



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

LanammeUCR

Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

Comisión de Bases Estabilizadas - LanammeUCR

INFORME FINAL: *EIC-Lanamme-INF-0676-2023*

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

Junio, 2023





1. Informe EIC-Lanamme-INF-0676-2023		2. Copia No. 1	
3. Título y subtítulo: Estudio de mezclas para el coronamiento de bases estabilizadas para preparar especímenes para la falla a la compresión		4. Fecha del Informe 26 junio, 2023	
5. Organización y dirección 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			
6. Notas complementarias Ninguna			
7. Resumen <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 se ha logrado que las 4 mezclas de coronamiento cumplan con los parámetros indicados en la norma. Es por ello que se considera posible implementar este procedimiento como parte de la falla de los especímenes de base estabilizada.</i>			
8. Palabras clave Bases estabilizadas, muestreo, moldeo, curado, coronamiento, falla, resistencia a la compresión, planicidad		9. Nivel de seguridad: Ninguno	10. Núm. de páginas 44
11. Preparado por:			
Ing. Ana Lorena Monge Sandí, M.Sc Coordinadora PIG	Ing. Andrea Ulloa Calderón, M.Sc Jefe Laboratorio de Técnicas de Preservación	Ing. Oscar Valerio Salas, M.Sc Jefe Laboratorio Geotecnia	
12. Revisado y aprobado por:			
Ing. Tania Ávila Esquivel, M.Sc Investigadora UIIT	Ing. Gustavo Badilla Vargas, D.Sc Investigador PIG	Ing. Tracy Gutiérrez Ruiz Jefe Laboratorio de Liberia	
Ing. Mauricio Salas Chaves Auditor UAT		Ing. Wendy Sequeira Rojas, M.Sc Coordinadora UAT	



TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	7
1.1	OBJETIVO GENERAL.....	7
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
1.3	ANTECEDENTES	8
1.4	JUSTIFICACIÓN	8
1.5	MARCO TEÓRICO	9
1.5.1	<i>CORONAMIENTO DE LA NORMA ASTM D1632</i>	<i>9</i>
1.5.2	<i>CORONAMIENTO DE LA NORMA ASTM D1633.....</i>	<i>10</i>
1.5.3	<i>CRITERIO DE ACEPTACIÓN DE MATERIALES PARA CORONAMIENTO SEGÚN LA NORMA INTE C16 (ASTM C617)</i>	<i>10</i>
2	METODOLOGÍA EMPLEADA	12
2.1	FASE 1: INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE.....	12
2.2	FASE 2: MUESTREO Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIA PRIMA.....	12
2.2.1	<i>MATERIAL DE BASE PARA ESPECÍMENES DE BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO.....</i>	<i>13</i>
2.2.2	<i>MATERIAL PARA EL CORONAMIENTO.....</i>	<i>13</i>
2.3	FASE 3: ELABORACIÓN DE DISEÑOS DE MEZCLA	14
2.4	FASE 4: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MATERIAL	14
2.5	FASE 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	15
2.6	FASE 6: ELABORACIÓN DE NORMATIVA O NUEVA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN	15
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
3.1	INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE	16
3.2	CARACTERIZACIÓN DE MATERIA PRIMA.....	17
3.2.1	<i>MATERIAL DE BASE PARA ESPECÍMENES DE BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO.....</i>	<i>17</i>
3.2.2	<i>MATERIAL PARA EL CORONAMIENTO.....</i>	<i>19</i>
3.2.2.1	<i>Materia prima para el coronamiento.....</i>	<i>19</i>
3.2.2.2	<i>Diseños de mezcla para el coronamiento</i>	<i>20</i>
3.3	DISEÑO DE MEZCLA DE BE.....	24
3.4	CORONAMIENTO DE ESPECÍMENES DE BE CON CORONAS DE MAYOR RESISTENCIA.....	26
4	CONCLUSIONES.....	36
5	RECOMENDACIONES	37
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38
7	APÉNDICE	40



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 CARACTERÍSTICAS DEL CORONAMIENTO ESTABLECIDO PARA LA INVESTIGACIÓN	11
TABLA 2 CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS DE CORONAMIENTO A UTILIZAR.....	13
TABLA 3 RESISTENCIA ESPECIFICADA PARA LAS BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO.....	14
TABLA 4 RESULTADO DE LÍMITES DE ATTERBERG DEL AGREGADO DE BASE.....	17
TABLA 5 GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO DE BASE	18
TABLA 6 RESULTADO DEL PRÓCTOR MODIFICADO DEL AGREGADO DE BASE.....	18
TABLA 7 PRIMERA ETAPA DE DISEÑOS DE MEZCLA DE CORONAMIENTOS PARA BE.....	20
TABLA 8 RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PRIMERAS MEZCLAS DE CORONAMIENTO.....	21
TABLA 9 SEGUNDA ETAPA DE DISEÑOS DE MEZCLA DE CORONAMIENTO PARA BE.....	22
TABLA 10 RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA SEGUNDA ETAPA DE MEZCLAS DE CORONAS.....	22
TABLA 11 TERCERA ETAPA DE DISEÑOS DE MEZCLA DE CORONAMIENTO PARA BE	23
TABLA 12 RESULTADOS OBTENIDOS UTILIZANDO YESO DE CALIDAD ESTÁNDAR	23
TABLA 13 RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA CONFIRMACIÓN DE MEZCLAS DE CORONAS	24
TABLA 14 MEZCLAS DE CORONAS PARA CORONAMIENTO DE ESPECÍMENES DE BE.....	24
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	27
TABLA 18 RESULTADOS DE ESPESORES DE CORONAS	28
TABLA 19 RESULTADOS DE DENSIDADES DE ESPECÍMENES DE BE.....	29
TABLA 20 RESULTADOS DE HUMEDADES DE ESPECÍMENES DE BE.....	30
TABLA 21 ANOVA: RESISTENCIA VRS PARÁMETROS DE CORONA Y MATERIAL – ESPECÍMENES CORONA #12.....	30
TABLA 22 ANOVA: RESISTENCIA VRS PARÁMETROS DE CORONA Y MATERIAL – ESPECÍMENES CORONA #17.....	31
TABLA 23 ANOVA: RESISTENCIA VRS PARÁMETROS DE CORONA Y MATERIAL – ESPECÍMENES CORONA #18.....	31
TABLA 24 ANOVA: RESISTENCIA VRS PARÁMETROS DE CORONA Y MATERIAL – ESPECÍMENES CORONA #19.....	31



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 CURVA PRÓCTOR PARA AGREGADO DE BASE	19
FIGURA 2 MEZCLA Y COLOCACIÓN DE PASTA PARA EL CORONAMIENTO	20
FIGURA 3 OBTENCIÓN DE PROPORCIÓN ÓPTIMA PARA LA BE	25
FIGURA 4 COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA DE LOS ESPECÍMENES RESPECTO AL ESPESOR DE LA CORONA.....	32
FIGURA 5 COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA DE LOS ESPECÍMENES RESPECTO A SU DENSIDAD	32
FIGURA 6 COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA DE LOS ESPECÍMENES RESPECTO A LA HUMEDAD DE MOLDEO	33
FIGURA 7 COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA DE LOS ESPECÍMENES RESPECTO A LA HUMEDAD DE FALLA.....	33



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 del que se observa no se ha logrado cumplir en su totalidad por 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”.

La Comisión de Bases Estabilizadas (CBE) del LanammeUCR, realizó un estudio detallado de los requisitos de estas normas comparando lo ejecutado en laboratorio y 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 las 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

Determinar si es posible establecer diseños de mezcla para un coronamiento adecuado de especímenes de base estabilizada.



1.2 Objetivos específicos

1.2.1 Diseñar una base estabilizada con cemento contemplando al menos tres diferentes porcentajes de cemento y tomando como premisa una resistencia a la compresión de 3,0 MPa de acuerdo con lo establecido en el CR-2020.

1.2.2 Confeccionar 15 especímenes que cumplan con el límite de planicidad indicado por la norma ASTM D1632 y 15 especímenes por cada tipo de coronamiento a evaluar.

1.2.3 Fabricar y fallar los especímenes confeccionados siguiendo los procedimientos indicados en el CR-2020, respecto al tamaño, metodología de Próctor y porcentaje de compactación, así como lo indicado en la norma ASTM D1633.

1.2.4 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.

Informe EIC-Lanamme-INF-0676-2023	Enero de 2023	Página 10 de 44
-----------------------------------	---------------	-----------------



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 estableció la siguiente metodología con el fin de 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 son 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 realiza 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 utiliza 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)	(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

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 ⁽¹⁾ (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 dos (2) puntos de cantidad de cemento que generen resistencias por debajo de la resistencia de diseño, y al menos dos (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 cinco (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 y discusión

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, pues se generan gases tóxicos, 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 utilizada para elaborar las coronas, es la norma INTE C16 (ASTM C617) "Coronamiento de especímenes cilíndricos de concreto. Práctica normalizada", que fue desarrollada para especímenes de concreto, ya que 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 indicó 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 cuatro (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 segunda fase de caracterización de materia prima y la cuarta fase 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

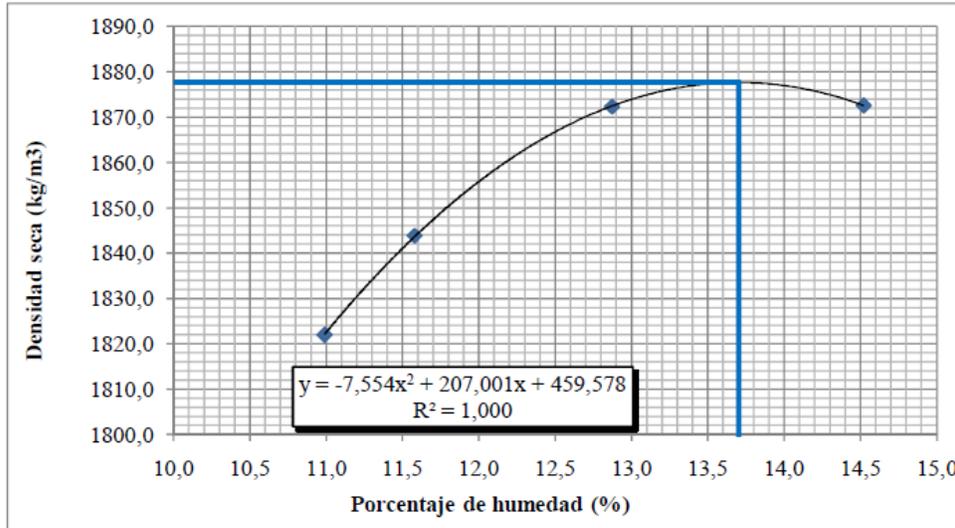
MASA INICIAL		MASA FINAL:			
8872,0		8250,0			
TAMIZ	ABERTURA	MASA RET.	% RET.	%RET. AC.	%PAS.
No.	(mm)	(g)			
2 1/2"	63,0	0,0	0	0	100,0
2"	50,0	0,0	0	0	100,0
1 1/2"	37,5	0,0	0	0	100,0
1"	25,0	240,8	2,7	2,7	97,3
3/4"	19,0	716,8	8,1	10,8	89,2
1/2"	12,5	1022,4	11,5	22,3	77,7
3/8"	9,50	699,4	7,9	30,2	69,8
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 ³)	1773,7	1822	1872,3	1872,6	1843,9
Humedad (%)	8,8	11	12,9	14,5	11,6
Densidad máxima seca (kg/m³)	1877,7				
Humedad óptima (%)	13,7				
Densidad húmeda (kg/m³)	2135				

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 cuatro (4) horas, pero al observar el resultado de resistencia, se decide esperar a fallar los especímenes cúbicos a las cinco (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 siete (7) días, el tiempo del espécimen sumergido, que es de cuatro (4) horas, y el proceso de endurecimiento y ganancia de resistencia de la corona, que es de cinco (5) horas.

Los resultados de los ensayos realizados a las nueve (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
11	1	1,50	0,50	05:00	4,98
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
17	-	1,00	0,50	05:00	5,48
18	1	2,00	0,50	05:00	6,01
19	1	2,00	0,45	05:00	7,49



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 cuatro (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 resumidas en la 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 3.2.1, 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 siete (7) días. Los resultados se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15 Mezclas de base estabilizada con cemento

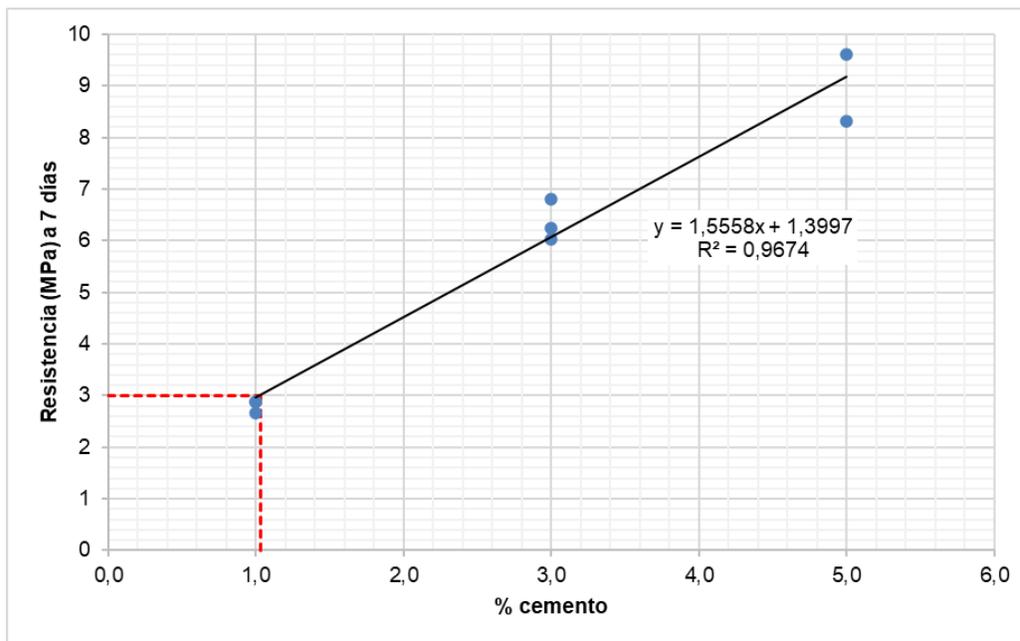
Espécimen	Cemento	Resistencia (MPa)	Cemento	Resistencia (MPa)	Cemento	Resistencia (MPa)
1		2,87		6,25		8,32
2	1%	2,67	3%	6,02	5%	9,60
3		2,89		6,80		*
Promedio		2,81		6,36		8,96

(*): 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.

Para el material de base estabilizada, se ha establecido un valor de densidad máxima seca de 1912 kg/m³ con una humedad óptima de 12,2%, como parámetros de diseño para el moldeo de los especímenes.



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

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 #12, con la mezcla 1:1:0,45; 16 especímenes coronados con el diseño de corona #17, con la mezcla 0:1:0,5; 16 especímenes coronados con el diseño de corona #18, con la mezcla 1:2:0,5 y 16 especímenes coronados con el diseño de corona #19, con la mezcla 1:2:0,45. 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° Espécimen	RESISTENCIA COMPRESIÓN (MPa)				
	Especímenes sin coronar	Corona #12 1:1:0,45	Corona #17 0:1:0,50	Corona #18 1:02:0,5	Corona #19 1:02:0,45
1	3,53	3,47	2,61	3,02	3,88
2	2,40	3,38	3,08	3,24	3,28
3	3,42	3,51	3,33	3,41	3,76
4	3,64	3,37	3,34	3,39	3,60
5	3,73	3,52	3,04	3,46	3,18
6	3,09	3,10	3,18	3,11	3,18
7	2,46	3,28	3,49	3,41	3,43
8	3,18	3,54	3,09	3,47	3,32
9	3,40	3,15	2,97	3,11	3,57
10	2,46	2,93	2,77	2,62	3,17
11	3,18	2,57	3,35	2,95	3,26
12	3,40	2,54	3,45	2,95	3,74
13	3,33	3,02	3,12	3,38	3,28
14	3,10	3,03	2,84	3,35	2,73
15	3,24	3,23	2,91	3,55	3,16
16	3,53	3,38	3,25	2,94	2,99
17	2,40				
18	3,42				
Promedio	3,16	3,19	3,11	3,21	3,34
Desviación estándar	0,44	0,31	0,25	0,26	0,30

Como puede observarse, el diseño de la base estabilizada logra alcanzar la resistencia meta elegida en las premisas de la investigación, tanto en la resistencia promedio, así como en los valores máximo y mínimo de resistencia. Al analizar las condiciones de promedio y desviación estándar de los especímenes coronados con respecto a los no coronados y comparando con las premisas de evaluación 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 #12	Cumple	Corona #17	Cumple	Corona #18	Cumple	Corona #19	Cumple
Resistencia promedio	3,16	3,19		3,11		3,21		3,34	
Desviación estándar	0,44	0,31		0,25		0,26		0,30	
$\frac{\bar{X}_{C\#}}{\bar{X}_{SC}} > 98\%$	-	101%	✓	98,5%	✓	101%	✓	106%	✓
$\frac{\sigma_{C\#}}{\sigma_{SC}} < 1,57$	-	0,71	✓	0,57	✓	0,59	✓	0,69	✓

Como se puede observar en la Tabla 17, las coronas para todos los diseños elegidos cumplen 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, cumplen



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. Por lo tanto, dados los resultados, es posible afirmar que se cumplen las premisas del diseño de las coronas establecidas en el apartado 2.4.

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

Tabla 18 Resultados de espesores de coronas

N° Espécimen	ESPESOR (mm)			
	Corona #12	Corona #17	Corona #18	Corona #19
	1:1:0,45	0:1:0,50	1:02:0.5	1:02:0.45
1	4,62	4,62	2,89	5,28
2	4,25	2,63	2,67	3,94
3	4,56	3,48	2,68	3,89
4	4,32	4,33	3,05	5,81
5	3,33	4,34	2,49	3,94
6	2,50	3,65	3,51	3,39
7	4,73	2,48	3,60	3,11
8	4,73	3,21	3,70	2,37
9	3,45	4,41	3,08	2,38
10	3,45	4,65	3,36	3,47
11	4,68	4,31	3,99	3,32
12	4,04	3,25	3,24	2,96
13	4,04	4,21	3,21	3,60
14	2,73	4,20	4,10	3,03
15	4,08	4,74	2,35	2,14
16	2,19	4,74	3,91	4,04
Promedio	3,86	3,95	3,24	3,54
Desviación estándar	0,83	0,74	0,54	0,98
Coefficiente variación	21,4%	18,7%	16,6%	27,7%
Máximo	4,73	4,74	4,10	5,81

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

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 para todas las coronas evaluadas.

A pesar de que no se había establecido como premisas para la aceptación de las coronas otros parámetros distintos a la resistencia promedio, desviación estándar y espesor de la corona, se decide realizar un análisis adicional y determinar si estas propiedades estudiadas tienen una influencia directa

Informe EIC-Lanamme-INF-0676-2023	Enero de 2023	Página 28 de 44
-----------------------------------	---------------	-----------------



en los resultados obtenidos de los especímenes ensayados. Los resultados de estos valores se muestran en la Tabla 19 y la Tabla 20. Posteriormente, se procede a realizar un análisis de variancias (ANOVA) para determinar la influencia del espesor de la corona, la densidad de compactación, la humedad de moldeo y la humedad durante la falla de los especímenes, en los resultados de resistencia obtenidos.

Tabla 19 Resultados de densidades de especímenes de BE

N° Espécimen	DENSIDAD (kg/m ³)			
	Corona #12 1:1:0,45	Corona #17 0:1:0,50	Corona #18 1:02:0.5	Corona #19 1:02:0.45
1	1924,7	1912,6	1893,6	1915,4
2	1926,6	1924,7	1910,8	1920,0
3	1915,4	1939,1	1901,6	1928,5
4	1903,8	1934,8	1903,4	1916,5
5	1877,0	1899,1	1893,3	1914,6
6	1880,0	1921,6	1897,6	1914,9
7	1889,4	1927,7	1893,8	1909,3
8	1907,0	1925,7	1906,7	1912,5
9	1877,1	1884,8	1881,4	1924,6
10	1889,5	1909,6	1877,4	1920,4
11	1905,4	1912,8	1890,1	1928,6
12	1882,2	1891,0	1893,0	1923,2
13	1922,0	1866,9	1905,8	1928,1
14	1926,3	1895,2	1909,1	1908,2
15	1931,1	1902,0	1902,6	1910,8
16	1916,7	1919,4	1898,4	1927,6
17				
18				
Promedio	1904,6	1910,4	1897,4	1919,0
Desviación estándar	19,5	19,6	9,41	7,14
Coefficiente variación	1,03%	1,02%	0,50%	0,37%



Tabla 20 Resultados de humedades de especímenes de BE

N° Espécimen	HUMEDAD MOLDEO (%)					HUMEDAD FALLA (%)				
	Especímenes sin coronar	Corona #12 1:1:0,45	Corona #17 0:1:0,50	Corona #18 1:02:0,5	Corona #19 1:02:0,45	Especímenes sin coronar	Corona #12 1:1:0,45	Corona #17 0:1:0,50	Corona #18 1:02:0,5	Corona #19 1:02:0,45
1	12,0	12,4	12,4	12,1	12,1	12,5	11,9	12,4	11,9	11,8
2	12,0	12,3	12,1	12,1	12,1	13,5	12,9	12,4	12,2	11,5
3	12,0	12,2	12,3	12,1	12,1	12,5	13,1	12,1	11,9	12,0
4	12,1	12,2	12,2	12,0	12,2	12,6	12,9	12,7	12,1	11,8
5	12,1	12,0	12,1	12,1	12,2	12,6	12,4	12,6	12,1	11,9
6	12,1	12,2	12,3	12,2	12,1	12,8	13,0	12,8	12,2	12,1
7	12,1	12,2	12,2	12,2	12,1	12,7	12,7	12,4	12,2	12,1
8	12,2	12,2	12,2	12,2	12,1	12,5	12,7	12,4	12,5	11,9
9	12,2	12,1	12,1	12,1	12,1	12,9	12,6	12,1	11,9	12,1
10	12,2	12,0	12,2	12,1	12,1	12,4	12,9	12,3	12,2	12,3
11	12,2	12,3	12,4	12,1	12,1	12,2	12,9	12,3	12,5	12,1
12	12,1	12,1	12,2	12,1	12,2	12,2	13,1	12,6	12,4	12,3
13	12,1	12,1	12,4	12,1	12,6	12,2	12,4	12,3	11,9	12,2
14	12,2	12,2	12,2	12,0	12,1	12,5	12,3	12,9	12,0	12,0
15	12,2	12,2	12,2	12,1	12,1	12,2	12,5	12,5	12,2	11,8
16	12,2	12,1	12,2	12,2	12,1	12,8	12,9	12,2	11,9	12,4
17	12,1					12,6				
18	12,3					12,7				
Promedio	12,1	12,2	12,2	12,1	12,1	12,6	12,7	12,4	12,1	12,0
Desviación estándar	0,09	0,11	0,09	0,05	0,11	0,31	0,33	0,24	0,22	0,23
Coefficiente variación	0,78%	0,90%	0,74%	0,38%	0,94%	2,48%	2,64%	1,91%	1,80%	1,89%

Como puede observarse, los valores de densidad alcanzados por todos los especímenes de BE son similares entre sí, donde la menor variación de los resultados se presenta para la corona #19 que para el resto de los especímenes. Con respecto a las humedades de moldeo y falla, igualmente los valores son similares entre sí y la menor variabilidad se presenta para la corona #18.

Al realizar el análisis de varianza para determinar si la resistencia resultante de los especímenes coronados con las mezclas de las coronas #12, #17, #18 y #19 depende de alguno de los factores mostrados en la y la Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20 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 mostrado en las Tablas 21 a la 24.

Tabla 21 ANOVA: Resistencia vrs parámetros de corona y material – especímenes corona #12

Parámetro	Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	Análisis de varianza						
						Origen	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Resistencia	RC	16	51,01	3,1879	0,0977							
Espesor	E	16	61,7	3,85625	0,6842	Entre grupos	3,5733	1	3,5733	9,1400	0,0051	4,1709
						Dentro grupos	11,73	30	0,3910			
Densidad	D	16	30474	1905	381,7	Entre grupos	28924196	1	28924196	151517	4,0590E-57	4,1709
						Dentro grupos	5727	30	190,8976			
Humedad moldeo	HM	16	193,6	12,10	0,0021	Entre grupos	635,7	1	635,7	12733	5,3448E-41	4,1709
						Dentro grupos	1,4978	30	0,0499			
Humedad falla	HF	16	194,2	12,14	0,0479	Entre grupos	640,5	1	640,5	8798	1,3473E-38	4,1709
						Dentro grupos	2,1839	30	0,0728			



Tabla 22 ANOVA: Resistencia vrs parámetros de corona y material – especímenes corona #17

Parámetro	Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	Análisis de varianza						
						Origen	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Resistencia	RC	16	49,82	3,1139	0,0634							
Espesor	E	16	63,25	3,953125	0,5471	Entre grupos	5,6344	1	5,6344	18,4583	0,0002	4,1709
						Dentro grupos	9,1574	30	0,3052			
Densidad	D	16	30567	1910	382,2	Entre grupos	29102978	1	29102978	152257	3,7728E-57	4,1709
						Dentro grupos	5734	30	191,1434			
Humedad moldeo	HM	16	194,3	12,14	0,0131	Entre grupos	652,1	1	652,1	17060	6,6984E-43	4,1709
						Dentro grupos	1,1468	30	0,0382			
Humedad falla	HF	16	192,3	12,02	0,0518	Entre grupos	634,3	1	634,3	11009	4,7105E-40	4,1709
						Dentro grupos	1,7283	30	0,0576			

Tabla 23 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
Resistencia	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	4,1709
						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 24 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
Resistencia	RC	16	53,51	3,3446	0,0921							
Espesor	E	16	30703	1919	51,0	Entre grupos	0,3113	1	0,3113	0,5915	0,4479	4,1709
						Dentro grupos	15,7887	30	0,5263			
Densidad	D	16	30567	1910	382,2	Entre grupos	29356628	1	29356628	1148239	2,6057E-70	4,1709
						Dentro grupos	767	30	25,5667			
Humedad moldeo	HM	16	195,1	12,20	0,0034	Entre grupos	652,1	1	652,1	17060	6,6984E-43	4,1709
						Dentro grupos	1,1468	30	0,0382			
Humedad falla	HF	16	197,8	12,36	0,2945	Entre grupos	650,3	1	650,3	3364	2,2764E-32	4,1709
						Dentro grupos	5,7988	30	0,1933			

Como puede observarse, únicamente el parámetro de espesor de las coronas #18 y #19 (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 las coronas cumple con lo establecido por la norma INTE C16 (ASTM C617) para las premisas de aceptación, así como los espesores de la corona.

Adicionalmente, se generaron gráficos para verificar si existe alguna tendencia de los resultados de la resistencia a la compresión con respecto a los mismos parámetros evaluados en los análisis de ANOVA realizados anteriormente. Los resultados se muestran en las Figuras 4 a la 7.

Figura 4

Comportamiento de la resistencia de los especímenes respecto al espesor de la corona

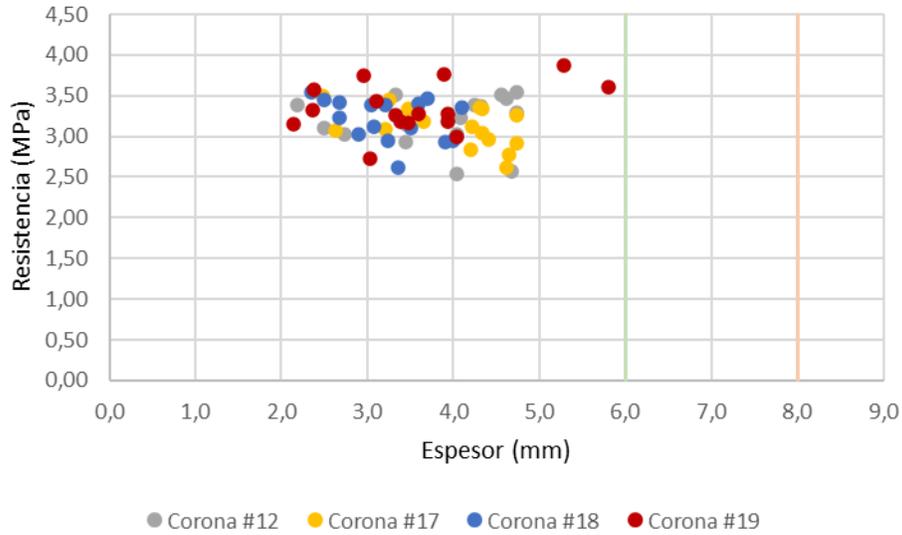


Figura 5

Comportamiento de la resistencia de los especímenes respecto a su densidad

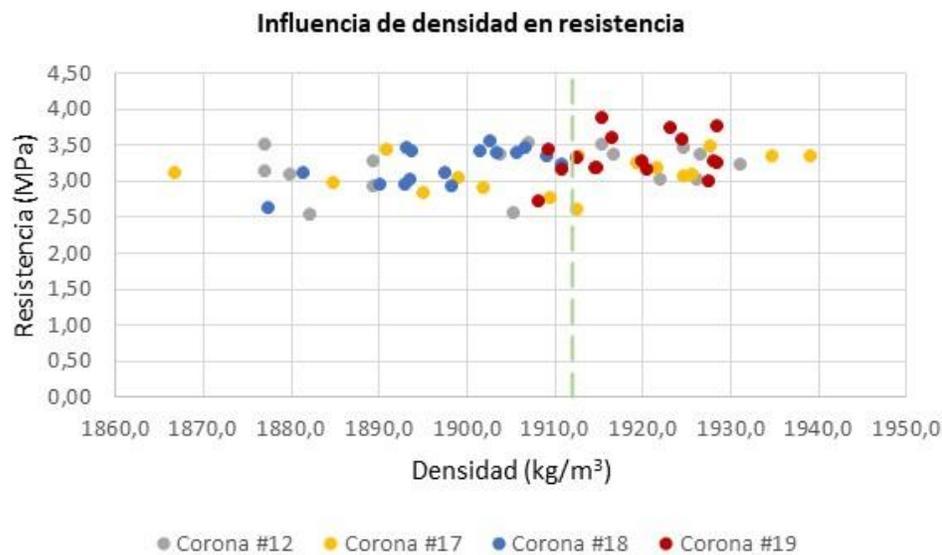


Figura 6

Comportamiento de la resistencia de los especímenes respecto a la humedad de moldeo

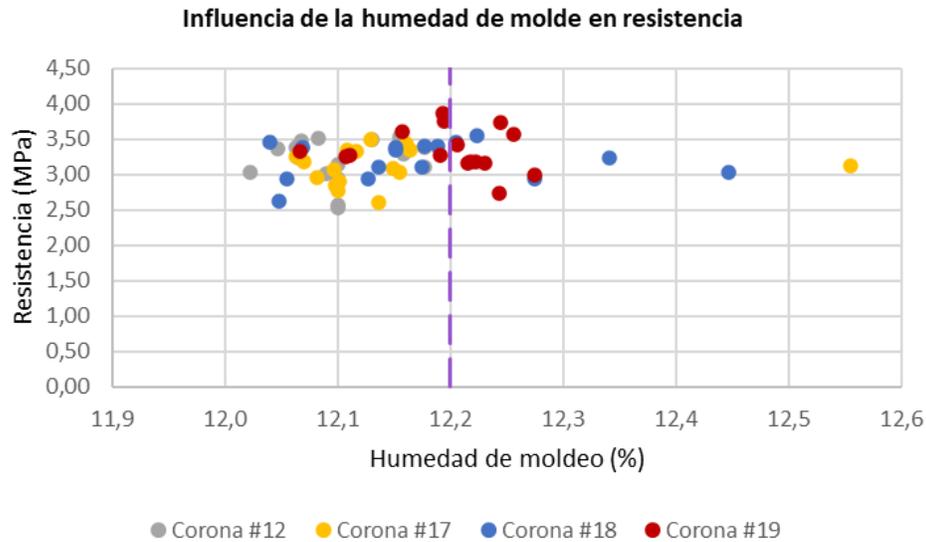
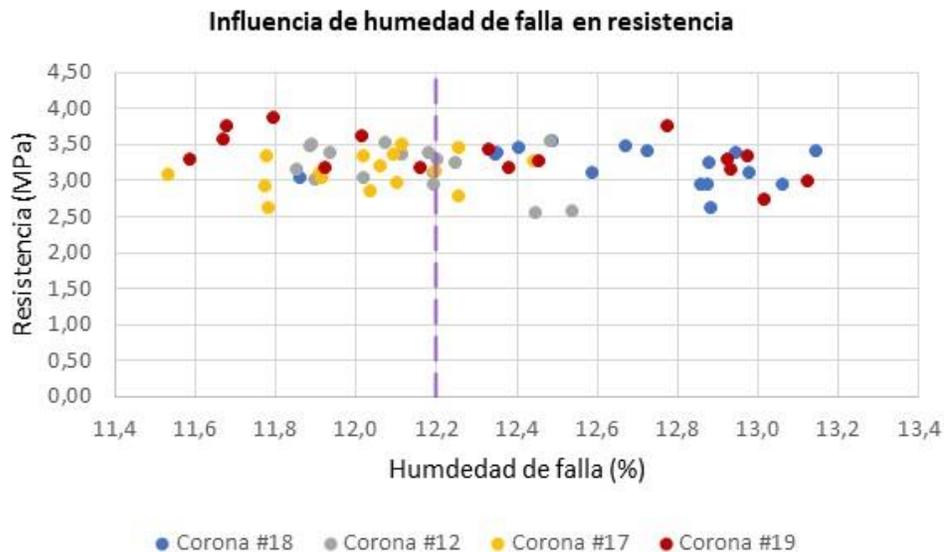


Figura 7

Comportamiento de la resistencia de los especímenes respecto a la humedad de falla





Como puede observarse, en ninguno de los gráficos se puede determinar una clara tendencia a que exista algún tipo de relación entre la resistencia y los parámetros mencionados, ya que la dispersión de los resultados es tal que no es posible establecerla.

Sin embargo, en la Figura 4 se puede observar que el espesor de la corona #19 fue el que presentó un mayor rango de variación que el resto, en el que se esperaba un comportamiento inverso ya que estos especímenes fueron los últimos en ser trabajados y era de esperar que el técnico que realiza el trabajo de coronar dominase aún más la técnica que cuando se moldearon las coronas de los primeros especímenes. Este aspecto es importante contemplarlo en los procesos de capacitación y refrescamiento de los conceptos del coronamiento a lo interno en los laboratorios.

A pesar de lo comentado anteriormente, se puede observar como el espesor cumple con lo establecido como parámetros de cumplimiento del coronamiento, pues los valores se encuentran a la izquierda de los valores límite establecidos, representados por la línea color verde para el espesor promedio y la línea color naranja para el espesor máximo.

Otro comportamiento que es posible observar en la

Figura 5, es que la densidad alcanzada por la mayoría de los especímenes se encuentra cercana a la densidad seca del diseño de la mezcla de la base estabilizada, pues los resultados están localizados cercanos y no muy dispersos de la línea verde que representa la densidad de diseño. Específicamente, en el caso de la densidad de los especímenes de la corona #19 se muestra la menor variabilidad e incluso los valores de la misma se encuentran por encima del valor de densidad objetivo. Mientras que la densidad de los especímenes de la corona #17 muestran la mayor variabilidad, contando con los valores máximo y mínimo, dentro de su rango de variación, que representan el 98% y el 101% de la densidad seca de diseño y considerados aceptables como parte del moldeo de especímenes. La densidad de los demás especímenes muestra una variabilidad similar e igualmente aceptable.

Con respecto a las humedades de moldeo y falla, mostradas en la Figura 6 y Figura 7, se puede observar cómo los especímenes contaron con humedades cercanas a la óptima (líneas punteadas color púrpura) y su dispersión no influye significativamente sobre los resultados de resistencia. De ambos gráficos se desprende que la dispersión de los resultados es mayor para las humedades de falla (rango de variación entre 95% a 108%) que las humedades de moldeo (rango de variación entre 99% a 103%). Este comportamiento es de esperar pues al momento del moldeo existe un mayor control de las condiciones en las operaciones que se realizan, mientras que en las operaciones de falla no. Aún esta condición de dispersión en los resultados de humedad del espécimen durante la falla, por los resultados de



resistencia y sumando los resultados obtenidos por el ANOVA, este parámetro no afecta significativamente los valores de resistencia a la compresión de los especímenes, sustentado incluso por el cumplimiento de las premisas de aceptación de la corona en cuanto a esta propiedad.



4 Conclusiones

Por lo tanto, con los resultados obtenidos, es posible determinar tres 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 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 emparea hasta dar el acabado liso al espécimen.
2. Que se pueden contar con diseños de mezcla de coronas que cumplen 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 y se obtengan resultados de la resistencia requerida por el diseño de mezcla de la base estabilizada, sin que se vean afectados significativamente por factores medulares que definen a los especímenes de la base estabilizada como lo son: la densidad de compactación, la humedad de moldeo y la humedad de falla.
3. Que los parámetros evaluados en esta investigación de espesor de la corona, densidad del espécimen, humedad durante el moldeo y humedad durante la falla, no afectan significativamente los resultados de resistencia a la compresión de las bases estabilizadas.



5 Recomendaciones

Dado que el alcance de esta investigación contempla el estudio de coronamientos en especímenes de base estabilizada que cumplan con lo estipulado por el “CR-2020: Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes”, la resistencia de las coronas fue limitada, por lo que se recomienda realizar un estudio adicional utilizando especímenes de bases estabilizadas que posean una resistencias superior a lo indicado en dicho manual para verificar si es posible obtener diseños de mezcla de coronamientos adecuados y que logren el desempeño establecido por la normativa.

Además, se recomienda que cada laboratorio haga su propio estudio de diseño de mezclas para coronamiento siguiendo la guía del apéndice de esta investigación, para encontrar su propio material de coronamiento, con las características de materia prima con que cuenten en sus instalaciones.



6 Referencias Bibliográficas

- [1] AASHTO T 89. *Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils*. Washington D.C., Estados Unidos, 2022.
- [2] AASHTO T90. *Standard Method of Test for Determining the Plastic Limit and Plasticity Index of Soils*. Washington D.C., Estados Unidos, 2022.
- [3] AASHTO T134 “Standard Method of Test for Moisture–Density Relations of Soil–Cement Mixtures”. Washington D.C., Estados Unidos, 2022.
- [4] AASHTO T180 “Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 4.54-kg (10-lb) Rammer and a 457-mm (18-in.) Drop”. Washington D.C., Estados Unidos, 2022.
- [5] ASTM C109 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)”. West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2021.
- [6] ASTM C117 “Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing”. West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2017.
- [7] ASTM C136 “Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates”. West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2019.
- [8] ASTM C617 “Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens”, West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2015.
- [9] ASTM D558 “Standard Test Methods for Moisture-Density (Unit Weight) Relations of Soil-Cement Mixtures”. West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2019.
- [10] ASTM D1632 “Standard Practice for Making and Curing Soil-Cement Compression and Flexure Test Specimens in the Laboratory”. West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2017.
- [11] ASTM D1633 “Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders”. West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2017.
- [12] INTE C16 “Coronamiento de especímenes cilíndricos de concreto. Práctica normalizada”. San José, Costa Rica, 2017.
- [13] INTE C46 “Análisis granulométrico en tamices de agregado fino y grueso. Método de ensayo”. San José, Costa Rica, 2020.
- [14] INTE C49 “Determinación por lavado del material que pasa por el tamiz 75 μ m (N° 200) en



agregados minerales. Método de ensayo". San José, Costa Rica, 2018.

[15] INTE C57 "Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico. Usando especímenes cúbicos de 50 mm (2 pulgadas). Método de ensayo". San José, Costa Rica, 2022.

[16] Ministerio de Obras Públicas y Transportes. "CR-2020: Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes". San José, Costa Rica, 2021.

[17] 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". Petroria, Sudáfrica, 2015.



7 APÉNDICE

PROCEDIMIENTO PARA LA PREPARACIÓN DE LOS ESPECÍMENES PARA EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

1. Alcance

Este procedimiento describe la manera de realizar la preparación de la superficie de los especímenes de base estabilizada para que cumplan el requisito de planicidad que indica la norma ASTM D1632.

2. Equipo

2.1 Platos para coronamiento

Deben ser platos de metal de al menos 11 mm de espesor, o platos pulidos de granito o diabasa de al menos 76 mm de espesor. En todos los casos, los platos deben ser de al menos 25 mm más grandes en diámetro que el resto de los especímenes de ensayo y las superficies de trabajo no se deben desviar del plano por más de 0,05 mm. La rugosidad de la superficie de platos metálicos recién acabados no debe exceder la propuesta en la Tabla 4 de American National Standard B46.1, o 3,2 μm para cualquier tipo de superficie y dirección de capa. La superficie, cuando está nueva, debe estar libre de agujeros, surcos y hendiduras más allá de aquellas causadas por la operación de acabado. Los platos metálicos que han estado en uso deben estar libres de agujeros, surcos y hendiduras más profundas que 0,25 mm o con área superficial mayor a 32 mm².

2.2 Dispositivos de alineación

Se deben utilizar dispositivos de alineamiento adecuados, como barras guías o niveles, junto con platos para coronamiento, para que la perpendicularidad de la corona no se desvíe respecto al eje del espécimen cilíndrico por más de 0,5° (Nota 1). Se aplica el mismo requisito a la relación entre ejes del dispositivo de alineación y la superficie del plato para coronar cuando se utilizan barras guías. Además, la ubicación de cada barra con respecto a su plato debe ser tal que ninguna corona esté descentrada con el espécimen de ensayo por más de 2 mm.

Nota 2. Una desviación de la perpendicularidad de 0.5° es igual a una pendiente de aproximadamente 1 mm en 100 mm.



2.3 Regla, escuadra y galgas calibradas

Se debe utilizar una regla con bordes rectos o una escuadra igualmente con bordes rectos como parte del equipo para verificar planicidad. Adicionalmente, se requiere de galgas calibradas tipo paso-no paso de un espesor de 0.05 mm.

3. Materiales para coronar

3.1 Cemento

El cemento debe ser del tipo de alta resistencia temprana (AR) según la norma INTE C147.

3.2 Yeso

El Yeso debe ser de alta pureza.

3.3 Corona

3.3.1 La resistencia de las coronas y el espesor del coronamiento deben cumplir con los requisitos indicados en la tabla 1.

Tabla 1 Resistencia a la compresión y espesor máximo de los materiales para coronar

Resistencia a la compresión de base estabilizada (MPa)*	Resistencia a la compresión mínima del material para coronar (MPa)	Máximo espesor promedio de la corona (mm)	Máximo espesor individual de la corona (mm)
2,1 a 3,9	4	6	8

(*) Si la base estabilizada cuenta con una resistencia mayor que la especificada, la resistencia a la compresión mínima de la corona debe ser al menos la resistencia de la base estabilizada

3.3.2 Para utilizar un diseño de mezcla para las coronas se deben realizar pruebas de calificación, que se deben documentar para demostrar lo siguiente:

- La resistencia promedio de 15 especímenes de base estabilizada coronados con el material, no es menor que el 98 % de la resistencia promedio del conjunto de 15 cilindros especímenes de base estabilizada que cumplan con el requisito de planicidad de 0,05 mm
- La desviación típica de las resistencias de los especímenes coronados no es mayor que 1,57 veces la desviación típica de los especímenes son coronar
- Se cumplen los requisitos del espesor de los coronamientos
- Los resultados de resistencia a compresión de cubos de 50 mm del diseño de mezcla (cemento y yeso en conjunto con la relación agua-material cementante) que se va a utilizar para coronar, ensayados con la norma INTE C57



3.3.3 Las pruebas de calificación para demostrar la resistencia del material para coronar se deben realizar si se cuenta con un lote nuevo de alguno de los materiales, cuando existen cambios en la relación agua-material cementante y a intervalos no mayores que tres meses. Si en un lote, el material para coronar falla en el cumplimiento de los requisitos de resistencia, no se debe utilizar y se deben realizar ensayos semanales del material de sustitución hasta que cuatro determinaciones consecutivas cumplan los requisitos (ver nota 1)

Nota 1. El yeso de baja pureza, yeso parís, o la mezcla de yeso parís con cemento no es un material apropiado para la corona

3.3.4 Se pueden utilizar retardadores para extender el tiempo de trabajo el material de la corona, sin embargo, se deben determinar sus efectos en la relación agua-cemento requerida y la resistencia (ver nota 2) para lo cual se deben ejecutar las pruebas de calificación respectivas

Nota 2. La relación de agua-cemento con yeso puede encontrarse entre 0,45 y 0,50. El uso de relaciones agua- cemento cercanas a las indicadas y mezclas vigorosas usualmente permitirán desarrollar la resistencia requerida de 4 h a 5 h. Relaciones altas de agua-cemento con yeso extienden el tiempo de trabajo, pero reducen la resistencia.

3.4 Se debe mezclar la pasta de cemento con yeso a la relación de agua-cemento deseada y utilizarla prontamente.

4. Preparación de la superficie del espécimen para el ensayo

4.1 La superficie de los extremos de los especímenes de base estabilizada que van a ser sometidos al ensayo de resistencia a la compresión debe cumplir con el requisito de planicidad establecido en la norma ASTM D1632. Para ello durante el proceso de moldeo se debe procurar proporcionar una superficie tal que permita cumplir dicho requisito (ver nota 3).

Nota 3. Se pueden tomar consideraciones al momento de proporcionar el acabado final del espécimen cuando se esté finalizado el proceso de moldeo, tales como colocar encima de la superficie enrasada material pasando el tamiz #4 y el tamiz #10 del material sobrante del enrase del espécimen (material que contiene agregado para la base, cemento y agua), y concluir con el acabado final utilizando la barra enrasadora.

4.2 Una vez que el espécimen cumple el proceso de curado, indicado en la norma ASTM D1632 (ver nota 4) y el período de sumergencia establecido en la norma ASTM D1633 (ver nota 5), se deben revisar las superficies de ambos extremos del espécimen. Si se cumple con el requisito de planicidad dentro de los 0,05 mm, el espécimen puede ser fallado



Nota 4. El proceso de curado consiste en un curado inicial de 12 horas con los especímenes dentro del molde y colocados en la cámara húmeda. Posteriormente, se desmoldan los especímenes y se colocan en la cámara húmeda a una temperatura de $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ y una humedad relativa mayor que 95%, hasta la edad estipulada para la falla.

Nota 5. El proceso de sumergencia se define como 4 horas antes de realizar el ensayo de compresión y los especímenes se deben sumergir hasta el momento de preparar al espécimen para realizar el proceso de coronamiento, si se requiere.

- 4.3 En caso de que se requiera realizar el coronamiento del espécimen, y una vez extraído de la sumergencia, se debe eliminar el agua libre y supernatante de la parte superior del espécimen inmediatamente antes de coronar.
- 4.4 Se debe formar el coronamiento colocando una pila cónica de pasta sobre el espécimen y luego en forma suave presionar un plato para coronar recién aceitado sobre la pila cónica hasta que el plato toque el borde del molde. Alternativamente, se puede realizar el coronamiento colocando la pila cónica sobre el plato y colocar el espécimen sobre ella.
- 4.5 Se puede requerir un movimiento torsional suave para eliminar el exceso de pasta y minimizar los vacíos de aire en la pasta.
- 4.6 Si el plato para coronar se coloca encima del espécimen, este no se debe balancear durante esta operación.
- 4.7 Después del endurecimiento de la corona, se remueve el plato para coronar o, en la forma alternativa, el espécimen con cuidado de no perder el material del coronamiento.
- 4.8 Se debe revisar nuevamente el cumplimiento con el requisito de planicidad descrito en el apartado 4.1.

5. Protección de especímenes después de coronar

- 5.1 Se debe mantener los especímenes en una condición húmeda entre la finalización del coronamiento y el tiempo de ensayo, envolviéndolos con una doble capa de arpillera húmeda o con doble capa de papel film. No almacenar los especímenes con coronamientos de cemento con yeso inmersos en agua o por más de 5 h en una cámara de humedad. Proteger los coronamientos de yeso del goteo de agua.
- 5.2 No ensayar especímenes de ensayo coronados antes que el material para coronar haya tenido el tiempo suficiente para desarrollar la resistencia requerida en el apartado 3.3.1.



6. Verificación diaria

- 6.1 Se debe verificar la planicidad de los coronamientos cada día antes de los ensayos a compresión en al menos tres especímenes, seleccionados en forma aleatoria, y que representen el inicio, medio y final de la operación de coronamiento. Verificar la planicidad con una galga calibrada de extremo recto, realizando un mínimo de tres medidas en diferentes sentidos diametrales para asegurar que la superficie del coronamiento no se desvíe del plano por más de 0,05 mm y revisar si existen áreas huecas. Se deben registrar los resultados de estas determinaciones en la documentación del control de calidad del laboratorio.
- 6.2 Si los coronamientos fallan en satisfacer los requisitos de planicidad o tienen áreas huecas, se deben remover y volver a elaborarlos.
- 6.3 Después de la operación diaria de ensayar la resistencia a compresión, se debe verificar el espesor de los coronamientos en al menos tres especímenes seleccionados al azar, desde el inicio, medio y final del día de operación. Después de finalizar el ensayo de compresión, recolectar al menos seis piezas del material para coronar de la superficie del espécimen seleccionado (ver nota 16). Las piezas se deben seleccionar al azar y se deben distribuir en el área entera del coronamiento. Las piezas seleccionadas se deben desligar de la base estabilizada por completo. Se debe medir y registrar el espesor de las piezas lo más cercano a 0,1 mm usando un micrómetro, calibrador u otro dispositivo para medir el espesor. Comparar el espesor promedio y el máximo con los valores de la Tabla 1. Se debe registrar los resultados de las determinaciones de espesor en la documentación de control de calidad del laboratorio.