



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA

LanammeUCR

Laboratorio Nacional de  
Materiales y Modelos Estructurales

## Comisión de Bases Estabilizadas - LanammeUCR

INFORME PARCIAL: *EIC-Lanamme-INF-0088-2023*

# ESTUDIO DE MEZCLAS PARA EL CORONAMIENTO DE BASES ESTABILIZADAS PARA PREPARAR ESPECÍMENES PARA LA FALLA A LA COMPRESIÓN

Preparado por:

Ing. Ana Lorena Monge Sandí, M.Sc

Ing. Andrea Ulloa Calderón, M.Sc

Ing. Oscar Valerio Salas, M.Sc

San José, Costa Rica

Enero, 2023





<b>1. Informe</b> EIC-Lanamme-INF-0088-2023		<b>2. Copia No.</b> 1							
<b>3. Título y subtítulo:</b> ESTUDIO DE MEZCLAS PARA EL CORONAMIENTO DE BASES ESTABILIZADAS PARA PREPARAR ESPECÍMENES PARA LA FALLA A LA COMPRESIÓN		<b>4. Fecha del Informe</b> Enero, 2023							
<b>5. Organización y dirección</b> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440									
<b>6. Notas complementarias</b> Ninguna									
<b>7. Resumen</b> <i>Las bases estabilizadas con cemento han mostrado ser una alternativa muy importante para la construcción de pavimentos. Su aporte estructural, la variabilidad de materiales en las distintas zonas del país, el clima lluvioso y la presencia de zonas con niveles freáticos altos favorecen la utilización de este material. En general, este material permite aumentar la vida útil de los pavimentos, mejorar su desempeño y a la vez permite disminuir la frecuencia en el mantenimiento para conservarlo en una condición aceptable.</i> <i>A pesar de ello, los procedimientos de muestreo y ensayo en campo y laboratorio de las bases estabilizadas aplicados en Costa Rica muestran algunas inconsistencias generando resultados que son difíciles de comparar entre laboratorios e incluso con los valores de especificación de estos materiales. Uno de los métodos en que se han encontrado desvíos es el ensayo de resistencia a la compresión, pues se ha detectado que no se realiza la verificación de la planicidad de los mismos y, por lo tanto, no se fabrican coronamientos para que se cumpla con tal parámetro.</i> <i>Por tal motivo, en esta investigación se plantea el análisis de 4 diseños de mezcla de pasta de coronamiento que pueden resultar adecuados para ser utilizados en los especímenes de ensayo para cumplir con la planicidad requerida. Al no existir normativa específica al respecto de coronas en especímenes de bases estabilizadas, se están utilizando los mismos principios establecidos para realizar coronamientos adheridos en especímenes de concreto, dictados por la norma INTE C16 (ASTM C617).</i> <i>En general, se ha logrado que algunos especímenes cuenten con la planicidad solicitada por la normativa, y al menos se ha logrado que una de las mezclas de coronamiento, logre cumplir con los parámetros indicados en la norma. Por tal motivo se considera que es posible poder implementar este procedimiento como parte de la falla de los especímenes de base estabilizada.</i>									
<b>8. Palabras clave</b> Bases estabilizadas, muestreo, moldeo, curado, coronamiento, falla, resistencia a la compresión, planicidad		<b>9. Nivel de seguridad:</b> Ninguno	<b>10. Núm. de páginas</b> 37						
<b>11. Preparado por:</b>  <table><tr><td><b>Ing. Ana Lorena Monge Sandí, M.Sc</b> Coordinadora PIG</td><td><b>Ing. Andrea Ulloa Calderón, M.Sc</b> Jefe Laboratorio de Técnicas de Preservación</td><td><b>Ing. Oscar Valerio Salas, M.Sc</b> Jefe Laboratorio Geotecnia</td></tr></table>				<b>Ing. Ana Lorena Monge Sandí, M.Sc</b> Coordinadora PIG	<b>Ing. Andrea Ulloa Calderón, M.Sc</b> Jefe Laboratorio de Técnicas de Preservación	<b>Ing. Oscar Valerio Salas, M.Sc</b> Jefe Laboratorio Geotecnia			
<b>Ing. Ana Lorena Monge Sandí, M.Sc</b> Coordinadora PIG	<b>Ing. Andrea Ulloa Calderón, M.Sc</b> Jefe Laboratorio de Técnicas de Preservación	<b>Ing. Oscar Valerio Salas, M.Sc</b> Jefe Laboratorio Geotecnia							
<b>12. Revisado y aprobado por:</b>  <table><tr><td><b>Ing. Tania Ávila Esquivel, M.Sc</b> Investigadora UIIT</td><td><b>Ing. Gustavo Badilla Vargas, D.Sc</b> Investigador PIG</td><td><b>Ing. Tracy Gutiérrez Ruiz</b> Jefe Laboratorio de Liberia</td></tr><tr><td><b>Ing. Mauricio Salas Chaves</b> Auditor UAT</td><td></td><td><b>Ing. Wendy Sequeira Rojas, M.Sc</b> Coordinadora UAT</td></tr></table>				<b>Ing. Tania Ávila Esquivel, M.Sc</b> Investigadora UIIT	<b>Ing. Gustavo Badilla Vargas, D.Sc</b> Investigador PIG	<b>Ing. Tracy Gutiérrez Ruiz</b> Jefe Laboratorio de Liberia	<b>Ing. Mauricio Salas Chaves</b> Auditor UAT		<b>Ing. Wendy Sequeira Rojas, M.Sc</b> Coordinadora UAT
<b>Ing. Tania Ávila Esquivel, M.Sc</b> Investigadora UIIT	<b>Ing. Gustavo Badilla Vargas, D.Sc</b> Investigador PIG	<b>Ing. Tracy Gutiérrez Ruiz</b> Jefe Laboratorio de Liberia							
<b>Ing. Mauricio Salas Chaves</b> Auditor UAT		<b>Ing. Wendy Sequeira Rojas, M.Sc</b> Coordinadora UAT							



## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
1.1	OBJETIVO GENERAL	8
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
1.3	ANTECEDENTES	8
1.4	JUSTIFICACIÓN	9
1.5	MARCO TEÓRICO	9
1.5.1	<i>CORONAMIENTO DE LA NORMA ASTM D1632</i>	9
1.5.2	<i>CORONAMIENTO DE LA NORMA ASTM D1633</i>	10
1.5.3	<i>CRITERIO DE ACEPTACIÓN DE MATERIALES PARA CORONAMIENTO SEGÚN LA NORMA INTE C16 (ASTM C617)</i>	11
<b>2</b>	<b>METODOLOGÍA EMPLEADA</b>	<b>13</b>
2.1	FASE 1: INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE	13
2.2	FASE 2: MUESTREO Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIA PRIMA	13
2.2.1	<i>MATERIAL DE BASE PARA ESPECÍMENES DE BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO</i>	14
2.2.2	<i>MATERIAL PARA EL CORONAMIENTO</i>	14
2.3	FASE 3: ELABORACIÓN DE DISEÑOS DE MEZCLA	15
2.4	FASE 4: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MATERIAL	15
2.5	FASE 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS	16
2.6	FASE 6: ELABORACIÓN DE NORMATIVA O NUEVA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN	16
<b>3</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>17</b>
3.1	INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE	17
3.2	CARACTERIZACIÓN DE MATERIA PRIMA	18
3.2.1	<i>MATERIAL DE BASE PARA ESPECÍMENES DE BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO</i>	18
3.2.2	<i>MATERIAL PARA EL CORONAMIENTO</i>	20
3.2.2.1	<i>Materia prima para el coronamiento</i>	20
3.2.2.2	<i>Diseños de mezcla para el coronamiento</i>	21
3.3	DISEÑO DE MEZCLA DE BE	25
3.4	CORONAMIENTO DE ESPECÍMENES DE BE CON CORONAS DE MAYOR RESISTENCIA	26
<b>4</b>	<b>CONFORMACIÓN DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES FALTANTES</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>METAS Y ENTREGABLES</b>	<b>35</b>
<b>7</b>	<b>RECURSOS UTILIZADOS</b>	<b>36</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>37</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 CARACTERÍSTICAS DEL CORONAMIENTO ESTABLECIDO PARA LA INVESTIGACIÓN	11
TABLA 2 CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS DE CORONAMIENTO A UTILIZAR.....	14
TABLA 3 RESISTENCIA ESPECIFICADA PARA LAS BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO ...	15
TABLA 4 RESULTADO DE LÍMITES DE ATTERBERG DEL AGREGADO DE BASE.....	18
TABLA 5 GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO DE BASE.....	19
TABLA 6 RESULTADO DEL PRÓCTOR MODIFICADO DEL AGREGADO DE BASE.....	19
TABLA 7 PRIMERA ETAPA DE DISEÑOS DE MEZCLA DE CORONAMIENTOS PARA BE.....	21
TABLA 8 RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PRIMERAS MEZCLAS DE CORONAMIENTO .....	22
TABLA 9 SEGUNDA ETAPA DE DISEÑOS DE MEZCLA DE CORONAMIENTO PARA BE.....	23
TABLA 10 RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA SEGUNDA ETAPA DE MEZCLAS DE CORONAS .....	23
TABLA 11 TERCERA ETAPA DE DISEÑOS DE MEZCLA DE CORONAMIENTO PARA BE .....	24
TABLA 12 RESULTADOS OBTENIDOS UTILIZANDO YESO DE CALIDAD ESTÁNDAR .....	24
TABLA 13 RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA CONFIRMACIÓN DE MEZCLAS DE CORONAS	25
TABLA 14 MEZCLAS DE CORONAS PARA CORONAMIENTO DE ESPECÍMENES DE BE.....	25
TABLA 15 MEZCLAS DE BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO.....	25
TABLA 16 RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES DE BASE ESTABILIZADA.....	27
TABLA 17 RESULTADOS DE EVALUACIÓN DE CORONAMIENTO EN ESPECÍMENES DE BASE ESTABILIZADA.....	28
TABLA 18 RESULTADOS DE ESPESORES DE CORONAS.....	28
TABLA 19 RESULTADOS DE DENSIDADES Y HUMEDADES DE ESPECÍMENES DE BE .....	30
TABLA 20 ANOVA: RESISTENCIA VRS PARÁMETROS DE CORONA Y MATERIAL – ESPECÍMENES CORONA #18.....	31
TABLA 21 ANOVA: RESISTENCIA VRS PARÁMETROS DE CORONA Y MATERIAL – ESPECÍMENES CORONA #19.....	31
TABLA 22 RESPONSABLES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	33
TABLA 23 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN .....	34
TABLA 24 ADMINISTRACIÓN, TRANSPORTE DE MATERIALES Y PONENCIAS (US\$).....	36
TABLA 25 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS.....	36



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 CURVA PRÓCTOR PARA AGREGADO DE BASE.....	20
FIGURA 2 MEZCLA Y COLOCACIÓN DE PASTA PARA EL CORONAMIENTO .....	21
FIGURA 3 OBTENCIÓN DE PROPORCIÓN ÓPTIMA PARA LA BE.....	26



## RESUMEN EJECUTIVO

Las bases estabilizadas con cemento han mostrado ser una alternativa muy importante y utilizada para la construcción de pavimentos. Su aporte estructural, la variabilidad de materiales existentes en las distintas zonas del país, condiciones de tránsito, el clima lluvioso y la presencia de zonas con niveles freáticos altos favorecen la utilización de este material, con el objeto de optimizar diseños. En general, la técnica constructiva permite aumentar la vida útil de los pavimentos, mejorar su desempeño y, a la vez, permite disminuir la frecuencia en el mantenimiento.

Debido a lo anterior, el muestreo y moldeo de especímenes de base estabilizada en campo en los proyectos, se ha convertido en un trabajo cotidiano. Sin embargo, los procedimientos normativos para este tipo de material se han desarrollado más que todo para trabajos a nivel de laboratorio y no en campo, por lo que se ha tenido que adaptar la metodología para poder cumplir con la verificación de las especificaciones descritas en el manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes de Costa Rica (CR-2020).

Estas adaptaciones han promovido que, en algunos casos, se omitan partes de algunos procedimientos de ensayo, sin realizar las evaluaciones pertinentes de los resultados de los ensayos y los efectos que podrían tener en la valoración de las especificaciones que deben cumplir las bases estabilizadas.

Uno de los aspectos que señala la normativa y que se observa no se ha logrado cumplir en su totalidad, tanto por parte del Laboratorio de Geotecnia del LanammeUCR, así como también por otros laboratorios de materiales, es la planicidad de los especímenes al realizar su preparación para proceder, posteriormente, con la falla respectiva.

Vale la pena destacar que el requisito de que un espécimen de ensayo cuente con una superficie plana en los extremos que tienen contacto con los bloques de aplicación de carga de las máquinas de ensayo, es uno de los más importantes, pues con esta condición se garantiza que no se desarrollarán concentraciones de esfuerzos en la superficie de aplicación de carga, por lo que el espécimen fallará al nivel de carga de la capacidad del material, y no a una carga menor debida a que se concentró el esfuerzo en un punto determinado consecuencia de la falta de uniformidad en la superficie de aplicación de carga. Por lo tanto, es de suma importancia generar información de diseños de mezcla de coronamientos para que, si el espécimen por sí solo no cumple con los requisitos de planicidad descritos en la norma, se cuente con un material adecuado para coronar el espécimen y proporcionar una superficie uniforme que no generará concentraciones de esfuerzos durante la falla.



## 1 Introducción

Al momento de realizar ensayos de resistencia o capacidad de carga en especímenes de cualquier tipo de material, uno de los aspectos más importantes a verificar es que la zona donde se está aplicando la carga en el espécimen, esté constituida por una superficie plana, uniforme y libre de imperfecciones, que permita la transmisión de la carga de la manera más homogénea posible, desde la máquina de ensayo hasta el espécimen.

En el caso de los ensayos para determinar la resistencia a la compresión de un material, los métodos indican que se debe realizar la revisión de las superficies transversales de ambos extremos del espécimen para verificar que cumplan el requisito de planicidad, además de verificar que las superficies no posean protuberancias o depresiones que no permitan contar con una superficie uniforme.

Por lo tanto, al momento de preparar los especímenes de ensayo, se deben realizar los procedimientos de revisión de la planicidad de la superficie indicados en las normas ASTM D1632 “Standard Practice for Making and Curing Soil-Cement Compression and Flexure Test Specimens in the Laboratory” y ASTM D1633 “Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders”.

Después de un estudio detallado realizado por parte de la Comisión de Bases Estabilizadas (CBE) del LanammeUCR, se encontraron una serie de desviaciones a las normas (las cuales se describen en el documento LM-EIC-CBE-0001-R1) que se están subsanando por medio de correcciones en la metodología de ensayos en el laboratorio, además, a partir de los resultados de este estudio se decidió realizar una evaluación preliminar para determinar los materiales (cemento, yeso y agua) y proporciones de los mismos para ser utilizados en los coronamientos de los especímenes de ensayo de bases estabilizadas con cemento. Este estudio también se encuentra descrito en el documento LM-EIC-CBE-0001-R1.

Con base en los resultados de los ensayos realizados en el estudio preliminar de los coronamientos, se concluyó la importancia de realizar un estudio más profundo y específico para las cuatro proporciones de las mezclas de coronamiento que reportaron un comportamiento de mayor resistencia, solo que, aplicado a los especímenes de bases estabilizadas, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma INTE C16 (ASTM C617) “Coronamiento de especímenes cilíndricos de concreto. Práctica normalizada”. Este estudio es el que se muestra en el presente documento.



## 1.1 Objetivo general

Estudiar el comportamiento de cuatro diseños de mezcla del coronamiento de especímenes de base estabilizada, utilizando una base estabilizada cuyo diseño cumpla con de las especificaciones del “CR-2020: Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes” para este material.

## 1.2 Objetivos específicos

1.2.1 Caracterizar el material de base granular a ser estabilizado.

1.2.2 Diseñar una base estabilizada con cemento, tomando como premisa una resistencia a la compresión de 3,0 MPa de acuerdo con lo establecido en el CR-2020.

1.2.3 Realizar un diseño de mezcla para la estabilización del material contemplando al menos tres diferentes porcentajes de cemento, considerando obtener resultados de resistencias menores y mayores que la resistencia objetivo, establecida.

1.2.4 Confeccionar 15 especímenes que cumplan con el límite de planicidad indicado por la norma ASTM D1632.

1.2.5 Confeccionar 15 especímenes por cada tipo de los cuatro coronamientos a evaluar, para un total de 60 especímenes coronados.

1.2.6 Fabricar los especímenes siguiendo los procedimientos indicados en el CR-2020, respecto al tamaño, metodología de Próctor y porcentaje de compactación.

1.2.7 Fallar los especímenes siguiendo el procedimiento indicado en la norma ASTM D1633.

1.2.8 Establecer las combinaciones de mezcla para coronamiento que resulten como mejor opción para el cumplimiento de la planicidad sin que afecte la resistencia a la compresión en bases estabilizadas con cemento

## 1.3 Antecedentes

A pesar de que existen investigaciones que se han realizado al respecto del comportamiento de la base estabilizada con cemento, tanto en etapa de laboratorio como en la fase constructiva, no se ha logrado determinar la existencia de informes que traten el tema de dosificaciones para mezclas de coronamiento aptas para realizar los ensayos de resistencia a la compresión de los especímenes de ensayo. Por lo tanto, no se tiene conocimiento de antecedentes al respecto.



Sin embargo, la Comisión de Bases Estabilizadas del LanammeUCR durante los meses de mayo y octubre del año 2020, realizó un estudio preliminar de materiales y dosificaciones para los posibles coronamientos a utilizar en especímenes de base estabilizada con cemento para realizar el ensayo de resistencia a la compresión. Los resultados de este informe se encuentran en el reporte LM-EIC-CBE-0001-R1.

#### 1.4 Justificación

Para poder determinar el cumplimiento de especificaciones de las bases estabilizadas con cemento muestreadas en los distintos proyectos de obra vial, se deben establecer procedimientos estandarizados para comparar de manera segura las propiedades obtenidas mediante los ensayos de laboratorio.

De esta manera es de suma importancia, determinar los materiales y las dosificaciones aptas para fabricar los coronamientos que permitan a los especímenes contar con las características óptimas para realizar los ensayos de resistencia, y más específicamente, los ensayos de resistencia a la compresión.

Por lo tanto, se propone el desarrollo de una investigación en que se realice un estudio de los materiales determinados para utilizarse en las coronas, así como las distintas dosificaciones de los mismos para conformar los coronamientos para los especímenes de base estabilizada con cemento.

#### 1.5 Marco teórico

A continuación, se indican las especificaciones establecidas para los coronamientos en las normas ASTM D1632, ASTM D1633 e INTE C16 (ASTM C617), para proporcionar el respaldo técnico adecuado a la investigación propuesta.

##### 1.5.1 Coronamiento de la norma ASTM D1632

Como parte de las normas que el American Society for Testing and Materials ha desarrollado, la norma ASTM D1632 “Standard Practice for Making and Curing Soil-Cement Compression and Flexure Test Specimens in the Laboratory” describe los equipos y los procedimientos a seguir para moldear especímenes en el laboratorio, que son requeridos para determinar la resistencia a la compresión y a la flexión de las bases estabilizadas con cemento.

En la sección de “Especímenes para el ensayo de resistencia a la compresión”, se indica cómo se deben preparar los especímenes de ensayo en condiciones de laboratorio, desde el moldeo, pasando por el proceso de curado y, por último, mostrando las especificaciones a cumplir en el proceso de coronamiento de los especímenes.



En el apartado 9 “Coronamiento de los especímenes” se indica que antes de ser ensayados, se deben coronar los especímenes que no cumplan con el requisito de planicidad de la superficie de ambos extremos, que son los que se colocan directamente sobre los bloques de aplicación de carga de la máquina de ensayo. Este requisito de planicidad establece que las superficies deben ser planas dentro de los 0,05 mm en cualquier punto del área de los extremos.

Si no se cumple con dicha tolerancia, los especímenes se deben coronar hasta cumplir con el requisito, y la capa de coronamiento debe encontrarse en ángulo recto respecto al eje axial del espécimen.

A su vez, la norma indica que las coronas deben ser fabricadas ya sea de mortero de azufre o de pasta de yeso – cemento, y que deben ser tan delgado como sea posible. Asimismo, deben contar con una edad de fabricación tal, que no fluyan o se fracturen cuando se esté efectuando el ensayo de resistencia a la compresión al espécimen de base estabilizada. Por lo tanto, a la corona se le debe permitir su fraguado y ganancia de resistencia por un período de tiempo tal que no influya en el contenido de humedad del espécimen de base estabilizada.

Al respecto de este último aspecto, la norma menciona en la nota 6 que un coronamiento realizado con pasta de yeso – cemento, tarda aproximadamente 3 horas en contar con las características antes descritas, a una temperatura de 23 °C, y para el caso de morteros de azufre, es posible que se requiera de un tiempo menor.

### **1.5.2 Coronamiento de la norma ASTM D1633**

En este caso, la norma ASTM D1633 “Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders” describe brevemente en su apartado 6.7 que los especímenes a ser fallados deben ser revisados en sus extremos para verificar que las superficies de estos cumplan con el requisito de planicidad establecido en la norma ASTM D1632, y si no lo cumple, se debe preparar la superficie como se indica en la misma norma.

Sin embargo, ambas normas, en el caso de especímenes de base estabilizada, no indican cómo deben ser las características de estos coronamientos y tampoco establece una metodología para aceptar materiales y dosificaciones para los mismos.

Es por esta razón que se propone adoptar las propiedades de los coronamientos que han sido ampliamente estudiados por parte de la ASTM, solo que, para su aplicación en otro tipo de material, en este caso bases estabilizadas con cemento.



### 1.5.3 Criterio de aceptación de materiales para coronamiento según la norma INTE C16 (ASTM C617)

Dada la falta de información en las normas de bases estabilizadas para la evaluación de materiales y dosificaciones de coronamientos para fallar especímenes a la compresión, es que se decide aplicar los principios que establece la norma INTE C16 (ASTM C617) “Coronamiento de especímenes cilíndricos de concreto. Práctica normalizada” a este respecto. Es por ello que, a continuación, se mencionan los aspectos más destacables a considerar y que se aplicarán como parte de la metodología de estudio en esta investigación.

Como la norma trata de la falla a la compresión de concreto, las resistencias en algunos casos pueden ser mayores que 35 MPa, por lo que ésta establece las características de los coronamientos para especímenes con resistencias menores o iguales que 35 MPa y los que cuentan con resistencias mayores que lo anterior. No obstante, en el caso específico de la base estabilizada con cemento, como la resistencia máxima establecida es de 3,9 MPa, se empleará únicamente las características que debe cumplir el coronamiento con resistencias menores que 35 MPa. En la Tabla 1 se indican las especificaciones que deben cumplir las coronas en esta investigación.

**Tabla 1** Características del coronamiento establecido para la investigación

Resistencia a la compresión de la BEC	Resistencia mínima del coronamiento	Espesor promedio máximo del coronamiento	Espesor máximo de la corona en cualquier parte
2,1 MPa a 3,9 MPa	4,0 (MPa)	6 mm	8 mm

Por otro lado, para evaluar el desempeño de los materiales y dosificaciones propuestos, se establece el criterio de esta norma para evaluar los resultados de las resistencias de los especímenes coronados, respecto a la resistencia de los especímenes patrón que cumplen los criterios de planicidad.

El criterio de aceptación se compone de los siguientes aspectos, que son los indicados por la norma INTE C16 (ASTM C617):

1. La resistencia a la compresión promedio de 15 especímenes coronados (con un tipo de material y una dosificación dada), no debe ser menor que el 98% de la resistencia promedio de los 15 especímenes patrón no coronados y que cumplen con el requisito de planicidad
2. La desviación estándar de los especímenes coronados (con un tipo de material y una dosificación dada), no debe ser mayor que 1,57 veces que la desviación estándar de los especímenes de referencia o patrón
3. Que el espesor de la capa del coronamiento cumpla con los requisitos establecidos en la Tabla 1



Por último, es importante indicar el tiempo requerido para el endurecimiento de los coronamientos, con el fin de establecer si es adecuado para realizar el proceso de preparación de los especímenes para la falla, indicado en la norma ASTM D1633.



## 2 Metodología empleada

Para esta investigación se plantea la siguiente metodología, y así determinar el mejor desempeño de los materiales y dosificaciones de los coronamientos a utilizar para preparar las superficies de los especímenes de base estabilizada.

### 2.1 Fase 1: Investigación bibliográfica y recolección de información existente

Se revisaron las siguientes normativas:

1. ASTM D1632 "Standard Practice for Making and Curing Soil-Cement Compression and Flexure Test Specimens in the Laboratory"
2. ASTM D1633 "Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders"
3. CR-2020 "Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes"
4. INTE C16 (ASTM C617) "Coronamiento de especímenes cilíndricos de concreto. Práctica normalizada"

Adicionalmente, se recopiló la información presentada en el documento LM-EIC-CBE-0001-2021-R1 "Informe de resultados de análisis preliminares de propiedades de bases estabilizadas", en el cual se muestran los resultados de las resistencias de las distintas dosificaciones de las pastas a utilizar como coronamiento para los especímenes de base estabilizada.

### 2.2 Fase 2: Muestreo y caracterización de materia prima

Se escogen las 4 mezclas que muestran los mayores resultados de resistencia a la compresión, ya que como se indicó en el apartado 1.5.3, las coronas deben contar con al menos el valor de la resistencia a la compresión de los especímenes de base estabilizada que serán fallados. Como la resistencia máxima especificada para las bases estabilizadas, indicado en el CR-2020 "Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes", es de 3,9 MPa, se ha establecido como valor de resistencia mínimo para las coronas de 4,0 MPa.

Por lo tanto, para la caracterización de la materia prima para este estudio, se cuenta con dos tipos de materia prima: una es el material de base a ser estabilizado para generar los especímenes de ensayo para fallar a compresión y el otro es el material de coronamiento del cual se establecieron 4 mezclas a ser analizadas. Por lo tanto, en este apartado se muestra el trabajo que se realizará para cada una de estas.



### 2.2.1 Material de base para especímenes de base estabilizada con cemento

Los ensayos que se requieren para la caracterización del material que se utilizará como base estabilizada con cemento, son los siguientes:

- Análisis granulométrico (INTE C46/ASTM C136)
- Material más fino que el tamiz No.200 (INTE C49/ASTM C117)
- Límites de Atterberg (AASHTO T89 y AASHTO T90)
- Próctor modificado (AASHTO T180)

### 2.2.2 Material para el coronamiento

Inicialmente, se contaba con la información de la materia prima propuesta a utilizar para los coronamientos en esta investigación es el mismo que se caracterizó en el estudio preliminar mostrado en el documento LM-EIC-CBE-0001-R1 "Informe de resultados de análisis preliminares de propiedades de bases estabilizadas". En la Tabla 2 se observan las características de las mezclas que son utilizadas para la presente propuesta de investigación.

**Tabla 2** Características de las mezclas de coronamiento a utilizar

Mezcla	Proporción		Relación A/(C+Y)	Resistencia Promedio (MPa)
	Cemento	Yeso		
11	1	1,50	0,50	4,98
17	-	1,00	0,50	5,48
18	1	2,00	0,50	6,01
19	1	2,00	0,45	7,49

Se puede observar que se ha decidido conservar la numeración de la mezcla que se había establecido en el estudio preliminar, esto con el fin de generar trazabilidad en los resultados y características de las mismas que se requieran para realizar los análisis pertinentes.

Cabe recordar que el cemento a utilizar es el MP-A-AR, el cual muestra características de alta resistencia temprana y el yeso de alta pureza producido en Costa Rica.

Para moldear los especímenes de base estabilizada, se está proponiendo utilizar los agregados de base de la muestra M-1125-18, procedente de Tajo Guacalillo Alajuela, cuya caracterización se realizará como parte de la presente investigación, según se indicó en el apartado 2.2.1.



### 2.3 Fase 3: Elaboración de diseños de mezcla

Para esta investigación, el diseño de mezcla se concentra en el diseño de la base estabilizada con cemento para que cuente con una resistencia cercana al promedio establecido en las especificaciones del CR-2020 “Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes”, pero siempre dentro de los límites señalados. A continuación, se muestran las características de resistencia establecidos para las bases estabilizadas en el CR-2020.

**Tabla 3** Resistencia especificada para las bases estabilizadas con cemento

Resistencia a la compresión a 7 días <sup>(1)</sup> (MPa)	
Mínima	2,1
Promedio	3,0
Máxima	3,9

(1): Realizado con la norma ASTM D1633, método A

El diseño de mezcla de la base estabilizada con cemento se realiza según lo establecido en la subsección 302.04 inciso (d) “Metodología de diseño”, que indica que se deben estudiar al menos 2 puntos de cantidad de cemento que generen resistencias por debajo de la resistencia de diseño, y al menos 2 puntos de cantidad de cemento que generen resistencias por encima.

Adicionalmente, se debe considerar que el moldeo de los especímenes se realiza según las indicaciones que se muestran en esta misma subsección, colocando el material en 5 capas y compactar con el mazo de próctor modificado.

### 2.4 Fase 4: Evaluación del desempeño del material

El desempeño del material se medirá realizando el ensayo de resistencia a la compresión realizado con el método escrito en la norma ASTM D1633, a los especímenes de base estabilizada que cumplan con el diseño establecido en el apartado 2.3. Se ensayarán 15 especímenes por el tipo de coronamiento descrito en la Tabla 2, y se compararán los resultados con los 15 especímenes patrón, que cumplen con la especificación de planicidad indicada en la norma ASTM D1632.

Los parámetros de evaluación del desempeño del material se describen a continuación:

1. La resistencia a la compresión promedio de 15 especímenes coronados (con un tipo de material y una dosificación dada), no debe ser menor que el 98% de la resistencia promedio de los 15 especímenes patrón, no coronados y que cumplen con el requisito de planicidad



2. La desviación estándar de los especímenes coronados (con un tipo de material y una dosificación dada), no debe ser mayor que 1,57 veces que la desviación estándar de los especímenes de referencia o patrón
3. Que el espesor de la capa del coronamiento cumpla con los requisitos establecidos en la Tabla 1.

## 2.5 Fase 5: Análisis de resultados

Los resultados se analizarán a partir de los datos obtenidos de la ejecución de los ensayos. A partir de estos análisis se establecerán las proporciones adecuadas para los coronamientos que se vayan a tener que realizar para cumpliendo del requisito de planicidad.

## 2.6 Fase 6: Elaboración de normativa o nueva propuesta de investigación

Dependiendo de los resultados que se obtengan en la investigación, se analizará si se debe realizar investigación adicional al respecto, o bien, si es posible desarrollar una práctica para el coronamiento de especímenes, que indique los requisitos mínimos que se deben cumplir.



### 3 Resultados

Como se indicó en el apartado de metodología, existe una serie de fases que se desarrollaron en esta investigación para así obtener resultados de utilidad en la determinación de la necesidad de preparar los especímenes de base estabilizada con cemento para su ensayo de resistencia a la compresión. A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el desarrollo de cada una de estas fases.

#### 3.1 Investigación bibliográfica y recolección de información existente

De la investigación bibliográfica realizada, se logra determinar que la norma ASTM D1632 establece en el capítulo 12, que los especímenes que no cumplen con los requisitos de planicidad en las caras que se encuentran en contacto con los bloques de aplicación de carga, es decir, la superficie se desvía del plano en más de 0,05 mm en el diámetro del espécimen, deben ser coronados con coronamientos adheridos de pasta de yeso-cemento o con mortero de azufre.

En el LanammeUCR, no se acostumbra a coronar con mortero de azufre, de ahí que esta investigación se basa únicamente en generar diseños de mezcla de coronas de pasta de yeso-cemento, que cumplan con los requisitos para los especímenes de bases estabilizadas.

Es importante destacar, que la norma base que fue utilizada para elaborar las coronas, fue la norma INTE C16 (ASTM C617) "Coronamiento de especímenes cilíndricos de concreto. Práctica normalizada", que, a pesar de haber sido desarrollada para especímenes de concreto, no se encuentra ninguna otra norma que trate este tema en específico para especímenes de base estabilizada con cemento y al tratarse de materiales que se consideran de la misma familia, se emplea para realizar el estudio.

Cabe recordar que en el documento LM-EIC-CBE-0002-2021-P que contiene la propuesta para la presente investigación, se indica que se iban a utilizar como base los resultados de un estudio preliminar que se había realizado para determinar si efectivamente, con los materiales que se encuentran en Costa Rica, era posible obtener coronas de yeso-cemento que desarrollaran adecuadamente la resistencia requerida para ser colocadas en los especímenes de base estabilizada. Este aspecto se discute en el siguiente apartado.

Además de lo indicado anteriormente, es importante destacar que por el proceso de curado y preparación al que se deben someter los especímenes de base estabilizada con cemento establecidos en la norma ASTM D1633, que señalan que después del período de curado indicado en la norma ASTM D1632 se deben sumergir en agua por 4 horas. El proceso de coronamiento de los especímenes debe obedecer a un procedimiento estudiado con detenimiento en el laboratorio, ya que las coronas deben



desarrollar su resistencia en un tiempo específico (que se establece cuando se realiza el estudio de resistencias de las coronas) fuera de la cámara húmeda y sin sumergirse, por lo que se debe tener especial cuidado de que el espécimen de base estabilizada no pierda humedad, tal como también se indica en la norma INTE C16 (ASTM C617).

Por las razones anteriormente mostradas que surgen de lo estudiado en los documentos revisados, es que la fase 2 de caracterización de materia prima y la fase 4 que implica la colocación de la corona en los especímenes de base estabilizada, son en las que se debe realizar un mayor control en su desarrollo, pues estas condiciones encontradas en las normas deben ser cumplidas a cabalidad.

### 3.2 Caracterización de materia prima

Tal como se indicó en el documento LM-EIC-CBE-0002-2021-P, con la propuesta del desarrollo de esta investigación, se debieron realizar dos caracterizaciones de materiales de manera separada, como lo son el material de base que se utilizaría en la elaboración de los especímenes de base estabilizada que cumplieran con las premisas establecidas, que se muestran en la Tabla 1, y la caracterización de los dos materiales que se utilizarían para generar las coronas con las características solicitadas. A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los trabajos de caracterización realizados para los materiales a utilizar en esta investigación.

#### 3.2.1 Material de base para especímenes de base estabilizada con cemento

En un inicio, se había establecido que los materiales de base a utilizar en elaborar los especímenes de base estabilizada eran los provenientes del Tajo Guacalillo Alajuela. Para caracterizar estos materiales se realizaron los ensayos enlistados en el apartado 2.2.1, cuyos resultados se muestran en las tablas 4, 5 y 6, y Figura 1:

**Tabla 4** Resultado de límites de Atterberg del agregado de base

Límite líquido (LL)	Límite plástico (LP)	Índice de plasticidad (IP)
68	48	19

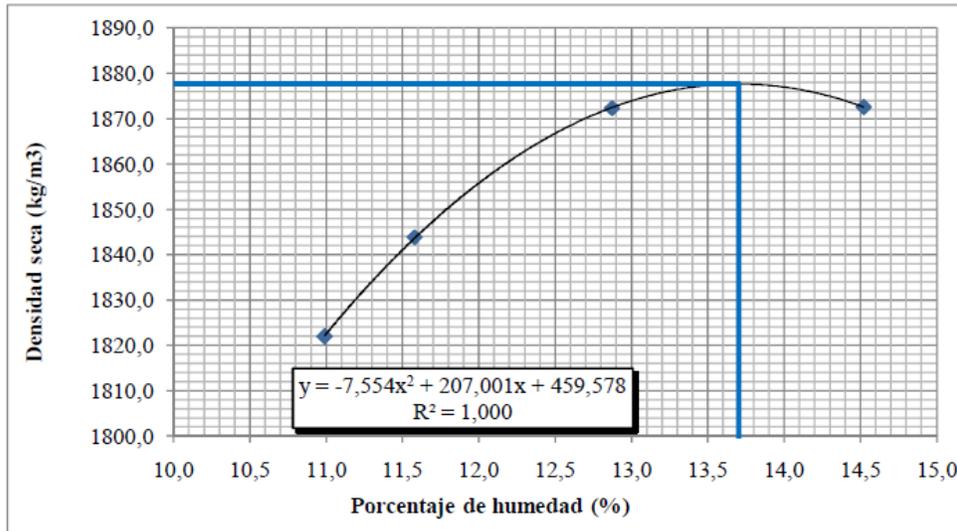


**Tabla 5 Granulometría del agregado de base**

MASA INICIAL		MASA FINAL:			
8872,0		8250,0			
TAMIZ	ABERTURA	MASA RET.	% RET.	%RET. AC.	%PAS.
No.	(mm)	(g)			
2 1/2"	63,0	0,0	0	0	100,0
2"	50,0	0,0	0	0	100,0
1 1/2"	37,5	0,0	0	0	100,0
1"	25,0	240,8	2,7	2,7	97,3
3/4"	19,0	716,8	8,1	10,8	89,2
1/2"	12,5	1022,4	11,5	22,3	77,7
3/8"	9,50	699,4	7,9	30,2	69,8
1/4"	6,3	1281,9	14,4	44,6	55,4
Nº 4	4,75	1014,9	11,4	56,1	43,9
Nº 8	2,36	1364,9	15,4	71,5	28,5
Nº 10	2,00	207,0	2,3	73,8	26,2
Nº 16	1,18	482,6	5,4	79,2	20,8
Nº 20	0,85	252,0	2,8	82,1	17,9
Nº 30	0,600	223,7	2,5	84,6	15,4
Nº 40	0,425	176,4	2,0	86,6	13,4
Nº 50	0,300	170,4	1,9	88,5	11,5
Nº 60	0,250	81,5	0,9	89,4	10,6
Nº100	0,150	154,4	1,7	91,2	8,8
Nº200	0,075	145,1	1,6	92,8	7,2
% LAVADO MALLA # 200					7,0

**Tabla 6 Resultado del Próctor modificado del agregado de base**

Punto	1	2	3	4	5
Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	1773,7	1822	1872,3	1872,6	1843,9
Humedad (%)	8,8	11	12,9	14,5	11,6
<b>Densidad máxima seca (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1877,7</b>				
<b>Humedad óptima (%)</b>	<b>13,7</b>				
<b>Densidad húmeda (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2135</b>				



**Figura 1** Curva próctor para agregado de base

Estos materiales a grandes rasgos cumplieron con lo establecido en el documento “CR-2020: Manual de carreteras, caminos y puentes”, excepto por los tamices #4 y #40, aun así, se utilizaron para elaborar el diseño de mezcla para la base estabilizada con cemento, cuyo resultado se discute en el apartado 3.3.

### 3.2.2 Material para el coronamiento

Como se indicó en el apartado 2.2.2, el material para el coronamiento fue caracterizado en el estudio preliminar LM-EIC-CBE-0001-R1 “Informe de resultados de análisis preliminares de propiedades de bases estabilizadas”. Los resultados arrojados en este documento se muestran a continuación.

#### 3.2.2.1 Materia prima para el coronamiento

En esta etapa se caracterizaron de manera preliminar los materiales a utilizar en los coronamientos de los especímenes.

Dadas las características del curado especificado en la norma ASTM D1632 y los tiempos que se deben cumplir para preparar el espécimen para realizar la falla (en menos de un día), se establece que el cemento a utilizar en estas coronas debe ser el cemento de alta resistencia temprana por lo que se utiliza el cemento MP-A-AR y el yeso de alta calidad, por lo que decide utilizar yeso con alta pureza producido en Costa Rica.

### 3.2.2.2 Diseños de mezcla para el coronamiento

Al contar con la materia prima para realizar las mezclas de los coronamientos, se decide trabajar inicialmente con las proporciones de los materiales que se observan en la Tabla 7.

**Tabla 7** Primera etapa de diseños de mezcla de coronamientos para BE

Mezcla	Proporción		Relación A/(C+Y)	Edad corona (hrs)
	Cemento	Yeso		
1	1	1,00	0,60	04:00
2	1	0,75	0,60	05:00
3	1	0,50	0,60	05:00
4	1	1,00	0,55	05:00
5	1	0,75	0,55	05:00
6	1	0,50	0,55	05:00
7	1	1,00	0,50	05:00
8	1	0,75	0,50	05:00
9	1	0,50	0,50	05:00

Se trabaja con la metodología indicada para caracterización de materiales para coronamiento indicados en la norma INTE C16 (ASTM C617), que indica que inicialmente se requiere conocer la resistencia de las coronas por medio de la ejecución de cubos de pasta, que deben ser fallados según lo indicado en la norma INTE C57 (ASTM C109). En esta primera etapa de diseños de mezcla de los coronamientos, se consideraron los tiempos de sumersión de los especímenes de ensayo posterior al curado (indicados por la norma ASTM D1633) y el tiempo de ganancia de resistencia de la corona. En la Figura 2 se observa el proceso de preparación de la pasta según las combinaciones establecidas y la colocación del coronamiento sobre especímenes de base estabilizada.



**Figura 2** Mezcla y colocación de pasta para el coronamiento

Inicialmente, se plantea fallar los cubos a 4 horas, pero al observar el resultado de resistencia, se decide esperar a fallar los especímenes cúbicos a las 5 horas, tiempo suficiente para que cuando se coloque la corona en el espécimen de base estabilizada, se cumpla en un día el ciclo final de curado en cámara



húmeda que es de 7 días, el tiempo del espécimen sumergido, que es de 4 horas, y el proceso de endurecimiento y ganancia de resistencia de la corona, que es de 5 horas.

Los resultados de los ensayos realizados a las 9 mezclas mostradas en la Tabla 7, se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 8** Resultados obtenidos de las primeras mezclas de coronamiento

Mezcla	Proporción		Relación A/(C+Y)	Edad corona (hrs)	Resistencia Promedio (MPa)
	Cemento	Yeso			
1	1	1,00	0,60	04:00	2,50
2	1	0,75	0,60	05:00	2,34
3	1	0,50	0,60	05:00	1,62
4	1	1,00	0,55	05:00	3,49
5	1	0,75	0,55	05:00	2,79
6	1	0,50	0,55	05:00	2,00
7	1	1,00	0,50	05:00	4,27
8	1	0,75	0,50	05:00	3,24
9	1	0,50	0,50	05:00	2,32

Un aspecto relevante para establecer que la resistencia de las coronas es adecuada, es que se toma como resistencia mínima, el valor de la especificación dado en el CR-2020, para la resistencia máxima que deben presentar las bases estabilizadas con cemento, que es de 3,9 MPa. Por lo tanto, en los resultados, se marcarán en color amarillo los resultados que cuenten con una resistencia de al menos 4,0 MPa (valor escogido como conservador).

Es importante hacer notar que la mayoría de las resistencias obtenidas se encuentran en el rango de resistencias que indica el CR-2020: 2,1 MPa como mínimo, 3,0 MPa como promedio y 3,9 MPa como valor máximo. Solamente el valor marcado rojo pálido es menor a la especificación mínima de resistencia de las bases estabilizadas con cemento. Por lo tanto, en principio se podrían utilizar estas dosificaciones para fabricar el coronamiento para los distintos especímenes, considerando que la resistencia de la corona debe ser al menos la resistencia del espécimen.

Nótese que las resistencias son mayores para las mezclas que contienen mayor cantidad de yeso, en proporción con el cemento, y que cuentan con menor cantidad de agua. Es importante comentar que la cantidad de agua agregada a la mezcla obedece más a un comportamiento de facilidad de manipulación como corona, y no tanto a una relación agua/material cementicio que proporcione una resistencia dada.

A pesar de los resultados obtenidos en esta primera etapa, por la experiencia de los resultados obtenidos históricamente, se ha observado que las bases estabilizadas han logrado alcanzar



resistencias mucho mayores que las especificadas, por lo que se decide realizar la segunda campaña de diseños de mezcla para coronamiento, para verificar si es posible obtener resultados de mayor resistencia.

Para esta segunda etapa se plantea realizar coronas con la misma metodología planteada para la primera etapa, pero con nuevas proporciones, que se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9** Segunda etapa de diseños de mezcla de coronamiento para BE

Mezcla	Proporción		Relación A/(C+Y)	Edad corona (hrs)
	Cemento	Yeso		
10	1	1,25	0,50	05:00
11	1	1,50	0,50	05:00
12	1	1,00	0,45	05:00
13	1	0,75	0,45	05:00
14	1	0,50	0,45	05:00
15	1	0,20	0,50	05:00
16	1	0,20	0,45	05:00
17	-	1,00	0,50	05:00
18	1	2,00	0,50	05:00
19	1	2,00	0,45	05:00

Los resultados de estas 10 proporciones adicionales se muestran a continuación.

**Tabla 10** Resultados obtenidos para la segunda etapa de mezclas de coronas

Mezcla	Proporción		Relación A/(C+Y)	Edad corona (hrs)	Resistencia Promedio (MPa)
	Cemento	Yeso			
10	1	1,25	0,50	05:00	4,78
<b>11</b>	<b>1</b>	<b>1,50</b>	<b>0,50</b>	<b>05:00</b>	<b>4,98</b>
12	1	1,00	0,45	05:00	4,46
13	1	0,75	0,45	05:00	4,15
14	1	0,50	0,45	05:00	2,37
15	1	0,20	0,50	05:00	1,11
16	1	0,20	0,45	05:00	1,25
<b>17</b>	-	<b>1,00</b>	<b>0,50</b>	<b>05:00</b>	<b>5,48</b>
<b>18</b>	<b>1</b>	<b>2,00</b>	<b>0,50</b>	<b>05:00</b>	<b>6,01</b>
<b>19</b>	<b>1</b>	<b>2,00</b>	<b>0,45</b>	<b>05:00</b>	<b>7,49</b>

Al igual que los resultados anteriores, se resaltan en amarillo los que cuentan con un valor mayor o igual que 4,0 MPa y en rojo pálido los que no cumplen con las especificaciones mínimas indicadas para la resistencia a la compresión de bases estabilizadas del CR-2020. Igualmente, en este caso se presentan los mayores resultados con contenidos mayores de yeso en la mezcla y menores contenidos de agua.



Dados estos resultados, se decide trabajar con las cuatro proporciones que generan mayores valores de resistencia y contar con estas como las mezclas para el coronamiento de especímenes de base estabilizadas para cuando se requiera trabajar con ellas en el laboratorio. Estas son las resaltadas con letra en negrita.

Por último, se plantea un tercer diseño de mezclas utilizando las mezclas con los resultados de mayor resistencia, con el mismo tipo de cemento, pero cambiando el tipo de yeso, por uno de calidad estándar, esto para determinar si la alta pureza es requerida. Las mezclas trabajadas son las que se muestran en la Tabla 11.

**Tabla 11** Tercera etapa de diseños de mezcla de coronamiento para BE

Mezcla	Proporción		Relación A/(C+Y)	Edad corona (hrs)
	Cemento	Yeso		
20	1	1,50	0,50	05:00
21	-	1,00	0,50	05:00
22	1	2,00	0,50	05:00
23	1	2,00	0,45	05:00

Los resultados de esta tercera etapa de mezclas se muestran en la Tabla 12:

**Tabla 12** Resultados obtenidos utilizando yeso de calidad estándar

Mezcla	Proporción		Relación A/(C+Y)	Edad corona (hrs)	Resistencia Promedio (MPa)
	Cemento	Yeso			
20	1	1,50	0,50	05:00	1,44
21	-	1,00	0,50	05:00	1,38
22	1	2,00	0,50	05:00	1,28
23	1	2,00	0,45	05:00	1,70

Como puede observarse, el yeso de calidad estándar no puede utilizarse para fabricar coronamiento dado que ninguna mezcla genera al menos los resultados mínimos de resistencia de las bases estabilizadas con cemento. De aquí se concluye que se debe utilizar el yeso de alta pureza para las mezclas de los coronamientos.

Por último, se realiza una etapa de reconfirmación de resultados para verificar que las resistencias de 4 mezclas de las coronas son adecuadas cuando se utiliza el cemento de alta resistencia temprana y el yeso de alta pureza y bajo las mismas premisas de tiempo de ganancia de resistencia, solo que utilizando sacos nuevos de los materiales. Los resultados son los mostrados en la Tabla 13.



**Tabla 13** Resultados obtenidos para la confirmación de mezclas de coronas

Mezcla	Proporción		Relación A/(C+Y)	Resistencia Promedio (MPa)
	Cemento	Yeso		
10	1,00	1,25	0,50	4,8
11	1,00	1,50	0,50	4,4
12	1,00	1,00	0,45	5,1
13	1,00	0,75	0,45	3,8
14	1,00	0,50	0,45	2,6
15	1,00	0,20	0,50	0,7
16	1,00	0,20	0,45	1,1
17	-	1,00	0,50	9,7
18	1,00	2,00	0,50	6,3
19	1,00	2,00	0,45	7,6

Como puede observarse en esta ocasión se obtuvo una mayor resistencia en la mezcla 12 en lugar de la 11, por lo que se decide finalmente utilizar las siguientes mezclas de coronas para la etapa de coronamiento de especímenes (Tabla 14):

**Tabla 14** Mezclas de coronas para coronamiento de especímenes de BE

Mezcla	Proporción		Relación A/(C+Y)	Resistencia Promedio (MPa)
	Cemento	Yeso		
12	1,00	1,00	0,45	5,15
17	-	1,00	0,50	9,73
18	1,00	2,00	0,50	6,29
19	1,00	2,00	0,45	7,57

### 3.3 Diseño de mezcla de BE

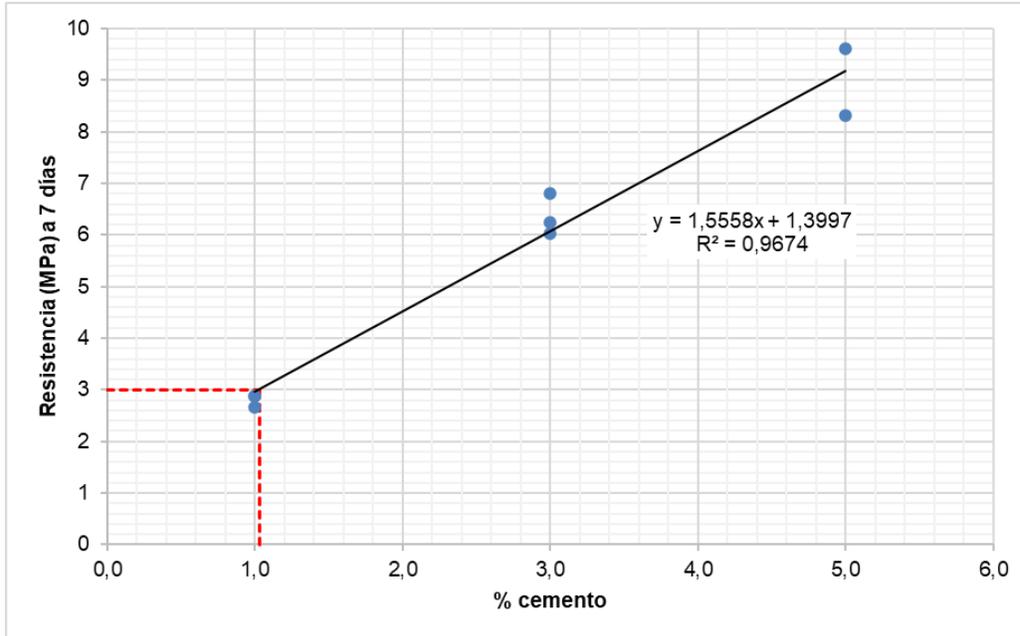
Con la caracterización obtenida de los materiales mostrada en el apartado 2.2.1, se procedió a realizar el diseño de la base estabilizada con cemento. Se realizaron especímenes con un contenido de cemento de 1%, 3% y 5% con la premisa de obtener una resistencia a la compresión simple de 3,0 MPa a los 7 días. Los resultados se muestran en la Tabla 15:

**Tabla 15** Mezclas de base estabilizada con cemento

Espécimen	Cemento	Resistencia (MPa)	Cemento	Resistencia (MPa)	Cemento	Resistencia (MPa)
1	1%	2,87	3%	6,25	5%	8,32
2		2,67		6,02		9,60
3		2,89		6,80		*
<b>Promedio</b>		<b>2,81</b>		<b>6,36</b>		<b>8,96</b>

(\*): No fue posible realizar la falla del espécimen

Colocando esos resultados de manera gráfica para obtener la curva de mejor ajuste que ayuda a obtener la proporción óptima para trabajar se tiene la Figura 3:



**Figura 3** Obtención de proporción óptima para la BE

De lo que puede observarse de la Figura 3, y aplicando la curva de mejor ajuste obtenida del gráfico, se obtiene que el porcentaje óptimo para la base estabilizada es ligeramente mayor que el 1%. Debido a esto, se decide trabajar con un 2% de porcentaje de cemento.

### 3.4 Coronamiento de especímenes de BE con coronas de mayor resistencia

Esta etapa de la investigación consiste en coronar especímenes de base estabilizada con cemento moldeados en laboratorio, con las cuatro mezclas de coronamientos que se mostraron mayor resistencia.

Para este estudio, se utilizó la mezcla de base estabilizada en el laboratorio, que cumple con los límites especificados en el CR-2020, según se mostró en el apartado 3.3.

Como se debe cumplir con los requisitos de evaluación de materiales para coronamiento descrita en la norma INTE C16 (ASTM C617), se deben moldear 15 especímenes que cumplieran con el requisito de planicidad, es decir estos especímenes no requieren de coronamiento alguno, y 15 especímenes por



cada tipo de coronamiento para establecer su comportamiento. Los parámetros que se evalúan en esta etapa de la investigación son:

- La resistencia promedio de los especímenes coronados debe ser mayor o igual que el 98% de la resistencia promedio de los especímenes patrón
- La desviación estándar de los especímenes coronados debe ser menor que 1,57 veces la desviación estándar de los especímenes patrón
- El espesor individual de las coronas debe ser menor que 8 mm
- El espesor promedio de las coronas debe ser menor que 6 mm

Hasta el momento en que se encuentra el desarrollo de esta última etapa, finalmente en el laboratorio se trabajaron 18 especímenes sin coronar, es decir que cumplieron el requisito de planicidad (0.05 mm), 16 especímenes coronados con el diseño de corona #18, esto es con la mezcla 1:2:0,5, y 16 especímenes coronados con el diseño de corona #19, esto es con la mezcla 1:2:0,45. Aún quedan por ensayar las coronas #12 y #17. Los resultados de estos especímenes se muestran en la Tabla 16.

**Tabla 16** Resultados de resistencia a la compresión de especímenes de base estabilizada

N° Especímen	RESISTENCIA COMPRESIÓN (MPa)		
	Especímenes sin coronar	Corona #18 1:02:0.5	Corona #19 1:02:0.45
1	3,53	3,02	2,52
2	2,40	3,24	2,66
3	3,42	3,41	2,96
4	3,64	3,39	2,92
5	3,73	3,46	2,76
6	3,09	3,11	2,83
7	2,46	3,41	3,03
8	3,18	3,47	2,99
9	3,40	3,11	2,76
10	2,46	2,62	2,93
11	3,18	2,95	3,17
12	3,40	2,95	2,95
13	3,33	3,38	2,92
14	3,10	3,35	2,68
15	3,24	3,55	2,43
16	3,53	2,94	2,86
17	2,40		
18	3,42		
<b>Promedio</b>	<b>3,16</b>	<b>3,21</b>	<b>2,84</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>0,44</b>	<b>0,26</b>	<b>0,19</b>



Como puede observarse, el diseño de la base estabilizada logra alcanzar la resistencia meta elegida en las premisas de la investigación. Al analizar las condiciones de promedio y desviación estándar de los especímenes coronados con respecto a los no coronados, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 17.

**Tabla 17** Resultados de evaluación de coronamiento en especímenes de base estabilizada

Parámetro	Sin corona	Corona #18	Cumple	Corona #19	Cumple
Resistencia promedio	3,16	3,21	> 98%	2,84	> 98%
Desviación estándar	0,44	0,26	< 1,57	0,19	< 1,57
$\frac{\bar{X}_{C\#}}{\bar{X}_{SC}}$	-	101%		90%	
$\frac{\sigma_{C\#}}{\sigma_{SC}}$	-	0,59		0,44	

En cuanto a los espesores de las coronas, los resultados se muestran en la Tabla 18:

**Tabla 18** Resultados de espesores de coronas

N° Especímen	ESPESOR (mm)	
	Corona #18 1:02:0.5	Corona #19 1:02:0.45
1	2,89	3,04
2	2,67	3,75
3	2,68	2,73
4	3,05	3,96
5	2,49	3,13
6	3,51	3,56
7	3,60	3,62
8	3,70	3,75
9	3,08	3,02
10	3,36	2,09
11	3,99	3,10
12	3,24	3,15
13	3,21	3,06
14	4,10	2,98
15	2,35	2,90
16	3,91	3,09
<b>Promedio</b>	<b>3,24</b>	<b>3,18</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>0,54</b>	<b>0,46</b>

Nota: debido a que la corona quedó adherida al espécimen solo se pudo obtener un valor de espesor, por lo que no se pudo obtener espesor máximo y un promedio de varias mediciones



Como se puede observar en la Tabla 17, la corona #18 cumple con los resultados de resistencia de los especímenes coronados, pues el promedio de estos comparados en la resistencia promedio de los especímenes sin corona es mayor que el 98%. Adicionalmente, este mismo diseño de mezcla, cumple con el criterio de relación de las desviaciones estándar, pues la desviación estándar de los especímenes coronados es menor que 1,57 veces la desviación estándar de los especímenes sin coronar. Incluso, vale la pena recalcar que la dispersión de los datos coronados observada es baja, dada la desviación estándar resultante. En cuanto al espesor de coronas observados en la Tabla 18, al solamente contar con un valor por la dificultad que la corona se encontraba adherida al espécimen, este se compara con el máximo individual y promedio para cada corona, obteniéndose el cumplimiento del criterio de 8 mm máximo individual y 6 mm máximo promedio.

Por otro lado, al observar la corona #19 en la Tabla 17, la comparación de la resistencia a la compresión de los especímenes coronados con los no coronados no cumple, pues es menor que 98%. Sin embargo, la condición de la desviación estándar sí cumple con lo especificado por la norma INTE C16 (ASTM C617), incluso la dispersión de esta muestra es la menor encontrada en los 3 juegos de especímenes. En cuanto al espesor de coronas observados en la Tabla 18, al igual que con las coronas del diseño de mezcla #18, solamente se pudo obtener un valor de espesor de corona, y estas cumplen con el criterio de 8 mm máximo individual y 6 mm máximo promedio.

Llama la atención, como los especímenes coronados con el diseño #19, muestran resultados consistentemente más bajos que los especímenes coronados con el diseño #18. Por esta razón, se procede a analizar las densidades de compactación y humedades con las que contaban los especímenes en la falla. Los resultados de estos valores se muestran en la Tabla 19.



**Tabla 19** Resultados de densidades y humedades de especímenes de BE

N° Espécimen	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )			HUMEDAD MOLDEO (%)			HUMEDAD FALLA (%)		
	Especímenes sin coronar	Corona #18 1:02:0.5	Corona #19 1:02:0.45	Especímenes sin coronar	Corona #18 1:02:0.5	Corona #19 1:02:0.45	Especímenes sin coronar	Corona #18 1:02:0.5	Corona #19 1:02:0.45
1	1909,0	1893,6	1924,1	12,0	12,4	12,4	12,5	11,9	12,4
2	1899,0	1910,8	1940,5	12,0	12,3	12,1	13,5	12,9	12,4
3	1909,0	1901,6	1931,0	12,0	12,2	12,3	12,5	13,1	12,1
4	1910,7	1903,4	1926,5	12,1	12,2	12,2	12,6	12,9	12,7
5	1925,4	1893,3	1910,2	12,1	12,0	12,1	12,6	12,4	12,6
6	1911,7	1897,6	1920,9	12,1	12,2	12,3	12,8	13,0	12,8
7	1906,8	1893,8	1938,0	12,1	12,2	12,2	12,7	12,7	12,4
8	1901,7	1906,7	1923,3	12,2	12,2	12,2	12,5	12,7	12,4
9	1925,1	1881,4	1935,7	12,2	12,1	12,1	12,9	12,6	12,1
10	1913,2	1877,4	1922,3	12,2	12,0	12,2	12,4	12,9	12,3
11	1878,7	1890,1	1937,2	12,2	12,3	12,4	12,2	12,9	12,3
12	1890,0	1893,0	1926,1	12,1	12,1	12,2	12,2	13,1	12,6
13	1900,2	1905,8	1927,7	12,1	12,1	12,4	12,2	12,4	12,3
14	1890,9	1909,1	1930,9	12,2	12,2	12,2	12,5	12,3	12,9
15	1879,3	1902,6	1937,0	12,2	12,2	12,2	12,2	12,5	12,5
16	1880,8	1898,4	1940,4	12,2	12,1	12,2	12,8	12,9	12,2
17	1885,0			12,1			12,6		
18	1894,7			12,3			12,7		
<b>Promedio</b>	<b>1900,6</b>	<b>1897,4</b>	<b>1929,5</b>	<b>12,1</b>	<b>12,2</b>	<b>12,2</b>	<b>12,6</b>	<b>12,7</b>	<b>12,4</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>14,5</b>	<b>9,41</b>	<b>8,41</b>	<b>0,09</b>	<b>0,11</b>	<b>0,09</b>	<b>0,31</b>	<b>0,33</b>	<b>0,24</b>
<b>Coeficiente variación</b>	<b>0,76%</b>	<b>0,50%</b>	<b>0,44%</b>	<b>0,78%</b>	<b>0,90%</b>	<b>0,74%</b>	<b>2,48%</b>	<b>2,64%</b>	<b>1,91%</b>

Como puede observarse, los valores de densidad alcanzados por todos los especímenes de BE son similares entre sí y la variación de los resultados es incluso menor en la corona #19 que para el resto de los especímenes. Igualmente sucede con las humedades de moldeo y falla. Por lo que no es posible determinar que las humedades de moldeo y falla, sumado a las densidades obtenidas para los especímenes haya sido la causa de que la resistencia de los especímenes de la mezcla de la corona #19 sean ligeramente más bajos que los de la corona #18.

Por otro lado, al observar los valores de resistencia desarrollados propiamente por las coronas dados en la Tabla 13, se nota que la resistencia del diseño de mezcla de la corona #19 resulta ser la mayor que la corona #18. Aunado a esto, los espesores del coronamiento de la mezcla de la corona #19, son ligeramente menores que los de la corona #18, por lo que no es posible establecer que la corona es la que ha influido en la resistencia de los especímenes.

Al realizar un análisis de varianza para determinar si la resistencia resultante de los especímenes coronados con las mezclas de las coronas #18 y #19 depende de alguno de los factores mostrados en la Tabla 19, que son: espesor de la corona, densidad del espécimen, humedad del material durante el moldeo y humedad del material después de la falla, se obtiene lo que se muestra en las tablas 20 y 21.



**Tabla 20 ANOVA: resistencia vrs parámetros de corona y material – especímenes corona #18**

Parámetro	Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	Análisis de varianza						
						Origen	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
<b>Resistencia</b>	RC	16	51,34	3,2088	0,0675							
Espesor	E	16	51,83	3,2394	0,2905	Entre grupos	0,0075	1	0,0075	0,0417	0,8396	
						Dentro grupos	5,3705	30	0,1790			
Densidad	D	16	30359	1897	88,53	Entre grupos	28704091	1	28704091	647971	1,3898E-66	4,1709
						Dentro grupos	1329	30	44,2985			
Humedad moldeo	HM	16	194,8	12,18	0,0120	Entre grupos	643,2	1	643,2	16179	1,4810E-42	4,1709
						Dentro grupos	1,1926	30	0,0398			
Humedad falla	HF	16	203,1	12,69	0,1121	Entre grupos	719,4	1	719,4	8012	5,4522E-38	4,1709
						Dentro grupos	2,6937	30	0,0898			

**Tabla 21 ANOVA: resistencia vrs parámetros de corona y material – especímenes corona #19**

Parámetro	Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	Análisis de varianza						
						Origen	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
<b>Resistencia</b>	RC	16	45,38	2,8364	0,0372							
Espesor	E	16	50,93	3,1831	0,2122	Entre grupos	0,9615	1	0,9615	7,7112	0,0094	
						Dentro grupos	3,7407	30	0,1247			
Densidad	D	16	30872	1929	70,81	Entre grupos	29695554	1	29695554	838274	2,9212E-68	4,1709
						Dentro grupos	1063	30	35,4247			
Humedad moldeo	HM	16	195,6	12,23	0,0081	Entre grupos	705,5	1	705,5	31123	8,2086E-47	4,1709
						Dentro grupos	0,6800	30	0,0227			
Humedad falla	HF	16	199,1	12,44	0,0565	Entre grupos	738,0	1	738,0	15743	2,2298E-42	4,1709
						Dentro grupos	1,4063	30	0,0469			

Como puede observarse, únicamente el parámetro de espesor de la corona #18 (resaltado en amarillo) es el que posiblemente esté influyendo en los resultados de resistencia para estos especímenes, pues el F resultante es menor que el valor crítico para F, y el resto de los parámetros no tienen influencia. Sin embargo, como se comentó anteriormente, la resistencia de los especímenes es adecuada y la mezcla de la corona cumple con lo establecido por la norma INTE C16 (ASTM C617) para la evaluación de las mismas.

Por su parte, los especímenes que cuentan con la mezcla de coronas #19, no muestra en el análisis que alguno de los parámetros esté incluyendo en la resistencia, aun así, no cumple con lo indicado en la norma INTE C16 (ASTM C617).

Por lo anteriormente discutido, se está valorando realizar una repetición de la condición de los especímenes coronados con la mezcla de la corona #19 y así constatar este comportamiento al finalizar el estudio de las premisas iniciales de esta investigación.

Por lo pronto, con los resultados que se cuentan hasta el momento, es posible determinar dos aspectos importantes de esta investigación:

1. Que es posible contar con especímenes que cumplan los requisitos de planicidad sin requerir coronamiento. Esta condición de planicidad se obtuvo realizando el moldeo final utilizando del



material sobrante del moldeo, material más fino que pasa tanto el tamiz #4 como el #10, que se coloca encima de la superficie del espécimen de base estabilizada y utilizando una regla enrasadora se empareja hasta dar el acabado liso al espécimen

2. Que se pueden contar con diseños de mezcla de coronas que pueden cumplir con los requisitos de la norma INTE C16 (ASTM C617) para que cuando existan especímenes que no cumplan con la planicidad solicitada por la norma ASTM D1632, se puedan coronar con pasta de yeso-cemento capaces de contar con la resistencia requerida de al menos el valor del diseño de mezcla de la base estabilizada.



#### 4 Conformación del grupo de investigación

Esta investigación está a cargo de las siguientes personas:

**Tabla 22** Responsables del proyecto de investigación

Investigador	Grado académico	Estado en régimen	Función en el proyecto	Dedicación semanal (horas)	Meses
Ana Lorena Monge Sandí	Maestría	Propiedad	Investigador principal	5	4
Andrea Ulloa Calderón	Maestría	Interino	Investigador asociado	5	4
Oscar Valerio Salas	Maestría	Interino	Investigador asociado	5	4



## 5 Cronograma de actividades faltantes

A continuación, se muestra el cronograma de actividades faltantes planificado para la finalización de esta investigación (Tabla 23):

**Tabla 23** Cronograma de actividades del proyecto de investigación

Actividad	Fecha inicio	Fecha término
Fase 4: Evaluación del desempeño del material: 2 diseños de coronas	01-enero-2023	01-febrero-2023
Fase 5: Análisis de resultados	15-febrero-2023	01-marzo-2023
Fase 6: Elaboración de normativa o nueva propuesta de investigación	01-marzo-2023	01-abril-2023
<b>Presentación de informe final</b>	01-Abril-2023	<b>01-Junio-2023</b>



## 6 Metas y entregables

La meta de la investigación es poder implementar el uso de materiales para coronar los especímenes de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de las bases estabilizadas con cemento, utilizando los recursos de laboratorio con los que cuenta el LanammeUCR. Además de establecer rangos de mezclas para usar según los distintos grados de resistencia que se puedan esperar de los especímenes de base estabilizada con cemento, con el fin de poder incorporarlos en el quehacer diario de la realización de estos ensayos en los laboratorios del LanammeUCR.

Se planea realizar esta investigación en menos de un año dada la premura de la implementación del coronamiento en los especímenes de ensayo para fallar a la compresión. Por lo tanto, al final se entregará un informe cuyo producto consiste en la implementación de diseños de mezcla de coronamiento para realizar adecuadamente el ensayo de resistencia a la compresión de especímenes de base estabilizada con cemento, para así colaborar con la verificación de la calidad de este material en los distintos proyectos de obra vial, solicitada por la Unidad de Auditoría Técnica del LanammeUCR.



## 7 Recursos utilizados

A continuación, se muestra el presupuesto requerido para realizar la investigación:

**Tabla 24** Administración, transporte de materiales y ponencias (US\$)

Descripción	Justificación	Valor
Publicaciones	Recopilación de información, libros y publicaciones en revistas nacionales e internacionales requeridas para la ejecución del proyecto de investigación	\$330
Equipos	Necesidad de nuevos ensayos para cumplir con el alcance del proyecto (coronamiento y fabricación de aditamentos)	\$1475
Consumibles	Cemento, yeso, agregados para base estabilizada	\$150
<b>Total</b>		

**Tabla 25** Descripción de los ensayos de laboratorio realizados

Ensayo	Justificación	Cantidad	Costo total
Diseño de base estabilizada	En esta etapa se realiza el diseño de la base estabilizada para cumplir con los parámetros de resistencia requeridos con 4 porcentajes de cemento	1	\$350
Moldeo de especímenes	En esta etapa de evaluación de las mezclas de coronamiento.	75 (60 coronados y 15 sin coronar)	\$1665
Falla de especímenes de base estabilizada	Se fallan a la compresión los 75 especímenes moldeados para evaluar el desempeño de las mezclas de coronamiento	75	\$1500



## 8 Referencias Bibliográficas

- AASHTO T134 “Standard Method of Test for Moisture–Density Relations of Soil–Cement Mixtures”. Estados Unidos, 2019.
- ASTM D558 “Standard Test Methods for Moisture-Density (Unit Weight) Relations of Soil-Cement Mixtures”. Estados Unidos, 2019.
- ASTM D1632 “Standard Practice for Making and Curing Soil-Cement Compression and Flexure Test Specimens in the Laboratory”. Estados Unidos, 2017.
- ASTM D1633 “Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders”. Estados Unidos, 2017.
- INTE C16 “Coronamiento de especímenes cilíndricos de concreto. Práctica normalizada”. San José, 2017.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. “CR-2020: Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes”. San José, 2021.
- SANS 3001-GR51 “Part GR51: Sampling, preparation, compaction and curing of field mixed freshly cementitiously stabilized materials including the determination of the maximum dry density and optimum moisture content”. Sudáfrica, 2015.