

Diseño y análisis de bases estabilizadas con cementos tipo UG (uso general) y MCH (moderado calor de hidratación)

César Duvan Ortiz Amaya
Paula Katalina Díaz Zambrano

Universidad Santo Tomás
Facultad de ingeniería civil
Bogotá, D.C.

2019

Diseño y análisis de bases estabilizadas con cementos tipo UG (uso general) y MCH (moderado calor de hidratación)

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

César Duvan Ortiz Amaya

Paula Katalina Díaz Zambrano

Director:

Juan Miguel Sánchez Durán
Ingeniero Civil, MSc

Universidad Santo Tomás

Facultad de ingeniería civil

Bogotá, D.C.

2019

Director
Ing. Juan Miguel Sánchez Durán

Par
Ing. Elkin Gerardo Ávila Castro

Estudiante
Cesar Duvan Ortiz Amaya

Estudiante
Paula Katalina Díaz Zambrano

Dedicatoria

Agradecimientos

Resumen

En este proyecto de grado se diseñan y analizan dos tipos de bases granulares tratadas con cemento de uso general (tipo UG) y de moderado calor de hidratación (tipo MCH). Por consiguiente, entre los ensayos realizados se encuentran: caracterización de material granular (dureza, durabilidad, limpieza, geometría y resistencia), análisis granulométrico, compactación Proctor, compresión inconfiada y trabajabilidad, todo esto bajo las normas de ensayo de materiales para carreteras del INVIAE sección 100, 200 y 600 junto con las especificaciones generales señaladas en el capítulo 3 de la misma entidad. Esto surge a raíz de que en el mercado colombiano ya se encuentra cemento tipo MCH especialmente diseñados para el mejoramiento y estabilización de suelos que garantizan un desempeño superior al cemento de uso general establecido por la norma vigente.

Palabras clave: Base tratada con cemento, cemento de uso general, cemento de moderado calor de hidratación.

Abstract

In this graded project, two types of granular bases treated with general-purpose cement (type UG) and moderate heat of hydration (type MCH) are designed and analyzed. Therefore among the tests carried out are granular material characterization (hardness, durability, cleanliness, geometry, and resistance), granulometric analysis, proctor compaction, unconfined compression, and workability, all this under the INVIAS road materials test standards section 100, 200 and 600 along with the general specifications indicated in chapter 3 of the same entity. This arises because of the fact that in the Colombian market there is already cement type MCH specially designed for the improvement and stabilization of soils that guarantees a superior performance, in comparison to the cement of general use established by the current norm.

Key words: Base treated with cement, general-purpose cement, moderate heat hydration cement.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
2. Formulación del problema	3
3. Justificación	4
4. Objetivos	5
4.1. General	5
4.2. Específicos	5
5. Marco Referencial	6
4.1. Científico	6
4.2. Teórico	11
4.3. Conceptual	14
4.4. Histórico (Estado del Arte)	18
4.5. Normatividad aplicable	22
5. Metodología	23
6. Resultados y Análisis	25
6.1. Caracterización del material granular	25
6.1.1. Localización	25
6.1.2. Ensayos	26
6.1.2.1. Análisis granulométrico	26
6.1.2.2. Dureza	30
6.1.2.3. Durabilidad	32
6.1.2.4. Limpieza	32
6.1.2.5. Geometría	34
6.1.2.6. Resistencia	34
6.2. Diseño de la mezcla	38
6.2.1. Ensayo Proctor	39
6.2.1.1. Ensayo Proctor sin cemento	39
6.2.1.2. Ensayo Proctor con cemento	40
6.2.1.2.1. Ensayo Proctor con cemento de uso general o UG	40
6.2.1.2.2. Ensayo Proctor con cemento de moderado calor de hidratación o MCH	42

6.2.2.	Resistencia a la compresión	43
6.2.2.1.	Resistencia con cemento de uso general o UG	45
6.2.2.2.	Resistencia con cemento de moderado calor de hidratación o MCH.	48
6.3.	Trabajabilidad	50
6.3.1.	Ensayo de trabajabilidad con cemento de uso general o UG	51
6.3.2.	Ensayo de trabajabilidad con cemento de moderado calor de hidratación o MCH	53
7.	Conclusiones	55
8.	Bibliografía	58
9.	Anexos	60

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Curvas de esfuerzo-deformación en función del tiempo del suelo-cemento. Fuente: Soil stabilization: principles and practice, por Ingles O. G., Metcalf J. B., Sidney, 1972.....	13
Ilustración 2. Cantera de explotación de materiales pétreos El Pencal. Fuente: Ingenieros GF S.A.S., 2019.	26
Ilustración 3. Inmersión y lectura del dial de las probetas para CBR. Fuente: Propia	36
Ilustración 4. Inmersión de probetas para ensayo de resistencia a la compresión. Fuente: Propia	44
Ilustración 5. Capinado de probetas con azufre. Fuente: Propia.....	45
Ilustración 6. Ensayo de trabajabilidad para BTC-25 con 4% de cemento tipo UG marca Argos. Fuente: Propia.	51

Lista de tablas

Tabla 1. Requisitos típicos de cemento para varios tipos de suelo. Fuente: Report on Soil Cement. Reported by American Concrete Institute (ACI) Committe 230, 2009.....	11
Tabla 2. Requisitos granulométricos del agregado para base tratada con cemento. Especificación técnica INVIAS, capítulo 3 artículo 351. Fuente: (INVIAS, 2013, p. 3).	26
Tabla 3. Resultados de los ensayos de laboratorio de dureza en el material obtenido de la cantera El Pencal. Fuente: Elaboración propia.....	31
Tabla 4. Resultado del ensayo de laboratorio de solidez en sulfato de magnesio en el material obtenido de la cantera El Pencal. Fuente: Elaboración propia.....	32
Tabla 5. Resultados de los ensayos de laboratorio de limpieza en el material obtenido de la cantera El Pencal. Fuente: Elaboración propia.	33
Tabla 6. Requisitos de los agregados para base tratada con cemento. Especificación técnica INVIAS, capítulo 3 artículo 351. Fuente: (INVIAS, 2013, p. 2).....	33
Tabla 7. Resultados de los ensayos de laboratorio de geometría en el material obtenido de la cantera El Pencal. Fuente: Elaboración propia.	34
Tabla 8. Datos de CBR a 0.1 y 0.2 pulgadas, densidad seca y grado de compactación para cada probeta. Fuente: Elaboración propia.	37
Tabla 9. Procedimiento de la preparación de probetas en mezclas de base tratada con cemento. Fuente: (INVIAS, 2013, p. 2).	38
Tabla 10. Criterios de diseño para la mezcla de base tratada con cemento. Fuente: (INVIAS, 2013, p. 2).	44
Tabla 11. Resumen de datos de cada espécimen para la base BTC25 con cemento de tipo UG. Fuente: Elaboración propia.	46
Tabla 12. Resumen de datos de cada espécimen para la base BTC38 con cemento de tipo UG. Fuente: Elaboración propia.	47
Tabla 13. Resumen de datos de cada espécimen para la base BTC25 con cemento de tipo MCH. Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 14. Resumen de datos de cada espécimen para la base BTC38 con cemento de tipo MCH. Fuente: Elaboración propia.	49

Lista de Gráficos

Gráfico 1. Curva granulométrica del material a utilizar obtenido de la Cantera El Pencal. Fuente: Elaboración propia.	27
Gráfico 2. Límites granulométricos para base tratada con cemento según la especificación técnica INVIAS, capítulo 3 artículo 351. Fuente: Elaboración propia.	28
Gráfico 3. Curva granulométrica del material BTC-38 diseñada en laboratorio con el material obtenido de la Cantera El Pencal. Fuente: Elaboración propia.	29
Gráfico 4. Curva granulométrica del material BTC-25 diseñada en laboratorio con el material obtenido de la Cantera El Pencal. Fuente: Elaboración propia.	30
Gráfico 5. Curva del ensayo modificado de compactación para la determinación de la humedad óptima y densidad seca máxima. Fuente: Elaboración propia.	35
Gráfico 6. Curvas esfuerzo vs deformación para las probetas compactadas con 10, 25 y 56 golpes. Fuente: Elaboración propia.	36
Gráfico 7. Grado de compactación vs CBR a 0.1 pulgadas. Fuente: Elaboración propia.	37
Gráfico 8. Curva de compactación para BTC-25 sin cemento. Fuente: Elaboración propia.	39
Gráfico 9. Curva de compactación para BTC-38 sin cemento. Fuente: Elaboración propia.	40
Gráfico 10. Curva de compactación para BTC-25 con 4% de cemento tipo UG marca Argos. Fuente: Elaboración propia.	41
Gráfico 11. Curva de compactación para BTC-38 con 4% de cemento tipo UG marca Argos. Fuente: Elaboración propia.	41
Gráfico 12. Curva de compactación para BTC-25 con 4% de cemento tipo MCH marca Argos. Fuente: Elaboración propia.	42
Gráfico 13. Curva de compactación para BTC-38 con 4% de cemento tipo MCH marca Argos. Fuente: Elaboración propia.	43
Gráfico 14. Resistencia a la compresión vs contenido de cemento de la base BTC25 con cemento UG. Fuente: Elaboración propia.	46
Gráfico 15. Resistencia a la compresión vs contenido de cemento de la base BTC38 con cemento UG. Fuente: Elaboración propia.	47
Gráfico 16. Curva de Proctor de la base BTC38 con cemento UG con 5% de cemento UG. Fuente: Elaboración propia.	48
Gráfico 17. Resistencia a la compresión vs contenido de cemento de la base BTC25 con cemento MCH. Fuente: Elaboración propia.	49
Gráfico 18. Resistencia a la compresión vs contenido de cemento de la base BTC38 con cemento MCH. Fuente: Elaboración propia.	50
Gráfico 19. Curva de trabajabilidad para BTC-25 con 4% de cemento tipo UG marca Argos. Fuente: Elaboración propia.	52
Gráfico 20. Curva de trabajabilidad para BTC-38 con 5% de cemento tipo UG marca Argos. Fuente: Elaboración propia.	52

Gráfico 21. Curva de trabajabilidad para BTC-25 con 4% de cemento tipo MCH marca Argos. Fuente: Elaboración propia.	53
Gráfico 22. Curva de trabajabilidad para BTC-38 con 4% de cemento tipo MCH marca Argos. Fuente: Elaboración propia.	54

1. Introducción

Las bases granulares son parte de la estructura común de un pavimento, su estabilización, en este caso con cemento, aporta una mayor resistencia a toda la estructura y también reduce los costos, pues su espesor varía. Las nuevas tecnologías han desarrollado un cemento enfocado especialmente en la estabilización de suelos denominado cemento de Moderado Calor de Hidratación (tipo MCH), que según sus especificaciones genera unas características mejores que al utilizar el cemento de Uso General (tipo UG).

En la actualidad, es fundamental la optimización de recursos en los proyectos de ingeniería civil para garantizar costos más competitivos en el mercado nacional. El tema del proyecto surge en respuesta a las necesidades de la ingeniería, y aunque lo que se hace en este proyecto son ensayos básicos de la profesión, sirven para generar una experiencia académica que permita evaluar y comparar las ventajas o desventajas que proporcionan cada tipo de cemento en el comportamiento físico mecánico y en el desempeño de las bases granulares estabilizadas con cemento.

Este proyecto de grado estudia dos tipos de bases granulares determinadas por la norma INVIAS como BTC-38 y BTC-25, diseñadas con los dos tipos de cemento mencionados anteriormente (MCH y UG); este diseño consiste en la realización de diferentes ensayos, primero de caracterización del material granular (dureza, durabilidad, limpieza, geometría, resistencia y características químicas), una vez se conozca la densidad seca máxima y su respectiva humedad óptima para cada diseño por medio del ensayo Proctor, posteriormente se escoge un porcentaje de cemento que genere el esfuerzo mínimo de 3,5 MPa que solicita la norma a los 7 días de curado de las probetas (Norma INVIAS, Artículo 351-13. Base tratada con cemento, Tabla 351 - 6. Criterios de diseño para la mezcla de base tratada con cemento) y, por último, se evalúa la

trabajabilidad que permite la mezcla; esto quiere decir, que se hacen ensayos Proctor en diferentes intervalos de tiempo para determinar cuál de los tipos de cemento proporciona más tiempo de trabajo sin perder las características que se necesitan en la obra.

2. Formulación del problema

En Colombia la base tratada con cemento está constituida por una mezcla de agregados pétreos, cemento hidráulico tipo UG (de uso general) y agua. Dado que el cemento entra en contacto con el agua se inicia un proceso de fraguado y endurecimiento por esta razón el tiempo disponible para extender, mezclar y compactar la base es limitado.

Los procedimientos constructivos y de control de calidad son elementos fundamentales para garantizar el desempeño óptimo de la base estabilizada. Por esta razón el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) en el capítulo 3 - artículo 351 del año 2013, define la ruta de trabajo exigida en el país para adelantar este tipo de intervenciones. Sin embargo, no se exige un método de ensayo para la determinación del período de trabajabilidad de la mezcla simplificándolo a experiencia y experticia del constructor. Por otro lado, en el mercado colombiano ya se encuentran cementos tipo MCH (de moderado calor de hidratación), especialmente diseñados para el mejoramiento y estabilización de suelos que garantizan un desempeño superior al cemento de uso general establecido por la norma INVIAS.

Por lo antes expuesto, es necesario evaluar las variaciones de las propiedades físico-mecánicas de comportamiento y desempeño de la base estabilizada con cemento tipo MCH contra cemento tipo UG cumpliendo las normas técnicas de construcción y especificaciones de INVIAS actuales, pero a la vez se utilizará como guía la norma española vigente, porque en ella se encuentra un referente para el ensayo del período de trabajabilidad de la mezcla.

3. Justificación

La base de suelo-cemento ya terminada es bastante más rígida que las bases convencionales, lo que le permite mejorar la capacidad estructural del pavimento. En efecto, al aumentar la capacidad portante es posible reducir el espesor requerido de los pavimentos, lo que lleva a disminuir costos.

Es por esto que durante la elaboración de los proyectos de obras se presentará frecuentemente la posibilidad de que, mediante la aplicación de un tratamiento adecuado, logrando cumplir con las normas y especificaciones técnicas, se puedan aprovechar buena parte de los suelos que se encuentran en la zona, que de otra manera serían deficientes por no satisfacer los requerimientos del diseño (Lavallo, 2013). A nivel global, la tendencia de estabilizar suelos con cemento ha mostrado un importante incremento dada la necesidad existente de garantizar una mayor durabilidad de las vías de comunicación que favorecen el desarrollo de las regiones donde se llevan a cabo (HOLCIM, 2016).

Respondiendo a las necesidades de la ingeniería, puesto que esta requiere cada vez más hacer un uso eficiente de los recursos y optimizar los procedimientos constructivos, y también a los avances de la industria que ha desarrollado un cemento especialmente para estabilización de suelos, se quiere brindar la experiencia desde un espacio académico, en el diseño de una base estabilizada con cemento bajo parámetros nacionales e internacionales que permita evaluar y comparar el desempeño de la misma.

4. Objetivos

4.1. General

Diseñar y analizar el comportamiento de dos bases granulares estabilizadas con cementos tipo UG (Uso General) y MCH (Moderado Calor de Hidratación).

4.2. Específicos

4.2.1. Determinar el peso unitario seco y el contenido de agua óptimo con el ensayo Proctor Modificado inicial para cada base granular con un porcentaje teórico de cemento del 4%.

4.2.2. Establecer la dosificación de cemento correcta con el contenido de agua óptimo anterior que permita alcanzar la resistencia a la compresión a los 7 días.

4.2.3. Realizar una corrección de la humedad óptima, teniendo en cuenta la dosificación de cemento verdadera obtenida.

4.2.4. Determinar el período de trabajabilidad de cada mezcla de base estabilizada con cemento.

5. Marco Referencial

4.1. Científico

El suelo-cemento es una mezcla íntima de suelo pulverizado, cemento Portland y agua que, compactada a una humedad óptima y densidad máxima, produce luego de la hidratación del cemento (que se logra protegiéndolo contra la pérdida de humedad durante el período de curado) un material duro, durable y de bajo costo que tiene muchos usos en ingeniería (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Este método de estabilización presenta algunas diferencias para los dos tipos principales de suelos. En los suelos finos (limosos y arcillosos), el cemento en hidratación desarrolla fuertes eslabones entre los agregados minerales y los agregados de suelo para formar una matriz que aglutina efectivamente los últimos. La matriz adopta una estructura de tipo colmena de la cual depende la resistencia de la mezcla, ya que los agregados arcillosos en la matriz tienen poca resistencia y contribuyen en pequeña cantidad a la resistencia del suelo-cemento. La matriz sirve para fijar las partículas de tal manera que no se deslicen unas sobre otras. En esta forma, el cemento no solo destruye la plasticidad, sino que también aumenta su resistencia al esfuerzo cortante. El efecto químico superficial del cemento reduce la afinidad por el agua y, por consiguiente, la capacidad de los suelos arcillosos para retenerla. Esta doble función de reducir la afinidad por el agua y de producir una matriz o estructura fuerte proporciona a las partículas más grandes y no pulverizadas de suelo una especie de capa protectora, la cual sirve no solo para protegerlas, sino que también evita las expansiones causadas por el aumento de humedad (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

En la mayoría de los suelos granulares, la acción cementante es similar a la que ocurre en el concreto, pero la pasta de cemento no llena todos los vacíos existentes en el agregado. En las

arenas, las partículas se cementan únicamente en los puntos de contacto. Mientras más densa sea la gradación de suelo, más pequeños serán los vacíos, mayor el área de contacto y más fuerte la acción cementante. Las arenas de gradación uniforme (un solo tamaño) que tienen un área de contacto mínimo entre granos requieren mayor contenido de cemento para su estabilización. Puesto que los suelos granulares bien gradados tienen una baja expansión potencial, es posible estabilizarlos con menos contenidos de cemento que los requeridos para arenas uniformemente gradadas y para suelos arcillosos de alta expansión potencial (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

En cualquier tipo de suelo, el proceso de cementación tiene la máxima capacidad para desarrollarse cuando la mezcla está bien compactada y posee un contenido de humedad que facilite su compactación y la hidratación del cemento. Por otra parte, para que el último proceso se desarrolle totalmente, es necesario que la humedad no se pierda fácilmente, lo cual se consigue mediante un buen curado durante un tiempo prudencial. (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

4.1.1. Tipos de mezclas de suelo con cemento

La escogencia de la mezcla apropiada depende del uso para el cual quiera destinarse el suelo-cemento. La cantidad de agente estabilizador, generalmente se determina por medio de ensayos arbitrarios de laboratorio que tratan de simular las condiciones a las que va a estar sometido el material en el campo en relación con esfuerzos, meteorizaciones y otros procesos que afectan su durabilidad y que es posible que ocurran cuando el suelo estabilizado se usa para subbases y, en algunos casos muy particulares, para capas de rodadura en pavimentos de carreteras, cubiertas superficiales para canales de irrigación o drenaje, protección de taludes de represas, etc (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

Montejo, et al (2018), afirma que cinco son las variables principales que controlan la estabilización de suelos con cemento:

- a. La naturaleza del suelo.
- b. La proporción de cemento en la mezcla.
- c. El contenido de humedad en el momento de compactarla.
- d. La densidad obtenida en la compactación.
- e. El método de curado de la mezcla compactada.

Si se controla el contenido de humedad y la densidad por el método normal y se siguen los procedimientos de mezcla y curado adecuados, el grado de estabilización estará determinado por la naturaleza del suelo y por la proporción de cemento usado. La posibilidad de controlar las propiedades de la mezcla de forma apropiada durante la construcción y de controlar el grado de estabilización de manera tal que se satisfagan los requisitos de resistencia y durabilidad ha dado como resultado el desarrollo de cinco tipos principales de mezclas de suelo y cemento, que se describen a continuación (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018):

4.1.1.1. Suelo con cemento

Estas mezclas se diseñan para satisfacer criterios establecidos, determinados por ensayos normales de la AASTHO, ASTM, INV u otras entidades.

Estos criterios se basan especialmente en la resistencia a la compresión de la mezcla al cabo de cierto tiempo (técnica británica en general) o pérdidas en el ensayo de meteorización acelerada (humedecimiento y secado), de acuerdo con el procedimiento norteamericano. Además, se consideran otros factores relacionados, tales como el incremento en la humedad y el cambio de volumen.

Las mezclas de suelo-cemento que satisfacen estos criterios se sugieren para las siguientes aplicaciones:

- Bases y subbases para pavimentos rígidos y flexibles de calles, carreteras y aeropuertos.
- Bermas con capa superficial de rodadura para carreteras y aeropuertos.
- Zonas de estacionamiento, con capa superficial de rodadura.
- Núcleo central en presas de tierra.
- Mantos de revestimiento para tanques, sin tratamiento superficial.
- Fundaciones para algunos tipos de estructuras.
- Construcciones varias, incluyendo drenajes superficiales, alcantarillas, puentes de arco pequeños, unidades pequeñas de construcción, aceras y pasarelas, etc.

4.1.1.2. Suelos granulares modificados con cemento

Muchos suelos arenosos y cascajosos están ligeramente por debajo de las especificaciones, como materiales para base, subbases y subrasante de pavimentos rígidos y flexibles. Pueden contener cantidades excesivas de fracciones finas o finos excesivamente plásticos, por lo que bastaría añadirles una cierta cantidad de cemento que modifique sus propiedades plásticas, o pueden también necesitar cantidades de cemento para endurecer en forma sustancial la mezcla, dando una calidad solo ligeramente inferior a la del suelo-cemento.

En resumen, el cemento se usa en estos casos para reducir las características de plasticidad y expansividad del material, aumentando su capacidad de soporte hasta hacerlo admisible para la construcción de bases o subbases para pavimentos rígidos o flexibles que se ciñan a las normas.

El contenido de cemento varía desde 3% en adelante, pero es siempre menor que el requerido para suelo-cemento.

4.1.1.3. Suelos fino-granulares modificados con cemento

En estos casos, el cemento se usa para controlar las características de expansión y contracción del suelo. Este tipo de estabilización puede usarse también para aumentar la resistencia de suelos anormalmente débiles o áreas de suelos húmedos; contiene menos que el requerido para el suelo-cemento.

Este tipo de suelo-cemento se usa en los siguientes casos:

- Como tratamiento para controlar encogimiento y expansión en subrasantes con suelo de alto cambio de volumen.
- Para aumentar la resistencia de subrasantes.

4.1.1.4. Suelo-cemento plástico

Estas mezclas pueden colocarse en estado plástico (consistencia de mortero). Sin embargo, se endurecen hasta formar un material que llena los requisitos de resistencia y durabilidad fijados para el suelo-cemento, pero requiere contenidos de cemento superiores en más de un 4% a los requisitos para el suelo-cemento ordinario. Se usan generalmente con suelo de textura liviana, como en los arenosos.

La dificultad para colocar y compactar a humedad óptima los tipos usuales de suelo-cemento en obras que presentan superficies inclinadas planas llevó al desarrollo del suelo-cemento plástico. Se usa principalmente en los siguientes casos:

- Revestimiento superficial para canales de drenaje.
- Cubierta superficial para canales de irrigación.

- Capa para proteger de la erosión los enroscados.
- Revestimiento de taludes.

4.1.1.5. Lodos y materiales para inyección tratados con cemento

Se usan principalmente en trabajos de mantenimiento, para levantar pavimentos que se han hundido por erosión de la subrasante o por asentamiento de terraplenes. También en túneles para evitar el flujo del agua y para estabilizar balastos de ferrocarriles.

4.2. Teórico

Se consideran suelos aptos para mezclas de suelo-cemento aquellos cuyos consumos de cemento en peso se encuentren entre 5 y 12% con respecto al peso del suelo (ACI, 2009).

Tabla 1. Requisitos típicos de cemento para varios tipos de suelo. Fuente: Report on Soil Cement. Reported by American Concrete Institute (ACI) Committe 230, 2009.

Clasificación del suelo AASHTO	Clasificación del suelo ASTM	Rango Típico de Cemento requerido, porcentaje en peso
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM	3 - 5
A-1-b	GM, GP, SM, SP	5 - 8
A-2	GM, GC, SM, SC	5 - 9
A-3	SP	7 - 11
A-4	CL, ML	7 - 12
A-5	ML, MH, CH	8 - 13
A-6	CL, CH	9 - 15
A-7	MH, CH	10 - 16

La estabilización con cemento generalmente se emplea para aumentar la resistencia del suelo y así mismo incrementar las cargas de tránsito y obtener mezclas con un mejor comportamiento ante la erosión y los cambios de temperatura (Avila & Loría Salazar, 2012). Es por esto que es usado como un material para pavimentos donde es muy importante la calidad de la base debido a

que permite una alta capacidad estructural y durabilidad a largo plazo (Arce, 2011). Como una consecuencia de la incorporación de cemento, el espesor de la base estabilizada es menor que el requerido para bases granulares que soporten el mismo tráfico, porque la rigidez de esta hace que las cargas de tráfico se distribuyan sobre un área mayor, haciendo disminuir los esfuerzos sobre la subbase o sobre la subrasante (Acurio, 2016).

No existen limitaciones para el uso de agua en las mezclas de suelo-cemento, cualquier agua potable es apta para emplear en dichas mezclas (Corral, 2008). Esta agua debe cumplir con un requisito básico respecto al pH ya que este debe estar entre 5,50 y 8,0. También se recomienda que el máximo contenido de sulfatos debe ser 1,0 g/l.

En cuanto al cemento, el más utilizado es Portland normal tipo I, aunque para algunos proyectos se han usado los de alta resistencia, tipo III. Existen trabajos de investigación que concluyen que el cemento Portland tipo I permite a la mezcla alcanzar mayor resistencia que la del tipo II pues contiene mayor cantidad de aluminato tricálcico y sulfato de calcio, pero el tipo II es preferible al tipo I cuando se trata de reducir el agrietamiento. Además, se ha observado que los cementos tipo II y IV son más resistentes al ataque de los sulfatos (los sulfatos ejercen mucha influencia en la durabilidad y resistencia a la compresión simple) que el tipo I (Lavalle, 2013).

Los suelos predominantemente granulares dan después de tratados materiales frágiles. Los suelos cohesivos tratados presentan un comportamiento elástico lineal y elástico no lineal significativo (Ingles & Metcalf, 1972).

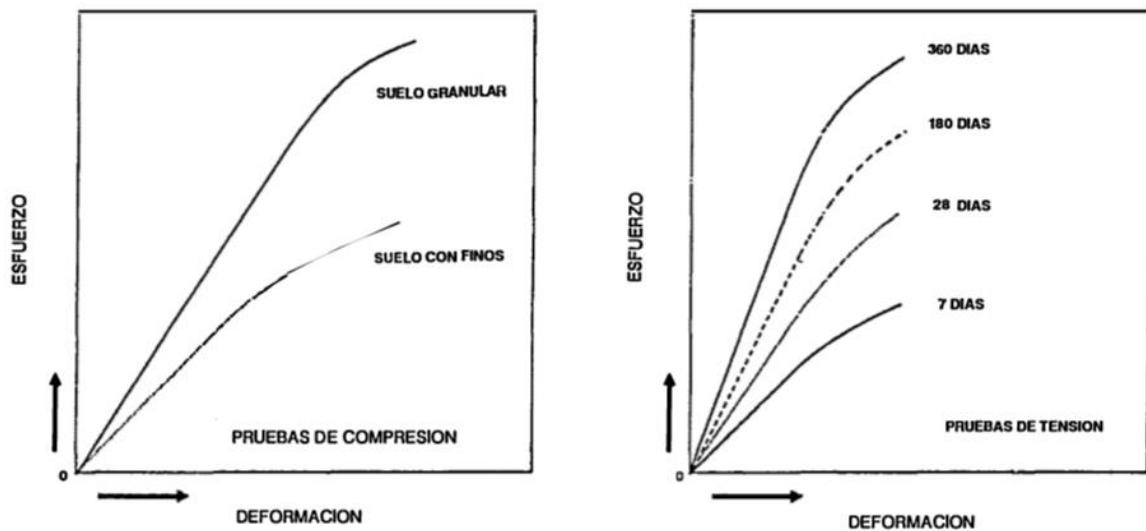


Ilustración 1. Curvas de esfuerzo-deformación en función del tiempo del suelo-cemento. Fuente: Soil stabilization: principles and practice, por Ingles O. G., Metcalf J. B., Sidney, 1972.

La resistencia a la compresión simple varía principalmente con (Felt, 1953):

- El contenido y tipo de cemento usado.
- La eficiencia lograda en el mezclado del cemento con el suelo.
- Las características y efectividad de los aditivos usados.
- El tipo y la cantidad de materia orgánica, sales y materiales deletéreos existentes en el suelo.
- La cantidad y calidad del agua usada.
- El tiempo transcurrido después de realizados la humectación, mezclado y compactación de los materiales.
- El grado de compactación alcanzado.
- La duración y forma de hacer el curado.

- Las prevenciones tomadas para disminuir el agrietamiento
- El tipo de suelo usado.

La tendencia al agrietamiento en general aumenta con el contenido de cemento a partir de determinados valores, y por tanto se producirá por agrietamiento una disminución de la resistencia del conjunto. No debe desecharse en consideraciones de diseño que el agrietamiento considerable puede reducir mucho la resistencia, de diez a cien veces el conjunto aumente la de la parte, por lo que será necesario valorar este efecto y prever en lo posible cómo controlar el agrietamiento (Barksdale & Vergnolle, 1968).

4.3. Conceptual

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials – Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes. Es una asociación sin ánimo de lucro, que establece y emite normas, especificaciones y estándares técnicos para el diseño y construcción en materia de transporte.

ACI: American Concrete Institute – Instituto Americano del concreto. Es una organización sin ánimo de lucro y autoridad a nivel mundial en el desarrollo, difusión y capacitación en lo referente al concreto.

Aluminato tricálcico [$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$]: Es un compuesto químico existente en el clinker de los cementos Portland.

Arcillas: Consiste en un material fino formado por partículas muy pequeñas cuyo tamaño es inferior a 4 micras y que se compone principalmente de silicatos de aluminio hidratados.

ASTM: American Society for Testing and Materials – Asociación Americana de Ensayo de Materiales. Es una organización sin ánimo de lucro que proporciona un foro para el desarrollo y publicación de estándares de consenso voluntario internacional para materiales, productos, sistemas y servicios. Por esto desarrolla documentos técnicos que son la base de fabricación, gestión, compras, códigos y regulaciones para docenas de sectores de la industria.

Base: Es una capa compuesta agregados grueso, arena y material fino, que se encuentra debajo de la capa de rodadura de un pavimento flexible o debajo de una losa en concreto de un pavimento rígido. Posee alta resistencia a la deformación lo que hace que soporte presiones altas.

Capa de rodadura: Es la capa superior del pavimento flexible formada por una mezcla bituminosa y agregado.

Capacidad portante: Capacidad del terreno para soportar las cargas que son aplicadas sobre él.

Compresión del suelo: Es la reducción del volumen de los poros del suelo.

Compresión simple: Es un ensayo que se realiza para determinar la resistencia o esfuerzo de un suelo a la compresión no confinada, mediante la aplicación de una

carga axial con control de deformación y utilizando una muestra de suelo inalterada tallada en forma de cilindro.

Curado: Es el proceso por el cual la mezcla ya terminada de suelo-cemento madura y endurece con el tiempo como resultado de la hidratación continua del cemento en presencia de suficiente cantidad de agua y calor (ACI, 2001).

Dosificación: Es determinar la cantidad o proporción adecuada de cemento necesaria para obtener la resistencia y durabilidad necesaria.

Estabilización granular: Es una combinación de métodos de estabilización de tipo físico y/o fisicoquímico. Con este sistema se modifica el comportamiento del esqueleto del suelo (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Estabilización química: En este sistema juega un papel importante la interacción química, en lugar de la fisicoquímica y la física. En la estabilización química, se le adiciona al suelo un componente químico; como agentes de estabilización química se menciona la cal, el cemento, el asfalto, los silicatos, las resinas, los ácidos, los lignitos, los óxidos metálicos, residuos de carbón (cenizas) y algunos elementos cáusticos (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Fatiga: Reducción progresiva de la resistencia de un material debido a la aplicación repetida de esfuerzos sobre él (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Fresado: Molienda en frío de la superficie de un pavimento que permite conformarla con las rasantes y pendientes transversales deseadas, removiendo ondulaciones,

bachos y otras imperfecciones de la capa de rodadura, dejando una superficie de textura apropiada y resistente al deslizamiento (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Hidratación del cemento: Proceso en el cual el cemento se transforma en un agente aglomerante debido a los procesos químicos responsables de la formación de nuevos compuestos, que generan propiedades mecánicas.

Humedad: Es la relación, expresada en porcentaje, del peso de agua en una masa de suelo dada, al peso de las partículas sólidas.

Invias: Instituto Nacional de Vías. Es una entidad gubernamental la cual está encargada de ejecutar políticas, estrategias, planes, programas y proyectos de infraestructura de la red vial, férrea, fluvial y marítima, de acuerdo con los lineamientos dados por el Gobierno Nacional.

Pavimento rígido: Tipo de pavimento conformado por losas de concreto sobre unas capas la cual transmite directamente los esfuerzos al suelo.

Pavimento flexible: Tipo de pavimento conformado por una carpeta de cemento asfáltico (material pétreo cementado con asfalto) apoyada generalmente sobre dos capas, la base y la subbase.

Reciclado: Reutilización de parte de las capas de la estructura existente, para mejorar su capacidad estructural. La adición de nuevos materiales es necesaria para mejorar la resistencia y el comportamiento del pavimento mejorado (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Subbase: Es una capa de material grueso compuesto por triturados, arena y material grueso. Resistente a la erosión y permite el libre drenaje con el fin de prevenir el bombeo. Se somete a menores esfuerzos que la base.

Subrasante: Suelo natural o antrópico que soporta las cargas transmitidas a través de las capas superiores de la estructura de pavimento.

UNE: Organismo de normalización en España el cual elabora normas técnicas, impulsa el desarrollo de la infraestructura de la calidad, promoviendo la transferencia del conocimiento y el fortalecimiento de las empresas.

4.4. Histórico

4.4.1. Experiencias a nivel mundial del uso de suelo-cemento (Lavallo, 2013):

3000 A.C.

Pirámides de Xí An, Provincia de Shaanxi en China, construidas hace 5.000 años.

600 A.C.

Las Ruinas de Cartago de Túnez

500 A.C.

Vías de comunicación del Imperio Romano y caminos blancos “sachbéh” de los Mayas, realizadas hace 2.500 años, existentes hasta hoy.

1910 - 1920

Estudio del suelo-cemento de forma científica, metodológica y técnica en Estados Unidos e Inglaterra.

1914

Joseph Hay Amies, el 24 de febrero en Filadelfia, Estados Unidos, adquirió la “U.S. Patent #1087914” de un producto que denominó “Alkaline Cement”, manufacturado en una planta central combinando 60 partes de cemento Portland con alrededor de 30 partes de hidróxido de calcio y cerca de 10 partes de soda cáustica. El producto resultante fue mezclado con suelo natural y agua.

1917

El ing. H.E. Brooke Bradley aplicó exitosamente una mezcla de cemento con suelos arcillosos en la construcción de unas carreteras cerca de la población de Salisbury Plain en el condado de Wiltshire, Inglaterra.

1921

En el estado de California, Estados Unidos, se usa el suelo-cemento para estabilizar suelos arcillosos.

1932

El Departamento de Caminos Estatales de Carolina del Sur, Estados Unidos, creó laboratorios para su investigación e impulso científicamente su estudio.

1935

Primera construcción supervisada de suelo-cemento con técnica moderna, cerca de Johnsonville, Carolina del Sur, Estados Unidos.

1939 - 1945

Segunda guerra mundial. Las fuerzas militares alemanas utilizaron eficientemente el suelo-cemento para una muy rápida construcción de pistas de aterrizaje en 130 aeropuertos en Europa.

1951

Material de protección de taludes para presas de tierra y enrocamiento fue en una sección de prueba de la presa Bonny cerca de New Hale, Colorado, Estados Unidos.

1975

Se usó para la reparación de la roca erosionada en la presa Tarbella, ubicada en Pakistán.

1979

Se usó en la construcción de un bordo provisional de la presa Revelstoke, Canadá.

1980

Se utilizó en la construcción de cortinas para presas en los Estados Unidos: Presa Willow Creek.

1985

Se utilizó por primera en México para la construcción de la presa La Manzanilla.

4.4.2. Experiencia en Colombia del uso de suelo-cemento (ARGOS, 2015):

1965

Se usó para la estabilización de algunos barrios de Medellín, entre estos: Belén, La América, Castilla y Campo Valdés.

1968

Lo implementa la firma Atuesta - Guarín y Pombo en 25,0 km de la vía Santander de Quilichao - Popayán.

1969

Se implementa en 43,70 km de la vía San Jorge – Planeta Rica y en 62,20 km de la vía La Ye – Sincelejo.

1970

La avenida oriental de Medellín se convierte en una de las primeras obras de infraestructura urbana que implementa una tecnología combinada entre la estabilización del suelo y un pavimento rígido sobre ella.

1975

Se usó para la estabilización del suelo en el aeropuerto de Cartagena.

1978

Lo implementa la firma Ezequiel Pinsky y Asociados en 30,0 km de la vía Yumbo – San Marcos – Media Canoa.

1998

Se usa para la estabilización de suelos en la construcción de algunas vías en Quibdó.

1999

Parte de la red vial del Quindío: Quimbaya – Puerto Alejandría, Finlandia – La India, Kérman - Palmera, La Fachada, Guaduales de la Villa, Bosques de Pinares, El Cáimo y La Argentina.

2000

Implementado en las vías de la localidad de Engativá, Bogotá, por parte del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU).

2001

Se implementa en la vía Zipaquirá - Briceño.

2002

Se implementa en algunos tramos de las Autopista del café, concesión que une los departamentos de Caldas, Risaralda, Quindío y Valle del Cauca.

Se implementa en la vía Quibdó - Yuto.

2005

Se usó para la estabilización del suelo en la terminal aérea del Dorado, Bogotá.

2008

Se usó para la estabilización del suelo en vías de los municipios de Apartadó, Turbo, Sonsón, La Tebaida, Concordia, Ciudad Bolívar, entre otros.

4.5. Normatividad aplicable

En la sección 600 del INVIAS se presentan diferentes documentos técnicos de los ensayos de laboratorio que se deben realizar para las mezclas de suelo - cemento. A continuación, se muestran los ensayos que se deben realizar para el diseño de una base tratada con cemento:

I.N.V.E. - 611: *Relaciones Humedad-Densidad de Mezclas de Suelo Cemento.*

I.N.V.E. - 612: *Humedecimiento y Secado de Mezclas Compactadas de Suelo Cemento.*

I.N.V.E. - 613: *Preparación y Curado de Probetas de Suelo – Cemento Para Pruebas de Compresión y Flexión en el Laboratorio.*

I.N.V.E. - 614: *Resistencia a la Compresión de Cilindros Moldeados de Suelos – Cemento.*

En el Capítulo 3 – *afirmados, subbases y bases* de la misma entidad que se menciona anteriormente, se especifican los requisitos que deben cumplir los materiales para la ejecución de bases granulares estabilizadas y los índices de calidad que se deben alcanzar al construirlas. A continuación, se muestran las especificaciones generales de construcción para base granular:

Artículo 300 – 13: *Disposiciones Generales para la Ejecución de Afirmados, Subbases y Bases Granulares y Estabilizadas.*

Artículo 330 – 13: *Base Granular.*

Artículo 350 – 13: *Suelo - Cemento.*

Artículo 351 – 13: *Base tratada con cemento.*

5. Metodología

El proyecto se divide en 3 fases (A, B y C), con el fin de cumplir cada uno de los objetivos específicos, y dentro de la segunda fase se subdivide en otras mencionadas a continuación:

A. Marco teórico y metodología de los ensayos.

B. Ensayos:

B.1. Caracterización del material granular:

- **INV E - 213 – 13** Análisis granulométrico de los agregados gruesos y fino: “Esta norma se refiere a la determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados grueso y fino de un material, por medio de tamizado” (Instituto Nacional de Vías [INVIAS], 2013).

B.2. Determinación del diseño de las mezclas:

B.2.1. Ensayo de diseño de la mezcla:

- **INV E - 611 – 13.** Relaciones humedad - peso unitario de mezclas de suelo cemento: “Estos métodos se refieren a la determinación de la relación entre la humedad y la densidad de mezclas de suelo - cemento cuando se compactan del modo que se prescribe en esta norma y antes de que ocurra la hidratación del cemento” (Instituto Nacional de Vías [INVIAS], 2013).

B.3. Evaluación de la mezcla:

- **UNE - EN 13286 – 45.** Mezclas de áridos sin ligante y con conglomerante hidráulico. Parte 45: Método de ensayo para la determinación del periodo de trabajabilidad: “Esta norma describe los métodos de ensayo para determinar el periodo de trabajabilidad de una mezcla de áridos con conglomerante hidráulico, utilizando materiales granulares” (Asociación Española de Normalización y Certificación [AENOR], 2004).

- **INV E - 613 – 13.** Preparación y curado de probetas de suelo - cemento para pruebas de compresión y flexión en el laboratorio: “Esta norma cubre el procedimiento para moldear y curar en el laboratorio probetas de suelo - cemento, utilizadas en pruebas de compresión y flexión, bajo un control exacto de las cantidades de materiales y de las condiciones de ensayo.” (Instituto Nacional de Vías [INVIAS], 2013).
- **INV E - 614 – 13.** Resistencia a la Compresión de Cilindros Moldeados de Suelos - Cemento (a diferentes edades): “Esta norma se refiere a la determinación de la resistencia a la compresión del suelo - cemento, empleando cilindros moldeados como especímenes de ensayo.” (INVIAS], 2013).

C. Análisis y resultados de los ensayos.

6. Resultados y Análisis

6.1. Caracterización del material granular

6.1.1. Localización

El material usado para el proyecto de grado corresponde a una base granular clase A según la especificación técnica IDU, la cual se obtuvo de la Cantera El Pencal, localizada en la vereda Balsillas, municipio de Mosquera en el departamento de Cundinamarca.



Ilustración 2. Cantera de explotación de materiales pétreos El Pencal. Fuente: Ingenieros GF S.A.S., 2019.

6.1.2. Ensayos

6.1.2.1. Análisis granulométrico

Este ensayo, I.N.V. E-213-13, nos permite determinar cuantitativamente, por medio de tamizado, si el material obtenido cumple con la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados grueso y fino, según la especificación técnica del INVIAS para el caso específico de base tratada con cemento, ver tabla 2. Por otra parte, es necesario que la granulometría del material a utilizar tenga la gradación comprendida dentro de los límites establecidos. Lo anterior con el propósito de garantizar un óptimo comportamiento del agregado. En la gráfica 1, se presenta el comportamiento de la curva granulométrica de la muestra.

Tabla 2. Requisitos granulométricos del agregado para base tratada con cemento. Especificación técnica INVIAS, capítulo 3 artículo 351. Fuente: (INVIAS, 2013, p. 3).

Tipo de Gradación	TAMIZ (mm / U.S. Standard)							
	37.5	25.0	19.0	9.5	4.75	2.0	0.425	0.075
	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
	% PASA							
BTC-38	100	70-100	60-90	45-75	30-60	20-45	10-30	2-15
BTC-25	-	100	70-100	50-80	35-65	25-50	15-30	2-15

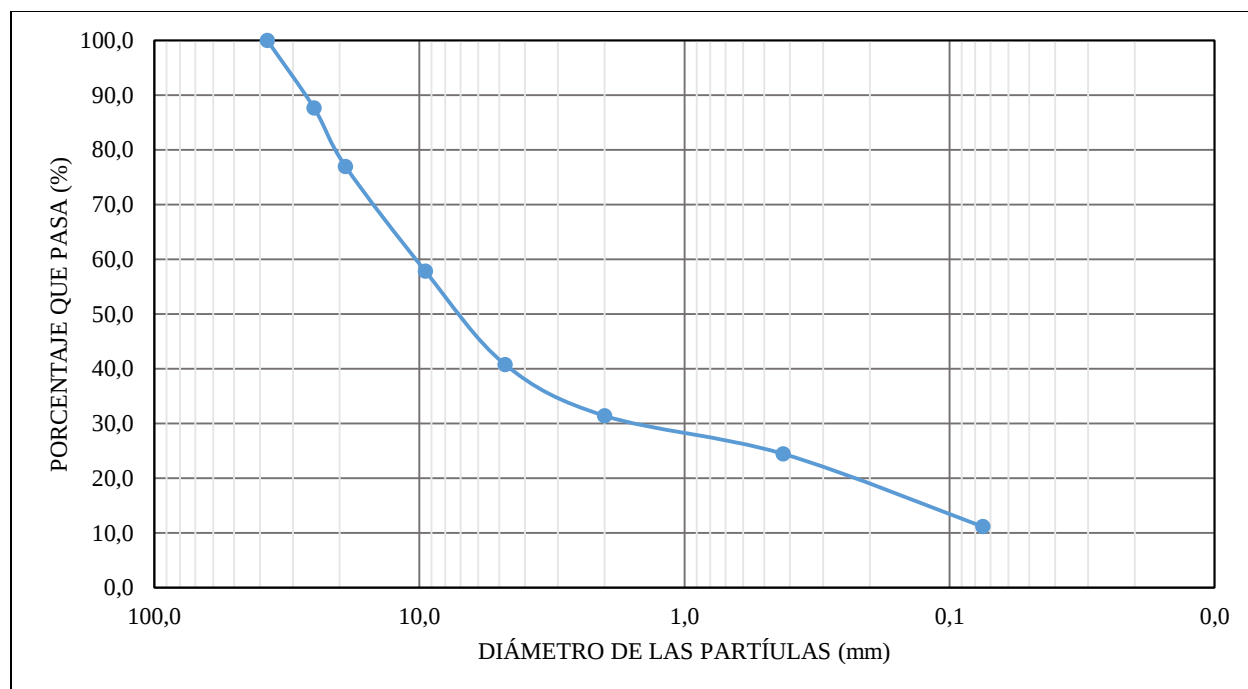


Gráfico 1. Curva granulométrica del material a utilizar obtenido de la Cantera El Pencal. Fuente: Elaboración propia.

La distribución granulométrica mediante tamizado nos arroja, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), que un 59.22% del material corresponde a gravas, el 29.61% arenas y el 11.16% restante a finos y la misma, según la clasificación de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), nos arroja que un 68.59% son gravas, 20.25% arenas y 11.16% finos. Es importante mencionar que la determinación exacta del material que pasa el tamiz de $75\mu\text{m}$ (No. 200) no se requiere lograr mediante este ensayo.

De acuerdo a los requisitos granulométricos presentados en la tabla 2, es necesario establecer los límites a considerar para los dos tipos de bases tratadas con cemento, BTC 38 y BTC 25, para de esta forma verificar el cumplimiento y comportamiento que presenta el material a utilizar en relación con la distribución de partículas. Por consiguiente, en el Gráfico 2 se muestra el

comportamiento de la curva granulométrica del material respecto a las curvas granulométricas límites.

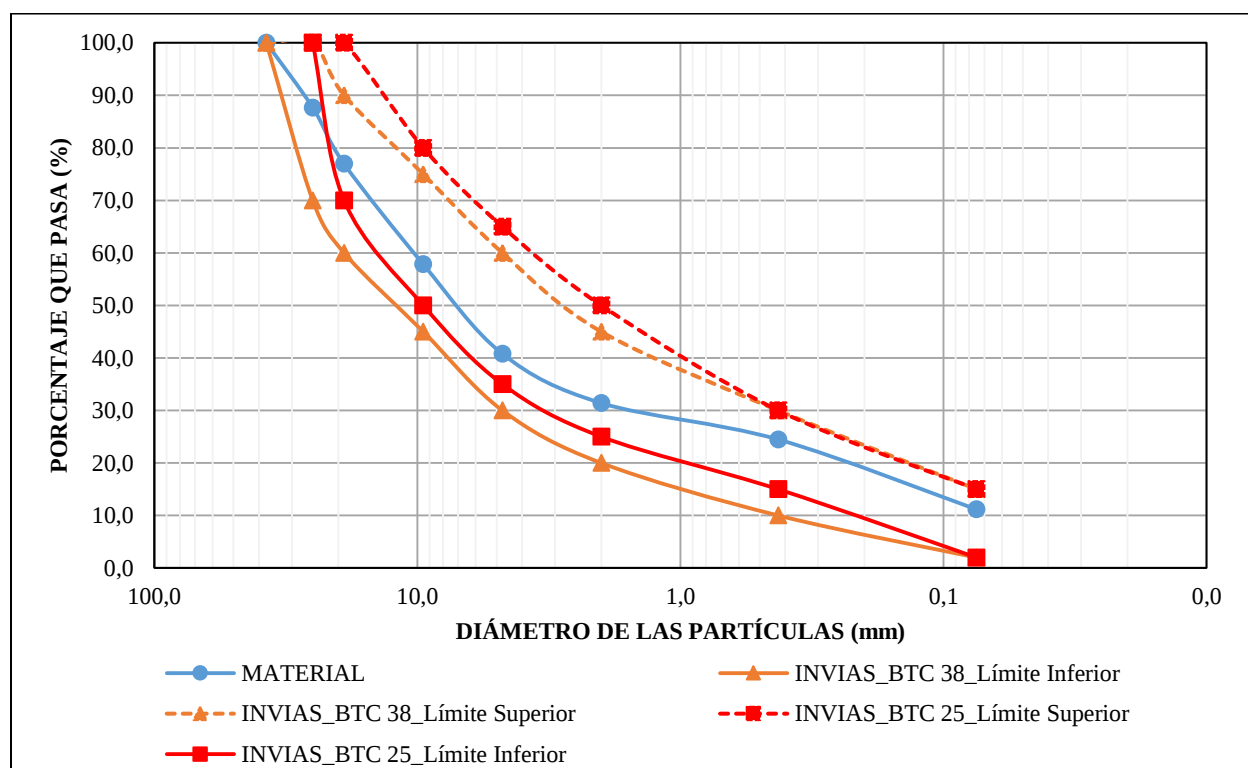


Gráfico 2. Límites granulométricos para base tratada con cemento según la especificación técnica INVIAS, capítulo 3 artículo 351. Fuente: Elaboración propia.

La granulometría del material obtenido se ajusta y cumple la exigida para una BTC-38 ya que se mantiene en los límites correspondientes, ver Gráfico 2, sin embargo para la BTC-25 inicialmente esta por fuera del límite inferior debido a que en los requisitos granulométricos del INVIAS, ver tabla 2, esta empieza a retener material en el tamiz $\frac{3}{4}$ " y la fracción del material obtenido lo hace apartir del tamiz de 1". Finalmente, se debe disponer de dos granulometrías adecuadas que se encuentren en los límites que pide la normativa para su posterior análisis, para ello se diseñan dos diferentes, la primera corresponde a una BTC-25 con un contenido de finos del 14% y la segunda a una BTC-38 con un contenido de finos del 8%. A continuación se muestran las curvas granulometrias de cada una de ellas.

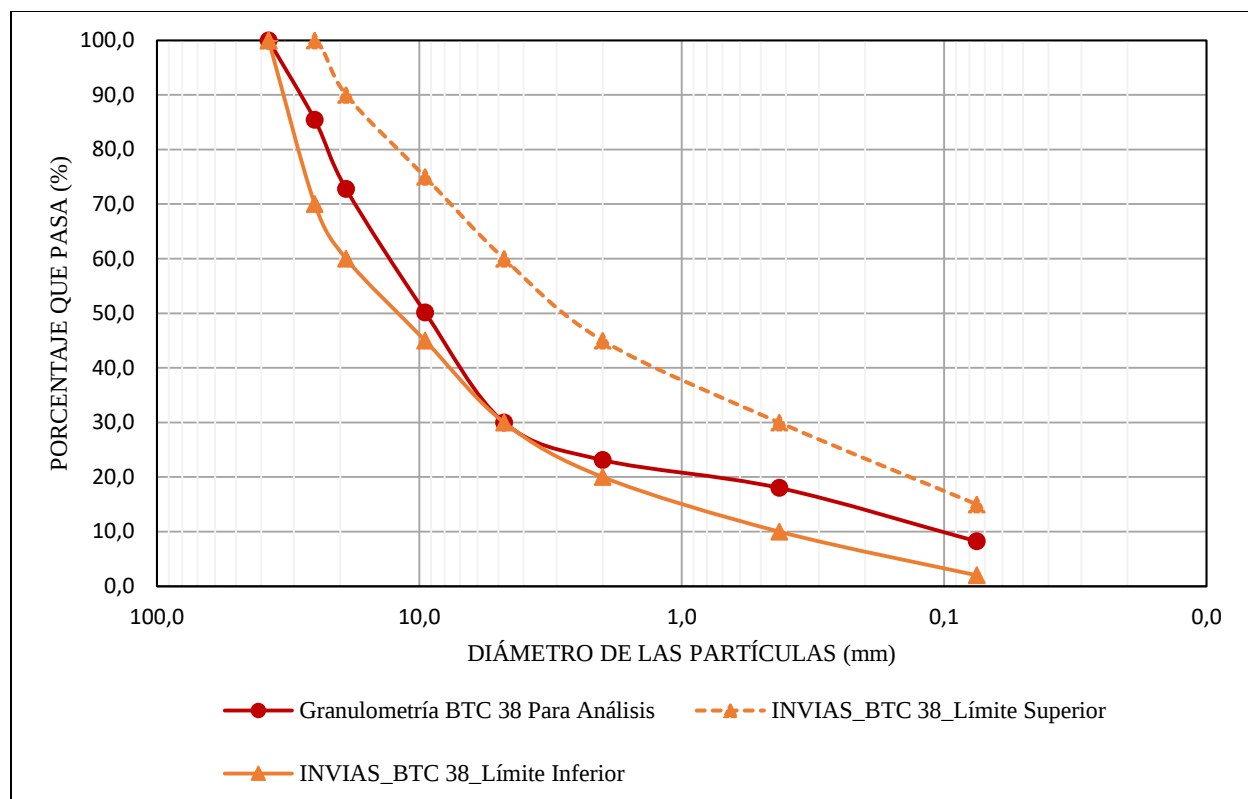


Gráfico 3. Curva granulométrica del material BTC-38 diseñada en laboratorio con el material obtenido de la Cantera El Pencal. Fuente: Elaboración propia.

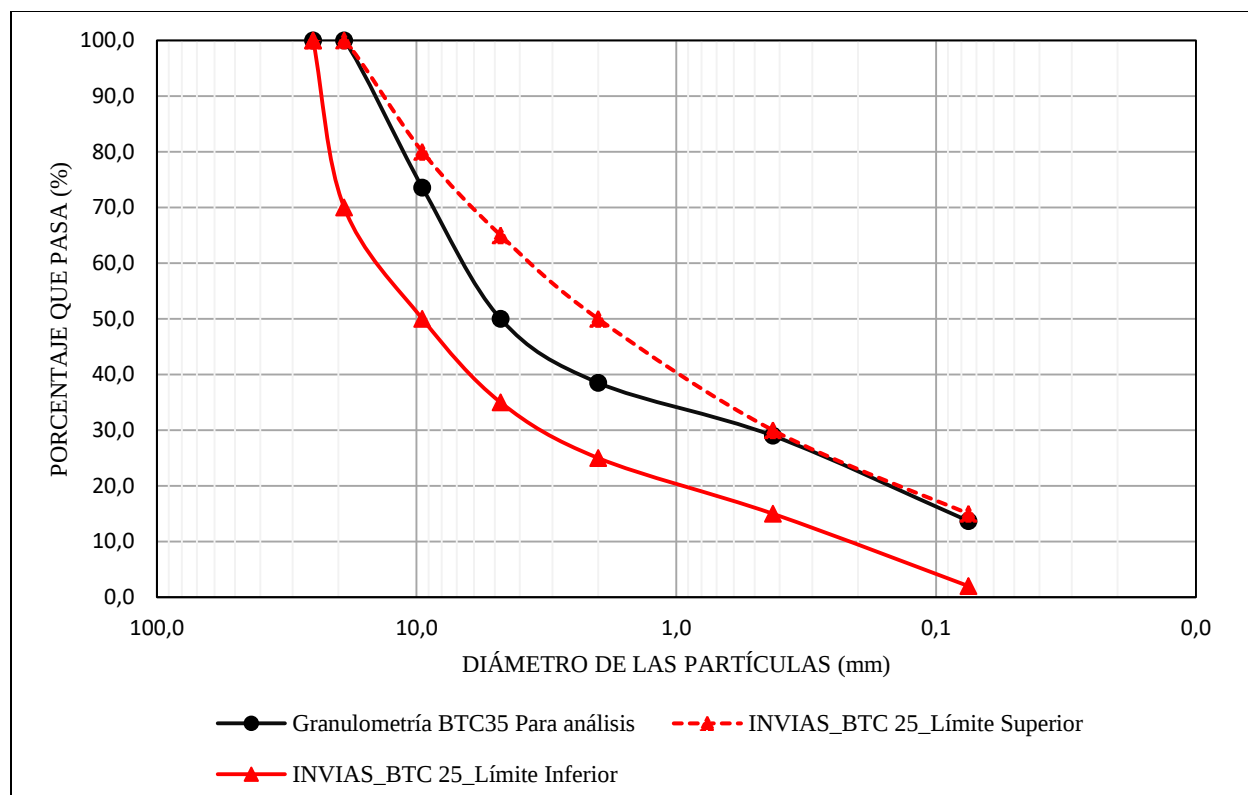


Gráfico 4. Curva granulométrica del material BTC-25 diseñada en laboratorio con el material obtenido de la Cantera El Pencal. Fuente: Elaboración propia.

6.1.2.2. Dureza

Los ensayos de laboratorio realizados en este apartado corresponden a: desgaste en la máquina de los ángeles, degradación por abrasión en el equipo micro-deval y resistencia por el método 10% de finos, los resultados para cada uno de estos se detallan en la Tabla 3.

El porcentaje máximo de pérdidas permitido por la especificación general de construcción de carreteras del INVIAS capítulo 3 artículo 351, para el ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles a 500 revoluciones es de 40% para un agregado clase A y de 35% para un agregado clase B y a 100 revoluciones es de 8% y 7% respectivamente. Teniendo en cuenta que el resultado obtenido del ensayo para 500 revoluciones fue del 43% lo cual nos indica que no cumple con los

requisitos que debe cumplir el material para base tratada con cemento sin embargo para 100 revoluciones si lo hace porque no sobrepasa el máximo permitido ya que el resultado obtenido fue del 3%, se debe considerar que se realizó un solo laboratorio para cada uno por disponibilidad limitada del material de análisis por lo tanto no fue posible llevar a cabo ensayos adicionales que permitieran corroborar el comportamiento del agregado a las 500 revoluciones.

El caso anterior se repite para el ensayo de degradación por abrasión en el equipo micro-deval donde el porcentaje máximo de pérdidas permitido para un material clase A es de 30% y clase B de 25%, sin embargo, el resultado de laboratorio nos arroja un 37.3% con lo cual el material no cumple con este requisito exigido en la normativa. En cambio, el ensayo de resistencia por el método del 10% de finos si cumple ya que no se encuentra por debajo de los mínimos exigidos, los resultados obtenidos corresponden a 85kN valor seco y la relación húmedo/seco es de 82.35% cuando los exigidos para el primero en un material clase A es de 90kN y clase B de 70kN y para el segundo es de 75% para ambas clases de material.

Tabla 3. Resultados de los ensayos de laboratorio de dureza en el material obtenido de la cantera El Pencal. Fuente: Elaboración propia.

NORMA DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS
I.N.V. E - 218-13	Desgaste en la máquina de los Ángeles (%)	
	500 revoluciones	43
	100 revoluciones	3
I.N.V. E - 238-13	Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval (%)	37
I.N.V. E - 224-13	Resistencia mecánica por el método del 10% de finos	
	Valor seco (kN)	85
	Relación húmedo/seco (%)	82

6.1.2.3. Durabilidad

El ensayo de laboratorio realizado corresponde a solidez del agregado frente a la acción de una solución de sulfato de magnesio; mediante este se puede obtener información útil para juzgar la resistencia de la fracción gruesa y fina del material frente a la acción de los agentes atmosféricos. El resultado se detalla a continuación:

Tabla 4. Resultado del ensayo de laboratorio de solidez en sulfato de magnesio en el material obtenido de la cantera El Pencal. Fuente: Elaboración propia.

NORMA DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS
I.N.V. E - 220-13	Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato (%)	
	Sulfato de magnesio	
	* fracción fina	57
	* fracción gruesa	47

El porcentaje máximo de pérdidas permitido por la especificación general de construcción de carreteras del INVIAS capítulo 3 artículo 351, para el ensayo de solidez en sulfato de magnesio es de 18% para un agregado clase A y clase B, sin embargo el resultado de laboratorio nos arroja un 57% para la fracción fina (material que pasa el tamiz de 3/8" y se retiene en el tamiz N° 50) y un 47% para la fracción gruesa (material que pasa el tamiz de 1 1/2" y se retiene en el tamiz N° 4) con lo cual el material no cumple con este requisito exigido en la normativa.

6.1.2.4. Limpieza

Los ensayos de laboratorio realizados en este apartado corresponden a: límite líquido, índice de plasticidad, equivalente de arena, azul de metileno, contenido de orgánica y contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales. Los resultados para cada uno de estos se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de los ensayos de laboratorio de limpieza en el material obtenido de la cantera El Pencal. Fuente: Elaboración propia.

NORMA DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS
I.N.V. E - 125-13	Límite líquido (%)	-
I.N.V. E - 125-13 I.N.V. E - 126-13	Índice de plasticidad (%)	0
I.N.V. E - 133-13	Equivalente de arena (%)	20
I.N.V. E - 235-13	Valor de azul de metileno (ml/g)	4,0
I.N.V. E - 121-13	Contenido de materia orgánica (%)	0,64
I.N.V. E - 211-13	Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales (%)	3,2

En los seis ensayos realizados en esta sección, dos no cumplen con lo estipulado en la Tabla 6, estos son: equivalente de arena y contenido de terrenos de arcilla y partículas deleznales. Sin embargo si comparamos la curva granulométrica del material donde nos muestra que el 11% de este pasa el tamiz N° 200 lo que quiere decir que corresponden a partículas arcillosas pero el ensayo de equivalente de arena muestra que el 20% del volumen del material puesto en la solución es arena y el 80% restante son finos nocivos, la dispersión entre los resultados al parecer es incoherente más aún cuando el ensayo de límite líquido y plástico indica que no se encuentra material arcilloso dentro de la muestra.

Tabla 6. Requisitos de los agregados para base tratada con cemento. Especificación técnica INVIAS, capítulo 3 artículo 351. Fuente: (INVIAS, 2013, p. 2).

ENSAYO	NORMA DE ENSAYO INV	CLASE DE AGREGADO	
		CLASE B	CLASE A
LIMPIEZA (F)			
Límite líquido, máximo (%)	E-125-13	-	-
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125-13 y E-126-13	0	0
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133-13	30	30
Valor de azul de metileno, máximo	E-235-13	10	10
Contenido de materia orgánica, máximo (%)	E-121-13	1	1
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%)	E-211-13	2	2

6.1.2.5. Geometría

Los ensayos de laboratorio realizados en este apartado corresponden a: índice de alargamiento, índice de aplanamiento y caras fracturadas. Los resultados para cada uno de estos se detallan en la Tabla 7. Los dos primeros cumplen con los requisitos estipulados sin embargo con el tercero esto no sucede ya que el porcentaje máximo permitido por la especificación general de construcción de carreteras del INVIAE capítulo 3 artículo 351, para el ensayo de caras fracturadas (una cara) es de 60% para un agregado clase A y de 50% para un agregado clase B y el resultado obtenido es de 40%.

Tabla 7. Resultados de los ensayos de laboratorio de geometría en el material obtenido de la cantera El Pencal. Fuente: Elaboración propia.

NORMA DE ENSAYO	ENSAYO	RESULTADOS OBTENIDOS
I.N.V. E - 230-13	Índice de alargamiento (%)	28
I.N.V. E - 230-13	Índice de aplanamiento (%)	14
I.N.V. E - 227-13	Caras fracturadas (una cara) (%)	40

6.1.2.6. Resistencia

Los ensayos que corresponden a la parte de resistencia del material son CBR y Proctor, ya que este último es necesario para poder realizar el ensayo de CBR. En el capítulo 3 de la Norma INVIAE, artículo 351, los requisitos de CBR para una compactación del 95% del ensayo Proctor modificado corresponde a 60% y 80% para agregado de Clase A y Clase B, respectivamente.

Primero se realizó el ensayo modificado de compactación (Proctor modificado, norma de ensayo INV E 412-13), para el cual se hicieron 5 puntos, con diferentes humedades, 4, 6, 8, 10 y 12 por ciento de humedad teórica. Durante el ensayo se toman unas muestras del suelo

compactado para comprobar la humedad real que tenía el material ensayado. En el Gráfico 5 se muestran los datos obtenidos y con los cuales se determinaron la densidad seca máxima de 2.16 g/cm³ y la humedad óptima de 7.4%.

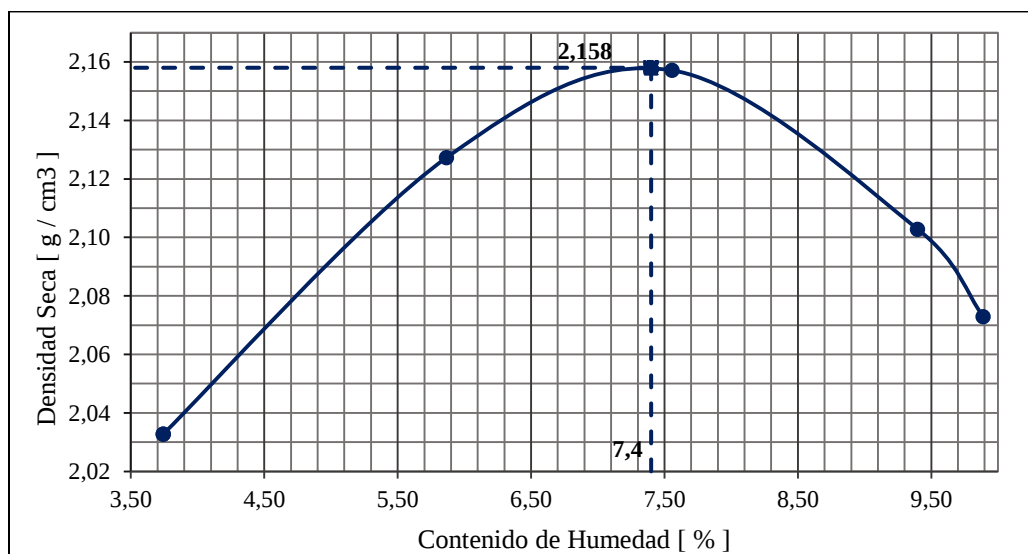


Gráfico 5. Curva del ensayo modificado de compactación para la determinación de la humedad óptima y densidad seca máxima. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, ya conociendo la densidad seca máxima y humedad óptima, se procede a realizar el ensayo de CBR, se hacen 3 probetas con diferente compactación que varía con el número de golpes, lo cuales son 10, 25 y 56 golpes. Se dejan en inmersión con la sobrecarga que exige la norma de ensayo INV E-148-13 por 4 días y se ubica un dial para determinar la expansión como se muestra en la Ilustración 3; después de la inmersión, se fallan con el pistón y se registra la carga aplicada a diferentes valores de penetración, se halla el esfuerzo sabiendo que el área del pistón es de 3 pulgadas cuadradas y se hacen las curvas de esfuerzo vs deformación, tal y como se puede observar en el Gráfico 6.



Ilustración 3. Inmersión y lectura del dial de las probetas para CBR. Fuente: Propia

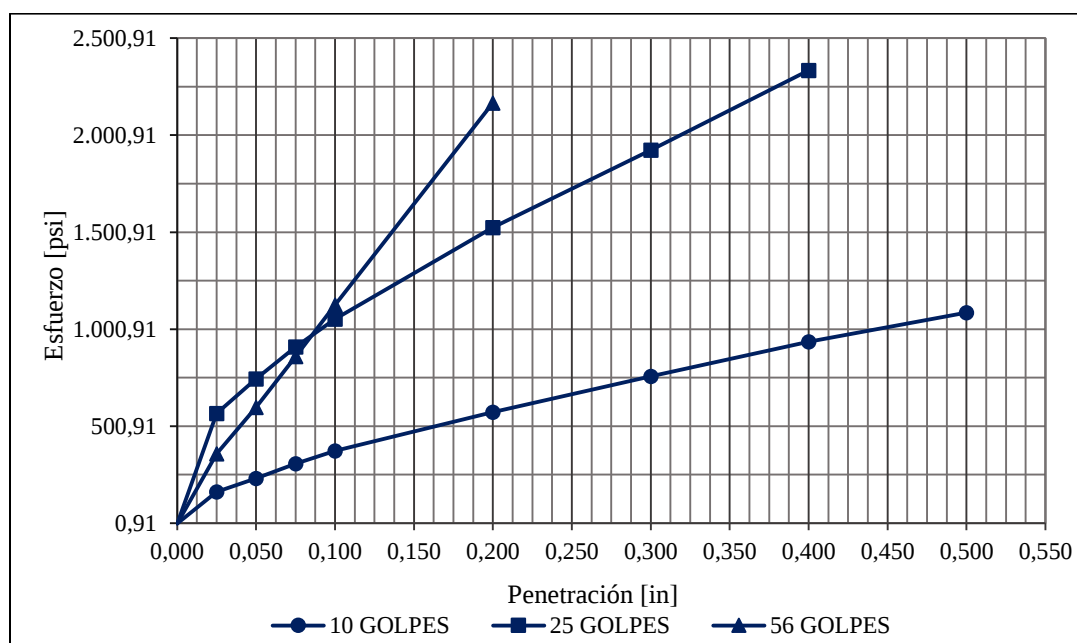


Gráfico 6. Curvas esfuerzo vs deformación para las probetas compactadas con 10, 25 y 56 golpes. Fuente: Elaboración propia.

Con los datos que se sacan de cada probeta, como el peso del suelo compactado, y las muestras para la humedad, se calcula la densidad seca de cada probeta que fueron de 1.99 g/cm^3 ,

2.07 g/cm³ y 2.14 g/cm³ para 10, 25 y 56 golpes, respectivamente y así mismo, con estos datos se determina el grado de compactación con respecto a la densidad seca máxima del Proctor modificado que fue de 2.16 g/cm³; con los datos de esfuerzos a 0.1 y 0.2 pulgadas de penetración, se calcula el CBR correspondiente, dividiendo este esfuerzo en 1000 si es a 0.1 pulgadas o en 1500 si es a 0.2 pulgadas, ver Tabla 8.

Tabla 8. Datos de CBR a 0.1 y 0.2 pulgadas, densidad seca y grado de compactación para cada probeta. Fuente: Elaboración propia.

	CRB a 0.1 pulgadas	CBR a 0.2 pulgadas	DENSIDAD SECA [g/cm ³]	Grado de compactación
10 GOLPES	37.40	38.22	1.99	0.92
25 GOLPES	105.38	101.64	2.07	0.96
56 GOLPES	112.64	144.44	2.14	0.99

De acuerdo con el Gráfico 7, el CBR es de 90 para un grado de compactación del 95%, lo cual cumple con los requerimientos de la norma tanto para agregado de Clase A como para el de Clase B, como se mencionó anteriormente.

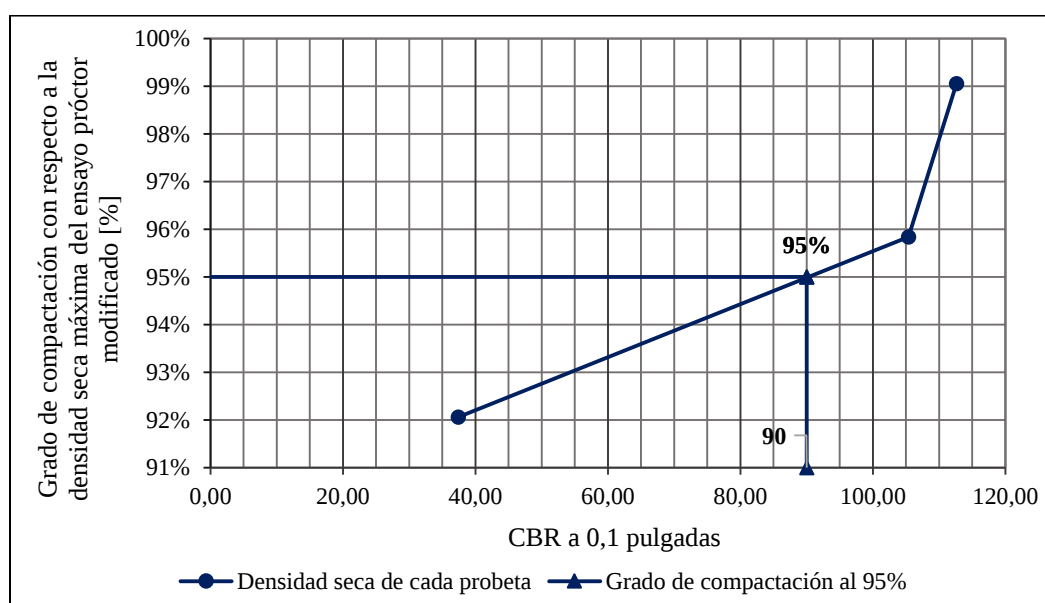


Gráfico 7. Grado de compactación vs CBR a 0.1 pulgadas. Fuente: Elaboración propia.

6.2. Diseño de la mezcla

La mezcla de base tratada con cemento se diseña mediante los criterios de resistencia a la compresión a 7 días, donde el contenido mínimo de cemento es aquel que permita una resistencia mínima de 3.5MPa y máxima de 7.0MPa. Sin embargo, en ningún caso el contenido de cemento debe ser inferior a cuatro por ciento (4%) de la masa seca del material para estabilizar. También es importante mencionar que el tipo cemento permitido por la especificación general de construcción de carreteras en el capítulo 3 artículo 351 corresponde a cemento hidráulico de uso general. No obstante, en el mercado nacional, diferentes empresas cuentan con un cemento especializado para estabilizaciones de suelos llamado cemento de moderado calor de hidratación o MCH, es por ello que los ensayos de laboratorio se realizan de igual forma para ambos con el fin de comparar y evaluar su comportamiento y desempeño en la BTC-25 y BTC-38.

En la Tabla 9 (que corresponde a la Tabla 351-5) se observan los ajustes que se le hacen a la norma de ensayo INV E-611-13, pero debido a que el material de ensayo era limitado, se decidió usar el molde pequeño de Proctor, pero, cumpliendo con la1 energía de compactación modificada, por lo que las capas fueron 5, con 25 golpes por capa con el martillo de 4.536 kg.

Tabla 9. Procedimiento de la preparación de probetas en mezclas de base tratada con cemento. Fuente: (INVIAS, 2013, p. 2).

CARACTERÍSTICA	DENSIDAD MÁXIMA DE REFERENCIA	
	ENERGÍA DE COMPACTACIÓN NORMAL	ENERGÍA DE COMPACTACIÓN MODIFICADA
Ensayo de referencia para la energía de compactación	INV E-141	INV E-142

Determinación del peso unitario seco máximo y preparación de probetas para prueba de compresión	INV E-611 ajustado - Molde: 3243 cm ³ - Masa martillo: 4.536 kg - Caída martillo: 457 mm - No. capas: 7 - Golpes/capa: 13	INV E-611 ajustado - Molde: 3243 cm ³ - Masa martillo: 4.536 kg - Caída martillo: 457 mm - No. capas: 7 - Golpes/capa: 61
---	---	---

6.2.1. Ensayo Proctor

6.2.1.1. Ensayo Proctor sin cemento

Una vez definida la granulometría a emplear para cada una de las bases granulares tratadas con cemento siendo la primera BTC-25 y la segunda BTC-38, se realiza el ensayo Proctor sin cemento, donde la energía de referencia para la compactación será la correspondiente al modificado bajo el método B, norma de ensayo I.N.V E-142-13.

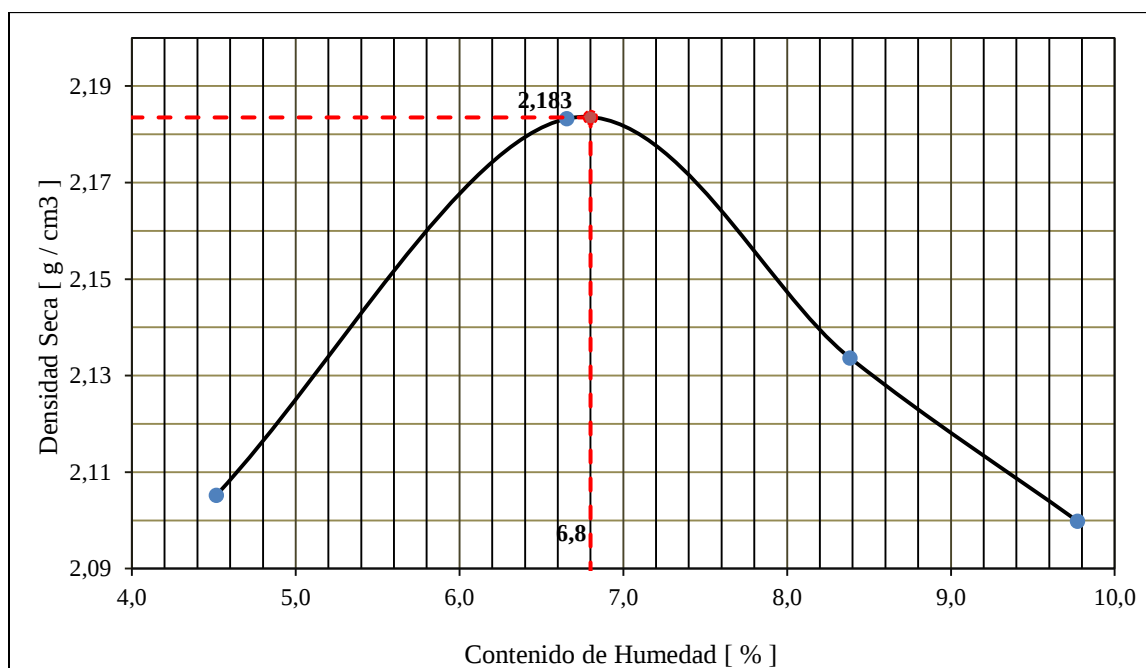


Gráfico 8. Curva de compactación para BTC-25 sin cemento. Fuente: Elaboración propia.

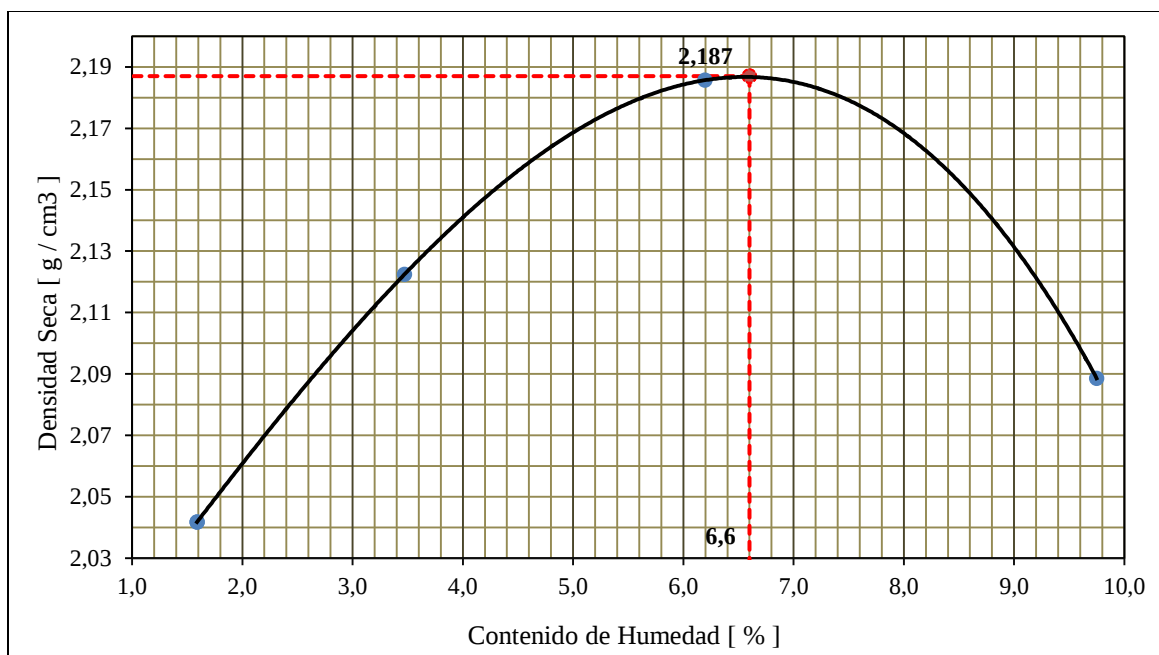


Gráfico 9. Curva de compactación para BTC-38 sin cemento. Fuente: Elaboración propia.

De las dos gráficas anteriores se muestran el contenido de humedad óptimo ($w_{\text{óptima}}$ ó w_o) y la densidad seca máxima ($\gamma_{d_{\text{máx}}}$) correspondientes al pico de la curva dibujada. Para la BTC-25, con un 14% de finos, su humedad óptima es del 6,8% y densidad seca máxima de 2,18g/cm³ y la BTC-38, con un 8% de finos, $w_{\text{óptima}}$ es de 6,6% y $\gamma_{d_{\text{máx}}}$ de 2,19g/cm³.

6.2.1.2. Ensayo Proctor con cemento

6.2.1.2.1. Ensayo Proctor con cemento de uso general o UG

Después de obtener el contenido de humedad óptimo para cada material se procede a realizar nuevamente un ensayo Proctor con cemento de uso general (UG) igual al cuatro por ciento (4%) de la masa seca del material, norma de ensayo I.N.V E-611-13.

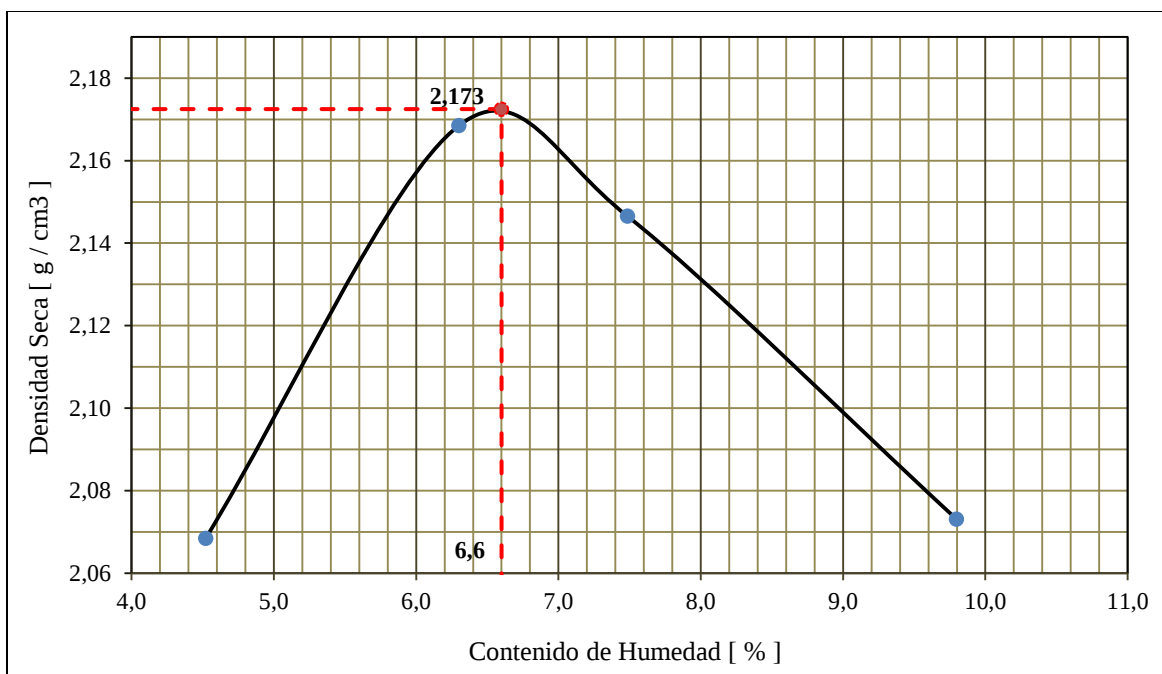


Gráfico 10. Curva de compactación para BTC-25 con 4% de cemento tipo UG marca Argos. Fuente: Elaboración propia.

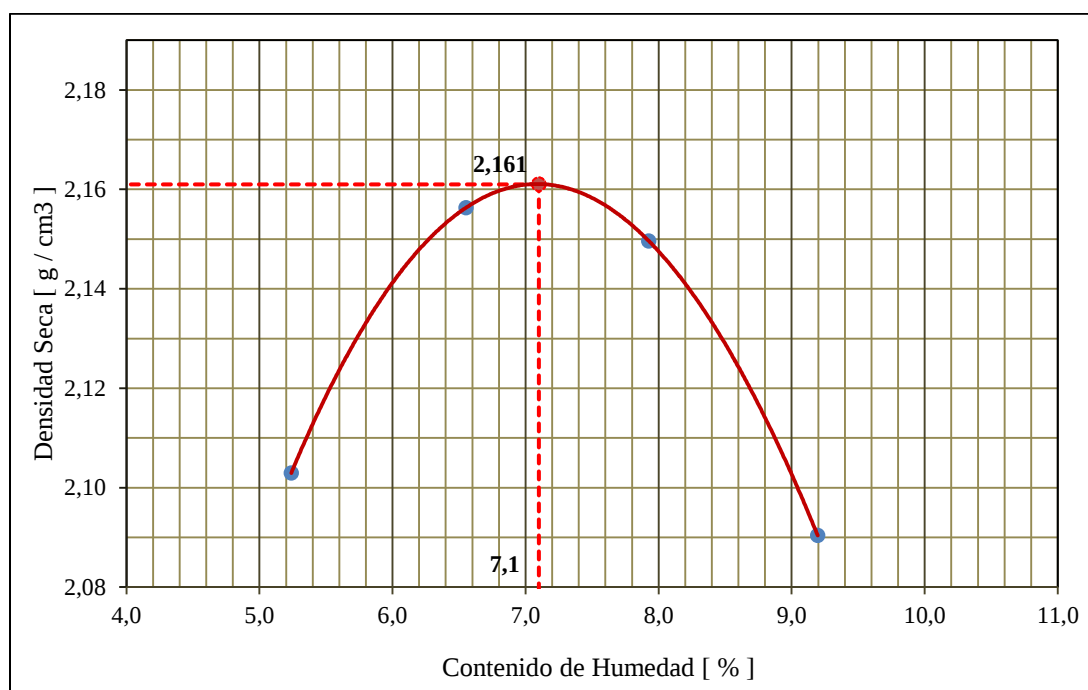


Gráfico 11. Curva de compactación para BTC-38 con 4% de cemento tipo UG marca Argos. Fuente: Elaboración propia.

El contenido de humedad óptimo para la BTC-25 es de 6.6% y su densidad seca máxima corresponde a 2.17g/cm^3 y para la BTC-38 la $w_{\text{óptima}}$ es de 7.1% y $\gamma_{d_{\text{máx}}}$ de 2.16g/cm^3 .

6.2.1.2.2. Ensayo Proctor con cemento de moderado calor de hidratación o MCH

Nuevamente se realiza un ensayo Proctor, pero esta vez con el cemento de moderado calor de hidratación (MCH) también con el cuatro por ciento (4%) de la masa seca del material, norma de ensayo I.N.V E-611-13.

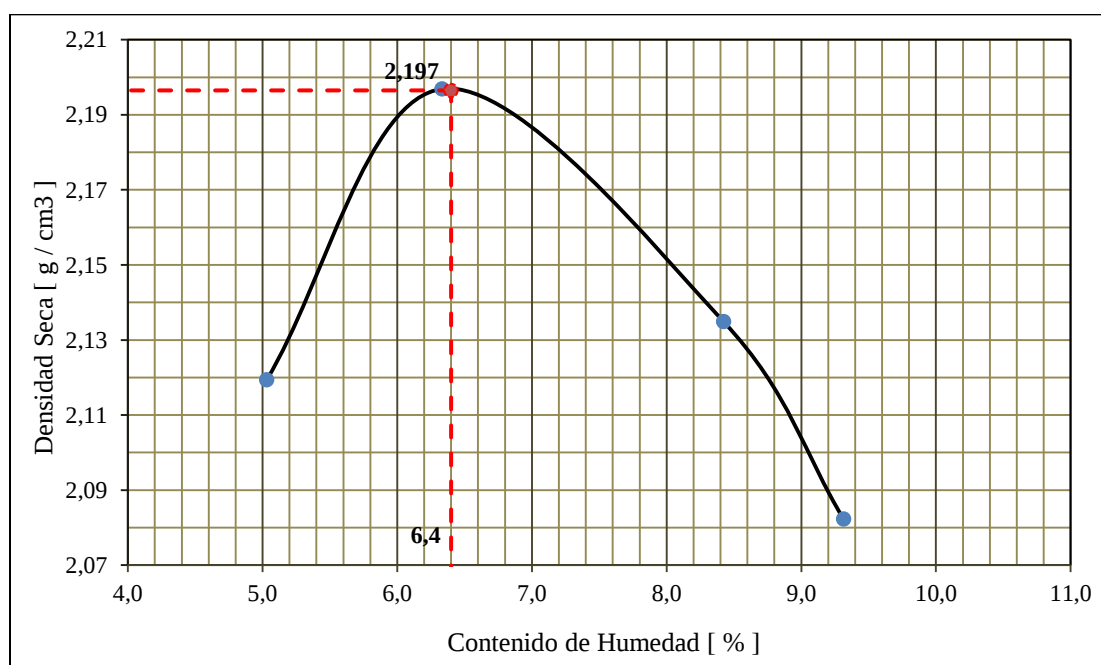


Gráfico 12. Curva de compactación para BTC-25 con 4% de cemento tipo MCH marca Argos.
Fuente: Elaboración propia.

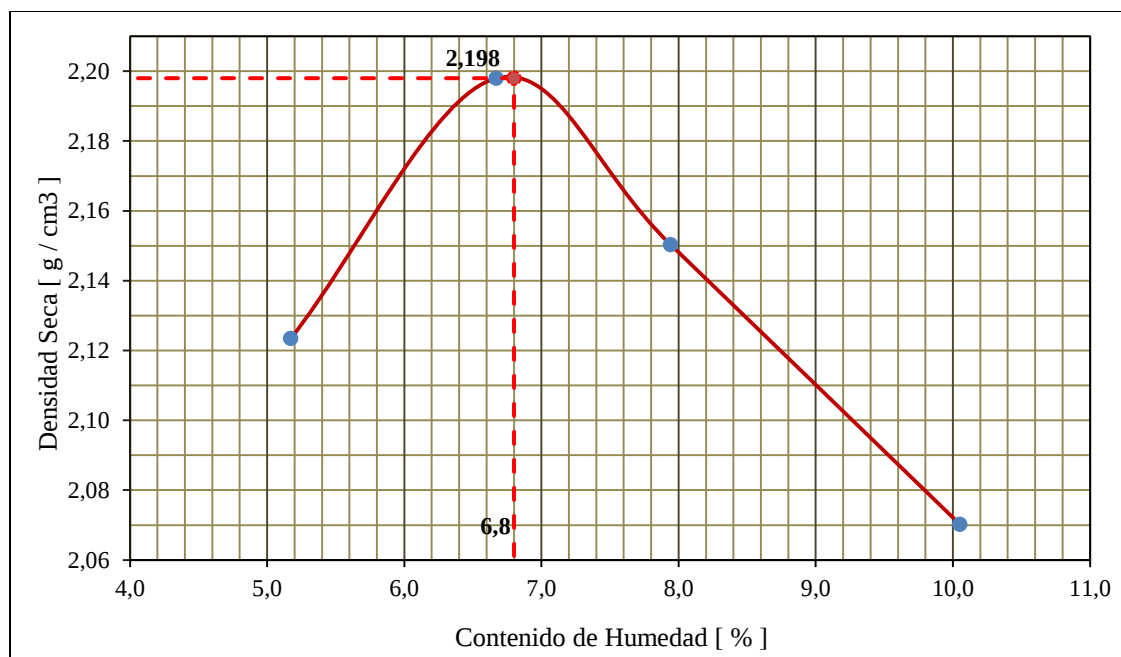


Gráfico 13. Curva de compactación para BTC-38 con 4% de cemento tipo MCH marca Argos.
Fuente: Elaboración propia.

El contenido de humedad óptimo para la BTC-25 es de 6,4% y su densidad seca máxima corresponde a 2,20g/cm³ y para la BTC-38 la $w_{\text{óptima}}$ es de 6,8% y $\gamma_{d_{\text{máx}}}$ de 2,20g/cm³.

6.2.2. Resistencia a la compresión

La norma de ensayo INV E-614-13 es la que corresponde a esta parte, en la Tabla 10, se observa que la norma de ensayo que se indica debe ser ajustada y en el capítulo 3, artículo 351 como Nota 1 de la Tabla 351-6 dice literalmente “*el ajuste de la norma de ensayo INV E-614 se refiere a la modificación de las dimensiones de las probetas, las cuales serán elaboradas según las indicaciones de la Tabla 351-5*”, se hace con el método A de la E-614 porque un porcentaje menor del 30% del material se retiene en el tamiz de $\frac{3}{4}$ y se utiliza el molde pequeño del ensayo de Proctor y compacta con el martillo de 4,536 kg por las razones que se explican en el numeral 6.2. Luego de enrasar la probeta, se retira del molde con ayuda de un gato hidráulico y se deja

curando durante 7 días. Como en los laboratorios de la universidad no hay cámara húmeda, lo que se hizo fue envolver las probetas en papel film o vinipel y en una bolsa sellable. Luego del tiempo de curado se dejan en inmersión por 4 horas, ver Ilustración 4 y después de esto se capina con azufre como se muestra en la Ilustración 5.

Tabla 10. Criterios de diseño para la mezcla de base tratada con cemento. Fuente: (INVIAS, 2013, p. 2).

ENSAYO	NORMA DE ENSAYO INV	NIVEL DE RESISTENCIA	
		R 3.5	R 5.2
Resistencia			
Resistencia a la compresión a los 7 días, MPa	E-614 ajustado		
Mínima		3.5	5.2
Máxima		7.0	7.0



Ilustración 4. Inmersión de probetas para ensayo de resistencia a la compresión. Fuente: Propia



Ilustración 5. Capinado de probetas con azufre. Fuente: Propia

Para este proyecto se busca el contenido de cemento que cumpla con la Resistencia mínima a la compresión a los 7 días que es de 3.5 MPa, en los siguientes numerales se presentan los resultados obtenidos para cada tipo de base granular, con cada tipo de cemento.

6.2.2.1. Resistencia con cemento de uso general o UG

Se preparan dos probetas con el procedimiento de la norma de ensayo INV E-611-13, tal cual como se hace en los ensayos de relaciones de peso unitario contra humedad, con la humedad óptima determinada en el ensayo de Proctor del Gráfico 10 y con 4% y 8% de contenido de cemento de Uso General. En la Tabla 11 se resumen los datos de esta base (BTC-25) con el cemento de tipo UG y de la cual se escoge el 4% de cemento para el diseño debido a que alcanza una resistencia de 3.85 MPa, lo cual es mayor a la resistencia mínima requerida, pero no se puede diseñar la mezcla con un contenido de cemento menor al 4%.

Tabla 11. Resumen de datos de cada espécimen para la BTC-25 con cemento de tipo UG.
Fuente: Elaboración propia.

	ESPÉCIMEN	ESPÉCIMEN
Número de identificación del espécimen	4%	8%
Diámetro promedio del espécimen [mm]	101.42	101.45
Área de la sección transversal [mm ²]	8078.22	8083.00
Carga máxima [N]	31100.00	45300.00
Resistencia a la compresión [MPa]	3.85	5.60
Edad del espécimen	7 días	7 días

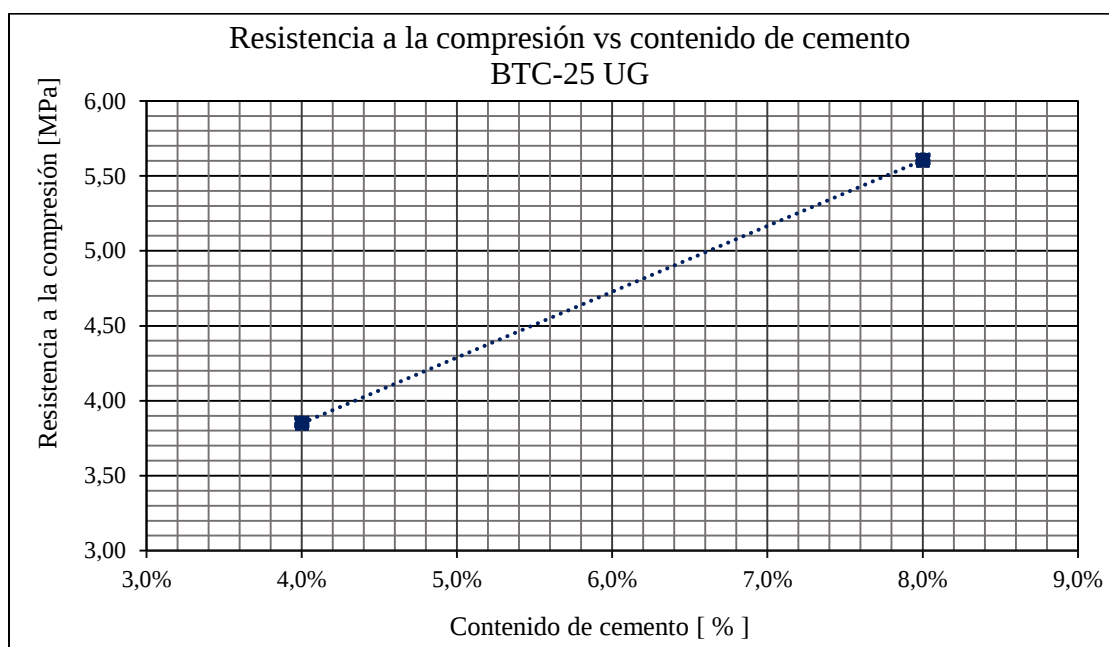


Gráfico 14. Resistencia a la compresión vs contenido de cemento de la base BTC-25 con cemento UG. Fuente: Elaboración propia.

Inicialmente, al igual que con la BTC-25 con cemento UG se hacen 2 probetas de la BTC-38 con 4% y 8% de cemento, pero al revisar los datos, con 4% de cemento no alcanza la resistencia mínima de 3.5 MPa, por lo tanto, se procede a realizar probetas con 5% y 7% de cemento. En la Tabla 12 se encuentran los datos correspondientes a este tipo de base, y se escoge un 5% de cemento para el diseño de esta mezcla.

Tabla 12. Resumen de datos de cada espécimen para la BTC-38 con cemento de tipo UG.
Fuente: Elaboración propia.

	ESPÉCIMEN	ESPÉCIMEN	ESPÉCIMEN	ESPÉCIMEN
Número de identificación del espécimen	4%	5%	7%	8%
Diámetro promedio del espécimen [mm]	101.28	101.30	101.48	101.30
Área de la sección transversal [mm ²]	8056.73	8059.51	8087.65	8059.51
Carga máxima [N]	25300.00	33100.00	42200.00	47600.00
Resistencia a la compresión [MPa]	3.14	4.11	5.22	5.91
Edad del espécimen	7 días	7 días	7 días	7 días

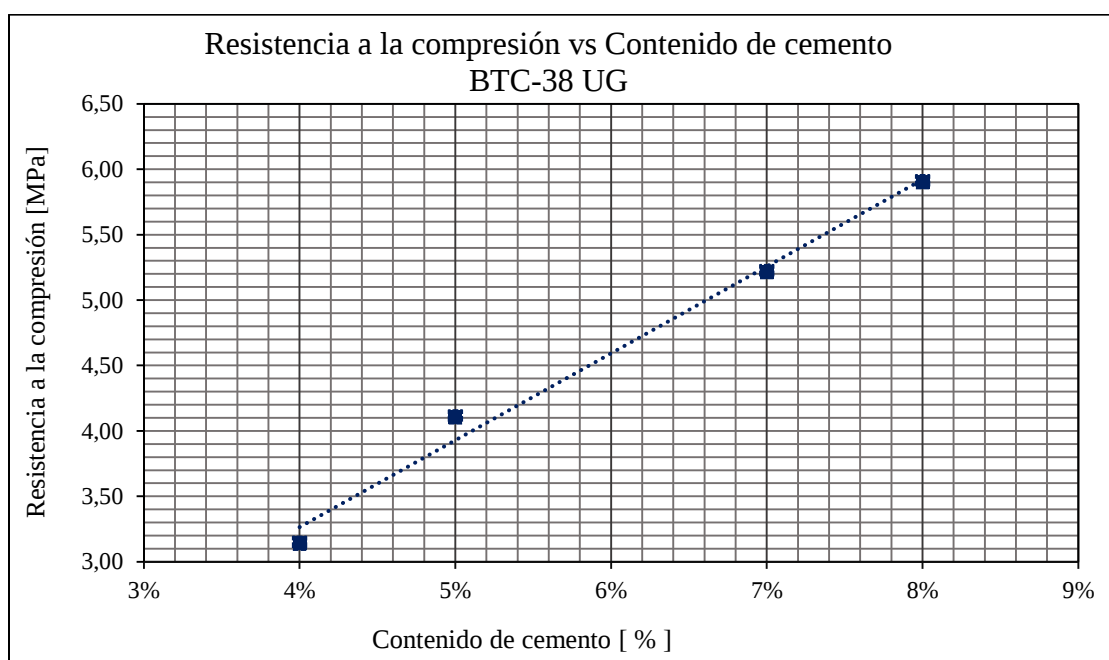


Gráfico 15. Resistencia a la compresión vs contenido de cemento de la BTC-38 con cemento UG. Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el porcentaje de cemento para este caso queda del 5% se debe hacer un nuevo Proctor para determinar la humedad óptima, por lo tanto, en el

Gráfico 16, se muestra la curva de Proctor para 5% de cemento, para el cual se obtiene una densidad seca máxima de 2.19g/cm³ y una humedad óptima de 7.2%.

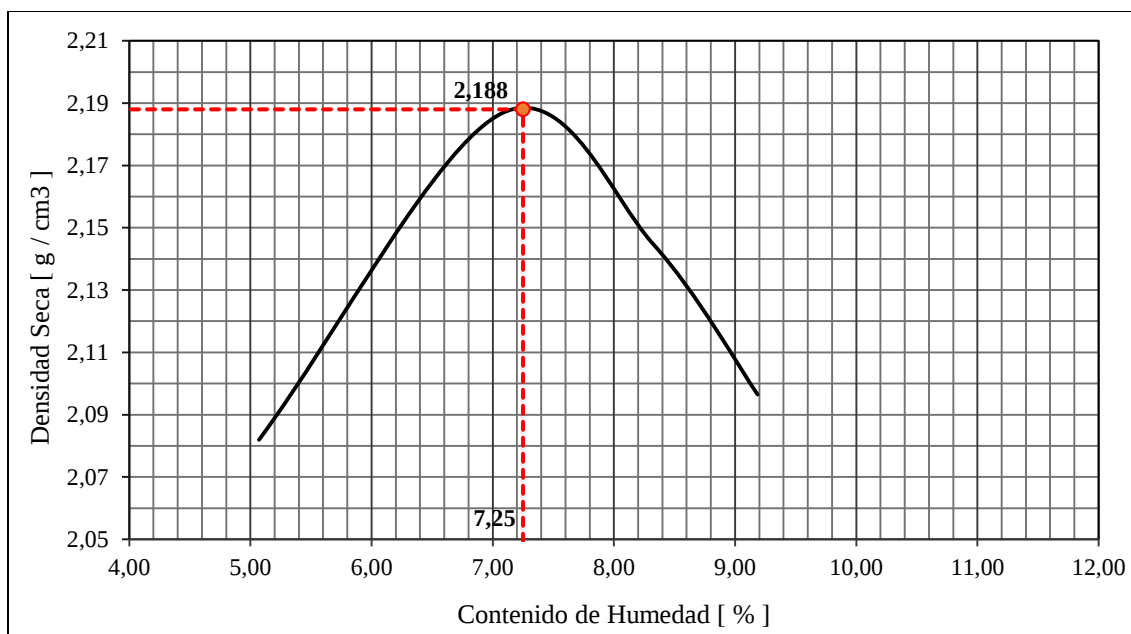


Gráfico 16. Curva de Proctor de la BTC-38 con cemento UG con 5% de cemento UG. Fuente: Elaboración propia.

6.2.2.2. Resistencia con cemento de moderado calor de hidratación o MCH.

Nuevamente, se realizan dos especímenes con 4% y 8% de cemento de Moderado Calor de Hidratación (MCH) con la BTC-25. En la Tabla 13 se pueden observar los datos para este caso y la resistencia con el 4% de cemento de tipo MCH es notoriamente mayor que con el cemento de tipo UG.

Tabla 13. Resumen de datos de cada espécimen para la BTC-25 con cemento de tipo MCH. Fuente: Elaboración propia.

	ESPÉCIMEN	ESPÉCIMEN
Número de identificación del espécimen	4%	8%
Diámetro promedio del espécimen [mm]	101.54	101.56
Área de la sección transversal [mm²]	8097.75	8100.54
Carga máxima [N]	42100.00	80700.00

Resistencia a la compresión [MPa]	5.20	9.96
Edad del espécimen	7 días	7 días

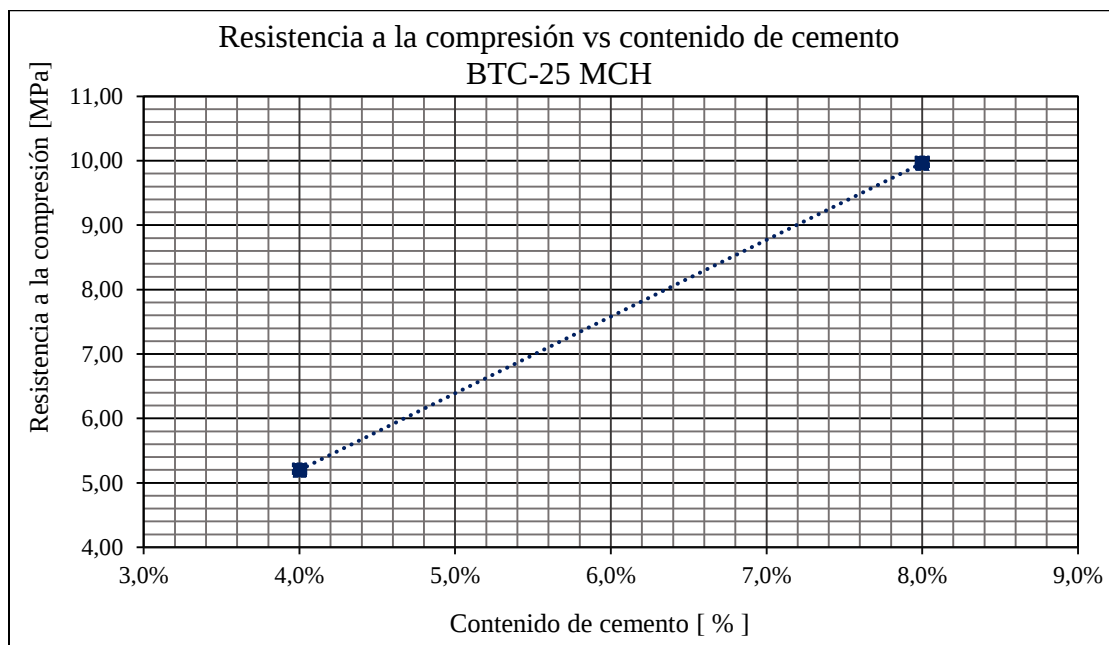


Gráfico 17. Resistencia a la compresión vs contenido de cemento de la BTC-25 con cemento MCH. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, para la base BTC-38 con cemento de tipo MCH, también se muestran en la Tabla 14 la resistencia a la compresión más alta que con cemento de tipo UG, pero un poco menor con respecto a la base BTC-25 con cemento MCH.

Tabla 14. Resumen de datos de cada espécimen para la BTC-38 con cemento de tipo MCH. Fuente: Elaboración propia.

	ESPÉCIMEN	ESPÉCIMEN
Número de identificación del espécimen	4%	8%
Diámetro promedio del espécimen [mm]	101.71	101.64
Área de la sección transversal [mm ²]	8124.48	8113.31

Carga máxima [N]	34300.00	74500.00
Resistencia a la compresión [MPa]	4.22	9.18
Edad del espécimen	7 días	7 días

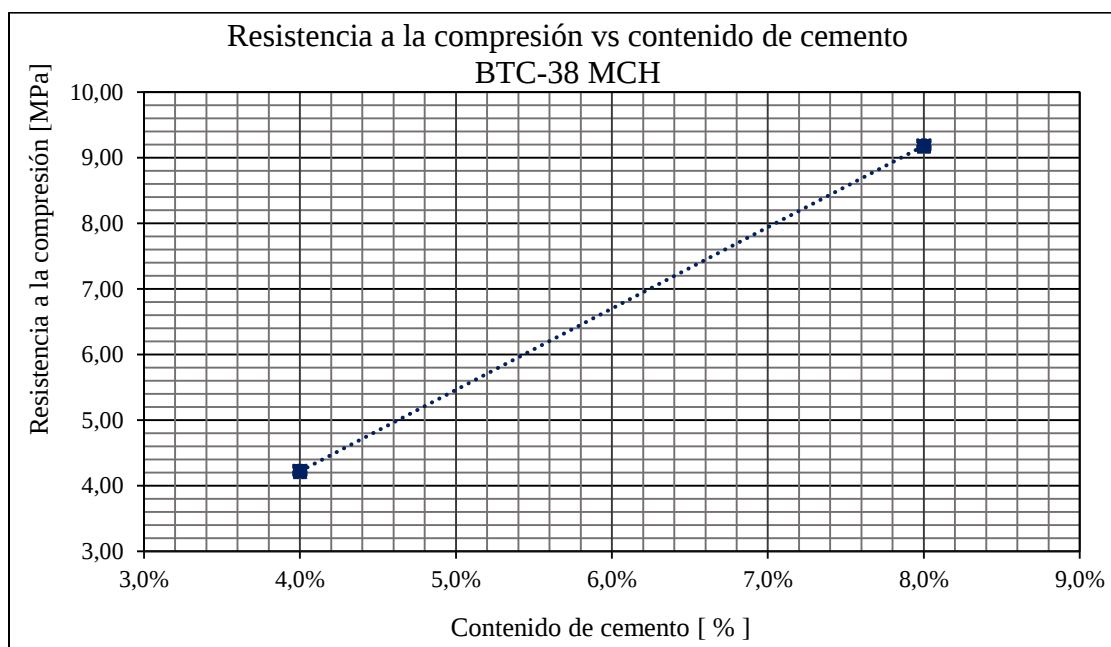


Gráfico 18. Resistencia a la compresión vs contenido de cemento de la BTC-38 con cemento MCH. Fuente: Elaboración propia.

6.3. Trabajabilidad

El ensayo de trabajabilidad consiste en realizar varias probetas con la dosificación de cemento requerida para la resistencia mínima a la compresión y el contenido óptimo de agua, según el procedimiento de compactación I.N.V E-611-13 con un tiempo definido entre probetas. Para las probetas con cemento hidráulico de uso general (UG) se compactan cada 30 minutos y con cemento de moderado calor de hidratación (MCH) cada 60 minutos. Cabe mencionar que para este ensayo se tienen cuenta las pautas de la norma española UNE-E 13286-45 y lo que se busca

con él, es el tiempo máximo que puede transcurrir desde la mezcla de los materiales hasta su compactación con el fin de que no pierda sus propiedades mecánicas.



Ilustración 6. Ensayo de trabajabilidad para BTC-25 con 4% de cemento tipo UG marca Argos.
Fuente: Propia.

6.3.1. Ensayo de trabajabilidad con cemento de uso general o UG

La determinación del periodo de trabajabilidad para las mezclas de BTC-25 y BTC-38 con cemento hidráulico de uso general (UG) se basa en realizar el ensayo Proctor según lo estipulado en la norma I.N.V E-611-13 cada 30 minutos el número de veces que sea necesario y posterior a ello se grafica el tiempo transcurrido en cada una de las probetas y la densidad seca en porcentaje de la máxima Proctor previamente establecida.

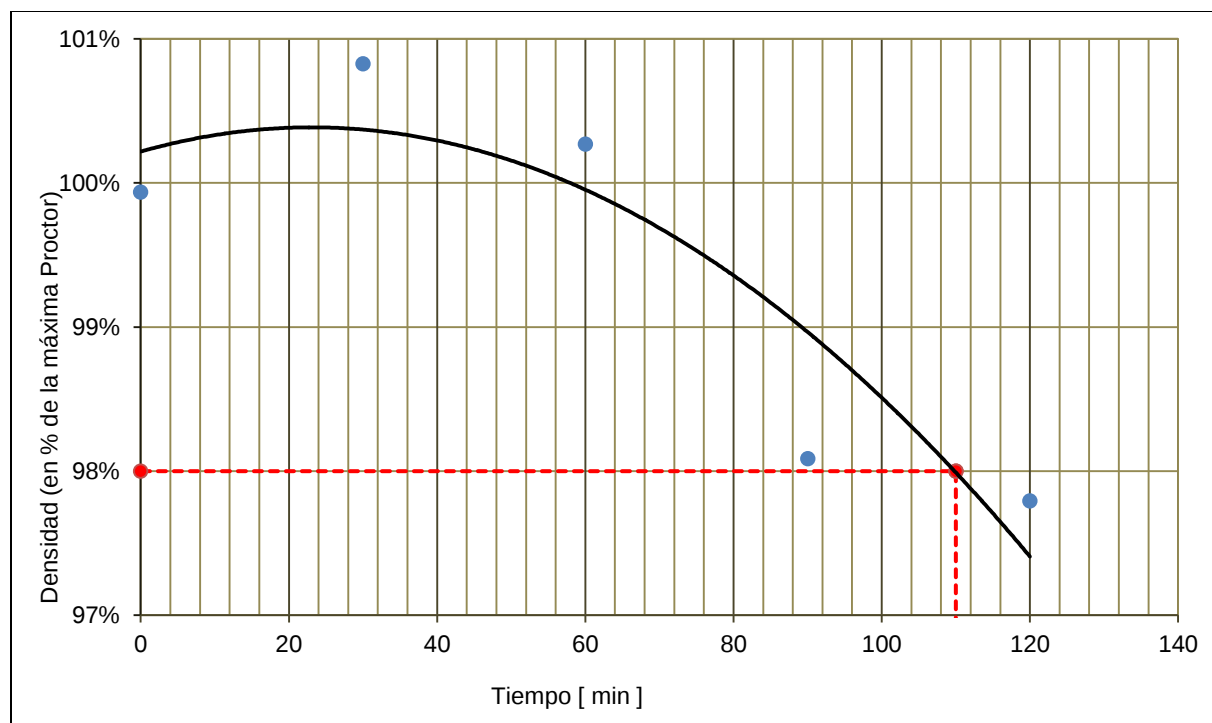


Gráfico 19. Curva de trabajabilidad para BTC-25 con 4% de cemento tipo UG marca Argos.
Fuente: Elaboración propia.

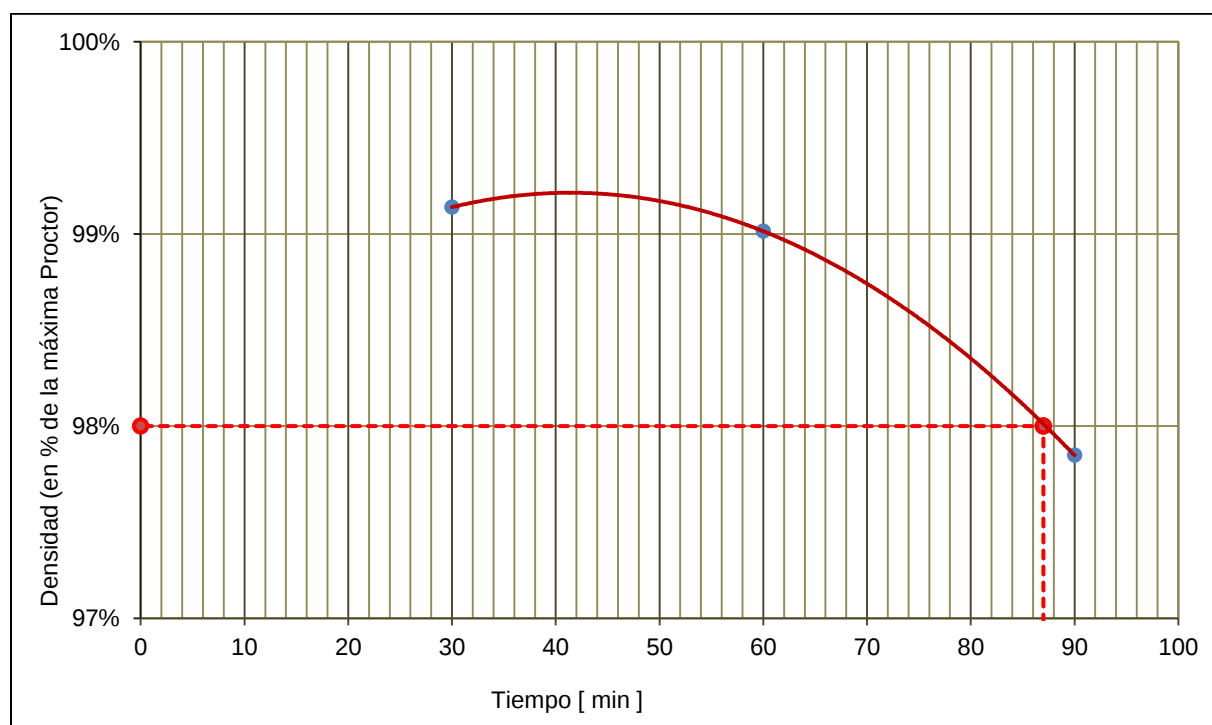


Gráfico 20. Curva de trabajabilidad para BTC-38 con 5% de cemento tipo UG marca Argos.
Fuente: Elaboración propia.

El período de trabajabilidad alcanzado para la BTC-25 con cemento UG es de 110 minutos y para la BTC-38 con el mismo tipo de cemento es de 87 minutos, siendo estos resultados para una compactación mínima del 98% de la máxima densidad seca del ensayo Proctor exigido por la especificación general de construcción de carreteras.

6.3.2. Ensayo de trabajabilidad con cemento de moderado calor de hidratación o MCH

La determinación del periodo de trabajabilidad para las mezclas de BTC-25 y BTC-38 con cemento de moderado calor de hidratación (MCH) se basa en realizar el ensayo Proctor según lo estipulado en la norma I.N.V E-611-13 cada 60 minutos el número de veces que sea necesario y posterior a ello se grafica el tiempo transcurrido en cada una de las probetas y la densidad seca en porcentaje de la máxima Proctor previamente establecida.

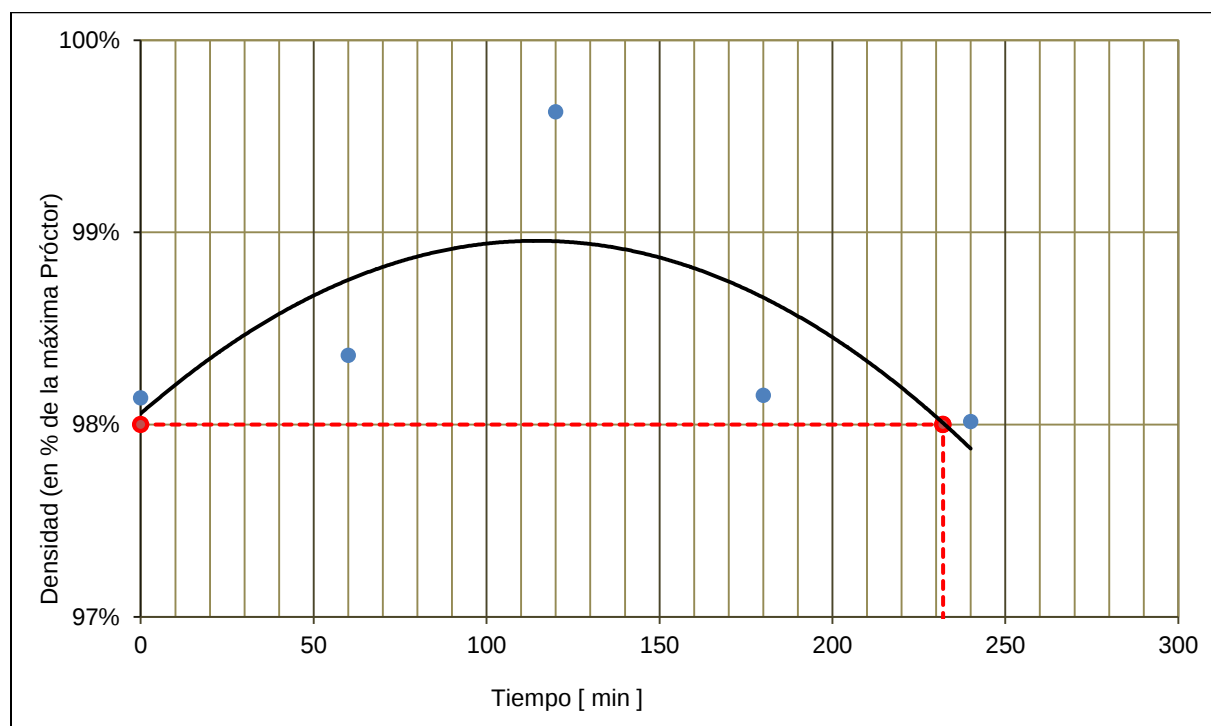


Gráfico 21. Curva de trabajabilidad para BTC-25 con 4% de cemento tipo MCH marca Argos.
Fuente: Elaboración propia.

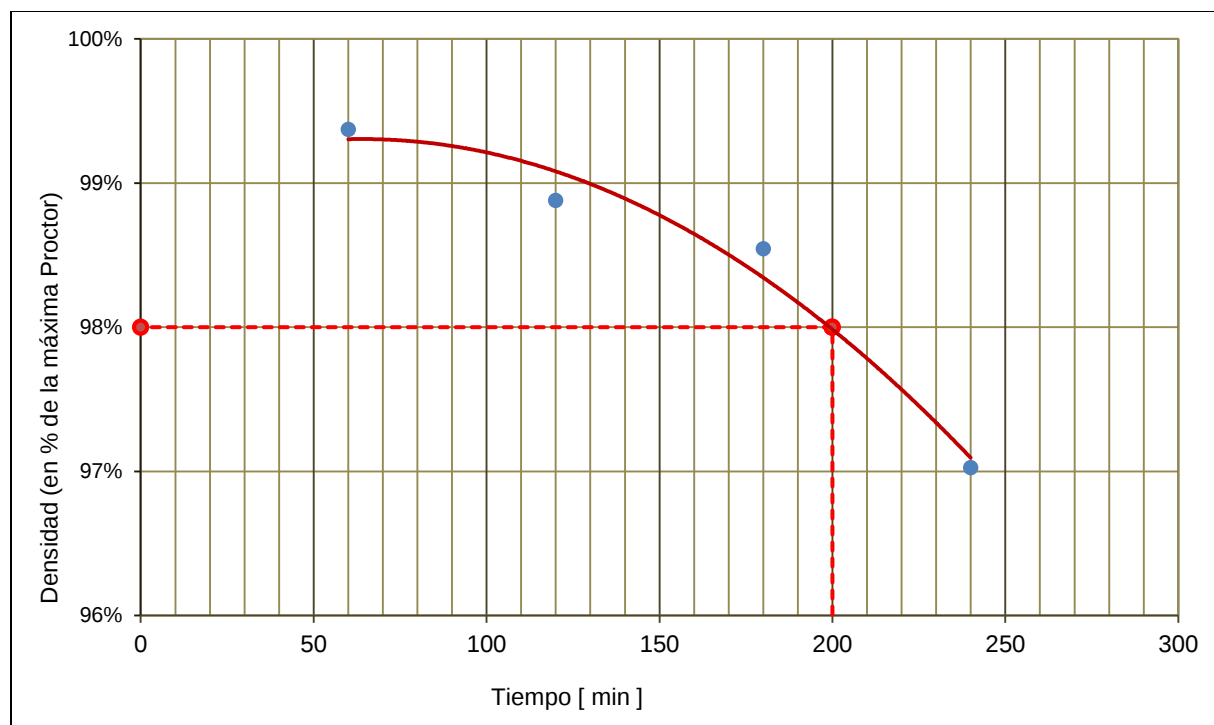


Gráfico 22. Curva de trabajabilidad para BTC-38 con 4% de cemento tipo MCH marca Argos.
Fuente: Elaboración propia.

El período de trabajabilidad alcanzado para la BTC-25 con cemento MCH es de 232 minutos y para la BTC-38 con el mismo tipo de cemento es de 200 minutos, siendo estos resultados para una compactación mínima del 98% de la máxima densidad seca del ensayo Proctor exigido por la especificación general de construcción de carreteras.

7. Conclusiones

Los resultados de densidad seca y contenido de agua óptimo con 4% de cemento UG corresponden a 2.17 g/cm^3 y 6.6% para la BTC-25, 2.16 g/cm^3 y 7.1% para la BTC-38; con 5% de cemento UG los resultados son 2.19 g/cm^3 y 7.2% para la BTC-38 (que era la única base que se tenía que hacer con 5% de cemento UG); con 4% de cemento MCH se obtiene 2.20 g/cm^3 y 6.4% para la BTC-25 y 2.20 g/cm^3 y 6.8% para la BTC-38. De acuerdo con estos resultados, entre más material fino tenga la base, cuando se mezcla con cualquier tipo de cemento ya sea es este caso UG o MCH que fueron los que se utilizaron, se necesita menos agua para obtener la densidad seca máxima. Además de esto, las mezclas con el cemento MCH requieren una menor cantidad de agua, manteniendo la premisa anteriormente expuesta.

A causa de que el diseño de las mezclas BTC-25 con cemento UG, BTC-25 con cemento MCH, BTC-38 con cemento MCH quedaron con un 4% de cemento “óptimo”, no es necesario

corregir la humedad porque los ensayos de Proctor se habían hecho con ese mismo porcentaje, pero en el caso de la mezcla BTC-38 con cemento UG, se determinó un 5% de cemento, que era el que cumplía con la resistencia mínima que exigía la norma en el artículo 351-13, al corregir su humedad, esta aumentó en de 7.1% a 7.2%.

La resistencia a la compresión para las probetas con cemento UG que cumplían con el requerimiento mínimo de 3.5MPa fueron de: 3.8MPa, BTC-25 con 4% de cemento y 4.1MPa, BTC-38 con 5% de cemento; y con cemento MCH fueron de: 5.2MPa, BTC-25 con 4% de cemento y 4.2MPa, BTC-38 con 4% de cemento. Teniendo en cuenta estos valores, efectivamente el cemento de moderado calor de hidratación o MCH permite que se obtenga una mayor resistencia de una base granular, por lo tanto, se considera preciso, que la norma INVIAS autorice el uso de un menor porcentaje de este cemento especial.

El tiempo de trabajabilidad que se obtiene de cada mezcla, para una compactación igual al 98% de la densidad seca máxima del ensayo Proctor es de 110 minutos con la BTC-25 con cemento UG, 87 minutos con la BTC-38 con cemento UG, 232 minutos para la BTC-25 con cemento MCH y 220 minutos para la BTC-38 con cemento MCH. Esto evidencia que el cemento MCH permite un mayor lapso tiempo entre el proceso de mezclado y compactación, a diferencia del UG que es el que se ha utilizado comúnmente en las intervenciones en el país, y esto es determinante a la hora de la ejecución de un proyecto.

Es pertinente mencionar que en la normativa nacional vigente no se cuenta con una norma específica para el ensayo de trabajabilidad, por este motivo, sería prudente que se estructurara una norma para tal fin, bajo las condiciones que se presentan en el país, porque actualmente se hacen bajo las normativas de otros países.

También cabe mencionar que para futuros trabajos encaminados en la dirección expuesta aquí se podrían llevar a cabo ensayos de humedecimiento y secado que permiten determinar las pérdidas, cambios de humedad y los cambios de volumen, que permita establecer alguna otra ventaja entre el cemento UG y cemento MCH.

8. Bibliografía

Avila, T., & Loría Salazar, L. G. (Noviembre de 2012). *Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)*.

(L. N. (UCR), Ed.) Obtenido de Experiencia costarricense en diseño, aseguramiento de la calidad y construcción de bases estabilizadas con cemento LM-PI-PU-001-12.

ACI. (2001). *American Concrete Institute (ACI)* . Obtenido de Committee 308R. Guide to Curing Concrete.

ACI. (July de 2009). *Reported by ACI Committee 230*. Obtenido de Report on Soil Cement:

<https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/230.1R-09web.pdf>

Acurio, A. C. (2016). Comparación técnico económica del uso de bases granulares y bases estabilizadas con cemento, para diversos casos de tráfico, con y sin capa de rodadura, para nuestro medio.

Guayaquil, Ecuador: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

Arce, M. (Agosto de 2011). *Boletín Técnico Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)*.

Obtenido de Bases estabilizadas con cemento. Algunos comentarios sobre sus ventajas e inconvenientes.

ARGOS. (14 de Julio de 2015). *360º en Concreto - Blog Argos*. Obtenido de Webinar 360º en Concreto -

Estabilización de Suelos con Cemento: Alternativa Sostenible:

<https://www.youtube.com/watch?v=Zpx8TH8upr4>

Barksdale, R., & Vergnolle, R. (1968). Expansive Cement Stabilization of Bases. Obtenido de

<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1968/255/255-003.pdf>

Corral, J. T. (Octubre-Diciembre de 2008). *El suelo-cemento como material de construcción*. (I. T.

Domingo, Ed.) Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/870/87012672003.pdf>

Felt, E. (1953). Thesis professional civil Eng. *Factors influencing the phisical proprieties of soil-cement*.

Minneapolis, Estados Unidos: Universidad de Minneapolis.

HOLCIM. (2016). *Soluciones en cemento Holcim Base Vial*. Obtenido de

https://www.portaldirecta.com/portaldirecta/ec/CEMENTO_BASEVIAL_S.pdf

Ingenieros GF S.A.S. (2019). *Cantera El Pencal*. Obtenido de

<http://www.ingenierosgf.com.co/projects/view/16>

Ingles, O., & Metcalf, J. (1972). *Soil stabilization: principles and practice* (Vol. II). Sydney, Australia:

Butterworths.

Lavalle, E. d. (2013). *Suelo-Cemento. Sus usos, propiedades y aplicaciones*. México, D.F.: Instituto

Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. .

Montejo Fonseca, A., Montejo Piratova, A., & Montejo Piratova, A. (2018). *Estabilización de Suelos* (1a

ed.). Bogotá, Colombia: Ediciones de la U.

9. Anexos