

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
CHOTA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**EVALUACIÓN DEL CBR DE LA SUBRASANTE DE LA
CARRETERA EL VERDE – NUMBRAL, KM 1+500 AL KM 2+500,
ADICIONANDO RESIDUOS DE CARBÓN MINERAL,
CHALAMARCA, CHOTA**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Presentado por: JHONN BILLER ESQUÉN VÁSQUEZ

Asesor(a): Mg. Ing. CLAUDIA EMILIA BENVIDEZ NUÑEZ

Chota – Perú

2022

**Evaluación del CBR de la subrasante de la carretera el Verde
– Numbral, Km 1+500 al Km 2+500, adicionando residuos de
carbón mineral, Chalamarca, Chota**

POR:

Jhonn Biller Esquén Vásquez

**Presentada a la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la
Universidad Nacional Autónoma de Chota para optar el título
de
INGENIERO CIVIL**

APROBADA POR EL JURADO INTEGRADO POR



Dr. Ing. Elmer Natividad Chávez Vásquez

PRESIDENTE



Dra Ing. Carmen Rosa Cárdenas Rosales

SECRETARIO



Mg. Ing. Luis Fernando Romero Chiquilín

VOCAL

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida y la inteligencia para lograr mis metas, por guiarme durante mi carrera profesional.

A mis padres, Marina y Segundo, a mis hermanos, por su apoyo incondicional. A todos mis amigos y todas las personas que estuvieron allí siempre para apoyarme, que confiaron y creyeron en mi durante mi formación profesional.

A mi asesora de tesis la Ing. Claudia Emilia Benavidez Núñez, por su orientación y asesoramiento en el desarrollo de la presente investigación, ya que con su vasto conocimiento supo guiarme de la mejor manera en todo el proceso de la investigación.

A la Universidad Nacional Autónoma de Chota, mi alma mater, quien me acogió en sus aulas y me brindó los conocimientos, técnicas, destrezas y capacidades para la vida profesional.

DEDICATORIA

A mis padres: Marina Eideht y Segundo Manuel, a quienes les debo lo que soy y que nunca se rindieron, por guiarme en la senda del buen camino con valores y principios, por su apoyo moral para lograr mis metas; son mi razón de ser, mi motor y motivo de superación, mi mayor ejemplo de constancia, a ustedes les dedico este trabajo.

A mis hermanos: Iris Fabiola, Naghiely Ghianiveht, Danna Iveht y Jhosly Maxbell; por estar siempre presentes con su firme apoyo moral e incondicional, dándome fuerzas para seguir adelante y por ser mi mayor motivación en la vida.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	15
1.1. Planteamiento del problema.....	15
1.2. Formulación del problema	18
1.3. Justificación e importancia	18
1.4. Delimitación de la investigación.....	19
1.5. Objetivos	20
1.5.1. Objetivo general.....	20
1.5.2. Objetivos específicos	20
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	21
2.1. Antecedentes	21
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	21
2.1.2. Antecedentes nacionales	24
2.1.3. Antecedentes regionales	26
2.2. Marco teórico.....	28
2.2.1. Teoría de compresibilidad y expansión del suelo.....	28
2.2.2. Teoría de la capacidad de soporte (CBR)	28
2.3. Marco conceptual	29
2.3.1. Residuos de carbón mineral.....	29
2.3.2. Carreteras	34
2.3.3. Subrasante.....	35
2.3.4. Suelo	36
2.3.5. Capacidad de soporte del suelo (CBR).....	44
2.3.6. Estabilización de la subrasante	46
2.3.7. Estabilización de la subrasante con residuos de carbón	48
2.4. Definición de términos	49

2.5. Hipótesis	50
2.6. Operacionalización de variables	50
2.6.1. Variable independiente	50
2.6.2. Variable dependiente	50
2.6.3. Operacionalización de variables	51
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	52
3.1. Ubicación geográfica del estudio	52
3.2. Tipo y nivel de investigación	55
3.3. Diseño de investigación	56
3.4. Población, muestra y muestreo	58
3.4.1. Población	58
3.4.2. Muestra	59
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	63
3.5.1. Técnicas de recolección de datos	63
3.5.2. Instrumentos de recolección de datos	63
3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	64
3.6.1. Proceso de obtención de información	64
3.6.2. Procesamiento de información	70
3.6.3. Análisis de información	70
3.7. Aspectos éticos	70
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	72
4.1. Descripción de resultados	72
4.1.1. Características físicas del residuo de carbón mineral	72
4.1.2. Características físico – mecánicas del suelo natural	76
4.1.3. Capacidad de soporte del suelo con residuos de carbón mineral.....	90
4.1.4. Dosificación óptima de residuos de carbón mineral	110
4.1.5. Análisis técnico-económico-ambiental.....	115
4.2. Discusión de resultados	122
4.3. Contrastación de hipótesis	128
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	135

5.1. Conclusiones	135
5.2. Recomendaciones y/o sugerencias	137
CAPÍTULO VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138
CAPÍTULO VII. ANEXOS	149
Anexo A. Matriz de consistencia.....	149
Anexo B. Panel fotográfico	150
Anexo C. Certificados de INACAL	164
Anexo D. Estudio de residuos de carbón.....	165
Anexo E. Estudio de mecánica de suelos	166
Anexo F. Planos.....	167

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Clasificación de Carbones Minerales	32
Tabla 2	Recursos y Reservas Totales Estimadas de Carbón en el Perú	33
Tabla 3	Clasificación de Carreteras según Demanda	34
Tabla 4	Categorías de la Subrasante.....	35
Tabla 5	Clasificación de Suelos según Tamaño de Partículas.....	37
Tabla 6	Clasificación de Suelos, según Índice de Plasticidad.....	38
Tabla 7	Especificaciones de la Prueba Proctor Modificada	43
Tabla 8	Matriz de Operacionalización de Variables	51
Tabla 9	Tipo de Investigación según los Principales Criterios	55
Tabla 10	Ubicación Geográfica de las Calicatas, en el Km 1+500 al Km 2+500 de la Carretera El Verde – Numbral	60
Tabla 11	Ensayos a Muestras de Suelo Natural	61
Tabla 12	Número de Especímenes para el Ensayo de Compactación	62
Tabla 13	Número de Especímenes para el Ensayo de CBR.....	62
Tabla 14	Análisis Granulométrico de los Residuos de Carbón Mineral	72
Tabla 15	Análisis del Límite Líquido, Residuos de Carbón Mineral	74
Tabla 16	Análisis del Límite Plástico, Residuos de Carbón Mineral.....	74
Tabla 17	Características de los Residuos de Carbón Mineral	75
Tabla 18	Análisis Granulométrico del Suelo	76
Tabla 19	Contenido de Humedad del Suelo	77
Tabla 20	Análisis del Límite Líquido del Suelo.....	78
Tabla 21	Límite Plástico del Suelo.....	78
Tabla 22	Límites de Consistencia del Suelo.....	79
Tabla 23	Clasificación del Suelo del Km 1+500 a 2+500, Carretera El Verde – Numbral	81
Tabla 24	Análisis de Compactación del Suelo de la Subrasante del Km 1+500 a 2+500, Carretera El Verde – Numbral	82
Tabla 25	Expansión (%) del Suelo de las Calicatas 1, 2 y 3	84
Tabla 26	Capacidad de Carga (CBR) del Suelo de la Subrasante.....	85
Tabla 27	Características Físicas y Mecánicas del suelo Natural de la Subrasante de la Carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500	89
Tabla 28	Compactación del Suelo de la Calicata 1, con Residuos de Carbón Mineral.....	90
Tabla 29	Expansión del Suelo de la Calicata 1, con Residuos de Carbón Mineral.....	93
Tabla 30	CBR de la Calicata 1, con Residuos de Carbón Mineral.....	94
Tabla 31	Compactación del Suelo de la Calicata 2, con Residuos de Carbón Mineral.....	97

Tabla 32	Expansión del Suelo de la Calicata 2, con Residuos de Carbón Mineral.....	99
Tabla 33	CBR de la Calicata 2, con Residuos de Carbón Mineral.....	101
Tabla 34	Compactación del Suelo de la Calicata 3, con Residuos de Carbón Mineral.....	103
Tabla 35	Expansión del Suelo de la Calicata 3, con Residuos de Carbón Mineral.....	107
Tabla 36	CBR de la Calicata 3, con Residuos de Carbón Mineral.....	108
Tabla 37	Características Mecánicas del Suelo de la Calicata 1, con Residuos de Carbón Mineral	110
Tabla 38	Características Mecánicas del Suelo de la Calicata 2, con Residuos de Carbón Mineral	111
Tabla 39	Características Mecánicas del Suelo de la Calicata 3, con Residuos de Carbón Mineral	112
Tabla 40	Estabilización con Residuos de Carbón	115
Tabla 41	Estabilización con Cal	116
Tabla 42	Estabilización con Cemento	117
Tabla 43	Costo de los Residuos de Carbón Mineral	119
Tabla 44	Costo de los Materiales para Estabilizar 1 m ³ de Suelo	119
Tabla 45	Características Físico – Mecánicas del Suelo de la Subrasante de la Carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, al adicionar Residuos de Carbón Mineral	127
Tabla 46	Datos de la Capacidad de Soporte del Suelo, para Análisis ANOVA.....	129
Tabla 47	Análisis de Varianza de la Capacidad de Soporte	130
Tabla 48	Prueba t-test.....	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Carreteras (Km), Cajamarca – 2018	15
Figura 2	Estado de Conservación de Vías de la Ciudad de Chota	16
Figura 3	Residuos de Carbón Mineral	29
Figura 4	Modelo Tradicional que muestra a los Ciclotemas y Depósitos de Carbón de una Cuenca	30
Figura 5	Carbón Mineral.....	31
Figura 6	Tipos de Carbones	32
Figura 7	Carretera Pavimentada y Sin Pavimentar, Sección Típica.....	34
Figura 8	Distintos Tipos de Formaciones de Suelo.....	36
Figura 9	Esquema de una Muestra de Suelo y el Modelo de sus 3 Fases	36
Figura 10	Carta de Plasticidad Sistema de Clasificación AASHTO.....	39
Figura 11	Clasificación de los Suelos basada en AASHTO M 145 y/o ASTM D 3282.....	40
Figura 12	Carta de Plasticidad Sistema de Clasificación SUCS	41
Figura 13	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).....	42
Figura 14	Aplicación de la Carga de Penetración en el Ensayo CBR.....	44
Figura 15	Ejemplo de Curva CBR	45
Figura 16	Tipos de Estabilizaciones	46
Figura 17	Ubicación del Distrito de Chalamarca	52
Figura 18	Ubicación de la Carretera El Verde – Numbral	53
Figura 19	Ubicación de la “Mina La Palma”	54
Figura 20	Diseño de Investigación Descriptivo Causal Simple	57
Figura 21	Carretera El Verde – Numbral	58
Figura 22	Km 1+500 al Km 2+500, Carretera El Verde – Numbral.....	59
Figura 23	Ubicación de las Calicatas, en el Km 1+500 al Km 2+500 de la Carretera El Verde – Numbral.....	60
Figura 24	Curva Granulométrica de los Residuos de Carbón Mineral	73
Figura 25	Curva de Fluidez de los Residuos de Carbón Mineral.....	74
Figura 26	Curva Granulométrica del Suelo.....	77
Figura 27	Curva de Fluidez del Suelo.....	79
Figura 28	Clasificación SUCS del Suelo	80
Figura 29	Clasificación AASHTO del Suelo	80
Figura 30	Curva de Compactación, Calicata 1.....	82
Figura 31	Curva de Compactación, Calicata 2.....	83
Figura 32	Curva de Compactación, Calicata 3.....	83

Figura 33	Expansión (mm) del Suelo de las Calicatas 1, 2 y 3	84
Figura 34	CBR de la Calicata 1 de la Subrasante	86
Figura 35	CBR de la Calicata 2 de la Subrasante	86
Figura 36	CBR de la Calicata 3 de la Subrasante	87
Figura 37	Capacidad de Carga (CBR) del Suelo de la Subrasante	87
Figura 38	Curva de Compactación del Suelo de la Calicata 1, con 10% de Residuos de Carbón Mineral	91
Figura 39	Curva de Compactación del Suelo de la Calicata 1, con 20% de Residuos de Carbón Mineral	91
Figura 40	Curva de Compactación del Suelo de la Calicata 1, con 30% de Residuos de Carbón Mineral	92
Figura 41	Expansión del Suelo de la Calicata 1, con Residuos de Carbón Mineral	93
Figura 42	Curva CBR de la Calicata 1, con 10% Residuos de Carbón Mineral	95
Figura 43	Curva CBR de la Calicata 1, con 20% Residuos de Carbón Mineral	95
Figura 44	Curva CBR de la Calicata 1, con 30% Residuos de Carbón Mineral	96
Figura 45	Curva de Compactación del Suelo de la Calicata 2, con 10% de Residuos de Carbón Mineral	97
Figura 46	Curva de Compactación, Calicata 2, con 20% de Residuos de Carbón Mineral	98
Figura 47	Curva de Compactación, Calicata 2, con 30% de Residuos de Carbón Mineral	98
Figura 48	Expansión del Suelo de la Calicata 2, con Residuos de Carbón Mineral	100
Figura 49	Curva CBR de la Calicata 2, con 10% Residuos de Carbón Mineral	101
Figura 50	Curva CBR de la Calicata 2, con 20% Residuos de Carbón Mineral	102
Figura 51	Curva CBR de la Calicata 2, con 30% Residuos de Carbón Mineral	102
Figura 52	Curva de Compactación, Calicata 3, con 10% de Residuos de Carbón Mineral	104
Figura 53	Curva de Compactación, Calicata 3, con 20% de Residuos de Carbón Mineral	104
Figura 54	Curva de Compactación del Suelo de la Calicata 3, con 30% de Residuos de Carbón Mineral	105
Figura 55	Expansión del Suelo de la Calicata 3, con Residuos de Carbón Mineral	106
Figura 56	Curva CBR de la Calicata 3, con 10% Residuos de Carbón Mineral	108
Figura 57	Curva CBR de la Calicata 3, con 20% Residuos de Carbón Mineral	109
Figura 58	Curva CBR de la Calicata 3, con 30% Residuos de Carbón Mineral	109
Figura 59	Capacidad de Soporte del Suelo de la Calicata 1, con Residuos de Carbón Mineral	110
Figura 60	Capacidad de Soporte del Suelo de la Calicata 2, con Residuos de Carbón Mineral	111
Figura 61	Capacidad de Soporte del Suelo de la Calicata 3, con Residuos de Carbón Mineral	112

Figura 62	CBR al 95% de MDS del Suelo con Residuos de Carbón Mineral	114
Figura 63	CBR al 100% de MDS del Suelo con Residuos de Carbón Mineral	114
Figura 64	Residuos de Carbón Mineral	121
Figura 65	Características del Carbón Mineral de la Mina “La Palma”, Chalamarca.....	122
Figura 66	Gráfico de Residuos para CBR del Suelo con Residuos de Carbón Mineral	130
Figura 67	Resumen Estadístico del CBR del Suelo con 0% de Residuos de Carbón Mineral	132
Figura 68	Resumen Estadístico, CBR del Suelo con 10% de Residuos de Carbón Mineral ..	132
Figura 69	Resumen Estadístico, CBR del Suelo con 20% de Residuos de Carbón Mineral ..	133
Figura 70	Resumen Estadístico, CBR del Suelo con 30% de Residuos de Carbón Mineral ..	133
Figura 71	ANOM, CBR según Porcentaje de Residuos de Carbón Mineral y Calicata	134
Figura 72	ANOM, CBR según Porcentaje de Residuos de Carbón Mineral y Máxima Densidad Seca (MDS).....	134

RESUMEN

Las carreteras, son el principal medio de conexión, pero muchas presentan deformaciones producto de la baja capacidad de soporte de la subrasante, siendo este el caso de la carretera El Verde – Numbral, del distrito de Chalamarca, lugar donde se ubica la mina de carbón “La Palma”, donde a diario se produce gran cantidad de ganga, que es almacena en botaderos locales. La investigación tuvo como objetivo “Evaluar la capacidad de soporte (CBR) del suelo de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, al adicionar residuos de carbón mineral de la mina “La Palma”, del distrito de Chalamarca, según los lineamientos del Manual de Carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2014)”, para ello se excavaron tres calicatas, distribuidas uniformemente, a fin de mejorar el CBR con la adición de 0, 10, 20 y 30% de residuos de carbón mineral. Al adicionar residuos de carbón mineral al suelo de cada una de las calicatas, la expansión disminuye y la capacidad de soporte aumenta, pero empieza a disminuir cuando el porcentaje de adición supera el 20%. La calicata 1, 2 y 3 se clasifican como arcilla de alta plasticidad, limo de alta plasticidad, y arena limosa, respectivamente, su CBR al 95% de MDS, al adicionar 20% de residuos de carbón mineral, aumenta de 4.20% a 6.60%, para la calicata 1, de 5.0% a 6.50% para la calicata 2, y de 5.10% a 6.5%, para la calicata 3. Se concluye, que al adicionar 20% de residuos de carbón mineral, la capacidad de soporte del suelo aumenta, calificándose como subrasante regular, según el MTC (2014).

Palabras clave: Carretera, suelo, subrasante, residuos de carbón mineral, capacidad de soporte.

ABSTRACT

Roads are the main means of connection, but many of them present deformations due to the low bearing capacity of the subgrade. This is the case of the El Verde-Numbral Road in the district of Chalamarca, where the "La Palma" coal mine is located, where a large amount of gangue is produced daily and stored in local dumps. The research aimed to "Evaluate the bearing capacity (CBR) of the soil of the subgrade of the El Verde - Numbral road, from Km 1+500 to Km 2+500, by adding mineral coal waste from the "La Palma" mine, in the district of Chalamarca, according to the guidelines of the Highway Manual of the Ministry of Transport and Communications (MTC, 2014)", for this purpose, three trenches were excavated, evenly distributed, in order to improve the CBR with the addition of 0, 10, 20 and 30% of mineral coal waste. By adding coal residues to the soil in each of the pits, the expansion decreases and the bearing capacity increases, but begins to decrease when the percentage of addition exceeds 20%. Trench 1, 2 and 3 are classified as high plasticity clay, high plasticity silt, and silty sand, respectively, their CBR at 95% MDS, when 20% coal residues are added, increases from 4.20% to 6.60%, for Trench 1, from 5.0% to 6.50% for test pit 2, and from 5.10% to 6.5% for test pit 3. It is concluded that by adding 20% of coal residues, the bearing capacity of the soil increases, qualifying it as a regular subgrade, according to the MTC (2014).

Key words: Road, soil, subgrade, coal residues, bearing capacity.

CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN

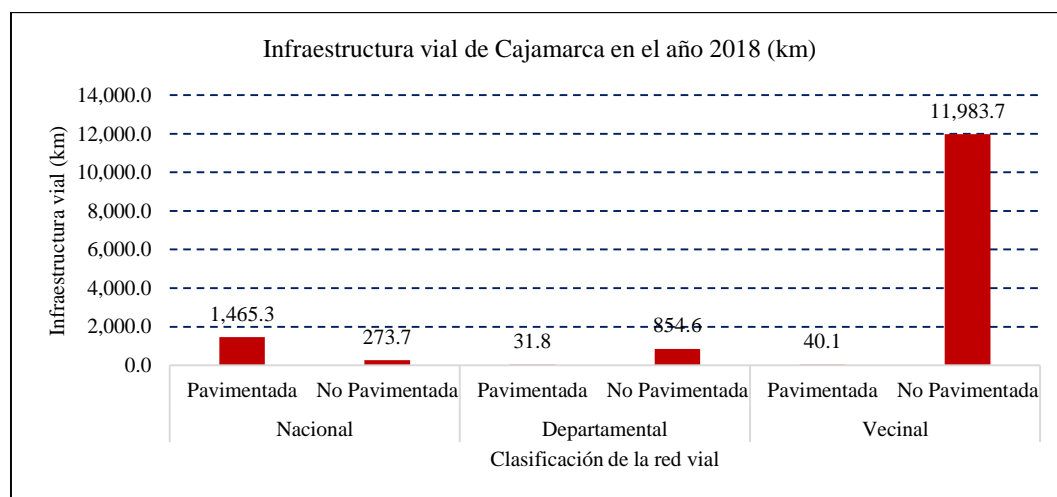
1.1. Planteamiento del problema

Un índice de progreso económico, social y comercial, es el desarrollo de la red vial de un país (Katte et al., 2019). No obstante, gran número de carreteras, pueden tener un considerable deterioro, si la subrasante, capa consolidada y/o construida para resistir la carga del tráfico (Dasho y Verma, 2019), está conformada por suelos débiles, que no presentan buena capacidad de soporte (Sadiq et al., 2020). La capacidad de carga (CBR) del suelo de la subrasante es un parámetro mecánico importante, que determina el espesor del pavimento, un CBR bajo implicará un mayor grosor del pavimento y viceversa (Katte et al, 2019).

Cajamarca, es una de las regiones del país, con mayor número de carreteras sin pavimentar (MTC, 2018), cuya superficie de rodadura, presentan rasgos de deterioro en lapsos cortos de uso, por la baja capacidad de soporte de la subrasante (Gambini, 2021, Gamarra y Sandoval, 2021; Bustamante, 2021; Ocupa y Troyes, 2021; Fernández, 2017).

Figura 1

Carreteras (Km), Cajamarca – 2018

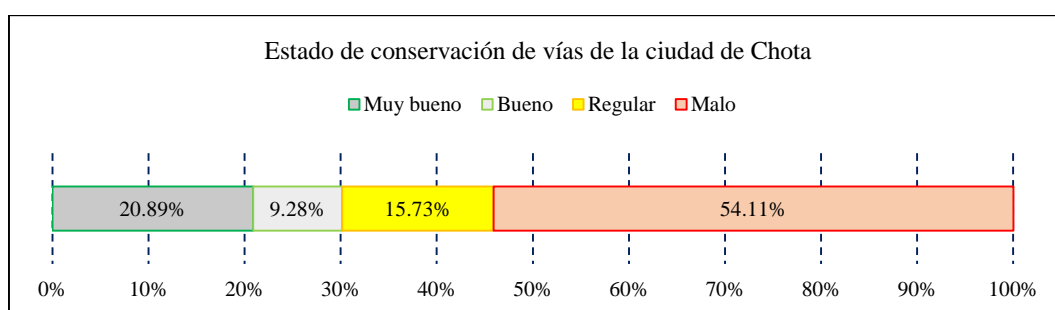


Nota: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2018).

Según la Municipalidad Provincial de Chota (MPCH, 2018), el 54.11% de las vías chotanas están en mal estado de conservación (Fig. 2); para mejorar el estado de la carpeta de rodadura de las carreteras generalmente se utiliza material granular de cantera (Ticlla, 2020), no obstante, no logra una mejora significativa, si el suelo de la subrasante tiene un CBR menor a 6%, por lo que deberían usarse métodos de estabilización (Tenorio y Zegarra, 2021, Ormeño y Rivas, 2020).

Figura 2

Estado de Conservación de Vías de la Ciudad de Chota



Nota: Municipalidad Provincial de Chota (MPCH, 2018).

La estabilización de la subrasante, método de tratamiento realizado en campo, con la colocación de aditivos (Yenigalla y Slaney, 2021), generalmente se realiza para modificar su resistencia, asentamiento probable, trabajabilidad y propiedades del suelo; la estabilización depende del tipo de suelo, el costo esperado y las propiedades a optimizar (Elkafoury y Azzam., 2021). En el país, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2014), en el “Manual de carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos – Sección Suelos y Pavimentos”, argumenta que, subrasantes con CBR menor a 6% son insuficientes e inadecuadas para el soporte vehicular, por lo que su suelo debe ser estabilizado, no obstante los métodos de estabilización químicos con cemento o cal, son costosos, y causan un gran impacto ambiental, por lo que, en la actualidad se optan por otros métodos de tratamiento más sustentables (Fustamante, 2021).

La combustión de carbón en las centrales termoeléctricas proporciona a las personas electricidad y calor, pero también plantea preocupaciones sobre la posibilidad de contaminación ambiental, por el incremento de los residuos de la extracción de carbón y las cenizas producto de la ignición (Parzentny y Róg, 2019). La ganga de carbón, es un residuo producido durante el proceso de extracción del carbón, que tienen potencial como material de relleno en la construcción de terraplenes, muros de contención o mejoramiento de la subrasante (Ashfaq et al., 2020). En la mina de carbón “La Palma”, ubicada a las afueras de la ciudad de Chalamarca, se producen de 3 a 5 ton diarias, aproximadamente, de residuos de carbón, los cuales no representan ningún valor económico, para la industria manufacturera, por lo que son acumulados en botaderos, que generan contaminación al aire y suelo agrícola cercano, no obstante, pueden ser utilizados como materia estabilizante, para mejorar la capacidad de soporte del suelo de la subrasante de carreteras o trochas chalmarquinas.

La carretera El Verde – Numbral, distrito de Chalamarca, es la vía de acceso a los centros poblados El Verde, Masintranca, Numbral, Huayrasitana, Bella Andina y demás comunidades; a su vez esta ruta, conecta el distrito de Chalamarca, provincia de Chota con el distrito de Bambamarca, provincia de Hualgayoc, siendo una importante ruta comercial; sin embargo, a partir de la inspección visual de la misma, se han observado fallas por ahuellamiento, expansión granular del afirmado, asentamientos de la superficie de rodadura, baches, lodazal, entre otros, lo que provoca dificultades para la transitabilidad en dicha ruta, especialmente en el Km 1+500 al Km 2+500, donde la subrasante se ha deformado por el constante tránsito vehicular, haciendo evidente la baja capacidad de carga del suelo, lo que hace necesario la estabilización de este tramo.

La ubicación de la mina de carbón “La Palma”, hace posible el uso de los residuos de carbón, producto de la extracción mineral, como materia prima para la estabilización de carreteras Chalarquinás, sin embargo, su capacidad técnica como estabilizante, debe ser probada mediante estudios de mecánica de suelos, tal como hace mención el MTC (2014), para otros métodos de estabilización, por lo que considerando la importancia comercial y baja capacidad de soporte del suelo de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, específicamente del Km 1+500 al Km 2+500, es que se ha realizado la determinación del CBR del suelo de la subrasante de esta ruta, en laboratorio, con la aplicación de estos residuos de carbón mineral, para verificar si se logra una mejora significativa en la capacidad de carga del suelo, utilizando el Manual de carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2014).

1.2. Formulación del problema

¿La capacidad de soporte del suelo de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, aumenta al adicionar residuos de carbón mineral de la Mina La Palma, del distrito de Chalarquinás?

1.3. Justificación e importancia

Una de las vías de mayor importancia, para el distrito de Chalarquinás, es la carretera El Verde – Numbral, debido a que conecta diversos centros poblados, e incluso sirve como medio de conexión hacia el distrito de Bambamarca, sin embargo, esta ruta en el Km 1+500 al Km 2+500, presenta hundimientos y deformaciones en la capa de rodadura, producto de la baja capacidad de soporte del suelo de la subrasante, lo que ha llevado a que en temporada de lluvias, el deterioro sea más evidente, causando la pérdida total de la transitabilidad, siendo evidente la necesidad de estabilizar el suelo de la subrasante de esta ruta.

En Chalamarca, se encuentra la mina de carbón “La Palma”, que si bien es una fuente de ingresos económicos para el distrito, también representa un problema ambiental, por la acumulación de residuos de carbón, producto de la extracción mineral, lo que genera aproximadamente de 3 a 5 ton, de desechos, diarios, que son arrojados en botaderos cercanos a áreas agrícolas, contaminando el aire y el suelo local, además de que por su cantidad de producción diaria cada vez son más los residuos, que no tienen ningún uso productivo en la industria manufacturera, pero que, pueden tener un uso sustentable en la industria de la construcción, al ser utilizados en la estabilización de carreteras.

La importancia del estudio, no solo abarca el fin técnico de lograr un incremento en la capacidad de soporte del suelo, sino en lograr la sustentabilidad de los métodos estabilizantes, con el uso de residuos de carbón mineral, por tanto, de los resultados positivos de la investigación, depende el uso masivo de residuos de carbón mineral, como estabilizante, de la subrasante del suelo de las carreteras chalamarquinas, con tipos de suelo similar a los analizados.

1.4. Delimitación de la investigación

Se ha utilizado residuos de carbón mineral de la mina “La Palma” del distrito de Chalamarca, con un diámetro menor a 3/8”, como material estabilizante en porcentajes de 10%, 20% y 30% del peso del suelo, de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, del distrito de Chalamarca. El estudio, se realizó en época de lluvias, siendo estas según SENAMHI (2021) de octubre a mayo, por lo que las muestras de suelo se excavaron durante el mes de enero del 2021, realizando los ensayos en los meses siguientes. Se excavaron tres calicatas en un tramo de 1 km de vía, distribuidas uniformemente, para obtener muestras de suelo alterado e inalterado, en sacos

impermeables de 150 kg, que fueron trasladadas al laboratorio GSE, del distrito de Chota, a fin de determinar sus características físicas y mecánicas en estado natural, de tal manera se han comparado los CBR de laboratorio, al 95% y 100% de la MDS del suelo natural con el suelo estabilizado.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Evaluar la capacidad de soporte (CBR) del suelo de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, al adicionar residuos de carbón mineral de la mina “La Palma”, del distrito de Chalamarca, según los lineamientos del Manual de Carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2014).

1.5.2. Objetivos específicos

- Determinar las características físicas del residuo de carbón mineral de la mina “La Palma”, del distrito de Chalamarca.
- Determinar las características físicas y mecánicas del suelo natural de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, del distrito de Chalamarca.
- Analizar la capacidad de soporte del suelo de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, del distrito de Chalamarca, adicionando 10%, 20% y 30% de residuos de carbón mineral, respecto al peso del suelo.
- Determinar el porcentaje de residuos de carbón mineral, con el que se logra un mayor aumento en la capacidad de soporte del suelo natural.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

Amaya et al. (2022), en su artículo científico “Residue from coal combustion for plastic soil improvement”, utilizaron residuos de carbón para la mejora de suelos plásticos en Colombia, con dosificaciones que varían del 0 al 15% respecto al peso seco del suelo. Determinando que el suelo al que se le adiciona 0, 3, 6, 9, 12 y 15% de residuos de carbón alcanza un CBR al 95% de MDS, de 10.10, 15.80, 9.10, 12, 21.30 y 17.70%, además la expansión a los 56 golpes se reduce a 1.12, 0.328, 1.152, 1.040, 0.361 y 0.559%. Por lo que concluyeron que, el suelo al que se le adiciona un 12% de residuos del carbón, tiene un mejor comportamiento físico-mecánico que el suelo natural, reduciendo su plasticidad en 10% e incremento el CBR en 75%.

Ashfaq et al. (2020) en su investigación “Characterization studies on coal gangue for sustainable geotechnics” estudiaron el efecto de la ganga de carbón del 10 al 50% por peso seco del suelo, en el comportamiento CBR del suelo expansivo de algodón negro, además consideraron a la cal, al 2%, 4% y 6%, como aditivo por sus propiedades cementantes. Determinaron que el CBR aumentó de 4% a 23% con un 40% de ganga de carbón, siendo este el mayor resultado, debido que, para porcentajes mayores el CBR disminuye.

Sumesh et al. (2020) en su artículo científico “Effect of coal ash on strength characteristics of clayey silt soil treated with cement” utilizaron suelo limo arcilloso, mezclándolo con cenizas de carbón tipo F, en diferentes proporciones hasta el 50% en masa del suelo, determinando que todas las muestras

presentan una mayor resistencia CBR que las muestras de suelo natural. El contenido óptimo de cenizas de carbón fue 20%, debido a que mostró un CBR más alto, así mismo el contenido mínimo de cemento del 1% para la mezcla óptimo, logró que los valores de CBR de 25.19% aumentaran a 29.14%. Concluyeron que, el suelo mezclado con ceniza de carbón es adecuado para la construcción de subrasantes de pavimento y terraplenes.

Aderinlewo, et al. (2020) en su estudio “Geotechnical properties of lateritic soil stabilized with cement and pulverized wood charcoal” compararon las propiedades geotécnicas de suelos lateríticos estabilizados con cemento y con carbón vegetal pulverizado en proporciones de 2, 4, 6, 8 y 10% en peso del suelo. El suelo natural de clasificación A-6, alcanzó su CBR óptimo de 13.68% con la adición de 6% de carbón pulverizado por peso de suelo. Concluyeron que el carbón vegetal tiene un alto potencial para ser estabilizador de suelos, debido a que se compara favorablemente con el cemento en resistencia a compresión.

Navagire et al. (2021), en su artículo científico “Stabilization of black cotton soil with coal bottom ash” determinaron el CRB del suelo de algodón negro, adicionando ceniza de carbón al 0, 10, 20, 30 y 40%, como agente estabilizante. Concluyendo que la muestra con 30% de adición de ceniza de carbón, presentaba las mejores características mecánicas, aumentando el CBR.

Cañar (2017) en su tesis “Análisis comparativo de la resistencia al corte y estabilización de suelos arenosos finos y arcillosos combinadas con ceniza de carbón” recolectó muestras de los cantones de Ambato y Puyo, verificando que eran muestras de suelos arenosos y arcillosos, que fueron combinados con 20, 23 y 25% de cenizas de carbón, para determinar su capacidad de soporte. Las arcillas en combinación con 25% de cenizas de carbón, aumentó e CBR desde 9.10% hasta

11.20%. El suelo arenoso, aumento de 4.6%, al combinarse con 25% de cenizas de carbón, hasta 19.60%, indicando que se puede utilizar como subrasante. Concluyó, que las cenizas de carbón disminuyen la humedad, expansión y plasticidad de los suelos, por lo que es posible su uso en subrasante, presentando mejores resultados en suelos arenosos.

Jiménez et al. (2019) en su artículo científico “Optimización de residuos mineros de carbón para el mejoramiento de suelos viales con algoritmos evolutivos multiobjetivo” utilizaron los residuos de carbón mineral como estabilizante del suelo, pero para lograr una mayor capacidad de soporte, realizaron su tratamiento previo con cal entre 2 a 4%, y cemento al 1%, mediante la aplicación del algoritmo multi objetivo (AEMO), para luego determinar la capacidad de soporte. El CBR del suelo para ser utilizado en afirmado, subbase y terraplén debe superar el 15, 40 y 5%, respectivamente, pero el suelo A-2-6 en estudio alcanza 5.5%, no obstante, al aplicar 50% de residuos de carbón y los aditivos cal y cemento, se obtuvieron valores CBR de 31.93%, 56.29% y 14.27% para afirmado, subbase y terraplén. Los autores concluyeron, que el AEMO, puede ser utilizado en obras viales, para realizar la mezcla de residuos con las proporciones mínimas de cal y cemento, para mejorar las propiedades del suelo.

Ariza et al. (2017), en su tesis “Evaluación de la capacidad de soporte (CBR) de un suelo expansivo con adición de ceniza volante” determinaron que el suelo natural tenía una expansión de 13.23%, máxima densidad seca de 1.344 gr/cm³, contenido óptimo de humedad de 24.5%, y CBR al 95 y 100% de la MDS, de 6.8 y 7.9%, que al adicionar 30% de cenizas volantes, alcanzan valores de 18 y 23.7%, respectivamente, con porcentajes de cenizas más altos, se disminuye el CBR, por lo que concluyeron que con 30% de cenizas el suelo se estabiliza.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Casas (2021) en su tesis “Ceniza de carbón mineral para estabilización de suelos cohesivos en subrasante” realizó una calicata en el pasaje 30 de mayo – jirón Mariátegui del Anexo de Uñas, en Huancayo, para extraer muestras de suelo, tipo CL, que fueron adicionadas con cenizas de carbón mineral, en 0, 3, 5 y 7%, alcanzando valores CBR de 2.2, 5.5, 6.0 y 7.5%, respectivamente. Concluyó que, el CBR de la subrasante, ha aumentado, clasificándose como regular.

Goñas y Saldaña (2020) en su artículo científico “Estabilización de suelos con cenizas de carbón para uso como subrasante mejorada” ensayaron muestras de suelo de la ciudad de Chachapoyas, adicionadas de carbón al 15, 20 y 25%. El suelo de la calicata 1 y 2, pertenece al grupo A-7-6 (16) y A-7-5 (13), con índice de plasticidad de 24 y 18%, CBR de 2.1 y 2.2%, respectivamente, mientras que el suelo de la calicata 1, con 15, 20 y 25% de carbón, alcanzan CBR de 2.3, 2.9 y 3.5%, y el suelo de la calicata 2, con alcanza valores de 2.6, 3.0 y 3.7%, respectivamente. Concluyeron que, las cenizas de carbón mejoran las propiedades de los suelos tipo CH y OH, aunque no alcanzan los estándares para ser usadas como material apto como subrasante.

Julca (2020) en su investigación “Análisis de suelos arcillosos con ceniza de hoja maíz y carbón molido para estabilización de subrasante, camino vecinal Áncash, 2020” determinó que el suelo del camino vecinal de Áncash, tiene una clasificación A-1-b (0), índice de plasticidad de 8%, y CBR de 17.5%, alcanzando CBR de 40.2, 51.0 y 59.2% para mezclas con 6, 11 y 16% de ceniza de hoza de maíz y carbón molido. Concluyó que, el residuo de carbón triturado incrementa la capacidad de soporte del suelo.

Chilcon y Leon (2020) en su estudio “Evaluación de estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de carbón en la subrasante de la Av. Cuzco, Distrito de San Martín de Porres, 2020” determinaron que el suelo natural era arcilla de alta plasticidad, al cual se le aplicó 0, 13, 21 y 27% de cenizas de carbón, alcanzando valores CBR de 9.10, 9.82, 10.20 y 10.70%. Concluyeron que, la ceniza de carbón disminuye la plasticidad e incrementa la capacidad de carga.

Cabrera y Paredes (2018) en su tesis “Estabilización de suelos con cenizas de carbón mineral con fines de pavimentación en el centro poblado de Cascajal Izquierdo, provincia de Santa – Ancash - 2018” adicionaron al suelo natural A-2-4, grava y arena arcillosa o limosa, 0, 4, 8 y 10% de cenizas de carbón mineral, alcanzando valores CBR de 8.50, 8.75, 11, y 13%, respectivamente. Concluyeron que, existe un efecto positivo entre el CBR y la cantidad de cenizas de carbón.

Medina (2020) en su investigación “Estudio del comportamiento del aserrín y la ceniza de carbón para la estabilización de la sub rasante, Carabayllo, Lima 2019”, tuvo como muestra la calle Santa Úrsula del asentamiento humano Milagros II, cuyo suelo era arena arcillosa con un CBR de 18.10%, al que se le adicionó cenizas de carbón al 20 y 25%, la capacidad de carga aumenta hasta 24.10 y 26.60%, respectivamente, mientras que al usar aserrín el CBR disminuye.

Rios y Neyra (2020) en su tesis “Influencia de las cenizas de carbón mineral en las propiedades de una subrasante arcillosa en Huamachuco, La Libertad, 2020” aplicaron a las muestras de suelo A-4 (6), porcentajes de 0, 24, 28, 32% de cenizas de carbón mineral, obteniendo valores CBR al 100% de MDS de 10.30, 52.30, 69.90 y 60.80%, y valores CBR al 95% de MDS de 8.50, 44.20, 59.20 y 51.60%, respectivamente. Concluyeron que, el uso de cenizas de carbón mineral mejora la capacidad de carga del suelo arcilloso de la subrasante.

Vásquez (2019), en su tesis “Capacidad de soporte al estabilizar el suelo de la Vía Cascajal con adición de carbón y cal a nivel de sub rasante”, realizó combinaciones de carbón mineral obtenido de la cantera “La Galgada”, triturado para que pueda mezclarse con la cal al 7 y 4%, respectivamente, del peso del suelo limo de baja plasticidad arenoso. El suelo de las calicatas 1, 2 y 3 en estado natural alcanzaron CBR al 100% de la MDS, de 16.2, 15.4, 14%, mientras que con la mezcla carbón-cal, obtuvieron valores de 29, 35.3 y 32.2%, respectivamente. Concluyó que, la adición de 7% de carbón y 4% de cal, aumenta la capacidad de carga del suelo de la subrasante de la carretera Cascajal km 15 al Km 16.

2.1.3. Antecedentes regionales

A nivel de la región Cajamarca, no hay estudios que hayan utilizado residuos de carbón triturado, para mejorar el CBR del suelo de la subrasante de carreteras, no obstante, existen investigaciones con otros aditivos estabilizantes.

Cubas y Manay (2021) en su tesis “Mejoramiento de subrasante para pavimento industrial de tránsito pesado utilizando escoria metálica, en estacionamiento vehicular avenida Circunvalación – Jaén – Cajamarca 2021” utilizaron 0, 2, 4 y 8% de escoria metálica, para mejorar la capacidad portante del suelo areno arcilloso A-2-4 (0), determinando que los valores CBR al 95% de MDS que alcanzaban las muestras eran 14.50, 17.5, 54 y 46%, mientras que, al 100% de MDS, alcanzan valores CBR de 22.9, 30.96, 83.94 y 89.49% respectivamente. Concluyeron que la escoria mejora el CBR del suelo.

Fustamante (2021) en su investigación “Evaluación de la capacidad de soporte del suelo adicionando polímeros reciclados (PET) en la sub rasante de la calle camino real, progresiva Km 0+000 – Km 0+750, Chota” obtuvo muestras de suelo de tres calicatas, determinando que pertenecían al grupo A-7-6, las cuales

fueron combinadas con PET triturado de 2.00 mm al 0, 5, 10, 15 y 25%, obteniendo valores CBR al 95% de MDS de 5.43, 5.5, 7.9, 8.4 y 7.1%, verificando así que la capacidad de carga de la subrasante aumenta con PET hasta el 15%.

Alvarez y Gutierrez (2020) en su disertación “Estudio experimental del efecto en el comportamiento mecánico al adicionar caucho triturado en un suelo arcilloso de baja plasticidad proveniente del caserío de Callampampa - Llama-Cajamarca” realizaron mezclas de suelo arcilloso de Callampampa con 0, 1.5, 2.5 y 3.5% de caucho triturado, determinando valores CBR al 95% de la MDS de 3.2, 5.0, 8.7 y 9.4%, respectivamente. Concluyeron que, el material puede ser utilizado como subrasante granular cuando se le adiciona 3.5% de caucho triturado.

Vilchez (2019) en su estudio “Aplicación de ceniza de cascara de arroz para mejorar la estabilidad de la subrasante en la vía de Evitamiento Jaén-Cajamarca, 2019” adicionaron 0, 3, 5 y 10% de ceniza al suelo arcilloso de baja plasticidad A-7-6 (10), tomado del Km 6+300, alcanzando valores CBR al 100% de la MDS, de 3.8, 6.0, 8.8 y 12.4%, respectivamente. Concluyó que, la adición de cenizas en el suelo, da muestras de mejora en la estabilidad de la subrasante.

Estrada y Pintado (2019) en su investigación “Capacidad portante (CBR) del suelo del sector 9 de Cajamarca, incorporando 2%, 4% y 6% de cal hidratada, 4%, 6% y 8% de cemento portland tipo i y 4%, 8% y 12% de cloruro de sodio” utilizaron muestras de suelo arcilloso de baja a media plasticidad A-6 (7), con un CBR de 4.6%, que al ser mezclado con cal al 2, 4 y 6%, alcanza valores de 9.05, 11.15 y 10.50%, al ser mezclado con cloruro de sodio al 4, 8 y 12% alcanza valores CBR de 4.8, 5.1 y 5.1%, así mismo, al ser mezclado con cemento al 4, 6 y 8% alcanza valores CBR de 7, 7.7 y 7.7%, respectivamente. Concluyeron que, con el aditivo cal, se logra una mayor capacidad de carga en el suelo del sector 9.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Teoría de compresibilidad y expansión del suelo

Hay dos componentes de la deformación a nivel de estructura de los suelos arcillosos: (1) un cambio constante en la separación de las partículas y (2) un estrechamiento de la separación de las partículas sin cambiar su orientación. La compactación de dos muestras de suelo arcilloso con el mismo método y energía y a la misma densidad seca, una con un contenido de humedad inferior al óptimo y la otra con un contenido de humedad superior, da lugar a un comportamiento en el que la deformación volumétrica se mide por la compresibilidad y la expansión durante las operaciones de carga. La expansión depende del método de compactación y es mayor para la compactación estática que para la compactación por mezcla, siendo la diferencia mayor con mayor energía de compactación y mayor peso volumétrico. (Rico y Del Castillo, 2017).

2.2.2. Teoría de la capacidad de soporte (CBR)

Según Rico y Del Castillo (2017), los valores de capacidad portante relativa se utilizan para el control de calidad en la construcción de carreteras y para las muestras ensayadas después de la saturación, la absorción de agua y la expansión que sufren las muestras durante la saturación dan lugar a una curva de compactación. Por lo tanto, para determinar los valores de CBR de los suelos en la construcción de carreteras, es necesario determinar la densidad seca máxima y la relación óptima de contenido de agua mediante la compactación.

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Residuos de carbón mineral

Residuos resultantes del carbón mineral, se dividen en tres grupos, 1) el grupo inferior está dentro de calderas con dimensiones superiores a 0.075 mm, 2) las cenizas volantes que se adhieren a la chimenea de las calderas con dimensiones inferiores a 0.075 mm y 3) las mezclas de las mencionadas (Casas, 2021). Sedimento que se produce del carbón, material poroso y húmedo, también denominado ganga (Castillejo et al., 2017). Los residuos de carbón, tienen potencial de uso como materia prima para la industria de la ingeniería civil, sea como como material de relleno en la construcción de terraplenes, muros de contención, estabilización de suelos (Ashfaq et al., 2020).

Figura 3

Residuos de Carbón Mineral



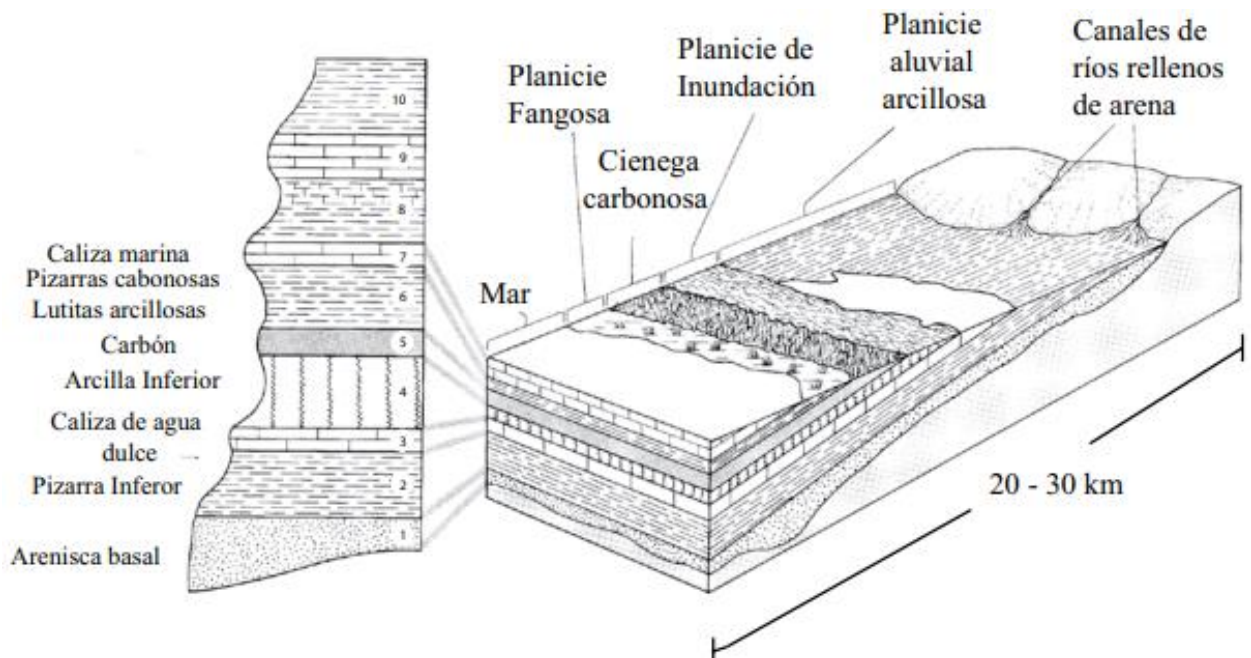
Nota: En la figura, se muestra el carbón mineral, la extracción de los mismos, y la acumulación de residuos en desmonte, y en sacos de material residual.

2.3.1.1. Carbón

Combustible fósil, en forma de roca sedimentaria negra orgánoclastica, compuesta por restos de plantas litificadas, originalmente depositados en pantanos, lagos o lugares deltaicos (Castillejo et al, 2017). Consiste en una serie de transformaciones químicas, por acción de bacterias, que incluyen el enriquecimiento gradual de átomos de carbón y la transformación de moléculas orgánicas (principalmente celulosa) en carbón y subproductos como dióxido de carbono y metano; este proceso bioquímico se completa en una variación geológica; donde la maduración es la fase final, que se basa en compactación, deshidratación y expulsión de volátiles previamente formados, donde prioriza factores como, presión y temperatura (León, 2006).

Figura 4

Modelo Tradicional que muestra a los Ciclotemas y Depósitos de Carbón de una Cuenca



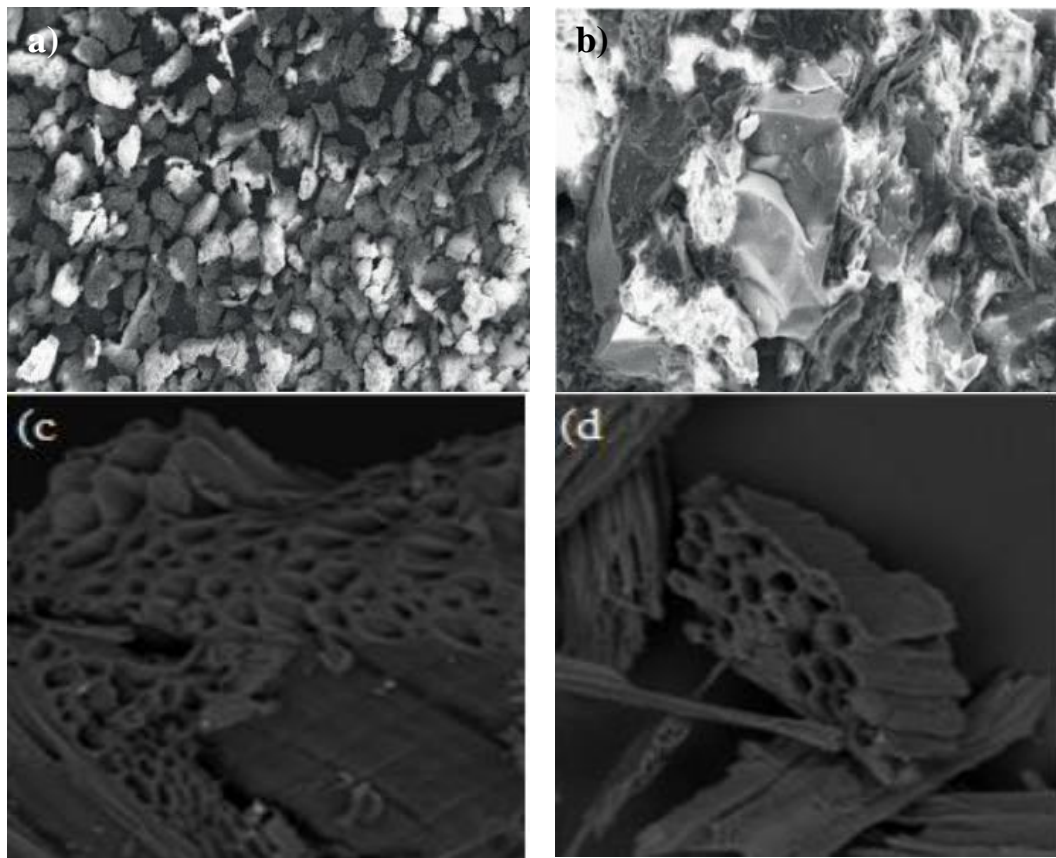
Nota: “Modelo tradicional de los depósitos pensilvánicos de la cuenca de Illinois, EUA, esquematizados por Shaw et al., 1997” (Corona-Esquivel et al. 2006).

2.3.1.2. Composición del carbón mineral

Los principales elementos que componen el carbón son: carbono, hidrógeno, oxígeno, así como pequeñas proporciones de azufre, nitrógeno y otros elementos característicos de la materia inorgánica. El carbono, el hidrógeno, el nitrógeno y algo de azufre se combinan para formar moléculas muy complejas con un alto peso molecular, que se producen a partir de la materia vegetal original por carbonatación (León, 2006, p. 92). El carbón mineral se constituye de un área orgánica (carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre, etc.) e inorgánica, donde sus componentes se muestran combinados entre sí (Casas, 2021).

Figura 5

Carbón Mineral



Nota: a) Carbón mineral, b) Micrografía de la mezcla de residuos de carbón, c) Morfología del carbón tamaño > 2 mm, d) Morfología carbón tamaño 74 – 150 μm (Asimbaya et al., 2015; Triviño-Restrepo et al., 2015).

2.3.1.3. Tipos de carbón

Los métodos más conocidos para clasificar el carbón, que van desde la turba hasta la antracita, utilizan un análisis aproximado de la materia volátil y el carbón fijo; el poder calorífico o análisis final de carbono, hidrógeno y oxígeno. Entre los diferentes tipos de carbón, se encuentran: (León, 2006)

Tabla 1

Clasificación de Carbones Minerales

Tipo	Clase	Carbono fijo (%)	Materias volátiles (%)	Poder calorífico (BT/lb) x10 ³	Carácter aglomerante
Antracita	Meta antracita	98	< 2		Carbones no aglomerantes
	Antracita	92-98	2-8		
	Semi antracita	86-92	8-14		
Bituminoso	Bajo volátil	78-86	14-22		Carbones aglomerantes
	Medio volátil	69-78	22-31		
	Alto volátil A			13 – 14	
	Alto volátil B	< 69	>31	11.5-13	
	Alto volátil C			10.5-11.5	
				10.5-11.5	
Sub bituminoso	Clase A			10.5-11.5	Carbones no aglomerantes
	Clase B			9.5-10.5	
	Clase C			8.3-8.5	
Lignito	Lignito A			6.3-8.3	
	Lignito B			<6.3	

Nota: Norma ASTM D 388-82 (León, 2006, p. 96).

Figura 6

Tipos de Carbones



Turba

55.44% carbón



Lignito

72.95% carbón



Bituminoso

84.24% carbón



Antracita

93.50% carbón

Nota: Adaptado de (León, 2006, p. 92).

2.3.1.4. Características del carbón mineral

Según Quijandria (2017) las características del carbón mineral son:

- Dureza: Firmeza frente a penetración, el componente de carbón más fuerte y blando, respectivamente es durenó y vitrenó.
- Abrasividad: Capacidad del carbón para desgastar elementos metálicos.
- Resistencia mecánica: Fuerza contra el impacto. Las vetas de carbón se usan más comúnmente como paredes, techos y pisos en las galerías de las minas.
- Cohesión: Es la acción y resultado que tiende a combinar componentes de una sustancia de origen carbónico. Es un rasgo positivo o de resistencia
- Friabilidad: Es la capacidad del carbón de descomponerse fácilmente en tamaños de partículas más pequeños ya sea por impacto o fricción.

2.3.1.5. Disponibilidad de carbón en el país

Tabla 2

Recursos y Reservas Totales Estimadas de Carbón en el Perú

Eras	Cuencas	R. Probadas (ton)	Recursos (ton)
Paleozoico	Paracas		2950000
	Yura		2892000
Mesozoico	Oyón	18000000	27205000
	Santa	575940	214749940
	Chicama	26976741	312174360
	Goyllarisquiza	1542500	7970000
	Jatunhuasi	1905295	60457250
	Cajamarca	20000	54870000
	Chiclayo		400000
Cenozoico	Yanacancha		25000000
	Tumbes		101000000
	Loreto		100000000
Subtotal		49020476	1054613554
Total			1103634030

Nota: INGEMMET (León, 2006, p. 97).

2.3.2. Carreteras

Faja, sobre la que circulan medios de transporte terrestre (Gutiérrez, 2010). Las carreteras se clasifican en base a sus características geométricas e índice medio diario anual de tránsito vehicular, donde el número de inspecciones que se realizan para un estudio vial dependen de la clasificación de las mismas (MTC, 2018).

Tabla 3

Clasificación de Carreteras según Demanda

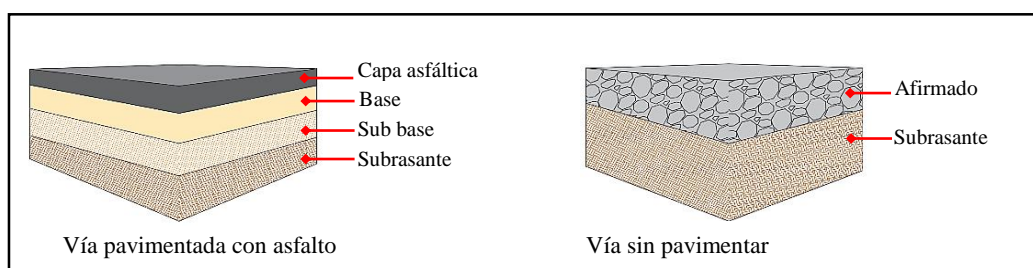
Clasificación por demanda	Índice medio diario anual (IMDA) veh/día	N° de carriles/ ancho de carril (m)	Superficie de rodadura	Número de calicatas
Autopistas 1ª clase	>6000	2x3.60	Pavimentada	4 x km x carril
Autopistas 2ª clase	4001 – 6000	2x3.60	Pavimentada	4 x km x carril
Carreteras 1ª clase	2001 – 4000	2x3.60	Pavimentada	4 x km
Carreteras 2ª clase	401 – 2000	2x3.30	Pavimentada	3 x km
Carreteras 3ª clase	< 400	2x3.30	Pavimentada	2 x km
Trochas carrozables	< 200	1x4.00	Afirmada o sin afirmar	1 x km

Nota: Adaptado del manual de carreteras DG (MTC, 2018), y el manual de suelos (MTC, 2014).

La superficie de rodadura de una vía está conformada por un conjunto de capas compactadas sobre la subrasante de la vía, cuya función es resistir y distribuir las cargas transmitidas por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y optimización del tráfico (Castro, 2017). La superficie de rodadura puede ser pavimentada o sin pavimentar (MTC, 2018).

Figura 7

Carretera Pavimentada y Sin Pavimentar, Sección Típica



2.3.3. Subrasante

Es la superficie terminada de la carretera a nivel de excavación y relleno (Cuipal, 2018), que puede estar constituida por suelo en su estado natural o mejorado (Sandoval-Vallejo y Rivera-Mena, 2019, p. 136), pero debe cumplir con la función de proporcionar un soporte estandarizado sin deformaciones (Leiva, 2016). Las propiedades fundamentales a analizar en la subrasante son las propiedades físicas y mecánicas (Aquino, 2020), para determinarlas se debe realizar estudios mediante el muestreo de suelos de calicatas de 1.5 m por debajo del nivel proyectado para la subrasante, ubicados de forma alterna y a lo largo de la vía a distancias similares (MTC, 2014, p. 28).

Tabla 4

Categorías de la Subrasante

Categoría de Subrasante	CBR
S0 Subrasante Inadecuada	$CBR < 3\%$
S1 Subrasante Pobre	$3\% \leq CBR < 6\%$
S2 Subrasante Regular	$6\% \leq CBR < 10\%$
S3 Subrasante Buena	$10\% \leq CBR < 20\%$
S4 Subrasante Muy Buena	$20\% \leq CBR < 30\%$
S5 Subrasante Excelente	$CBR \geq 30\%$

Nota: “Manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos” (MTC, 2014, p. 37).

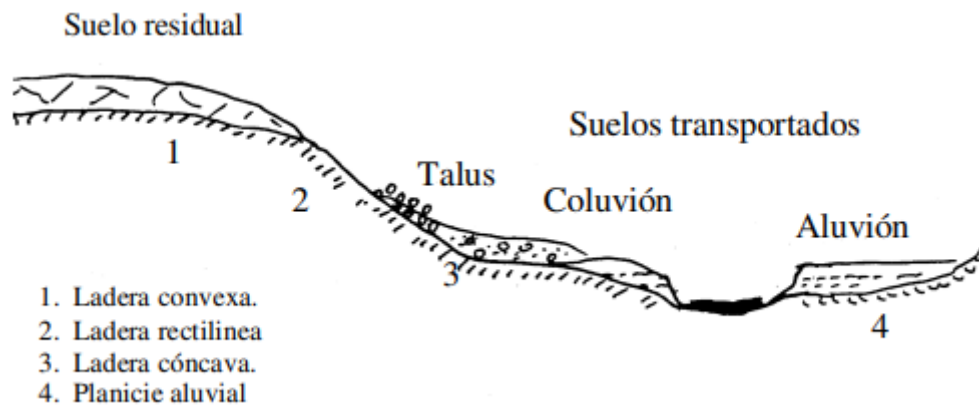
El suelo debajo de la superficie de la subrasante debe tener una capacidad de carga (CBR) mayor o igual al 6%, por consiguiente, su calidad debe ser lo más consistente posible, ya que soportará la estructura de las carreteras y las cargas transportadas por los vehículos; en los casos en que el CBR sea inferior al 6% (Subrasante pobre y/o inadecuada), debe estabilizarse con aditivos o reemplazarse con otro material o suelo estable (Cuipal, 2018).

2.3.4. Suelo

Es un grupo de partículas minerales, producto de la descomposición mecánica o química de rocas preexistentes, sedimentos no consolidados y sedimentos de partículas sólidas resultantes de la descomposición de rocas (Palli, 2015, p. 26).

Figura 8

Distintos Tipos de Formaciones de Suelo

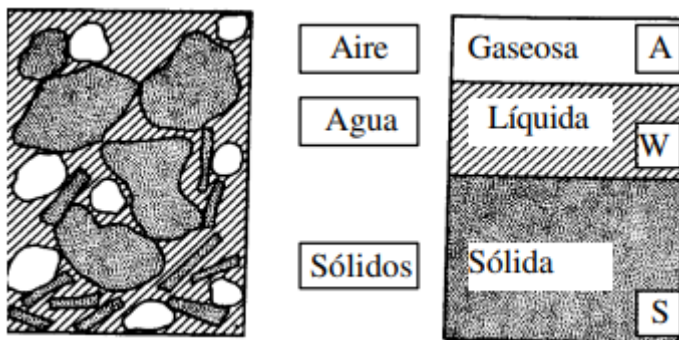


Nota: (Duque y Escobar, 2002, p. 8).

En un suelo se distinguen las fases: sólida, formada por las partículas minerales del suelo; la líquida por el agua (libre específicamente), aunque en el suelo pueden existir otros líquidos de menor significación; la fase gaseosa comprende sobre todo el aire, pero pueden estar presentes otros gases (Duque y Escobar, 2002).

Figura 9

Esquema de una Muestra de Suelo y el Modelo de sus 3 Fases



Nota: (Duque y Escobar, 2002, p. 8).

2.3.4.1. Propiedades físicas del suelo

Granulometría. Tamaño de las partículas de una muestra de suelo. El análisis granulométrico del suelo tiene como finalidad determinar las proporciones de los distintos elementos constituyentes, clasificados según el tamaño de sus partículas, y así definir los términos grava, arena y materiales finos (limo, arcilla) (Velasquez 2018, p. 7). Se realiza tamizando el suelo a través de varios orificios, que a su vez se reducen a una cierta proporción, obteniendo así una determinada cantidad en cada malla (Casas, 2021).

$$\% \text{ Ret. Acum.} = \frac{\text{Peso ret. acumulado}}{PT} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Peso que pasa} = PT - \text{Peso ret. acumulado} \quad (2)$$

$$\% \text{ Que pasa} = \frac{\text{Peso que pasa}}{PT} \times 100 \quad (3)$$

En la ecuación 1, 2 y 3, se muestran el porcentaje retenido acumulado, el peso que pasa y el porcentaje que pasa, respecto al porcentaje total (PT) de la muestra, esto se hace calculando el porcentaje en peso de cada malla y así poder realizar la distribución de partículas que se obtiene, gráficamente en la curva granulométrica.

Tabla 5

Clasificación de Suelos según Tamaño de Partículas

Tipo de Material	Tamaño de partículas
Grava	75 mm - 4.75 mm
Arena	Arena gruesa: 4.75 mm - 2.00 mm
	Arena media: 2.00 mm - 0.425 mm
	Arena fina: 0.425 mm - 0.075 mm
Material fino	Limo 0.075 mm - 0.005 mm
	Arcilla Menor a 0.005 mm

Nota: (MTC, 2018, p. 33).

Contenido de humedad. Relación que se expresa por el peso natural del suelo y el peso de la muestra de suelo después de ponerla a secar en el horno, este resultado se expresa en porcentaje (Casas, 2021).

$$H\% = \frac{W_a}{W_s} \times 100 \quad (4)$$

$$W_a = W_h - W_s \quad (5)$$

$$H\% = \frac{W_h - W_s}{W_s} \times 100 \quad (6)$$

En la ecuación 4, el contenido de humedad (H%), es igual a la división del peso del agua (Wa), obtenida de restar el peso húmedo del suelo menos el peso seco, entre el peso seco del suelo (Ws).

Límites de consistencia o Límites de Atterberg. Determinan la sensibilidad del comportamiento del suelo a su contenido de humedad; bajo el cual se pueden representar los suelos: líquido, plástico o sólido (Velásquez, 2018, p. 8).

a) *Límite líquido (LL)*. Es el contenido de humedad del suelo cuando cambia de un estado semilíquido a un estado plástico y puede formarse (Fernandez, 2018).

b) *Límite plástico (LP)*. Se define a la humedad más baja con la que pueden formarse barritas de suelo de unos 3.2 mm (1/8") de diámetro, sin que dichas barritas se desmoronen. (MTC, 2016, p. 72)

c) *Índice de Plasticidad (IP)*. Es un parámetro útil para medir la plasticidad del suelo. Se calcula como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

$$IP = LL - LP \quad (5)$$

En la ecuación 5, el índice de plasticidad (IP), es igual a la resta del límite líquido (LL), con el límite plástico (LP).

Tabla 6

Clasificación de Suelos, según Índice de Plasticidad

Índice de plasticidad	Plasticidad	Características
>20	Alta	Suelos muy arcillosos
7 a 20	Media	Suelos arcillosos
< 7	Baja	Suelos poco arcillosos
0	No plástico	Suelos exentos de arcilla

Nota: (MTC, 2014, p. 34).

2.3.4.2. Clasificación del suelo

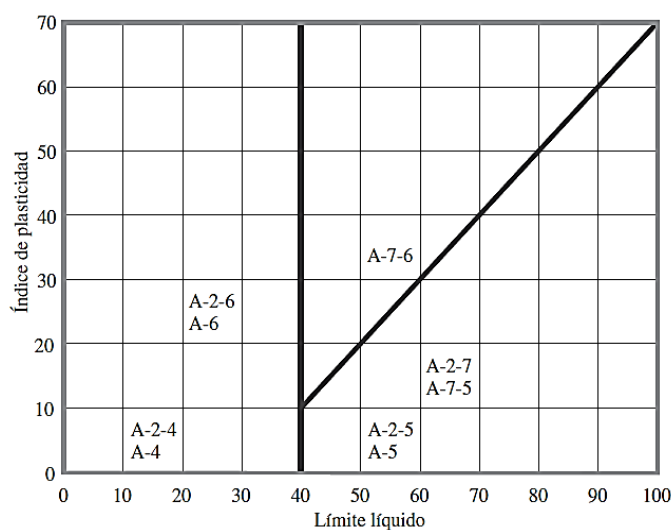
Los sistemas de clasificación son métodos empíricos que facilitan la resolución de problemas porque agrupan los suelos según similitudes en su comportamiento; Además, también permiten correlacionar características. Los sistemas de clasificación más utilizados son SUCS “Standard Soil Classification System” y AASHTO “American Association of Highway Officials”; este último sistema es especialmente útil para la construcción de carreteras (Ravinez, 2010).

a) Sistema de clasificación AASHTO

En este sistema los suelos se dividen en dos grupos: suelos granulares y francos arcillosos finos (Ariza et al., 2017). El sistema, clasifica los suelos en siete grupos básicos, numerados del A-1 al A-7, que indican que clase de suelo es útil como subrasante, base o subbase de un pavimento. Una medida numérica de la calidad del suelo es el índice de grupo (IG), cuanto menor sea el índice de grupo (IG), mejor será la calidad de los fragmentos del suelo (Cuipal, 2018).

Figura 10

Carta de Plasticidad Sistema de Clasificación AASHTO



Nota: (Braja, 2015, p. 80)

Figura 11

Clasificación de los Suelos basada en AASHTO M 145 y/o ASTM D 3282

Clasificación general	Suelos granulares 35% máximo que pasa por tamiz de 0.075 mm (N° 200)							Suelos finos más de 35% pasa por el tamiz de 0.075 mm (N° 200)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
% que pasa por el tamiz de: 2 mm (N° 10) 0.425 mm (N° 40) F: 0.075 mm (N° 200)	máx. 50	máx. 50	mín. 51	Máx. 35	máx. 35	máx. 35	máx. 35	min. 36	mín. 36	mín. 36	mín. 36	min. 36
Características de la fracción que pasa del tamiz (N° 40)												
LL (límite líquido)				máx. 40	min. 41	máx. 40	mín. 41	máx. 40	Min. 41	máx. 40	mín. 41	min. 41
IP (índice de plasticidad)	máx. 6	máx. 6	NP	máx. 10	máx. 10	mín. 11	mín. 11	máx. 10	máx. 10		mín. 11 (a)	min. 11
Tipo de material	Piedras, gravas y arenas		Arenas Finas	Gravas y arenas limosas o arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos		
Estimación general del suelo como sub rasante	Excelente a bueno						Regular a insuficiente					

(a) Índice de Plasticidad del subgrupo A-7-5: es igual o menor que LL-30.

(b) Índice de Plasticidad del subgrupo A-7-6: es mayor que LL-30.

Cuando se requiera relacionar los grupos con el Índice de Grupo (IG), estos deben mostrarse entre paréntesis después del símbolo del grupo, ejemplo: A-4(5), A-7-5 (17), etc
 $IG = (F-35) [0.2+0.005 ((1-40))] +0.01 (F-15) (IP-10)$.

Nota: (MTC, 2014, p. 36)

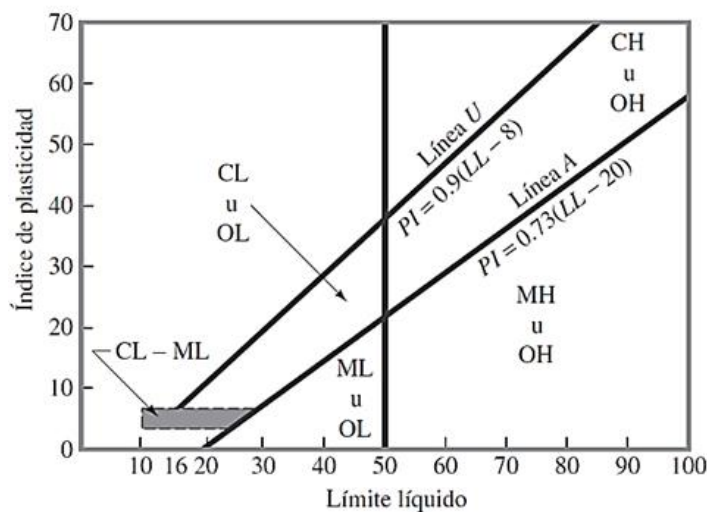
b) Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)

El sistema de clasificación SUCS se utiliza para describir la textura y el volumen de los suelos, y se divide en suelos de partículas finas y gruesas, de acuerdo al suelo que pasa por la malla N° 200 (Cuipal, 2018).

- Gravas (G). Acumulación suelta de fragmentos de roca, sus partículas oscilan entre 7.62 cm y 2 mm (Crespo, 2004).
- Arenas (S). Materiales de grano fino que resultan de la erosión o trituración artificial de rocas, sus partículas varían de 2 mm a 0.05 mm (Crespo, 2004).
- Limos (M). Suelo de grano fino, con poca o ninguna plasticidad, el diámetro de las partículas varía de 0.05 mm a 0.005 mm (Crespo, 2004).
- Arcillas (C). Partículas sólidas de menos de 0.005 mm de diámetro cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al mezclarse con agua (Crespo, 2004).

Figura 12

Carta de Plasticidad Sistema de Clasificación SUCS



Nota: (Braja, 2015, p. 84).

Figura 13

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

DIVISIÓN MAYOR		GRUPO SÍMBOLOS	DESCRIPCIÓN	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN DEL LABORATORIO				
SUELOS DE GRANO GRUESO Mas de la Mitad del material es mayor que el tamiz N° 200	MAS DE LA MITAD DE LA FRACCIÓN GRUESA ES MAYOR QUE EL TAMIZ N° 4	GRAVA LIMPIA (Poco o ningún fino)	GW Grava bien graduada o mezcla de arena y grava. Poco o ningún fino	mayor que 4 $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ entre 1 y 3 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} * D_{60})}$				
			GP Grava mal graduada o mezcla de arena y grava. Poco o ningún fino		No reúne los requisitos de granulometría para GW			
		GRAVA CON FINOS (Apreciable cantidad de finos)	GM <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td>d</td> <td rowspan="2">Grava con limos, grava mal graduada muy limosa. Mezcla grava, arena y arcilla</td> </tr> <tr> <td>u</td> </tr> </table>	d	Grava con limos, grava mal graduada muy limosa. Mezcla grava, arena y arcilla	u	Límites de Atterberg bajo la línea "A" o IP menor de 4	Por encima de la línea "A" con IP entre 4 y 7, estaremos en un caso "limite" y usarse los dos símbolos
			d	Grava con limos, grava mal graduada muy limosa. Mezcla grava, arena y arcilla				
	u							
	GC Mezcla bien graduada de gran, arena y arcilla. Excelente aglutinante	Límites de Atterberg sobre la línea "A" o IP mayor de 7						
	MAS DE LA MITAD DE LA FRACCIÓN GRUESA ES MENOR QUE EL TAMIZ N° 4	ARENA LIMPIA (Poco o ningún fino)	SW Arena bien graduada y arena gravillosa, poco o ningún fino	mayor que 6 $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ entre 1 y 3 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} * D_{60})}$	No reúne los requisitos de granulometría para SW			
			SP Arena mal graduada, arena gravillosa, pocos o ningún fino					
		ARENA CON FINOS (Apreciable cantidad de finos)	SM <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td>d</td> <td rowspan="2">Arena con limos, arena muy limosa, mezcla arena y arcilla</td> </tr> <tr> <td>u</td> </tr> </table>	d	Arena con limos, arena muy limosa, mezcla arena y arcilla	u	Límites de Atterberg bajo la línea "A" o IP menor de 4	Las líneas trazadas en la zona rayada con IP entre 4 y 7 son casos limite y deben usarse los dos símbolos
			d	Arena con limos, arena muy limosa, mezcla arena y arcilla				
u								
SC Mezcla bien graduada arena y arcilla. Excelente aglutinante		Límites de Atterberg sobre la línea "A" o IP mayor de 7						
SUELOS DE GRANO FINO Mas de la mitad del material es menor que el tamiz N° 200	LIMO Y ARCILLA (Límite líquido es menor de 50)	ML Limo orgánico y arena muy fina, polvo de roca, arena fina con ligera plasticidad						
		CL Arcilla inorgánica de baja o media plasticidad. Arcilla arenosa, arcilla gravillosa, arcilla limosa, arcilla floja						
		OL Limos orgánicos, limos-arcilla orgánica de baja plasticidad						
	LIMO Y ARCILLA (Límite líquido es mayor de 50)	MH Limos inorgánicos, arena fina micáceos o diatomeoso suelo limoso, suelo elástico						
		CH Arcilla inorgánica de alta plasticidad						
		OH Arcilla orgánica de media a alta plasticidad						
		Pt Turbas y otros suelos altamente orgánicos						

Nota: Adaptado de (Chincay, 2018, p. 23; Braja, 2012, p. 19).

2.3.4.3. Propiedades mecánicas del suelo

Proctor modificado (compactación). Determina la cantidad de agua necesaria para asegurar la compactación del suelo, es la representación más completa de las condiciones de campo. Se trata de determinar la masa por unidad de volumen mediante un procedimiento específico para diferentes contenidos de agua. La diferencia entre el ensayo de Proctor modificado y Proctor estándar es la energía de compactación (Quispe, 2020).

$$D_s = \frac{D_h}{(100+W\%)} \times 100 \quad (6)$$

En la ecuación 6, la densidad seca (D_s), es igual a la densidad húmeda, entre el 100% más el porcentaje del contenido de humedad ($W\%$).

Tabla 7

Especificaciones de la Prueba Proctor Modificada

Elemento	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde (mm)	101.6	101.6	152.4
Volumen del molde (cm ³)	943.3	3 943.3	2124
Peso del martillo (N)	44.5	44.5	44.5
Altura de la caída del martillo (mm)	457.2	457.2	457.2
Número de golpes de martillo por capa de suelo	25	25	56
Número de capas de compactación	5	5	5
Energía de compactación (KN-m/m ³)	2696	2696	2696

Nota: (Braja, 2015, p. 102).

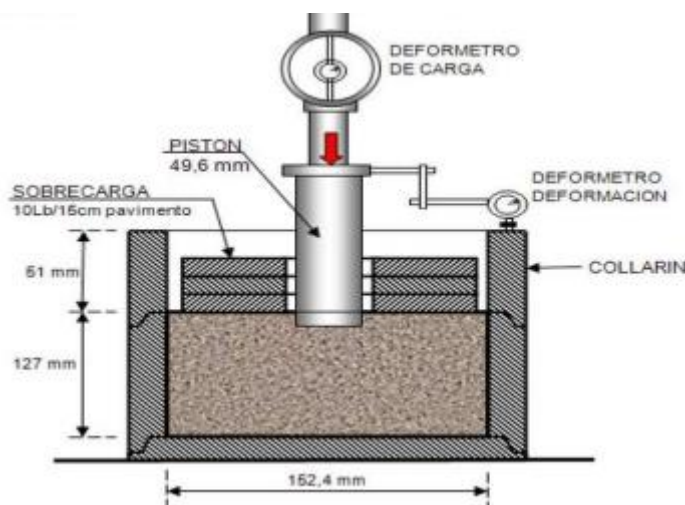
Capacidad de soporte del suelo (CBR, California Bearing Ratio). Resistencia al corte del suelo en condiciones controladas de humedad y densidad, a diversos grados de compactación. El CBR es la fuerza requerida para que el pisón o martillo penetre a una profundidad determinada una probeta con una muestra de suelo compactada a una humedad y densidad definidas (Fernández, 2017).

2.3.5. Capacidad de soporte del suelo (CBR)

California bearing ratio (CBR), capacidad de soporte del suelo, determina la resistencia del suelo a esfuerzos cortantes, en condiciones de humedad y densidad controlada, permitiendo obtener el % de relación de soporte (Osorio y Casas, 2011, p. 16). Este método fue propuesto en 1929, por los ingenieros T.E. Stanton, y O.J. Porter del departamento de carreteras de California, desde esa fecha el método CBR se ha generalizado, y es una forma de clasificar al suelo para ser utilizado como subrasante en la construcción de carreteras (Osorio y Casas, 2011, p. 16). “El CBR del suelo, es la carga unitaria correspondiente a 0.1” y 0.2” de penetración, expresada en porciento como valor estándar, también mide el potencial de resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de densidad y humedad cuidadosamente controladas” (Pineda, 2019, p. 49). Es un parámetro de la calidad de la subrasante, si el CBR es mayor a 6%, el suelo es bueno, pero si el CBR es menor a 6%, el suelo de la subrasante es pobre e inadecuado, necesita estabilización (Cordova y Mori, 2021, p. 18).

Figura 14

Aplicación de la Carga de Penetración en el Ensayo CBR



Nota: (Pineda, 2019, p. 49).

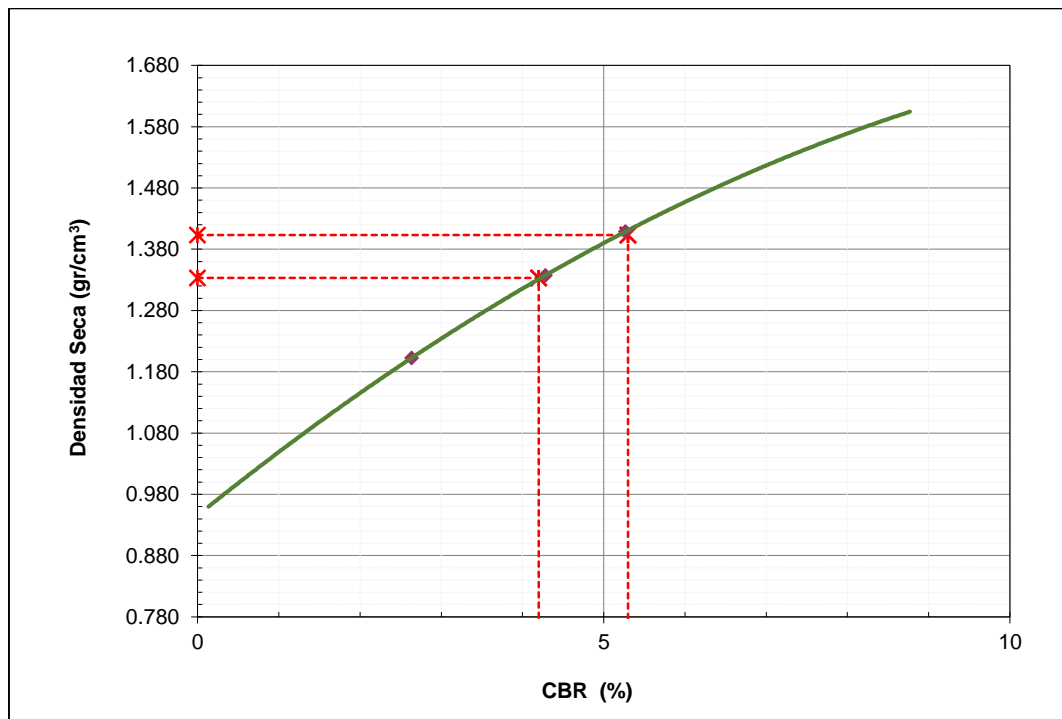
El CBR que se usa para proyectar, es el valor que se consigue para una penetración de 0.1” o 0.2”, optando como resultado al menor de los valores. En la mayoría de los suelos, el valor para la penetración de 0.1” tiene un menor valor CBR, siendo el que es tomado para diseños de vías afirmadas o pavimentadas. Este ensayo, se utiliza para establecer una correspondencia entre el comportamiento de los suelos frente a un esfuerzo dado por el tránsito de vehículos, para ello, se determina la curva esfuerzo deformación; esta curva se evalúa para ver si presenta homogeneidad, caso contrario requiere corregir la tendencia desde la curva de origen (Pineda, 2019, pp. 50-51).

$$\%CBR = \frac{\text{Carga unitaria del ensayo}}{\text{Carga unitaria patrón}} \times 100 \quad (7)$$

En la ecuación 7, el CBR es un porcentaje del peso unitario del ensayo, entre la carga unitaria patrón, multiplicada por 100, para que se exprese en porcentaje.

Figura 15

Ejemplo de Curva CBR



2.3.6. Estabilización de la subrasante

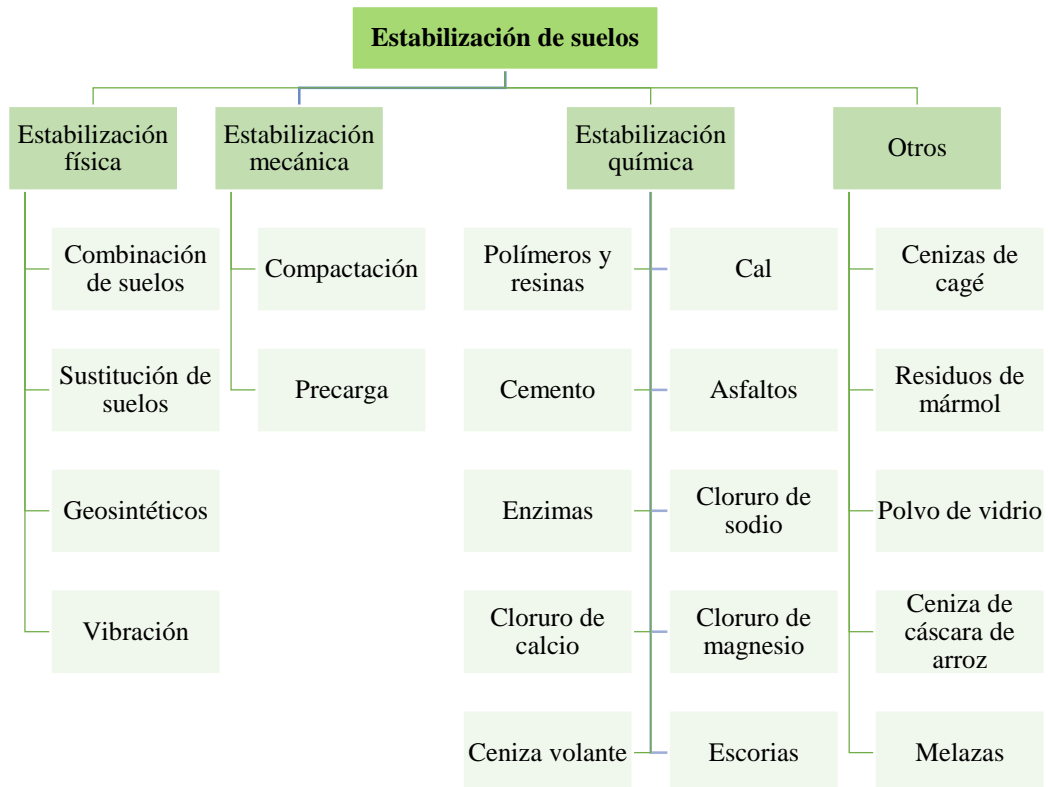
Proceso de incorporar o mezclar materiales al suelo para mejorar sus propiedades, como, resistencia, tenacidad, ductilidad, permeabilidad, entre otras (Elizondo, 2009, p. 50), por intermedio de la mezcla de agregados (estabilización mecánica), mezcla de aditivos (cemento, cal viva o cal apagada, betún, cloruro cálcico o sódico, ceniza de alto horno, entre otros.) y/o compactación adecuada (Montejo et al., 2018, pp. 13-14).

2.3.6.1. Tipos de estabilización de subrasante

Existen diversas alternativas mecánicas, físicas y químicas para la estabilización del suelo. A continuación, se muestra varias clasificaciones para la estabilización del suelo:

Figura 16

Tipos de Estabilizaciones



Nota: Adaptado (MTC, 2014). Elaboración propia.

2.3.6.2. Estabilización física

Estabilización por combinación de suelos. Consiste en la fusión o mezcla de materiales de suelo existentes con materiales de préstamo, para asegurar que la mezcla cumpla con los requisitos para su construcción (MTC, 2014, p. 94).

Estabilización por sustitución de suelos. Combinaciones o mezclas del suelo presente con materiales prestados; se debe realizar una excavación de 15 cm sobre el suelo existente para colocar el material prestado (MTC, 2014, p. 94).

Estabilización por Geosintéticos. Reducen las fuerzas cortantes y verticales en suelos naturalmente débiles (Castro, 2017).

Vibración. Solidificación del suelo por vibración profunda, aplicado a suelos arenosos o permeables, más compactación (Castro, 2017).

2.3.6.3. Estabilización mecánica por compactación

Método más común para acrecentar el CBR, consiste en aumentar la densidad del suelo, para reducir la cantidad de vacíos, disminuir el contenido de agua por filtración y aumentar la fricción interna (Cuipal, 2018; Higuera et al., 2012).

2.3.6.4. Estabilización química

Consiste en el uso de productos químicos para mejorar las propiedades técnicas del suelo, reducir su plasticidad y hacerlo más resistente (Junco y Tejada, 2011).

Estabilización por medios químicos (cemento, cal, asfalto, cloruro de sodio, cloruro de calcio, etc.). Generar un cambio en las propiedades y características del suelo; proporcionando así una mayor respuesta a las tensiones dinámicas a las que estará expuesto (Lomparte y Sanchez, 2019).

Otros (Estabilización con polímeros). Para aumentar la capacidad de carga, el suelo se recubre por los polímeros (diluidos en agua), luego se compacta hasta que las partículas entran en contacto entre sí (Lomparte y Sanchez, 2019).

2.3.7. *Estabilización de la subrasante con residuos de carbón*

Los residuos de carbón han venido siendo utilizados en diferentes países, como Alemania, España, Polonia, República Checa y Francia, donde destinan millones de toneladas al año de estos residuos como material de relleno de carreteras y terraplenes (Jiménez et al., 2019). La estabilización de los suelos a nivel de subrasante, es la adición de aditivos, para mejorar la capacidad portante del suelo natural, mediante procesos físicos, mecánicos y/o químicos (Casas, 2021). El efecto de introducir residuos de carbón al suelo, es provocar la floculación y aglomeración de las partículas de arcilla debido al intercambio de iones en la superficie de las partículas del suelo; mejorando la trabajabilidad y proporcionando una reducción inmediata de la expansión, contracción y plasticidad del suelo, mejorando la capacidad de soporte del suelo, con método más seguro para el medio ambiente (Adereinlewo et al., 2020). Se puede utilizar residuos de carbón mineral o carbón vegetal, en diferentes gradaciones, sea granular o pulverizado, sin embargo, de estas características del carbón, dependen en gran medida, la resistencia que alcance el suelo estabilizado (Amaya et al., 2020). La resistencia mecánica es el principal factor del suelo que se usa en subrasantes, por lo que al aplicar un tratamiento se debe determinar los efectos que éste pueda ocasionar en el suelo (Palomino, 2016, p. 23). El uso de residuos de carbón en su estado natural, molidos o triturados, previamente tamizados por la malla N° 4 o 3/8", como estabilizante de la subrasante, logra un impacto positivo en la capacidad de soporte del suelo, siendo un método de estabilización química, donde se mezcla el suelo con el residuo de carbón triturado, para luego pasar por un proceso mecánico de compactación, para que cumpla con los lineamientos del MTC (Julca, 2020).

2.4. Definición de términos

Carbón mineral. Combustible fósil, en forma de roca sedimentaria negra organoclastica, compuesta primariamente de restos de plantas fósiles, depositados en pantanos, lagos o ambientes ordinarios (Castillejo et al., 2017).

CBR. Porcentaje entre la fuerza requerida para penetrar un pistón de un tamaño dado a una velocidad predeterminada y una profundidad establecida en la muestra de suelo que se analiza (Ariza et al, 2017).

Estabilización de subrasante. Se basa en agregar un componente químico o aplicar un tratamiento físico para cambiar las propiedades del suelo (Payne, 2017).

Residuos de carbón mineral. Sedimento que se produce del carbón, material poroso y húmedo, también denominado ganga (Castillejo et al., 2017).

Subrasante. Es la capa superficial del suelo natural, forma el punto de apoyo de la estructura del pavimento. Es necesario evaluar las propiedades físicas, mecánicas y químicas del suelo, tanto en campo y laboratorio (Fernández, 2017).

Carretera no pavimentada. Carretera cuya superficie de rodadura está conformada por gravas o afirmado, suelos estabilizados o terreno natural (MTC, 2018, p.7).

Calicata. Excavación que se realiza en el terreno que nos permite estudiar la estratigrafía del suelo a diferentes profundidades (MTC, 2018, p. 6).

2.5. Hipótesis

Ho: La capacidad de soporte (CBR) del suelo de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, no aumenta al adicionar residuos de carbón mineral de la Mina “La Palma”, del distrito de Chalamarca, según los lineamientos del Manual de Carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2014).

H1: La capacidad de soporte (CBR) del suelo de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, aumenta al adicionar residuos de carbón mineral de la Mina “La Palma”, del distrito de Chalamarca, según los lineamientos del Manual de Carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2014).

2.6. Operacionalización de variables

2.6.1. Variable independiente

Los “Residuos de carbón mineral”, son el sedimento que se produce del carbón, material poroso y húmedo, también denominado ganga (Castillejo et al., 2017), que es tamizado por el tamiz 3/8”, para ser utilizado en diferentes porcentajes del peso seco del suelo, como estabilizante de la subrasante de la carretera el Verde Numbral del Km 1+500 al Km 2+500.

2.6.2. Variable dependiente

El “CBR de la subrasante”, es el porcentaje entre la fuerza requerida para penetrar un pistón de un tamaño dado a una velocidad predeterminada y una profundidad establecida en la muestra de suelo que se analiza (Ariza et al, 2017). Esta variable, sirve para determinar el CBR del suelo natural y estabilizado.

2.6.3. Operacionalización de variables

Tabla 8

Matriz de Operacionalización de Variables

Variables	Definición conceptual	Dimensiones	Definición conceptual	Definición operacional		
				Indicadores	Ítem	
VI Residuos de carbón mineral	“Define su proceso de obtención y tamizado para su uso en la el mejoramiento de la subrasante”	Propiedades físicas	Para conocer las características del residuo de carbón	Granulometría	%	
				Humedad natural	%	
				Límite líquido	%	
				Límite plástico	%	
VD CBR de la subrasante	“El CBR mide la resistencia mecánica de la subrasante ante un esfuerzo cortante. En el estudio se definen las propiedades físico-mecánicas de la subrasante y su adición de 10%, 20% y 30% de residuos de carbón mineral en la carretera El Verde – Numbral”	Propiedades físicas del suelo natural	Para conocer las características físicas de suelo de la subrasante en estado natural	Granulometría	%	
				Humedad natural	%	
				Límite líquido	%	
				Límite plástico	%	
			Propiedades mecánicas del suelo natural	Es necesario determinar las propiedades mecánicas del suelo de la subrasante a fin de verificar si necesita estabilización, de acuerdo a las normas actuales.	Proctor modificado	%
					CBR	%
					Proctor modificado	%
					CBR	%

CAPÍTULO III.

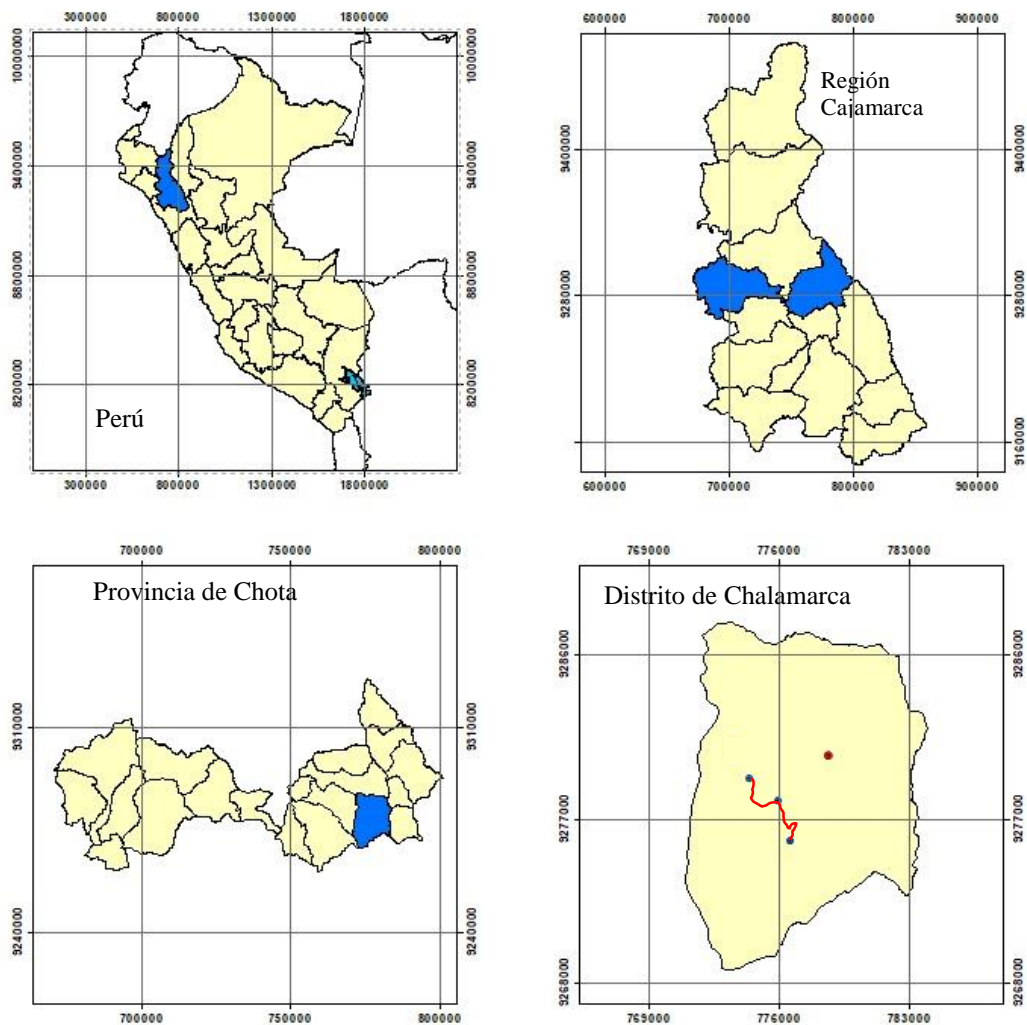
MARCO METODOLÓGICO

3.1. Ubicación geográfica del estudio

El distrito de Chalamarca, tiene una extensión de 179.74 km², está ubicada al noreste de la ciudad de Chota a 40.5 km aproximadamente, geográficamente en las coordenadas UTM WGS84 17S 778631.00 m E, 9280436.00 m S, a 2,662 msnm, tiene un relieve que va de llano a accidentado, variación de climas desde cálido hasta frío seco, notándose muy definida la estación lluviosa entre los meses de octubre a mayo (Municipalidad Distrital de Chalamarca, 2021).

Figura 17

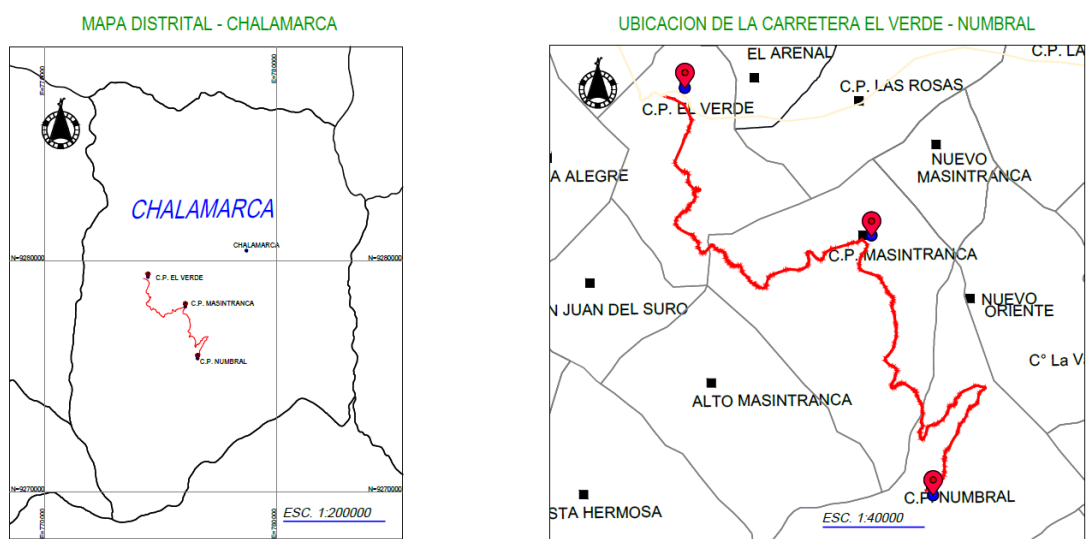
Ubicación del Distrito de Chalamarca



La carretera El Verde – Numbral, está ubicada en el distrito de Chalamarca, provincia de Chota, región Cajamarca, tiene una extensión de 8 km, inicia en el centro poblado El Verde con coordenadas UTM WGS84 17S, de 774250.997 m E, 9279230.979 m S, a 2913.14 msnm y termina en el centro poblado Numbral, con coordenadas UTM WGS84 17S de 776517.397 m E, 9275820.872 m S, a 3069.68 msnm; tiene superficie de rodadura no pavimentada, en condición de trocha, es la vía de acceso a los centros poblados El Verde, Masintranca, Numbral, Huayrasitana, Bella Andina y demás comunidades; a su vez esta ruta, conecta el distrito de Chalamarca, provincia de Chota con el distrito de Bambamarca, provincia de Hualgayoc, siendo una importante ruta comercial; sin embargo, a partir de la inspección visual de la misma, se han observado fallas por ahuellamiento, expansión granular del afirmado, asentamientos de la superficie de rodadura, baches, lodazal, entre otros, lo que provoca dificultades para la transitabilidad en dicha ruta, especialmente en el Km 1+500 al Km 2+500.

Figura 18

Ubicación de la Carretera El Verde – Numbral

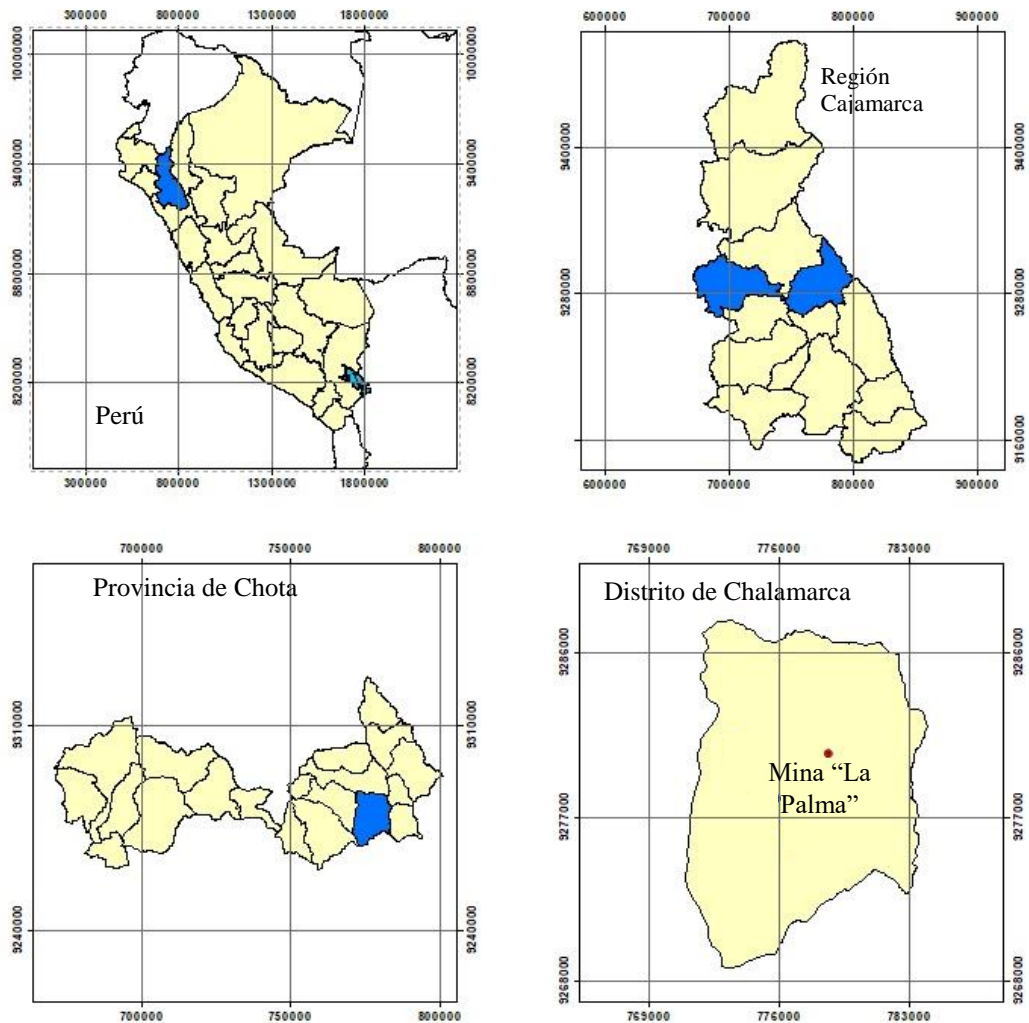


Nota: (ver anexo F, planos).

Los residuos de carbón mineral, se han obtenido de manera manual, a partir de la ganga de carbón dejada afuera de la mina artesanal denominada “La Palma”, ubicada geográficamente en las coordenadas UTM WGS84 17 S 778848.051 m E, 9281080.952 m S, a 2637.20 msnm. La mina “La Palma” se encuentra a 0.62 km de la ciudad de Chalamarca, se accede a la misma por carretera afirmada, de esta mina hasta el centro poblado El Verde hay una distancia de 8.00 km, por la carretera Chalamarca – Namoyoc – La Libertad – Las Rosas – El Verde, y hacia el centro poblado Numbral, hay una distancia de 9.00 km por la carretera Chalamarca – Namoyoc – La Libertad – Nuevo Oriente – Numbral.

Figura 19

Ubicación de la “Mina La Palma”



3.2. Tipo y nivel de investigación

El enfoque del estudio es cuantitativo, se ha cuantificado las propiedades físicas y mecánicas del suelo en su estado natural, y con adición de 10, 20 y 30% de residuos de carbón mineral, respecto al peso, para determinar su efecto en la capacidad de soporte del suelo, según las normas técnicas peruanas, por tanto, según la finalidad el estudio es aplicado, porque utiliza conocimientos existentes, para generar nueva información acerca de la estabilización de suelos. La investigación es descriptiva, no experimental de corte transversal; a pesar de que se ha manipulado la variable dependiente, capacidad portante de la subrasante, por medio de la variable independiente (residuos de carbón mineral), no ha habido un tratamiento estadístico para la elección de la muestra, sino se ha definido en base al “Manual de carreteras: suelos, geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos” (MTC, 2014, p. 26), así mismo los ensayos se han realizado en un tiempo específicos, siendo el muestreo en enero 2021, y los ensayos de laboratorio en los meses siguientes.

Tabla 9

Tipo de Investigación según los Principales Criterios

Criterio	Tipo de investigación
Finalidad	Aplicada
Estrategia o enfoque metodológico	Cuantitativa
Objetivos	Descriptiva
Fuente de datos	Primaria
Control de diseño de la prueba	No experimental
Temporalidad	Transversal (sincrónica)
Contexto donde sucede	Laboratorio, campo
Intervención disciplinaria	Interdisciplinaria

Nota: (Hernández-Sampieri et al., 2014).

3.3. Diseño de investigación

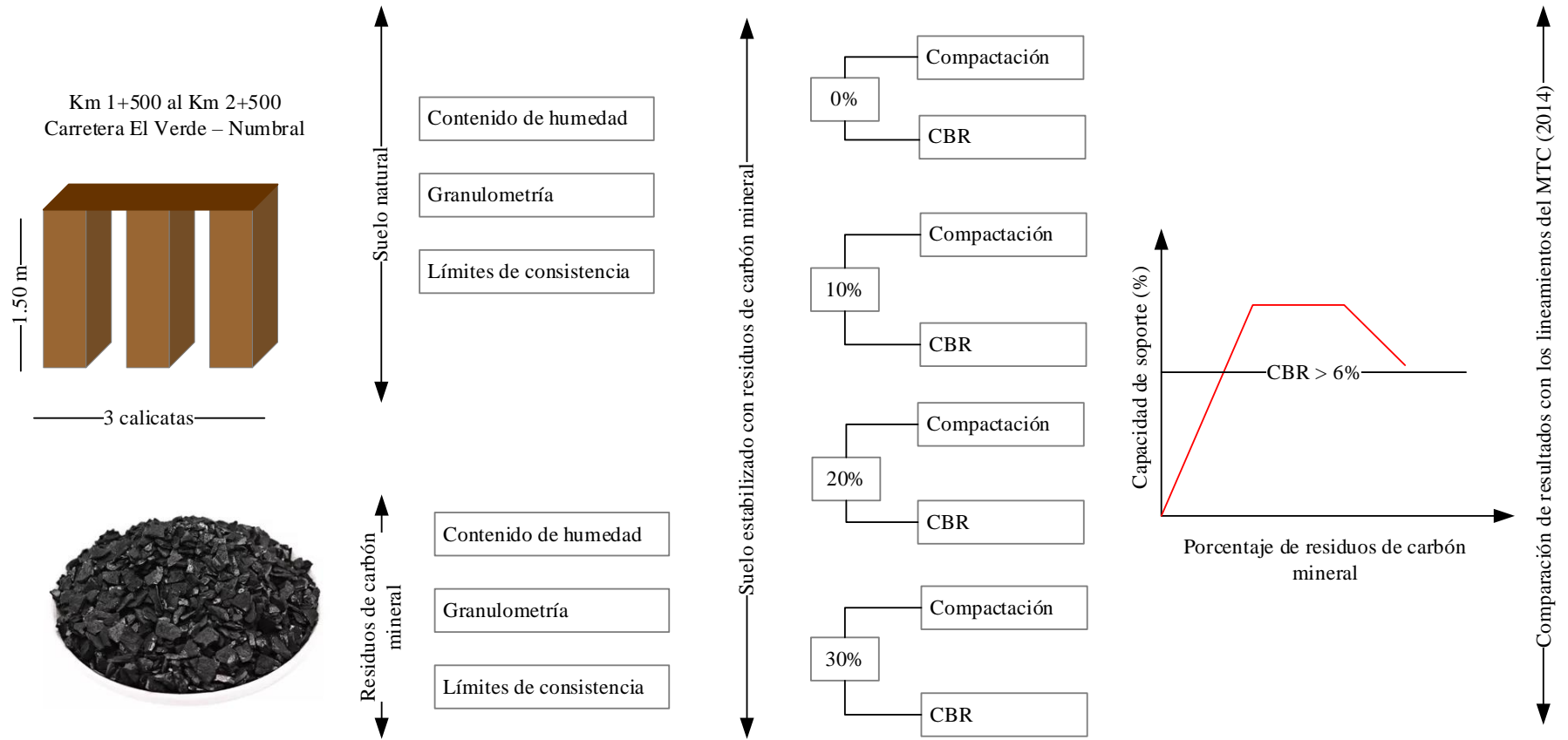
El diseño es descriptivo causal simple, se ha adicionado residuos de carbón mineral (causa), para determinar el efecto en la capacidad de soporte (consecuencia) del suelo de la subrasante del Km 1+500 al Km 2+500, de la carretera El Verde – Numbral.

$$M \leftarrow XY \quad (8)$$

En la ecuación 8, la muestra M, es sometida a tratamiento (X) que es la adición de residuos de carbón mineral, para generar un efecto Y en la capacidad de soporte del suelo de la subrasante del Km 1+500 al Km 2+500, de la carretera El Verde – Numbral.

Figura 20

Diseño de Investigación Descriptivo Causal Simple



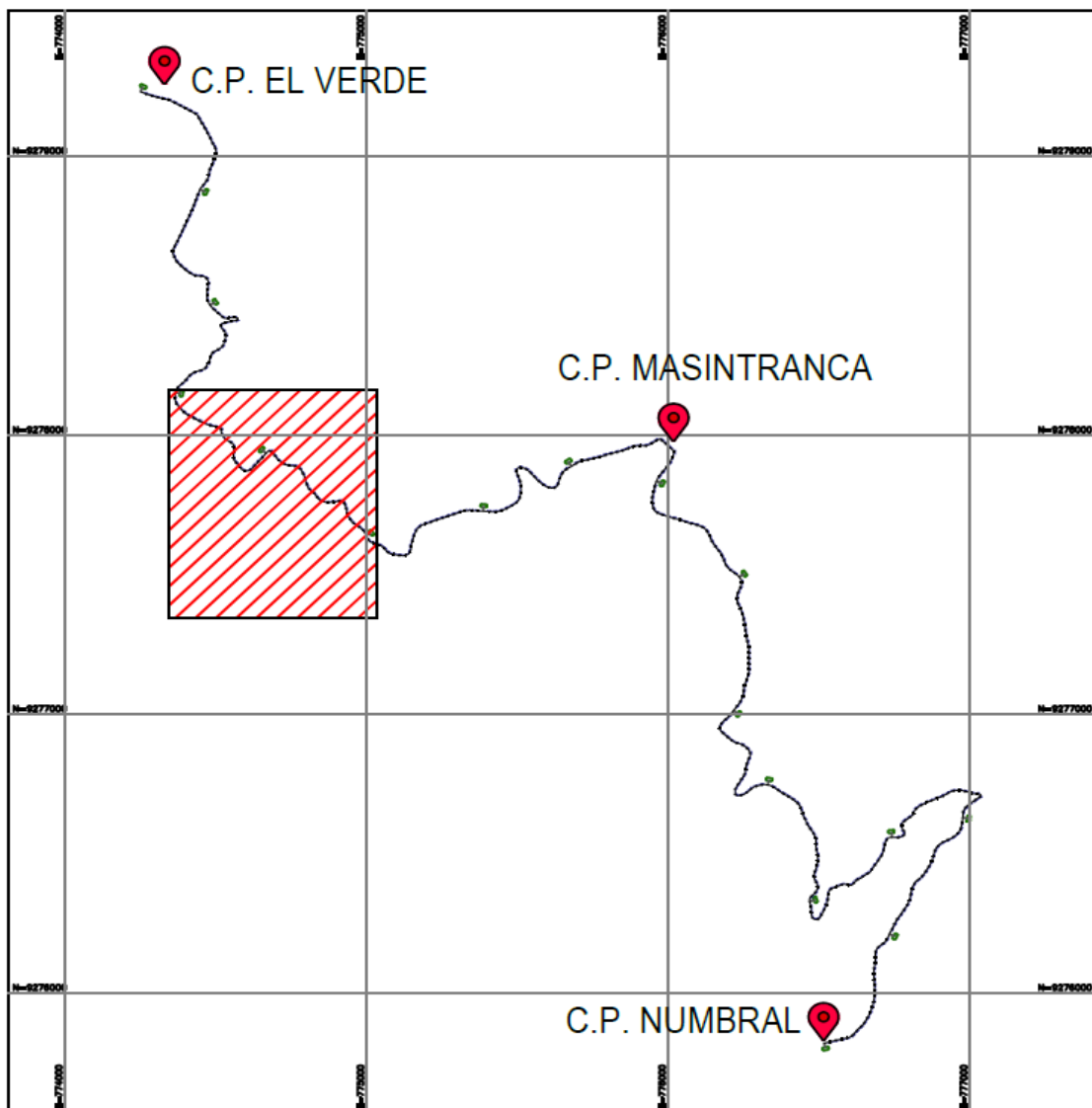
3.4. Población, muestra y muestreo

3.4.1. Población

El suelo de la subrasante del Km 1+500 al Km 2+500 de la carretera de 8.00 km, que conecta el centro poblado El Verde con el centro poblado Numbral, del distrito de Chalamarca, provincia de Chota. Debido a que, en la capa de rodamiento de dicho kilometro se evidenciaron fallas por deformación, baches, lodazal, erosión, entre otros.

Figura 21

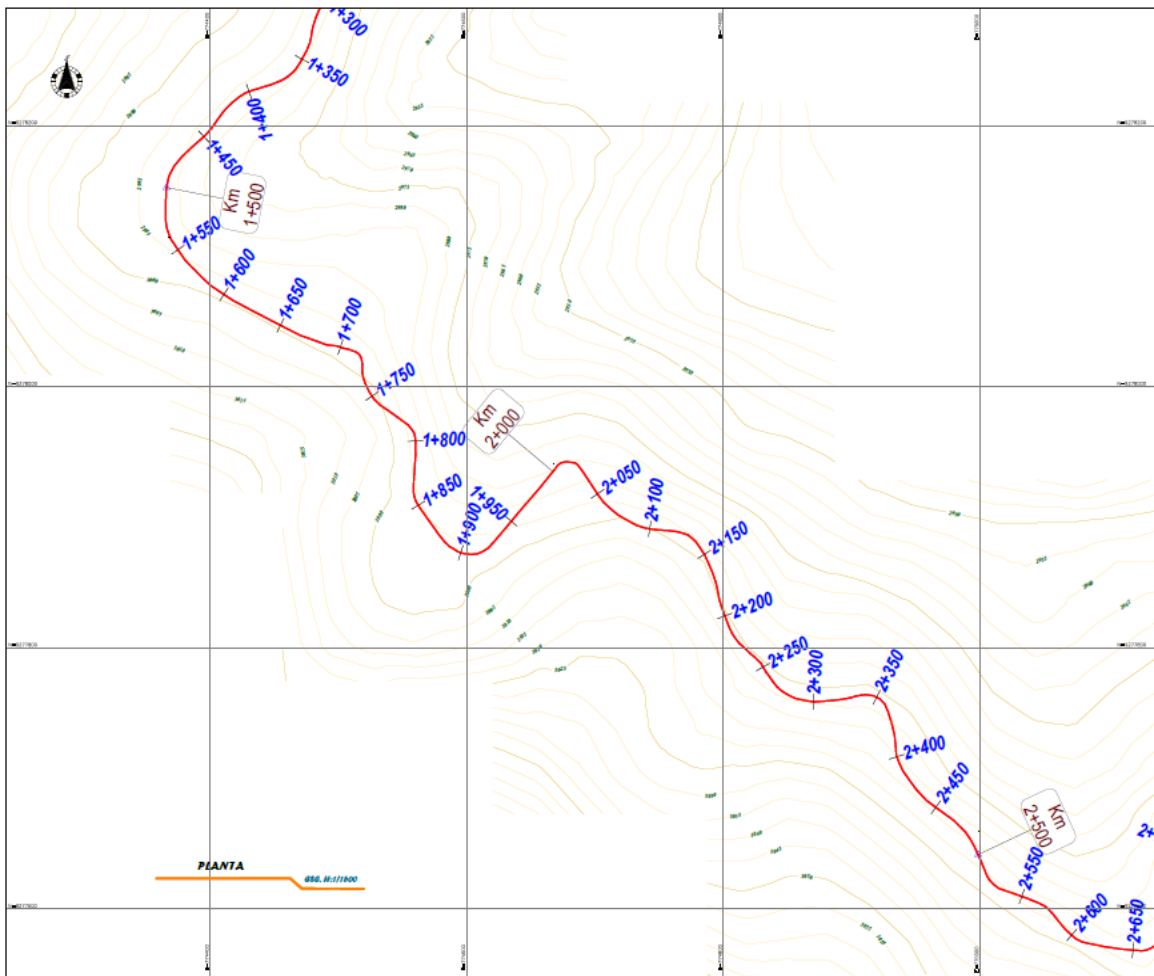
Carretera El Verde – Numbral



Nota: (ver anexo F, planos).

Figura 22

Km 1+500 al Km 2+500, Carretera El Verde – Numbral



Nota: (ver anexo F, planos).

3.4.2. Muestra

La muestra se ha determinado según los criterios del “Manual de carreteras: suelos, geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos” (MTC, 2014, p. 26), donde se hace mención que el número mínimo de calicatas en carreteras de bajo volumen de tránsito es 1 por km, siendo así en el presente estudio la población fue el suelo de la subrasante del km 1+500 al km 2+500 de la carretera El Verde – Numbral, del distrito de Chalamarca, por lo que buscando mayor precisión en la estabilización del suelo, se ha tomado como muestra a tres

(3) calicatas, ubicadas uniformemente en la extensión de 1 km, excavadas con una profundidad de 1.50 m, según los criterios del “Manual de ensayo de materiales” (MTC, 2018), en la sección E 101.

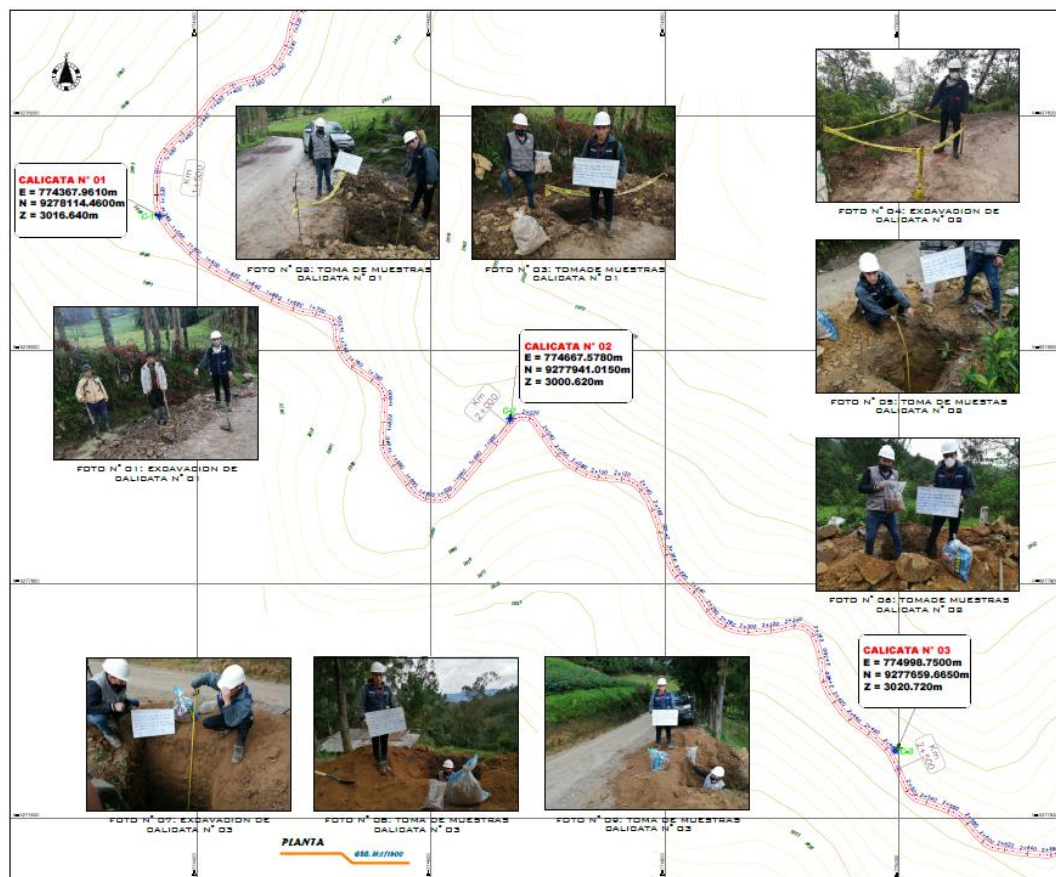
Tabla 10

Ubicación Geográfica de las Calicatas, en el Km 1+500 al Km 2+500 de la Carretera El Verde – Numbral

Calicatas	Este (m)	Norte (m)	Altura (msnm)
C-1	774367.96	9278114.46	3016.64
C-2	774667.58	9277941.02	3000.62
C-3	774998.75	9277659.67	3019.99

Figura 23

Ubicación de las Calicatas, en el Km 1+500 al Km 2+500 de la Carretera El Verde – Numbral



Nota: (ver anexo F, planos).

De cada calicata se obtuvieron 10 kg de suelo inalterado, para los ensayos físicos, tales como contenido de humedad, granulometría y límites de consistencia, a fin de determinar la clasificación AASHTO de los suelos de las tres calicatas de la subrasante del Km 1+500 al Km 2+500 de la carretera El Verde – Numbral.

Tabla 11

Ensayos a Muestras de Suelo Natural

Ensayos en Suelo Natural	Calicatas			
	C-1	C-2	C-3	Sub Total
Granulometría por tamizado	1.00	1.00	1.00	3.00
Contenido humedad	1.00	1.00	1.00	3.00
Límites de consistencia	1.00	1.00	1.00	3.00
Total	3.00	3.00	3.00	9.00

Para los ensayos mecánicos de cada calicata se llenaron sacos impermeables de 150 kg de suelo alterado. Al suelo de las calicatas extraídas de la subrasante del Km 1+500 al Km 2+500 de la carretera El Verde – Numbral, se le adicionaron 0, 10, 20 y 30% de residuos de carbón mineral, respecto al peso del suelo seco, para determinar sus propiedades mecánicas como compactación (ensayo de Proctor modificado) y capacidad de soporte (ensayo de CBR). Para el ensayo de compactación, se elaboraron cuatro especímenes con diferentes cantidades de agua, según calicata y porcentaje de adición de residuos de carbón mineral, para determinar la densidad seca máxima, y el óptimo contenido de humedad, siendo así fueron necesarios 48 especímenes, mientras que para el ensayo CBR se trabaja con diferente número de golpes por capa (56, 25 y 12 golpes), siendo así se han elaborado tres especímenes por cada calicata y por cada porcentaje de adición de residuos de carbón mineral, dando un total de 36 especímenes, tal como se muestra en la Tabla 11 y Tabla 12.

Tabla 12*Número de Especímenes para el Ensayo de Compactación*

Calicatas	Porcentajes de adición de residuos de carbón mineral de TM 3/8" en el suelo				
	0%	10%	20%	30%	Sub Total
C-1	4	4	4	4	16
C-2	4	4	4	4	16
C-3	4	4	4	4	16
Total	12	12	12	12	48

Tabla 13*Número de Especímenes para el Ensayo de CBR*

Calicatas	Porcentajes de adición de residuos de carbón mineral de TM 3/8" en el suelo				
	0%	10%	20%	30%	Sub Total
C-1	3	3	3	3	12
C-2	3	3	3	3	12
C-3	3	3	3	3	12
Total	9	9	9	9	36

3.4.2.1. Criterios de selección de la muestra

Se ha utilizado los criterios del “Manual de carreteras: suelos, geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos” (MTC, 2014, p. 26).

En dicho manual se especifica que el número mínimo de calicatas en carreteras de bajo volumen de tránsito, como lo es la carretera de estudio, es 1 por km.

El tramo de estudio iba del Km 1+500 al Km 2+500 de la carretera El Verde – Numbral, con 1 km de extensión, por lo tanto, correspondía la realización de una sola calicata, pero para mayor precisión de los datos recopilados, se considero realizar tres calicatas.

Se realizaron tres calicatas distribuidas uniformemente en la extensión del Km 1+500 al Km 2+500 de la carretera El Verde – Numbral.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.5.1. Técnicas de recolección de datos

Observación. Técnica a priori para la recolección y tamizado de residuos de carbón mineral. Así como para el muestreo del suelo de la subrasante.

Ensayos de laboratorio. Se ha realizado el análisis de los residuos de carbón mineral y el suelo natural de la subrasante a ensayos de contenido de humedad, gradación y límites de consistencia, mientras que el suelo con 0, 10, 20 y 30% de residuos de carbón mineral, se ha sometido a ensayos de compactación y CBR, según los lineamientos de las normas técnicas peruanas.

- NTP 339.127 Contenido de humedad (INACAL, 2019).
- NTP 339.128 Análisis granulométrico (INACAL, 2019)
- NTP 339.129 Límites de consistencia (INACAL, 2019)
- NTP 339.141 Proctor modificado (INACAL, 2019)
- NTP 339.145 CBR de laboratorio (INACAL, 2019)

Comparación. Se han comparado los valores CBR del suelo natural de las calicatas de la subrasante de la carretera, y el CBR del suelo estabilizado con diferentes dosis de residuos de carbón mineral, para determinar el efecto del tratamiento en las características mecánicas.

3.5.2. Instrumentos de recolección de datos

Cuaderno de campo. Medio de registro de los diferentes procesos realizados como parte del desarrollo de la investigación.

Informe de laboratorio. Resultados de los ensayos a los residuos de carbón mineral, al suelo natural, y al suelo estabilizado.

Matriz de comparación. Medio de cotejo de los resultados, para definir una dosis con la que se logren mejores resultados técnicos del CBR del suelo.

3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

3.6.1. Proceso de obtención de información

3.6.1.1.Exploración y muestreo de suelos (MTC E 101)

Equipos y/o materiales

- Herramientas manuales (picos, palas y lampas)
- GPS y wincha metálica
- Estacas y cinta de seguridad
- Saco de polipropileno impermeable
- Tarjeta de identificación
- Cuaderno de campo

Procedimiento (Llique, 2003)

- Se anotaron las coordenadas de cada calicata.
- Se excavaron las calicatas de 1.20 x 1.20 x 1.50 m, con picos y palas.
- Se registró el perfil estratigráfico de cada calicata.
- Se extrajeron manualmente las muestras alteradas.
- Se pusieron las muestras en los sacos de polipropileno, con tarjetas de identificación para su traslado al laboratorio GSE de la ciudad de Chota.

3.6.1.2.Análisis Granulométrico

Materiales y/o equipos

- Muestra de suelo fino 500 gr y 1000 gr de suelo grueso.
- Una balanza con aproximación de 0.1 g.
- Juego de tamices
- Estufa con control de temperatura

Procedimiento (Llique, 2015)

- Se secó y pesó la muestra.

- Se colocó el suelo en un recipiente, se agregó agua y se dejó reposar por 1 h.
- Se pasó el suelo por el tamiz N°200, se colocó a un recipiente y se dejó secar.
- La muestra retenida en el tamiz N° 200, se pasó por el juego de tamices agitando manualmente.
- Se determinaron los porcentajes y pesos retenidos en cada tamiz, para dibujar la curva granulométrica.

3.6.1.3. Ensayo de contenido de humedad

Materiales y/o equipos

- Muestra alterada extraída de cada calicata
- Balanza con aproximación de 0.01 gr
- Estufa con control de temperatura
- Taras

Procedimiento

- Se pesó la tara, se pesó la muestra húmeda.
- Se secó la muestra en la estufa a 105°C durante 24 h.
- Se pesó la muestra seca.
- Se determinó el peso del agua, y la muestra seca.
- Se halló el contenido de humedad.

3.6.1.4. Ensayo de plasticidad

Materiales y/o equipos (Llique 2003)

- Muestra de suelo seco que pasa la malla N°40
- Malla N°40
- Copa de Casagrande
- Ranurador o acanalador
- Balanza con aproximación de 0.01 gr

- Hormo o estufa con control de temperatura
- Espátula
- Probeta de 100 ml
- Capsula de porcelana
- Taras identificadas

Procedimiento, para límite líquido

- Se mezcló el suelo con agua mediante una espátula.
- Se colocó la pasta en la copa de Casagrande, espesor de 1 cm.
- Se dividió a la muestra por el centro en dos partes con el acanalador.
- Se elevó y dejó caer la copa mediante la manivela a razón de 2 caídas por segundo hasta que las dos mitades de suelo se pongan en contacto, registrando el número de golpes de dicho ensayo.
- Con la espátula se tomó una porción de suelo que se ha puesto en contacto en la parte inferior de la ranura y se determinó su contenido de humedad.
- Se repitió este ensayo dos veces.
- Se realizó la gráfica y se determinó la ordenada correspondiente a los 25 golpes en la curva de fluidez, este valor será el límite líquido del suelo.

Procedimiento, para límite plástico

- Se tomó una porción de la mezcla preparada para el límite líquido.
- Se adicionó suelo para bajar su contenido de humedad.
- Se enrolló la muestra con la mano sobre una placa de vidrio hasta obtener cilindros de 3 mm de diámetro que presenten fisuras.
- Se tomó la muestra y se procedió a pesar, para determinar su humedad.
- Se repitió el ensayo una vez más.
- El límite plástico es el promedio de los 2 valores de contenido de humedad.

3.6.1.5. Ensayo Proctor modificado

Materiales y/o equipos (Llique, 2015)

- Muestra alterada seca.
- Equipo Proctor modificado
- Pisón o martillo Proctor modificado
- Balanza con precisión de 1 gr
- Estufa con control de temperatura
- Probeta de 1000 ml
- Recipiente con 6 kg de capacidad
- Espátula
- Taras identificadas

Procedimiento

- Se secó el material, se preparó cuatro muestras según el método A, se añadió agua y se mezcló uniformemente.
- Se compactó cada muestra en 5 capas con 25 golpes cada una.
- Se compactó la última capa y se enrasó el molde con la espátula.
- Se pesó la muestra y se llevó al horno para determinar su humedad.
- Se dibujó la curva de compactación para determinar la densidad máxima y la humedad óptima.

3.6.1.6. Ensayo CBR

Materiales y/o equipos

- Muestra seca
- Papel filtro
- Equipo CBR
- Pistón Proctor modificado

- Balanza con precisión de 1 gr
- 3 diales de expansión con divisores de 0.01mm
- Horno
- Probeta de 1000 ml
- Recipiente de 6kg de capacidad
- Espátula
- Taras identificadas

Ensayo de compactación CBR

- Se preparó la muestra con el contenido óptimo de humedad determinando en el ensayo de compactación Proctor modificado para cada calicata.
- Se ensambló los moldes cilíndricos con sus placas de base, collares de extensión, discos espaciadores y papeles filtro, se compactó la muestra en los 3 moldes CBR en cada uno de ellos en 5 capas, el primero con 13 golpes, el segundo con 27 golpes y el tercero con 56 golpes por capa.
- Se determinó la densidad húmeda y el contenido de humedad de las muestras de cada molde. También se determinó la densidad seca de las muestras.

Ensayo de Hinchamiento

- Se volteó las muestras, la superficie libre queda en la parte superior.
- Se colocó sobre cada muestra el papel filtro, la placa de expansión, la sobrecarga, el trípode y el dial de expansión.
- Se colocaron tres moldes adecuados en un tanque de agua por 4 días (96 h) y se anotó las lecturas de expansión cada 24 h.

Ensayo carga – penetración

- Después de los 4 días se sacó los moldes del tanque y se dejó secar durante 15 minutos. Se colocó la sobrecarga en cada molde y se llevó a la prensa

hidráulica. Se procedió a realizar el ensayo de penetración aplicando un pisón a una velocidad de 0.05 pulg/min, registramos las lecturas de penetración y carga de cada una de las muestras en nuestro cuaderno de apuntes.

- Se determinó la densidad húmeda y el contenido de humedad de las muestras.
- Se dibujan las curvas de esfuerzo – deformación de las muestras de cada molde. Determinamos los esfuerzos e índices correspondientes a 0.1” y 0.2” de penetración, de cada una de las curvas esfuerzo – deformación.

3.6.1.7. Obtención de los residuos de carbón mineral

Materiales y/o equipos

- Palas
- Saco de Polipropileno impermeable
- Tarjeta de identificación
- GPS

Procedimiento

- Se registró las coordenadas del lugar donde se ubica la mina artesanal.
- Se recolectó la muestra con ayuda de una pala.
- Se coloca la muestra de carbón mineral en los sacos de polipropileno y se etiqueto con su tarjeta de identificación.

3.6.1.8. Tamizado de los residuos de carbón mineral

Equipos y/o Materiales

- Muestra de carbón mineral
- Cuchara industrial para muestreo
- Recipiente
- Tamiz 3/8”
- Bandeja

Procedimiento

- Se tomó con la cuchara industrial el carbón mineral y se depositó en el tamiz de 3/8”.
- Se tamizó el material agitando de manera manual el residuo en el tamiz.
- El material pasante de tamiz de 3/8” se utilizó para la adición de los porcentajes de 10,20y 30%, respecto al peso del suelo seco.

3.6.1.9.Elaboración de prototipos de suelo natural con residuos de carbón mineral para ensayos de Proctor Modificado y CBR

- Se mezcló el suelo natural de la subrasante con carbón mineral tamizado en proporciones de 10, 20 y 30% del peso del suelo seco.
- Se realizó el mismo procedimiento descrito para el ensayo de Proctor modificado y CBR.

3.6.2. *Procesamiento de información*

Los valores encontrados en laboratorio se procesaron en formatos de ensayo, mediante el uso del software Microsoft Excel 2016.

3.6.3. *Análisis de información*

Para el análisis estadístico se ha utilizado el software Minitab 19, a fin de aceptar o rechazar la hipótesis nula (H_0).

3.7. Aspectos éticos

La ética es un aspecto central en el inicio y desarrollo de cualquier investigación y debe estar presente desde el planteamiento hasta las conclusiones y posterior uso de los resultados. La ética respeta y describe claramente el valor social de la investigación, la validez científica, la selección justa de las muestras, la revisión independiente por un comité de ética ajeno a los intereses del investigador, el consentimiento informado, el respeto a los participantes, el respeto a los intereses

del investigador, etc. en cualquier proyecto de investigación científica o tecnológica para garantizar los principios éticos. Define las características esenciales que deben respetarse y exponerse claramente en cualquier proyecto de investigación científica o tecnológica para garantizar los principios éticos (Moscoso y Díaz 2018). Por ello en la presente investigación se ha hecho uso de los principios éticos de los investigadores, al momento de extraer las muestras necesarias y los diversos ensayos tanto en campo como en laboratorio para la determinación de la capacidad de soporte del suelo de la carretera El Verde – Numbral.

CAPÍTULO IV.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción de resultados

4.1.1. Características físicas del residuo de carbón mineral

El residuo de carbón mineral de la mina “La Palma”, del distrito de Chalamarca, tiene un diámetro de partícula menor a 3/8”, su gradación es uniforme tiene 31.20% de agregado grueso de diámetro de una grava, 21.10% de material fino (diámetro de limos y arcillas) y 47.70% de material grueso de diámetro de una arena, cumple con el huso granulométrico para afirmado “Gradación D” según el “Manual de carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos” (MTC, 2014), así mismo, cumple parcialmente con la norma CE.010 “Pavimentos urbanos” (MVCS, 2021), que norma los requisitos granulométricos para base granular, cumpliendo con todas las proporciones, a excepción del porcentaje que pasa el tamiz N° 200, el cual en el estudio es 21.10%, mientras que en la norma CE.010 especifica que debe estar entre 8 a 15%, sin embargo los resultados validan las buenas características de gradación del residuo de carbón mineral, para su uso como estabilizante.

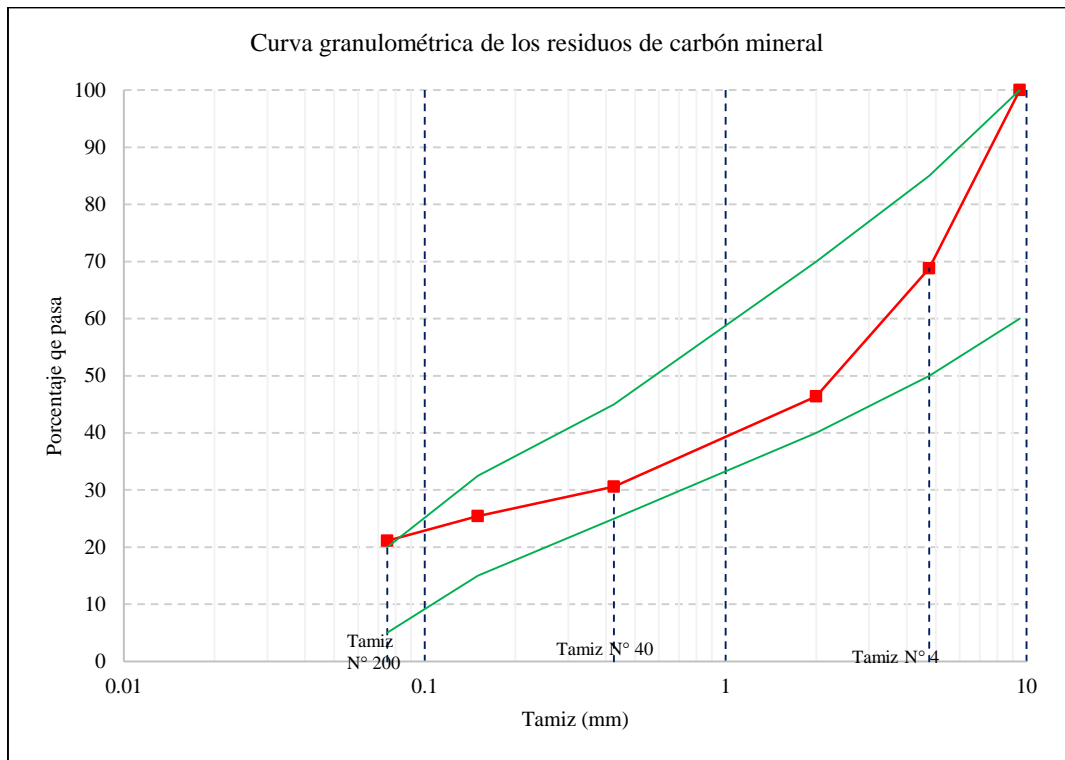
Tabla 14

Análisis Granulométrico de los Residuos de Carbón Mineral

Tamiz N°	Tamiz mm	Porcentaje que pasa	Huso (MTC, 2014) Gradación D
3/8"	9.5	100	60-100
N° 4	4.75	68.8	50-85
N° 10	2	46.4	40-70
N° 40	0.425	30.6	25-45
N° 100	0.15	25.4	
N° 200	0.075	21.1	5-20

Figura 24

Curva Granulométrica de los Residuos de Carbón Mineral



El límite líquido de los residuos de carbón mineral “La Palma”, es 21.22%, por tanto, cumple con el “Manual de carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos” (MTC, 2014), que especifica un máximo de 35%, y también cumple con la norma CE.010 “Pavimentos urbanos” (MVCS, 2021), que especifica un límite de 25%, para base granular; así mismo, el límite plástico promedio de los residuos de carbón mineral es 18.21%. Al restar el límite líquido y el límite plástico, se obtiene el índice de plasticidad, mismo que asciende a 3 %, valor que cumple con los lineamientos del MVCS (2021), para base granular, debido a que es menor al máximo de 4%, no obstante, para que el material fuese utilizado como afirmado tendría que tener un valor entre 4 a 9% según el MTC (2014), a pesar de ello, los residuos de carbón mineral de la “Mina La Palma”, tienen buenas características plásticas, debido a que su uso será como

estabilizante de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, Km 1+500 al Km 2+500.

Figura 25

Curva de Fluidez de los Residuos de Carbón Mineral

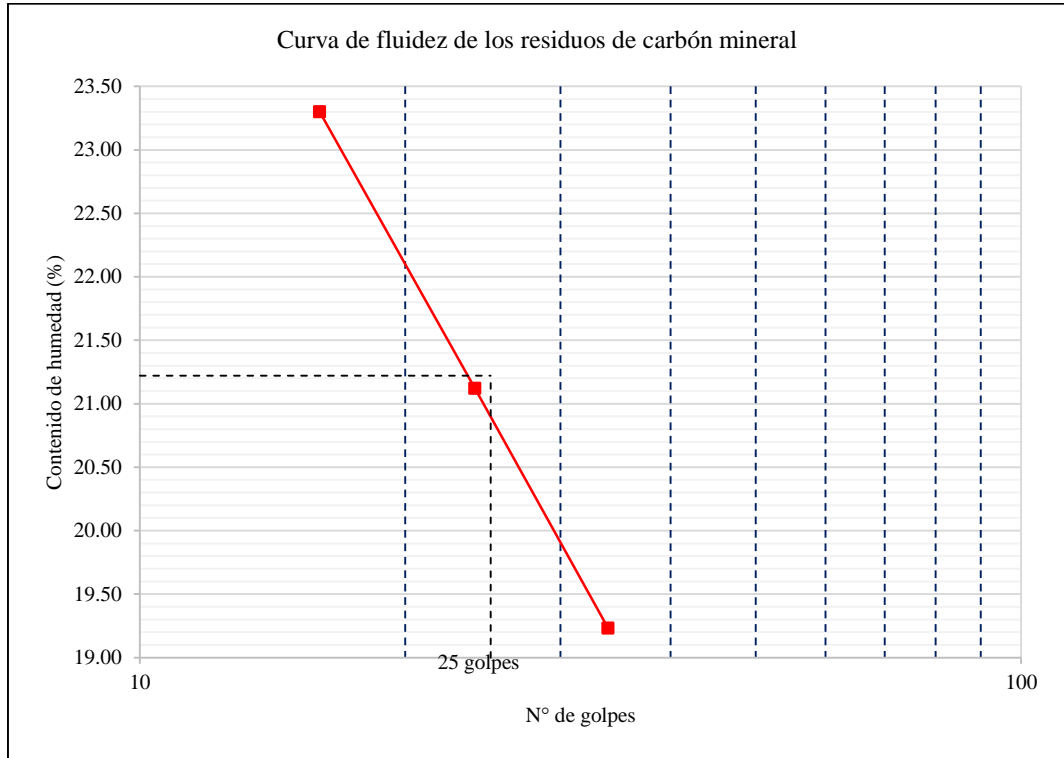


Tabla 15

Análisis del Límite Líquido, Residuos de Carbón Mineral

Residuos de carbón	M1	M2	M2	Resultado	MTC (2014)
Contenido de humedad	19.23	21.12	23.3	21.22	Máx. 35%
Nº de golpes	34	24	16	24.67	

Tabla 16

Análisis del Límite Plástico, Residuos de Carbón Mineral

Límite plástico	M1	M2	Promedio
Contenido de humedad (%)	18.17	18.25	18.21

Los residuos de carbón mineral de la mina “La Palma”, del distrito de Chalamarca, tienen contenido de humedad de 2.04%, son un material con baja contenido de agua, tienen una gradación mayor al tamiz N° 4 de 31.20%, y menor de 68.80%, se encuentran dentro del uso granulométrico D, según el MTC (2014); el límite líquido es 21.20%, valor menor a 25% y 35%, dado como límite por el MVCS (2021) y el MTC (2014), respectivamente, para su uso como base granular y como afirmado para carreteras, siendo así, el residuo mineral presenta buena fluidez; el límite plástico es 18.20%, lo que representa el contenido de humedad que debe tener para pasar de un estado plástico a semisólido; el índice de plasticidad es 3%, por tanto, no cumple con la plasticidad para ser un material de afirmado según el MTC (2014), que establece un rango de 4 a 9%, pero cumple con los requisitos de una base granular según el MVCS (2021); la clasificación SUCS del material residual, es arcilla limosa (SM), y la clasificación AASHTO es A-1-b (0), lo que hace mención a sus buenas características, ya que mientras un material tenga un índice de grupo más cercano a cero (0), mejor calidad tendrá, y este es el caso de los residuos de carbón mineral de la mina “La Palma”, que han sido utilizados como estabilizante del suelo de la subrasante.

Tabla 17

Características de los Residuos de Carbón Mineral

Características	Residuos de carbón mineral
Contenido de humedad (%)	2.04
% Material > N° 4	31.2
% Material < N° 4	68.8
LL	21.2
LP	18.2
IP	3
Clasificación SUCS	SM
Clasificación AASHTO	A-1-b (0)

4.1.2. Características físico – mecánicas del suelo natural

Para determinar las características físicas y mecánicas del suelo natural de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, del distrito de Chalamarca, se excavaron tres calicatas. El suelo de la calicata 1 que queda retenido en el tamiz N° 4 es 0%, por tanto, el suelo está exento de grava, el porcentaje de suelo que pasa el tamiz N° 200, es 92.40%, por tanto, tiene gran cantidad de finos, mientras que, el porcentaje de arena en la muestra es de tan solo 7.6%. El suelo la calicata 2, tiene 7% de grava, 63% de finos y 30% de arena, tiene mayor cantidad de finos, que otros materiales. El suelo de la calicata 3, tiene 21.4% de grava, 48% de finos, y 30.60% de arena, en esta muestra, sobresale la proporción de arena dentro de la mezcla de suelo. Las tres calicatas, tienen una gradación diferente, tal como se observa en la curva granulométrica, donde la calicata 1, tiene porcentajes que pasan más cercanos al 100%, por su gran cantidad de finos, y la calicata 3, tiene una gradación más uniforme dentro de todos los tamices, por lo que presenta suelos mejor gradados, que las otras dos calicatas, que forman parte de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, Km 1+500 al Km 2+500, del distrito de Chalamarca.

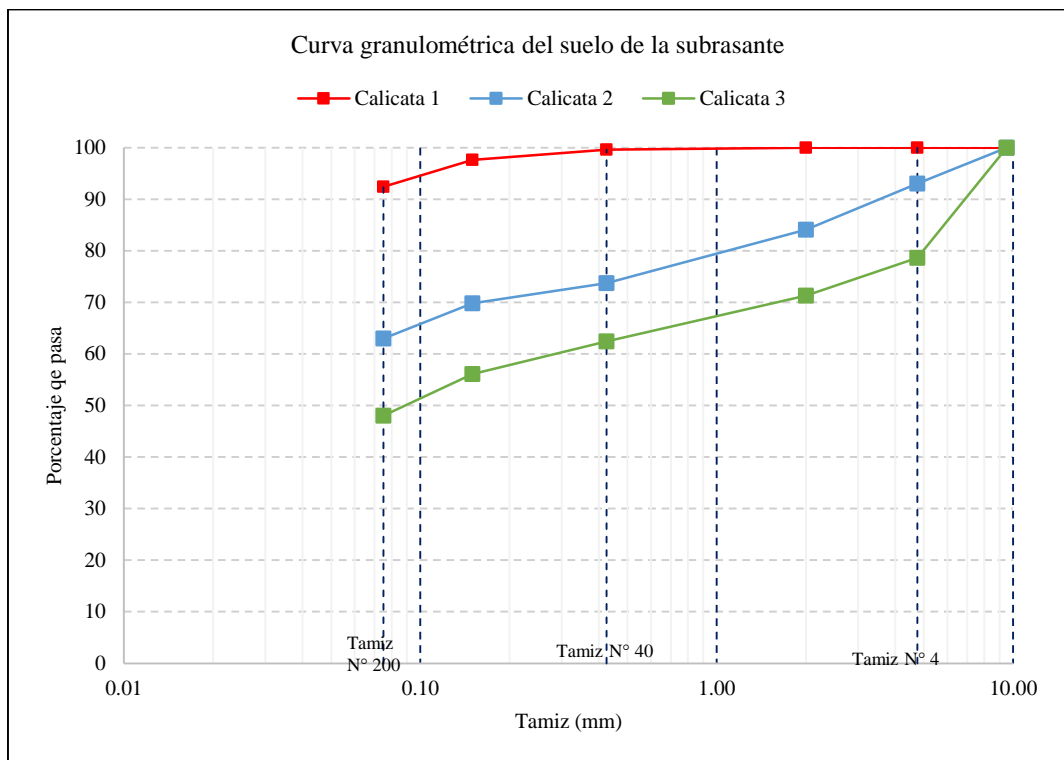
Tabla 18

Análisis Granulométrico del Suelo

Tamiz N°	Tamiz mm	Porcentaje que pasa		
		Calicata 1	Calicata 2	Calicata 3
3/8"	9.50	100	100	100
N° 4	4.75	100	93	78.6
N° 10	2.00	100	84.1	71.3
N° 40	0.43	99.6	73.7	62.4
N° 100	0.15	97.6	69.8	56.1
N° 200	0.075	92.4	63	48

Figura 26

Curva Granulométrica del Suelo



El suelo de las calicatas 1, 2 y 3 de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, Km 1+500 al Km 2+500, presentan 41.84, 15.70 y 17.85% de contenido de humedad, respectivamente; mientras que el suelo de las calicatas 1 y 2 presenta similar contenido de humedad, evidencia similar cantidad de agua dentro de la matriz del suelo, la calicata 1, tiene un contenido de humedad igual a 2.6 veces el contenido de humedad de la calicata 2, y a 2.34 veces la humedad natural de la calicata 3, lo que demuestra mayor permeabilidad y absorción del agua.

Tabla 19

Contenido de Humedad del Suelo

	Calicata 1	Calicata 2	Calicata 3
Contenido de humedad (%)	41.84	15.7	17.85

El límite líquido del suelo de la calicata 1, 2 y 3 de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, Km 1+500 al Km 2+500, es respectivamente, 58.43, 53.30 y 47.44%, difieren entre sí aproximadamente 5% de contenido de humedad; en cambio, el límite plástico es igual a 29.30, 30.05 y 31.46%, respectivamente, por tanto, difieren cada una entre sí, aproximadamente 1%. El índice de plasticidad es 29.13, 23.25 y 15.98%, para las calicatas 1, 2 y 3, respectivamente, por tanto, los suelos de las calicatas 1 y 2 son altamente plásticos, mientras que el suelo de la calicata 3, también tiene plasticidad, pero en menor medida que el suelo de las otras calicatas. El límite líquido del suelo de todas las calicatas, supera el máximo de 35% dado para material de afirmado; al igual que el índice de plasticidad es mayor al máximo de 9% según el MTC (2014), lo que hace evidente sus características plásticas, mismas que terminan generando deformaciones en la subrasante de la carpeta de rodadura.

Tabla 20

Análisis del Límite Líquido del Suelo

N° de golpes	Contenido de humedad		
	Calicata 1	Calicata 2	Calicata 3
34	56.35	51.34	45.62
24	58.53	53.22	47.37
16	60.41	55.35	49.33
25	58.43	53.3	47.44

Tabla 21

Límite Plástico del Suelo

Límite plástico	Calicata 1	Calicata 2	Calicata 3
M1	29.23	30.13	31.34
M2	29.37	29.97	31.58
Promedio	29.3	30.05	31.46

Figura 27

Curva de Fluidez del Suelo

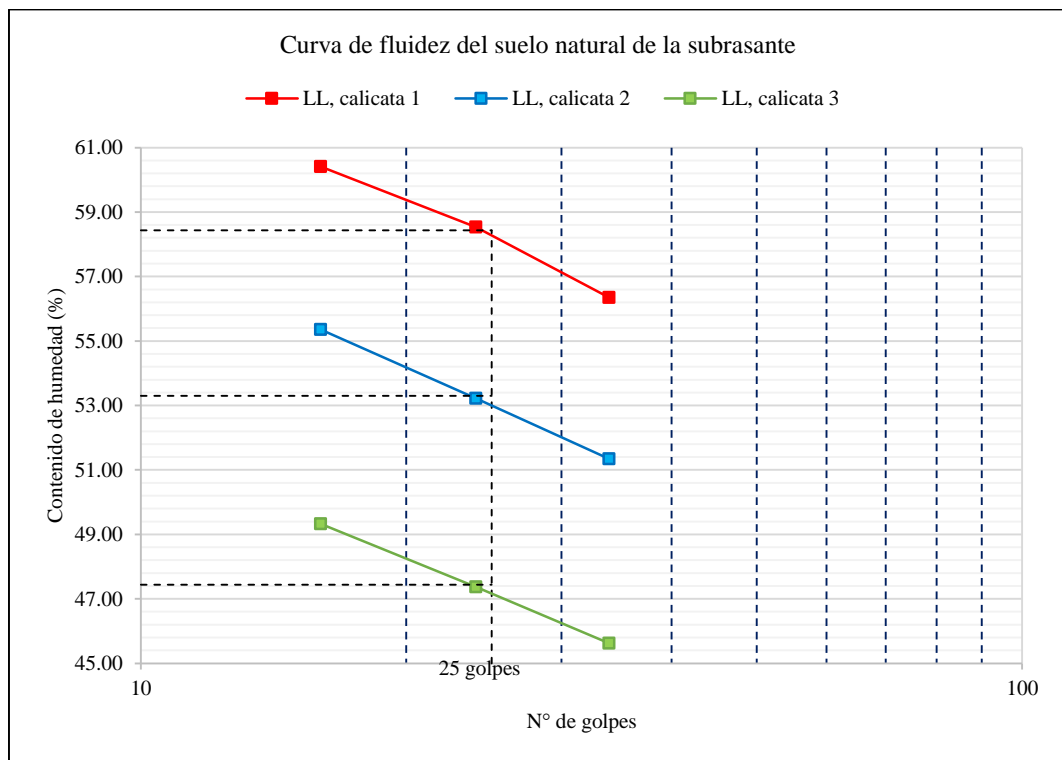


Tabla 22

Límites de Consistencia del Suelo

Límites de consistencia	Calicata 1	Calicata 2	Calicata 3
LL (%)	58.43	53.3	47.44
LP (%)	29.3	30.05	31.46
IP (%)	29.13	23.25	15.98

Según la gradación y los límites de consistencia se clasifica el suelo según SUCS y según AASHTO, haciendo uso de las cartas de plasticidad. Las tres canteras, presenta diferente clasificación, son diferentes tipos de suelo, por lo que para determinar el efecto de los residuos de carbón en el suelo de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, Km 1+500 al Km 2+500, se ha realizado el análisis específico por el suelo de cada calicata.

Figura 28

Clasificación SUCS del Suelo

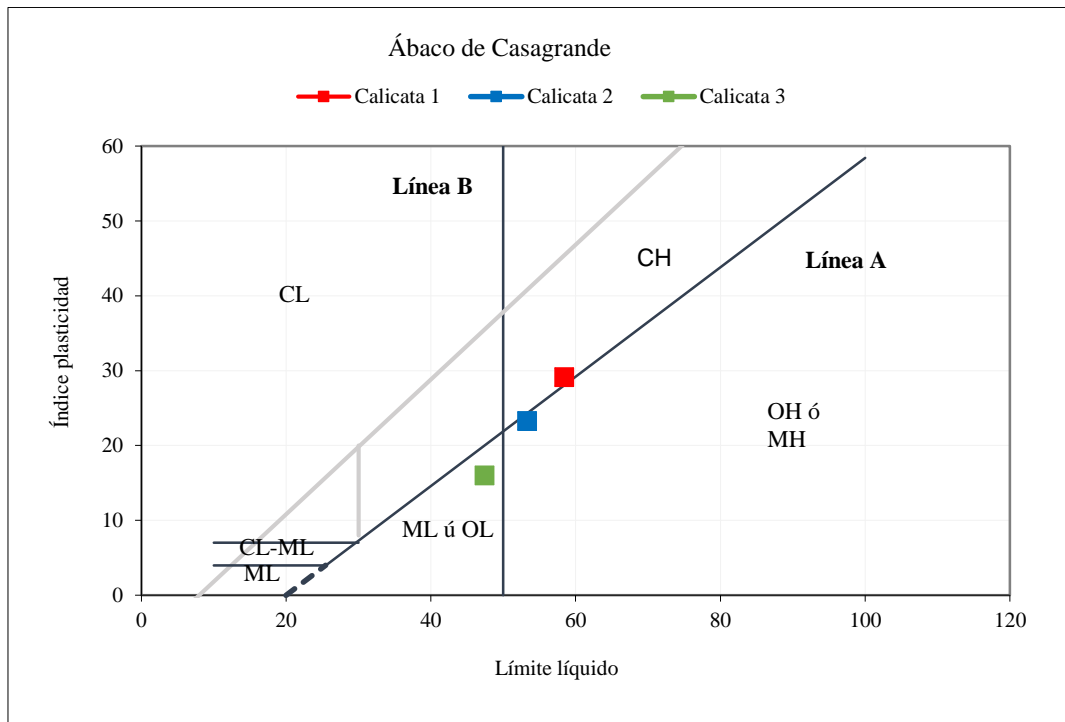
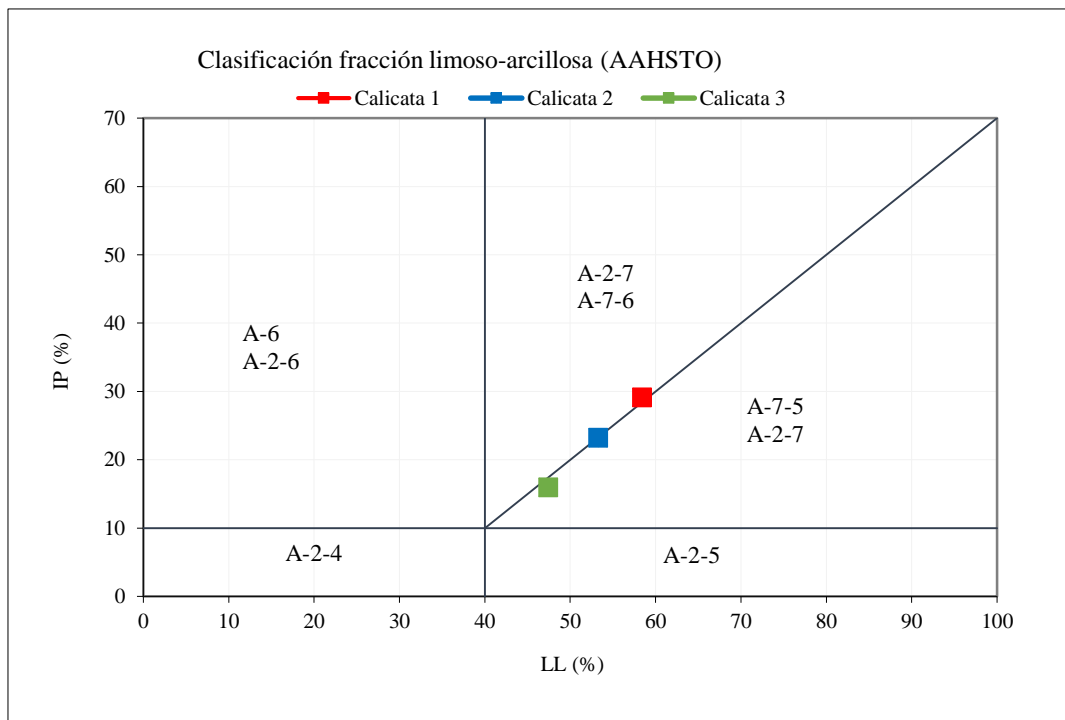


Figura 29

Clasificación AASHTO del Suelo



El suelo de la calicata 1, se clasifica como arcilla de alta plasticidad (CH), del grupo A-7-6 (19), la calicata 2 se clasifica como limo de alta plasticidad (MH) del grupo A-7-5 (13), y la calicata 3 se clasifica como arena limosa (SM) del grupo A-7-5 (5). De las tres calicatas, el suelo de la calicata 3, tiene un índice de grupo menor (5) en comparación de las otras calicatas, por tanto, es la que tienen mejor calidad para su uso en carreteras, en cambio, el suelo de la calicata 1, tiene el índice de grupo más alto (19), por lo que su calidad de material es menor en comparación con el suelo de las otras calicatas de la subrasante.

Tabla 23

Clasificación del Suelo del Km 1+500 a 2+500, Carretera El Verde – Numbral

Clasificación	Calicata 1	Calicata 2	Calicata 3
SUCS	CH	MH	SM
AASHTO	A-7-6 (19)	A-7-5 (13)	A-7-5 (5)

Se ha realizado el análisis de compactación al suelo de las calicatas de la subrasante del Km 1+500 al Km 2+500 de la carretera El Verde – Numbral, del distrito de Chalamarca, por medio del cual se han graficado las curvas de compactación, para determinar el óptimo contenido de humedad, con el que se alcanza la densidad seca máxima. Para la calicata 1, la densidad máxima seca 1.403 gr/cm³, se alcanza al agregar agua hasta un contenido óptimo de humedad de 14.65%, para la calicata 2, la densidad máxima seca 1.633 gr/cm³, se alcanza con el óptimo contenido de humedad de 12.24%, mientras que para la calicata 3, la densidad seca máxima 1.438 gr/cm³, se logra con el óptimo contenido de humedad de 13.92%. El óptimo contenido de humedad difiere en un aproximado de 1% entre la calicata 1 y 3, y entre la calicata 2 y 3, por tanto en promedio tienen similar contenido de humedad óptimo, en otras palabras la cantidad de agua que se tendría que colocar al suelo durante la compactación de la subrasante, sería

similar para todo el suelo de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, no obstante, la densidad seca máxima difiere para la calicata 2, esta presenta un valor mayor en comparación de las calicatas 1 y 3, que alcanzan valores similares con una diferencia de tan solo 0.035 gr/cm³, siendo así, se tiene que tener un adecuado control de calidad en campo durante la compactación de la vía, realizando ensayos de densidad de campo.

Tabla 24

Análisis de Compactación del Suelo de la Subrasante del Km 1+500 a 2+500, Carretera El Verde – Numbral

Compactación	Calicata 1	Calicata 2	Calicata 3
Densidad máxima (gr/cm ³)	1.403	1.633	1.438
Humedad óptima (%)	14.65	12.24	13.92

Figura 30

Curva de Compactación, Calicata 1

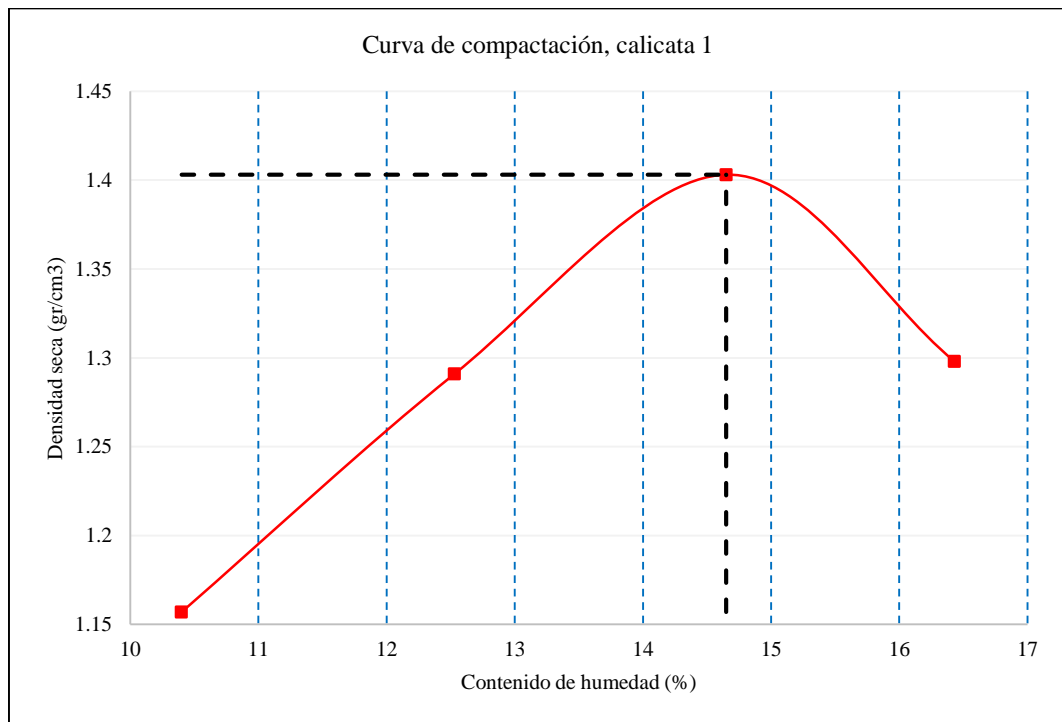


Figura 31

Curva de Compactación, Calicata 2

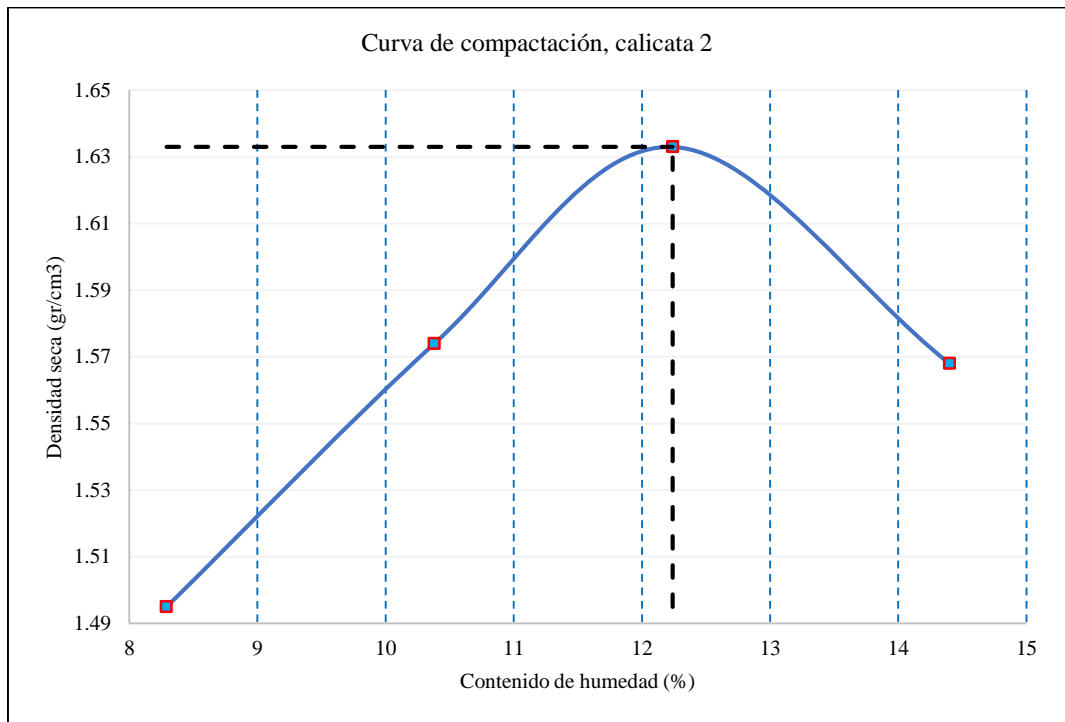
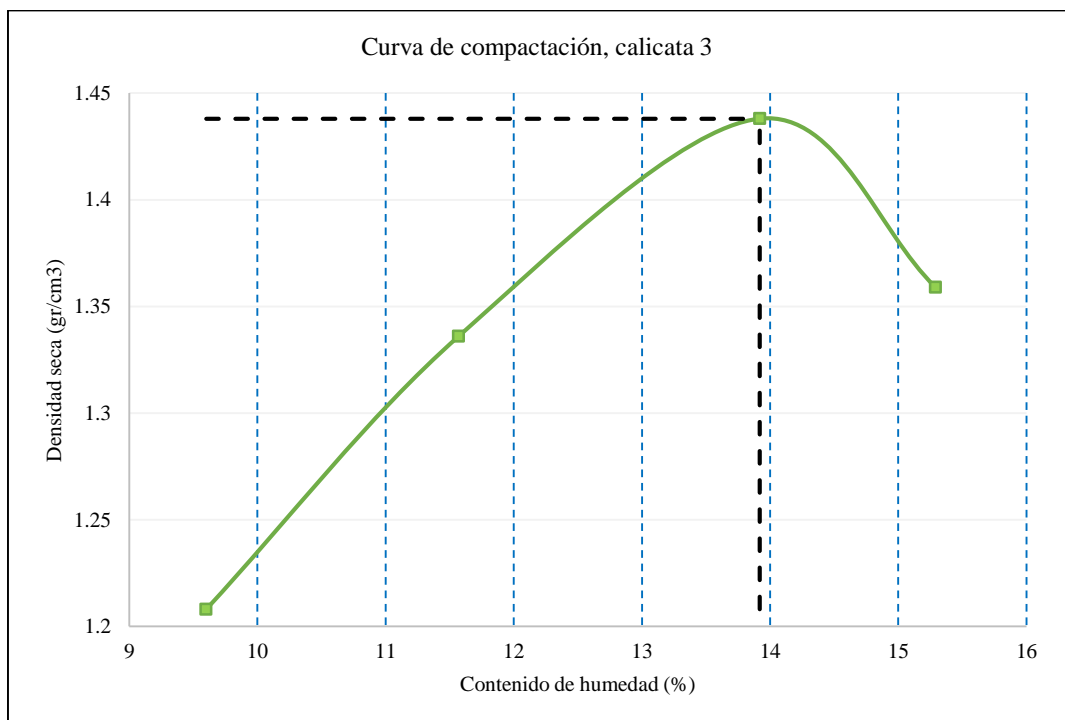


Figura 32

Curva de Compactación, Calicata 3



El suelo de las calicatas 1, 2 y 3 de la subrasante del Km 1+500 al Km 2+500 de la carretera El Verde – Numbral, tiene porcentaje de expansión de 9.27, 7.17 y 5.37%, respectivamente, esto es el hinchamiento del suelo, característica que podría dañar al pavimento que se coloque sobre la subrasante si no se tiene un control sobre este; siendo así las arcillas tienen mayor porcentaje de expansión, por ello la calicata 1, tiene mayor expansión que las calicatas 2 y 3, mientras que las arenas tienen un menor potencial de hinchamiento, tal como se demuestra en los resultados, donde la calicata 3, tiene la menor expansión.

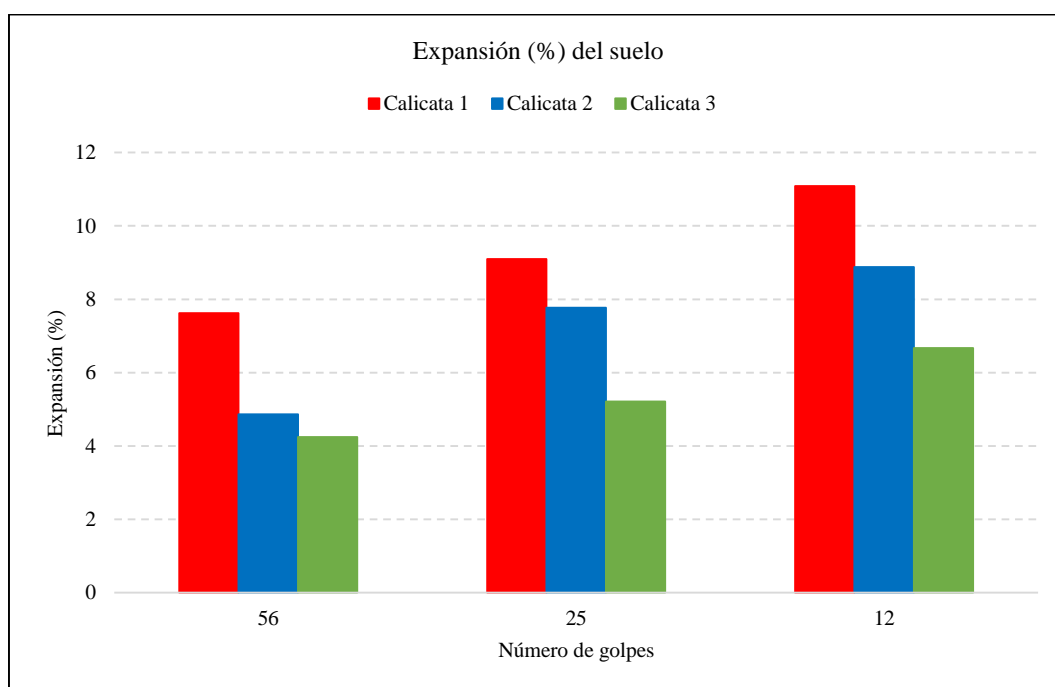
Tabla 25

Expansión (%) del Suelo de las Calicatas 1, 2 y 3

Golpes	Calicata 1	Calicata 2	Calicata 3
56	7.62	4.86	4.24
25	9.1	7.77	5.21
12	11.09	8.88	6.67
Promedio	9.27	7.17	5.37

Figura 33

Expansión (mm) del Suelo de las Calicatas 1, 2 y 3



El suelo de las calicatas 1, 2 y 3 de la subrasante del Km 1+500 al Km 2+500 de la carretera El Verde – Numbral, tiene capacidad portante (CBR) al 95% de la máxima densidad seca (MDS) igual a 4.20%, 5.00%, 5.10%, y al 100% de la MDS alcanza valores CBR de 5.30%, 6.00% y 6.10%, respectivamente. El CBR representa la resistencia que alcanza el suelo para soportar la carga vehicular del tránsito, representado a través de un ensayo de laboratorio, en condiciones controladas de humedad, siendo así para alcanzar la máxima densidad seca se debe cumplir con el óptimo contenido de humedad, por lo que debe realizarse la verificación en campo. Al 95% y 100% de la MDS el suelo de la calicata 1, tiene menor capacidad de carga (4.20% y 5.30%, respectivamente) a comparación de las otras calicatas, así mismo, el suelo de la calicata 3, presenta mejor resistencia con un CBR al 95% y 100% de MDS de 5.10% y 6.10%, por lo que tiene mejores características mecánicas que el suelo de las otras calicatas, con un incremento máximo de 0.80% respecto a calicata 1, y 0.10% respecto a la calicata 2, esto se debe a que este suelo al ser arena mezclada con limo, tiene características granulares, que le dan mayor resistencia que el suelo arcilloso y limoso, respectivamente, de las otras canteras, sin embargo, al 95% de la MDS todas las calicatas presentan suelo con CBR menor a 6%, por lo que según el MTC (2014), deben pasar por procesos de estabilización, para garantizar su capacidad mecánica al ser el soporte para las capas de afirmado, base o subbase.

Tabla 26

Capacidad de Carga (CBR) del Suelo de la Subrasante

CBR (%)	Calicata 1	Calicata 2	Calicata 3
95% de MDS	4.20	5.00	5.10
100% de MDS	5.30	6.00	6.10

Figura 34

CBR de la Calicata 1 de la Subrasante

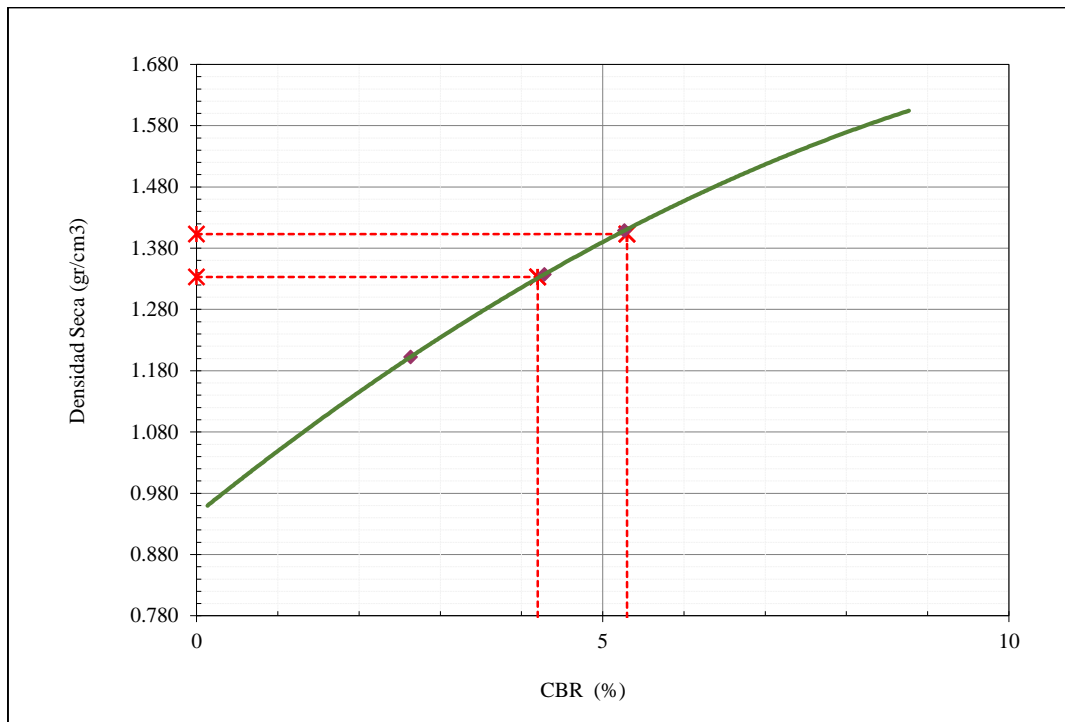


Figura 35

CBR de la Calicata 2 de la Subrasante

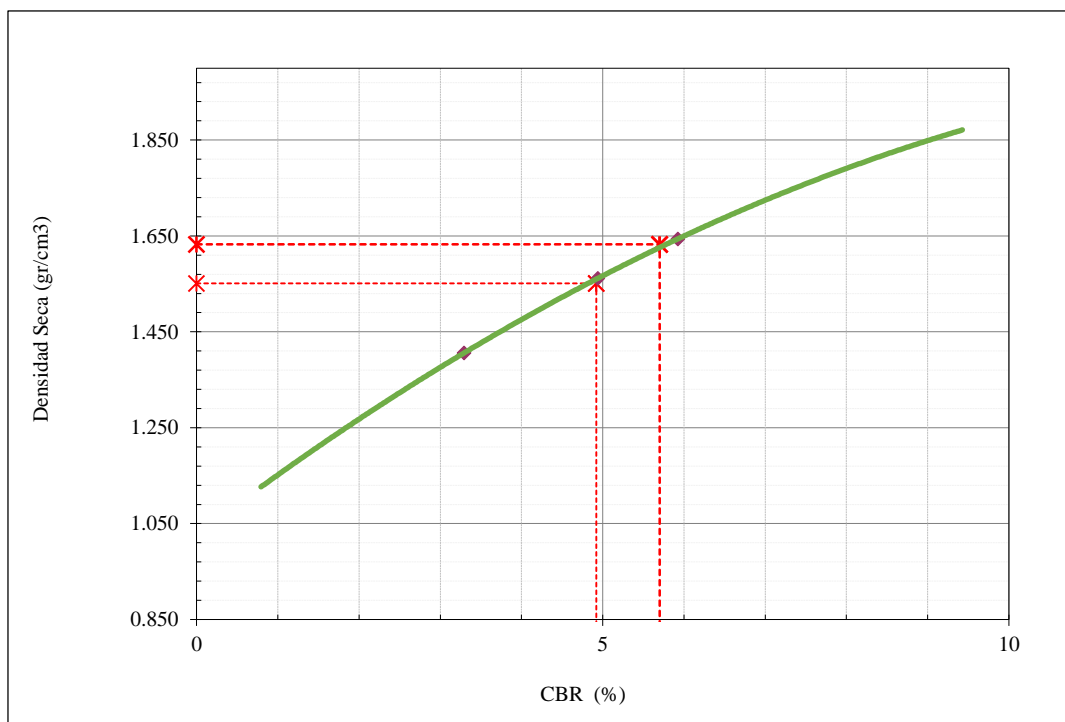


Figura 36

CBR de la Calicata 3 de la Subrasante

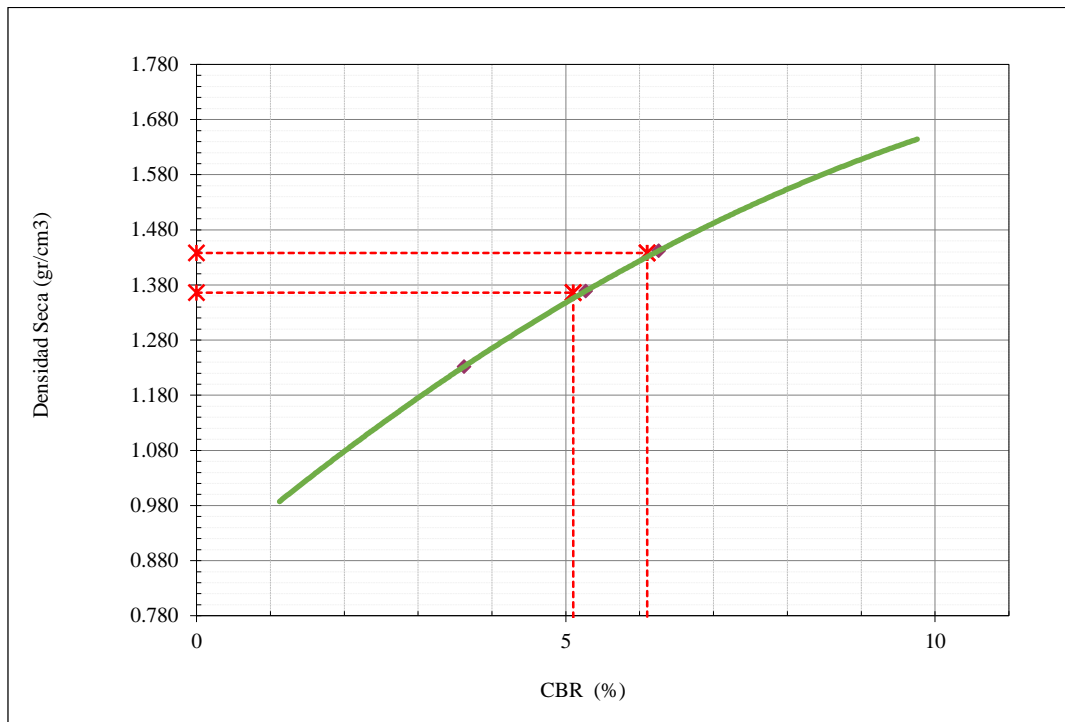
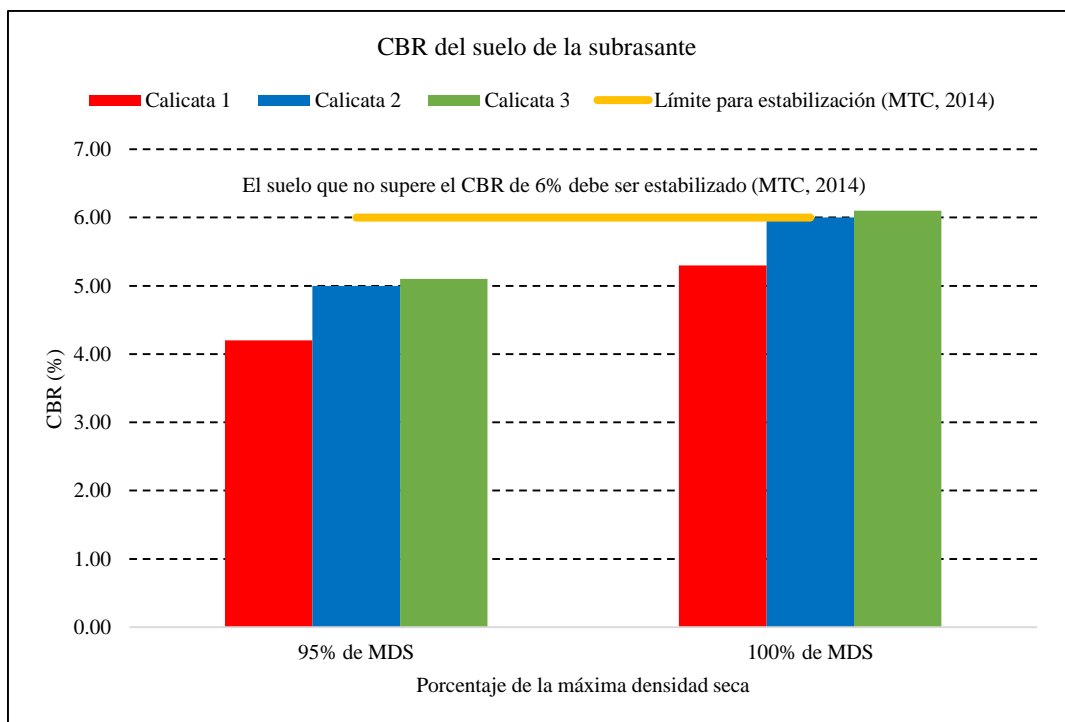


Figura 37

Capacidad de Carga (CBR) del Suelo de la Subrasante



El suelo de la calicata 1, de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al km 2+500, es un suelo arcilloso de alta plasticidad, compuesto en un 7.6% por suelo granular y 92.4% por finos, con un contenido de humedad de 41.84%, límite líquido de 58.4% e índice de plasticidad de 29.10%, que con la humedad óptima de 14.65%, alcanza la máxima densidad seca de 1.403 gr/cm³, así mismo el CBR al 95% y 100% de la MDS es 4.20% y 5.30%, respectivamente, con una expansión promedio de 9.27%. El suelo de la calicata 2, es limo de alta plasticidad, compuesto en un 7% por grava, 30% por suelo granular (arena) y en 63% por finos, con un contenido de humedad de 15.72%, límite líquido de 53.30% e índice de plasticidad de 23.20%, que con la humedad óptima de 12.24%, alcanza la máxima densidad seca de 1.633 gr/cm³, así mismo, el CBR al 95% y 100% de la MDS es 5.00% y 6.00%, respectivamente, con una expansión promedio 7.17%. El suelo de la calicata 3, es arena limosa, compuesto en un 21.40% por gravas, 30.60% por suelo granular y en un 48% por finos, con un contenido de humedad de 17.85%, límite líquido de 47.40% e índice de plasticidad de 15.90%, que con la humedad óptima de 13.92%, alcanza la máxima densidad seca de 1.438 gr/cm³, así mismo, el CBR al 95% y 100% de la MDS es 5.10% y 6.10%, respectivamente, con una expansión promedio 5.37%.

Las tres calicatas presentan una clasificación SUCS diferente, es decir se tratan de materiales distintos arcilla, limo y arena, para las calicatas 1, 2 y 3, respectivamente, mientras que según la clasificación AASHTO, el suelo de las calicatas 2 y 3, tiene el mismo grupo A-7-5, pero diferente índice de grupo, siendo (13) para la calicata 2 y (5) para la calicata 3, por tanto, la calicata 3 tiene mejor calidad que la calicata 2, lo que se puede comprobar con los resultados de la capacidad de carga, donde las calicatas 1, 2 y 3, respectivamente, han alcanzado

valores de 5.30, 6.00 y 6.10%, para una MDS de 100%, y valores de 4.20, 5.00 y 5.10% de CBR al 95% de MDS, estos valores son menores a 6.00% por tanto la subrasante se califica como pobre e inadecuada, según el MTC (2014), mismo ente, que establece que si el suelo presenta una capacidad de carga menor a 6.00%, deberá pasar por procesos de estabilización física, mecánica y/o química, para incrementar su capacidad de soporte, disminuir su porcentaje de expansión, y reducir la plasticidad del suelo, logrando un suelo con mejores características mecánicas, considerando que la subrasante es la capa que soporta el peso de las cargas vehiculares transmitidas por la losa, base y subbase en caso de vías pavimentadas, o por el material de afirmado, en caso de vías no pavimentadas.

Tabla 27

Características Físicas y Mecánicas del suelo Natural de la Subrasante de la Carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500

Características	Calicata 1	Calicata 2	Calicata 3
Contenido de humedad (%)	41.84	15.72	17.85
Gravas	0	7	21.4
Arena	7.6	30	30.6
Finos	92.4	63	48
LL	58.4	53.3	47.4
LP	29.3	30.1	31.5
IP	29.1	23.2	15.9
Clasificación SUCS	CH	MH	SM
Clasificación AASHTO	A-7-6 (19)	A-7-5 (13)	A-7-5 (5)
Densidad máxima (gr/cm ³)	1.403	1.633	1.438
Humedad óptima (%)	14.65	12.24	13.92
Expansión (%)	9.27	7.17	5.37
CBR al 95% de MDS (%)	4.20	5.00	5.10
CBR al 100% de MDS (%)	5.30	6.00	6.10

4.1.3. *Capacidad de soporte del suelo con residuos de carbón mineral*

El suelo de la calicata 1, de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, del distrito de Chalamarca, arcilla de alta plasticidad, ha sido modificada con la adición de 10, 20 y 30% de residuos de carbón mineral, respecto al peso del suelo, determinando que con la humedad óptima de 15.30, 13.18 y 11.26%, alcanza la densidad máxima seca de 1.466, 1.472 y 1.287 gr/cm³, respectivamente; por tanto, a mayor cantidad de residuos de carbón mineral, la humedad óptima es menor, es decir, se requiere menor cantidad de agua para su compactación en campo, esto se debe al aporte de humedad del residuo de carbón al suelo, no obstante, la densidad máxima seca, no se ve influenciada por la cantidad de residuos de carbón mineral de la misma manera, la densidad seca del suelo de la calicata 1, con 20% de residuos de carbón mineral es mayor a comparación del suelo con 10% y 30% de residuos de carbón mineral, lo que indica que tiene mayor masa de suelo por unidad de volumen, que las otras mezclas de suelo – residuos de carbón mineral, por ende las partículas se integran con mayor facilidad, que para los otros porcentajes de adición de residuos de carbón mineral. Este parámetro debe ser verificado en campo, a través del ensayo de densidad de campo, para lograr una buena compactación.

Tabla 28

Compactación del Suelo de la Calicata 1, con Residuos de Carbón Mineral

Calicata 1	Residuos de carbón mineral		
	10%	20%	30%
Compactación			
Densidad máxima (gr/cm ³)	1.466	1.472	1.287
Humedad óptima (%)	15.3	13.18	11.26

Figura 38

Curva de Compactación del Suelo de la Calicata 1, con 10% de Residuos de Carbón Mineral

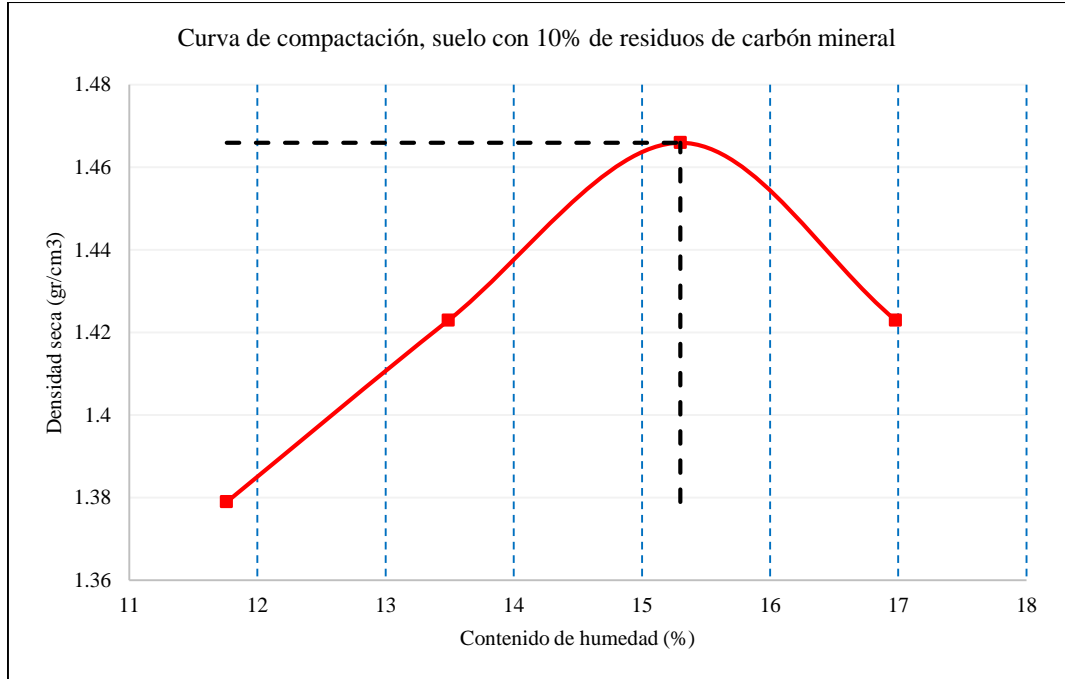


Figura 39

Curva de Compactación del Suelo de la Calicata 1, con 20% de Residuos de Carbón Mineral

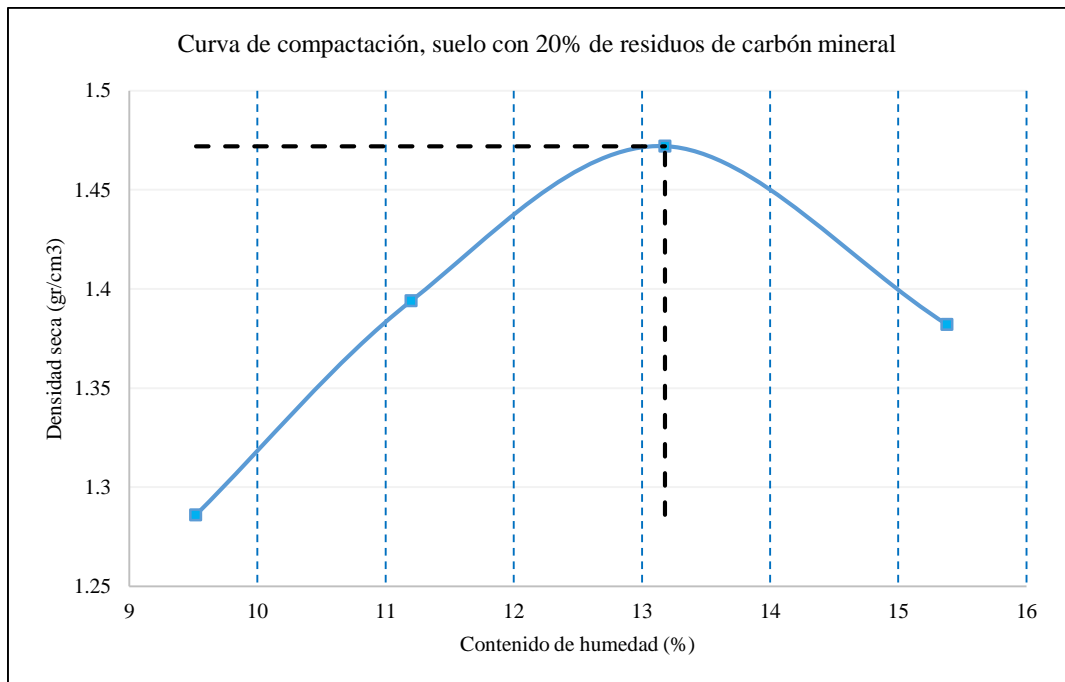
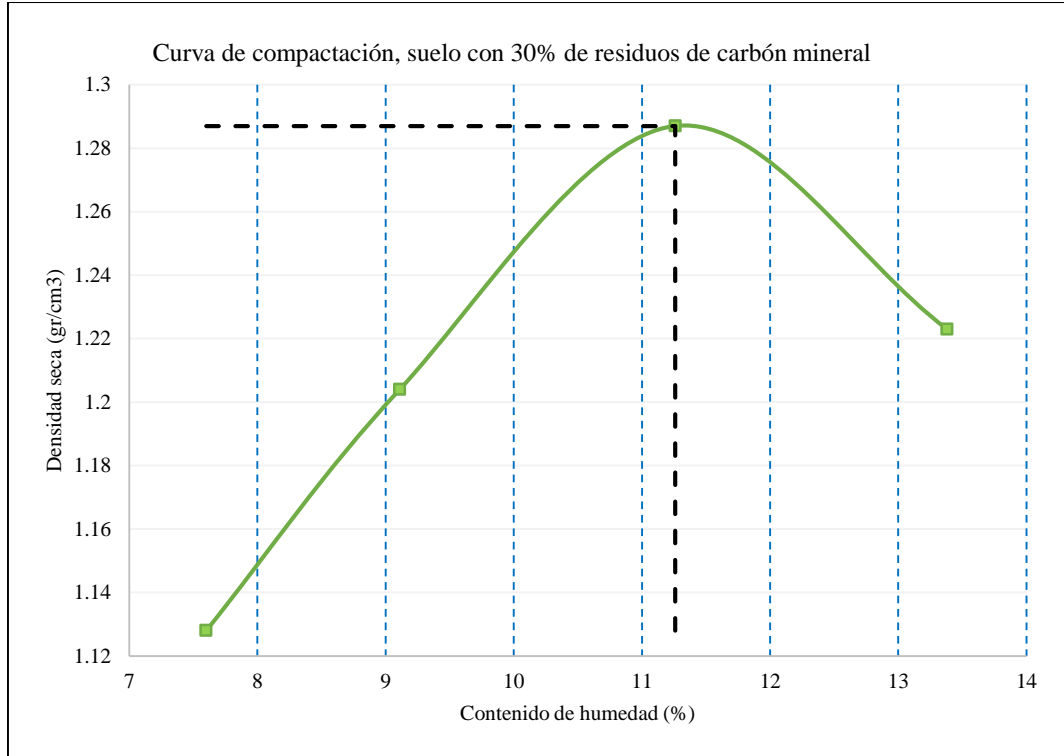


Figura 40

Curva de Compactación del Suelo de la Calicata 1, con 30% de Residuos de Carbón Mineral



La expansión del suelo de la calicata 1, arcilla de alta plasticidad, disminuye al aumentar el número de golpes de compactación, debido a que la energía de compactación es mayor, lo que provoca mayor adhesión de los materiales, y se considera un proceso de estabilización mecánica. La muestra de suelo con 10% de residuos de carbón mineral, alcanza valores de 5.32, 7.53 y 8.88% para los especímenes compactados con 56, 25 y 12 golpes, en promedio su expansión es 7.24%; para el suelo con 20% de residuos de carbón mineral, a los 56, 25 y 12 golpes de compactación, se obtienen valores de 4.33, 7.07 y 8.79% de expansión, en promedio 6.73% de expansión; mientras que para el suelo con 30% de residuos de carbón mineral la expansión es 8.50, 9.10 y 9.63% para 56, 25 y 12 golpes, por tanto, en promedio la expansión es 9.08%; la expansión del suelo disminuye al

adicionar residuos de carbón mineral hasta 20%, pero al incrementar el porcentaje de adición de este residuo, la expansión aumenta, esto se puede deber a las características de gradación del carbón, y su facilidad para volverse polvo al ser compactado. Finalmente, se puede argumentar que la mezcla de suelo arcilloso con 20% de residuos de carbón mineral, presenta menor grado de hinchamiento.

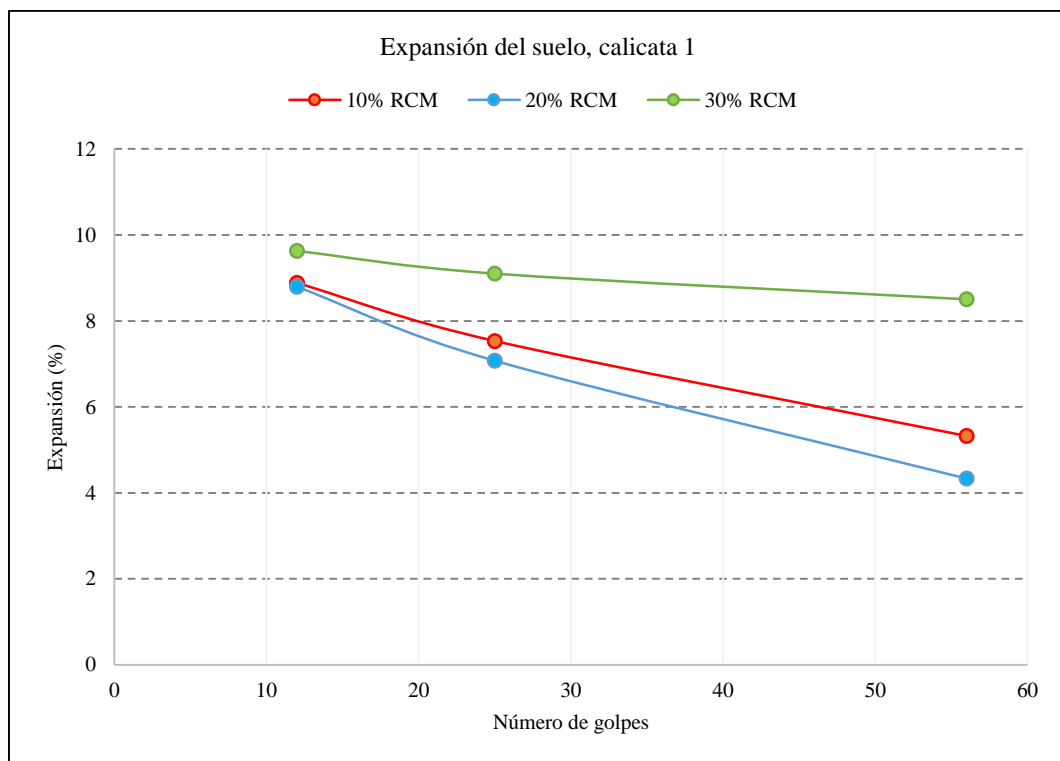
Tabla 29

Expansión del Suelo de la Calicata 1, con Residuos de Carbón Mineral

Calicata 1	Residuos de carbón mineral		
	10%	20%	30%
Expansión (%)			
56 golpes	5.32	4.33	8.50
25 golpes	7.53	7.07	9.10
12 golpes	8.88	8.79	9.63
Promedio	7.24	6.73	9.08

Figura 41

Expansión del Suelo de la Calicata 1, con Residuos de Carbón Mineral



La capacidad de carga (CBR) del suelo de la calicata 1, arcilla de alta plasticidad, tiende a aumentar cuando se adiciona residuos de carbón mineral hasta alcanzar el máximo con un porcentaje de 20% de residuos de carbón respecto al peso seco del suelo, pero luego disminuye si se incrementa mayor cantidad de estos residuos, así mismo, cuanto más se acerque la compactación a la máxima densidad seca (MDS), mejores resultados de la capacidad de soporte se alcanzarán. El CBR al 100% de MDS de las muestras de suelo con 10, 20 y 30% de residuos de carbón mineral, es 6.50%, 7.50% y 5.00%, respectivamente, así mismo, el CBR al 95% es 5.60%, 6.60% y 4.00%, para las muestras de suelo con 10, 20 y 30% de residuos de carbón mineral, respectivamente. Para el CBR al 100% de la MDS las muestras de suelo con 10% y 20% de residuos de carbón mineral, superan el límite de una subrasante pobre (S1) dada por el MTC (2014) de 6% de CBR, pasando a ser una subrasante regular (S2), mientras que, para el CBR al 95% de la MDS solo la muestra de suelo con 20% de residuos de carbón mineral, supera el CBR mínimo dado en el “Manual de suelos, geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos” del MTC (2014), por tanto, solo las muestras con 20% de residuos de carbón mineral logran una mejora en sus características mecánicas, permitiendo construir el afirmado o pavimento de la carretera El Verde – Numbral, del distrito de Chalamarca, sobre la subrasante estabilizada sin complicaciones por la baja capacidad de carga del suelo natural.

Tabla 30

CBR de la Calicata 1, con Residuos de Carbón Mineral

Calicata 1	Residuos de carbón mineral		
	10%	20%	30%
CBR			
100% de MDS	6.50	7.50	5.00
95% de MDS	5.60	6.60	4.00

Figura 42

Curva CBR de la Calicata 1, con 10% Residuos de Carbón Mineral

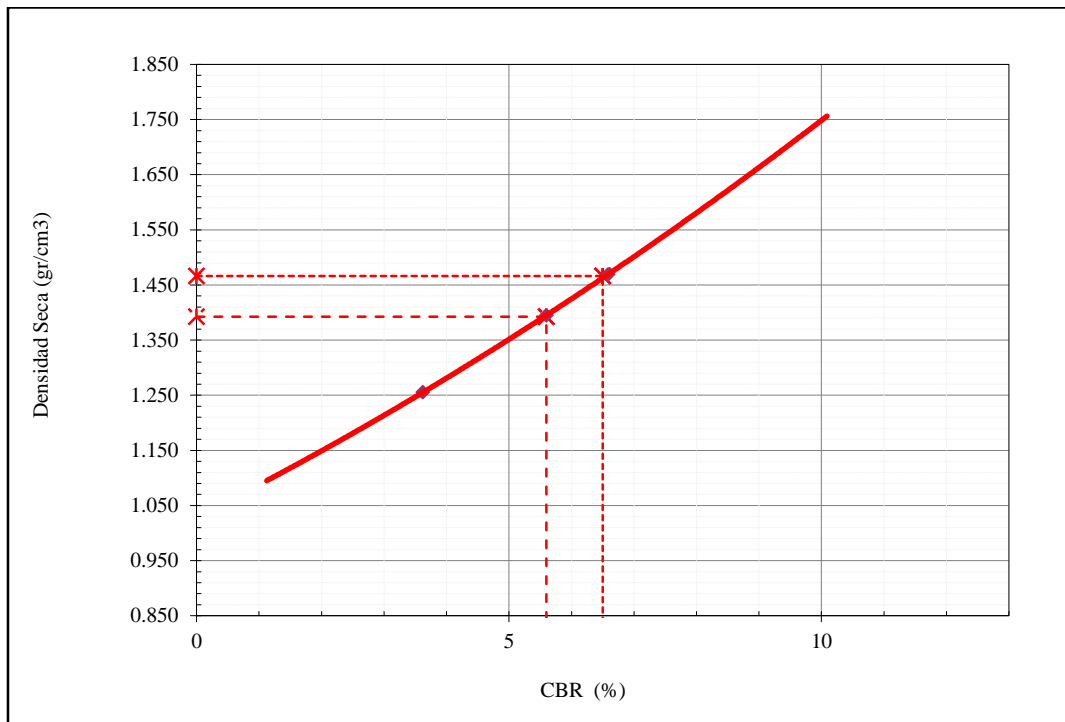


Figura 43

Curva CBR de la Calicata 1, con 20% Residuos de Carbón Mineral

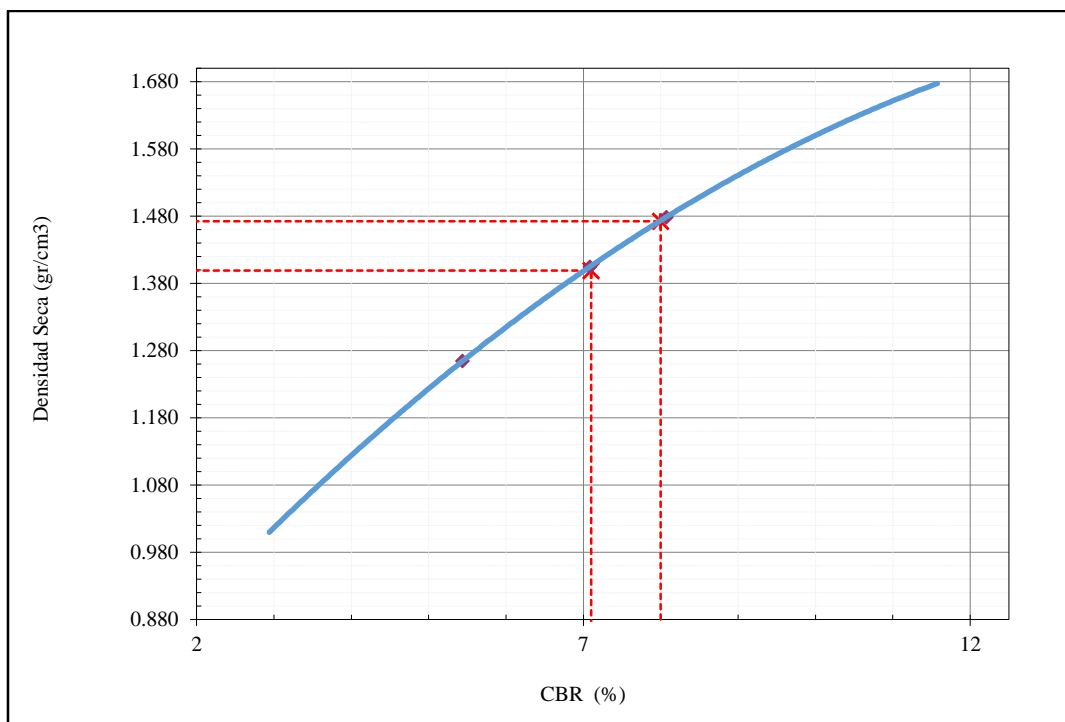
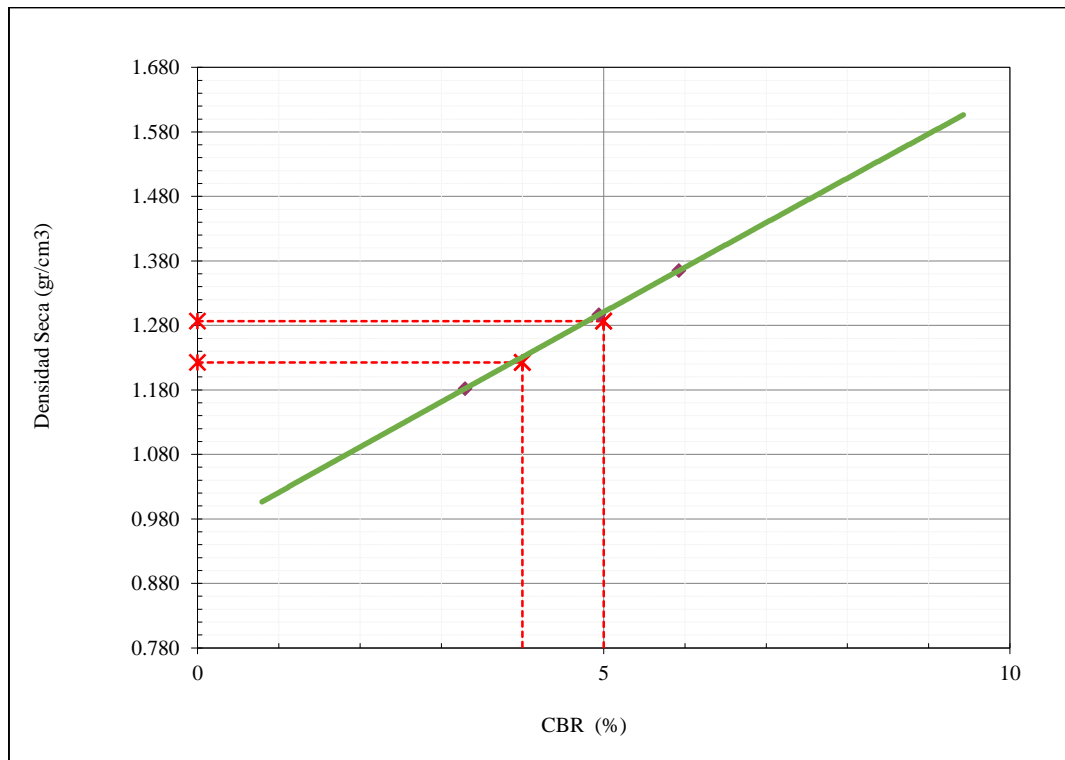


Figura 44

Curva CBR de la Calicata 1, con 30% Residuos de Carbón Mineral



El suelo de la calicata 2, de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, del distrito de Chalamarca, limo de alta plasticidad, ha sido modificado con la adición de 10, 20 y 30% de residuos de carbón mineral, respecto al peso del suelo, determinando que con la humedad óptima de 10.32, 10.18 y 11.52%, alcanza la densidad máxima seca de 1.66, 1.69 y 1.57 gr/cm³, respectivamente; por tanto, a mayor cantidad de residuos de carbón mineral, hasta 20%, la humedad óptima es menor, es decir, se requiere menor cantidad de agua para su compactación en campo, esto se debe al aporte de humedad del residuo de carbón al suelo, no obstante, la densidad máxima seca, no se ve influenciada por la cantidad de residuos de carbón mineral de la misma manera, la densidad seca del suelo de la calicata 2, con 20% de residuos de carbón mineral es mayor a comparación del suelo con 10% y 30% de residuos de carbón mineral, lo que

indica que tiene mayor masa de suelo por unidad de volumen, que las otras mezclas de suelo – residuos de carbón mineral, por ende las partículas se integran con mayor facilidad, que para los otros porcentajes de adición de residuos de carbón mineral. Este parámetro debe ser verificado en campo, a través del ensayo de densidad de campo, para lograr una buena compactación.

Tabla 31

Compactación del Suelo de la Calicata 2, con Residuos de Carbón Mineral

Calicata 2	Residuos de carbón mineral		
	10%	20%	30%
Densidad máxima (gr/cm ³)	1.66	1.693	1.572
Humedad óptima (%)	10.32	10.18	11.52

Figura 45

Curva de Compactación del Suelo de la Calicata 2, con 10% de Residuos de Carbón Mineral

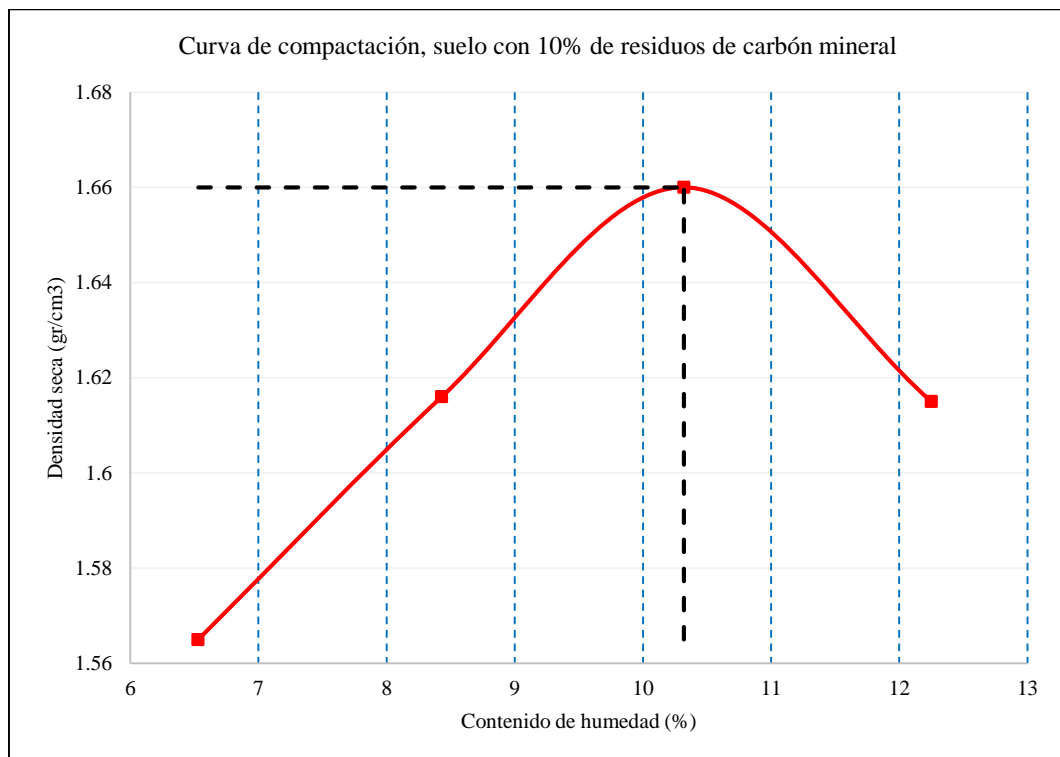


Figura 46

Curva de Compactación, Calicata 2, con 20% de Residuos de Carbón Mineral

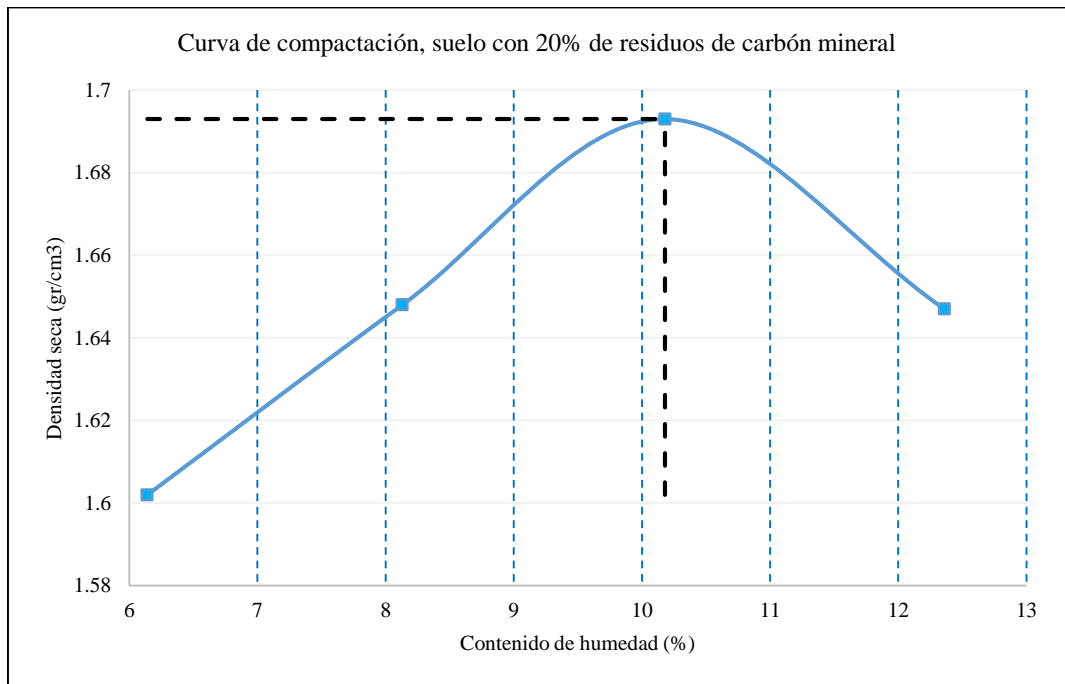
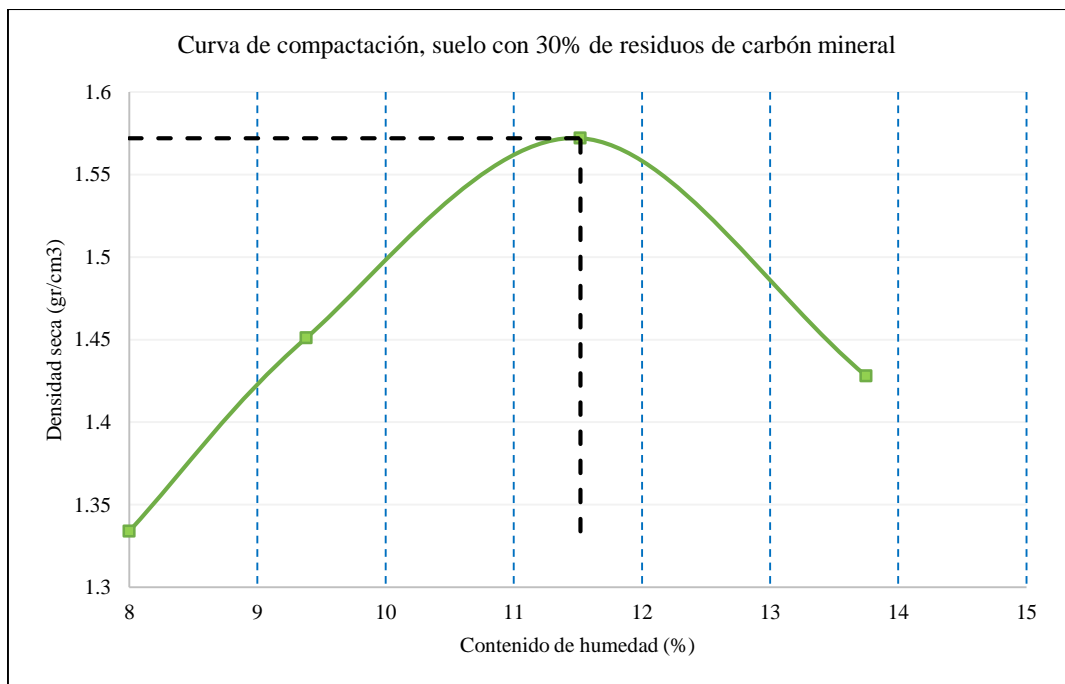


Figura 47

Curva de Compactación, Calicata 2, con 30% de Residuos de Carbón Mineral



La expansión del suelo de la calicata 2, limo de alta plasticidad, disminuye al aumentar el número de golpes de compactación, debido a que la energía de compactación es mayor, lo que provoca mayor adhesión de los materiales, y se considera un proceso de estabilización mecánica. La muestra de suelo con 10% de residuos de carbón mineral, alcanza valores de 5.85, 8.79 y 9.10% para los especímenes compactados con 56, 25 y 12 golpes, respectivamente, en promedio su expansión es 7.91%; para el suelo con 20% de residuos de carbón mineral, a los 56, 25 y 12 golpes de compactación, se obtienen valores de 4.86, 8.59, y 9.28% de expansión, respectivamente, en promedio 7.58% de expansión; mientras que para el suelo con 30% de residuos de carbón mineral la expansión es 6.54, 8.50 y 9.10% para 56, 25 y 12 golpes, respectivamente, por tanto, en promedio la expansión es 8.05%; la expansión del suelo disminuye al adicionar residuos de carbón mineral hasta 20%, pero al incrementar el porcentaje de adición de este residuo, la expansión aumenta, esto se puede deber a las características de gradación del carbón, y su facilidad para volverse polvo al ser compactado. Finalmente, se puede argumentar que la mezcla de suelo limoso con 20% de residuos de carbón mineral, presenta menor grado de hinchamiento.

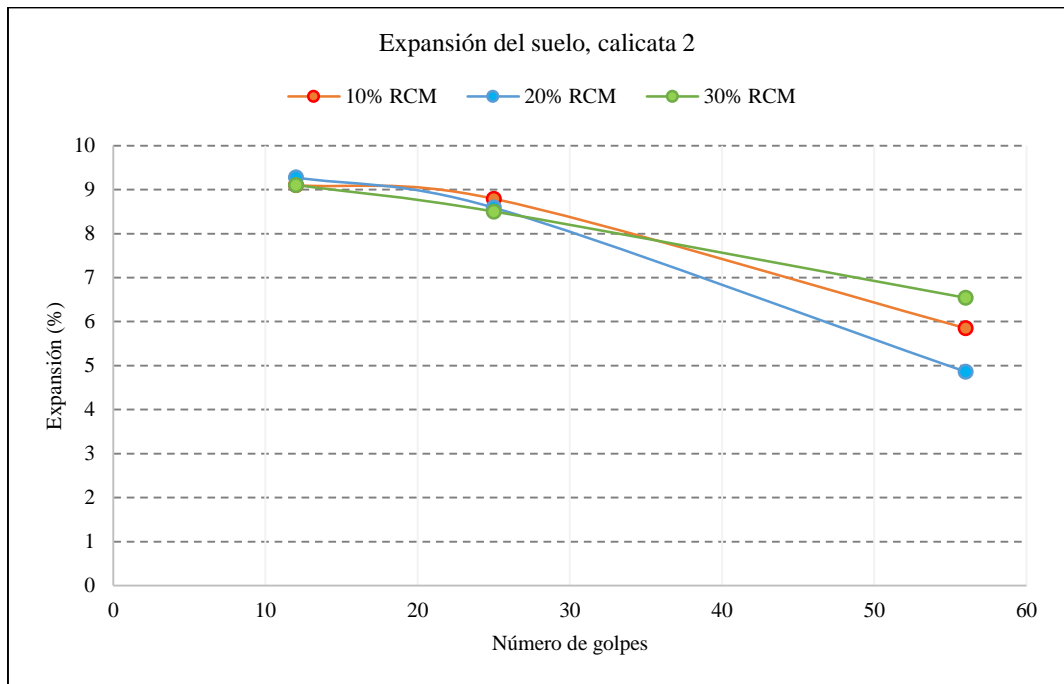
Tabla 32

Expansión del Suelo de la Calicata 2, con Residuos de Carbón Mineral

Calicata 2	Residuos de carbón mineral		
	10%	20%	30%
Expansión (%)			
56 golpes	5.85	4.86	6.54
25 golpes	8.79	8.59	8.50
12 golpes	9.10	9.28	9.10
Promedio	7.913	7.577	8.047

Figura 48

Expansión del Suelo de la Calicata 2, con Residuos de Carbón Mineral



La capacidad de carga (CBR) del suelo de la calicata 2, limo de alta plasticidad, tiende a aumentar cuando se adiciona residuos de carbón mineral hasta alcanzar el máximo con un porcentaje de 20% de residuos de carbón respecto al peso seco del suelo, pero luego disminuye si se incrementa mayor cantidad de estos residuos, así mismo, cuanto más se acerque la compactación a la máxima densidad seca (MDS), mejores resultados de la capacidad de soporte se alcanzarán. El CBR al 100% de MDS de las muestras de suelo con 10, 20 y 30% de residuos de carbón mineral, es 7.10, 7.50 y 5.50%, respectivamente, así mismo, el CBR al 95% es 6.20, 6.50 y 4.50%, para las muestras de suelo con 10, 20 y 30% de residuos de carbón mineral, respectivamente. Para el CBR al 100% de la MDS las muestras de suelo con 10% y 20%, superan el límite de una subrasante pobre (S1) dada por el MTC (2014) de 6% de CBR, pasando a ser una subrasante regular (S2), así mismo, para el CBR al 95% de la MDS, también las muestra de suelo con 10% y

20% de residuos de carbón mineral, superan el CBR mínimo dado en el “Manual de suelos, geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos” del MTC (2014), pero, la muestra con 20% de residuos de carbón mineral, logran mayor incremento en sus características mecánicas, siendo así se puede construir el afirmado o pavimento sobre la subrasante estabilizada con 20% de residuos de carbón mineral, de la carretera El Verde – Numbral, del distrito de Chalamarca, sin complicaciones por la baja capacidad de carga del suelo natural.

Tabla 33

CBR de la Calicata 2, con Residuos de Carbón Mineral

Calicata 2	Residuos de carbón mineral		
	10%	20%	30%
100% de MDS	7.10	7.50	5.50
95% de MDS	6.20	6.50	4.50

Figura 49

Curva CBR de la Calicata 2, con 10% Residuos de Carbón Mineral

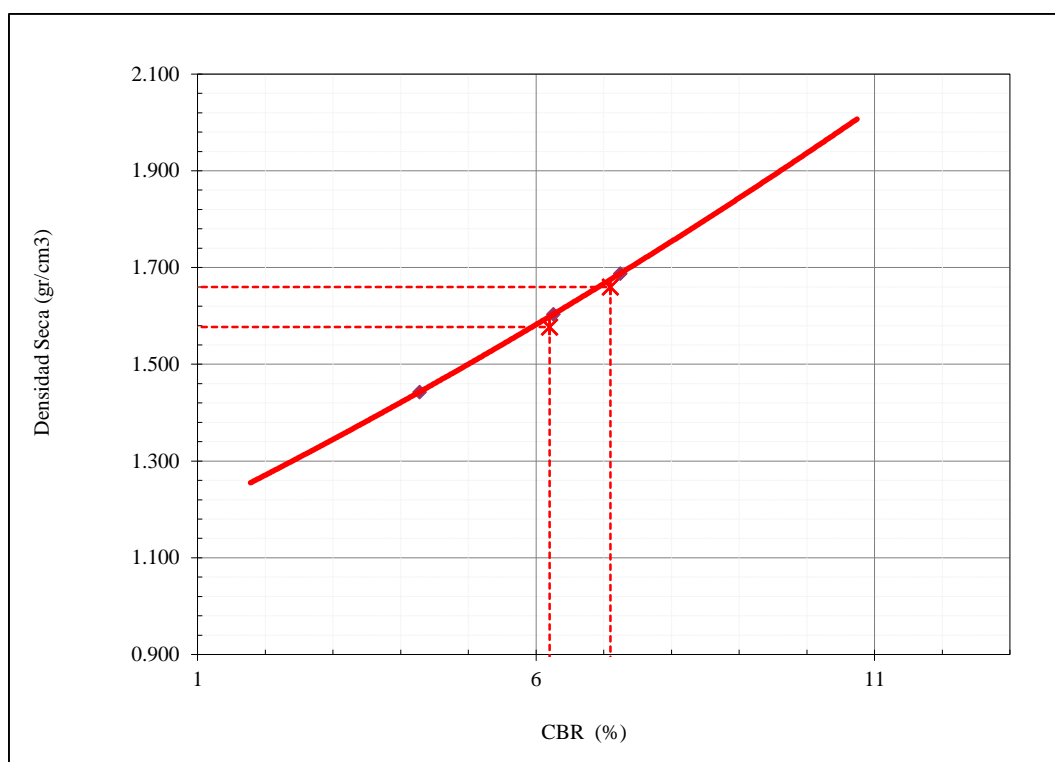


Figura 50

Curva CBR de la Calicata 2, con 20% Residuos de Carbón Mineral

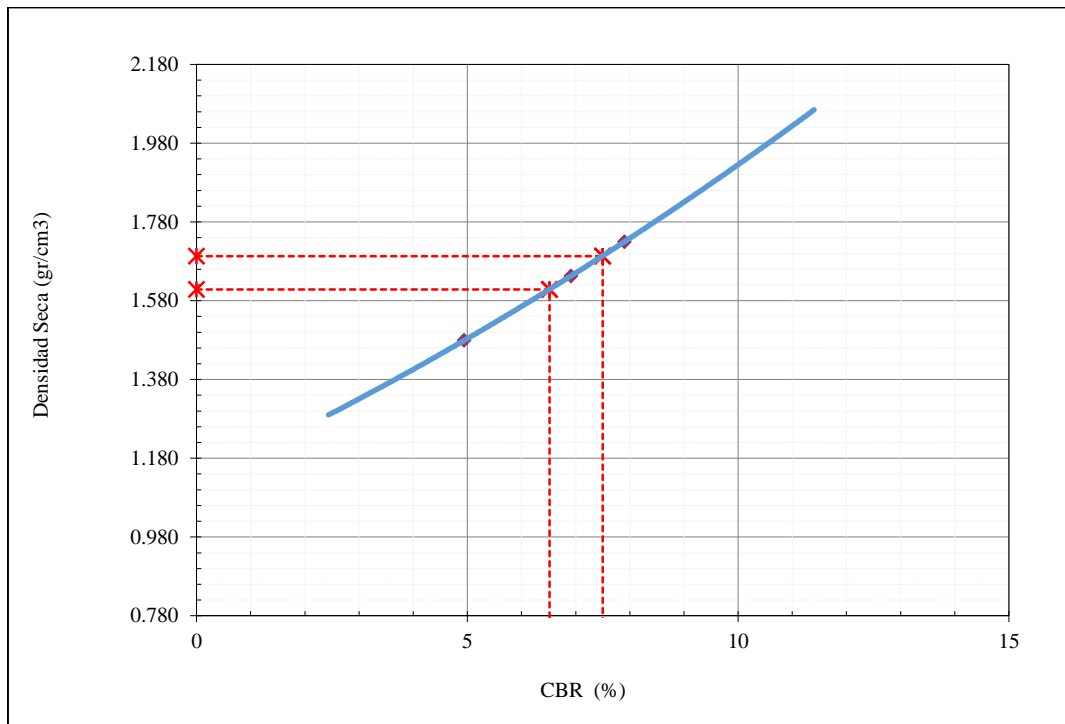
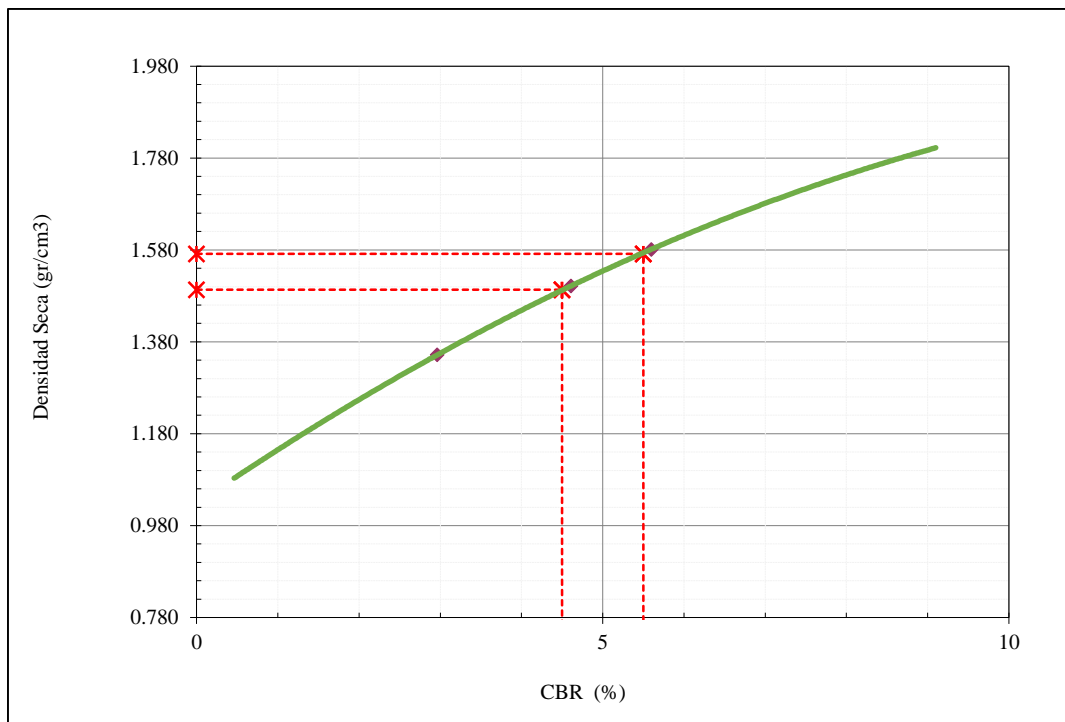


Figura 51

Curva CBR de la Calicata 2, con 30% Residuos de Carbón Mineral



El suelo de la calicata 3, de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, del distrito de Chalamarca, arena limosa, ha sido modificada con la adición de 10, 20 y 30% de residuos de carbón mineral, respecto al peso del suelo, determinando que con la humedad óptima de 12.50, 12.0, y 12.54%, alcanza la densidad máxima seca de 1.618, 1.654 y 1.304 gr/cm³, respectivamente; por tanto, a mayor cantidad de residuos de carbón mineral, la humedad óptima es menor, hasta un porcentaje de adición de 20% de residuos de carbón mineral, es decir, se requiere menor cantidad de agua para su compactación en campo, esto se debe al aporte de humedad del residuo de carbón al suelo, mismo que se pierde mientras mayor sea la cantidad de residuo mezclado con el suelo, no obstante, la densidad máxima seca, no se ve influenciada por la cantidad de residuos de carbón mineral de la misma manera, la densidad seca del suelo de la calicata 3, con 20% de residuos de carbón mineral es mayor a comparación del suelo con 10% y 30% de residuos de carbón mineral, lo que indica que tiene mayor masa de suelo por unidad de volumen, que las otras mezclas de suelo – residuos de carbón mineral, por ende las partículas se integran con mayor facilidad, que para los otros porcentajes de adición de residuos de carbón mineral. Este parámetro debe ser verificado en campo, a través del ensayo de densidad de campo, para lograr una buena compactación.

Tabla 34

Compactación del Suelo de la Calicata 3, con Residuos de Carbón Mineral

Calicata 3	Residuos de carbón mineral		
	10%	20%	30%
Compactación			
Densidad máxima (gr/cm ³)	1.618	1.654	1.304
Humedad óptima (%)	12.5	12.00	12.54

Figura 52

Curva de Compactación, Calicata 3, con 10% de Residuos de Carbón Mineral

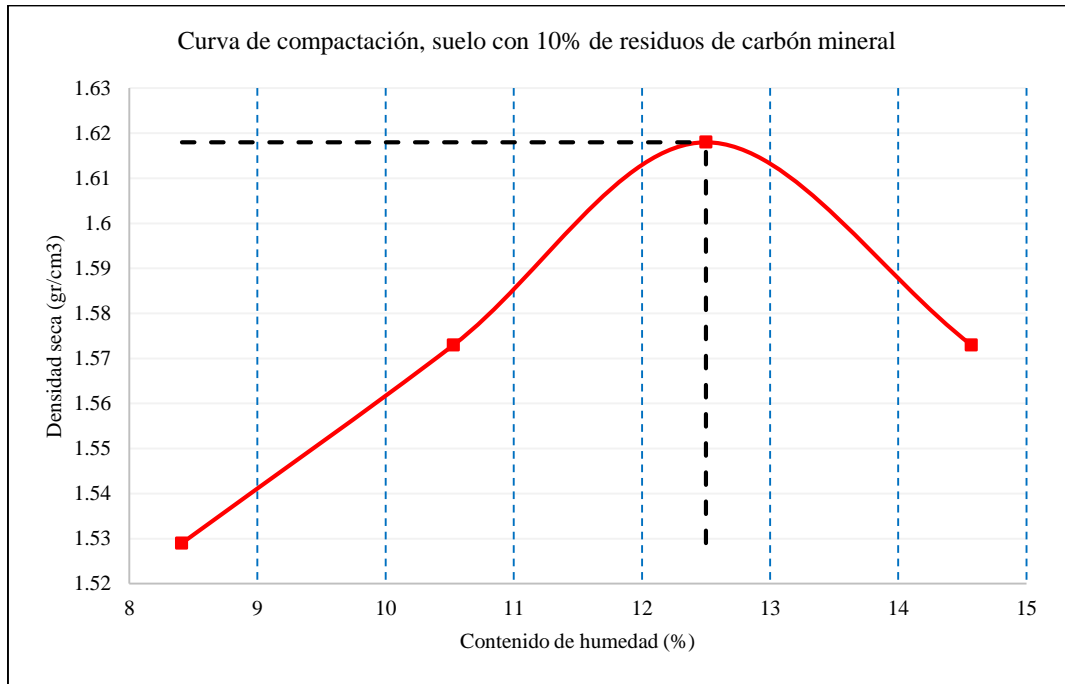


Figura 53

Curva de Compactación, Calicata 3, con 20% de Residuos de Carbón Mineral

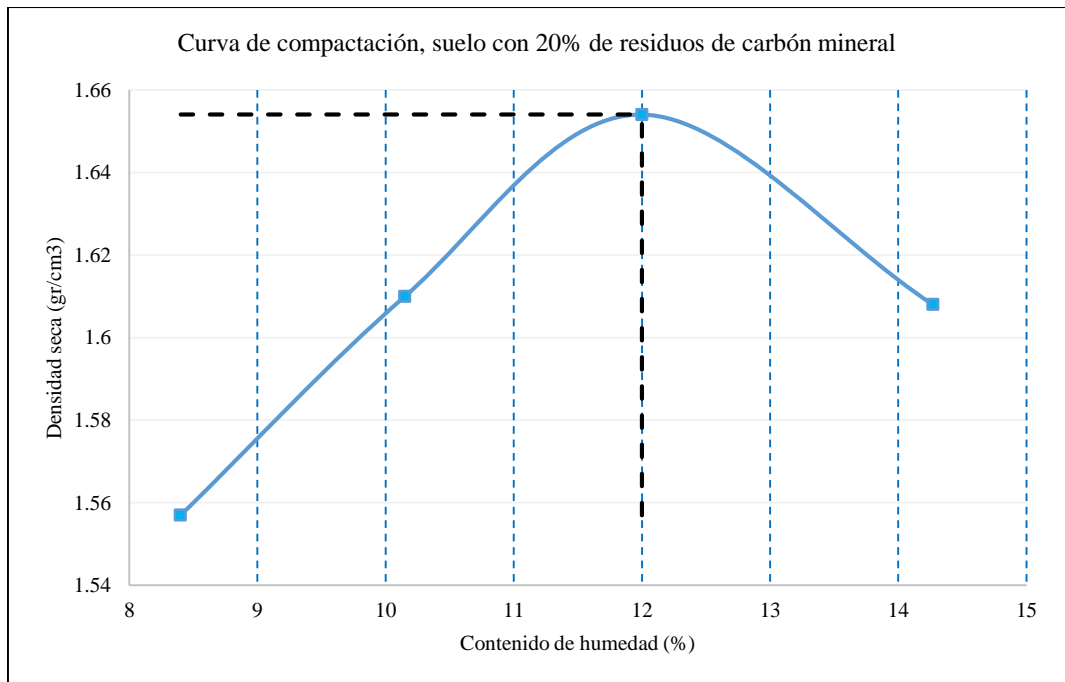
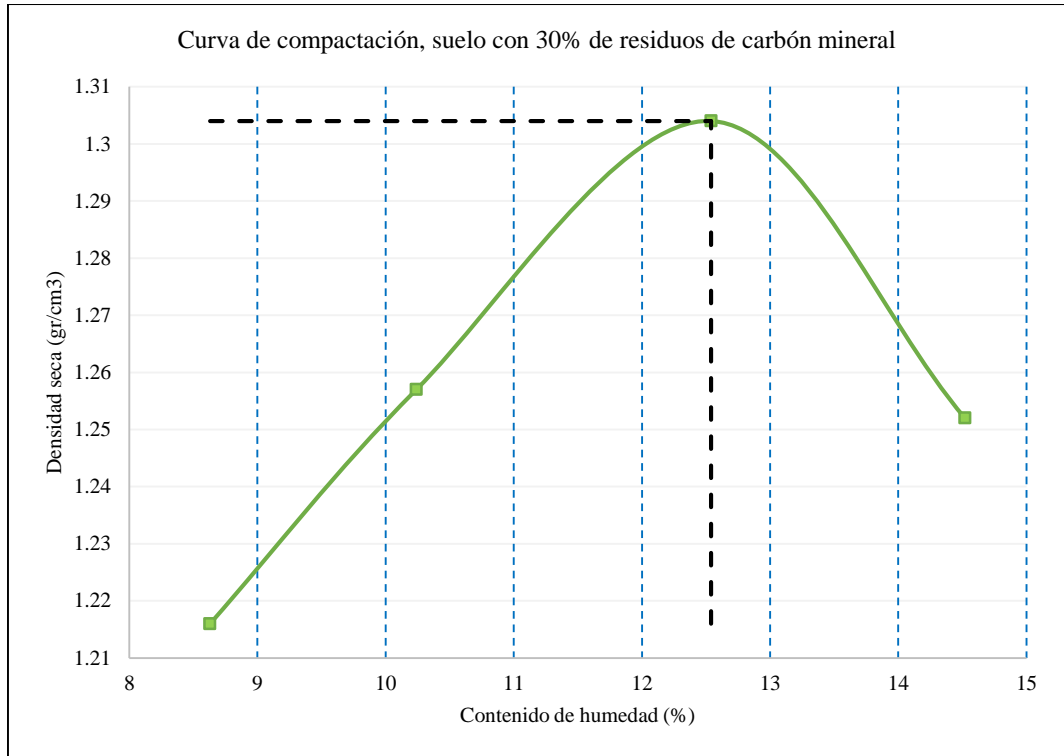


Figura 54

Curva de Compactación del Suelo de la Calicata 3, con 30% de Residuos de Carbón Mineral



La expansión del suelo de la calicata 3, arena limosa, disminuye al aumentar el número de golpes de compactación, debido a que la energía de compactación es mayor, lo que provoca mayor adhesión de los materiales, y se considera un proceso de estabilización mecánica. La muestra de suelo con 10% de residuos de carbón mineral, alcanza valores de 4.55, 5.57 y 6.89% para los especímenes compactados con 56, 25 y 12 golpes, respectivamente, en promedio su expansión es 5.67%; para el suelo con 20% de residuos de carbón mineral, a los 56, 25 y 12 golpes de compactación, se obtienen valores de 3.36, 5.21 y 7.42% de expansión, respectivamente, en promedio 5.33% de expansión; mientras que para el suelo con 30% de residuos de carbón mineral, la expansión es 4.55, 6.10 y 8.26% para 56, 25 y 12 golpes, respectivamente, por tanto, en promedio la expansión es 6.30%.

La expansión promedio para el suelo de la calicata 2, con 10, 20 y 30% de residuos de carbón mineral es 5.67%, 5.33% y 6.30%, respectivamente, por tanto, la expansión del suelo disminuye al adicionar residuos de carbón mineral hasta 20%, pero al incrementar el porcentaje de adición de este residuo, la expansión aumenta, esto se puede deber a las características de gradación del carbón, y su facilidad para volverse polvo al ser compactado. Así mismo, como el suelo de la calicata 3, es arena limosa, suelo granular, tiene menor expansión a comparación con el suelo de las calicatas 1 y 2, cuyo suelo es fino, lo que también influye en menores valores de expansión al adicionar residuos de carbón mineral. Finalmente, se puede argumentar que la mezcla de suelo areno limoso con 20% de residuos de carbón mineral, presenta menor grado de hinchamiento, en comparación con las otras muestras de suelo con distintos porcentajes de residuos de carbón.

Figura 55

Expansión del Suelo de la Calicata 3, con Residuos de Carbón Mineral

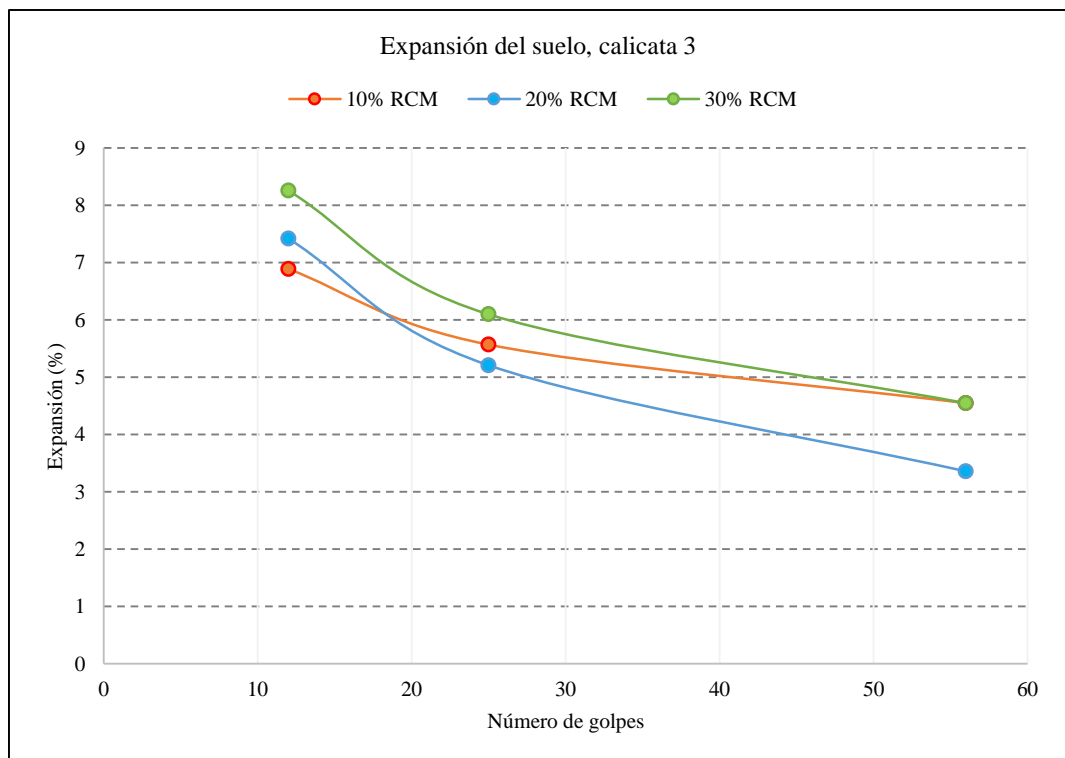


Tabla 35*Expansión del Suelo de la Calicata 3, con Residuos de Carbón Mineral*

Calicata 3	Residuos de carbón mineral			
	Expansión (%)	10%	20%	30%
56 golpes		4.55	3.36	4.55
25 golpes		5.57	5.21	6.10
12 golpes		6.89	7.42	8.26
Promedio		5.67	5.33	6.30

La capacidad de carga (CBR) del suelo de la calicata 3, arena limosa, tiende a aumentar cuando se adiciona residuos de carbón mineral, hasta alcanzar el máximo CBR, con un porcentaje de 20% de residuos de carbón respecto al peso seco del suelo, pero luego disminuye si se incrementa mayor cantidad de estos residuos, así mismo, cuanto más se acerque la compactación a la máxima densidad seca (MDS), mejores resultados de la capacidad de soporte se alcanzarán, tal como se muestra en la Tabla 36, y las Fig. 56, Fig. 57 y Fig. 58. El CBR al 100% de MDS de las muestras de suelo con 10, 20 y 30% de residuos de carbón mineral, es 6.50%, 7.50% y 5.00%, respectivamente, así mismo, el CBR al 95% es 5.60%, 6.60% y 4.00%, para las muestras de suelo con 10, 20 y 30% de residuos de carbón mineral, respectivamente. Para el CBR al 100% de la MDS las muestras de suelo con 10% y 20% de residuos de carbón mineral, superan el límite de una subrasante pobre (S1) dada por el MTC (2014) de 6% de CBR, pasando a ser una subrasante regular (S2), pero la muestra de suelo con 30% de residuos de carbón mineral, sigue presentando una capacidad de soporte baja, por lo que se considera una subrasante pobre, y no se cumple el fin de estabilización; así mismo, para el CBR al 95% de la MDS las muestras de suelo con 10% y 20% de residuos de carbón mineral presentan capacidad de carga superior al mínimo dado en el “Manual de suelos, geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos” del MTC

(2014), pero, las muestras con 20% de residuos de carbón mineral logran un mayor incremento en las características mecánicas, siendo la subrasante calificada como regular, además de que es posible construir el afirmado o pavimento de la carretera El Verde – Numbral, del distrito de Chalamarca, sobre la subrasante estabilizada con 20% de residuos de carbón mineral, sin complicaciones por la baja capacidad de carga del suelo natural.

Tabla 36

CBR de la Calicata 3, con Residuos de Carbón Mineral

Calicata 3	Residuos de carbón mineral		
	10%	20%	30%
100% de MDS	7.00	7.50	5.30
95% de MDS	6.20	6.50	4.00

Figura 56

Curva CBR de la Calicata 3, con 10% Residuos de Carbón Mineral

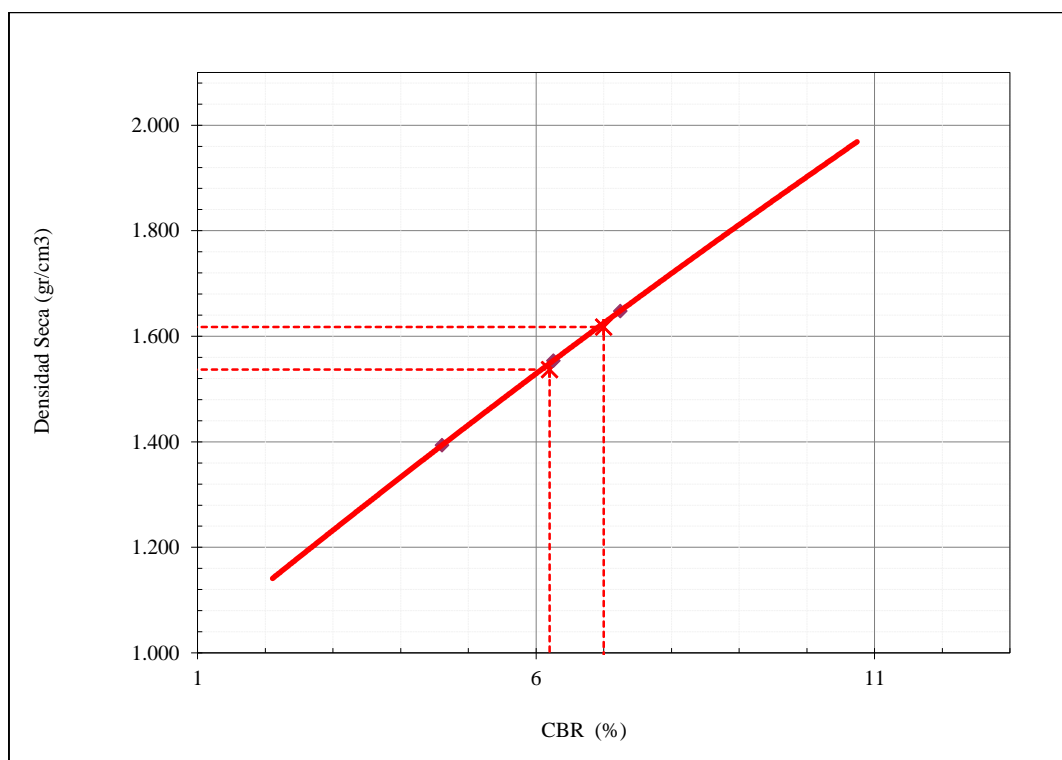


Figura 57

Curva CBR de la Calicata 3, con 20% Residuos de Carbón Mineral

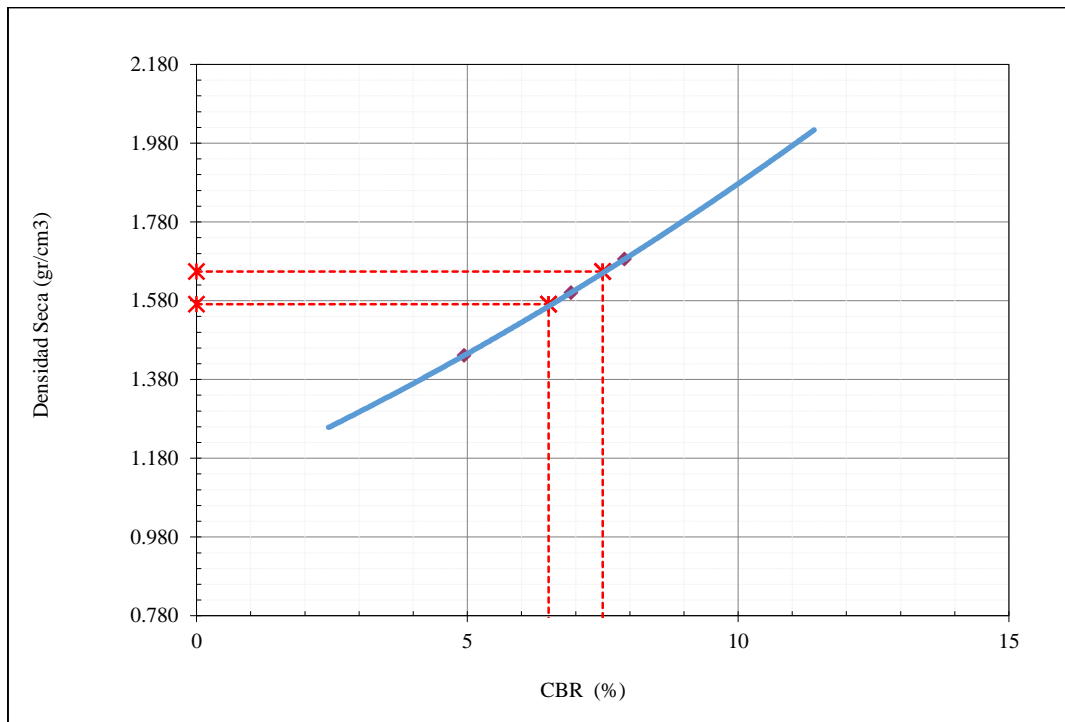
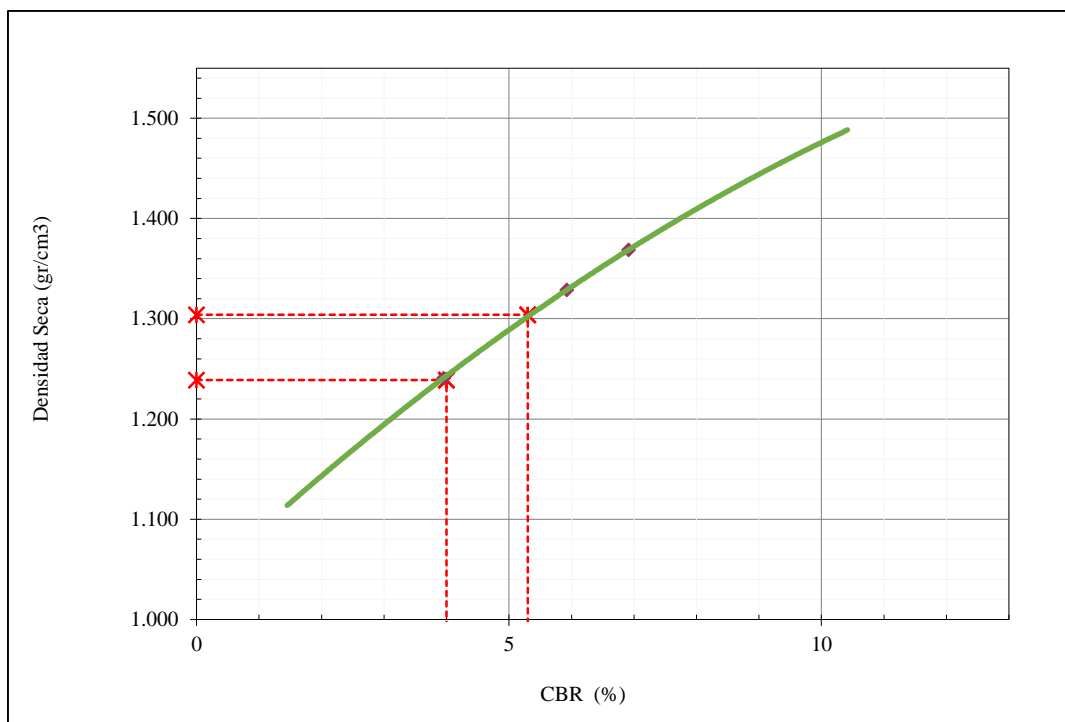


Figura 58

Curva CBR de la Calicata 3, con 30% Residuos de Carbón Mineral



4.1.4. Dosificación óptima de residuos de carbón mineral

El suelo de la calicata 1, con 20% de residuos de carbón mineral presenta mejores características mecánicas con un CBR al 95 y 100% de MDS de 6.60 y 7.50%.

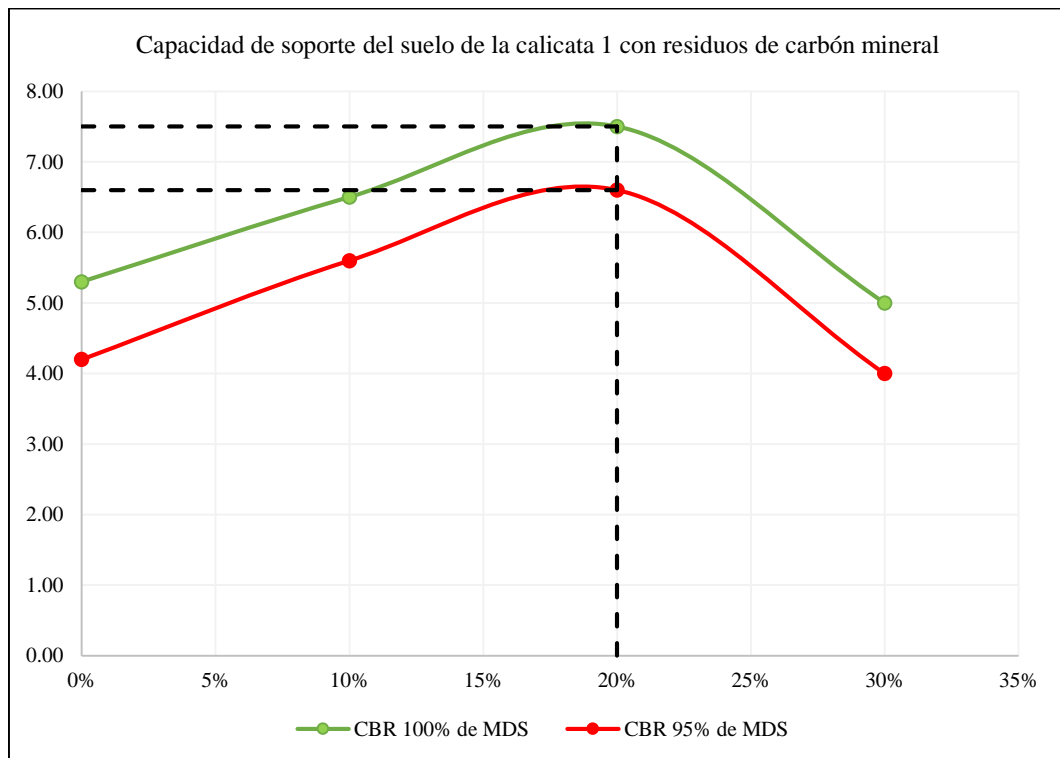
Tabla 37

Características Mecánicas del Suelo de la Calicata 1, con Residuos de Carbón Mineral

Calicata 1	Residuos de carbón mineral			
	0%	10%	20%	30%
Densidad máxima (gr/cm ³)	1.403	1.466	1.472	1.287
Humedad óptima (%)	14.65	15.3	13.18	11.26
Expansión promedio (%)	9.27	7.24	6.73	9.08
CBR 100% de MDS	5.30	6.50	7.50	5.00
CBR 95% de MDS	4.20	5.60	6.60	4.00

Figura 59

Capacidad de Soporte del Suelo de la Calicata 1, con Residuos de Carbón Mineral



El suelo de la calicata 2, con 20% de residuos de carbón mineral presenta mejores características mecánicas con un CBR al 95 y 100% de MDS de 6.50 y 7.50%.

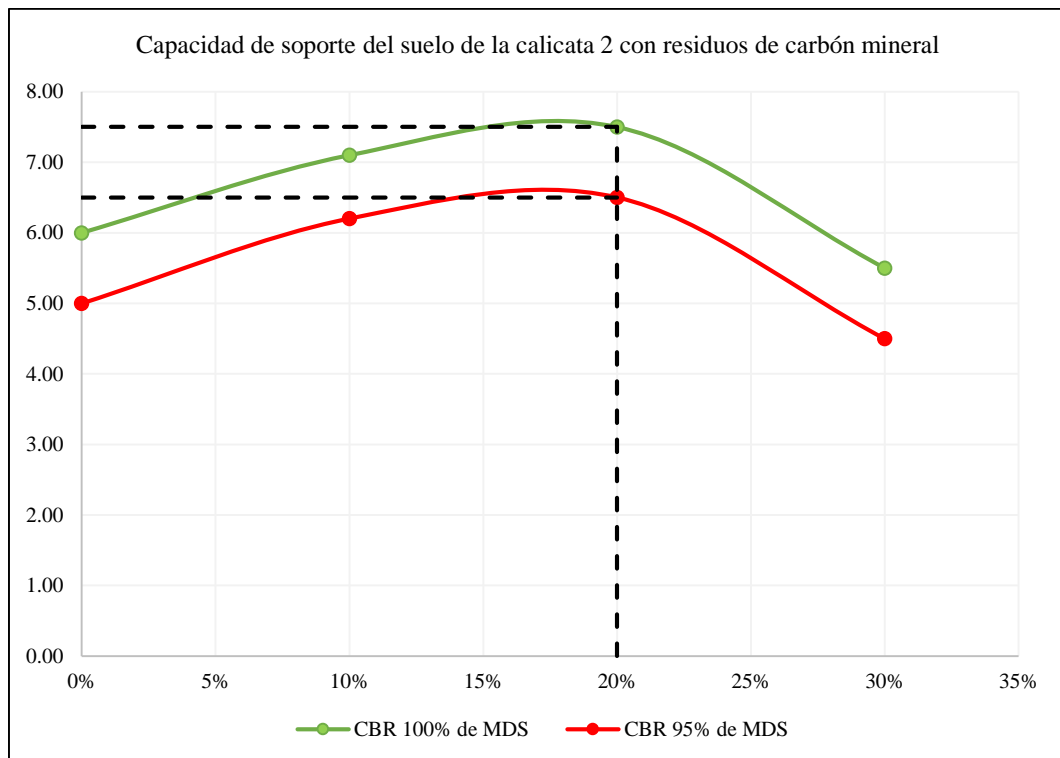
Tabla 38

Características Mecánicas del Suelo de la Calicata 2, con Residuos de Carbón Mineral

Calicata 2	Residuos de carbón mineral			
	0%	10%	20%	30%
Densidad máxima (gr/cm ³)	1.633	1.66	1.693	1.572
Humedad óptima (%)	12.24	10.32	10.18	11.52
Expansión promedio (%)	7.17	7.91	7.58	8.05
CBR 100% de MDS	6.00	7.10	7.50	5.50
CBR 95% de MDS	5.00	6.20	6.50	4.50

Figura 60

Capacidad de Soporte del Suelo de la Calicata 2, con Residuos de Carbón Mineral



El suelo de la calicata 3, con 20% de residuos de carbón mineral presenta mejores características mecánicas con un CBR al 95 y 100% de MDS de 6.50 y 7.50%.

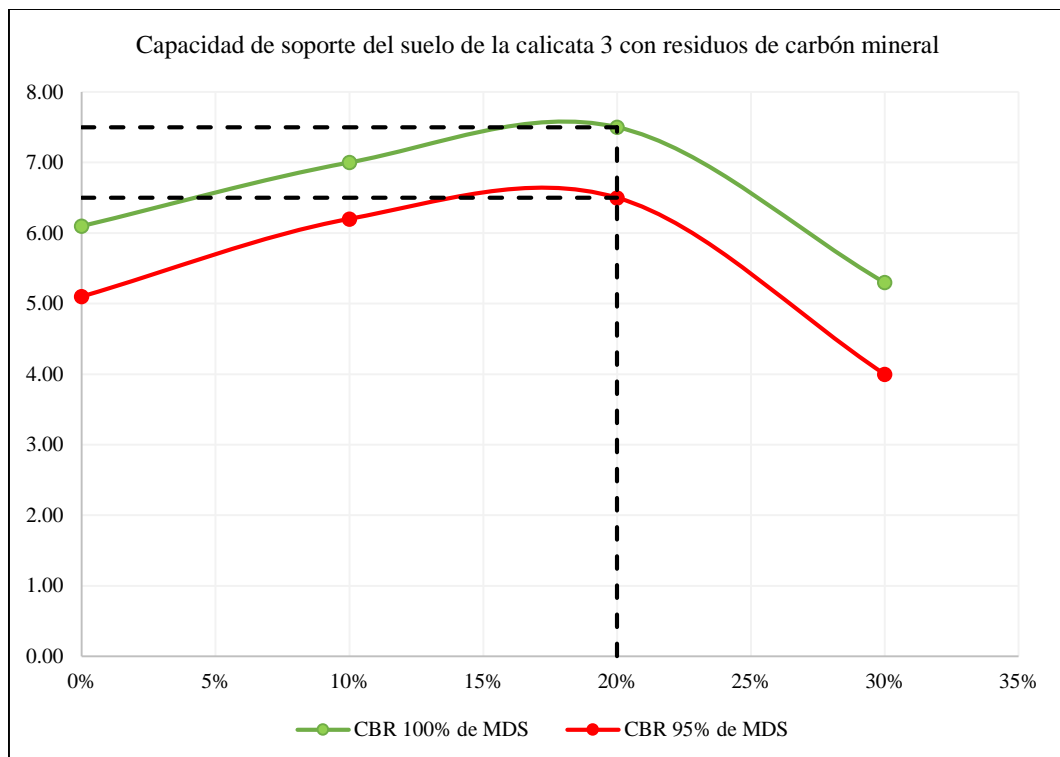
Tabla 39

Características Mecánicas del Suelo de la Calicata 3, con Residuos de Carbón Mineral

Calicata 3	Residuos de carbón mineral			
	0%	10%	20%	30%
Densidad máxima (gr/cm ³)	1.438	1.618	1.654	1.304
Humedad óptima (%)	13.92	12.5	12	12.54
Expansión promedio (%)	5.37	5.67	5.33	6.30
CBR 100% de MDS	6.10	7.00	7.50	5.30
CBR 95% de MDS	5.10	6.20	6.50	4.00

Figura 61

Capacidad de Soporte del Suelo de la Calicata 3, con Residuos de Carbón Mineral



El suelo de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, Km 1+500 al Km 2+500, tiene baja capacidad portante en estado natural, pero este se incrementa al adicionar residuos de carbón mineral, respecto al peso seco del suelo, hasta un porcentaje de incorporación máximo de 20%, luego si se adiciona mayor cantidad de residuos de carbón mineral el CBR disminuye, tanto para el 95% y 100% de la MDS. El suelo con menor CBR, en estado natural, corresponde a la calicata 1, pero es la calicata que logra un mayor incremento en la capacidad de soporte del suelo al incorporarle 20% de residuos de carbón mineral, el CBR al 95% de MDS es 6.60%, teniendo un incremento de 1.80% respecto, al suelo natural (CBR al 95% de MDS de 4.20%), lo que se debe a que es un suelo arcilloso de alta plasticidad, que se adhiere mejor a las partículas de los residuos de carbón mineral, logrando una mayor resistencia, no obstante, el suelo de las calicatas 2 y 3, estabilizado con 20% de residuos de carbón mineral, también tiene un incremento notable en la capacidad de carga, de 1.00% y 0.90%, respectivamente, respecto al suelo natural. El CBR del suelo de la subrasante al 100% de la MDS, es 5.30, 6.00 y 6.10%, para las calicatas 1, 2 y 3, respectivamente, pero al adicionar 20% de residuos de carbón mineral, alcanzan un porcentaje de CBR de 7.50%, para todas las calicatas, por tanto, el suelo mejora sus características mecánicas; la calicata 1, 2 y 3 tienen un incremento del CBR de 1.70, 1.50 y 1.40%, respectivamente, por tanto, la calicata 1, suelo arcilloso de alta plasticidad, tiene un mayor incremento en la capacidad de carga, mientras que el suelo de la calicata 3, arena limosa, tiene el menor incremento en la capacidad de carga, pero todas las muestras de suelo logran un aumento notable del CBR, al ser estabilizadas con 20% de residuos de carbón mineral.

Figura 62

CBR al 95% de MDS del Suelo con Residuos de Carbón Mineral

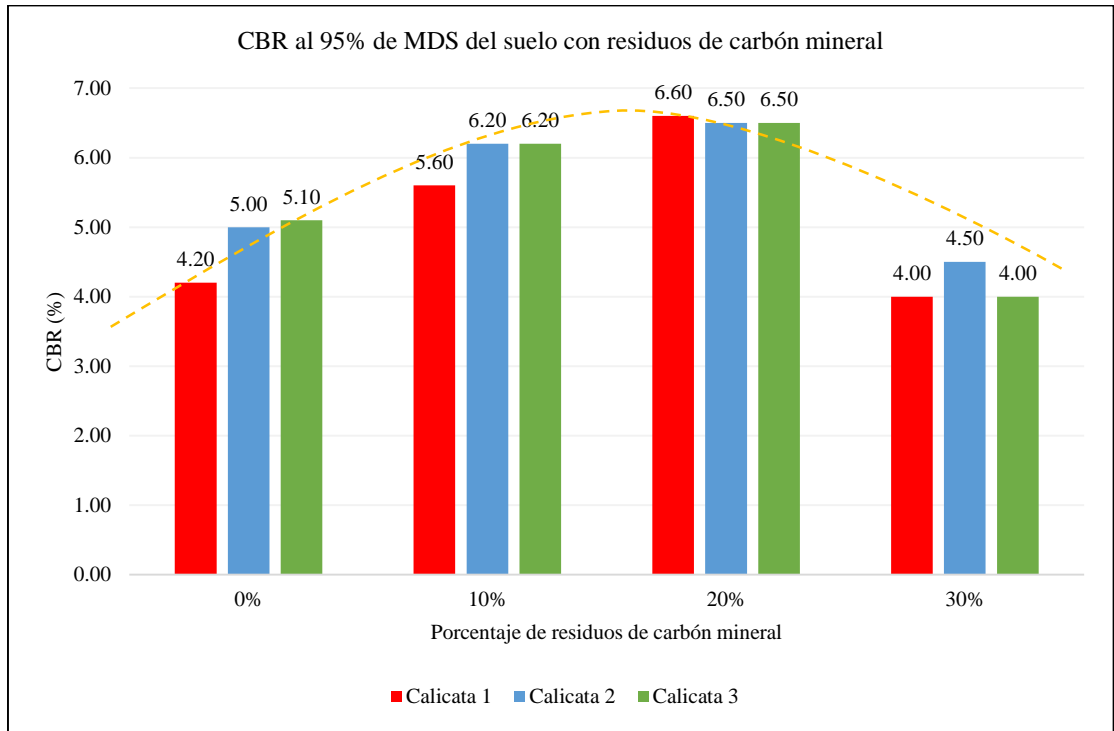
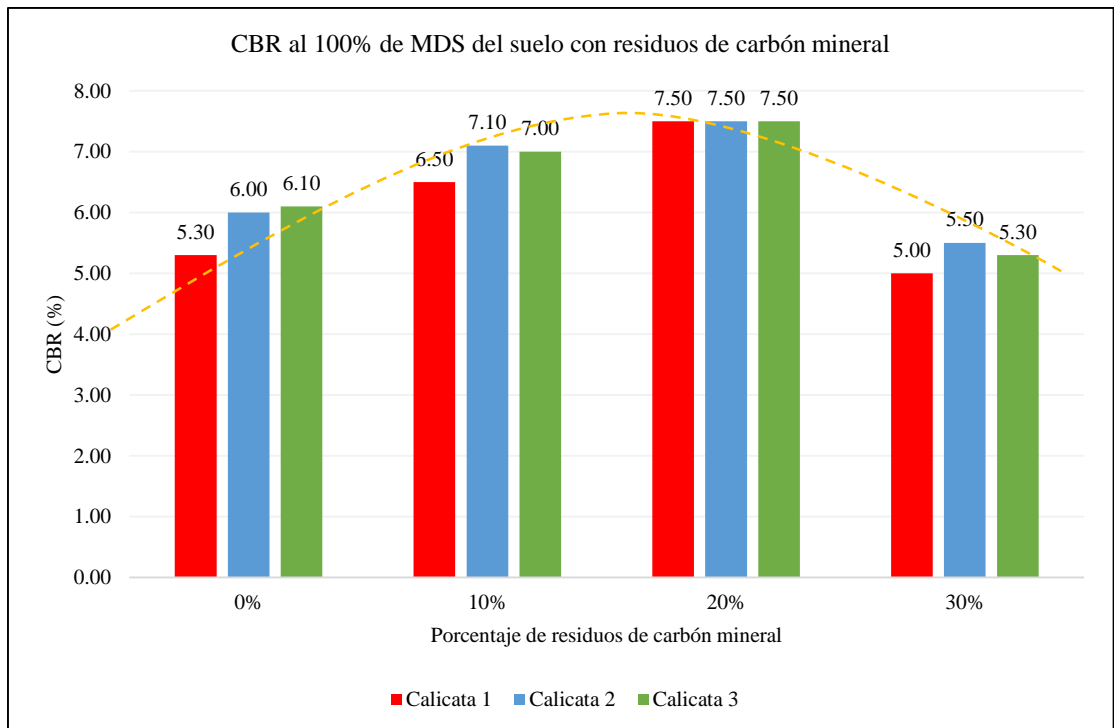


Figura 63

CBR al 100% de MDS del Suelo con Residuos de Carbón Mineral



4.1.5. Análisis técnico-económico-ambiental

4.1.5.1. Análisis técnico

Los suelos estabilizados con residuos de carbón mineral son arcillosos, limosos y areno limosos, según cada calicata (C1, C2 y C3 respectivamente), y alcanzan un incremento promedio de 57.14%, 30% y 27.45% de la capacidad de soporte del suelo natural al 95% de MDS, respectivamente. Mientras que, si se utilizasen aditivos químicos como la cal o cemento, se tendrían mayores incrementos en la resistencia técnica, pero con un mayor costo e incidencia ambiental.

Tabla 40

Estabilización con Residuos de Carbón

Calicata	Tipo de suelo	CBR al 95% MDS según		%	CBR al 100% MDS según		%
		% de residuos de carbón			% de residuos de carbón		
		0%	20%	0%	20%		
C1	Suelo arcilloso	4.2	6.6	57.14%	5.3	7.5	41.51%
C2	Suelo limoso	5	6.5	30.00%	6	7.5	25.00%
C3	Suelo areno limoso	5.1	6.5	27.45%	6.1	7.5	22.95%

La cal según el Manual de carreteras “Suelos, geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos” (MTC, 2014) solo se debe utilizar para suelos arcillosos, limosos o la mezcla de estos con grava, pero no sugiere su uso para suelos arenosos, así mismo, sugieren su aplicación de 1 a 3% en peso, no obstante, según los antecedentes para lograr un mayor porcentaje de aumento del CBR incluso llegan a adicionar un 20% de cal, pero es el porcentaje de aplicación entre suelos arcillosos y limosos el de 8% de cal, por tanto, este es el porcentaje que se ha utilizado para el análisis económico. Según los antecedentes, se puede inferir que, la cal, brinda un mayor aumento en la capacidad de soporte que los residuos de carbón mineral, pero algunos autores alcanzan resultados similares a los del estudio como Ponce (2017), Machco (2019), y Pelaéz y Benites (2020).

Tabla 41*Estabilización con Cal*

Tipo de suelo Autores	CBR al 95% MDS según porcentaje de cal						% aumento
	0%	5%	6%	8%	15%	20%	
Suelos arcillosos							
Jara (2014)	2.55%		10.75%				321.57%
Moale y Rivera (2019)	3.30%				5.90%		78.79%
Ponce (2017)	11.80%	16.50%					39.83%
Tacca (2021)	9.40%			24.95%			165.43%
Córdova (2021)	8.60%			19.80%			130.23%
Vásquez y Marín (2020)	1.70%			9.35%			450.00%
Suelos limosos							
Hurtado y Ricra (2020)	0.10%			0.80%			700.00%
Machco (2019)	9.60%				15.20%		58.33%
Suelos arenosos							
Peláez y Benites (2020)	32.20%					46%	42.86%

El cemento según el MTC (2014) se debe aplicar en un rango típico según el tipo de suelo, es decir según su clasificación AASHTO, el suelo del presente estudio se clasifica como A-7-6 (19), A-7-5 (13) y A-7-5 (5) para las calicatas C1, C2 y C3, respectivamente, por lo que su porcentaje de adición de cemento oscilaría entre 9% a 16% del peso del suelo, por lo que se utilizará 10% para el análisis económico, aún cuando, según los antecedentes es más común estabilizar suelos arcillosos y limosos con 8% de cemento en peso, y suelos areno limosos con 6% de cemento en peso. Según los antecedentes, el cemento brinda una mayor capacidad de soporte al suelo de la subrasante estabilizada, no obstante, algunos autores, como, Castro y Navarro (2020) y Cruz (2021), logran incrementos similares a los del presente estudio, al aplicar residuos de carbón mineral.

Tabla 42*Estabilización con Cemento*

Tipo de suelo	CBR al 95% MDS según porcentaje de cemento							% aumento
	Autores	0%	3%	5%	6%	8%	12%	
Suelos arcillosos								
Velásquez (2018)	1.30%		13.75%					957.69%
Castro y Navarro (2020)	91.90%						138.70%	50.92%
Jara (2021)	7%					25%		257.14%
Hanco (2021)	1.60%	11.10%						593.75%
Suelos limosos								
Quispe y Venero (2021)	6%						18%	200.00%
Suelos areno limosos								
Alata y Vásquez (2019)	22.60%			148%				554.87%
Cruz (2021)	45.70%			50.90%				11.38%

Siendo así, a partir del análisis técnico, se puede argumentar que el uso de aditivos químicos como cal o cemento, alcanzan un mayor CBR en la estabilización de la subrasante, pero, los valores finales no distan mucho, de los alcanzados con residuos de carbón mineral, por lo que, se sigue recomendando su uso, considerando que, si bien los aditivos químicos logran mayor CBR, ambos materiales estabilizadores, logran cumplir los lineamientos del MTC (2014), superando el rango de una subrasante inadecuada de 6% de CBR.

4.1.5.2. Análisis económico

Respecto al análisis económico, para estabilizar la subrasante de la carretera se necesitarán los mismos equipos, y se seguirá el mismo proceso que se utiliza para la estabilización con aditivos químicos convencionales, entonces la única diferencia sustancial serán los materiales que, se utilizarán para el proceso de mejoramiento de la subrasante. Siendo así, se ha estimado el costo de producción de los residuos de carbón triturados y tamizados, más el flete para llevarlo hacia

el lugar de estudio, y también se ha estimado el costo de traslado del cemento y cal, al 8% y 10% del peso del suelo.

a) Datos

- Volumen de suelo= 1 m³
- Peso específico del suelo= 1400 kg/m³
- Peso del suelo= 1400 kg
- Peso específico del carbón granular= 1800 kg/m³
- Rango de cemento (MTC, 2014) 10% para A-7
- Costo del cemento portland tipo I= 24.50 bolsa de 42 kg
- Peso específico del cemento= 3150 kg/m³
- Porcentaje de cal (MTC, 2014) = 8% para suelos arcillosos
- Costo de la cal= 15.50 bolsa de 20 kg
- Peso específico de la cal= 1150 kg/m³

b) Cálculo de materiales, para 1 m³ de suelo

Cantidad de polvo de residuos de carbón

- En peso= 20% (1400 kg) = 280 kg
- En volumen= $280/1800 = 0.156$ m³

Cantidad de cemento

- En peso= 10% (1400 kg) = 140 kg
- En bolsas= $140/42 = 3.33$ bolsas

Cantidad de cal

- En peso= 8% (1400 kg) = 112 kg
- En bolsas= $112/20 = 5.60$ bolsas

c) Cálculo del costo de los residuos de carbón mineral

El costo de residuos de carbón mineral es de 25 soles, incluye transporte a la calera, trituración y tamizado del material, para obtener carbón mineral granular.

Tabla 43

Costo de los Residuos de Carbón Mineral

Rendimiento	m3/día	75		EQ	75
Descripción del recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de obra					
Operario	hh	1	0.1067	20.19	2.154
Peón	hh	2	0.2133	14.91	3.181
					5.334
Materiales					
Residuos de carbón mineral	m3		1	5.00	5.000
					5.000
Equipos					
Herramientas manuales	%mo		5.000	5.33	0.267
Transporte de material volquete 10 m3 (ida y vuelta)	hm	1	0.107	128	13.653
					13.920
Costo unitario directo en m3					24.254

d) Comparación del costo de materiales para el mejoramiento de la subrasante

El costo de los materiales al estabilizar el suelo con residuos de carbón es significativamente mucho menor que, al utilizar otros estabilizadores.

Tabla 44

Costo de los Materiales para Estabilizar 1 m3 de Suelo

Material	Unidad	Cantidad	Precio unitario (S/.)	Total (S/.)
Residuos de carbón mineral	m3	0.156	24.254	3.773
Cemento	bolsas	3.33	24.50	81.67
Cal	bolsas	5.60	15.50	86.80

4.1.5.3. Análisis ambiental

La estabilización de suelos es uno de los métodos convencionales utilizados para mejorar la calidad de la subrasante de las carreteras y las capas de pavimento. Este método permite mejorar las propiedades del material existente en el sitio del proyecto y alcanzar las especificaciones necesarias. Además, mejorar la calidad del pavimento y las capas de relleno reduciría el espesor total del pavimento y conduciría a una reducción de los costos administrativos.

Según la literatura en los últimos cien años, se utilizaron varios aditivos como agentes estabilizadores. Algunos de estos aditivos estabilizadores consisten en varios tipos de cementos, cal, aditivos puzolánicos y betunes, lo que genera contaminación al medio ambiente, por tanto, además de los materiales antes mencionados que se consideran estabilizadores de suelo comunes, en los últimos años, la mayoría de los investigadores se están interesando más en la aplicación de materiales de desecho.

El cemento es una necesidad para el desarrollo económico, pero su producción consume mucha energía y genera una contaminación excesiva, incluidas las emisiones de SO_2 y CO_2 . Dado que la contaminación ambiental asociada con el rápido aumento de la producción de cemento ha empeorado significativamente en las últimas décadas, vale la pena analizar materiales que sustituyan o reduzcan su uso (Uwasu et al., 2014).

El óxido de calcio (CaO), conocido como cal o cal viva, es un producto intensivo en energía, pero uno de los productos alcalinos más utilizados y más baratos empleados en la industria. El impacto ambiental de la producción de cal puede ser de escala local, regional o global. Los efectos locales incluyen emisiones de polvo y cambios en el paisaje debido a la extracción de piedra caliza. El dióxido de

azufre y los óxidos de nitrógeno emitidos contribuyen a la lluvia ácida a escala regional, mientras que las emisiones de CO₂ contribuyen al cambio climático global (Gutiérrez et al., 2012).

Así mismo, el carbón es uno de los recursos más abundantes utilizados para producir energía. Cada año se producen casi 5.500 millones de toneladas de carbón en todo el mundo y cerca de la mitad del carbón obtenido de las minas se entierra como material de desecho. Una de las formas más beneficiosas de evitar los problemas medioambientales derivados de la eliminación de los materiales de desecho es consumirlos en la industria de la construcción, como en las capas de construcción de pavimentos (Modarres y Nosoudy, 2015).

El uso de residuos de carbón no solo permite reducir el uso de aditivos químicos en la estabilización de suelos (cemento o cal), sino también, facilita el uso de un material residual que causaría contaminación, por tanto, su uso generará un impacto ambiental positivo, sobre todo en la provincia de Chalamarca, donde hay una acumulación de residuos de carbón mineral de la mina La Palma.

Figura 64

Residuos de Carbón Mineral

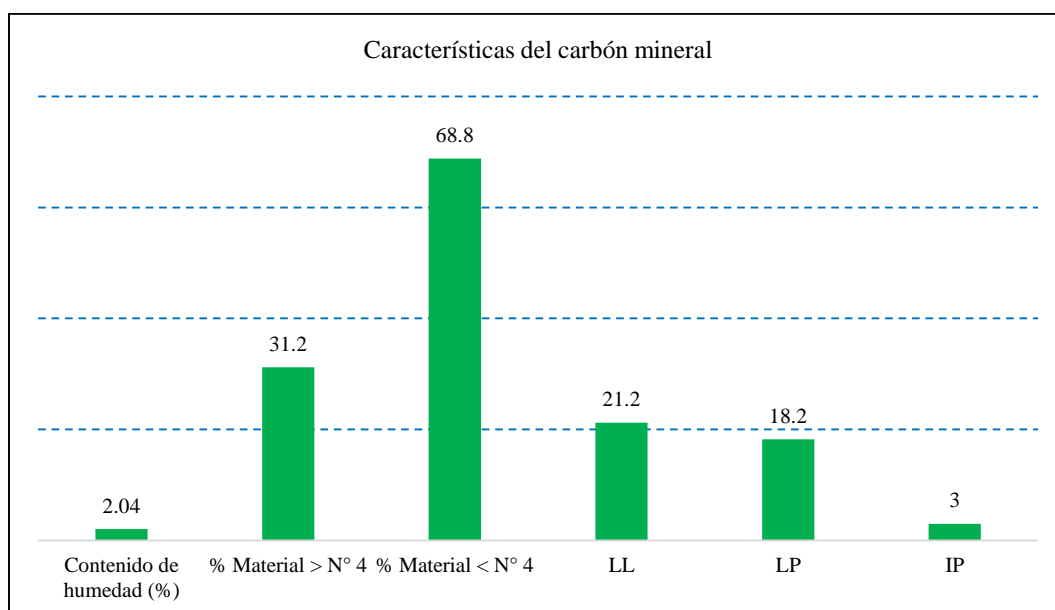


4.2. Discusión de resultados

El residuo de carbón mineral de la mina “La Palma”, del distrito de Chalamarca, tiene una gradación granular, menor al tamiz 3/8”, con un huso granulométrico, similar al de un material de base granular según el MVCS (2021) en la norma CE.010 “Pavimentos urbanos”, debido a que cumple con la gradación D. Los residuos de carbón mineral, presentan características similares a la ganga de carbón utilizada por Ashfaq et al. (2020), pero difieren con las características del carbón vegetal utilizado por Aderinlewo et al. (2020). Así mismo, Vásquez (2019), también utilizó residuos de carbón mineral triturados obtenidos a partir de la ganga de una cantera, en el caso del autor utilizó los residuos de la cantera “La Galgada” de Chimbote, mientras que en el presente estudio se utilizó una cantera de carbón de la región Cajamarca, sin embargo, la mayoría de estudios nacionales no utilizan los residuos de carbón mineral extraídos de una mina o cantera, sino utilizan las cenizas obtenidas a partir de la quema de carbón mineral o vegetal, lo que genera variación en el CBR del suelo de la subrasante mejorada.

Figura 65

Características del Carbón Mineral de la Mina “La Palma”, Chalamarca



El suelo natural de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, del distrito de Chalamarca, tiene alta plasticidad con índices de plasticidad, de 29.10, 23.20 y 15.90% para las calicatas 1, 2 y 3; los suelos estudiados por Chilcon y León (2020), Amaya et al. (2022) y Goñas y Saldaña (2020), también eran altamente plásticos, pero disímiles al suelo estudiado por Julca (2020) y Casas (2021) que eran de baja plasticidad. El suelo de la calicata 1 es arcilloso de alta plasticidad, la calicata 2 limoso de alta plasticidad, y la calicata 3 areno limoso, siendo así, Sumesh et al. (2020), para su estudio estabilizó suelos limo arcillosos, y Cañar (2017) utilizó suelos arenosos finos y arcillosos combinados, con un CBR de 4.60%, siendo esta una capacidad de soporte similar, a la obtenida por las muestras de suelo de las calicatas de la subrasante de la carretera en estudio, tal como Jiménez et al. (2019) quienes utilizaron suelo A-2-6 con CBR de 5.5%, pero mayores, al CBR del suelo utilizado por Goñas y Saldaña (2020) cuyo suelo tenía un CBR de 2.2%, así mismo, el suelo de la carretera El Verde – Numbral, tiene menor porcentaje de expansión que el suelo estudiado por Ariza et al. (2017), quienes determinaron un hinchamiento de 13.23%, mientras que en la presente investigación el porcentaje máximo de expansión es 9.27%. El suelo natural de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, del distrito de Chalamarca, según el “Manual de suelos, geología, geotecnia, y pavimentos, sección suelos y pavimentos” del MTC (2014), se clasifica como subrasante pobre, por lo que necesita pasar por procesos de estabilización para mejorar sus características mecánicas para que pueda servir como subrasante de una carretera.

La capacidad de soporte del suelo de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, del distrito de Chalamarca, adicionando 0%, 10%, 20% y 30% de residuos de carbón mineral, respecto al peso del suelo, alcanza respectivamente valores de 5.30, 6.50, 7.50 y 5.0% para la calicata 1, 6.00, 7.10, 7.50 y 5.50% para la calicata 2, 6.10, 7.00, 7.50 y 5.30% para la calicata 3; estos valores son menores a los alcanzados por Amaya et al. (2022), no obstante, el suelo natural analizado por los autores, tiene un CBR inicial de 10.10% al 95% de la MDS; Ashfaq et al. (2020), también lograron un mayor incremento del CBR de 4% a 23%, no obstante, no utilizaron solamente carbón sino lo mezclaron con cal al 6%, pero similares a los valores CBR determinados por Casas (2021), quien al adicionar 0, 3, 5 y 7% de residuos de carbón mineral, alcanzó valores CBR de 2.2, 5.5, 6.0 y 7.5%, respectivamente, por lo que la subrasante se clasificó como regular, tal como en la presente investigación, pero disímil al estudio de Goñas y Saldaña (2020) quienes lograron incrementar la capacidad de soporte del suelo natura de 2.2% a 2.6%, 3.0% y 3.7% con 15, 20 y 25% de carbón, pero a pesar del aumento en el CBR sigue siendo considerada una subrasante inadecuada, para la conformación de la carpeta de rodadura. Así mismo, Cañar (2017) logró que el suelo arenoso aumentará en 15% al mezclarse con cenizas de carbón, mientras que el suelo arcilloso solo aumento un 2%, siendo disímil a lo determinado en el presente estudio, donde el suelo arcilloso logra un mayor incremento que el suelo arenoso, esto se debe principalmente, a la gradación y procedencia del carbón mineral, debido a que Cañar (2017) utilizó cenizas de carbón mineral, y en el presente estudio se utilizaron residuos de carbón mineral o también denominado ganga de la mina “La Palma”, del distrito de Chalamarca.

El porcentaje de residuos de carbón mineral, con el que se logra un mayor aumento en la capacidad de soporte del suelo natural, es 20%, porcentaje superior al encontrado por Vásquez (2019) quien utilizó 7% de residuos de carbón mineral triturado para aumentar la capacidad de soporte del suelo de la subrasante, concluyendo que este sería el porcentaje óptimo, sin embargo, no realizó más ensayos con otros porcentajes, por lo que su investigación tiene una limitante, Amaya et al. (2022), quienes verificaron que con 12% de residuos de carbón logran un mejor comportamiento físico-mecánico del suelo natural, así mismo; Aderinlewo et al. (2020), como parte de su estudio determinó que el suelo con adición de 6% de residuos de carbón alcanza un mayor CBR en comparación con otros porcentajes, no obstante, los autores utilizaron carbón vegetal, y en el presente estudio se ha utilizado carbón mineral; y Cabrera y Paredes (2018) quienes determinaron que el porcentaje óptimo para incrementar el CBR es 10%, no obstante, utilizaron cenizas de carbón mineral, y no residuos de carbón mineral. Pero inferior al encontrado por Jiménez et al. (2019), quienes determinaron que con 50% de residuos de carbón se lograba un incremento del CBR, de hasta 14.27%, no obstante, para ello hicieron uso de otros aditivos como cal al 2% y cemento al 1%; Ariza et al. (2017) y Navagire et al. (2021) determinaron que el porcentaje óptimo de adición de carbón era 30%, con el que lograban un mayor CBR, no obstante, utilizaron cenizas de carbón, es decir tenía una menor gradación que los residuos utilizados en la presente investigación; Ríos y Neira (2020) afirman que con 28% de cenizas de carbón mineral, se mejora la capacidad de carga del suelo arcilloso de la subrasante; Chilcon y Leon (2020) determinaron que el suelo natural con 27% de cenizas de carbón aumenta su capacidad de soporte hasta 10.70%, siendo este el porcentaje óptimo para los autores; y Cañar

(2017), determinó que el porcentaje óptimo de cenizas de carbón que se debe adicionar a la mezcla para mejorar la capacidad de carga es 25%. Los estudios que determinaron como porcentaje óptimo a 20%, tal como en el presente estudio son Medina (2020) y Sumesh et al. (2020), quienes argumentan que el porcentaje óptimo para el mejoramiento de la capacidad de soporte del suelo de la subrasante de suelos limo arcillosos es 20%, tal como el porcentaje encontrado en la presente investigación, siendo así, afirman que es adecuado para la construcción de subrasantes, pavimentos y terraplenes.

El porcentaje óptimo de 20%, logra el incremento el CBR del suelo natural de la calicata 1, 2 y 3 al 100% de la MDS de 5.30%, 6.00% y 6.10%, respectivamente, hasta 7.50%, para todas las calicatas, valor menor al estimado por Fustamante (2021), quien logro un CBR de 8.4% para suelo con 15% de PET, no obstante, su CBR natural es mayor al del suelo utilizado en el presente estudio, además en la presente investigación se logra un mayor uso en porcentaje del material residual. Así mismo, el uso de residuos de carbón logra resultados similares de mejoramiento de CBR a los alcanzados por estabilizantes químicos como cloruro de sodio y cemento según el estudio de Estrada y Pintado (2019), donde el suelo al ser mezclado con cloruro de sodio al 4, 8 y 12% alcanza valores CBR de 4.8, 5.1 y 5.1%, así mismo, al ser mezclado con cemento al 4, 6 y 8% alcanza valores CBR de 7, 7.7 y 7.7%, respectivamente, para un CBR en estado natural de 4.6%. Siendo así el uso de residuos de carbón mineral de TMN 3/8", al 20% respecto al peso seco del suelo, logra mejorar la capacidad portante del suelo, estabilizando la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del distrito de Chalamarca.

Tabla 45

Características Físico – Mecánicas del Suelo de la Subrasante de la Carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, al adicionar Residuos de Carbón Mineral

Características físico – mecánicas	Residuos de carbón mineral (%)	Calicata 1	Calicata 2	Calicata 3
Contenido de humedad (%)	0	41.84	15.72	17.85
Gravas	0	0	7	21.4
Arena	0	7.6	30	30.6
Finos	0	92.4	63	48
LL	0	58.4	53.3	47.4
LP	0	29.3	30.1	31.5
IP	0	29.1	23.2	15.9
Clasificación SUCS	0	CH	MH	SM
Clasificación AASHTO	0	A-7-6 (19)	A-7-5 (13)	A-7-5 (5)
Densidad máxima (gr/cm ³)	0	1.403	1.633	1.438
	10	1.466	1.66	1.618
	20	1.472	1.693	1.654
	30	1.287	1.572	1.304
Humedad óptima (%)	0	14.65	12.24	13.92
	10	15.3	10.32	12.50
	20	13.18	10.18	12.00
	30	11.26	11.52	12.54
Expansión (%)	0	9.27	7.17	5.37
	10	7.24	7.91	5.67
	20	6.73	7.58	5.33
	30	9.08	8.05	6.30
CBR 100% de MDS	0	5.30	6.00	6.10
	10	6.50	7.10	7.00
	20	7.50	7.50	7.50
	30	5.00	5.50	5.30
CBR 95% de MDS	0	4.20	5.00	5.10
	10	5.60	6.20	6.20
	20	6.60	6.50	6.50
	30	4.00	4.50	4.00

4.3. Contrastación de hipótesis

El análisis estadístico de la varianza (ANOVA) se realizó mediante el software Minitab 19, con el fin de aceptar la hipótesis nula (H_0) o aceptar la hipótesis alternativa (H_1), si el valor-p (probabilidad) es menor que el nivel de significancia de 0.05, para un nivel de confianza del 95%, se rechaza H_0 , y se acepta H_1 , pero si el valor-p es mayor que el nivel de significancia se acepta H_0 . Las hipótesis generales del estudio son:

- H_0 : La capacidad de soporte (CBR) del suelo de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, no aumenta al adicionar residuos de carbón mineral de la Mina “La Palma”, del distrito de Chalamarca, según los lineamientos del Manual de Carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2014).
- H_1 : La capacidad de soporte (CBR) del suelo de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, aumenta al adicionar residuos de carbón mineral de la Mina “La Palma”, del distrito de Chalamarca, según los lineamientos del Manual de Carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2014).

Para determinar la aceptación o rechazo de la hipótesis general, se han planteado hipótesis específicas, que se han analizado utilizando los mismos datos de la capacidad portante del suelo con adición de residuos de carbón mineral; estos datos se pueden observar en la Tabla 46.

Tabla 46*Datos de la Capacidad de Soporte del Suelo, para Análisis ANOVA*

CBR	Residuos de carbón mineral	Calicata 1	Calicata 2	Calicata 3
100% de MDS	0%	5.30	6.00	6.10
100% de MDS	10%	6.50	7.10	7.00
100% de MDS	20%	7.50	7.50	7.50
100% de MDS	30%	5.00	5.50	5.30
95% de MDS	0%	4.20	5.00	5.10
95% de MDS	10%	5.60	6.20	6.20
95% de MDS	20%	6.60	6.50	6.50
95% de MDS	30%	4.00	4.50	4.00

a. Capacidad de soporte del suelo con adición de residuos de carbón mineral

El modelo estadístico que más se ajusta a los datos es el modelo lineal general, y las hipótesis específicas que se han analizado para demostrar la hipótesis general, son:

- H_0 : No hay diferencia significativa en las mediciones de capacidad de soporte para el suelo según porcentaje de residuos de carbón mineral.
- H_{a1} : Si hay diferencia significativa en las mediciones de capacidad de soporte para el suelo según porcentaje de residuos de carbón mineral.

En la Tabla 47, el valor p para residuos de carbón mineral, calicata y máxima densidad seca es 0.00, menor que 0.05, lo que significa que la capacidad de soporte del suelo varía según porcentaje de adición de residuos de carbón mineral, respecto al peso del suelo, también varía el CBR según la máxima densidad seca (MDS), así mismo, la capacidad de carga cambia para cada calicata, por tanto, se acepta la hipótesis alternativa H_{a1} .

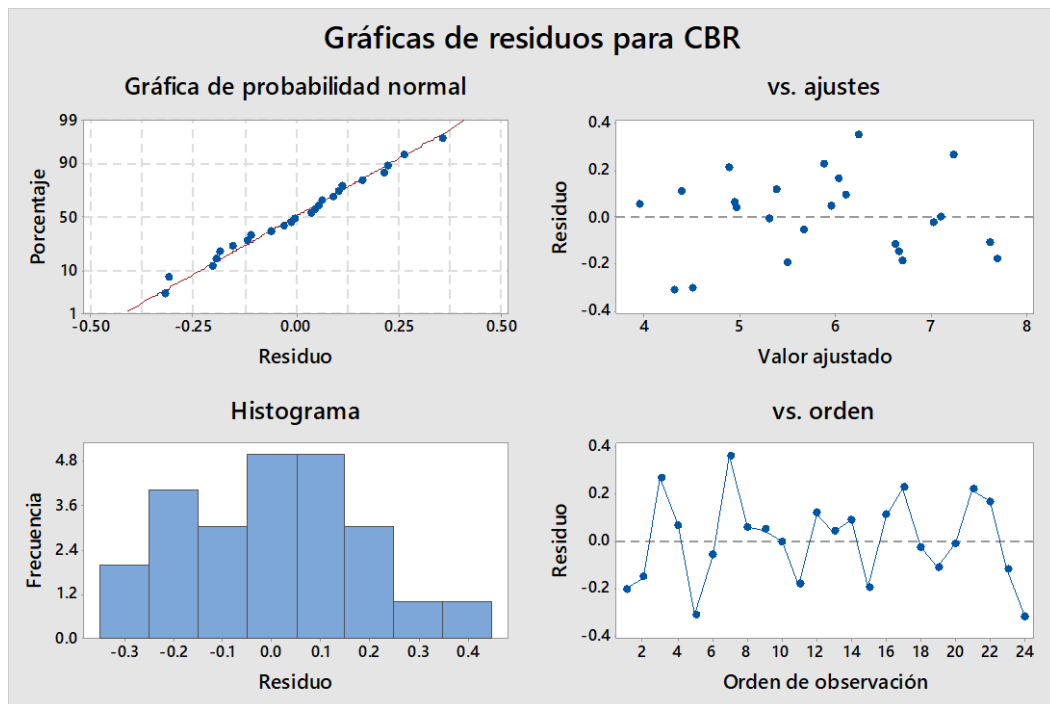
Tabla 47

Análisis de Varianza de la Capacidad de Soporte

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
MDS	1	5.9004	5.90042	137.80	0.000
Residuos de carbón mineral	3	19.8379	6.61264	154.43	0.000
Calicata	2	0.9300	0.46500	10.86	0.001
Error	17	0.7279	0.04282		
Total	23	27.3962			

Figura 66

Gráfico de Residuos para CBR del Suelo con Residuos de Carbón Mineral



b. Dosificación óptima

El análisis estadístico de varianza (t-test) se ha realizado mediante el software Minitab 19, con el fin de aceptar la hipótesis nula (H_0) o la hipótesis alternativa (H_1), siendo así, el valor-p (probabilidad) es menor que el nivel de significancia (0.05) se rechaza H_0 , pero si el valor-p es mayor que el nivel de significancia se acepta H_0 . Las hipótesis específicas que se han analizado son:

- H₀: La capacidad de soporte del suelo adicionado con residuos de carbón mineral, no supera el límite de estabilización (< 6% de CBR), lo que corresponde a una subrasante pobre, según el MTC (2014).
- H₁: La capacidad de soporte del suelo adicionado con residuos de carbón mineral, supera el límite de estabilización (\geq 6% de CBR), lo que corresponde a una subrasante regular, según el MTC (2014).

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu < 6$

Hipótesis alterna $H_1: \mu \geq 6$

En la Tabla 48 el valor p para el CBR del suelo con 0%, 10% y 30% de residuos de carbón mineral, es 0.973, 0.059 y 0.998, valores superiores al nivel de significancia de 0.05 por lo que se acepta la hipótesis nula, es decir el promedio del CBR del suelo con 0%, 10% y 30% de residuos de carbón mineral es menor a 6%, no obstante, si se incrementa la capacidad de soporte por lo que el valor p es cercano a 0.05. El valor p para el CBR del suelo con 20% de residuos de carbón mineral es 0.003, menor al nivel de significancia, por tanto, se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que la capacidad de soporte del suelo adicionado 20% de residuos de carbón mineral, supera el límite de estabilización (\geq 6% de CBR), lo que corresponde a una subrasante regular, según el MTC (2014).

Tabla 48

Prueba t-test

CBR según porcentaje de residuos de carbón mineral	Valor T	Valor p
0%	-2.50	0.973
10%	1.89	0.059
20%	4.69	0.003
30%	-4.84	0.998

Figura 67

Resumen Estadístico del CBR del Suelo con 0% de Residuos de Carbón Mineral

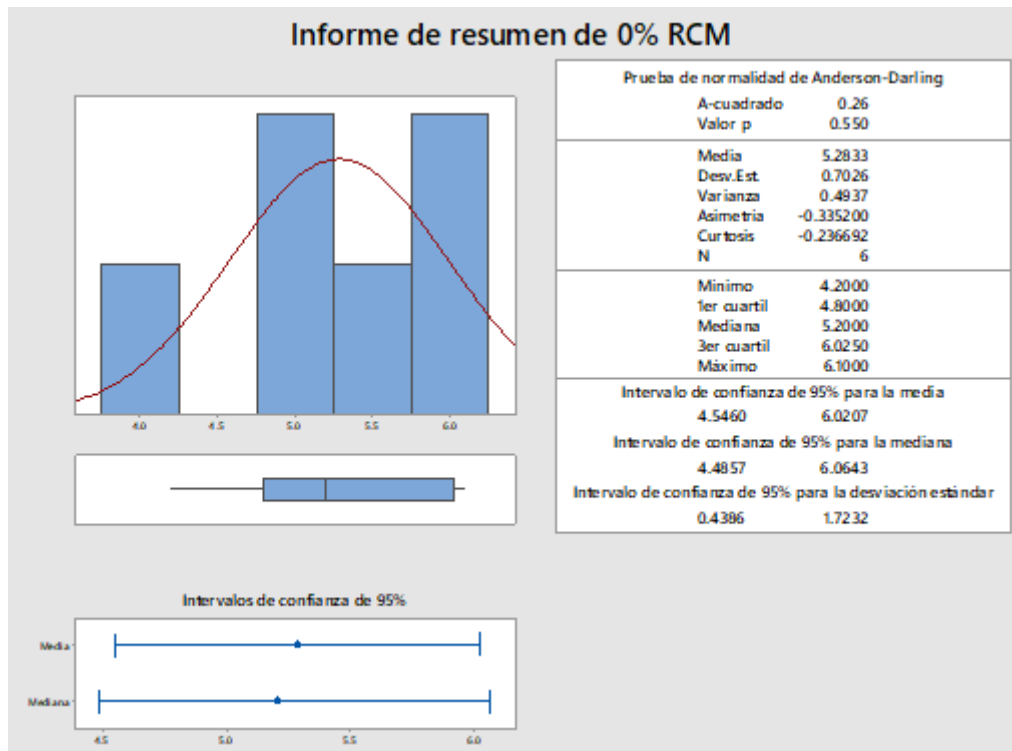


Figura 68

Resumen Estadístico, CBR del Suelo con 10% de Residuos de Carbón Mineral

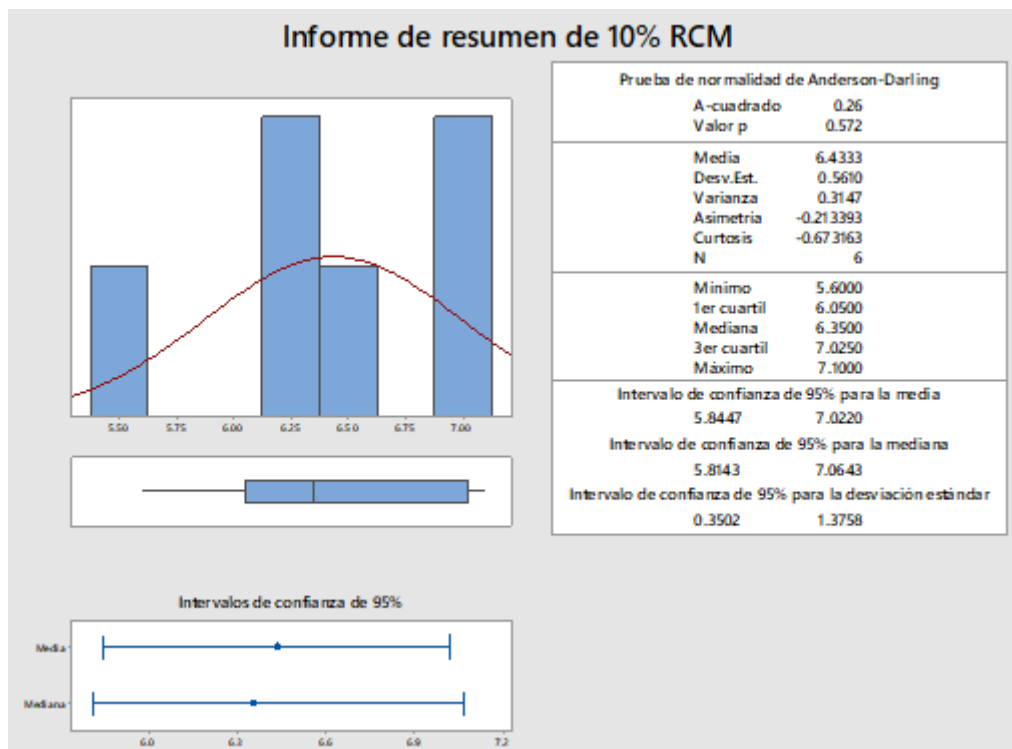


Figura 69

Resumen Estadístico, CBR del Suelo con 20% de Residuos de Carbón Mineral

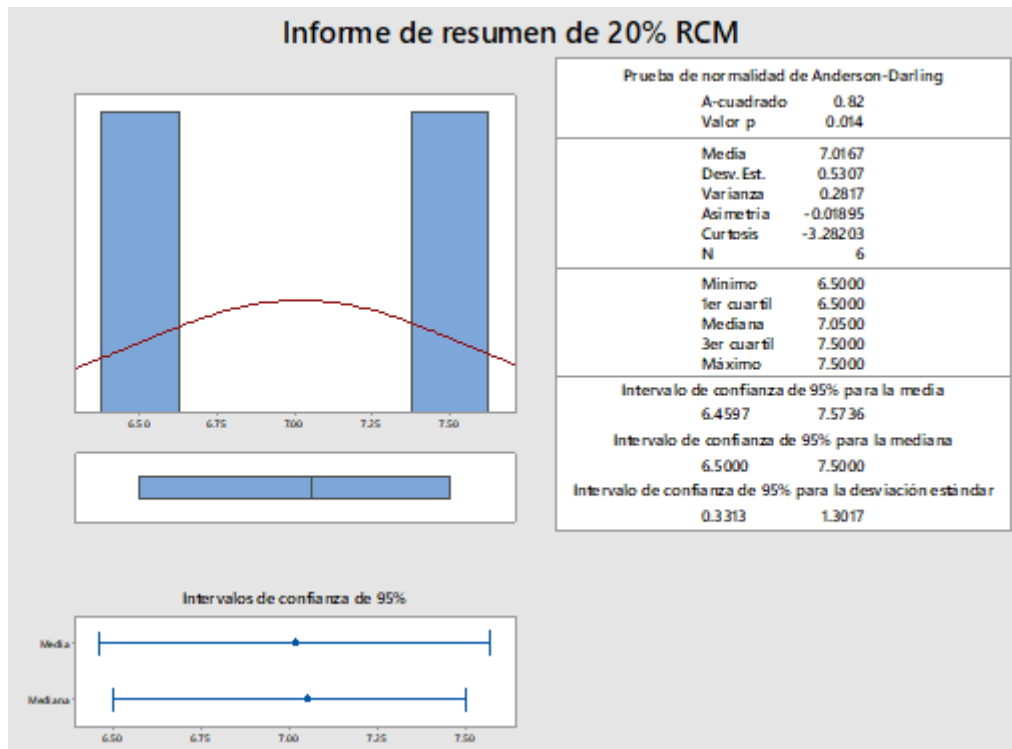


Figura 70

Resumen Estadístico, CBR del Suelo con 30% de Residuos de Carbón Mineral

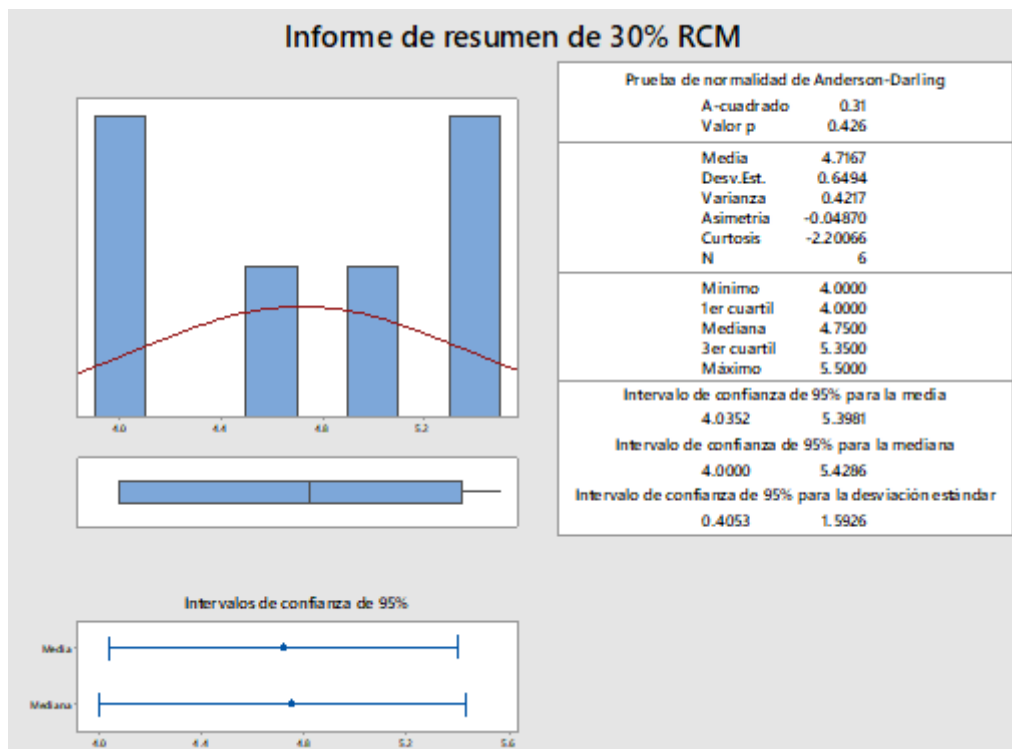


Figura 71

ANOM, CBR según Porcentaje de Residuos de Carbón Mineral y Calicata

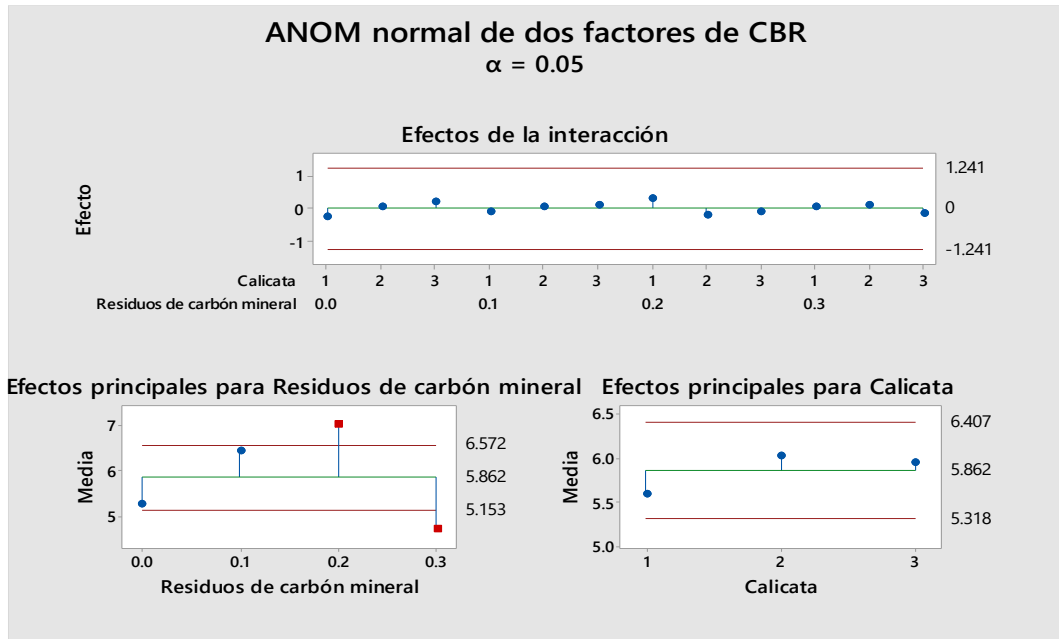
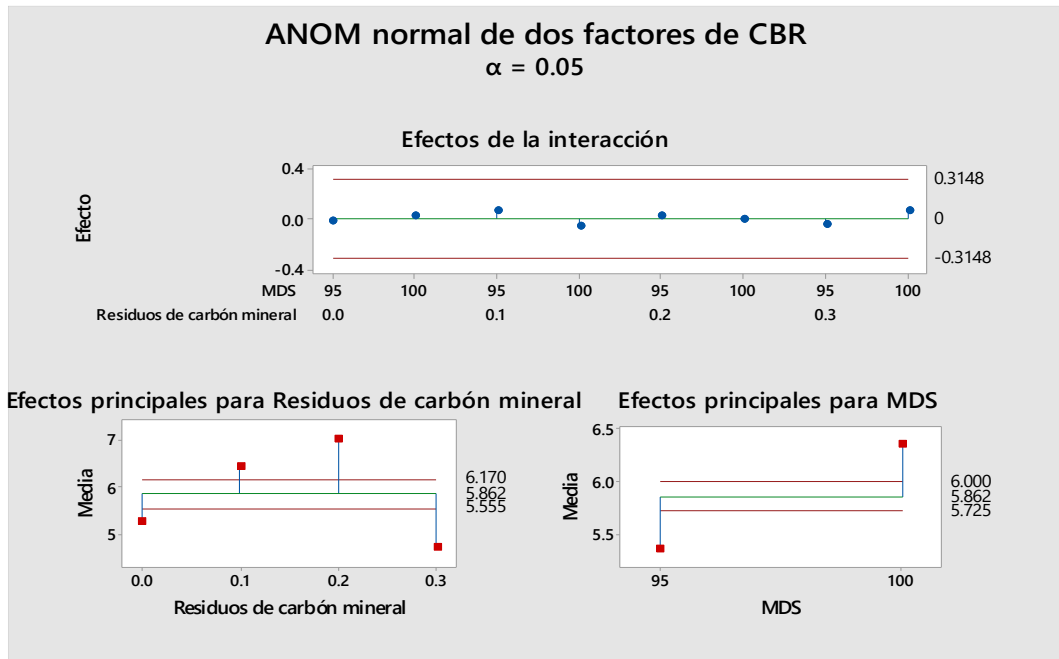


Figura 72

ANOM, CBR según Porcentaje de Residuos de Carbón Mineral y Máxima

Densidad Seca (MDS)



CAPÍTULO V.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Al evaluar la capacidad de soporte (CBR) del suelo de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, al adicionar residuos de carbón mineral de la mina “La Palma”, del distrito de Chalamarca, según los lineamientos del Manual de Carreteras “Suelos, geología, geotecnia y pavimentos, sección suelos y pavimentos” (MTC, 2014), se llegó a las siguientes conclusiones:

- 1) El residuo de carbón mineral de la mina “La Palma”, del distrito de Chalamarca, tiene un diámetro menor a 9.50 mm (tamiz 3/8”), cumple con el uso granulométrico de una base granular tipo D, según la norma CE.010 “Pavimentos” (MVCS, 2021), el 31.20% del material pasa la malla N° 4, el 21.10% pasa el tamiz N° 200 (material fino), y el 48.3% es material granular, tiene un límite líquido de 21.20% e índice de plasticidad de 3%, si se tuviese que clasificar a este material según SUCS sería arena limosa, y según AASHTO estaría en el grupo A-1-b (0).
- 2) El suelo natural de la calicata 1 de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, del distrito de Chalamarca, se clasifica como arcilla de alta plasticidad (CH), según AASHTO pertenece al grupo A-7-6 (19), tiene límite líquido de 58.4% e índice de plasticidad de 29.10%, la máxima densidad seca 1.403 gr/cm³, se alcanza con la humedad óptima de 14.65%, tiene un hinchamiento de 9.27%, el CBR al 95% y 100% de MDS es 4.20% y 5.30%, respectivamente. El suelo natural de la calicata 2, se clasifica como limo de alta plasticidad (MH), según AASHTO pertenece al grupo A-7-5 (13), tiene límite líquido de 53.3% e índice de plasticidad de 30.1%, la máxima densidad seca 1.633 gr/cm³, se alcanza con la humedad óptima de 12.24%, tiene un hinchamiento de 7.17%, el CBR al 95% y 100%

de MDS es 5.00% y 6.00%, respectivamente. El suelo natural de la calicata 3, se clasifica como arena limosa (SM), según AASHTO pertenece al grupo A-7-5 (5), tiene límite líquido de 47.4% e índice de plasticidad de 15.9%, la máxima densidad seca 1.438 gr/cm³, se alcanza con la humedad óptima de 13.92%, tiene un hinchamiento de 5.37%, el CBR al 95% y 100% de MDS es 5.10% y 6.10%, respectivamente.

- 3) La capacidad de soporte (CBR) del suelo de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, del distrito de Chalamarca, aumenta al adicionar residuos de carbón mineral, pero empieza a disminuir cuando el porcentaje de adición supera el 20%. El CBR de la calicata 1, al 95% de la MDS, adicionando 0%, 10%, 20% y 30% de residuos de carbón mineral, respecto al peso del suelo, alcanza valores de 4.20%, 5.60%, 6.60% y 4.00%, para la calicata 2, alcanza valores de 5.00%, 6.20%, 6.50%, 4.50%, y para la calicata 3, alcanza valores de 5.10%, 6.20%, 6.50% y 4.00%, respectivamente. El suelo de la calicata 1, arcilla de alta plasticidad, tiene el menor CBR en estado natural, pero logra el mayor porcentaje de incremento al adicionar residuos de carbón mineral, mientras que la calicata 3, arena limosa, tiene el mayor CBR en estado natural, pero logra el menor porcentaje de aumento, al adicionar residuos de carbón mineral, respecto al peso del suelo.
- 4) El porcentaje de residuos de carbón mineral, con el que se logra un mayor aumento en la capacidad de soporte del suelo natural, es 20%, alcanzando valores CBR al 95% de MDS de 6.60%, 6.50% y 6.50%, respectivamente, para las calicatas 1, 2 y 3, mientras que el CBR al 100% de MDS alcanza porcentajes iguales de 7.50% para todas las calicatas, por tanto, la subrasante se califica como regular según el MTC (2014), logrando así la estabilización del suelo, para su uso como capa de soporte del

afirmado o pavimento, de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, del distrito de Chalamarca.

5.2. Recomendaciones y/o sugerencias

- Se sugiere a la Municipalidad distrital de Chalamarca, utilizar los resultados de la presente investigación, para plantear el mejoramiento de la transitabilidad de la carretera El Verde – Numbral, Km 1+500 al Km 2+500, a través de la estabilización del suelo con el uso de 20% de residuos de carbón mineral.
- Se recomienda a la mina de carbón “La Palma”, tener un plan de manejo, disposición y reutilización de los residuos de carbón mineral (ganga), obtenidos de la extracción mineral, en coordinación con la Municipalidad distrital de Chalamarca, para disminuir un residuo contaminante, que es dispuesto en botaderos de la ciudad, y a la vez mejorar la calidad técnica de las vías del distrito de Chalamarca.
- Se exhorta, que para la estabilización de la carretera El Verde – Numbral, Km 1+500 al Km 2+500, con el 20% de residuos de carbón mineral, se realice una adecuada compactación, cumpliendo con la humedad óptima y máxima densidad seca, de tal forma que se alcance la capacidad de soporte esperada, siendo así, se deben realizar ensayos in situ, como densidad de campo, para demostrar la correcta estabilización.
- Se deja abierto el estudio, para futuras investigaciones, utilizando residuos de carbón mineral, ganga, de diámetro menor al tamiz N° 200, u otras gradaciones; residuos de carbón vegetal, cenizas de carbón mineral o vegetal, mezclas de residuos de carbón mineral con otros aditivos convencionales como la cal, entre otros estudios, que pueden aplicarse en el distrito de Chalamarca, por la disponibilidad de la materia prima, o incluso se puede probar este material en otras áreas del conocimiento como las cimentaciones, terraplenes, material de relleno, etc.

CAPÍTULO VI.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aderinlewo, O., Sorunke, O., Afolayan, A., & Tanimola, M. (2020). Geotechnical properties of lateritic soil stabilized with cement and pulverized wood charcoal. *Journal of Engineering Science*, 2(20), 128-134. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3784364>
- Alata, J.P., y Vásquez, R.C. (2019). *Estudio exploratorio de estabilización con cemento portland de subrasante de suelo areno-arcilloso en carretera no pavimentada “El Paujil”, Loreto. Iquitos, 2019.* [Tesis de grado, Universidad Científica del Perú]. <http://repositorio.ucp.edu.pe/handle/UCP/803>
- Alvarez, N.C., y Gutierrez, J.A. (2020). *Estudio experimental del efecto en el comportamiento mecánico al adicionar caucho triturado en un suelo arcilloso de baja plasticidad proveniente del caserío de Callampampa - Llama-Cajamarca.* [Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <http://doi.org/10.19083/tesis/652828>
- Amaya, R. G., Rojas, J. C., & Calixto, N. C. (2022). Residue from coal combustion for plastic soil improvement. In *Journal of Physics: Conference Series*, 2163(1), 1-6. doi:10.1088/1742-6596/2163/1/012008
- Aquino, M. A. (2020). *Estabilización de suelos con ceniza de bagazo de caña de azúcar para su uso en subrasantes en el distrito de Laredo-Trujillo, La Libertad 2018.* [Tesis de Grado, Universidad Privada de Trujillo].
- Ariza, C.C., Rojas, C.A., y Romero, Y. (2017). *Evaluación de la capacidad de soporte (CBR) de un suelo expansivo con adición de ceniza volante.* [Tesis de grado, Universidad La Gran Colombia]. <http://hdl.handle.net/11396/5529>
- Ashfaq, M., Heeralal, M., & Moghal, A. A. B. (2020). Characterization studies on coal gangue for sustainable geotechnics. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-0267-3>
- Asimbaya, C., Rosas, N., Endara, D., & Guerrero, V. H. (2015). Obtención de carbón activado a partir de residuos lignocelulósicos de canelo, laurel y eucalipto. *Revista Politécnica*, 36(3), 24-24. https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/537

- Braja, M. Das. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*, 7ª ed. Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.
- Braja, M. Das. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*, 4ª ed. Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.
- Bustamante, F.L. (2021). *Estabilización de suelos cohesivos mediante incorporación de vinaza de Saccharum Officinarum, carretera Rayme km. 0+000 al km. 5+010, Cutervo, Cajamarca*. [Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/74799>
- Cabrera, J.I. y Paredes, J.N. (2018). *Estabilización de suelos con cenizas de carbón mineral con fines de pavimentación en el centro poblado de Cascajal Izquierdo, provincia de Santa – Ancash – 2018*. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/30956>
- Cañar, E.S. (2017). *Análisis comparativo de la resistencia al corte y estabilización de suelos arenosos finos y arcillosos combinadas con ceniza de carbón*. [Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Ambato]. <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/25266>
- Casas, J.S. (2021). *Ceniza de carbón mineral para estabilización de suelos cohesivos en subrasante*. [Tesis de grado, Universidad Peruana Los Andes]. <https://hdl.handle.net/20.500.12848/2364>
- Castillejo, R. C., Poterico, J. G., Bojoquez, G. O., & Huaman, L. L. (2017). *Incremento del poder calorífico de los minerales de carbón antracita del departamento de Áncash mediante la técnica de flotación diferencial-2016*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo].
- Castro, A. F. (2017). *Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cascara de arroz para el mejoramiento de subrasante*. [Tesis de Grado. Universidad Nacional de Ingeniería].
- Castro, M.A., y Navarro, J.D. (2020). *Propuesta de mejora de suelos arcillosos de alta plasticidad a nivel de subrasante mediante la adición de cemento Portland para disminuir el cambio volumétrico provocado por las condiciones climáticas en la Av. Padre salas, Villa Rica, Oxapampa, Pasco*. [Tesis de grado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <http://doi.org/10.19083/tesis/652573>
- Chilcon, R. y Leon, G.O. (2020). *Evaluación de estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de carbón en la subrasante de de la Av. Cuzco, Distrito de San*

- Martin de Porres, 2020. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo].*
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/57212>
- Chinchay, D. (2018). *Influencia del aditivo Sika Dust Seal como agente estabilizador de suelos en la trocha carrozable tramo la Serma – Tambillo Jaén, Cajamarca.* [Tesis de Grado, Universidad Nacional de Cajamarca].
- Cordova, K.H. y Mori, A.F. (2021). *Modelo matemático para la predicción de la Capacidad de Soporte (CBR) en suelos expansivos estabilizados con cenizas de cáscara de arroz y cal a partir de sus propiedades índice y de compactación.* [Tesis de grado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas – UPC].
<http://hdl.handle.net/10757/657405>
- Córdova, D.E. (2021). *Cal y estabilización de suelos arcillosos a nivel de laboratorio de subrasante para el camino vecinal en trocha carrozable tramo curva - El Sauce, Distrito de Chalaco - Provincia de Morropón Piura 2021.* [Tesis de grado, Universidad Católica de Trujillo Benedito XVI].
<http://repositorio.uct.edu.pe/handle/123456789/1760>
- Corona-Esquivel, R., Tritlla, J., Benavides-Muñoz, M. E., Piedad-Sánchez, N., & Ferrusquía-Villafranca, I. (2006). Geología, estructura y composición de los principales yacimientos de carbón mineral en México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(1), 141-160.
<https://doi.org/10.18268/bsgm2006v58n1a5>
- Crespo, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*, 5ª ed. Editorial Limusa.
- Cruz, Y.W. (2021). *Influencia del cemento en las propiedades físico - mecánicas de subrasante en caminos vecinales, tramo Quinsachata – Laripata, Cabanillas – San Román 2021.* [Tesis de grado, Universidad César Vallejo].
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/65831>
- Cubas, J.A., y Manay, L. (2021). *Mejoramiento de subrasante para pavimento industrial de tránsito pesado utilizando escoria metálica, en estacionamiento vehicular avenida Circunvalación – Jaén – Cajamarca 2021.* [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/71303>
- Cuipal, B. K. (2018). *Estabilización de la subrasante de suelo arcilloso con uso de polímero sintético en la carretera Chachapoyas–Huancas, Amazonas, 2018.* [Tesis de Grado, Universidad César Vallejo].
- Dasho, D. K., & Verma, R. K. (2019). Geotechnical Investigation and Effect of Moisture Content on Subgrade CBR Values; Arbaminch-Chencha Existing Road;

- Ethiopia. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 8(3), 347-363. <https://afly.co/xzgg6>
- Duque, G. y Escobar, C. (2002). *Mecánica de suelos*. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. <https://afly.co/ykp6>
- Elizondo, F. (2009). Estabilización y mejoramiento de rutas no pavimentadas. *Revista de Infraestructura vial*, 21(1), 49-55.
- Elkafoury, A., & Azzam, W. (2021). Utilize Xanthan gum for enhancing CBR value of used cooking oil-contaminated fine sand subgrade soil for pavement structures. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(25), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00389-6>
- Estrada, F.J. y Pintado, J.F. (2019). *Capacidad portante (CBR) del suelo del sector 9 de Cajamarca, incorporando 2%, 4% y 6% de cal hidratada, 4%, 6% y 8% de cemento portland tipo i y 4%, 8% y 12% de cloruro de sodio*. [Tesis de grado, Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/22322>
- Fernández, H.W. (2017). *Efecto del aditivo terrazyme en la estabilización de suelos arcillosos de subrasantes en la zona de expansión de la ciudad de Cajamarca*. [Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Cajamarca]. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/1140>
- Fernandez, N. (2018). *Estabilización de subrasante con material de demoliciones en avenida malecón checa, San Juan de Lurigancho en el 2017*. [Tesis de grado, Universidad Cesar Vallejo].
- Fustamante, N. (2021). *Evaluación de la capacidad de soporte del suelo adicionando polímeros reciclados (PET) en la sub rasante de la Calle Camino Real, progresiva Km 0+000 - Km 0+750, Chota*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de Chota]. <http://repositorio.unach.edu.pe/handle/UNACH/182>
- Gamarra, A.C., y Sandoval, K.E. (2021). *Diseño del pavimento flexible utilizando geoceldas en la carretera Jancos - San Miguel de Pallaques – Cajamarca*. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/75348>
- Gambini, J.A. (2021). *Estabilización de la subrasante con cloruro de sodio en el sector 24 la Villa de Huacariz – Cajamarca*. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/63231>
- Goñas, O. y Saldaña, J.H. (2020). Estabilización de suelos con cenizas de carbón para uso como subrasante mejorada. *Revista científica UNTRM: Ciencias naturales e ingeniería*, 3(1), 30-35. <http://dx.doi.org/10.25127/ucni.v3i1.589>

- Gutiérrez, C. A. (2010). *Estabilización química de carreteras no pavimentadas en el Perú y ventajas comparativas del cloruro de magnesio (bischofita) frente al cloruro de calcio*. [Tesis de grado, Universidad Ricardo Palma].
- Gutiérrez, A. S., Van Caneghem, J., Martínez, J. B. C., & Vandecasteele, C. (2012). Evaluation of the environmental performance of lime production in Cuba. *Journal of Cleaner production*, 31, 126-136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.035>
- Hanco, J.C. (2021). *Estabilización de suelos cohesivos con cal y cemento para mejorar la subrasante de la avenida Santa Rosa, Puno, 2021*. [Tesis de grado, Unviersidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/80083>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación, 6ª ed.* McGraW-Hill/ Interamericana editores S.A.
- Higuera, C.H., Gómez, J. C., Pardo, Ó. E. (2012). Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio. *Revista de facultad de ingeniería*, 21 (32), 21-40. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=413940771003>
- Hurtado, E., Ricra, R. (2020). *Aplicación de cal para mejorar la estabilidad de la subrasante en la calle Wiracocha, distrito y provincia de Andahuaylas, 2020*. [Tesis de grado, Universidad Nacional César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/59175>
- Instituto Nacional de Calidad. (2019, 24 de octubre). NTP 339.127. Suelos. Método de ensayo para determinar el contenido de humedad. 1ª ed. INACAL.
- Instituto Nacional de Calidad. (2019, 24 de octubre). NTP 339.128. Suelos. Método de ensayo para el análisis granulométrico. 1ª ed. INACAL.
- Instituto Nacional de Calidad. (2019, 24 de octubre). NTP 339.128. Suelos. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico, e índice de plasticidad de suelos. 1ª ed. INACAL.
- Instituto Nacional de Calidad. (2019, 23 de octubre). NTP 339.141. Suelos. Método de ensayo para la compactación del suelo en laboratorio utilizando una energía modificada (2 700 kN-m/m³ (56 000 pie-lbf/pie³)). 1ª ed. INACAL.
- Instituto Nacional de Calidad. (2019, 23 de octubre). NTP 339.145. Suelos. Método de ensayo de CBR (Relación de Soporte de California) de suelos compactados en el laboratorio. 1ª ed. INACAL.
- Jara, S. (2021). *Mejoramiento de subrasante arcilloso estabilizado con cemento portland para diseñar pavimento rígido en calle Ciro Alegría, San Sebastián –Cusco, 2021*.

- [Tesis de grado, Universidad César Vallejo].
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/83977>
- Jara, R. (2014). *Efecto de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Cajamarca].
<http://hdl.handle.net/20.500.14074/686>
- Jiménez, Y.A., Bastidas, M.J. y Consuegra, J.L. (2019). Optimización de residuos mineros de carbón para el mejoramiento de suelos viales con algoritmos evolutivos multiobjetivo. *Información tecnológica*, 30(4), 249-258.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000400249>
- Julca, P.F. (2020). *Análisis de suelos arcillosos con ceniza de hoja maíz y carbón molido para estabilización de subrasante, camino vecinal Áncash, 2020*. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/72720>
- Junco, J. M. & Tejeda, E. (2011). Aditivo químico obtenido de sales cuaternarias empleado para la estabilización de suelos arcillosos de subrasantes de carreteras. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 5 (2), 1-10.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193921394002>
- Katte, V. Y., Mfoyet, S. M., Manefouet, B., Wouatong, A. S. L., & Bezeng, L. A. (2019). Correlation of California bearing ratio (CBR) value with soil properties of road subgrade soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(1), 217-234.
<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10706-018-0604-x>
- Leiva, R. R. (2016). *Utilización de bolsas de polietileno para el mejoramiento de suelo a nivel de la subrasante en el Jr. Arequipa, progresivo km 0+000 - km 0+100, distrito de Orcotuna, Concepción*. [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro Del Perú].
- León, E. F. (2006). La importancia del carbón mineral en el desarrollo. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias geográficas*, 9(18), 91-97. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v9i18.579>
- Llique, R. H. (2015). *Influencia de la humedad de compactación en el comportamiento volumétrico de suelos arcillosos*. [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Trujillo].
- Lomparte, J. A., & Sánchez, D. A. (2019). *Estabilización de la superficie de rodadura mediante el uso de polímero en emulsión vinilo acrílico en la carretera no pavimentada al centro poblado Tangay-Nuevo Chimbote-Santa*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional del Santa].

- Llique, R. H. (2003). *Manual de laboratorio de mecánica de suelos*, 1ª ed. Editorial Universitaria de la UNC.
- Machco, E.Y. (2019). *Aplicación de cal para mejorar la estabilidad de subrasante en la Calle Luna Pizarro A. H. Cueva de los Tallos, Ventanilla, 2019*. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/44888>
- Medina, G.R. (2020). *Estudio del comportamiento del aserrín y la ceniza de carbón para la estabilización de la sub rasante, Carabayllo, Lima 2019*. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/53368>
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (MTC, 2014) *Manual de carreteras. Suelos, geología, geotecnia y pavimentos. Sección suelos y pavimentos*. MTC.
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (MTC, 2016). *Manual de ensayo de materiales*. MTC.
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (MTC, 2018). *Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial*. MTC.
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (MTC, 2018). *Manual de carreteras: Diseño geométrico, DG-2018*. MTC.
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (MTC, 2018). *Red vial existente del sistema nacional de carreteras, según departamento 2010-2018. Infraestructura vial*. MTC. <https://portal.mtc.gob.pe/estadisticas/transportes.html>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (MVCS, 2021). *Norma CE.010 Pavimentos urbanos. Reglamento Nacional de Edificaciones*. MVCS.
- Modarres, A., & Nosoudy, Y. M. (2015). Clay stabilization using coal waste and lime— Technical and environmental impacts. *Applied clay science*, 116, 281-288. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.03.026>
- Molae, A.B., y Rivera, E.J. (2019). Estabilización química de suelos arcillosos con cal para su uso como subrasante en vías terrestres de la localidad de Villa Rica. [Tesis de grado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <http://hdl.handle.net/10757/648846>
- Montejo, A., Montejo, A., & Montejo, A. (2018). *Estabilización de suelos, 1a ed.* Ediciones de la U. <https://edicionesdelau.com/producto/estabilizacion-de-suelos/>
- Moscoso, L.F., y Díaz, L.P. (2018). Aspectos éticos en la investigación cualitativa con niños. *Bioética*, 17(1).
- Municipalidad Provincial de Chota. (MPCH, 2018). *Plan de desarrollo urbano de la ciudad de Chota. PDU 2017 – 2027*. MPCH.

- Municipalidad Distrital de Chalamarca. (2021). *Ubicación geográfica*. MuniChalamarca. <https://www.munichalamarca.gob.pe/?module=ubicacionGeografica>
- Navagire, O. P., Sharma, S. K., & Rambabu, D. (2021). Stabilization of black cotton soil with coal bottom ash. *Materials Today: Proceedings*, 20(21), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.447>
- Parzentny, H. R., & Róg, L. (2019). The role of mineral matter in concentrating uranium and thorium in coal and combustion residues from power plants in Poland. *Minerals*, 9(5), 1-18. <https://doi.org/10.3390/min9050312>
- Palli, E. E. (2015). *Guía básica para estabilización de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en la provincia de San Roman*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional del Altiplano].
- Payne, D. R. (2017). *Estabilización de la subrasante de carreteras empleando escorias de acería*. [Trabajo de Diploma, Universidad De Holguín].
- Peláez, J.D., y Benites J.C. (2020). *Mejoramiento de las propiedades mecánicas en la subrasante de suelos arenosos adicionando ceniza de cáscara de arroz y cal*. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/57379>
- Ponce, D.K. (2017). *Uso del cloruro de calcio para estabilización de la subrasante en suelos arcillosos de la avenida Ccoripaccha - Puyhuan Grande – Huancavelica*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Huancavelica]. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/1414>
- Quijandría J. C. (2017). *Evaluación del carbón mineral, para disminuir el contenido de azufre y mejorar su calidad*. [Tesis de Maestría en Ingeniería de Metalurgia Extractiva, Universidad Nacional Mayor de San Marcos].
- Quispe, A. G. (2020). *Aplicación de ceniza de boñiga para la estabilización en subrasantes plásticas*. [Tesis de Grado, Universidad Peruana los Andes].
- Ocupa, S.D. y Troyes, H. (2021). *Adición de escoria de acero para estabilizar la subrasante en la Carretera Tramo Puente Blanco - Chunchuquillo, Colasay – Jaén – Cajamarca – 2021*. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/68271>
- Ormeño, E.A., y Rivas, N.E. (2020). *Estudio experimental para determinar la influencia de la aplicación de Cenizas de Cáscara de Arroz (RHA) en la estabilización de una subrasante de suelo arcilloso de baja plasticidad en Chota- Cajamarca*.

- [Tesis de grado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas].
<http://doi.org/10.19083/tesis/653974>
- Osorio, J.F. y Casas, A.N. (2011). *Correlación P.D.C. con C.B.R. para suelos en la localidad de Suba*. [Tesis de grado, Universidad Militar Nueva Granada].
<http://hdl.handle.net/10654/3653>
- Palomino, K.E. (2016). *Capacidad portante (CBR) de un suelo arcilloso, con la incorporación del estabilizador MaxxSeal 100*. [Tesis de grado, Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/10489>
- Pineda, J.O. (2019). *Calibración de la ecuación de correlación entre el P.D.C (Penetración Dinámica de Cono) y C.B.R (Capacidad de Soporte California) bajo incidencia de la humedad, en suelos a nivel de la subrasante caso de estudio vía Juliaca – Caracoto*. [Tesis de grado, Universidad Peruana Unión].
<http://hdl.handle.net/20.500.12840/1680>
- Quispe, Y., y Venero, R.M. (2021). *Mejoramiento de suelo limo arcilloso para incrementar la resistencia mecánica de subrasante, aplicando cemento portland, en distrito Inkawasi– Cusco – 2021*. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo].
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/85694>
- Ravines, M. A. (2010). *Pruebas con un producto enzimático como agente estabilizador de suelos para carreteras*. [Tesis de Grado, Universidad de Piura].
- Rico, A., y Del Castillo, H. (2017). *La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres: Carreteras, ferrocarriles y aeropistas, volumen 1*. Limusa.
- Rios, N.W. y Neyra, A.M. (2020). *Influencia de las cenizas de carbón mineral en las propiedades de una subrasante arcillosa en Huamachuco, La Libertad, 2020*. [Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad César Vallejo].
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/59904>
- Sadiq, M. B., Shah, S. H. A., Khan, A., & Ahmed, A. (2020). Assessment Subgrade Soils through California Bearing Ratio (CBR) on Gilgit-Skardu Road (Pakistan): Techniques for Improvement of Subgrade Soil Properties. *i-Manager's Journal on Civil Engineering*, 10(2), 1-6. DOI:10.26634/jce.10.2.16619
- Sandoval-Vallejo, E. A., Rivera-Mena, W. A. (2019). Correlación del CBR con la resistencia a la compresión confinada. *Revista de ciencia e ingeniería neogranadina* [en línea]. 2019, 1 (29), 135-151.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91160956009>.

- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (Senamhi, 2021). *Tiempo. Pronóstico del tiempo para CHOTA (Cajamarca)*. Senamhi. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-detalle&dp=06&localidad=0033>
- Sumesh, M., Singh, B., Vigneshwaran, K., Samsonchelladurai, C., & Vikranth, G. (2020). Effect of coal ash on strength characteristics of clayey silt soil treated with cement. *Materials Today: Proceedings*, 20(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.247>
- Tacca, J.A. (2021). *Estabilización de suelo arcilloso con adición de cal para el mejoramiento de la subrasante, Vía de evitamiento, Abancay – Apurímac, 2021*. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/58189>
- Tenorio, L., y Zegarra, J.R. (2021). *Estabilización de suelos cohesivos mediante evaluación técnico económica de aglomerantes naturales, carretera Peña Blanca km.0+000 al km.10+100, Tacabamba, Cajamarca*. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/74920>
- Ticlla, TNR. (2021). *Evaluación de las características geotécnicas del suelo de las principales canteras para afirmado de carreteras del distrito de Chota*. [Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional Autónoma de Chota]. <http://repositorio.unach.edu.pe/handle/UNACH/162>
- Triviño-Restrepo, M. D. P., & Gil-Lancheros, E. (2015). Utilización de los residuos de la extracción de carbón y del proceso de coquización junto con desechos plásticos, como alternativa de obtención de materiales. *Energética*, (46), 85-95.
- Uwasu, M., Hara, K., & Yabar, H. (2014). World cement production and environmental implications. *Environmental Development*, 10, 36-47. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2014.02.005>
- Vásquez, A.M. (2019). *Capacidad de soporte al estabilizar el suelo de la Vía Cascajal con adición de carbón y cal a nivel de sub rasante*. [Tesis de grado, Universidad San Pedro]. <http://repositorio.usanpedro.edu.pe/handle/USANPEDRO/8013>
- Vásquez, J.L., y Marín, C.W. (2020). *Efecto de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso en carreteras no pavimentadas en selva baja, aplicación carretera ex petroleros, Loreto*. [Tesis de grado, Universidad Científica del Perú]. <http://repositorio.ucp.edu.pe/handle/UCP/1178>
- Velásquez, C. (2018). *Influencia del cemento portland tipo I en la estabilización del suelo arcilloso de la subrasante de la avenida Dinamarca, sector la Molina*. [Tesis de

grado, Universidad Nacional De Cajamarca].

<http://hdl.handle.net/20.500.14074/2534>

Vilchez, A.D. (2019). *Aplicación de ceniza de cascara de arroz para mejorar la estabilidad de la subrasante en la vía de Evitamiento Jaén- Cajamarca, 2019.*

[Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad César Vallejo].

<https://hdl.handle.net/20.500.12692/48455>

Yenigalla, R. V., & Slaney, G. V. (2021). Effect of Epoxy Resin on CBR Improvement of Soft Clayey Subgrade Mixed with Coconut Coir Fibres. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1112(1), 1-10. doi:10.1088/1757-899X/1112/1/012020

CAPÍTULO VII. ANEXOS

Anexo A. Matriz de consistencia

Tesis: Evaluación del CBR de la subrasante de la carretera el Verde – Numbral, Km 1+500 al Km 2+500, adicionando residuos de carbón mineral, Chalamarca, Chota

Tesista: Jhonn Biller Esquén Vásquez

Formulación del problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Metodología
¿La capacidad de soporte del suelo de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, aumenta al adicionar residuos de carbón mineral de la Mina La Palma, del distrito de Chalamarca?	Objetivo general	Ho: La capacidad de soporte (CBR) del suelo de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, no aumenta al adicionar residuos de carbón mineral de la Mina “La Palma”, del distrito de Chalamarca, según los lineamientos del Manual de Carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2014). Hi: La capacidad de soporte (CBR) del suelo de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, aumenta al adicionar residuos de carbón mineral de la Mina “La Palma”, del distrito de Chalamarca, según los lineamientos del Manual de Carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2014).	VI Residuos de carbón mineral	Propiedades físicas	Enfoque: Cuantitativo
	Objetivos específicos			Propiedades físicas del suelo natural	Nivel de investigación: Aplicado
	– Determinar las características físicas del residuo de carbón mineral de la mina “La Palma”, del distrito de Chalamarca.			Propiedades mecánicas del suelo natural	Diseño de investigación: Descriptivo causal simple
	– Determinar las características físicas y mecánicas del suelo natural de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, del distrito de Chalamarca.		VD CBR de la subrasante	Propiedades mecánicas del suelo con residuos de carbón mineral	Muestra: Suelo de 3 calicatas ubicadas uniformemente en el Km 1+500 al Km 2+500 de la carretera El Verde-Numbral del distrito de Chalamarca.
	– Analizar la capacidad de soporte del suelo de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, del Km 1+500 al Km 2+500, del distrito de Chalamarca, adicionando 10%, 20% y 30% de residuos de carbón mineral, respecto al peso del suelo.				
	– Determinar el porcentaje de residuos de carbón mineral, con el que se logra un mayor aumento en la capacidad de soporte del suelo natural.				

Anexo B. Panel fotográfico

B.1. Recolección de residuos de carbón mineral

Fotografía 1. Dueño de la mina “La Palma” junto al tesista



Fotografía 2. Residuos de carbón mineral depositados alrededor de la mina “La Palma”



B.2. Estado de la carretera

Fotografía 3. Ahuellamiento y hundimiento de la subrasante de la carretera El Verde – Numbral, Km 1+500 al Km 2+500



B.3. Extracción de muestras de suelo

Fotografía 4. Demarcación para la excavación de calicatas



Fotografía 5. Excavación de las calicatas



Fotografía 6. Recolección de las muestras de suelo



Fotografía 7. Extracción de muestras, calicata 1



Fotografía 8. Extracción de muestras, calicata 2



Fotografía 9. Extracción de muestras, calicata 3

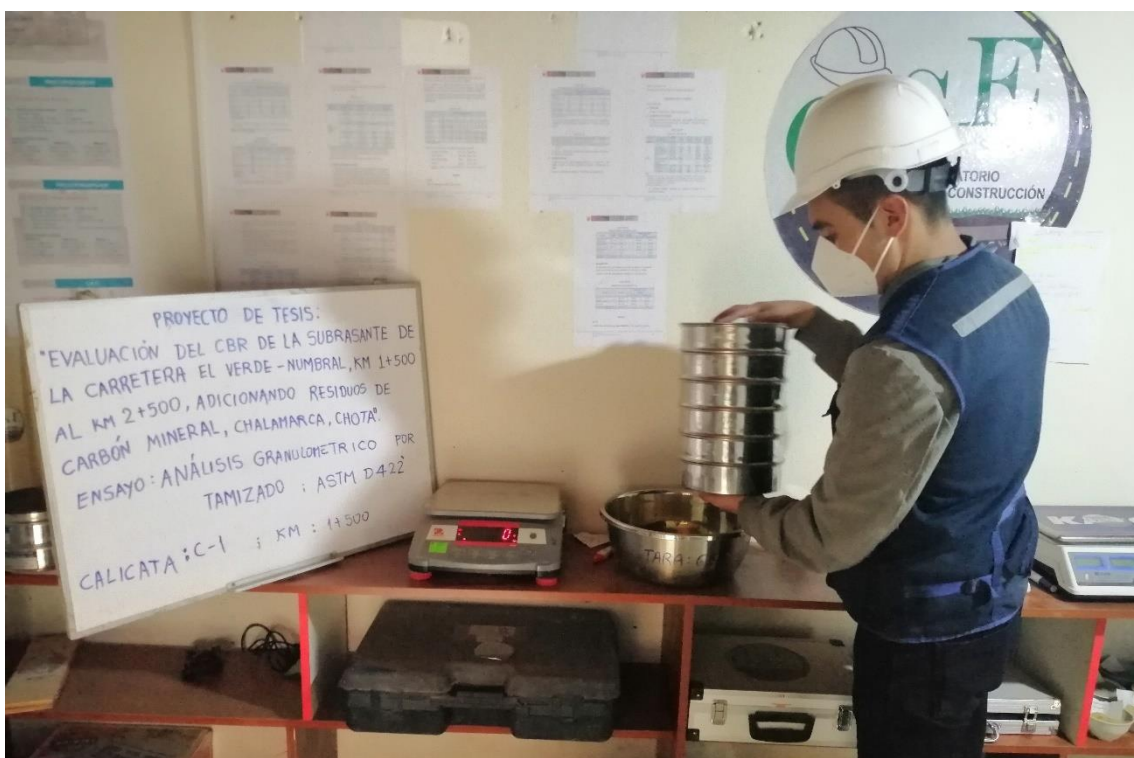


B.4. Ensayos al suelo natural

Fotografía 10. Ensayo de contenido de humedad



Fotografía 11. Ensayo de granulometría



Fotografía 12. Ensayo de límite líquido



Fotografía 13. Ensayo de límite plástico



Fotografía 14. Ensayo de Proctor modificado



Fotografía 15. Compactación para CBR



Fotografía 16. Ensayo de expansión



Fotografía 17. Ensayo de CBR, calicata 1



Fotografía 18. Ensayo de CBR, calicata 2



Fotografía 19. Ensayo CBR, calicata 3



B.5. Ensayos al suelo con residuos de carbón mineral

Fotografía 20. Mezcla de suelo con residuos de carbón mineral



Fotografía 21. Ensayo de Proctor modificado suelo con residuos de carbón mineral



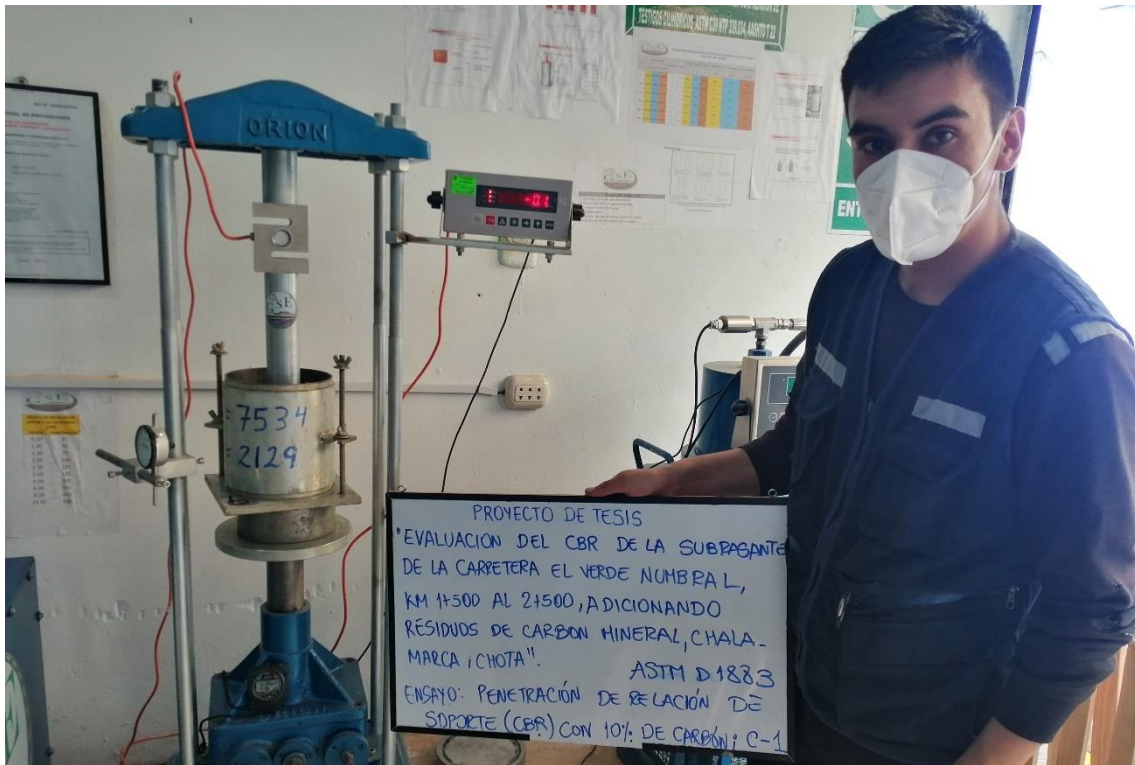
Fotografía 22. Compactación para CBR, suelo con residuos de carbón



Fotografía 23. Ensayo de expansión suelo con residuos de carbón mineral



Fotografía 24. Ensayo de CBR suelo con residuos de carbón mineral, calicata 1



Fotografía 25. Ensayo de CBR suelo con residuos de carbón mineral, calicata 2



Fotografía 26. Ensayo de CBR suelo con residuos de carbón mineral, calicata 3



Anexo C. Certificados de INACAL

Anexo D. Estudio de residuos de carbón

Anexo E. Estudio de mecánica de suelos

Anexo F. Planos