y ancho de la capa, las grietas transversales suelen presentarse en espaciamientos que oscilan entre 3 y 7 metros. En función de la resistencia a compresión a 7 días se puede

estimar cualitativamente, el agrietamiento de las bases estabilizadas con cemento según el criterio presentado en el Cuadro 5 (Arce, 2011).

Cuadro 5. Tipos de agrietamiento asociados a la resistencia a la compresión a los 7 días

Resistencia a la compresión, 7 días (UCS_{7d})	Tipo de agrietamiento
$UCS_{7d} \leq 20 \text{ kg/cm}^2$	Agrietamiento muy leve o imperceptible
$20 \text{ kg/cm}^2 \leq UCS_{7d} \leq 30 \text{ kg/cm}^2$	Agrietamiento de muy leve a leve
$30 \text{ kg/cm}^2 \leq UCS_{7d} \leq 40 \text{ kg/cm}^2$	Agrietamiento de leve a moderado
$40 \text{ kg/cm}^2 \leq UCS_{7d} \leq 55 \text{ kg/cm}^2$	Agrietamiento de moderado a alto
$UCS_{7d} \geq 60 \text{ kg/cm}^2$	Agrietamiento de alto a severo

Arce en su publicación (2011), establece lo siguiente:

El agrietamiento de la base estabilizada, especialmente a un nivel igual o inferior al aquí señalado como moderado, no afecta negativamente, ni la vida útil ni el desempeño a largo plazo de la estructura del pavimento, siempre y cuando el diseño en laboratorio, así como el proceso constructivo y de control de calidad de la base se haya ejecutado correctamente.

Se debe considerar entonces dentro del diseño, la dosificación del cemento óptima y por ende, medir o al menos estimar correctamente el módulo del material estabilizado, en donde sea posible controlar la aparición de grietas prematuras para reducir el daño sobre la vida útil de la capa de base.

Lo anterior con especial cuidado durante el proceso constructivo, porque el microagrietamiento, consiste en la fisuración de la capa estabilizada luego de haber sido compactada, mediante la aplicación de esfuerzos vibratorios con un rodillo o compactador (Ávila, Sequeira, & Aguiar, 2020).

2.4.5 Fatiga en bases estabilizadas con cemento

El máximo agrietamiento permitido antes de que una base estabilizada con cemento falle por fatiga es del 25 %, según investigaciones propuestas por la PCA (Scullion, Uzan, Hilbrich, & Chen, 2008). La vida útil de la base estabilizada se calcula de acuerdo a la Ecuación 24, evaluado en la fibra inferior de esta capa.

$$N_f = \left[\left(\frac{\beta_{c4}}{\sigma_t / M_{rup}} \right) \beta_{c3} \right]^{20} \quad \text{Ecuación 24}$$

donde,

N_f : Número de repeticiones de carga que soporta la capa antes de alcanzar el agrietamiento por fatiga de la base estabilizada;

M_{rup} : Módulo de ruptura a los 28 días (resistencia a flexión) (psi);

$\beta_{c3} = 1,0259$ y $\beta_{c4} = 1,1368$, para granular (psi); y

$\beta_{c3} = 0,6052$ y $\beta_{c4} = 2,1154$, para material fino (psi).

2.4.6 Módulo de ruptura M_{rup}

La resistencia a la flexión o a la tracción de un material mejorado o estabilizado con cemento es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga, lo cual se conoce como módulo de ruptura (M_{rup}), y representa cerca del 10% al 20% de la resistencia a la compresión inconfiada (Hidalgo, 2018).

A manera de referencia en el Cuadro 6 se muestran rangos típicos para el módulo de ruptura y para otros de los parámetros más usados en bases estabilizadas con cemento.

Cuadro 6. Propiedades de las bases estabilizadas con cemento (PCA, 2006)

Propiedad	Valores a los 7 días
Esfuerzo a la compresión	2,1-5,5 MPa (300-800 psi)
Módulo de ruptura	0,7-1,4 MPa (100-200 psi)
Módulo de elasticidad	4 100-6 900 MPa (600 000-1 000 000 psi)
Módulo de Poisson	0,15

En caso de no contar con datos de laboratorio para este parámetro es posible estimar el módulo de ruptura en función de la resistencia a la compresión inconfiada, UCS. La Ecuación 25 fue propuesta para obtener el M_{rup} a los 28 días de curado (Scullion, Uzan, Hilbrich, & Chen, 2008).

$$M_{rup} = 5,2851 \cdot \sqrt{UCS} \quad \text{Ecuación 25}$$

3. Caracterización y preparación del material de estudio

3.1 Ubicación del lugar de muestreo

El material granular utilizado como insumo de la base estabilizada con cemento de esta investigación, fue muestreado en el Quebrador del Km 49+000, el mismo fue donado por la empresa China Harbour Engineering (CHEC), a través del ingeniero Salvador Velásquez. El agregado es extraído de la cuenca de dominio público (CDP) Chirripó Norte, cuyo proceso de extracción y fraccionamiento se ubica en el kilómetro 49 del proyecto de ampliación de la ruta nacional 32, cercano a la intersección con la ruta nacional 4, en Limón, como se observa en la Figura 14.

Figura 14. Ubicación del Quebrador km 49, administrado por la empresa CHEC (CONAVI, 2019)



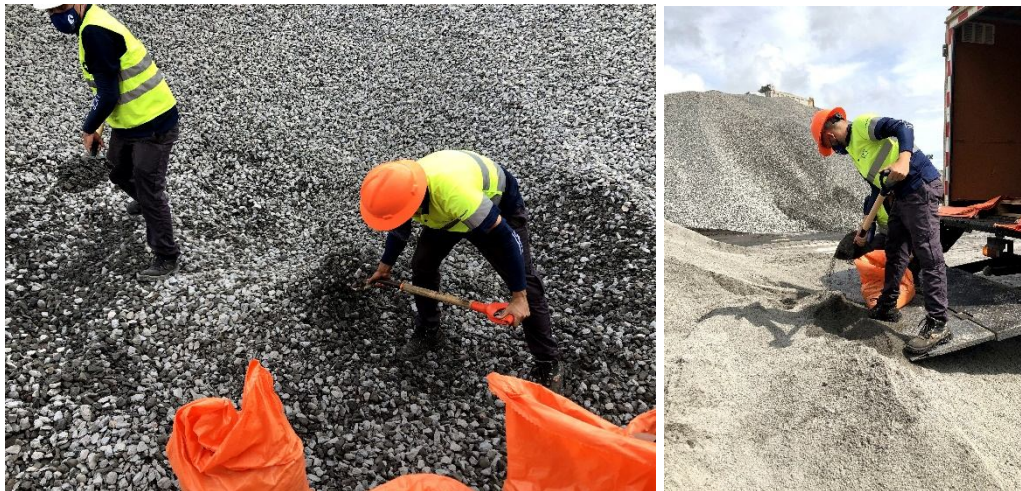
El material es de color grisáceo claro y presenta algunas betas amarillas en la fracción gruesa. En la fracción fina color gris oscuro. La graduación se conforma por la combinación de 60 % fino y 40 % grueso, de acuerdo a lo que se utilizó para los tramos de la Rama 1 en el proyecto de la ampliación de la ruta 32. En la Figura 15 se observan los apilamientos de donde se tomó las muestras del material grueso y fino.

Figura 15. Apilamientos de agregado grueso y fino en el quebrador muestreado



El material fue muestreado por la autora en colaboración del personal técnico del LanammeUCR, siguiendo los procedimientos de muestreo de la norma ASTM D 75. La cantidad total muestreada fue de 22 sacos de cada apilamiento (aproximadamente 60 kg por saco). En la Figura 16, se observa parte del muestreo.

Figura 16. Muestreo de material granular utilizado para preparar la BEC de estudio



3.2 Ensayos de caracterización básica y datos relevantes del material granular

El material muestreado inicialmente fue homogenizado y combinado según las proporciones establecidas en el proyecto de ampliación de la ruta nacional 32, con el fin de replicar la granulometría y obtener resultados comparables. El material combinado se almacenó en baldes de 5 galones para mantener la humedad de muestreo y así evitar que se perdiera material fino o se segregara. Posterior a esto se tamizó en 3 fracciones para la conformación de los baches respectivos. En la Figura 17 se presenta el proceso de tamizado y almacenamiento del material ya combinado y fraccionado.

Figura 17. Tamizado y almacenamiento del material granular

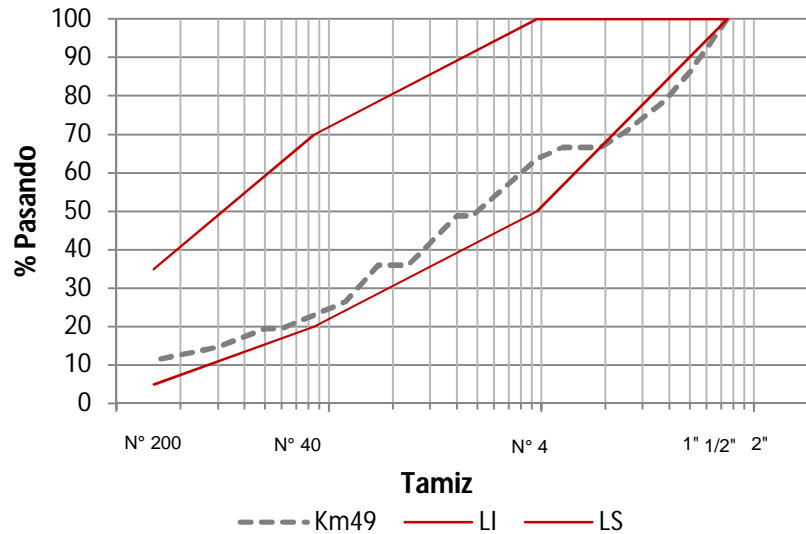
Después de la combinación del agregado se llevó a cabo la caracterización del material combinado: granulometría y el Próctor Modificado, ambos necesarios para la conformación de los especímenes de ensayo de resistencia requeridos. En el Cuadro 7 y en la Figura 15 se presentan los resultados de la granulometría y la banda de especificación del CR-2010 para una base estabilizada BE-25, Sección 703.21.

Cuadro 7. Graduación del material granular utilizado en el estudio ⁽¹⁾

Tamiz	Tamaño (mm)	%Pasando	Especificaciones CR-2010	
			LI	LS
1 1/2"	37,5	100	100	100
1"	25,0	86		
3/4"	19,0	79		
1/2"	12,5	71		
3/8"	9,50	67		
1/4"	6,3	67		
Nº 4	4,75	64	50	100
Nº 8	2,36	49		
Nº 10	2,00	49		
Nº 16	1,18	36		
Nº 20	0,85	36		
Nº 30	0,600	27		
Nº 40	0,425	23	20	70
Nº 50	0,300	20		
Nº 60	0,250	20		
Nº100	0,150	14,7		
Nº200	0,075	11,3	5	35

⁽¹⁾ Resultados de ensayo realizado por el Laboratorio de Concreto, LanammeUCR.

Figura 18. Curva granulométrica del material granular combinado 60 % fino - 40 % grueso



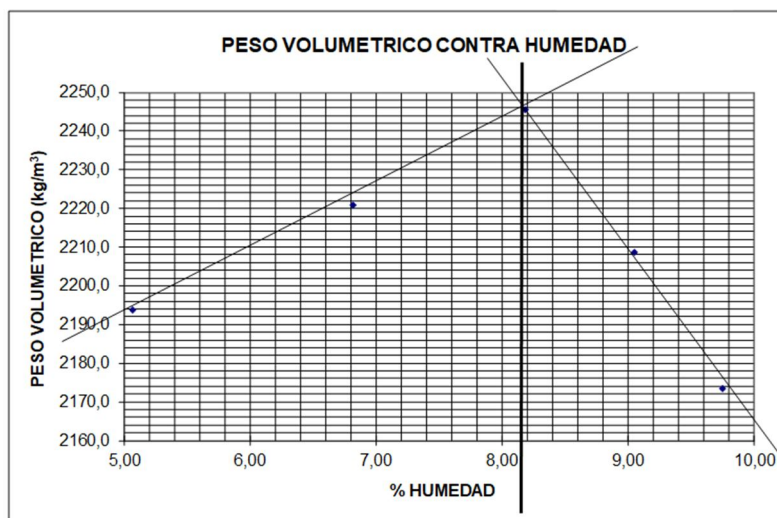
Los resultados de contenido de humedad y densidad máxima a partir del ensayo del Próctor modificado AASHTO T 180 se indican en el Cuadro 8 y Figura 19.

Cuadro 8. Resultados del contenido de humedad y densidad máxima seca ⁽¹⁾

Método	Próctor modificado (AASHTO T 180)	
Contenido de humedad óptimo	8,20	%
Densidad seca máxima	2245,6	kg/m ³

⁽¹⁾ Resultados de ensayo realizado por el Laboratorio de Geotecnia, LanammeUCR.

Figura 19. Gráfica de la relación densidad - humedad del material granular mediante método Próctor modificado, aportado por el Laboratorio de Geotecnia, LanammeUCR



Los demás datos de la caracterización del agregado fueron suministrados por la Unidad de Auditoría Técnica del LanammeUCR, como parte de la información del proyecto de ampliación de la ruta 32. Esto se presentó en el informe de resultados de ensayos 75-309-2019 OJM, la cual se resume en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Resumen de características del agregado para ser usado en la preparación de la base estabilizada con cemento

Límites Atterberg ASHTO T-89/ T-90		
Parámetro	Resultado	Especificación
Límite Líquido (LL)	N.P.	40 máx.
Límite Plástico (LP)	N.P.	-
Índice Plástico	N.P.	8 máx.
CBR AASHTO T-193		
Parámetro	Resultado	Especificación
CBR	> 80%	> 80%
GBS grueso AASHTO T-85		
Parámetro	Resultado	Especificación
GBS grueso	2,645	-
GBSSS	2,685	-
GS	2,754	-
% Abs	1,5	-
GBS fino AASHTO T-84		
Parámetro	Resultado	Especificación
GBS fino	2,622	-
GBSSS	2,669	-
GS	2,751	-
% Abs	1,8	-
Caras fracturadas ASTM D 5821		
Parámetro	Resultado	Especificación
1 cara	100%	-
2 o + caras	95%	-
Sin caras	0%	-
Peso unitario (grueso) INTE C-58		
Parámetro	Resultado	Especificación
Peso unitario suelto	1571	-
Peso unitario envarillado	1649	-
Peso unitario (fino) INTE C-58		
Parámetro	Resultado	Especificación
Peso unitario suelto	1611	-
Peso unitario envarillado	1702	-
Durabilidad AASHTO T-210		
Gruesos	96%	35 % mín.
Finos	80%	35 % mín.

En la Figura 20 se muestra el proceso para la homogenización y combinación del material según las proporciones establecidas.

Figura 20. Combinación del material y homogenización



3.3 Descripción del cemento utilizado en el proyecto

El cemento seleccionado para la estabilización del material en la investigación es de tipo MM/C (C-P)-28 según el Reglamento Técnico de Costa Rica, RTCR 479:2015. Este cemento cumple con la norma ASTM C 1157 para el cemento Tipo UG (Uso General).

El Cemento Holcim FUERTE es obtenido por la molienda conjunta y uniforme de Clinker tipo Portland, y minerales naturales (caliza de alta ley y puzolana), en proporciones que van del 36% al 55% en peso del cemento. En el Cuadro 10 se presenta un resumen de las propiedades del cemento.

Cuadro 10. Resumen de propiedades del cemento tipo UG utilizado en el estudio ⁽¹⁾

	Cemento Holcim Fuerte	RTCR 479:2015	ASTM C1157 GU
% Óxido de magnesio (M ₈ O)	≤ 3,0	≤ 6,0	≤ 6,0
% Trióxido de azufre (SO ₃)	≤ 3,0	≤ 4,0	≤ 4,0
Clinker	45-64	45-64	-
Adiciones minerales	36-55	36-55	-
Otros	0-5	0-5	-

⁽¹⁾ En el Anexo AX.1 se incluyen las demás características del cemento (Tomado de la ficha técnica, Holcim).

3.4 Preparación de especímenes y condiciones de ensayo

3.4.1 Conformación de la muestra

Para la conformación de cada espécimen de ensayo se requirió eliminar los sobre tamaños que se retienen en la malla 19 mm (3/4"). Sin embargo, debió sustituirse ese porcentaje con material pasando 19 mm (3/4") y retenido en la malla 12,5 mm (1/2"), para compensar el tamaño eliminado. Asimismo, se divide el material en las siguientes fracciones (Ulloa & Múnera, 2020):

- Pasando la malla 19 mm (3/4") y retenido en la malla 12,5 mm (1/2").
- Pasando la malla 12,5 mm (1/2") y retenido en la malla 4,75 mm (No. 4).
- Pasando la malla 4,75 mm (No. 4).

Luego se determina el contenido de humedad higroscópica, según la norma ASTM D 2216, de la muestra conformada y se almacenó la muestra en un recipiente hermético para evitar variaciones en la humedad, como se muestra en la Figura 21.

Figura 21. Almacenamiento del material tamizado y dividido en fracciones



3.4.2 Compactación en laboratorio

La densidad que se logre en la compactación es de vital importancia para el desempeño final del material. Usualmente se especifica la densidad mínima como un porcentaje de la densidad del Proctor Modificado, entre 98 % y 100 % para bases estabilizadas.

El método de compactación que se empleó en el laboratorio buscó reproducir lo mejor posible la densidad en el campo, así como la orientación de las partículas después de la compactación. Los tipos de compactación, el tamaño de los moldes y cantidad de golpes o segundos de vibración se indican en el Cuadro 11 y en la Figura 22 se muestra la dosificación del cemento para diferentes contenidos de humedad-densidad.

Figura 22. Dosificación de cemento y agua para la determinación de la humedad-densidad mediante compactación vibratoria



Cuadro 11. Resumen de métodos de compactación para los diferentes ensayos de la base estabilizada con cemento

Ensayo	Método de compactación	Tamaño de especímenes	Equipo	Características de la compactación
Contenido de humedad-densidad óptima	Vibración	150 mm de diámetro y 95 mm de altura	Martillo vibratorio	2 capas de 47,5 mm Tiempo de compactación 60 segundos
Diseño de la Base estabilizada	Próctor modificado	101 mm de diámetro y 101 mm de altura	Mazo Próctor modificado	5 capas con 25 golpes por capa
Compresión inconfiada (UCS)	Próctor modificado	101 mm de diámetro y 101 mm de altura	Mazo Próctor modificado	5 capas con 25 golpes por capa
Módulo elástico (ME)	Vibración	101 mm de diámetro y 203 mm de altura	Martillo vibratorio	6 capas de 57,2 mm Frecuencia de percusión (min-1): 900-1890
Módulo resiliente (MR)				Energía aplicada, para masa de martillo de 25 kg (J): 1574 Tiempo de aplicación (s): 30

En las imágenes de la Figura 23 se ejemplifica cada uno de los métodos de compactación utilizados para la investigación.

Figura 23. Compactación de especímenes de ensayo a) Compactación para la humedad-densidad (Vibratorio) b) Compactación del diseño de BEC (PM) c) Compactación de módulo elástico (Vibratorio) d) Compactación de módulo resiliente (Vibratorio)



a)



b)



c)



d)

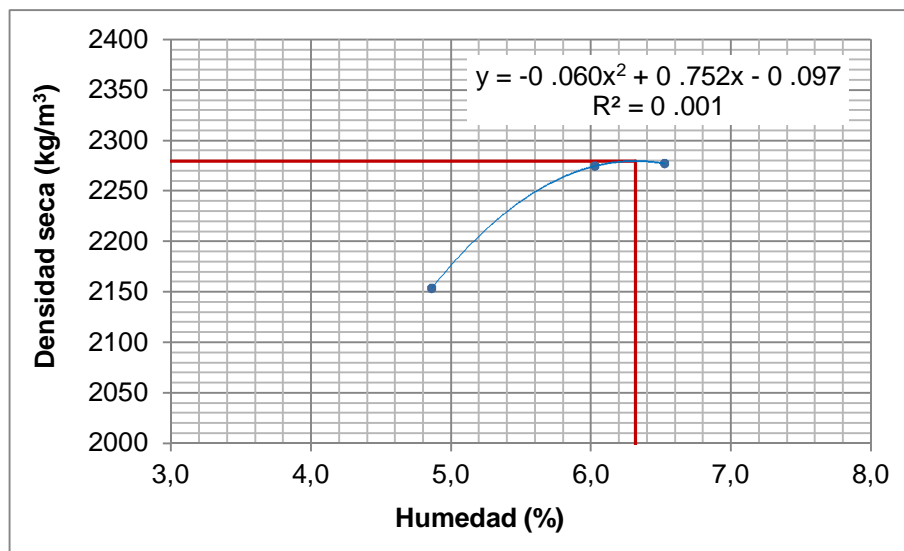
Se obtuvo además el contenido de humedad óptimo y la densidad máxima seca para cada porcentaje de cemento a utilizar en los ensayos de resistencia. Esto se compactó mediante compactación vibratoria y sustituyendo el agregado superior al tamaño de 19 mm, como se explicó anteriormente. Los datos de estos resultados se presentan en los Cuadros 12, 13,

14 y 15, y en las Figuras 24, 25 y 26, respectivamente para los contenidos de cemento 2 %, 3 % y 5 %.

Cuadro 12. Resultados del contenido de humedad y densidad máxima seca para 2 % de cemento

Método	Compactación vibratoria	
Diámetro del molde	150 mm	
Densidad seca máxima	2280	kg/m ³
Contenido de humedad óptimo	6,32	%

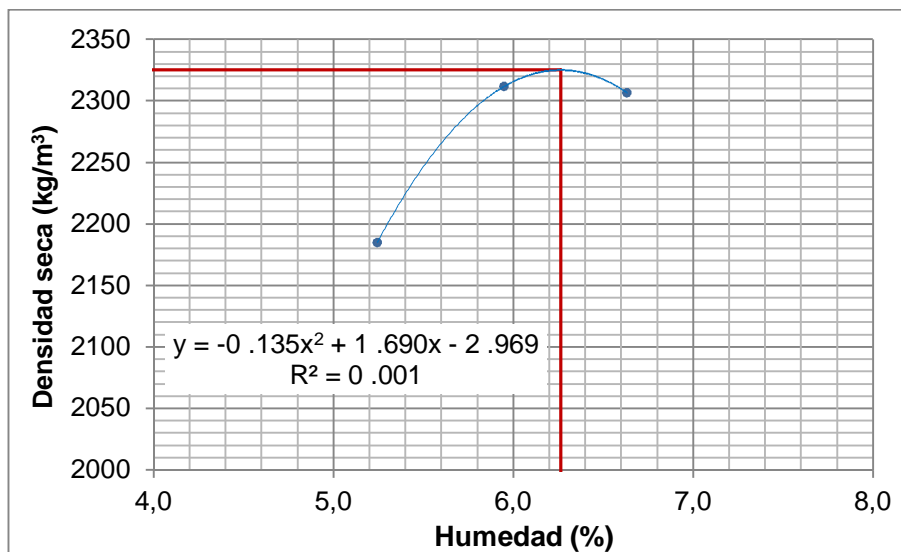
Figura 24. Gráfica de la relación densidad - humedad del material estabilizado con 2 % de cemento mediante compactación vibratoria



Cuadro 13. Resultados del contenido de humedad y densidad máxima seca para 3 % de cemento

Método	Compactación vibratoria	
Diámetro del molde	150 mm	
Densidad seca máxima	2325	kg/m ³
Contenido de humedad óptimo	6,26	%

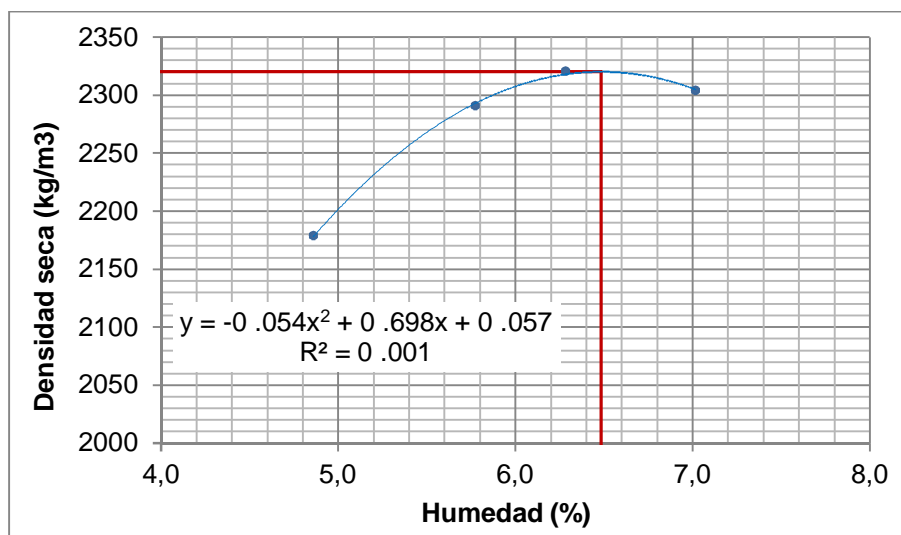
Figura 25. Gráfica de la relación densidad - humedad del material granular con 3 % de cemento mediante compactación vibratoria



Cuadro 14. Resultados del contenido de humedad y densidad máxima seca para 5 % de cemento

Método	Compactación vibratoria	
Diámetro del molde	150 mm	
Densidad seca máxima	2320	kg/m ³
Contenido de humedad óptimo	6,48	%

Figura 26. Gráfica de la relación densidad - humedad del material granular con 5 % de cemento mediante compactación vibratoria



Cuadro 15. Resumen del contenido de humedad y densidad máxima seca para los tres diferentes contenidos de cemento

Contenido de cemento (%)	Densidad seca máxima (kg/m ³)	Contenido de humedad óptimo (%)
2	2280	6,32
3	2325	6,26
5	2320	6,48

3.4.3 Período de curado

Posterior a la compactación, cada grupo de especímenes del esquema experimental (2 especímenes por combinación), fueron llevados a la cámara húmeda para permanecer ahí según dos tiempos de curado: 7 días y 28 días. En la Figura 27 se observa los especímenes durante el periodo de curado.

Figura 27. Curado de especímenes antes de cada ensayo de resistencia: 7 días y 28 días



4. Resultados de ensayos de laboratorio

4.1 Diseño de base estabilizada con cemento

Para la determinación del porcentaje de cemento óptimo se siguió el procedimiento indicado en el apartado anterior, con el objetivo de cumplir una resistencia a la compresión inconfiada promedio de 3,0 MPa (30 kg/cm²), de acuerdo a lo establecido en la Sección 302 del CR-2010.

El contenido de humedad óptima y densidad máxima seca de referencia para la compactación de los 9 especímenes del diseño fueron tomados del resultado del ensayo de Proctor modificado, en este caso se consideraron tres diferentes porcentajes de cemento 1%, 3% y 5%. El tipo de compactación se llevó a cabo de acuerdo al Cuadro 10, y el tiempo de curado fue de 7 días en la cámara húmeda antes de la falla a compresión inconfiada.

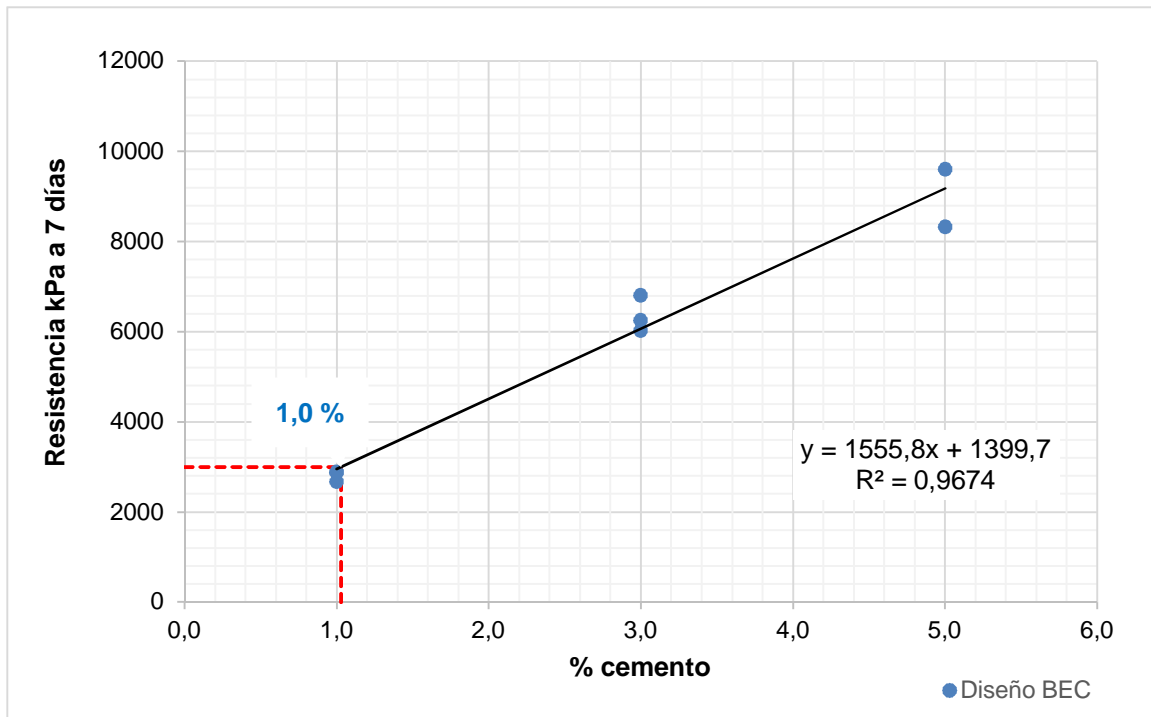
Los valores de densidad máxima seca y humedad óptima del material de base estabilizada con cemento y los resultados de resistencia a la compresión para los tres contenidos de cemento se resumen en el Cuadro 16. En la Figura 28 se presenta la gráfica con el porcentaje óptimo de cemento del diseño para la resistencia solicitada.

Cuadro 16. Resultados de resistencia a la compresión inconfiada para tres contenidos de cemento diferentes, 7 días de curado

No. Espécimen	% Cemento	Área transversal (cm ²)	Carga máxima (kN)	Esfuerzo máximo (kPa)	Esfuerzo promedio (kPa)	Edad de falla (días)	Cumplimiento de planicidad
1	1	81,42	23,4	2874		7	Arriba-Sí Abajo-Sí
2	1	81,37	21,7	2667	2809	7	Arriba-Sí Abajo-No
3	1	81,39	23,5	2887		7	Arriba-No Abajo-Sí
4	3	81,44	50,9	6250		7	Arriba-Sí Abajo-Sí
5	3	81,36	49	6023	6359	7	Arriba-Sí Abajo-Sí
6	3	81,56	55,5	6805		7	Arriba-No Abajo-Sí
7	5	81,49	67,8	8320		7	Arriba-Sí Abajo-Sí
8	5	81,57	78,3	9599	8960	7	Arriba-Sí Abajo-Sí
9 ⁽¹⁾	5	-	-	-		-	Arriba-Sí Abajo-Sí

(1) El espécimen se destruyó al momento de extraerlo del molde.

Figura 28. Gráfica del porcentaje de cemento óptimo del diseño de base estabilizada



La preparación y compactación de los especímenes para el ensayo de resistencia a la compresión confinada, el módulo resiliente y el módulo de elasticidad se realizaron de acuerdo al apartado 3.4. Los contenidos de cemento, contenidos de humedad y periodos de curado se consideraron según las combinaciones establecidas en el esquema planteado, Figura 2.

4.2 Resistencia a la compresión confinada (UCS)

Los resultados de las resistencias UCS de la base estabilizada para todas las combinaciones de porcentaje de cemento y contenido de agua dosificados, y para ambos tiempos de curado se resumen en el apéndice A.1, Cuadro A.1.

En el Cuadro 17 se establecen los rangos de los resultados para este ensayo. Las resistencias más altas se obtuvieron cuando se compactó con la humedad óptima, como era de esperarse; pero esto únicamente ocurrió para los tiempos de curado de 7 días. Cuando los curados fueron de 28 días, por el contrario, al aumentar los contenidos de humedad las resistencias fueron mayores. Esto quizá se deba a que el cemento pudiera estar reaccionando a más largo plazo en presencia de mayor humedad.

Por otro lado, aún para porcentajes bajos de cemento, las resistencias resultaron mayores a los 3,0 MPa promedio de la especificación, lo que hace propenso al material estabilizado, a presentar agrietamientos por contracción térmica, de un nivel moderado a alto, según lo estudiado (Cuadro 5), a pesar de que cualitativamente no se observó ninguna grieta después del curado. Por tanto, es de suma importancia la escogencia del contenido de

cemento en el diseño de los materiales estabilizados con cemento o cal, en los que logra alcanzar altas resistencia aún en pocos días de la compactación.

Cuadro 17. Resistencia a la compresión inconfiada de la BEC para dos tiempos de curado (MPa)

Combinación C-W	7 días	28 días
2C+Wopt	4,0	3,1
2C-1W	2,3	3,6
2C+1W	3,8	5,2
3C+Wopt	6,4	4,4
3C-1W	4,2	5,1
3C+1W	5,4	7,3
5C+Wopt	11,0	10,4
5C-1W	7,8	8,3
5C+1W	9,5	11,6
Rango	2,0 ~ 11,0	3,0 ~ 12,0
Promedio	6,0	6,6
S.D.	2,9	3,0
C.V.	48%	46%

C: Contenido de cemento (%)

W: Contenido de humedad respecto al óptimo (%), - 1 %, óptimo y + 1 %

En la Figura 29 se puede observar el proceso para la medición de la resistencia UCS de la base estabilizada con cemento. Por otra parte, se presentó un inconveniente que pudo afectar la calidad de los especímenes y con ello los resultados, el desnudamiento superficial que presentaron algunos de los especímenes durante el curado en la cámara húmeda, en especial aquellos con menor contenido de cemento, debido a que el rocío de los aspersores no permitió la humedad uniforme en la superficie de los especímenes, algunos de ellos presentaron desnudamiento principalmente en la capa superior, como se observa en la Figura 30.

Figura 29. Proceso de ensayo de resistencia a la compresión inconfiada de la BEC



Figura 30. Desnudamiento en la base estabilizada debido a un rocío de los aspersores no uniforme sobre los especímenes en la cámara húmeda



4.3 Módulo de elasticidad (M_E) en la base estabilizada

El ensayo presenta una alta variabilidad como se demuestra con el coeficiente de variación y no parece que los resultados muestren una tendencia al reducir o aumentar el contenido de humedad de compactación, aunque sí hay un incremento en el módulo elástico con el periodo de curado, al menos al compararlo por grupos de combinación. En el Cuadro 18 se presentan los resultados promedio de las diferentes dosificaciones de cemento y agua. Y en el apéndice A.2, se muestra el resumen de los resultados completos del ensayo.

A pesar de eso, el ensayo permite medir de manera directa las resistencias en el rango elástico ante cargas estáticas sostenidas, donde al menos los rangos resultantes son los esperados en bases estabilizadas con cemento.

Cuadro 18. Módulo de elasticidad de la BEC para dos tiempos de curado (MPa)

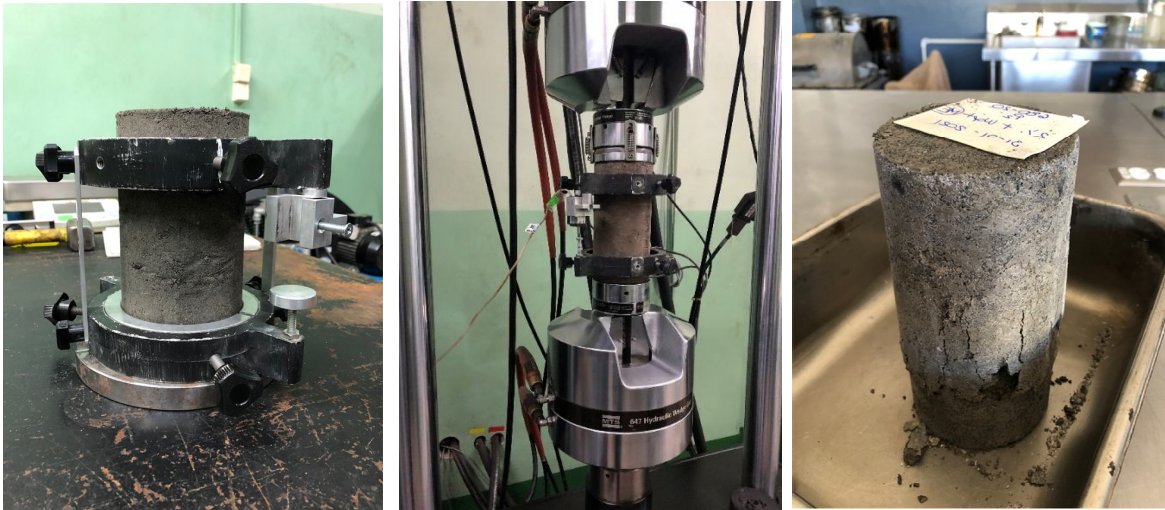
Combinación C-W	7 días	28 días
2C+Wopt	510	8 744
2C-1W	1 812	10 418
2C+1W	1 170	49 494
3C+Wopt	1 737	9 041
3C-1W	1 368	11 797
3C+1W	3 623	5 069
5C+Wopt	30 466	21 843
5C-1W	3 403	8 218
5C+1W	7 512	21 843
Rango	510 ~ 30 470	5 070 ~ 49 490
Promedio	5 733	16 274
S.D.	9 508	13 781
C.V.	166%	85%

C: Contenido de cemento (%)

W: Contenido de humedad respecto al óptimo (%), - 1 %, óptimo y + 1 %

En la Figura 31 pueden observarse algunas de las etapas del ensayo de módulo de elasticidad (M_E) en la BEC.

Figura 31. Ensayo de módulo de elasticidad de la BEC para ambos periodos de curado



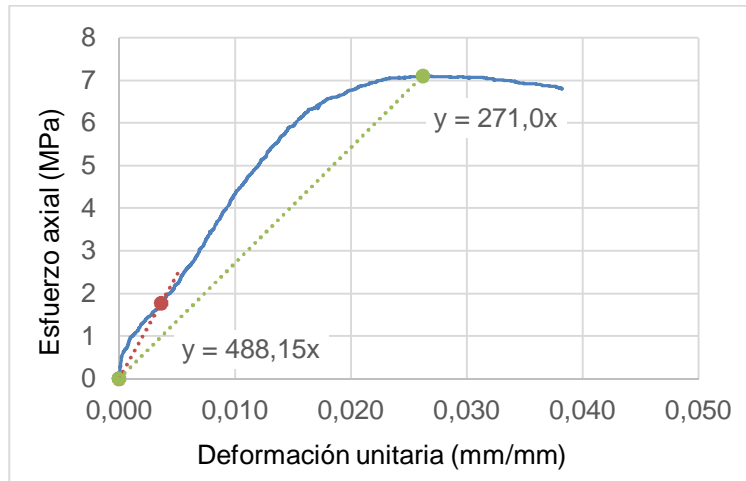
La compactación a menores contenidos de humedad fue complicada su manipulación y se debió compactar más especímenes hasta lograr que permanecieran intactos después del desmoldeo, esto se observa en la Figura 32.

En la Figura 33 se muestra las gráficas para el cálculo del M_E para los contenidos óptimos de humedad para contenido de cemento dosificado.

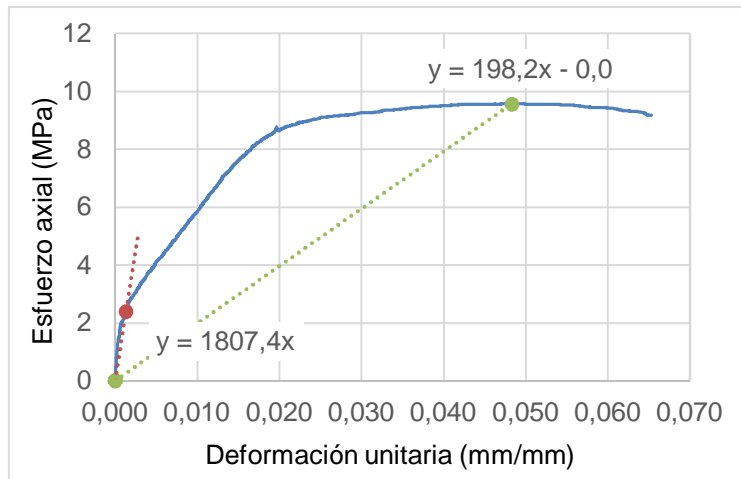
Figura 32. Complicaciones en la compactación de los especímenes con bajo contenido de humedad



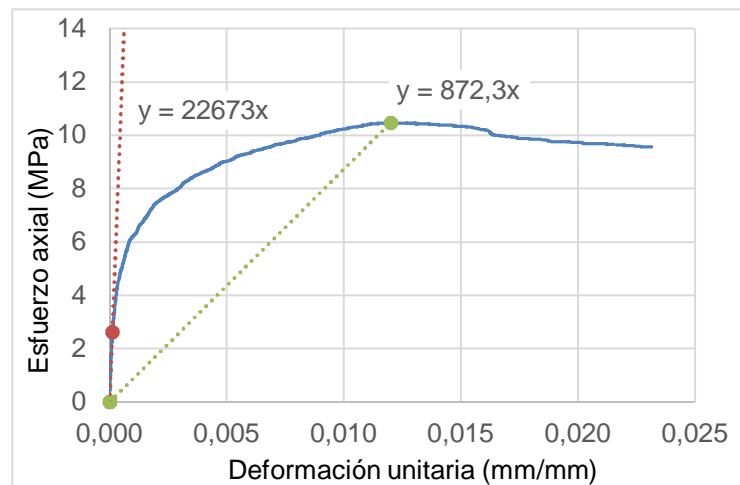
Figura 33. Gráficas del módulo elástico para diferentes porcentajes de cemento, a 7 días de curado: (a) 2 % C y Wopt, (b) 3 % C y Wopt, y (c) 5 % C y Wopt



(a)



(b)



(c)

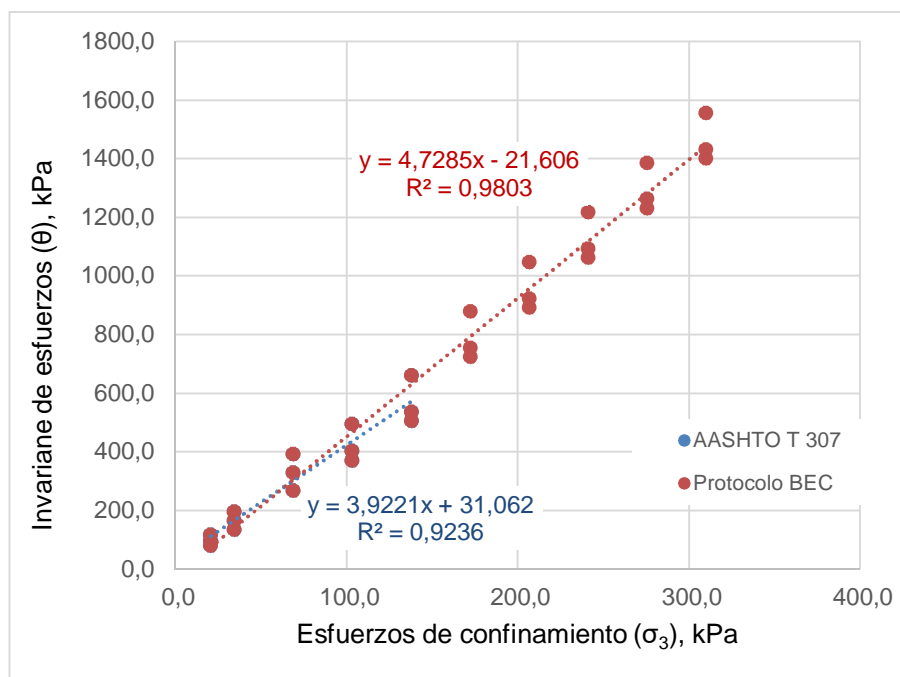
4.4 Módulo resiliente (M_r) en la base estabilizada (BEC)

4.4.1 Secuencia de esfuerzos proyectados

La magnitud de los esfuerzos de confinamiento y cíclicos desviadores definidos en el procedimiento de la norma estándar (AASHTO T 307), fueron diseñados para la capacidad promedio de materiales granulares, por tanto, su aplicación en materiales con mayor rigidez reaccionaría poco ante cargas bajas. Por esta razón, se debió plantear la aplicación de esfuerzos superiores, de manera que fuera posible medir una respuesta más adecuada del material estabilizado con cemento. Scullion et al, propusieron de manera similar en su investigación medir módulos resilientes a tres esfuerzos desviadores por arriba del mayor esfuerzo aplicado por AASHTO T 307: 206,8 kPa (30 psi), 344,7 kPa (50 psi) y 482,6 kPa (70 psi).

A partir de los esfuerzos de confinamiento (σ_3) y el invariante de esfuerzos (θ) establecidos en la norma AASHTO T 307, se calculó la tendencia entre los datos y se utilizó la ecuación de mejor ajuste para hallar 15 secuencias adicionales a los indicados en la norma. La gráfica mostrada en la Figura 34 se observa la proyección realizada; la línea azul muestra la ecuación con la cual se calcularon los nuevos esfuerzos cíclicos (σ_d) y de confinamiento (σ_3), expresados anteriormente en el Cuadro 4, la línea roja es la ecuación de la relación utilizando el conjunto total del invariante de esfuerzos (θ) vs los esfuerzos de confinamiento (σ_3).

Figura 34. Tendencia de la relación entre el invariante de esfuerzos (θ) y los esfuerzos de confinamiento (σ_3)



De esta manera se puede medir la respuesta en materiales de más rigidez, como las bases estabilizadas con cemento con contenidos de cemento mayores, sin poner en riesgo la capacidad del equipo para obtener los valores esperados.

4.4.2 Resultados obtenidos en la medición del módulo resiliente de la BEC

Los valores promedio y rangos de los módulos resiliente para los tres esfuerzos cíclicos o desviadores (σ_d) clave, se presentan en los Cuadros 19, 20 y 21. Los resultados completos obtenidos para ambos periodos de curado están disponibles en el apéndice A.3.

En la Figuras 35 y 36 se puede apreciar el proceso realizado en obtención del módulo resiliente de la base estabilizada con cemento.

Cuadro 19. Módulo resiliente (MPa) de la BEC para $\sigma_d = 207$ kPa y dos tiempos de curado

Combinación C-W	7 días	28 días
2C+Wopt	815	1 089
2C-1W	856	1 151
2C+1W	1 234	1 389
3C+Wopt	973	1 286
3C-1W	1 240	1 303
3C+1W	1 174	991
5C+Wopt	925	1 336
5C-1W	1 344	1 317
5C+1W	1 109	1 057
Rango	820 ~ 1 340	990 ~ 1 390
Promedio	1 075	1 213
S.D.	188	143
C.V.	18%	12%

C: Contenido de cemento (%)

W: Contenido de humedad respecto al óptimo (%), - 1 %, óptimo y + 1 %

Cuadro 20. Módulo resiliente (MPa) de la BEC para $\sigma_d = 335$ kPa y dos tiempos de curado

Combinación C-W	7 días	28 días
2C+Wopt	1 074	1 302
2C-1W	954	1 477
2C+1W	1 410	1 771
3C+Wopt	1 256	1 518
3C-1W	1 485	1 741
3C+1W	1 541	1 345
5C+Wopt	1 268	1 784
5C-1W	1 398	1 604
5C+1W	1 477	1 534
Rango	950 ~ 1 540	1 300 ~ 1 780
Promedio	1 516	1 769
S.D.	297	228
C.V.	15%	11%

C: Contenido de cemento (%)

W: Contenido de humedad respecto al óptimo (%), - 1 %, óptimo y + 1 %

Cuadro 21. Módulo resiliente (MPa) de la BEC para $\sigma_d = 483$ kPa y dos tiempos de curado

Combinación C-W	7 días	28 días
2C+Wopt	1 243	1 501
2C-1W	950	1 554
2C+1W	1 483	1 872
3C+Wopt	1 476	1 644
3C-1W	1 615	1 894
3C+1W	1 710	1 517
5C+Wopt	1 491	2 065
5C-1W	2 000	2 091
5C+1W	1 679	1 781
Rango	950 ~ 2 000	1 500 ~ 2 090
Promedio	1 516	1 769
S.D.	297	228
C.V.	20%	13%

C: Contenido de cemento (%)

W: Contenido de humedad respecto al óptimo (%), - 1 %, óptimo y + 1 %

Figura 35. Preparación de especímenes utilizando membrana de acetato y medición de especímenes de módulo resiliente en bases estabilizadas con cemento posterior al curado

Figura 36. Ensayo de módulo resiliente en la BEC para ambos periodos de curado

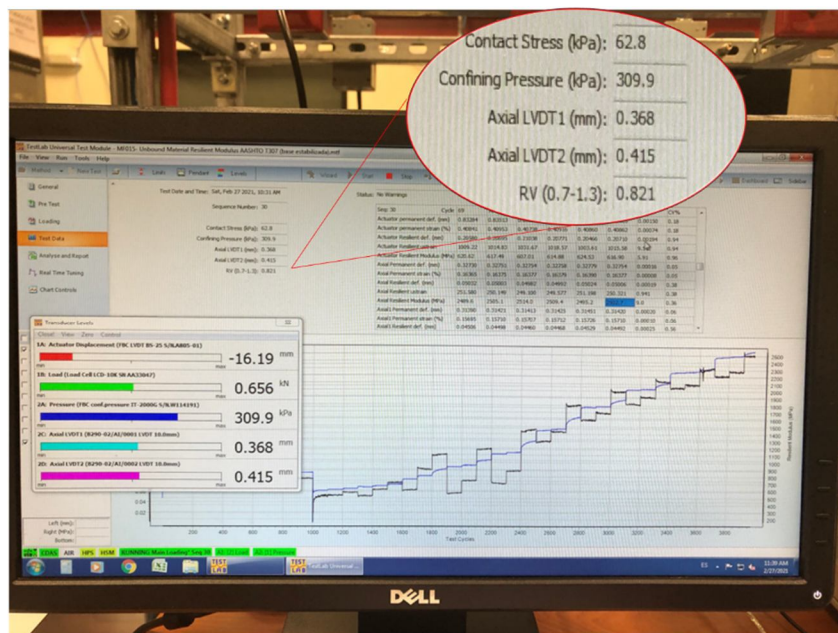


De lo anterior se tiene que la rigidez del material efectivamente aumenta al aplicar mayores esfuerzos desviadores y de confinamiento, lo que era de esperarse. Así mismo, es claro que, a mayores periodos de curado el módulo resiliente crece significativamente, esto también se suponía debido a que el cemento gana resistencia con el tiempo y con la hidratación. Al observar los coeficientes de variabilidad se puede decir que no es tan alta en comparación con la de los módulos de elasticidad, por lo que los resultados del ensayo son confiables y reproducibles para otras fuentes de agregado estabilizado con diferentes porcentajes de cemento.

Es importante mencionar que en la realización del ensayo se detectó que los especímenes deben poseer sus caras planas superior e inferior completamente planas, de lo contrario los resultados reportados en la medición estarían sesgados, lo cual se define por el valor RV (diferencia máxima admisible entre los reportes de deformación entre LVDT), el cual no debe ser superior a 1,3 durante todo los ciclos de carga, como lo establece la norma

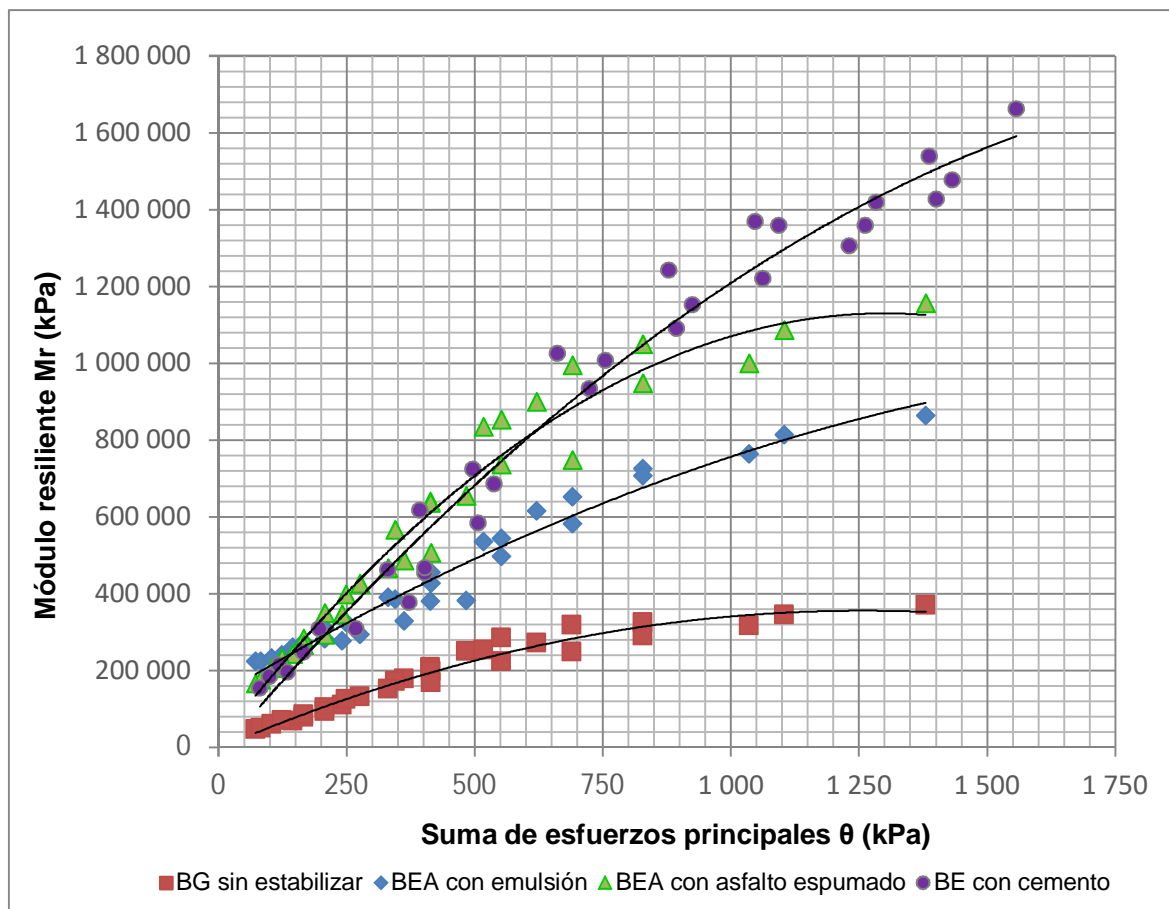
AASHTO T 307; en caso de superarse este valor, la prueba debe detenerse y corregir la planicidad en el espécimen mediante la limpieza de las caras o realizando un pequeño lijado en caso de observarse algún saliente. En la Figura 37 se muestra un espécimen que ha sido revisado y eliminado cualquier partícula suelta que pudiera haber aparecido posterior al desmolde o durante el curado.

Figura 37. Revisión y limpieza de caras planas de especímenes y control del RV durante el ensayo



La determinación del módulo resiliente en laboratorio en materiales estabilizados con diferentes agentes se ha tratado de medir en el pasado por parte del Laboratorio de Técnicas de Preservación del LanammeUCR, aplicando el protocolo de ensayo para materiales granulares sin ligar, aunque no se contaba con uno específico para rigideces y comportamientos de deformación distintos a la de los materiales originales sin estabilizar. En la Figura 38 se comparan los resultados de diferentes comportamientos de los materiales granulares estabilizados con distintos agentes, donde se aplicó el protocolo de ensayo estándar AASHTO T 307, en el caso de la base estabilizada con cemento se aplicó el propuesto en la investigación.

Figura 38. Gráfica comparativa entre los resultados de módulo resiliente para diferentes materiales estabilizados



* Siglas: BG: Base granular, BEA: Base estabilizada con asfalto, BE: Base estabilizada

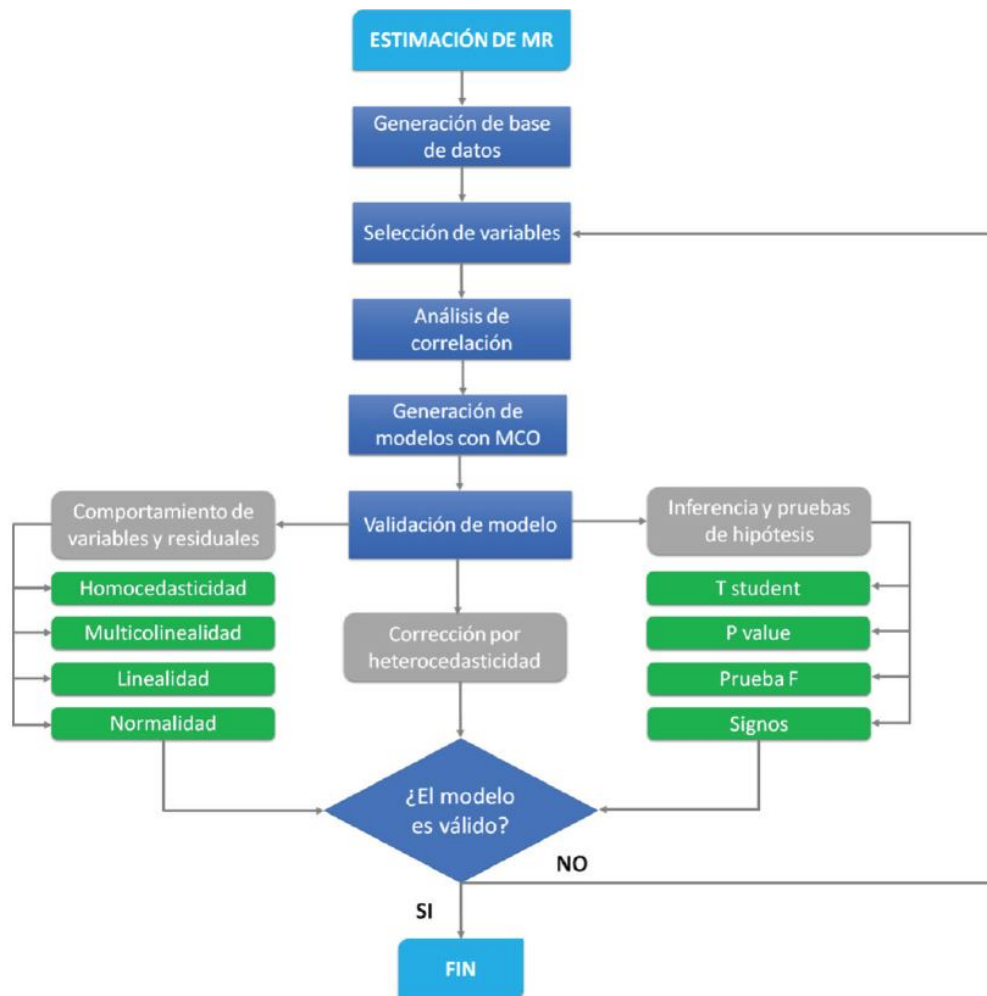
Es relevante mencionar, que los módulos resilientes medidos en el material de estudio para los esfuerzos aplicados arrojaron un incremento con respecto al aumento de esos esfuerzos, y que con el tiempo el módulo también aumenta, por tanto, no es constante como se supone en la teoría para simplificar los cálculos de manera empírica.

5. Modelación matemática para módulo resiliente en BEC

5.1 Sustentación estadística para el desarrollo del modelo

En la estimación del modelo de predicción del módulo resiliente a partir de los datos de los resultados obtenidos se siguió el esquema de análisis estadístico de la Figura 39.

Figura 39. Esquema general para el análisis estadístico (Múniera, 2019)



Inicialmente se consideraron todas las posibles variables que pudieran afectar la variable objetivo, por lo que en el análisis se evaluaron todos los parámetros que intervinieron en todos los ensayos de laboratorio. Para ello se utilizó un modelo clásico de regresión lineal, empleando el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO), en el que se midiera la correlación entre las variables y con respecto a la variable dependiente.

Para la escogencia de las variables se establece que los parámetros o predictores de la regresión sean consistentes (no sesgados) y eficientes (varianza mínima), por tanto, deben cumplir los siguientes supuestos (Múniera, 2019):

- Los residuos tienen una media de cero.

- Todos los predictores no están correlacionados con los residuos.
- Los residuos no están correlacionados entre sí.
- Los residuos tienen una varianza constante (homocedasticidad).
- Ninguna variable predictora esta correlacionada perfectamente ($r = 1$) con otra variable predictora (multicolinealidad).
- Los residuos están distribuidos normalmente.

5.2 Modelo predictor del módulo resiliente MR en BEC

Se genera primeramente una matriz de coeficientes de correlación *Pearson*, donde se incluyeron la totalidad de los parámetros de estudio, según se identifican en el Cuadro 22, y de esta forma determinar si existe algún grado de relación lineal entre pares de variables.

El modelo no lineal propuesto preliminarmente se establece mediante la Ecuación 26. Los β corresponden a los coeficientes de la regresión.

$$M_r = \beta_0 + \beta_1 \cdot C_c + \beta_2 \cdot W + \beta_3 \cdot \delta_{max} + \beta_4 \cdot \theta + \beta_5 \cdot M_E + \beta_6 \cdot UCS + \beta_7 \cdot T_c \quad \text{Ecuación 26}$$

Cuadro 22. Variables de estudio para el análisis estadístico

Variable	Abreviatura	Unidad
Módulo resiliente en la BEC	M_r	kPa
Contenido de cemento	C_c	%
Contenido de humedad de la compactación	W	%
Densidad máxima seca	δ_{max}	kg/m ³
Esfuerzo de confinamiento	σ_c	kPa
Esfuerzo desviador o cíclico	σ_d	kPa
Invariante de esfuerzos	θ	kPa
Resistencia a la compresión inconfiada	UCS	kPa
Módulo de elasticidad	M_E	kPa
Tiempo de curado	T_c	días
β_0 : Intercepto	-	-
β_i : Coeficientes de regresión	-	-

En el Cuadro 23 se muestran los resultados de este análisis y a partir del cual se pueden descartar las variables explicativas que estaban correlacionadas.

Cuadro 23. Coeficientes de correlación Pearson entre variables

Variable	MR	σ_c	σ_d	θ	W	δ_{max}	C _c	UCS	M _E	T _c
MR	1,00									
σ_c	0,86	1,00								
σ_d	0,89	0,89	1,00							
θ	0,90	0,98	0,96	1,00						
W	-0,02	0,00	0,07	0,03	1,00					
δ_{max}	0,01	0,00	0,03	0,01	0,24	1,00				
C _c	0,14	0,00	0,04	0,02	0,15	0,05	1,00			
UCS	0,12	0,00	0,06	0,02	0,14	0,53	0,90	1,00		
M _E	0,11	0,00	0,02	0,01	0,32	0,20	0,17	0,34	1,00	
T _c	0,15	0,00	0,04	0,01	-0,04	0,17	0,00	0,06	0,29	1,00

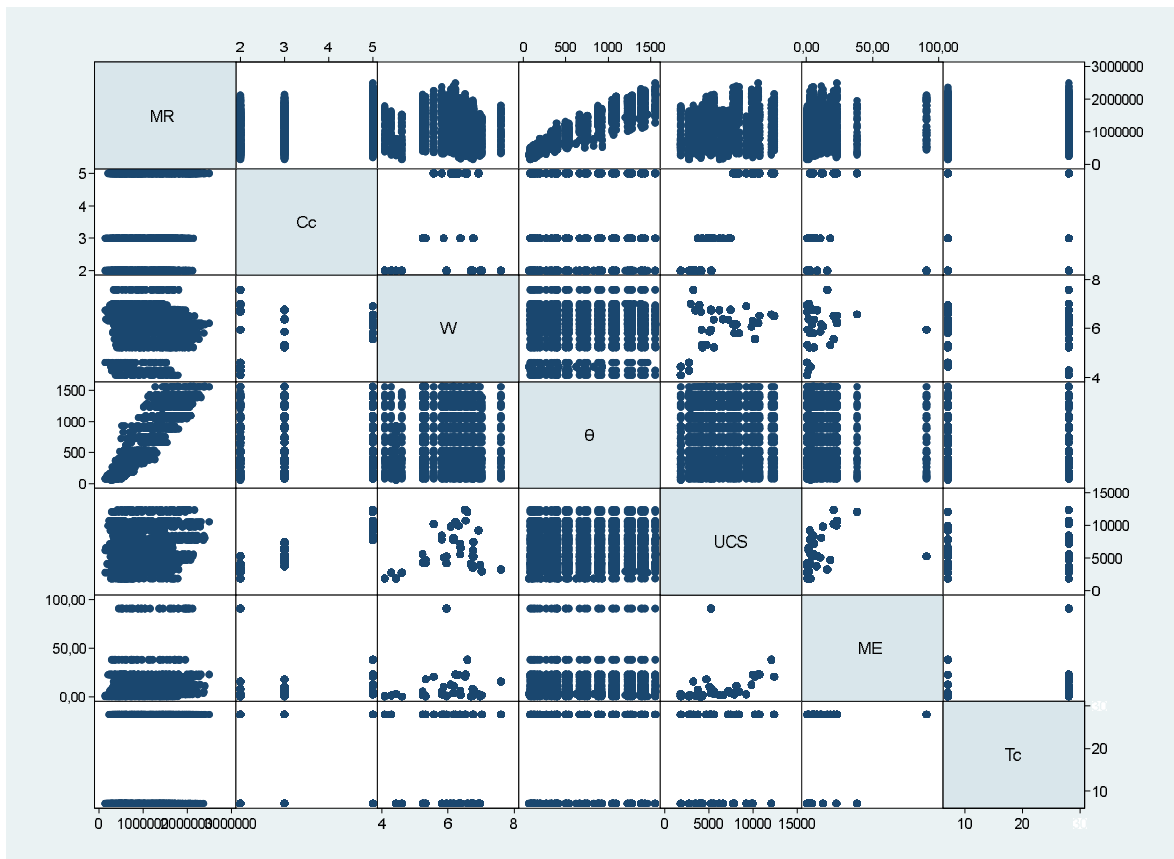
El criterio para definir cuáles variables presentan mayor correlación, se basó en lo indicado por (Holicky, 2013), donde valores mayores a 0,70 se consideran con una fuerte correlación. Partiendo de esto, los parámetros σ_c , σ_d y θ son variables que muestran una alta correlación, como era de esperarse, debido a que el invariante de esfuerzos contempla ambos esfuerzos para su cálculo. De igual manera, la relación entre la UCS y el contenido de cemento es altamente estrecha y de manera positiva, lo cual indica que cuanto mayor sea el porcentaje de cemento dosificado, la resistencia a la compresión confinada incrementará, lo que también era esperado.

De manera gráfica también se evaluó las correlaciones, aun cuando no mostraron coeficientes de correlación altos, ya que podrían poseer una relación de tipo no lineal y el procedimiento no lo mostrara. En la Figura 40 se exhiben dichas gráficas.

La variable dependiente Mr, posee una relación directa con la variable del invariante de esfuerzos, pero no se visualiza ninguna otra relación de manera lineal con las demás.

La correlación entre el contenido de humedad, W, y la resistencia a la compresión, UCS, no mostró una dependencia como se podría esperar en materiales granulares, por lo que parece entonces que para el caso de bases estabilizadas con cemento el agua de compactación no influye directamente en los resultados de la resistencia. Aunque si se obtuvo un coeficiente de correlación mayor con respecto a la densidad máxima seca, por tanto, de manera indirecta sí podría verse afectado por el agua dosificada.

Figura 40. Relaciones entre variables explicativas para MR, (STATA 16.1)



5.2.1 Modelos resultantes del análisis

Utilizando el programa estadístico STATA se ajustaron al menos ocho diferentes modelos de estimación del MR, para determinar qué variables serían las más significativas para la predicción. La principal variante utilizada para evaluar distintos modelos fue la transformación de las variables del tipo: lin-lin, log-lin, lin-log y log-log, sin embargo, también se analizó transformando la variable independiente de manera exponencial y con potencia a la 0,5.

En cada modelo se verificaron todos los supuestos de la Regresión Lineal Múltiple (RLM), mediante el método de MCO, discriminando aquellos que no cumplieran con uno o más de los requisitos del método. De esta forma se escoge aquel que alcanzara la mejor bondad de ajuste. Por otro lado, se decidió por aquel modelo en el que para un nivel de confianza del 95 %, los valores p (valor de probabilidad) fueran lo más cercano a cero y que el t de student fuera superior a 1,96.

5.2.2 Modelo de predicción propuesto

En la Figura 41 se presentan los resultados del análisis del modelo final escogido, obtenidos mediante el programa estadístico STATA.

Figura 41. Resultados de la bondad de ajuste de la regresión lineal múltiple para el modelo lin-lin

. regress MR Cc W θ UCS ME Tc

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	1,116
Model	2.6431e+14	6	4.4051e+13	F(6, 1109)	=	1019.37
Residual	4.7925e+13	1,109	4.3214e+10	Prob > F	=	0.0000
				R-squared	=	0.8465
				Adj R-squared	=	0.8457
Total	3.1223e+14	1,115	2.8003e+11	Root MSE	=	2.1e+05

MR	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
Cc	99991.75	13299.17	7.52	0.000	73897.37 126086.1
W	-30225.75	8681.679	-3.48	0.001	-47260.12 -13191.39
θ	1043.015	13.72979	75.97	0.000	1016.076 1069.954
UCS	-23.14696	6.198638	-3.73	0.000	-35.30934 -10.98458
ME	2394.805	452.7752	5.29	0.000	1506.412 3283.198
Tc	6145.161	622.9647	9.86	0.000	4922.838 7367.483
_cons	225144.3	58043.13	3.88	0.000	111257.6 339031.1

Como se aprecia en los resultados, el modelo estimador del Mr, posee un R^2 ajustado bastante aceptable, por lo tanto, los parámetros presentan una significancia también alta. De la misma manera, la suma de cuadrados de la regresión (SSR o “SS Model”) es mayor a la suma de cuadrados de errores (SSE o “SS Residual”), por tanto, la varianza de la variable dependiente, Mr, se explica mayormente por las desviaciones de las variables independientes y no por las desviaciones de los residuos.

Análisis de coeficientes estimadores

El intercepto tiene un coeficiente de regresión mayor que el de las variables explicativas, lo cual implica que una porción significativa del modelo está siendo explicada por el intercepto. La teoría indica que esto puede mejorarse al incluir más parámetros estimadores, sin embargo, dependiendo de la calidad de estos podría por el contrario reducir la eficiencia del modelo. El contenido de humedad es negativo, lo que era de esperarse, debido a que el módulo en la mayoría de los materiales granulares o finos se reduce en presencia de mayor humedad, en relación con la resistencia a la compresión confinada, también resultó con un coeficiente negativo, por lo que, se entiende que al aumentar ésta el módulo resiliente en las bases estabilizadas con cemento se reducirá, aunque su magnitud no causa un efecto tan fuerte dentro del cálculo. Este fenómeno podría deberse a que no se encontró una relación directa entre los resultados del Mr y la UCS, como se observó en el Cuadro 23, debido a que hay una variación en la humedad de compactación y contenido de cemento que no se ve reflejado directamente en el ensayo de compresión confinada, a pesar de que, en el módulo resiliente sí, esto manifestó una relación inversa diferente a la esperada.

Se tenía la expectativa de que el módulo resiliente tuviese una relación positiva respecto al invariante de esfuerzos θ , y así fue. La misma tendencia se manifestó con respecto al módulo de elasticidad y el tiempo de curado, lo que es razonable también.

Para todos los coeficientes el p-value fueron menores al nivel de significancia $\alpha = 0,05$, por lo que se estadísticamente se rechaza la hipótesis H_0 nula de que alguna de las variables predictoras fuera cero.

Análisis de multicolinealidad

Se analiza además la multicolinealidad (VIF) de los datos como parte de los requisitos estipulados, donde resultó < 10 , por tanto, cumple como se demuestra en el Cuadro 24.

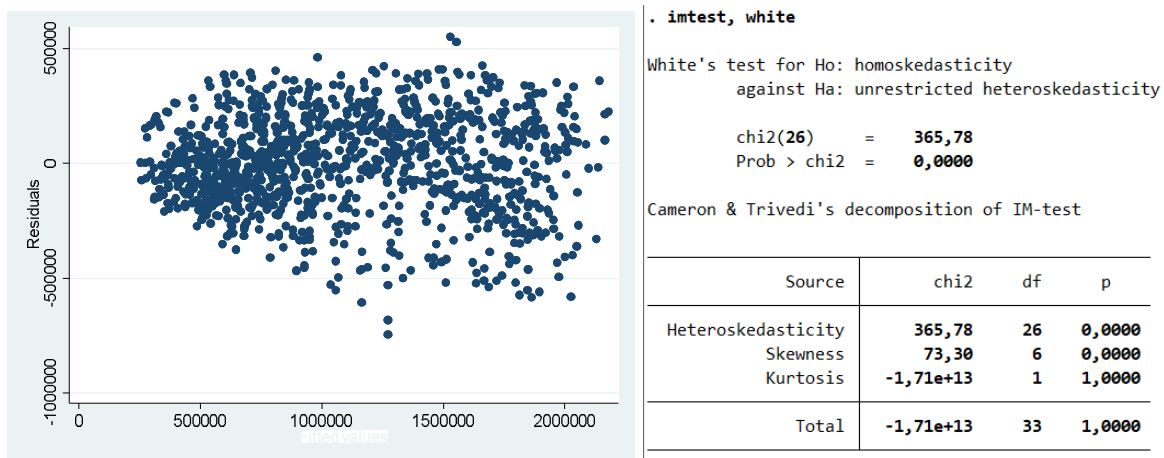
Cuadro 24. Resultado del análisis de multicolinealidad

Variable	VIF	1/VIF
UCS	8,42	0,118763
Cc	7,11	0,140743
ME	1,39	0,719421
W	1,3	0,771632
Tc	1,1	0,905018
θ	1	0,998644
Mean VIF	3,39	

Análisis de homocedasticidad

En la evaluación de la homocedasticidad gráficamente se observa que los datos tienen una alta dispersión y ningún patrón apreciable, a pesar de que el valor de Chi^2 no resultó mayor a 0,05 como solicita este supuesto. Por lo que, se aplica la corrección por heterocedasticidad de White de los errores estándar para que las inferencias estadísticas fueran asintóticamente válidas sobre los verdaderos valores de los parámetros (Gujarati & Porter, 2009), y de este modo obtener una varianza constante de los residuos. En la Figura 42 se muestra el resultado del programa STATA al realizar la prueba de homocedasticidad del modelo.

Figura 42. Resultados de la prueba de homocedasticidad en STATA



En la Figura 43 se exponen los resultados de la regresión lineal múltiple al aplicar la corrección por White, mediante el comando "robust" en STATA.

Figura 43. Resultados de la RLM al aplicar la corrección por White

```
. regress MR Cc W θ UCS ME Tc, robust
```

```
Linear regression           Number of obs   =    1.116
                          F(6, 1109)       =   1101,10
                          Prob > F         =    0,0000
                          R-squared        =    0,8465
                          Root MSE     =    2,1e+05
```

MR	Coef.	Robust Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
Cc	99991,75	12864,71	7,77	0,000	74749,83	125233,7
W	-30225,75	7325,046	-4,13	0,000	-44598,27	-15853,24
θ	1043,015	13,7808	75,69	0,000	1015,976	1070,054
UCS	-23,14696	5,412925	-4,28	0,000	-33,76769	-12,52623
ME	2394,805	341,3903	7,01	0,000	1724,961	3064,649
Tc	6145,161	623,5231	9,86	0,000	4921,743	7368,579
_cons	225144,3	52980,71	4,25	0,000	121190,6	329098,1

Se tiene entonces que los coeficientes de los parámetros predictores siguen siendo los mismos y el valor de p es menor a 0,05 para todos. Nuevamente, hay suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis H_0 nula de que alguno de los estimadores β sea igual cero. Por tanto, se indica que el supuesto de homocedasticidad se cumple.

Análisis de la distribución normal de los errores

En la Figura 44 al realizar la prueba de normalidad en el programa, el χ^2 , se obtuvo un valor muy por debajo de 0,05 para el 95 % de confianza que se planteó desde el inicio para todas las pruebas. Esto implica que los residuos no están distribuidos normalmente y que podría presentarse una distribución en las colas, lo cual indica que existen pocas o demasiadas observaciones en las colas de la distribución.

Sin embargo, en la Figura 45 se observa que los residuales tienden a seguir una distribución normal por la forma simétrica de campana de Gauss, que muestra la distribución.

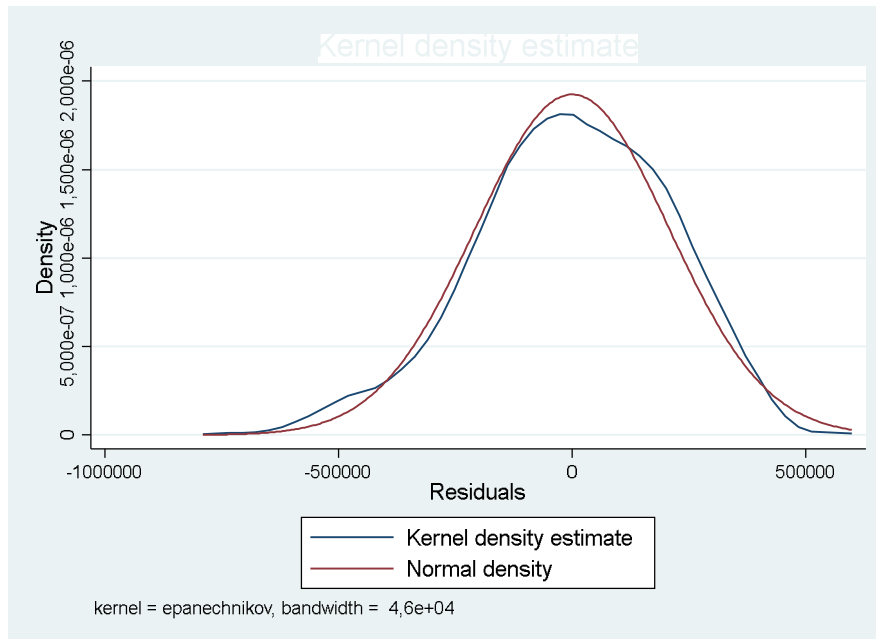
Figura 44. Resultados de la prueba de normalidad de los residuales

```
. predict error, resid
```

```
. sktest error
```

Variable	Skewness/Kurtosis tests for Normality				
	Obs	Pr(Skewness)	Pr(Kurtosis)	adj chi2(2)	joint Prob>chi2
error	1.116	0,0000	0,7469	17,80	0,0001

Figura 45. Gráfica de distribución de los errores con tendencia normal o campana de Gauss en STATA



Modelo final propuesto

Después de comprobar el cumplimiento de los supuestos en el análisis estadístico mediante la regresión lineal múltiple, el modelo propuesto final es el que se expresa en la Ecuación 27.

$$M_r = 225144,3 + 99991,75 \cdot C_c - 30225,75 \cdot W + 1043,023 \cdot \theta - 23,15 \cdot UCS + 0,0023948 \cdot M_E + 6145,16 \cdot T_c$$

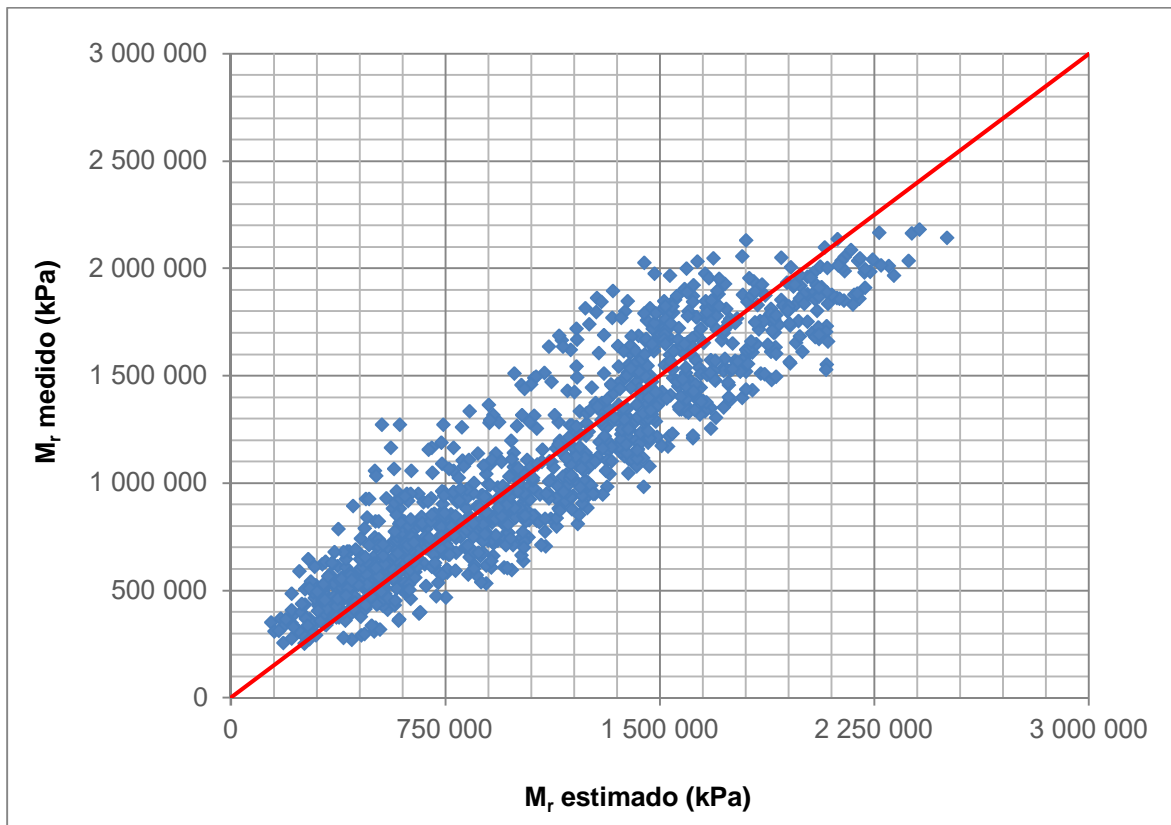
Ecuación 27

Donde,

- M_r : Módulo resiliente en la BEC, en kPa
- C_c : Contenido de cemento, en %
- W : Contenido de humedad de la compactación, en %
- θ : Invariante de esfuerzos, en kPa
- UCS : Resistencia a la compresión inconfiada, en kPa
- M_E : Módulo de elasticidad, en kPa
- T_c : Tiempo de curado, en días

En la Figura 46 se presenta una gráfica donde se comparan los módulos resilientes de la base estabilizada estimados vs los medidos. Se observa que los puntos de los datos se encuentran próximos a la línea a 45°, por tanto, el modelo propuesto es eficiente prediciendo la variable dependiente, M_r , y esto no implica un sesgo; el modelo propuesto se ajusta satisfactoriamente a los datos medidos.

Figura 46. Gráfica de módulo resiliente medido vs el estimado para bases estabilizadas con cemento



6. Casos de aplicación

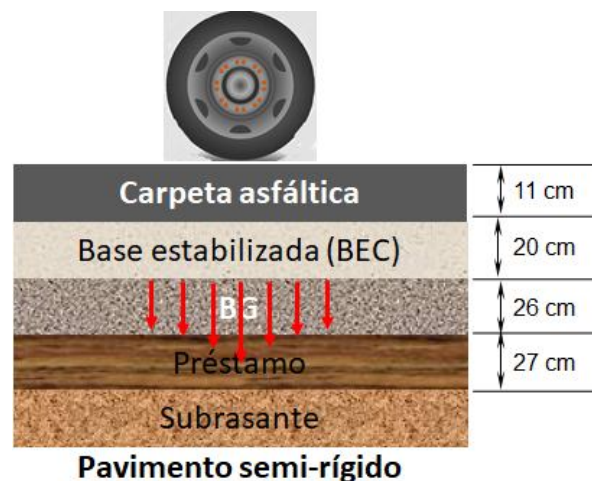
Con el fin de medir la aplicabilidad del modelo propuesto de módulo resiliente en bases estabilizadas con cemento en los diseños de una estructura de pavimento, se analiza mediante la metodología de multicapa elástica, la vida útil de dos casos de pavimento típicos para las vías de Costa Rica. Para esto se hizo una estimación de los ESALs en dos carreteras reales, una corresponde a una ruta nacional con un alto volumen de tránsito y la otra es un camino cantonal de bajo volumen de tránsito. El cálculo de los Ejes Equivalentes se llevó a cabo mediante la metodología de diseño de pavimentos AASHTO 93 y el desempeño de las capas críticas se evaluó aplicando la Guía de Diseño Mecánico, MEPDG (AASHTO, 2008). En cuanto al análisis de las respuestas de la estructura ante la aplicación de las cargas (1 eje equivalente = 9 000 lb), se utilizó el programa ejecutable PITRAPAVE para encontrar los esfuerzos, deformaciones y deflexiones respectivas en cada capa.

6.1 Diseño estructural de referencia

6.1.1 Caso de aplicación 1. Pavimento semi-rígido

El material granular muestreado y analizado en la presente investigación además de ser un material típico para capas de base en el país, es el que actualmente se está colocando como base estabilizada con cemento en el proyecto de la ampliación de la carretera de la ruta 32. Por esta razón, la información del diseño y características del proyecto en específico son los datos reales de este. En la Figura 47 se presenta un esquema de la estructura de la ruta 32 (R32), cuyos espesores no se rediseñaron, solamente se consideraron para el cálculo respectivo de la vida útil de la BEC y la subrasante.

Figura 47. Estructura de pavimento de la ruta 32



- **Cálculo de Ejes equivalentes de diseño**

Los datos base para el cálculo de los ESALs de diseño fueron tomados de la información que reporta la Secretaría de Planificación Sectorial del MOPT. En este caso se tomó la ruta

nacional 32, sección 40500, estación 174. Como resultado del cálculo y considerando la información del proyecto resumida en el Cuadro 25, se obtuvo **61 428 360** ESALs de diseño.

Los espesores y propiedades de cada capa según la información suministrada, se indica en el Cuadro 26.

Cuadro 25. Información del diseño para el caso de aplicación 1

Dato, parámetro de entrada o cálculo inicial		Valor	
Periodo de diseño	PD	15 años	
Ejes equivalentes	W_{18}	61 428 359	
Cantidad de carriles	-	4	
Distribución del tránsito	DS	50%	
Distribución por carril	LDF	90%	
Confiabilidad	R	95%	
Factor de crecimiento anual	G	4%	
Desviación estándar	Z_R	-1,645	
Desviación estándar global	S_o	0,5	
Índice de servicio inicial	p_0	4,2	
Índice de servicio final	p_t	2,5	
Cambio de índice de servicio	ΔPSI	1,7	
Tramo o sección de camino	CBR en sitio subrasante (%)	M_r eff subrasante (MPa/psi)	SN_{req}
km 49	4,5	46 126/6 690	5,27

Cuadro 26. Espesores, módulos y coeficientes estructurales por capa. Caso 1

Capa o material	Coefficiente estructural, a_i	Módulo estimado (MPa/psi)	Coefficiente de drenaje, m_i	Espesor (cm)	SN diseño
MAC modificada	0,44	3 103/450 000	1	11	1,91
BE-25	0,16	4 242/620 000	1	20	1,26
BG CBR > 80 %	0,13	128/18 500	0,9	26	1,2
Préstamo CBR > 30 %	0,11	103/15 000	0,8	27	0,94
Subrasante	-	46/6 690	-	-	
Total				84	5,31

- **Evaluación de la vida útil de la estructura**

Dado que se requieren los valores de cada estimador del modelo, se necesita hacer una extrapolación de los datos medidos para el material ensayado, de manera que coincida con las características del material estabilizado en el proyecto de la ruta 32.

Se escogió un contenido de cemento de 3,0 %, ya que es cercano al 3,2 % de cemento dosificado en el proyecto del caso en estudio. Esto con el fin de utilizar los valores correspondientes en la base de datos para los demás parámetros requeridos. Excepto el invariante de esfuerzos θ , el cual se calculó a partir de la ecuación de ajuste lineal obtenida

de la relación entre los módulos estimados y el invariante de esfuerzos medidos θ , esto se evaluó tanto para los 7 días como para los 28 días de curado, este último se calcula con base al crecimiento porcentual entre el máximo valor de M_r a 7 días y el valor máximo a 28 días (crece a una tasa de 1,53 %). El valor asignado del M_r para calcular θ_{proy} las Ecuaciones 28, 29, 30 y 31, correspondió al valor meta del módulo de la BEC en la estructura analizada, que de acuerdo a la información indicada en el Cuadro 26, es de 4 242 MPa (620 000 psi). La Ecuación 28 y 29 se obtienen a partir de la gráfica mostrada en la Figura 48.

$$M_r \text{ estimado (7 días)} = 1042,4 \cdot \theta_{medido} + 290813 \quad \text{Ecuación 28}$$

$$M_r \text{ estimado (28 días)} = 1043,4 \cdot \theta_{medido} + 435718 \quad \text{Ecuación 29}$$

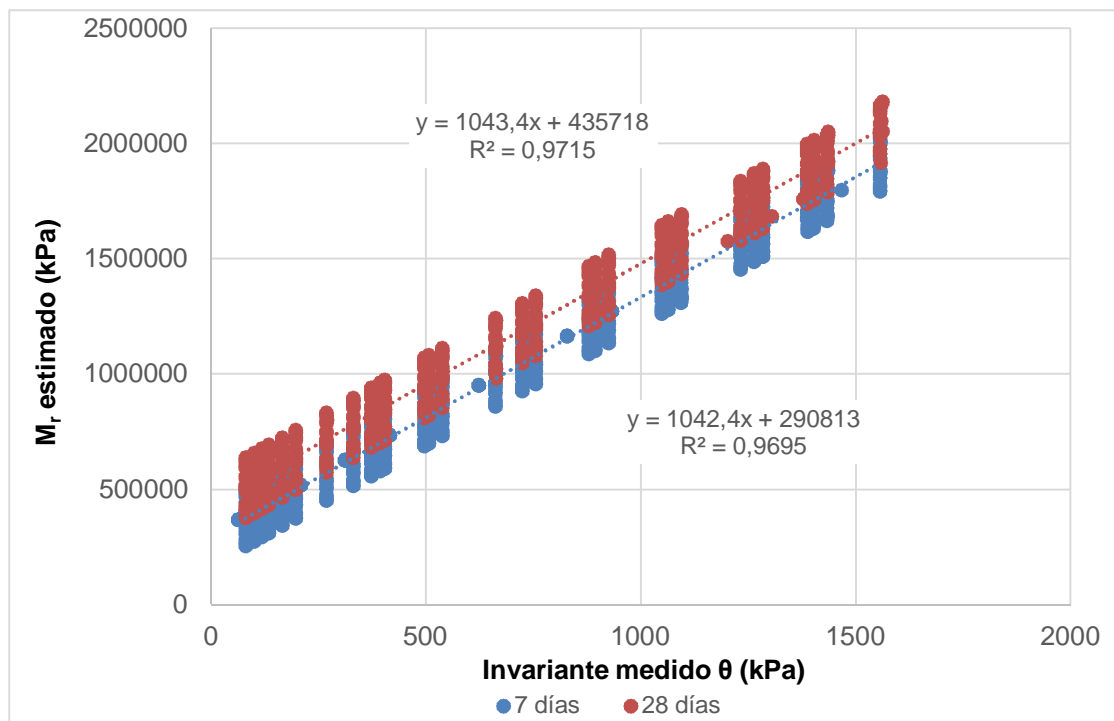
Al despejar ambas ecuaciones se tiene,

$$\theta_{proy} = \left(\frac{M_r \text{ estimado} - 290813}{1042,4} \right), \text{ para 7 días} \quad \text{Ecuación 30}$$

$$\theta_{proy} = \left(\frac{M_r \text{ estimado} - 435718}{1043,4} \right), \text{ para 28 días} \quad \text{Ecuación 31}$$

El UCS al igual que el θ_{proy} para 28 días de curado se calculan con respecto a la tasa de crecimiento entre los valores máximos del M_r , por tiempo de curado.

Figura 48. Gráfica de relación entre el M_r estimado de la BEC y el θ medido



Los parámetros de la base estabilizada con cemento utilizadas para el caso 1 y el resultado al aplicar la ecuación del modelo de M_r propuesto, se especifican en el Cuadro 27.

Cuadro 27. Resumen de datos para el cálculo del del M_r estimado. Caso 1

M_r estimado	4 241 656 kPa (615 200 psi)	Observaciones
C_c	3,0 %	* Contenido del proyecto: 3,2 %
W	6,4 %	* Contenido de humedad óptimo medido para el contenido de cemento escogido
θ_{proy}	3 822 kPa (554 psi)	* Calculado de acuerdo a la proyección, Ecuación 30
UCS	5 534 kPa (803 psi)	* Valor medido para ese contenido de cemento y humedad óptima
M_E	3 265 143 kPa (473 569 psi)	* Valor medido para ese contenido de cemento y humedad óptima
T_c (días)	7	* Días de diseño de la BEC en el proyecto

El valor del M_r estimado al aplicar el modelo propuesto para predecir el módulo resiliente en la base estabilizada con cemento, resultó muy cercano al valor meta utilizado en el diseño de la estructura del proyecto, por lo tanto, el uso de la ecuación definida en esta investigación es aplicable en el diseño estructural de un pavimento semi-rígido para altos volúmenes de tránsito. En la Ecuación 32 se expresa el cálculo del módulo obtenido.

$$M_r = 225144,3 + 99991,75 \cdot (3 \%) - 30225,75 \cdot (6,4 \%) + 1043,023 \cdot (3822 \text{ kPa}) - 23,15 \cdot (5534 \text{ kPa}) + 0,0023948 \cdot (3265143 \text{ kPa}) + 6145,16 \cdot (7 \text{ días}) = \mathbf{4\ 241\ 656\ kPa}$$

Ecuación 32

Es decir, 4 241 565 kPa = **615 200 psi** \approx **620 000 psi**, el cual era el valor meta de comparación.

- **Análisis del desempeño de las capas críticas**

Debido a que la estructura corresponde a un pavimento semi-rígido se verificó el número de repeticiones que puede soportar la capa de la BEC y la subrasante, antes de fallar por fatiga y por deformación permanente, respectivamente.

Los esfuerzos, deformaciones y deflexiones resultantes del análisis multicapa se presentan en el Apéndice A.4.

Se calculó primero el valor de M_{rup} , con base en el valor establecido de la UCS y luego, de acuerdo a la Ecuación 25, se obtuvo el número de repeticiones para la capa de base estabilizada, en la Ecuación 33 se muestra el resultado, el cual indica que la base estabilizada podrá soportar las cargas del tránsito sin que supere el 25 % del agrietamiento por fatiga. Dado que 1,31E09 es mayor que 6,14E+07 repeticiones de ejes equivalentes.

$$M_{rup} = 5,2851 \cdot \sqrt{805} = 150 \text{ psi} \quad \text{Ecuación 24 caso 1}$$

$$N_{f \text{ caso 1}} = \left[\left(\frac{1,1368}{61,296/150} \right)^{1,0259} \right]^{20} = 1,31E + 09 \text{ repeticiones} \quad \text{Ecuación 33}$$

En cuanto al desempeño de la subrasante, se utilizó la Ecuación 34, establecida por la Guía mecanístico-empírica de diseño de pavimentos (MEPDG).

$$N = 1,077 \times 10^{18} (\epsilon_z)^{-4,4843} \quad \text{Ecuación 34}$$

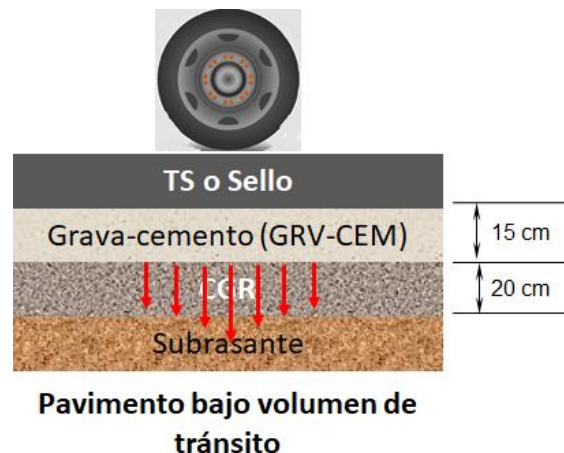
Aplicando la Ecuación 34, se obtiene un resultado también superior a la cantidad de ESALs proyectados para el periodo de diseño señalado, Ecuación 35.

$$N = 1,077 \times 10^{18} (138,8)^{-4,4843} = 2,66E + 08 \text{ repeticiones} \quad \text{Ecuación 35}$$

6.1.2 Caso de aplicación 2. Camino de bajo volumen de tránsito

El caso de estudio para caminos de bajo volumen de tránsito donde se aplicó el modelo estimador del Mr en bases estabilizadas con cemento, debía contar con materiales cuyas características físicas cumplieran con las mínimas solicitadas por las especificaciones vigentes, lo cual limitaba el hallar una estructura en la que además de cumplir con todos estos requisitos, contara con la información necesaria para calcular el módulo estimado. Entre los proyectos identificados se escogió un diseño de estructura propuesto por la Unidad de Gestión Municipal (LanammeUCR), para un tramo de los caminos que comunican internamente a la población de la isla de Chira. La estructura general que representa este tipo de rutas y los espesores de estudio se describen en la Figura 49.

Figura 49. Estructura de pavimento de camino de bajo volumen en la Isla de Chira



- **Cálculo de Ejes equivalentes de diseño**

Los ESALs de diseño fueron tomados de la información reportada en el informe de asesoría técnica por parte del LanammeUCR hacia la municipalidad del cantón de la Isla de Chira, LM-PI-GM-INF-12-17 (Ulate, 2017). En este caso se estudió el tramo 1 de los siete inspeccionados. La información resumida del proyecto se presenta en el Cuadro 28. La granulometría del material muestreado por personal del LanammeUCR, en el Tajo Bocona, se presenta en el Cuadro 30. Además, la cantidad de ejes equivalentes para el periodo de diseño establecido es de **53 218** ESALs.

Los espesores y propiedades de cada capa según la información suministrada, se indica en el Cuadro 29.

Cuadro 28. Información del diseño para el caso de aplicación 2

Dato, parámetro de entrada o cálculo inicial		Valor	
Periodo de diseño	PD	10 años	
Ejes equivalentes	W_{18}	53 218	
Cantidad de carriles	-	2	
Distribución del tránsito	DS	50 %	
Distribución por carril	LDF	100 %	
Confiabilidad	R	50 %	
Factor de crecimiento anual	G	4 %	
Desviación estándar	Z_R	0,675	
Desviación estándar global	S_o	0,5	
Índice de servicio inicial	p_0	4,2	
Índice de servicio final	p_t	2,5	
Cambio de índice de servicio	ΔPSI	1,7	
Tramo o sección de camino	CBR en sitio subrasante (%)	M_r eff subrasante (MPa/psi)	SN_{req}
1	9	67/9 777	1,5

Cuadro 29. Espesores, módulos y coeficientes estructurales por capa. Caso 2

Capa o material	Coefficiente estructural, a_i	Módulo estimado (MPa/psi)	Coefficiente de drenaje, m_i	Espesor (cm)	SN diseño
TSB	-	-	-	-	-
GRV-CEM	0,14	3 964/575 000	1,0	15	0,83
CGR	0,12	103/15 000	0,8	20	0,76
SR1	-	67/9 777	-	-	-
Total				35	1,58

Cuadro 30. Graduación del material granular del tramo 1 en la Isla de Chira ⁽¹⁾

Tamiz	Tamaño (mm)	%Pasando	Especificaciones CR- 2010	
			LI	LS
1 1/2"	37,5	98	100	100
1"	25,0	92		
3/4"	19,0	87		
1/2"	12,5	78		
3/8"	9,50	63		
Nº 4	4,75	33	50	100
Nº 8	2,36	19		
Nº 10	2,00	17		
Nº 40	0,425	6	20	70
Nº 60	0,250	5		
Nº200	0,075	3,0	5	35

(1) Informe LM-PI-GM-INF-12-2017, LanammeUCR.

- **Evaluación de la vida útil de la estructura**

Al igual que en el caso de aplicación 1, se realizó una extrapolación de los datos medidos para el material verificado en esta segunda estructura, de manera que coincida con las características del material estabilizado del proyecto de la ruta de la Isla de Chira.

Se escogió un contenido de cemento de 3,2 %, el cual fue el contenido óptimo para ese material muestreado, el contenido de humedad y su densidad máxima seca se obtuvieron del informe de referencia. El invariante de esfuerzos θ , se calculó de la misma forma que en el caso anterior, con un valor meta del módulo de la BEC correspondiente al indicado en el Cuadro 29, 3 964 MPa (575 000 psi). El módulo de elasticidad debió ser calculado ya que no fue medido en el laboratorio, para esto se utilizó la Ecuación 20, donde se obtiene como resultado $M_E = 2\ 679\ 072\ \text{kPa}$.

Los parámetros de la base estabilizada con cemento utilizadas para el caso 2 y el resultado al aplicar la ecuación del modelo de M_r propuesto, se especifican en el Cuadro 31.

Cuadro 31. Resumen de datos para el cálculo del del M_r estimado. Caso 2

M_r estimado	3 809 552 kPa (552 529 psi)	Observaciones
C_c	3,2 %	* Contenido indicado en el informe ⁽¹⁾
W	13,6 %	* Contenido de humedad óptimo ⁽¹⁾
w	1 826 kg/m ³ 114 pcf	* Densidad máxima seca para el contenido de humedad óptimo ⁽¹⁾
θ_{proy}	3 524 kPa 511 psi	* Calculado de acuerdo a la proyección, Ecuación 30
UCS	2 100 kPa 305 psi	* Valor mínimo CR-2010
M_E	2 679 072 kPa 388 567 psi	* Valor calculado a partir de la UCS mínima y un curado de 7 días, Ecuación 20
T_c (días)	7	* Días de diseño de la BEC en el proyecto

⁽¹⁾ Informe de la Unidad de Gestión Municipal del LanammeUCR LM-PI-GM-INF-12-2017.

El valor del M_r estimado al aplicar el modelo propuesto para predecir el módulo resiliente en la base estabilizada con cemento de este segundo caso, resultó cercano al valor meta utilizado en el diseño de la estructura del proyecto, por lo que, para estructuras de caminos de bajo volumen de tránsito, también se considera válido el uso de la ecuación definida en esta investigación. En la Ecuación 36 se expresa el cálculo del módulo obtenido.

$$M_r = 225144,3 + 99991,75 \cdot (3,2 \%) - 30225,75 \cdot (13,6 \%) + 1043,023 \cdot (3524 \text{ kPa}) - 23,15 \cdot (2100 \text{ kPa}) + 0,0023948 \cdot (388566 \text{ kPa}) + 6145,16 \cdot (7 \text{ días}) = \mathbf{3\ 809\ 552\ kPa}$$

Ecuación 36

Es decir, 3 809 552 kPa = **552 529 psi** \approx **575 000 psi**, el cual es similar, aunque no tan cercano como en el caso del pavimento semi-rígido al valor meta esperado.

- **Análisis del desempeño de las capas críticas**

Al igual que en el pavimento semi-rígido se verificó el número de repeticiones que puede soportar la capa de la BEC y la subrasante, antes de fallar por fatiga y por deformación permanente, respectivamente, debido a que estas capas son las más críticas en este tipo de estructuras.

Los esfuerzos, deformaciones y deflexiones resultantes del análisis multicapa se presentan en el Apéndice A.4.

El valor de M_{rup} , se obtuvo al aplicar la Ecuación 24, como se muestra para el caso 2. Este resultado se utiliza en el cálculo de la Ecuación 25, para lo cual se obtiene el número de repeticiones de la capa de grava-cemento, en la Ecuación 37 se muestra el resultado. La base de grava -cemento es capaz de soportar las cargas del tránsito sin que supere el 25

% del agrietamiento por fatiga. Dado que $7,80E+36$ es mayor que 53 208 repeticiones de ejes equivalentes.

$$M_{rup} = 5,2851 \cdot \sqrt{321} = 94,6 \text{ psi} \quad \text{Ecuación 24 caso 2}$$

$$N_{f \text{ caso 1}} = \left[\left(\frac{1,1368}{1,71/94,6} \right)^{1,0259} \right]^{20} = 7,80E + 36 \text{ repeticiones} \quad \text{Ecuación 37}$$

En cuanto al desempeño de la subrasante, se utilizó la Ecuación 34, establecida por la Guía mecanístico-empírica de diseño de pavimentos (MEPDG).

$$N = 1,077 \times 10^{18} (\varepsilon_z)^{-4,4843} \quad \text{Ecuación 38}$$

Al aplicar la Ecuación 34 para evaluar el desempeño de la subrasante, se obtiene que el valor es superior a la cantidad de ESALs proyectados para el periodo de diseño, Ecuación 39.

$$N = 1,077 \times 10^{18} (511,91)^{-4,4843} = 764 \text{ 502 repeticiones} \quad \text{Ecuación 39}$$

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Resultados y hallazgos relevantes

Se pudo comprobar la hipótesis planteada y el cumplimiento del principal objetivo, a través de la experimentación en laboratorio. Brindando a diseñadores e investigadores, un modelo matemático para estimar el módulo resiliente en materiales estabilizados o con rigideces similares. Una profunda y correcta revisión de la información relacionada al tema investigado, permitió entender el estado del arte referente al módulo resiliente en bases estabilizadas con cemento, y con ello proponer las variables que afectarían el módulo resiliente en materiales estabilizados.

Los ensayos del esquema experimental fueron realizados en su totalidad, de acuerdo a lo propuesto en la metodología y en los objetivos, cuyos resultados fueron coherentes con lo esperado. a pesar de que se presentaron algunas dificultades durante la elaboración de algunos de los especímenes y la abrasión mostrada en el proceso de curado, específicamente al trabajar con porcentajes bajos de humedad en el proceso de compactación, como se pudo apreciar en la Figura 32 y 33.

Se demostró de igual manera que el muestreo del material de estudio y su respectiva caracterización y preparación para la fabricación de especímenes, fue el adecuado y según lo planificado. Además, el correcto control del proceso se verificó a través de una baja variación en los módulos resilientes medidos.

Se puede concluir que el protocolo de ensayo propuesto para módulo resiliente, y objetivo de este proyecto, puede ser replicado para otros materiales en los que se esperan rigideces altas o similares a las alcanzadas en el material de estudio. Específicamente cuando se desee investigar o analizar el desempeño de este tipo de materiales o para el diseño estructural donde se requiera estimar el módulo a partir de las variables incluidas en la ecuación, antes de ser colocado el material en algún proyecto. Asimismo, se logró la implementación del procedimiento de la prueba para medir el módulo elástico, a pesar de no contar con una norma estándar.

Se completó en su totalidad todos los ensayos, de acuerdo al esquema experimental propuesto.

Se demostró que la aplicación de los diferentes esfuerzos de confinamiento y cíclicos sobre materiales granulares estabilizados con cemento, sí influyen sobre la magnitud de los resultados del módulo resiliente; pues como se pudo observar en los resultados, conforme mayor es el esfuerzo aplicado, se percibe un aumento en los valores promedio del módulo resiliente. Por otro lado, se pudo comprobar que esfuerzos similares aplicados en materiales estabilizados con cemento por otras investigaciones (30 psi, 50 psi y 70 psi), aproximados a los escogidos en este proyecto, presentaron incrementos de módulos equivalentes a los de esta investigación.

Se verificó el cumplimiento de los supuestos de la regresión lineal múltiple, mediante la obtención del modelo de predicción del módulo resiliente en BEC, dado que las variables se consideran estadísticamente significativas, ya que se alcanzó una adecuada bondad de

ajuste, a pesar de la variabilidad mostrada en la base de datos, principalmente la de los de M_E . Por lo tanto, se considera que la interpretación de los parámetros estimadores y su significancia pueden ser utilizados en el modelo propuesto para la estimación del módulo resiliente en BEC.

Mediante la teoría de multicapa elástica se corrobora la aplicabilidad del modelo en dos casos de estudio, tal como se propuso dentro de los objetivos. Lo que comprueba su utilidad en el diseño de pavimentos.

Finalmente, el modelo matemático propuesto para módulo resiliente en bases granulares estabilizadas con cemento, permite aproximar de una manera más precisa, las respuestas en la estructura de un pavimento semi-rígido, en contraste con los valores supuestos a partir de experiencia o nomogramas provenientes de materiales que no son representativos a los de cada proyecto. En complemento a la estimación o medición directa (en laboratorio) del módulo resiliente en BEC, debe realizarse una evaluación del agrietamiento en la fibra inferior de la capa y la determinación de los potenciales esfuerzos máximos que podría soportar bajo ciertas condiciones de humedad, contenido de cemento y curado del material, donde sea determinado el desempeño del material dentro de una estructura de pavimento.

7.2 Recomendaciones

Es importante que se considere a futuro, la medición de módulos resilientes en materiales estabilizados con aplicaciones de esfuerzos mayores, que permitan corroborar los valores del invariante de esfuerzos, que para esta investigación se obtuvieron mediante el cálculo de una proyección a partir de los esfuerzos aplicados en el laboratorio. Así también, la medición de los módulos resilientes para más periodos de curado, ya que el modelo es por ahora solo aplicable al rango entre 7 y 28 días.

Se podrían ajustar aún mejor los estimadores al replicar este estudio a más fuentes de agregado, donde sea factible aumentar la bondad de ajuste, aun cuando la obtenida en la investigación fue adecuada.

El modelo para estimar el módulo resiliente en BEC propuesto podría calibrarse al ir incorporando más tipos de agregado y esfuerzos de aplicación, a través de otras investigaciones o proyectos de graduación, de manera que pudiera ser incluido dentro de la Guía de Diseño Mecánica-Empírica para pavimentos de Costa Rica. Asumir valores de los nomogramas o rangos establecidos en el manual de diseño de AASHTO, suelen ser muy distantes de los propios de los materiales del país, y tienden a sobreestimar los módulos requeridos en las capas de base estabilizada con cemento. Esto puede causar problemas de agrietamiento prematuro en las bases estabilizadas, lo cual se refleja rápidamente en la capa de rodadura y reduce la vida útil de toda la estructura.

Se recomienda utilizar un sistema de irrigación adecuado en la cámara húmeda, así como contar con estantería que permita la colocación estable de los especímenes durante todo el periodo de curado, con el fin de asegurar que todos los especímenes de ensayo se curen de manera uniforme.

Se recomienda además en el futuro, determinar la pérdida en la masa (durabilidad) en el material estabilizado con cemento al que se desea evaluar el módulo resiliente, con el propósito de ajustar mejor el contenido de cemento en los que diseñó que no cumpliera esta propiedad. De igual forma, estudiar el agrietamiento por contracción en las bases estabilizadas, a través de ensayos de laboratorio, dado que esto quedó fuera del alcance de esta investigación, pero es uno de los problemas más recurrentes durante la construcción y durante el tiempo de curado. Lo cual puede afectar desde niveles leves hasta severos el desempeño de las capas de base, reduciendo así la vida útil de las mismas.

8. Referencias bibliográficas

- AASHTO. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures 1993*. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. Final Report prepared for National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) 1-37A. *Transportation Research Board*,.
- AASHTO. (2008). *The Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)*. American Association of State Highway and Transportation Officials executive committee 2007/2008. doi:ISBN: 978-1-56051-423-7
- AASHTO. (2017). *T 307. Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Andrei, D. (1999). *Development of a Harmonized Test Protocol for the Resilient Modulus of Unbound Material Used in Pavement Design*. M.S. Thesis, University of Maryland-College Park.
- Arce, M. (2011). *Bases estabilizadas con cemento Algunos comentarios sobre sus ventajas e inconvenientes*. San José: PITRA. LanammeUCR, Universidad de Costa Rica.
- ASTM. (2017). *ASTM C 469. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. ASTM International.
- ASTM. (2017). *ASTM D 1633. Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders*. ASTM International.
- Ávila, T. (2012). *Experiencia costarricense en diseño, aseguramiento de la calidad y construcción de bases estabilizadas con cemento*. San Pedro, Montes de Oca: PITRA. LanammeUCR, Uiversidad de Costa Rica.

- Ávila, T., Sequeira, W., & Aguiar, J. (2020). *Calibración de especificaciones para bases estabilizadas con cemento en Costa Rica*. San José: PITRA, LanammeUCR.
- Biswal, D., Sahoo, U., & Dash, S. (2018). Strength and Stiffness Studies of Cement Stabilized Granular Lateritic Soil. *International Congress and Exhibition " Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology*, 320-336.
- CONAVI. (2019). *AVANCE FISICO-FINANCIERO-INFORME EJECUTIVO DE OBRAS No. 18*. Intersección Ruta Nacional N° 4 (Cruce a Sarapiquí) - Limón: Unidad Ejecutora R32.
- Flores, G. (2011). *Efecto de fatiga en un material de base estabilizada con cemento (Pavimento flexible)*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Garro, J. (2018). *INFORME DE LA GESTIÓN DEL CONAVI PARA EL MANTENIMIENTO DE PROYECTOS DE OBRA NUEVA*. Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional. San Pedro, Montes de Oca: PITRA. LanammeUCR. Universidad de Costa Rica.
- Gujarati, & Porter, D. (2009). *Econometría*. México: D.F.: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A de C.V.
- Halsted, G. E., Adaska, W. S., & McConnell, W. T. (2008). Guide to cement-modified soil (CMS). Illinois, Estados Unidos: Portland Cement Association (PCA).
- Hanifa, K., Abu-Farsakh, M., & Gaut, G. (2015). *Design Values of Resilient Modulus for Stabilized and Non-Stabilized Base*. Louisiana Transportation Research Center. Louisiana: Federal Highway Administration.
- Hidalgo, A. (2018). *DETERMINACION DE UN PROTOCOLO DE ENSAYO Y MODELO DE FATIGA PARA UNA BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO CON UNA*

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PROMEDIO DE 2,45 MPA. San José: Lanamme, Universidad de Costa Rica.

Holicky, M. (2013). *Introduction for probability and statistics for engineers.* Springer.

Ismail, A., Baghini, M., Karim, M., Shokri, F., Al-mansoba, R., Firoozi, A., & Firoozi, A. (2014). Laboratory investigation on the strength characteristics of cement- treated base. *Applied Mechanics and Materials*, 507, 353-360. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.507.353

Leiva, F., Arce, M., & Castro, P. (2005). *Desarrollo de leyes de fatiga para bases estabilizadas con cemento.* San Pedro, Montes de Oca: LanammeUCR, PITRA.

Lim, S., & Zollinger, D. (2003). ESTIMATION OF THE COMPRESSIVE STRENGTH AND MODULUS OF ELASTICITY OF CEMENT-TREATED AGGREGATE BASE MATERIALS. *Transportation Research Board*, 30-38.

MOPT. (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR 2010).* San José, Costa Rica: Ministerio de Obras Públicas y Transportes, MOPT. LanammeUCR.

MOPT. (2017). *Sección actualizada y oficializada, mediante el Decreto Ejecutivo DE-40333-MOPT.* San José: Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Obtenido de <http://repositorio.mopt.go.cr:8080/xmlui/123456789/3585>

MOPT. (2019). *Anuario estadístico del sector transporte e infraestructura 2018.* Secretaría de Planificación Sectorial. doi:ISSN 1409-2816

Múnera, J. (2019). Estimación del módulo resiliente para materiales granulares de Costa Rica. *Revista Infraestructura Vial, LanammeUCR, Volumen 21(Número 37)*, p.p. 12 -20. doi:ISSN electrónico: 2215-3705

- NCHRP. (2004). *Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design*. National Cooperative Highway Research Program.
- PCA. (2006). *Guide to Cement-Treated Base (CTB)*. Georgia: Portland Cement Association.
- PITRA. (2019). *INFORME DE EVALUACIÓN DE LA RED VIAL NACIONAL PAVIMENTADA DE COSTA RICA. Años 2018-2019 / LM-PI-UGERVN-004-19*. San José: Universidad de Costa Rica, LanammeUCR.
- Rashidi, M., Reza, A., Si, J., Izzo, R., & McDaniel, M. (2018). A Practical Approach for the Estimation of Strength and Resilient Properties of Cementitious Materials. *Transportation Research Record*(1-12). doi:10.1177/0361198118769900
- Richardson, D. (1996). AASHTO LAYER COEFFICIENTS FOR CEMENT-STABILIZED SOIL BASES. *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING*(8(2)), 83-87.
- Rojas, N. (2011). *Estudio de Cuencas Hidrográficas de Costa Rica. Cuenca del río Chirripó*. San José, Costa Rica: MINAET.
- Scullion, T., Uzan, J., Hilbrich, S., & Chen, P. (2008). *Thickness design systems for pavements containing soil-cement bases*. Skokie, Illinois: Portland Cement Assosiation.
- Solanki, P., & Zaman, M. (2016). Design of semi-rigid type of flexible pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.10.004
- Thompson, M. (1996). *Shear Strength and Elastic Properties of Lime Soil Mixtures*. Champaign: Highway Research Board, University of Illinois.

- Ulate, A. (2017). *Asesoría técnica para realización de estudios preliminares y recomendaciones para el mejoramiento de varios caminos en Isla Chira, Puntarenas*. San José, Costa Rica: Unidad de Gestión Municipal, LanammeUCR.
- Ulloa, A., & Múnera, J. (2020). *Guía de diseño para materiales estabilizados con asfalto*. San José, Costa Rica: Lanamme, Universidad de Costa Rica.
- Villacreses, F. (2014). *DISEÑO DE BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON CEMENTO HIDRÁULICO COMO SOLUCIÓN PARA PAVIMENTOS*. Guayaquil: Universidad Laica Vicente Rocafuerte.
- Wegman, D., Sabouri, M., Korzilius, J., & Kuehl, R. (2017). *Base Stabilization Guidance and Additive Selection for Pavement Design and Rehabilitation*. SRF Consulting Group, Inc. Minnesota: Local Road Research Board (LRRB).

9. Apéndices

A.1 Resultados de la UCS de la base estabilizada con cemento

Cuadro A.1. Resultados de la compresión inconfiada para ambos periodos de curado

Espécimen	Condición	Curado (días)	% Humedad	Densidad (kg/m ³)	% Compactación	Carga máxima (kN)	Esfuerzo máximo (kPa)	Esfuerzo máximo (MPa)
P1	2C+W	7	6,2	2206	96,8	31,6	3902,3	3,9
P2	2C+W	7	5,1	2227	97,7	33,1	4077,9	4,1
P3	2C+W	28	6,4	2172	95,3	26,3	3219,2	3,2
P4	2C+W	28	5,8	2183	95,8	23,8	2936,4	2,9
P1	3C+W	7	5,2	2240	96,3	50,0	6181,0	6,2
P2	3C+W	7	5,7	2221	95,5	53,2	6573,6	6,6
P3	3C+W	28	5,7	2161	92,9	41,0	5054,2	5,1
P4	3C+W	28	5,9	2158	92,8	30,3	3725,1	3,7
P1	5C+W	7	5,6	2251	97,0	80,6	9948,2	9,9
P2	5C+W	7	5,5	2268	97,8	97,9	12066,8	12,1
P3	5C+W	28	5,7	2193	94,5	85,8	10568,5	10,6
P4	5C+W	28	6,4	2179	93,9	83,0	10223,6	10,2
P1	2C-1W	7	5,1	2200	96,5	22,3	2751,1	2,8
P2	2C-1W	7	5,6	2183	95,8	14,7	1812,8	1,8
P3	2C-1W	28	4,5	2152	94,4	24,5	3026,5	3,0
P4	2C-1W	28	4,6	2170	95,2	34,1	4210,8	4,2
P1	3C-1W	7	5,7	2187	94,1	34,1	4210,5	4,2
P2	3C-1W	7	5,2	2198	94,5	34,6	4274,5	4,3
P3	3C-1W	28	4,7	2157	92,8	38,0	4691,7	4,7
P4	3C-1W	28	4,7	2179	93,7	45,0	5553,1	5,6
P1	5C-1W	7	5,6	2224	95,9	63,7	7865,4	7,9
P2	5C-1W	7	5,8	2219	95,6	62,7	7737,3	7,7
P3	5C-1W	28	4,9	2189	94,3	68,2	8414,4	8,4
P4	5C-1W	28	4,8	2176	93,8	65,6	8086,1	8,1
P1	2C+1W	7	7,3	2235	98,0	28,1	3469,9	3,5
P2	2C+1W	7	7,2	2244	98,5	33,7	4151,6	4,2
P3	2C+1W	28	6,6	2236	98,1	42,7	5266,2	5,3
P4	2C+1W	28	6,8	2239	98,2	42,4	5230,5	5,2
P1	3C+1W	7	6,9	2248	96,7	44,8	5534,2	5,5
P2	3C+1W	7	6,9	2246	96,6	42,2	5209,6	5,2
P3	3C+1W	28	6,4	2249	96,7	58,2	7180,6	7,2
P4	3C+1W	28	6,0	2269	97,6	60,4	7434,4	7,4
P1	5C+1W	7	6,9	2272	97,9	74,9	9224,0	9,2
P2	5C+1W	7	6,5	2277	98,1	79,8	9822,3	9,8
P3	5C+1W	28	6,7	2266	97,7	87,3	10738,4	10,7
P4	5C+1W	28	6,8	2281	98,3	100,8	12396,6	12,4

A.2 Resultados del módulo de elasticidad M_E de la base estabilizada con cemento

Cuadro A.2. Resultados del cálculo del módulo de elasticidad para ambos periodos de curado

Espécimen	Condición	Curado (días)	% Humedad	Densidad (kg/m ³)	Carga última (N)	Esfuerzo último (MPa)	Deformación unitaria e (mm/mm)	Módulo Secante E_s (MPa)	Deformación unitaria $e_{25\% \sigma_{ult}}$ (mm/mm)	Módulo Elástico M_E (MPa)	Módulo Elástico M_E (kPa)
P1	2C+W	7	6,0	2332	57 779,96	7,11	0,02625	270,98	0,00364	488,15	488151
P2	2C+W	7	5,2	2347	51 073,06	6,29	0,03342	188,29	0,00295	532,82	532824
P3	2C+W	28	5,7	2354	56 799,30	7,00	0,00485	1 443,66	0,00011	15 686,89	15686892
P4	2C+W	28	5,8	2337	69 236,23	8,52	0,01655	514,69	0,00118	1 801,43	1801431
P1	3C+W	7	5,9	2340	16 517,56	6,33	0,00705	898,92	0,00095	1 666,59	1666593
P2	3C+W	7	5,8	2298	77 761,41	9,57	0,04830	198,22	0,00132	1 807,40	1807402
P3	3C+W	28	6,3	2333	95 511,62	11,72	0,00745	1 574,07	0,00028	10 353,40	10353396
P4	3C+W	28	6,0	2334	98 837,10	12,11	0,01076	1 125,89	0,00039	7 729,04	7729038
P1	5C+W	7	6,7	2344	85 011,47	10,47	0,01200	872,34	0,00012	22 673,01	22673006
P2	5C+W	7	6,6	2350	89 088,66	10,97	0,00256	4 290,65	0,00007	38 258,28	38258280
P3	5C+W	28	6,8	2355	103 569,07	12,78	0,00742	1 722,08	0,00014	22 952,70	22952705
P4	5C+W	28	6,7	2353	109 969,05	13,52	0,01015	1 332,97	0,00016	20 734,23	20734227
P1	2C-1W	7	4,2	2258	53 671,15	6,61	0,02325	284,32	0,00341	485,26	485262
P2	2C-1W	7	4,5	2253	50 071,28	6,16	0,00953	646,03	0,00049	3 138,23	3138234
P3	2C-1W	28	4,3	2271	60 495,35	7,45	0,01414	526,62	0,00120	1 554,40	1554398
P4	2C-1W	28	4,9	2237	55 154,72	6,78	0,01694	400,41	0,00267	634,82	634824
P1	3C-1W	7	4,4	2260	54 990,53	6,75	0,02381	283,34	0,00280	601,35	601347
P2	3C-1W	7	4,8	2238	55 112,73	6,76	0,01096	616,90	0,00079	2 135,13	2135133
P3	3C-1W	28	5,0	2243	49 114,02	6,03	0,00342	1 763,19	0,00008	18 030,92	18030922
P4	3C-1W	28	5,1	2233	69 321,64	8,52	0,00756	1 127,46	0,00038	5 563,88	5563878
P1	5C-1W	7	5,3	2319	85 816,92	10,63	0,00753	1 412,26	0,00099	2 697,29	2697294
P2	5C-1W	7	5,2	2331	94 357,19	11,59	0,00722	1 604,36	0,00071	4 108,34	4108342
P3	5C-1W	28	5,0	2348	116 520,24	14,33	0,02272	630,83	0,00070	5 139,46	5139461
P4	5C-1W	28	4,9	2323	114 741,10	14,10	0,00188	7 515,37	0,00031	11 297,46	11297459

Espécimen	Condición	Curado (días)	% Humedad	Densidad (kg/m ³)	Carga última (N)	Esfuerzo último (MPa)	Deformación unitaria e (mm/mm)	Módulo Secante E _s (MPa)	Deformación unitaria e _{25%σúlt} (mm/mm)	Módulo Elástico ME (MPa)	Módulo Elástico ME (kPa)
P1	2C+1W	7	7,8	2324	55 199,83	6,84	0,01902	359,51	0,00122	1 399,10	1399098
P2	2C+1W	7	6,7	2342	61 625,97	7,59	0,01891	401,38	0,00202	941,09	941094
P3	2C+1W	28	7,4	2304	57 771,61	7,11	0,02048	347,29	0,00022	8 257,76	8257759
P4	2C+1W	28	6,9	2321	58 661,46	7,25	0,01621	447,41	0,00002	90 730,46	90730459
P1	3C+1W	7	6,2	2333	71 364,61	8,80	0,01601	549,61	0,00067	3 265,14	3265143
P2	3C+1W	7	6,5	2317	70 105,40	8,63	0,01548	557,32	0,00054	3 981,17	3981172
P3	3C+1W	28	7,0	2324	86 138,70	10,60	0,02180	486,05	0,00045	5 930,25	5930248
P4	3C+1W	28	7,2	2336	88 594,40	10,92	0,02861	381,53	0,00065	4 207,40	4207405
P1	5C+1W	7	7,1	2324	71 854,29	8,84	0,01079	819,70	0,00087	2 544,65	2544652
P2	5C+1W	7	6,9	2338	78 954,47	9,74	0,01349	722,33	0,00020	12 478,57	12478568
P3	5C+1W	28	6,8	2318	103 569,07	12,78	0,00742	1 722,08	0,00014	22 952,70	22952705
P4	5C+1W	28	6,8	2319	109 969,05	13,52	0,01015	1 332,97	0,00016	20 734,23	20734227

A.3 Resultados del módulo de elasticidad M_r de la base estabilizada con cemento

Cuadro A.3. Resultados del módulo resiliente para 7 días de curado

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m^3)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
1	2	7,0	2319	0	103,4	93,5	403,7	460718
1	2	7,0	2319	1	20,7	18,6	80,7	256186
1	2	7,0	2319	2	20,7	37,5	99,6	275037
1	2	7,0	2319	3	20,7	55,9	118,0	298147
1	2	7,0	2319	4	34,5	31,1	134,6	289196
1	2	7,0	2319	5	34,5	62,1	165,7	328852
1	2	7,0	2319	6	34,5	93,3	196,8	377996
1	2	7,0	2319	7	68,9	62,2	268,9	386468
1	2	7,0	2319	8	68,9	124,5	331,2	496968
1	2	7,0	2319	9	68,9	186,2	392,9	620982
1	2	7,0	2319	10	103,4	62,2	372,4	423120
1	2	7,0	2319	11	103,4	93,4	403,7	476794
1	2	7,0	2319	12	103,4	186,4	496,6	718202
1	2	7,0	2319	13	137,9	93,5	507,2	545598
1	2	7,0	2319	14	137,9	124,5	538,2	629777
1	2	7,0	2319	15	137,9	248,5	662,2	961399
1	2	7,0	2319	16	172,3	207,5	724,4	929022
1	2	7,0	2319	17	172,3	238,4	755,3	1036901
1	2	7,0	2319	18	172,3	362,6	879,5	1211480
1	2	7,0	2319	19	206,7	273,7	893,9	1121796
1	2	7,0	2319	20	206,7	304,7	924,8	1203219
1	2	7,0	2319	21	206,7	428,7	1048,8	1313829
1	2	7,0	2319	22	241,1	339,6	1062,9	1244510
1	2	7,0	2319	23	241,1	370,6	1093,9	1375119
1	2	7,0	2319	24	241,1	561,2	1284,4	1391181
1	2	7,0	2319	25	275,5	406,0	1232,5	1331486
1	2	7,0	2319	26	275,5	437,2	1263,6	1375119
1	2	7,0	2319	27	275,5	561,2	1387,7	1478099
1	2	7,0	2319	28	309,9	472,4	1402,1	1404155
1	2	7,0	2319	29	309,9	503,4	1433,1	1449210
1	2	7,0	2319	30	309,9	627,5	1557,2	1546830
2	2	6,7	2338	0	103,4	93,2	403,4	476691
2	2	6,7	2338	1	20,7	18,7	80,8	184374
2	2	6,7	2338	2	20,7	37,4	99,5	212320
2	2	6,7	2338	3	20,7	56,0	118,1	248252
2	2	6,7	2338	4	34,5	31,2	134,7	237292
2	2	6,7	2338	5	34,5	62,2	165,7	294534
2	2	6,7	2338	6	34,5	93,2	196,7	356687

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
2	2	6,7	2338	7	68,9	62,1	268,8	349304
2	2	6,7	2338	8	68,9	124,3	331,0	461081
2	2	6,7	2338	9	68,9	186,2	392,9	538949
2	2	6,7	2338	10	103,4	62,1	372,3	387453
2	2	6,7	2338	11	103,4	93,1	403,3	452482
2	2	6,7	2338	12	103,4	186,2	496,4	618128
2	2	6,7	2338	13	137,9	93,3	507,0	509914
2	2	6,7	2338	14	137,9	124,3	538,0	570058
2	2	6,7	2338	15	137,9	248,4	662,1	736403
2	2	6,7	2338	16	172,3	207,2	724,1	701144
2	2	6,7	2338	17	172,3	238,1	755,0	745002
2	2	6,7	2338	18	172,3	362,6	879,5	908442
2	2	6,7	2338	19	206,7	273,4	893,4	810902
2	2	6,7	2338	20	206,7	304,7	924,8	862787
2	2	6,7	2338	21	206,7	428,2	1048,3	1000738
2	2	6,7	2338	22	241,1	339,7	1063,0	902914
2	2	6,7	2338	23	241,1	370,8	1094,1	1061600
2	2	6,7	2338	24	241,1	561,2	1284,5	1095468
2	2	6,7	2338	25	275,5	406,0	1232,5	1015043
2	2	6,7	2338	26	275,5	436,8	1263,3	1061600
2	2	6,7	2338	27	275,5	561,2	1387,7	1188983
2	2	6,7	2338	28	309,9	471,8	1401,5	1112524
2	2	6,7	2338	29	309,9	503,0	1432,7	1157257
2	2	6,7	2338	30	309,9	627,3	1557,0	1277014
3	2	4,6	2267	0	103,4	93,2	403,4	579072
3	2	4,6	2267	1	20,7	18,8	80,9	141499
3	2	4,6	2267	2	20,7	37,5	99,5	173366
3	2	4,6	2267	3	20,7	56,1	118,2	221254
3	2	4,6	2267	4	34,5	31,2	134,7	211857
3	2	4,6	2267	5	34,5	62,1	165,6	305593
3	2	4,6	2267	6	34,5	93,2	196,7	392215
3	2	4,6	2267	7	68,9	62,1	268,9	440756
3	2	4,6	2267	8	68,9	124,2	330,9	609474
3	2	4,6	2267	9	68,9	186,2	392,9	723963
3	2	4,6	2267	10	103,4	62,1	372,3	497931
3	2	4,6	2267	11	103,4	93,3	403,5	603124
3	2	4,6	2267	12	103,4	186,1	496,3	836543
3	2	4,6	2267	13	137,9	93,4	507,0	650292
3	2	4,6	2267	14	137,9	124,4	538,1	759097
3	2	4,6	2267	15	137,9	248,4	662,1	988515
3	2	4,6	2267	16	172,3	207,2	724,1	997490

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
3	2	4,6	2267	17	172,3	238,3	755,2	1042594
3	2	4,6	2267	18	172,3	362,6	879,5	1176711
3	2	4,6	2267	19	206,7	273,7	893,9	1149180
3	2	4,6	2267	20	206,7	304,5	924,6	1205895
3	2	4,6	2267	21	206,7	428,8	1048,9	1290609
3	2	4,6	2267	22	241,1	339,6	1062,9	1276360
3	2	4,6	2267	23	241,1	370,3	1093,6	1434050
3	2	4,6	2267	24	241,1	561,2	1284,5	1395024
3	2	4,6	2267	25	275,5	405,9	1232,4	1391465
3	2	4,6	2267	26	275,5	437,0	1263,5	1434050
3	2	4,6	2267	27	275,5	561,2	1387,6	1523669
3	2	4,6	2267	28	309,9	471,8	1401,5	1494452
3	2	4,6	2267	29	309,9	503,3	1433,0	1523030
3	2	4,6	2267	30	309,9	538,1	1467,8	1531957
4	2	4,4	2275	0	103,4	1,9	312,1	627160
4	2	4,4	2275	1	20,7	1,2	63,3	274437
4	2	4,4	2275	2	20,7	1,4	63,5	275875
4	2	4,4	2275	3	20,7	1,3	63,4	316879
4	2	4,4	2275	4	34,5	1,6	105,1	322520
4	2	4,4	2275	5	34,5	1,8	105,3	457790
4	2	4,4	2275	6	34,5	1,8	105,3	548399
4	2	4,4	2275	7	68,9	1,7	208,4	517713
4	2	4,4	2275	8	68,9	1,6	208,3	593695
4	2	4,4	2275	9	68,9	1,6	208,3	507374
4	2	4,4	2275	10	103,4	1,7	311,9	500081
4	2	4,4	2275	11	103,4	1,7	311,9	623820
4	2	4,4	2275	12	103,4	1,7	311,9	571125
4	2	4,4	2275	13	137,9	1,8	415,4	580638
4	2	4,4	2275	14	137,9	2,0	415,7	606319
4	2	4,4	2275	15	137,9	1,9	415,6	668879
4	2	4,4	2275	16	172,3	2,4	519,3	715078
4	2	4,4	2275	17	172,3	2,5	519,4	667213
4	2	4,4	2275	18	172,3	2,2	519,1	476272
4	2	4,4	2275	19	206,7	2,4	622,5	654515
4	2	4,4	2275	20	206,7	2,4	622,5	616025
4	2	4,4	2275	21	206,7	2,3	622,4	629246
4	2	4,4	2275	22	241,1	2,3	725,6	630813
4	2	4,4	2275	23	241,1	2,3	725,6	779504
4	2	4,4	2275	24	241,1	2,1	725,4	503988
4	2	4,4	2275	25	275,5	2,4	828,9	703283
4	2	4,4	2275	26	275,5	2,3	828,8	779504

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
4	2	4,4	2275	27	275,5	2,1	828,6	558267
4	2	4,4	2275	28	309,9	2,2	931,9	741828
4	2	4,4	2275	29	309,9	2,2	931,9	589501
4	2	4,4	2275	30	309,9	2,3	932,0	526913
5	2	6,8	2336	0	103,4	93,2	403,4	955466
5	2	6,8	2336	1	20,7	18,8	80,9	423590
5	2	6,8	2336	2	20,7	37,5	99,6	456190
5	2	6,8	2336	3	20,7	56,2	118,3	500934
5	2	6,8	2336	4	34,5	31,1	134,6	504873
5	2	6,8	2336	5	34,5	62,2	165,7	585326
5	2	6,8	2336	6	34,5	93,2	196,7	656762
5	2	6,8	2336	7	68,9	62,2	268,9	750978
5	2	6,8	2336	8	68,9	124,3	331,0	892730
5	2	6,8	2336	9	68,9	186,2	392,9	983148
5	2	6,8	2336	10	103,4	62,3	372,5	830126
5	2	6,8	2336	11	103,4	93,4	403,6	910680
5	2	6,8	2336	12	103,4	186,4	496,6	1100328
5	2	6,8	2336	13	137,9	93,3	507,0	959462
5	2	6,8	2336	14	137,9	124,3	538,0	1040374
5	2	6,8	2336	15	137,9	248,4	662,1	1192298
5	2	6,8	2336	16	172,3	207,4	724,3	1196008
5	2	6,8	2336	17	172,3	238,4	755,3	1234113
5	2	6,8	2336	18	172,3	362,3	879,2	1260810
5	2	6,8	2336	19	206,7	273,5	893,6	1282759
5	2	6,8	2336	20	206,7	304,4	924,5	1318423
5	2	6,8	2336	21	206,7	428,8	1048,9	1374439
5	2	6,8	2336	22	241,1	339,9	1063,2	1342826
5	2	6,8	2336	23	241,1	370,9	1094,2	1462171
5	2	6,8	2336	24	241,1	561,1	1284,4	1422709
5	2	6,8	2336	25	275,5	406,1	1232,6	1418812
5	2	6,8	2336	26	275,5	437,7	1264,1	1462171
5	2	6,8	2336	27	275,5	561,1	1387,6	1476967
5	2	6,8	2336	28	309,9	473,2	1402,9	1475120
5	2	6,8	2336	29	309,9	504,1	1433,8	1494387
5	2	6,8	2336	30	309,9	627,0	1556,7	1509513
6	2	6,0	2353	0	103,4	93,2	403,4	892157
6	2	6,0	2353	1	20,7	18,7	80,8	393163
6	2	6,0	2353	2	20,7	37,5	99,6	468603
6	2	6,0	2353	3	20,7	56,1	118,2	522034
6	2	6,0	2353	4	34,5	31,2	134,7	492923
6	2	6,0	2353	5	34,5	62,2	165,7	589148

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
6	2	6,0	2353	6	34,5	93,2	196,7	661161
6	2	6,0	2353	7	68,9	62,2	268,8	717791
6	2	6,0	2353	8	68,9	124,3	331,0	873951
6	2	6,0	2353	9	68,9	186,3	393,0	965407
6	2	6,0	2353	10	103,4	62,2	372,4	755209
6	2	6,0	2353	11	103,4	93,2	403,4	851982
6	2	6,0	2353	12	103,4	186,2	496,5	1085826
6	2	6,0	2353	13	137,9	93,3	507,0	914898
6	2	6,0	2353	14	137,9	124,3	538,0	1028377
6	2	6,0	2353	15	137,9	248,3	662,0	1246268
6	2	6,0	2353	16	172,3	207,3	724,2	1272857
6	2	6,0	2353	17	172,3	238,4	755,3	1315325
6	2	6,0	2353	18	172,3	362,4	879,3	1390698
6	2	6,0	2353	19	206,7	273,5	893,6	1374996
6	2	6,0	2353	20	206,7	304,8	924,9	1423664
6	2	6,0	2353	21	206,7	429,0	1049,1	1485474
6	2	6,0	2353	22	241,1	340,0	1063,3	1477566
6	2	6,0	2353	23	241,1	371,2	1094,5	1591308
6	2	6,0	2353	24	241,1	561,3	1284,6	1543846
6	2	6,0	2353	25	275,5	406,4	1233,0	1573229
6	2	6,0	2353	26	275,5	437,4	1263,9	1591308
6	2	6,0	2353	27	275,5	561,3	1387,8	1601470
6	2	6,0	2353	28	309,9	472,9	1402,6	1597703
6	2	6,0	2353	29	309,9	504,1	1433,8	1628053
6	2	6,0	2353	30	309,9	627,3	1557,0	1663122
7	3	6,8	2353	0	103,4	93,2	403,4	452426
7	3	6,8	2353	1	20,7	18,8	80,9	151930
7	3	6,8	2353	2	20,7	37,6	99,7	182186
7	3	6,8	2353	3	20,7	56,1	118,2	212514
7	3	6,8	2353	4	34,5	31,2	134,7	192890
7	3	6,8	2353	5	34,5	62,1	165,6	245924
7	3	6,8	2353	6	34,5	93,3	196,8	307320
7	3	6,8	2353	7	68,9	62,1	268,8	307438
7	3	6,8	2353	8	68,9	124,2	330,9	460171
7	3	6,8	2353	9	68,9	186,3	393,1	615917
7	3	6,8	2353	10	103,4	62,2	372,4	374625
7	3	6,8	2353	11	103,4	93,3	403,5	465674
7	3	6,8	2353	12	103,4	186,3	496,5	722308
7	3	6,8	2353	13	137,9	93,2	506,9	582013
7	3	6,8	2353	14	137,9	124,4	538,1	683432
7	3	6,8	2353	15	137,9	248,5	662,2	1024250

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
7	3	6,8	2353	16	172,3	207,3	724,3	932124
7	3	6,8	2353	17	172,3	238,2	755,1	1005769
7	3	6,8	2353	18	172,3	362,4	879,3	1240111
7	3	6,8	2353	19	206,7	273,6	893,7	1088969
7	3	6,8	2353	20	206,7	304,9	925,0	1150156
7	3	6,8	2353	21	206,7	428,3	1048,4	1366754
7	3	6,8	2353	22	241,1	340,1	1063,4	1218523
7	3	6,8	2353	23	241,1	370,6	1093,9	1356695
7	3	6,8	2353	24	241,1	560,8	1284,1	1417647
7	3	6,8	2353	25	275,5	405,2	1231,7	1304320
7	3	6,8	2353	26	275,5	436,4	1263,0	1356695
7	3	6,8	2353	27	275,5	560,8	1387,3	1537166
7	3	6,8	2353	28	309,9	472,1	1401,8	1425177
7	3	6,8	2353	29	309,9	503,2	1432,9	1475165
7	3	6,8	2353	30	309,9	627,3	1557,0	1660177
8	3	6,4	2368	0	103,4	93,2	403,4	642354
8	3	6,4	2368	1	20,7	18,8	80,9	167090
8	3	6,4	2368	2	20,7	37,5	99,6	219771
8	3	6,4	2368	3	20,7	55,9	118,0	284836
8	3	6,4	2368	4	34,5	31,2	134,7	262139
8	3	6,4	2368	5	34,5	62,1	165,6	420366
8	3	6,4	2368	6	34,5	93,3	196,8	572284
8	3	6,4	2368	7	68,9	62,2	268,9	594655
8	3	6,4	2368	8	68,9	124,3	331,0	859253
8	3	6,4	2368	9	68,9	186,3	393,0	1023219
8	3	6,4	2368	10	103,4	62,2	372,4	559627
8	3	6,4	2368	11	103,4	93,3	403,5	654873
8	3	6,4	2368	12	103,4	186,3	496,5	1015877
8	3	6,4	2368	13	137,9	93,3	507,0	632920
8	3	6,4	2368	14	137,9	124,4	538,1	747845
8	3	6,4	2368	15	137,9	248,5	662,2	1170068
8	3	6,4	2368	16	172,3	207,3	724,2	1014734
8	3	6,4	2368	17	172,3	238,2	755,1	1120832
8	3	6,4	2368	18	172,3	362,1	879,0	1362507
8	3	6,4	2368	19	206,7	273,7	893,8	1200356
8	3	6,4	2368	20	206,7	304,7	924,8	1288061
8	3	6,4	2368	21	206,7	428,7	1048,8	1472743
8	3	6,4	2368	22	241,1	339,6	1062,9	1294089
8	3	6,4	2368	23	241,1	370,9	1094,2	1455647
8	3	6,4	2368	24	241,1	560,8	1284,1	1534550
8	3	6,4	2368	25	275,5	405,7	1232,2	1387216

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
8	3	6,4	2368	26	275,5	437,0	1263,5	1455647
8	3	6,4	2368	27	275,5	560,8	1387,3	1612488
8	3	6,4	2368	28	309,9	472,0	1401,7	1497649
8	3	6,4	2368	29	309,9	502,9	1432,6	1566831
8	3	6,4	2368	30	309,9	627,0	1556,7	1680377
9	3	5,3	2391	0	103,4	93,3	403,5	933689
9	3	5,3	2391	1	20,7	18,7	80,8	397747
9	3	5,3	2391	2	20,7	37,5	99,6	417309
9	3	5,3	2391	3	20,7	56,2	118,2	455794
9	3	5,3	2391	4	34,5	31,1	134,6	465496
9	3	5,3	2391	5	34,5	62,1	165,6	539790
9	3	5,3	2391	6	34,5	93,3	196,8	613216
9	3	5,3	2391	7	68,9	62,1	268,8	719835
9	3	5,3	2391	8	68,9	124,0	330,7	833584
9	3	5,3	2391	9	68,9	186,0	392,7	919751
9	3	5,3	2391	10	103,4	62,2	372,4	818698
9	3	5,3	2391	11	103,4	93,3	403,5	899663
9	3	5,3	2391	12	103,4	186,3	496,5	1043263
9	3	5,3	2391	13	137,9	93,2	506,9	995435
9	3	5,3	2391	14	137,9	124,1	537,8	1034667
9	3	5,3	2391	15	137,9	248,2	661,9	1213612
9	3	5,3	2391	16	172,3	207,3	724,2	1228631
9	3	5,3	2391	17	172,3	238,3	755,2	1272713
9	3	5,3	2391	18	172,3	362,5	879,4	1365512
9	3	5,3	2391	19	206,7	273,5	893,6	1370938
9	3	5,3	2391	20	206,7	304,6	924,7	1404970
9	3	5,3	2391	21	206,7	428,7	1048,8	1479986
9	3	5,3	2391	22	241,1	339,5	1062,8	1461135
9	3	5,3	2391	23	241,1	370,9	1094,2	1564412
9	3	5,3	2391	24	241,1	560,5	1283,8	1577277
9	3	5,3	2391	25	275,5	405,7	1232,2	1535368
9	3	5,3	2391	26	275,5	436,8	1263,2	1564412
9	3	5,3	2391	27	275,5	560,5	1387,1	1667068
9	3	5,3	2391	28	309,9	472,7	1402,3	1628908
9	3	5,3	2391	29	309,9	504,4	1434,1	1668793
9	3	5,3	2391	30	309,9	626,7	1556,4	1717237
10	3	5,2	2390	0	103,4	93,3	403,5	919216
10	3	5,2	2390	1	20,7	18,7	80,8	443621
10	3	5,2	2390	2	20,7	37,5	99,6	470431
10	3	5,2	2390	3	20,7	56,1	118,2	516288
10	3	5,2	2390	4	34,5	31,1	134,6	522337

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
10	3	5,2	2390	5	34,5	62,1	165,6	610801
10	3	5,2	2390	6	34,5	93,2	196,7	681421
10	3	5,2	2390	7	68,9	62,1	268,8	754960
10	3	5,2	2390	8	68,9	124,3	331,0	918012
10	3	5,2	2390	9	68,9	186,0	392,8	1027643
10	3	5,2	2390	10	103,4	62,1	372,3	824136
10	3	5,2	2390	11	103,4	93,3	403,6	913173
10	3	5,2	2390	12	103,4	186,2	496,4	1117825
10	3	5,2	2390	13	137,9	93,3	507,0	935211
10	3	5,2	2390	14	137,9	124,3	538,0	1013392
10	3	5,2	2390	15	137,9	248,4	662,1	1247283
10	3	5,2	2390	16	172,3	207,4	724,3	1251654
10	3	5,2	2390	17	172,3	238,3	755,2	1315639
10	3	5,2	2390	18	172,3	362,6	879,5	1446178
10	3	5,2	2390	19	206,7	273,5	893,6	1394707
10	3	5,2	2390	20	206,7	304,8	924,8	1446704
10	3	5,2	2390	21	206,7	428,5	1048,6	1538051
10	3	5,2	2390	22	241,1	339,7	1063,0	1509096
10	3	5,2	2390	23	241,1	370,3	1093,7	1616215
10	3	5,2	2390	24	241,1	560,4	1283,7	1652341
10	3	5,2	2390	25	275,5	405,7	1232,2	1586779
10	3	5,2	2390	26	275,5	437,1	1263,6	1616215
10	3	5,2	2390	27	275,5	560,4	1386,9	1745649
10	3	5,2	2390	28	309,9	472,7	1402,4	1688060
10	3	5,2	2390	29	309,9	504,0	1433,6	1732388
10	3	5,2	2390	30	309,9	626,9	1556,6	1827478
11	3	6,4	2826	0	103,4	93,3	403,5	787926
11	3	6,4	2826	1	20,7	18,7	80,8	334025
11	3	6,4	2826	2	20,7	37,5	99,6	400756
11	3	6,4	2826	3	20,7	56,2	118,3	454645
11	3	6,4	2826	4	34,5	31,1	134,6	394560
11	3	6,4	2826	5	34,5	62,3	165,7	532999
11	3	6,4	2826	6	34,5	93,2	196,7	628519
11	3	6,4	2826	7	68,9	62,2	268,9	581780
11	3	6,4	2826	8	68,9	124,1	330,8	849220
11	3	6,4	2826	9	68,9	186,1	392,8	1015261
11	3	6,4	2826	10	103,4	62,3	372,5	601468
11	3	6,4	2826	11	103,4	93,4	403,6	753398
11	3	6,4	2826	12	103,4	186,5	496,7	1097780
11	3	6,4	2826	13	137,9	93,4	507,2	780131
11	3	6,4	2826	14	137,9	124,4	538,1	913559

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
11	3	6,4	2826	15	137,9	248,3	662,0	1299174
11	3	6,4	2826	16	172,3	207,4	724,3	1236824
11	3	6,4	2826	17	172,3	238,2	755,1	1324608
11	3	6,4	2826	18	172,3	362,2	879,1	1528435
11	3	6,4	2826	19	206,7	273,7	893,8	1458401
11	3	6,4	2826	20	206,7	304,7	924,7	1531686
11	3	6,4	2826	21	206,7	428,9	1049,0	1677977
11	3	6,4	2826	22	241,1	339,7	1063,0	1588942
11	3	6,4	2826	23	241,1	370,4	1093,7	1786943
11	3	6,4	2826	24	241,1	561,0	1284,2	1803996
11	3	6,4	2826	25	275,5	405,6	1232,1	1724970
11	3	6,4	2826	26	275,5	436,6	1263,2	1786943
11	3	6,4	2826	27	275,5	561,0	1387,5	1897832
11	3	6,4	2826	28	309,9	472,0	1401,7	1845460
11	3	6,4	2826	29	309,9	503,2	1432,9	1892031
11	3	6,4	2826	30	309,9	627,4	1557,1	2039135
12	3	6,8	2818	0	103,4	93,4	403,5	743207
12	3	6,8	2818	1	20,7	18,7	80,8	268009
12	3	6,8	2818	2	20,7	37,5	99,5	312088
12	3	6,8	2818	3	20,7	56,2	118,3	354641
12	3	6,8	2818	4	34,5	31,1	134,7	328978
12	3	6,8	2818	5	34,5	62,1	165,6	427261
12	3	6,8	2818	6	34,5	93,3	196,8	531959
12	3	6,8	2818	7	68,9	62,1	268,8	535528
12	3	6,8	2818	8	68,9	124,3	331,0	756305
12	3	6,8	2818	9	68,9	186,4	393,1	872724
12	3	6,8	2818	10	103,4	62,2	372,4	585573
12	3	6,8	2818	11	103,4	93,3	403,5	709323
12	3	6,8	2818	12	103,4	186,3	496,5	966047
12	3	6,8	2818	13	137,9	93,5	507,2	782872
12	3	6,8	2818	14	137,9	124,5	538,2	878175
12	3	6,8	2818	15	137,9	248,3	661,9	1115406
12	3	6,8	2818	16	172,3	207,4	724,3	1111501
12	3	6,8	2818	17	172,3	238,5	755,4	1172455
12	3	6,8	2818	18	172,3	362,2	879,1	1348042
12	3	6,8	2818	19	206,7	273,5	893,6	1325415
12	3	6,8	2818	20	206,7	304,4	924,6	1388072
12	3	6,8	2818	21	206,7	428,6	1048,7	1478419
12	3	6,8	2818	22	241,1	339,8	1063,2	1493448
12	3	6,8	2818	23	241,1	370,6	1093,9	1627043
12	3	6,8	2818	24	241,1	561,1	1284,4	1615714

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
12	3	6,8	2818	25	275,5	405,7	1232,2	1590912
12	3	6,8	2818	26	275,5	437,3	1263,8	1627043
12	3	6,8	2818	27	275,5	561,1	1387,6	1715573
12	3	6,8	2818	28	309,9	473,1	1402,8	1698191
12	3	6,8	2818	29	309,9	504,9	1434,6	1737433
12	3	6,8	2818	30	309,9	628,5	1558,2	1788926
13	5	6,3	2376	0	103,4	93,2	403,4	505181
13	5	6,3	2376	1	20,7	18,7	80,8	212144
13	5	6,3	2376	2	20,7	37,4	99,5	258713
13	5	6,3	2376	3	20,7	56,1	118,2	298307
13	5	6,3	2376	4	34,5	31,0	134,5	280149
13	5	6,3	2376	5	34,5	62,2	165,7	345810
13	5	6,3	2376	6	34,5	93,1	196,5	403390
13	5	6,3	2376	7	68,9	62,0	268,7	407164
13	5	6,3	2376	8	68,9	124,2	330,9	503538
13	5	6,3	2376	9	68,9	186,2	392,9	588289
13	5	6,3	2376	10	103,4	62,1	372,3	468162
13	5	6,3	2376	11	103,4	93,2	403,4	517093
13	5	6,3	2376	12	103,4	186,1	496,3	619325
13	5	6,3	2376	13	137,9	93,2	506,9	543077
13	5	6,3	2376	14	137,9	124,2	537,9	579250
13	5	6,3	2376	15	137,9	248,2	661,9	739210
13	5	6,3	2376	16	172,3	207,3	724,3	690552
13	5	6,3	2376	17	172,3	238,2	755,1	735929
13	5	6,3	2376	18	172,3	362,3	879,2	916623
13	5	6,3	2376	19	206,7	273,7	893,8	833847
13	5	6,3	2376	20	206,7	304,6	924,7	900684
13	5	6,3	2376	21	206,7	428,6	1048,7	1066899
13	5	6,3	2376	22	241,1	339,4	1062,7	990570
13	5	6,3	2376	23	241,1	370,5	1093,8	1207508
13	5	6,3	2376	24	241,1	561,3	1284,6	1252431
13	5	6,3	2376	25	275,5	405,9	1232,4	1148167
13	5	6,3	2376	26	275,5	436,6	1263,1	1207508
13	5	6,3	2376	27	275,5	561,3	1387,8	1386909
13	5	6,3	2376	28	309,9	471,8	1401,4	1279130
13	5	6,3	2376	29	309,9	503,0	1432,7	1336097
13	5	6,3	2376	30	309,9	627,5	1557,2	1444877
14	5	6,6	2357	0	103,4	93,2	403,4	740911
14	5	6,6	2357	1	20,7	18,8	80,9	293776
14	5	6,6	2357	2	20,7	37,4	99,5	325888
14	5	6,6	2357	3	20,7	56,1	118,2	372726

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
14	5	6,6	2357	4	34,5	31,1	134,6	367107
14	5	6,6	2357	5	34,5	62,0	165,5	447652
14	5	6,6	2357	6	34,5	93,0	196,5	531825
14	5	6,6	2357	7	68,9	62,2	268,9	600739
14	5	6,6	2357	8	68,9	124,1	330,8	744213
14	5	6,6	2357	9	68,9	186,0	392,7	866433
14	5	6,6	2357	10	103,4	62,1	372,3	624075
14	5	6,6	2357	11	103,4	93,3	403,5	723772
14	5	6,6	2357	12	103,4	186,3	496,5	975227
14	5	6,6	2357	13	137,9	93,2	506,9	793050
14	5	6,6	2357	14	137,9	124,2	537,9	875791
14	5	6,6	2357	15	137,9	248,2	662,0	1128434
14	5	6,6	2357	16	172,3	207,4	724,3	1159776
14	5	6,6	2357	17	172,3	238,3	755,2	1219680
14	5	6,6	2357	18	172,3	362,4	879,3	1448454
14	5	6,6	2357	19	206,7	273,7	893,8	1382772
14	5	6,6	2357	20	206,7	304,6	924,7	1385716
14	5	6,6	2357	21	206,7	428,5	1048,6	1608842
14	5	6,6	2357	22	241,1	339,7	1063,0	1545976
14	5	6,6	2357	23	241,1	370,9	1094,2	1722204
14	5	6,6	2357	24	241,1	561,0	1284,3	1730102
14	5	6,6	2357	25	275,5	405,7	1232,2	1715424
14	5	6,6	2357	26	275,5	436,7	1263,2	1722204
14	5	6,6	2357	27	275,5	561,0	1387,5	1841073
14	5	6,6	2357	28	309,9	471,9	1401,6	1805704
14	5	6,6	2357	29	309,9	503,0	1432,7	1820941
14	5	6,6	2357	30	309,9	628,1	1557,8	1958071
15	5	5,8	2381	0	103,4	93,3	403,4	840463
15	5	5,8	2381	1	20,7	18,7	80,8	412362
15	5	5,8	2381	2	20,7	37,5	99,6	470962
15	5	5,8	2381	3	20,7	56,2	118,3	519457
15	5	5,8	2381	4	34,5	31,1	134,6	490581
15	5	5,8	2381	5	34,5	62,2	165,7	592581
15	5	5,8	2381	6	34,5	93,4	196,9	677698
15	5	5,8	2381	7	68,9	62,2	269,0	645643
15	5	5,8	2381	8	68,9	124,3	331,0	899912
15	5	5,8	2381	9	68,9	186,0	392,7	1070265
15	5	5,8	2381	10	103,4	62,2	372,5	668010
15	5	5,8	2381	11	103,4	93,3	403,5	826801
15	5	5,8	2381	12	103,4	186,2	496,4	1187669
15	5	5,8	2381	13	137,9	93,3	507,0	878539

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
15	5	5,8	2381	14	137,9	124,3	538,0	1036744
15	5	5,8	2381	15	137,9	248,3	661,9	1402123
15	5	5,8	2381	16	172,3	207,3	724,2	1357303
15	5	5,8	2381	17	172,3	238,4	755,3	1438364
15	5	5,8	2381	18	172,3	362,7	879,6	1657041
15	5	5,8	2381	19	206,7	273,4	893,5	1581554
15	5	5,8	2381	20	206,7	304,4	924,5	1651322
15	5	5,8	2381	21	206,7	428,3	1048,5	1851962
15	5	5,8	2381	22	241,1	339,7	1063,0	1746532
15	5	5,8	2381	23	241,1	370,8	1094,1	1956520
15	5	5,8	2381	24	241,1	560,7	1283,9	1983874
15	5	5,8	2381	25	275,5	405,5	1232,0	1900824
15	5	5,8	2381	26	275,5	436,9	1263,4	1956520
15	5	5,8	2381	27	275,5	560,7	1387,2	2118184
15	5	5,8	2381	28	309,9	472,4	1402,1	2016294
15	5	5,8	2381	29	309,9	503,6	1433,3	2064527
15	5	5,8	2381	30	309,9	626,7	1556,4	2245202
16	5	6,2	2369	0	103,4	93,3	403,5	935009
16	5	6,2	2369	1	20,7	18,8	80,9	513409
16	5	6,2	2369	2	20,7	37,6	99,7	536408
16	5	6,2	2369	3	20,7	56,2	118,3	579972
16	5	6,2	2369	4	34,5	31,2	134,7	578443
16	5	6,2	2369	5	34,5	62,3	165,8	643433
16	5	6,2	2369	6	34,5	93,5	197,0	712136
16	5	6,2	2369	7	68,9	62,3	269,0	754825
16	5	6,2	2369	8	68,9	124,3	331,1	927113
16	5	6,2	2369	9	68,9	186,1	392,8	1030742
16	5	6,2	2369	10	103,4	62,3	372,5	770870
16	5	6,2	2369	11	103,4	93,3	403,6	881651
16	5	6,2	2369	12	103,4	186,3	496,5	1137386
16	5	6,2	2369	13	137,9	93,3	507,1	949936
16	5	6,2	2369	14	137,9	124,4	538,1	1060509
16	5	6,2	2369	15	137,9	248,5	662,2	1331230
16	5	6,2	2369	16	172,3	207,3	724,2	1330922
16	5	6,2	2369	17	172,3	238,3	755,2	1415353
16	5	6,2	2369	18	172,3	362,6	879,5	1600203
16	5	6,2	2369	19	206,7	273,4	893,5	1575460
16	5	6,2	2369	20	206,7	304,7	924,8	1662261
16	5	6,2	2369	21	206,7	429,0	1049,1	1866168
16	5	6,2	2369	22	241,1	339,8	1063,1	1801176
16	5	6,2	2369	23	241,1	370,7	1094,0	2082639

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
16	5	6,2	2369	24	241,1	560,7	1283,9	2015748
16	5	6,2	2369	25	275,5	406,2	1232,7	2032554
16	5	6,2	2369	26	275,5	437,6	1264,1	2082639
16	5	6,2	2369	27	275,5	560,7	1387,1	2196888
16	5	6,2	2369	28	309,9	473,9	1403,6	2179745
16	5	6,2	2369	29	309,9	505,2	1434,9	2216486
16	5	6,2	2369	30	309,9	627,0	1556,7	2370328
17	5	6,9	2366	0	103,4	93,3	403,5	585180
17	5	6,9	2366	1	20,7	18,7	80,8	259251
17	5	6,9	2366	2	20,7	37,6	99,7	320198
17	5	6,9	2366	3	20,7	56,2	118,3	385753
17	5	6,9	2366	4	34,5	31,2	134,7	321814
17	5	6,9	2366	5	34,5	62,2	165,7	431903
17	5	6,9	2366	6	34,5	93,4	196,9	536307
17	5	6,9	2366	7	68,9	62,2	268,9	478503
17	5	6,9	2366	8	68,9	124,3	330,9	682832
17	5	6,9	2366	9	68,9	186,2	392,9	857229
17	5	6,9	2366	10	103,4	62,2	372,4	515769
17	5	6,9	2366	11	103,4	93,3	403,5	599404
17	5	6,9	2366	12	103,4	186,1	496,3	876725
17	5	6,9	2366	13	137,9	93,4	507,1	591121
17	5	6,9	2366	14	137,9	124,3	538,0	674443
17	5	6,9	2366	15	137,9	248,5	662,2	1018260
17	5	6,9	2366	16	172,3	207,3	724,2	832979
17	5	6,9	2366	17	172,3	238,5	755,4	925385
17	5	6,9	2366	18	172,3	362,6	879,5	1185795
17	5	6,9	2366	19	206,7	273,7	893,8	937101
17	5	6,9	2366	20	206,7	304,5	924,6	1017360
17	5	6,9	2366	21	206,7	428,3	1048,4	1261892
17	5	6,9	2366	22	241,1	339,4	1062,6	1048941
17	5	6,9	2366	23	241,1	370,5	1093,9	1211514
17	5	6,9	2366	24	241,1	560,8	1284,1	1304995
17	5	6,9	2366	25	275,5	405,6	1232,1	1160518
17	5	6,9	2366	26	275,5	436,6	1263,1	1211514
17	5	6,9	2366	27	275,5	560,8	1387,3	1377745
17	5	6,9	2366	28	309,9	471,9	1401,7	1240093
17	5	6,9	2366	29	309,9	503,1	1432,8	1294444
17	5	6,9	2366	30	309,9	626,9	1556,6	1480501
18	5	6,1	2378	0	103,4	93,4	403,6	888171
18	5	6,1	2378	1	20,7	18,8	80,9	360846
18	5	6,1	2378	2	20,7	37,5	99,6	484404

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
18	5	6,1	2378	3	20,7	56,1	118,2	578677
18	5	6,1	2378	4	34,5	31,2	134,7	465656
18	5	6,1	2378	5	34,5	62,2	165,7	645326
18	5	6,1	2378	6	34,5	93,2	196,7	786004
18	5	6,1	2378	7	68,9	62,3	268,9	709703
18	5	6,1	2378	8	68,9	124,3	330,9	979755
18	5	6,1	2378	9	68,9	186,4	393,1	1139784
18	5	6,1	2378	10	103,4	62,2	372,4	747377
18	5	6,1	2378	11	103,4	93,4	403,6	881544
18	5	6,1	2378	12	103,4	186,4	496,6	1227275
18	5	6,1	2378	13	137,9	93,3	507,0	944154
18	5	6,1	2378	14	137,9	124,3	538,0	1080541
18	5	6,1	2378	15	137,9	248,6	662,2	1418133
18	5	6,1	2378	16	172,3	207,5	724,4	1384376
18	5	6,1	2378	17	172,3	238,5	755,4	1505044
18	5	6,1	2378	18	172,3	362,5	879,5	1696485
18	5	6,1	2378	19	206,7	273,7	893,8	1640539
18	5	6,1	2378	20	206,7	304,8	924,9	1722039
18	5	6,1	2378	21	206,7	428,7	1048,8	1890941
18	5	6,1	2378	22	241,1	339,6	1062,9	1905534
18	5	6,1	2378	23	241,1	370,8	1094,1	2079858
18	5	6,1	2378	24	241,1	560,6	1283,9	2053926
18	5	6,1	2378	25	275,5	405,7	1232,2	2056205
18	5	6,1	2378	26	275,5	437,4	1263,9	2079858
18	5	6,1	2378	27	275,5	560,6	1387,1	2174037
18	5	6,1	2378	28	309,9	473,2	1402,9	2143193
18	5	6,1	2378	29	309,9	505,9	1435,6	2191400
18	5	6,1	2378	30	309,9	626,8	1556,5	2299964

Cuadro A.4. Resultados del módulo resiliente para 28 días de curado

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
1	2	7,6	2330	0	103,4	93,3	403,5	886168
1	2	7,6	2330	1	20,7	18,7	80,8	334459
1	2	7,6	2330	2	20,7	37,5	99,6	370958
1	2	7,6	2330	3	20,7	56,0	118,1	415623
1	2	7,6	2330	4	34,5	31,2	134,6	434019
1	2	7,6	2330	5	34,5	62,2	165,7	532621
1	2	7,6	2330	6	34,5	93,3	196,8	608023
1	2	7,6	2330	7	68,9	62,2	268,9	703452
1	2	7,6	2330	8	68,9	124,2	330,9	882204
1	2	7,6	2330	9	68,9	186,3	393,0	961187
1	2	7,6	2330	10	103,4	62,2	372,4	752118
1	2	7,6	2330	11	103,4	93,3	403,5	847463
1	2	7,6	2330	12	103,4	186,3	496,5	1061698
1	2	7,6	2330	13	137,9	93,3	507,0	896863
1	2	7,6	2330	14	137,9	124,4	538,1	990423
1	2	7,6	2330	15	137,9	248,6	662,3	1189470
1	2	7,6	2330	16	172,3	207,3	724,2	1189140
1	2	7,6	2330	17	172,3	238,2	755,1	1237863
1	2	7,6	2330	18	172,3	362,2	879,1	1373254
1	2	7,6	2330	19	206,7	273,6	893,7	1315588
1	2	7,6	2330	20	206,7	304,6	924,7	1352034
1	2	7,6	2330	21	206,7	428,6	1048,7	1459680
1	2	7,6	2330	22	241,1	339,4	1062,7	1427664
1	2	7,6	2330	23	241,1	370,6	1093,9	1585791
1	2	7,6	2330	24	241,1	560,7	1284,0	1564485
1	2	7,6	2330	25	275,5	405,9	1232,4	1547482
1	2	7,6	2330	26	275,5	436,9	1263,5	1585791
1	2	7,6	2330	27	275,5	560,7	1387,2	1697352
1	2	7,6	2330	28	309,9	472,1	1401,8	1663602
1	2	7,6	2330	29	309,9	503,2	1432,9	1706595
1	2	7,6	2330	30	309,9	626,9	1556,6	1812711
2	2	7,0	2358	0	103,4	93,3	403,5	683424
2	2	7,0	2358	1	20,7	18,8	80,9	304394
2	2	7,0	2358	2	20,7	37,5	99,6	369239
2	2	7,0	2358	3	20,7	56,1	118,1	435079
2	2	7,0	2358	4	34,5	31,2	134,7	373817
2	2	7,0	2358	5	34,5	62,1	165,7	525031
2	2	7,0	2358	6	34,5	93,2	196,7	621032
2	2	7,0	2358	7	68,9	62,1	268,8	562364

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
2	2	7,0	2358	8	68,9	124,3	331,0	760165
2	2	7,0	2358	9	68,9	186,2	392,9	881829
2	2	7,0	2358	10	103,4	62,2	372,4	514343
2	2	7,0	2358	11	103,4	93,3	403,5	631160
2	2	7,0	2358	12	103,4	186,4	496,6	918322
2	2	7,0	2358	13	137,9	93,3	507,0	718651
2	2	7,0	2358	14	137,9	124,3	538,0	822701
2	2	7,0	2358	15	137,9	248,2	661,9	1055797
2	2	7,0	2358	16	172,3	207,5	724,4	989023
2	2	7,0	2358	17	172,3	238,3	755,2	1035539
2	2	7,0	2358	18	172,3	362,4	879,4	1250469
2	2	7,0	2358	19	206,7	273,6	893,7	1069307
2	2	7,0	2358	20	206,7	304,4	924,5	1145369
2	2	7,0	2358	21	206,7	428,4	1048,5	1336489
2	2	7,0	2358	22	241,1	339,8	1063,1	1176710
2	2	7,0	2358	23	241,1	370,8	1094,1	1354001
2	2	7,0	2358	24	241,1	479,0	1202,3	1437266
2	2	7,0	2358	25	275,5	406,0	1232,4	1286102
2	2	7,0	2358	26	275,5	436,9	1263,4	1354001
2	2	7,0	2358	27	275,5	479,0	1305,5	1400035
2	2	7,0	2358	28	309,9	460,6	1390,3	1333843
2	2	7,0	2358	29	309,9	459,1	1388,8	1365848
2	2	7,0	2358	30	309,9	448,5	1378,2	1454758
3	2	4,3	2249	0	103,4	93,4	403,6	821924
3	2	4,3	2249	1	20,7	18,8	80,9	288937
3	2	4,3	2249	2	20,7	37,5	99,6	315712
3	2	4,3	2249	3	20,7	56,3	118,4	341684
3	2	4,3	2249	4	34,5	31,2	134,7	360953
3	2	4,3	2249	5	34,5	62,3	165,8	416721
3	2	4,3	2249	6	34,5	93,3	196,8	484845
3	2	4,3	2249	7	68,9	62,2	268,9	650034
3	2	4,3	2249	8	68,9	124,3	331,0	762539
3	2	4,3	2249	9	68,9	186,3	393,0	819315
3	2	4,3	2249	10	103,4	62,2	372,5	735475
3	2	4,3	2249	11	103,4	93,4	403,6	799738
3	2	4,3	2249	12	103,4	186,4	496,6	934209
3	2	4,3	2249	13	137,9	93,4	507,0	893155
3	2	4,3	2249	14	137,9	124,3	538,0	966044
3	2	4,3	2249	15	137,9	248,4	662,1	1087551
3	2	4,3	2249	16	172,3	207,4	724,3	1136433

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
3	2	4,3	2249	17	172,3	238,3	755,1	1176235
3	2	4,3	2249	18	172,3	362,5	879,4	1244870
3	2	4,3	2249	19	206,7	273,6	893,7	1258173
3	2	4,3	2249	20	206,7	304,7	924,8	1298162
3	2	4,3	2249	21	206,7	428,8	1048,9	1384000
3	2	4,3	2249	22	241,1	339,6	1062,9	1418942
3	2	4,3	2249	23	241,1	370,7	1094,0	1518013
3	2	4,3	2249	24	241,1	560,8	1284,1	1480529
3	2	4,3	2249	25	275,5	406,3	1232,7	1504585
3	2	4,3	2249	26	275,5	437,5	1264,0	1518013
3	2	4,3	2249	27	275,5	560,8	1387,3	1551777
3	2	4,3	2249	28	309,9	472,9	1402,6	1558417
3	2	4,3	2249	29	309,9	504,4	1434,1	1585680
3	2	4,3	2249	30	309,9	626,9	1556,6	1631433
4	2	4,1	2248	0	103,4	93,2	403,4	769099
4	2	4,1	2248	1	20,7	18,7	80,8	384562
4	2	4,1	2248	2	20,7	37,5	99,6	428763
4	2	4,1	2248	3	20,7	56,1	118,2	468191
4	2	4,1	2248	4	34,5	31,2	134,7	434769
4	2	4,1	2248	5	34,5	62,2	165,7	523993
4	2	4,1	2248	6	34,5	93,3	196,8	601639
4	2	4,1	2248	7	68,9	62,1	268,8	614751
4	2	4,1	2248	8	68,9	124,4	331,1	805567
4	2	4,1	2248	9	68,9	186,1	392,8	916292
4	2	4,1	2248	10	103,4	62,3	372,5	605603
4	2	4,1	2248	11	103,4	93,4	403,6	744412
4	2	4,1	2248	12	103,4	186,2	496,4	1023847
4	2	4,1	2248	13	137,9	93,3	507,0	739315
4	2	4,1	2248	14	137,9	124,4	538,1	900150
4	2	4,1	2248	15	137,9	248,6	662,2	1205077
4	2	4,1	2248	16	172,3	207,4	724,3	1166090
4	2	4,1	2248	17	172,3	238,4	755,3	1240976
4	2	4,1	2248	18	172,3	362,8	879,7	1372058
4	2	4,1	2248	19	206,7	273,6	893,7	1417772
4	2	4,1	2248	20	206,7	304,6	924,7	1462033
4	2	4,1	2248	21	206,7	429,1	1049,2	1544820
4	2	4,1	2248	22	241,1	339,8	1063,1	1535424
4	2	4,1	2248	23	241,1	370,8	1094,1	1677414
4	2	4,1	2248	24	241,1	560,6	1283,9	1627253
4	2	4,1	2248	25	275,5	406,1	1232,6	1641616

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
4	2	4,1	2248	26	275,5	437,3	1263,8	1677414
4	2	4,1	2248	27	275,5	560,6	1387,1	1704329
4	2	4,1	2248	28	309,9	472,9	1402,6	1700625
4	2	4,1	2248	29	309,9	504,0	1433,7	1726934
4	2	4,1	2248	30	309,9	626,5	1556,2	1786730
5	2	6,8	2336	0	103,4	93,2	403,4	987703
5	2	6,8	2336	1	20,7	18,7	80,9	369992
5	2	6,8	2336	2	20,7	37,5	99,6	422299
5	2	6,8	2336	3	20,7	56,2	118,3	470236
5	2	6,8	2336	4	34,5	31,1	134,6	472252
5	2	6,8	2336	5	34,5	62,1	165,6	550826
5	2	6,8	2336	6	34,5	93,3	196,8	618380
5	2	6,8	2336	7	68,9	62,2	268,8	739186
5	2	6,8	2336	8	68,9	124,2	330,9	909972
5	2	6,8	2336	9	68,9	186,4	393,1	1023748
5	2	6,8	2336	10	103,4	62,1	372,3	850395
5	2	6,8	2336	11	103,4	93,2	403,4	961186
5	2	6,8	2336	12	103,4	186,2	496,4	1213006
5	2	6,8	2336	13	137,9	93,4	507,1	1079289
5	2	6,8	2336	14	137,9	124,4	538,1	1216481
5	2	6,8	2336	15	137,9	248,5	662,2	1443946
5	2	6,8	2336	16	172,3	207,4	724,3	1389570
5	2	6,8	2336	17	172,3	238,4	755,3	1462210
5	2	6,8	2336	18	172,3	362,7	879,6	1615096
5	2	6,8	2336	19	206,7	273,5	893,6	1615282
5	2	6,8	2336	20	206,7	304,5	924,6	1679054
5	2	6,8	2336	21	206,7	429,2	1049,3	1744643
5	2	6,8	2336	22	241,1	339,8	1063,1	1740816
5	2	6,8	2336	23	241,1	370,8	1094,1	1823257
5	2	6,8	2336	24	241,1	561,0	1284,3	1821362
5	2	6,8	2336	25	275,5	405,7	1232,2	1791975
5	2	6,8	2336	26	275,5	437,6	1264,1	1823257
5	2	6,8	2336	27	275,5	561,0	1387,5	1915756
5	2	6,8	2336	28	309,9	473,6	1403,3	1850012
5	2	6,8	2336	29	309,9	504,8	1434,5	1885425
5	2	6,8	2336	30	309,9	627,8	1557,5	1966424
6	2	6,0	2353	0	103,4	93,3	403,6	974716
6	2	6,0	2353	1	20,7	18,7	80,8	449844
6	2	6,0	2353	2	20,7	37,5	99,6	501205
6	2	6,0	2353	3	20,7	56,1	118,2	547007

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
6	2	6,0	2353	4	34,5	31,2	134,7	530532
6	2	6,0	2353	5	34,5	62,2	165,7	626746
6	2	6,0	2353	6	34,5	93,3	196,8	696508
6	2	6,0	2353	7	68,9	62,1	268,9	772562
6	2	6,0	2353	8	68,9	124,2	330,9	951621
6	2	6,0	2353	9	68,9	186,3	393,0	1045500
6	2	6,0	2353	10	103,4	62,2	372,4	739717
6	2	6,0	2353	11	103,4	93,3	403,5	885301
6	2	6,0	2353	12	103,4	186,3	496,5	1160694
6	2	6,0	2353	13	137,9	93,4	507,0	892185
6	2	6,0	2353	14	137,9	124,5	538,1	1050048
6	2	6,0	2353	15	137,9	248,5	662,2	1364310
6	2	6,0	2353	16	172,3	207,3	724,2	1388258
6	2	6,0	2353	17	172,3	238,4	755,3	1459560
6	2	6,0	2353	18	172,3	362,6	879,5	1605193
6	2	6,0	2353	19	206,7	273,6	893,7	1642196
6	2	6,0	2353	20	206,7	304,8	924,9	1694545
6	2	6,0	2353	21	206,7	429,4	1049,5	1805671
6	2	6,0	2353	22	241,1	339,8	1063,1	1800873
6	2	6,0	2353	23	241,1	371,1	1094,4	1974653
6	2	6,0	2353	24	241,1	561,0	1284,3	1923561
6	2	6,0	2353	25	275,5	406,3	1232,8	1946578
6	2	6,0	2353	26	275,5	437,8	1264,3	1974653
6	2	6,0	2353	27	275,5	561,0	1387,5	2015100
6	2	6,0	2353	28	309,9	473,9	1403,6	2035075
6	2	6,0	2353	29	309,9	504,9	1434,6	2060925
6	2	6,0	2353	30	309,9	627,0	1556,7	2120001
7	3	5,9	2370	0	103,4	93,3	403,5	1026716
7	3	5,9	2370	1	20,7	18,7	80,8	322646
7	3	5,9	2370	2	20,7	37,5	99,6	359174
7	3	5,9	2370	3	20,7	56,1	118,2	397062
7	3	5,9	2370	4	34,5	31,1	134,6	418515
7	3	5,9	2370	5	34,5	62,2	165,7	520485
7	3	5,9	2370	6	34,5	93,3	196,8	629054
7	3	5,9	2370	7	68,9	62,2	268,9	826754
7	3	5,9	2370	8	68,9	124,3	331,0	1019664
7	3	5,9	2370	9	68,9	186,2	392,9	1138576
7	3	5,9	2370	10	103,4	62,2	372,4	949102
7	3	5,9	2370	11	103,4	93,3	403,5	1055988
7	3	5,9	2370	12	103,4	186,2	496,4	1251632

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
7	3	5,9	2370	13	137,9	93,3	507,0	1174507
7	3	5,9	2370	14	137,9	124,3	538,0	1259515
7	3	5,9	2370	15	137,9	248,6	662,3	1440990
7	3	5,9	2370	16	172,3	207,3	724,2	1427952
7	3	5,9	2370	17	172,3	238,5	755,4	1489814
7	3	5,9	2370	18	172,3	363,0	879,9	1569392
7	3	5,9	2370	19	206,7	273,8	893,9	1583783
7	3	5,9	2370	20	206,7	304,7	924,8	1592257
7	3	5,9	2370	21	206,7	430,1	1050,1	1689223
7	3	5,9	2370	22	241,1	340,1	1063,4	1637435
7	3	5,9	2370	23	241,1	371,2	1094,5	1762963
7	3	5,9	2370	24	241,1	561,1	1284,4	1769403
7	3	5,9	2370	25	275,5	407,2	1233,7	1724661
7	3	5,9	2370	26	275,5	438,0	1264,5	1762963
7	3	5,9	2370	27	275,5	561,1	1387,6	1867925
7	3	5,9	2370	28	309,9	474,4	1404,1	1832496
7	3	5,9	2370	29	309,9	505,1	1434,8	1856588
7	3	5,9	2370	30	309,9	627,4	1557,1	1924937
8	3	6,8	2363	0	103,4	93,2	403,4	745764
8	3	6,8	2363	1	20,7	18,8	80,9	275946
8	3	6,8	2363	2	20,7	37,5	99,6	324864
8	3	6,8	2363	3	20,7	56,1	118,3	380849
8	3	6,8	2363	4	34,5	31,2	134,7	339174
8	3	6,8	2363	5	34,5	62,3	165,8	454337
8	3	6,8	2363	6	34,5	93,3	196,8	565570
8	3	6,8	2363	7	68,9	62,2	268,9	607756
8	3	6,8	2363	8	68,9	124,3	331,0	817386
8	3	6,8	2363	9	68,9	186,4	393,1	925139
8	3	6,8	2363	10	103,4	62,1	372,3	668989
8	3	6,8	2363	11	103,4	93,2	403,4	785473
8	3	6,8	2363	12	103,4	186,1	496,4	1022324
8	3	6,8	2363	13	137,9	93,2	506,9	847749
8	3	6,8	2363	14	137,9	124,3	538,0	950380
8	3	6,8	2363	15	137,9	248,6	662,3	1172898
8	3	6,8	2363	16	172,3	207,4	724,3	1144436
8	3	6,8	2363	17	172,3	238,5	755,3	1181203
8	3	6,8	2363	18	172,3	362,6	879,5	1321386
8	3	6,8	2363	19	206,7	273,5	893,6	1281894
8	3	6,8	2363	20	206,7	304,1	924,2	1315658
8	3	6,8	2363	21	206,7	428,8	1049,0	1426743

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
8	3	6,8	2363	22	241,1	339,6	1062,9	1398235
8	3	6,8	2363	23	241,1	370,8	1094,1	1537467
8	3	6,8	2363	24	241,1	560,6	1283,9	1518439
8	3	6,8	2363	25	275,5	406,0	1232,5	1518599
8	3	6,8	2363	26	275,5	436,8	1263,2	1537467
8	3	6,8	2363	27	275,5	560,6	1387,1	1614328
8	3	6,8	2363	28	309,9	473,1	1402,8	1596260
8	3	6,8	2363	29	309,9	504,5	1434,2	1618670
8	3	6,8	2363	30	309,9	627,1	1556,8	1687532
9	3	5,3	2391	0	103,4	93,3	403,5	858994
9	3	5,3	2391	1	20,7	18,8	80,9	387964
9	3	5,3	2391	2	20,7	37,5	99,6	473298
9	3	5,3	2391	3	20,7	56,2	118,3	569258
9	3	5,3	2391	4	34,5	31,2	134,7	461144
9	3	5,3	2391	5	34,5	62,1	165,7	621036
9	3	5,3	2391	6	34,5	93,5	197,0	748911
9	3	5,3	2391	7	68,9	62,2	268,9	679360
9	3	5,3	2391	8	68,9	124,4	331,1	959123
9	3	5,3	2391	9	68,9	186,3	393,0	1145181
9	3	5,3	2391	10	103,4	62,3	372,5	710429
9	3	5,3	2391	11	103,4	93,4	403,5	864822
9	3	5,3	2391	12	103,4	186,4	496,6	1176478
9	3	5,3	2391	13	137,9	93,4	507,1	850505
9	3	5,3	2391	14	137,9	124,5	538,2	973408
9	3	5,3	2391	15	137,9	248,5	662,2	1299725
9	3	5,3	2391	16	172,3	207,4	724,3	1222138
9	3	5,3	2391	17	172,3	238,5	755,5	1311028
9	3	5,3	2391	18	172,3	362,6	879,5	1507628
9	3	5,3	2391	19	206,7	273,6	893,7	1572995
9	3	5,3	2391	20	206,7	304,7	924,8	1633751
9	3	5,3	2391	21	206,7	428,8	1048,9	1771947
9	3	5,3	2391	22	241,1	339,8	1063,1	1726473
9	3	5,3	2391	23	241,1	371,0	1094,3	1889018
9	3	5,3	2391	24	241,1	561,2	1284,5	1888158
9	3	5,3	2391	25	275,5	405,5	1231,9	1864324
9	3	5,3	2391	26	275,5	437,3	1263,7	1889018
9	3	5,3	2391	27	275,5	561,2	1387,7	1991590
9	3	5,3	2391	28	309,9	472,8	1402,5	1945425
9	3	5,3	2391	29	309,9	505,3	1435,0	1989223
9	3	5,3	2391	30	309,9	630,3	1560,0	2076545

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
10	3	5,2	2390	0	103,4	93,3	403,5	1022343
10	3	5,2	2390	1	20,7	18,8	80,9	410019
10	3	5,2	2390	2	20,7	37,5	99,6	476330
10	3	5,2	2390	3	20,7	56,1	118,2	541628
10	3	5,2	2390	4	34,5	31,1	134,6	511666
10	3	5,2	2390	5	34,5	62,2	165,7	626498
10	3	5,2	2390	6	34,5	93,3	196,8	713320
10	3	5,2	2390	7	68,9	62,3	268,9	757986
10	3	5,2	2390	8	68,9	124,2	330,9	971973
10	3	5,2	2390	9	68,9	186,2	392,9	1097495
10	3	5,2	2390	10	103,4	62,1	372,3	848002
10	3	5,2	2390	11	103,4	93,3	403,5	947269
10	3	5,2	2390	12	103,4	186,3	496,5	1229040
10	3	5,2	2390	13	137,9	93,3	507,0	1025424
10	3	5,2	2390	14	137,9	124,4	538,1	1143601
10	3	5,2	2390	15	137,9	248,5	662,1	1421283
10	3	5,2	2390	16	172,3	207,4	724,3	1383137
10	3	5,2	2390	17	172,3	238,6	755,6	1457501
10	3	5,2	2390	18	172,3	363,0	879,9	1622259
10	3	5,2	2390	19	206,7	273,6	893,7	1566942
10	3	5,2	2390	20	206,7	304,8	924,9	1639961
10	3	5,2	2390	21	206,7	429,6	1049,7	1780725
10	3	5,2	2390	22	241,1	340,0	1063,3	1754747
10	3	5,2	2390	23	241,1	371,1	1094,4	1952815
10	3	5,2	2390	24	241,1	561,1	1284,4	1900585
10	3	5,2	2390	25	275,5	407,2	1233,7	1893120
10	3	5,2	2390	26	275,5	438,7	1265,2	1952815
10	3	5,2	2390	27	275,5	561,1	1387,6	2015660
10	3	5,2	2390	28	309,9	475,2	1404,9	2040290
10	3	5,2	2390	29	309,9	505,6	1435,3	2046687
10	3	5,2	2390	30	309,9	632,4	1562,1	2145615
11	3	6,4	2826	0	103,4	93,3	403,5	628430
11	3	6,4	2826	1	20,7	18,8	80,8	247909
11	3	6,4	2826	2	20,7	37,5	99,6	328177
11	3	6,4	2826	3	20,7	56,1	118,2	401619
11	3	6,4	2826	4	34,5	31,3	134,8	302490
11	3	6,4	2826	5	34,5	62,2	165,7	445484
11	3	6,4	2826	6	34,5	93,3	196,8	569300
11	3	6,4	2826	7	68,9	62,2	268,8	473272
11	3	6,4	2826	8	68,9	124,4	331,1	732880

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
11	3	6,4	2826	9	68,9	186,4	393,1	888495
11	3	6,4	2826	10	103,4	62,2	372,4	454186
11	3	6,4	2826	11	103,4	93,3	403,5	572900
11	3	6,4	2826	12	103,4	186,3	496,5	890366
11	3	6,4	2826	13	137,9	93,4	507,0	565890
11	3	6,4	2826	14	137,9	124,4	538,1	688872
11	3	6,4	2826	15	137,9	248,4	662,1	1024942
11	3	6,4	2826	16	172,3	207,4	724,3	911796
11	3	6,4	2826	17	172,3	238,4	755,3	989988
11	3	6,4	2826	18	172,3	362,5	879,4	1191497
11	3	6,4	2826	19	206,7	273,7	893,8	1044451
11	3	6,4	2826	20	206,7	304,7	924,8	1131959
11	3	6,4	2826	21	206,7	428,8	1048,9	1398146
11	3	6,4	2826	22	241,1	339,6	1062,8	1329785
11	3	6,4	2826	23	241,1	370,9	1094,2	1452866
11	3	6,4	2826	24	241,1	561,2	1284,5	1517726
11	3	6,4	2826	25	275,5	405,8	1232,3	1395992
11	3	6,4	2826	26	275,5	437,2	1263,7	1452866
11	3	6,4	2826	27	275,5	561,2	1387,7	1599041
11	3	6,4	2826	28	309,9	471,9	1401,6	1465977
11	3	6,4	2826	29	309,9	503,1	1432,8	1515480
11	3	6,4	2826	30	309,9	627,2	1557,0	1658777
12	3	6,8	2818	0	103,4	93,3	403,5	803281
12	3	6,8	2818	1	20,7	18,8	80,9	428735
12	3	6,8	2818	2	20,7	37,5	99,6	509107
12	3	6,8	2818	3	20,7	56,2	118,3	573894
12	3	6,8	2818	4	34,5	31,2	134,7	490297
12	3	6,8	2818	5	34,5	62,2	165,7	623465
12	3	6,8	2818	6	34,5	93,3	196,8	724085
12	3	6,8	2818	7	68,9	62,3	269,0	650207
12	3	6,8	2818	8	68,9	124,4	331,1	866133
12	3	6,8	2818	9	68,9	186,2	392,9	976759
12	3	6,8	2818	10	103,4	62,2	372,4	611324
12	3	6,8	2818	11	103,4	93,4	403,6	736440
12	3	6,8	2818	12	103,4	186,4	496,6	1029972
12	3	6,8	2818	13	137,9	93,3	507,0	747081
12	3	6,8	2818	14	137,9	124,4	538,1	866879
12	3	6,8	2818	15	137,9	248,5	662,2	1185961
12	3	6,8	2818	16	172,3	207,4	724,3	1070861
12	3	6,8	2818	17	172,3	238,4	755,3	1171438

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
12	3	6,8	2818	18	172,3	362,7	879,6	1367859
12	3	6,8	2818	19	206,7	273,6	893,7	1208398
12	3	6,8	2818	20	206,7	304,5	924,6	1300654
12	3	6,8	2818	21	206,7	429,2	1049,3	1484769
12	3	6,8	2818	22	241,1	339,6	1062,9	1359777
12	3	6,8	2818	23	241,1	370,6	1093,9	1471651
12	3	6,8	2818	24	241,1	561,0	1284,3	1515335
12	3	6,8	2818	25	275,5	405,7	1232,2	1415047
12	3	6,8	2818	26	275,5	436,5	1263,0	1471651
12	3	6,8	2818	27	275,5	561,0	1387,5	1598585
12	3	6,8	2818	28	309,9	471,9	1401,6	1486274
12	3	6,8	2818	29	309,9	502,9	1432,6	1542874
12	3	6,8	2818	30	309,9	627,2	1556,9	1670413
13	5	6,2	2354	0	103,4	93,4	403,6	771897
13	5	6,2	2354	1	20,7	18,7	80,8	516204
13	5	6,2	2354	2	20,7	37,5	99,6	536839
13	5	6,2	2354	3	20,7	56,3	118,4	579580
13	5	6,2	2354	4	34,5	31,2	134,7	533102
13	5	6,2	2354	5	34,5	62,3	165,8	618252
13	5	6,2	2354	6	34,5	93,3	196,8	718489
13	5	6,2	2354	7	68,9	62,4	269,1	619109
13	5	6,2	2354	8	68,9	124,4	331,1	893502
13	5	6,2	2354	9	68,9	186,2	392,9	1112940
13	5	6,2	2354	10	103,4	62,4	372,6	573515
13	5	6,2	2354	11	103,4	93,4	403,6	745303
13	5	6,2	2354	12	103,4	186,5	496,7	1190385
13	5	6,2	2354	13	137,9	93,2	506,9	705540
13	5	6,2	2354	14	137,9	124,3	538,0	884555
13	5	6,2	2354	15	137,9	248,4	662,1	1463789
13	5	6,2	2354	16	172,3	207,3	724,2	1296972
13	5	6,2	2354	17	172,3	238,3	755,2	1423716
13	5	6,2	2354	18	172,3	362,3	879,2	1802174
13	5	6,2	2354	19	206,7	273,7	893,8	1591667
13	5	6,2	2354	20	206,7	304,8	924,9	1689311
13	5	6,2	2354	21	206,7	428,5	1048,6	1998222
13	5	6,2	2354	22	241,1	339,7	1063,0	1813227
13	5	6,2	2354	23	241,1	370,3	1093,6	2086767
13	5	6,2	2354	24	241,1	560,9	1284,3	2127356
13	5	6,2	2354	25	275,5	405,3	1231,8	2050160
13	5	6,2	2354	26	275,5	436,7	1263,2	2086767

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
13	5	6,2	2354	27	275,5	560,9	1387,4	2318903
13	5	6,2	2354	28	309,9	471,8	1401,5	2215499
13	5	6,2	2354	29	309,9	503,1	1432,8	2273622
13	5	6,2	2354	30	309,9	626,4	1556,1	2502989
14	5	5,6	2383	0	103,4	93,3	403,5	1002220
14	5	5,6	2383	1	20,7	18,8	80,9	356495
14	5	5,6	2383	2	20,7	37,5	99,6	402237
14	5	5,6	2383	3	20,7	56,2	118,3	455301
14	5	5,6	2383	4	34,5	31,2	134,7	412912
14	5	5,6	2383	5	34,5	62,4	165,8	532909
14	5	5,6	2383	6	34,5	93,4	196,9	634124
14	5	5,6	2383	7	68,9	62,3	269,0	699412
14	5	5,6	2383	8	68,9	124,4	331,1	960213
14	5	5,6	2383	9	68,9	186,1	392,8	1102889
14	5	5,6	2383	10	103,4	62,3	372,5	823887
14	5	5,6	2383	11	103,4	93,3	403,5	965408
14	5	5,6	2383	12	103,4	186,2	496,4	1235274
14	5	5,6	2383	13	137,9	93,3	507,0	1005466
14	5	5,6	2383	14	137,9	124,3	538,0	1114607
14	5	5,6	2383	15	137,9	248,7	662,4	1431770
14	5	5,6	2383	16	172,3	207,4	724,3	1375506
14	5	5,6	2383	17	172,3	238,5	755,4	1455687
14	5	5,6	2383	18	172,3	362,3	879,2	1624716
14	5	5,6	2383	19	206,7	273,6	893,7	1559457
14	5	5,6	2383	20	206,7	304,6	924,7	1642014
14	5	5,6	2383	21	206,7	428,7	1048,8	1822696
14	5	5,6	2383	22	241,1	339,7	1063,1	1755173
14	5	5,6	2383	23	241,1	370,8	1094,2	1989105
14	5	5,6	2383	24	241,1	560,4	1283,7	2001776
14	5	5,6	2383	25	275,5	405,7	1232,3	1931296
14	5	5,6	2383	26	275,5	436,4	1262,9	1989105
14	5	5,6	2383	27	275,5	560,4	1387,0	2146045
14	5	5,6	2383	28	309,9	472,2	1401,9	2085451
14	5	5,6	2383	29	309,9	503,1	1432,8	2133437
14	5	5,6	2383	30	309,9	626,7	1556,4	2266459
15	5	5,8	2381	0	103,4	93,3	403,4	777587
15	5	5,8	2381	1	20,7	18,8	80,9	320193
15	5	5,8	2381	2	20,7	37,5	99,6	453550
15	5	5,8	2381	3	20,7	56,2	118,3	571683
15	5	5,8	2381	4	34,5	31,2	134,7	392994

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
15	5	5,8	2381	5	34,5	62,2	165,7	620536
15	5	5,8	2381	6	34,5	93,4	196,9	787204
15	5	5,8	2381	7	68,9	62,2	268,9	593144
15	5	5,8	2381	8	68,9	124,2	330,9	990902
15	5	5,8	2381	9	68,9	186,5	393,2	1266053
15	5	5,8	2381	10	103,4	62,2	372,4	593052
15	5	5,8	2381	11	103,4	93,3	403,5	777768
15	5	5,8	2381	12	103,4	186,4	496,6	1310334
15	5	5,8	2381	13	137,9	93,3	507,0	761908
15	5	5,8	2381	14	137,9	124,5	538,2	945567
15	5	5,8	2381	15	137,9	248,3	662,0	1543045
15	5	5,8	2381	16	172,3	207,3	724,2	1294661
15	5	5,8	2381	17	172,3	238,3	755,3	1440435
15	5	5,8	2381	18	172,3	362,4	879,3	1741761
15	5	5,8	2381	19	206,7	273,5	893,6	1561574
15	5	5,8	2381	20	206,7	304,5	924,6	1663915
15	5	5,8	2381	21	206,7	428,2	1048,4	1904980
15	5	5,8	2381	22	241,1	339,7	1063,0	1836119
15	5	5,8	2381	23	241,1	370,6	1093,9	2041921
15	5	5,8	2381	24	241,1	560,9	1284,2	2100734
15	5	5,8	2381	25	275,5	405,4	1231,9	1951405
15	5	5,8	2381	26	275,5	436,8	1263,2	2041921
15	5	5,8	2381	27	275,5	560,9	1387,4	2235595
15	5	5,8	2381	28	309,9	472,2	1401,9	2136291
15	5	5,8	2381	29	309,9	505,5	1435,2	2193654
15	5	5,8	2381	30	309,9	629,1	1558,8	2379685
16	5	6,2	2369	0	103,4	93,4	403,7	825679
16	5	6,2	2369	1	20,7	18,8	80,9	330869
16	5	6,2	2369	2	20,7	37,5	99,6	468961
16	5	6,2	2369	3	20,7	56,1	118,2	584052
16	5	6,2	2369	4	34,5	31,2	134,7	435632
16	5	6,2	2369	5	34,5	62,2	165,7	640802
16	5	6,2	2369	6	34,5	93,3	196,8	781077
16	5	6,2	2369	7	68,9	62,3	269,0	628494
16	5	6,2	2369	8	68,9	124,4	331,1	964064
16	5	6,2	2369	9	68,9	186,3	393,0	1163592
16	5	6,2	2369	10	103,4	62,2	372,5	609580
16	5	6,2	2369	11	103,4	93,4	403,6	803886
16	5	6,2	2369	12	103,4	186,2	496,4	1227014
16	5	6,2	2369	13	137,9	93,3	507,0	814623

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
16	5	6,2	2369	14	137,9	124,5	538,2	981059
16	5	6,2	2369	15	137,9	248,3	662,0	1459712
16	5	6,2	2369	16	172,3	207,4	724,3	1339243
16	5	6,2	2369	17	172,3	238,6	755,5	1467151
16	5	6,2	2369	18	172,3	362,4	879,3	1737480
16	5	6,2	2369	19	206,7	273,5	893,6	1579435
16	5	6,2	2369	20	206,7	304,7	924,8	1676638
16	5	6,2	2369	21	206,7	428,9	1049,0	1877139
16	5	6,2	2369	22	241,1	340,0	1063,3	1819339
16	5	6,2	2369	23	241,1	371,1	1094,4	2057167
16	5	6,2	2369	24	241,1	560,5	1283,8	2082191
16	5	6,2	2369	25	275,5	405,5	1232,0	2005028
16	5	6,2	2369	26	275,5	436,7	1263,2	2057167
16	5	6,2	2369	27	275,5	560,5	1387,0	2218205
16	5	6,2	2369	28	309,9	473,4	1403,1	2123854
16	5	6,2	2369	29	309,9	506,4	1436,1	2198423
16	5	6,2	2369	30	309,9	632,6	1562,3	2406390
17	5	6,5	2274	0	103,4	93,3	403,5	473091
17	5	6,5	2274	1	20,7	18,8	80,9	239310
17	5	6,5	2274	2	20,7	37,5	99,7	293548
17	5	6,5	2274	3	20,7	56,1	118,2	354244
17	5	6,5	2274	4	34,5	31,2	134,7	271261
17	5	6,5	2274	5	34,5	62,2	165,7	363430
17	5	6,5	2274	6	34,5	93,3	196,8	482322
17	5	6,5	2274	7	68,9	62,2	269,0	376900
17	5	6,5	2274	8	68,9	124,4	331,1	578901
17	5	6,5	2274	9	68,9	186,3	393,0	797837
17	5	6,5	2274	10	103,4	62,3	372,4	427171
17	5	6,5	2274	11	103,4	93,4	403,6	483329
17	5	6,5	2274	12	103,4	186,4	496,6	795485
17	5	6,5	2274	13	137,9	93,4	507,1	506756
17	5	6,5	2274	14	137,9	124,3	538,0	570783
17	5	6,5	2274	15	137,9	248,5	662,2	978946
17	5	6,5	2274	16	172,3	207,5	724,4	807421
17	5	6,5	2274	17	172,3	238,4	755,4	906429
17	5	6,5	2274	18	172,3	362,7	879,5	1202344
17	5	6,5	2274	19	206,7	273,6	893,7	1026934
17	5	6,5	2274	20	206,7	304,8	924,9	1120008
17	5	6,5	2274	21	206,7	428,5	1048,6	1447697
17	5	6,5	2274	22	241,1	339,8	1063,1	1372805

No. Espécimen	Cemento (%)	Humedad (%)	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Secuencia	Presión de confinamiento σ_c (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	Invariante de esfuerzos θ (kPa)	Módulo resiliente MR (kPa)
17	5	6,5	2274	23	241,1	370,7	1094,0	1519437
17	5	6,5	2274	24	241,1	561,0	1284,3	1615430
17	5	6,5	2274	25	275,5	405,7	1232,2	1444621
17	5	6,5	2274	26	275,5	437,1	1263,6	1519437
17	5	6,5	2274	27	275,5	561,0	1387,5	1707079
17	5	6,5	2274	28	309,9	471,8	1401,5	1535619
17	5	6,5	2274	29	309,9	502,6	1432,3	1592714
17	5	6,5	2274	30	309,9	626,9	1556,6	1800847
18	5	6,5	2269	0	103,4	93,3	403,5	935602
18	5	6,5	2269	1	20,7	18,7	80,8	422674
18	5	6,5	2269	2	20,7	37,5	99,6	517270
18	5	6,5	2269	3	20,7	56,1	118,1	588561
18	5	6,5	2269	4	34,5	31,2	134,7	508579
18	5	6,5	2269	5	34,5	62,2	165,7	640964
18	5	6,5	2269	6	34,5	93,3	196,8	766011
18	5	6,5	2269	7	68,9	62,2	268,9	694499
18	5	6,5	2269	8	68,9	124,4	331,1	969486
18	5	6,5	2269	9	68,9	186,3	393,0	1149654
18	5	6,5	2269	10	103,4	62,2	372,4	701731
18	5	6,5	2269	11	103,4	93,3	403,5	869570
18	5	6,5	2269	12	103,4	186,2	496,5	1222386
18	5	6,5	2269	13	137,9	93,4	507,1	905258
18	5	6,5	2269	14	137,9	124,3	538,0	1056679
18	5	6,5	2269	15	137,9	248,4	662,1	1421056
18	5	6,5	2269	16	172,3	207,4	724,3	1307206
18	5	6,5	2269	17	172,3	238,4	755,3	1388737
18	5	6,5	2269	18	172,3	362,7	879,6	1645240
18	5	6,5	2269	19	206,7	273,6	893,7	1524580
18	5	6,5	2269	20	206,7	304,7	924,8	1617716
18	5	6,5	2269	21	206,7	428,4	1048,5	1807107
18	5	6,5	2269	22	241,1	339,7	1063,0	1694496
18	5	6,5	2269	23	241,1	370,6	1093,9	1907236
18	5	6,5	2269	24	241,1	561,0	1284,3	1946436
18	5	6,5	2269	25	275,5	405,9	1232,4	1833365
18	5	6,5	2269	26	275,5	437,0	1263,5	1907236
18	5	6,5	2269	27	275,5	561,0	1387,5	2055759
18	5	6,5	2269	28	309,9	472,2	1401,8	1970475
18	5	6,5	2269	29	309,9	504,4	1434,1	2026432
18	5	6,5	2269	30	309,9	627,0	1556,7	2168778

A.4 Resultados de las respuestas mecánicas de las estructuras para los casos de aplicación

Figura A 1. Esfuerzos, deformaciones y deflexiones resultantes del caso de aplicación 1.

Corrida 1 28-07-21 3C (in-psi).dat

Capas de la estructura de pavimento

Introduzca las propiedades de las capas:

Número: 5

#	Módulo E (psi)	Poisson v (1)	Espesor h (in)	Descripción
1	450000.0	0.35	4.3	CA
2	615200	0.15	7.9	BEC
3	18500.0	0.4	10.2	BG
4	15000.0	0.4	10.6	Prest
5	6690.0	0.45		SR

Cargas sobre el pavimento

Introduzca las propiedades de las cargas circulares:

Número: 1

#	Carga P (lb)	Presión q (psi)	X (in)	Y (in)
1	9000.0	100.0	0.0	0.0

Puntos de medición en el pavimento

Introduzca las propiedades de los puntos:

Número: 7

#	X (in)	Y (in)	Z (in)	Capa #
1	0.0	0.0	4.29134	1
2	0.0	0.0	4.37008	2
3	0.0	0.0	7.874	2
4	0.0	0.0	12.1654	2
5	0.0	0.0	17.3228	3
6	0.0	0.0	27.7559	4
7	0.0	0.0	33.1102	5

Resultados del modelo en los puntos especificados:

Esfuerzos Deformaciones Deflexiones

#	Sxx (psi)	Syy (psi)	Szz (psi)	Sxy (psi)	Sxz (psi)	Syz (psi)
1	4.1340e+01	4.1340e+01	7.2213e+01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
2	1.4538e+01	1.4538e+01	7.1124e+01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
3	-1.5557e+01	-1.5557e+01	2.8457e+01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
4	-6.1296e+01	-6.1296e+01	3.9740e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
5	-2.9028e-01	-2.9028e-01	2.5389e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
6	-5.2136e-01	-5.2136e-01	1.2899e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
7	9.4802e-02	9.4802e-02	1.0139e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

Resultados del modelo en los puntos especificados:

Esfuerzos Deformaciones Deflexiones

#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	3.5478e-06	3.5478e-06	9.6166e-05	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
2	2.7452e-06	2.7452e-06	1.0852e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
3	-2.8433e-05	-2.8433e-05	5.3843e-05	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
4	-8.5659e-05	-8.5659e-05	3.6350e-05	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
5	-6.4309e-05	-6.4309e-05	1.4979e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
6	-5.5252e-05	-5.5252e-05	1.1380e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
7	-6.0407e-05	-6.0407e-05	1.3880e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

Figura A 2. Esfuerzos, deformaciones y deflexiones resultantes del caso de aplicación 2.

Corrida BV 4 02-08-21.dat

Capas de la estructura de pavimento

Introduzca las propiedades de las capas: ?

Número:

#	Módulo E (psi)	Poisson v (1)	Espesor h (in)	Descripción
1	1.0	0.5	1.0	TS-2
2	552529.0	0.15	5.906	BEC
3	15000.0	0.4	7.874	CGR
4	9777.0	0.45		SR

Cargas sobre el pavimento

Introduzca las propiedades de las cargas circulares: ?

Número:

#	Carga P (lb)	Presión q (psi)	X (in)	Y (in)
1	9000.0	100.0	0.0	0.0

Puntos de medición en el pavimento

Introduzca las propiedades de los puntos: ?

Número:

#	X (in)	Y (in)	Z (in)	Capa #
1	0.0	0.0	6.91291	3
2	0.0	0.0	14.96063	4

Resultados del modelo en los puntos especificados: ?

Esfuerzos **Deformaciones** **Deflexiones**

#	Sxx (psi)	Syy (psi)	Szz (psi)	Sxy (psi)	Sxz (psi)	Syz (psi)
1	1.7132e+00	1.7132e+00	1.1908e+01	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
2	8.9436e-01	8.9436e-01	5.8099e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

Resultados del modelo en los puntos especificados: ?

Esfuerzos **Deformaciones** **Deflexiones**

#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	-2.4902e-04	-2.4902e-04	7.0250e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
2	-2.1710e-04	-2.1710e-04	5.1191e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

10. Anexos

AX.1. Propiedades fisicoquímicas del cemento de Uso General

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

TABLA 1: ANÁLISIS QUÍMICOS DEL CEMENTO

	CEMENTO HOLCIM FUERTE	RTCR 479: 2015	ASTM C1157 GU
% Óxido de magnesio (MgO)	≤ 3.0	≤ 6.0	≤ 6.0
% Trióxido de azufre (SO ₃)	≤ 3.0	≤ 4.0	≤ 4.0

TABLA 2: COMPOSICIÓN DEL CEMENTO

	CEMENTO HOLCIM FUERTE	RTCR 479: 2015
Clinker	45-64	45-64
Adiciones minerales	36-55	36-55
Otros	0-5	0-5

TABLA 3: ANÁLISIS FÍSICOS DEL CEMENTO

	CEMENTO HOLCIM FUERTE	RTCR 479:2015	ASTUM C1157 GU
Contenido de aire del mortero INTE 06-11-04 (max. %)	12.0	12.0	12.0
Finura por permeabilidad (mln. cm ² /g) INTE 06-11-06	-	-	-
Finura retenido en tamiz 0.045 mm INTE 06-11-10 (max. %)	-	-	-
Resistencia mínima a la compresión INTE 06-02-20	3 días	13	13
	7 días	20	20
	28 días	28	28
Tiempo de Fragua, minutos	Inicial mínimo INTE 06-11-05	45	45
	Final máximo INTE 06-11-05	420	420
Autoclave, cambio de longitud % máximo INTE 06-11-03	Expansión (máx.%)	0.80	0.80
	Contracción (máx.%)		0.80
Expansión en barras de mortero 14 días, % máximo ASTM C 1038	0,02	0,02	0,02
Falso fraguado, % mínimo ASTM C451	50	50	50

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

TABLA 4: REQUISITOS DE LOS COMPONENTES MINERALES

	PUZOLANA HOLCIM	REQUISITOS SEGÚN ASTM C 618
Contenido de minerales reactivos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) mínimo %	80.0	70.0
% Tróxido de azufre (SO_2) máximo %	2.0	4.0
Contenido de humedad (máximo %)	2.0	3.0
Pérdida a la ignición (máximo %)	10.0	10.0
Índice de actividad a 7 o 28 días (mínimo %)	75	75