

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
SECCIÓN DE POSGRADO



**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE
CARBÓN PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA Y/O
SUB BASE DE PAVIMENTOS**

TESIS

**Para optar el Grado de Maestro en Ciencias
con mención en
INGENIERIA GEOTÉCNICA**

Ing. Rocío del Carmen Pérez Collantes

Lima-Perú

2012

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE
CARBÓN PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA Y/O
SUB BASE DE PAVIMENTOS

Ing^o Rocio del Carmen Pérez Collantes

Presentado a la Sección de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil en
cumplimiento parcial de los requerimientos para el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA GEOTECNICA
DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

2012

Autor : Ing. Rocio Pérez Collantes

Recomendado : M.Sc. José Wilfredo Gutiérrez Lázares
Asesor de la Tesis

Aceptado por : CE.Ing. Francisco Coronado del Aguila
Jefe de la Sección de Posgrado

DEDICATORIA

A mis queridos padres Eulalia y Rigoberto, hermanos: Arturo, Rafael, Frank y Carolina, por su apoyo y porque me incentivan y alientan a seguir avanzando en mi carrera profesional y porque mi familia es lo mas importante en mi vida.

A mis queridos abuelos Alejandra, Samuel, Espiritu y Belisario porque ellos velan mi existencia y cuidan de mi.

AGRADECIMIENTOS

A Dios porque cuida mis pasos, me cuida y me guía en la vida.

A mi profesor Ing. José Gutiérrez Lázares, quien más que mi asesor es mi amigo y mi guía, muchas gracias por su asesoramiento, por el conocimiento transmitido, su comprensión y apoyo para culminar la presente tesis.

A mi querido amigo Gino Calderón Vizcarra, quien fue mi co asesor, muchas gracias por su amistad y apoyo incondicional, así como por brindarme sus conocimientos para el desarrollo de la presente tesis.

A la comisión de tesis: Dr. Jorge Alva Hurtado e Ing. César Atala Abad, por la acertada revisión de mi tesis.

A mi querida amiga Marisol Secretaria de la Sección de Pos grado, por su amistad y apoyo.

A mis queridos amigos del Laboratorio N°2 Mecánica de Suelos de la UNI, por su apoyo en brindarme sus instalaciones y personal para el desarrollo de los ensayos de la presente tesis.

Resumen

Esta investigación, estudia el efecto que produce la adición de cenizas volantes de carbón en un suelo arcilloso, con el fin de evaluar en sus obras de pavimentación.

La ceniza volante es un residuo que proviene de la planta termoeléctrica ubicada en Ilo, Moquegua. La disposición de éste, genera un problema ambiental.

Se realizaron ensayos de laboratorio para caracterizar la ceniza volante, las mezclas suelo-ceniza volante y suelo – ceniza volante – cemento para evaluar su comportamiento geotécnico.

Se comprueba que la mezcla de ceniza volante con el suelo arcilloso en estudio, como también la adición de cemento, presenta un mejor comportamiento que el suelo puro para su empleo como capa de sub-base y sub-rasante mejorada de pavimentos. Se examinó factores como; tiempo de curado, tiempo de compactación, contenido de agua y otros factores que influyen en el comportamiento de la mezcla final.

Los diseños de estructuras típicas de pavimento rural, tanto con un suelo natural arcilloso y con suelo estabilizado, se relacionaron mediante el método NAASRA (National Association of Australian State Road Authorities).

La investigación concluye que existe viabilidad técnica y económica para la construcción de pavimentos empleando cenizas volantes de carbón como material estabilizador de suelos.

Abstract

This investigation, studies the effect of the addition of coal fly ash in clay soil, in order to assess their use in paving.

Fly ash is a residue that comes from the power plant located in Ilo, Moquegua. The arrangement of this, generates an environmental problem.

Laboratory tests were conducted to characterize the fly ash, the mixtures soil-fly ash and soil - fly ash - cement to evaluate their geotechnical behavior.

It's found that the mixtures of fly ash with the clayey soil in study, and the addition of cement provides a better performance than pure soil for use as sub-base and subgrade improved pavement.

We examined factors as, curing time, compaction time, water content and other factors influencing the behavior of the final mixture.

The design of structures typical of rural pavement, both with a natural soil clay and soil stabilized, are related by the method NAASRA (National Association of Australian State Road Authorities).

The research concludes that there is technical and economical feasibility for construction of pavements using coal fly ash as soil stabilizer.

Contenido

Resumen	1
Abstract.....	2
Lista de Figuras	5
Lista de Tablas.....	8
Lista de Símbolos	10
Lista de Abreviaturas.....	11
Introducción.....	12
CAPITULO I.- ANTECEDENTES.....	13
1.1 Planteamiento del Problema	13
1.2 Alcance de la Investigación.....	14
1.3 Justificación	14
1.4 Organización de la Tesis.....	14
CAPÍTULO II.- ESTADO DEL ARTE	16
2.1 Ceniza Volante de Carbón (Fly Ash)	16
2.2 Aplicaciones de Ceniza de Carbón en Pavimentación	17
CAPÍTULO III.- MARCO TEÓRICO	25
3.1 Origen y Proceso de Obtención de Ceniza Volante	25
3.2 Ceniza Volante	31
3.3 Clasificación de Ceniza Volante.....	32
3.4 Propiedades de la Ceniza Volante	33
3.5 Estabilización de Suelo Arcilloso con Cenizas de Carbón.....	35
3.6 Capacidad de Soporte de la Subrasante	36
3.7 Diseño del Pavimento	38
CAPITULO IV.- PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	41
4.1 Materiales Investigados	41
4.1.1 Ceniza Volante	43
4.1.2 Cemento Portland	44
4.1.3 Mezcla de Suelo Arcilloso y Ceniza Volante.....	45
4.1.4 Mezcla de Suelo Arcilloso y Cemento	46
4.2. Ensayos de Laboratorio a Realizar	46
4.2.1 Ensayos Físicos y Mecánicos	47
4.3 Ensayos de Caracterización Química	50
4.3.1 Caracterización Mineralógica (Difracción de Rayos X - DRX).....	51
4.3.2 Análisis de Materia Orgánica	52
CAPÍTULO V.- PRESENTACION Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	53
5.1 Ensayos de Caracterización Física	53

5.1.1 Distribución Granulométrica	53
5.1.2 Límites de Atterberg.....	55
5.1.3 Gravedad Específica de Sólidos	58
5.1.4 Clasificación de Suelos.....	60
5.2 Ensayos de Caracterización Química	62
5.2.1 Composición Mineralógica de Materiales Investigados.....	62
5.2.2 Contenido de Materia Orgánica.....	65
5.3 Ensayos de Caracterización Mecánica	66
5.3.1 Variación del Ensayo Próctor con el Contenido de Ceniza y/o Cemento	66
5.3.2 Ensayo CBR	70
5.4 Dimensionamiento de Pavimento Típico	75
5.5 Consideraciones sobre Presentación y Discusión de Resultados.	77
5.6 Evaluación Económica	78
Conclusiones.....	80
Recomendaciones	81
Bibliografía.....	82

Lista de Figuras

Figura 2.01 Distribución de Partículas de Mezclas de Suelo Cal y Suelo Cemento	21
Figura 2.02 Limites de Atterberg vs Contenidos Estabilizadores	21
Figura 2.03 CBR vs. Contenido de Estabilizadores	22
Figura 2.04 UCS a) Modulo Tangente Inicial b) Mezclas de Limo, Cemento, después de 7 y 28 Días de Curado	22
Figura 3.01 Proceso de Obtención de Carbón Pulverizado	26
Figura 3.02. Vista General de la Central Termoeléctrica ILO21	29
Figura 3.03. Vista Interior de las Instalaciones de Central Termoeléctrica ILO21	30
Figura 3.04: Vista de los Silos donde se Almacena la Ceniza Volante.....	30
Figura 3.05: Curvas para Diseño de Espesores de Pavimento (MTC, 2008)	38
Figura 3.06: Curvas para Diseño de Espesores de Pavimento (MTC, 2008	39
Figura 4.01 Ubicación de la Zona en Estudio	41
Figura 4.02 Vista del Lugar de Obtención de Arcilla en Villarica y Producto Final Pasante la Malla N°4	41
Figura 4.03: Vista de la Planta y Zona de Obtención de Ceniza Volante	42
Figura 4.04: Ceniza Volante.....	42
Figura 4.05: Cemento Portland Tipo I.....	44
Figura 4.06 : Ensayo de Análisis Granulométrico por Tamizado	47
Figura 4.07: Ensayo de Limite Liquido con la Copa de Casagrande	47
Figura 4.08: Bomba de Vacios para el Ensayo de Gravedad Específica.....	48
Figura 4.09: Ensayo de CBR	49
Figura 4.10: Proceso de Saturación y Medición de Expansión	49
Figura 4.11: Vista de Equipo de Laboratorio y Difracción de Rayos X	50
Figura 5.01 Curvas Granulométricas de Suelo Arcilloso, Ceniza Volante y Mezclas con Ceniza Volante	52
Figura 5.02 Curva Granulométrica de Suelo Arcilloso, Ceniza Volante y Mezclas con Ceniza Volante y Cemento	53
Figura 5.03 Variación de Límites de Consistencia con el Contenido de Ceniza Volante	55
Figura 5.04 Variación de Índice de Plasticidad con el Contenido de Ceniza Volante ...	56

Figura 5.05 Variación de Límites de Consistencia con el Contenido de Ceniza Volante y Cemento 3%	56
Figura 5.06 Variación de Índice de Plasticidad con el Contenido de Ceniza Volante y Cemento 3%	57
Figura 5.07 Variación de la Gravedad Específica con el Contenido de Ceniza Volante	58
Figura 5.08 Variación de La Gravedad Específica con el Contenido de Ceniza Volante y Cemento 3%.	59
Figura 5.09 Difractograma Detallado de la Ceniza Volante	62
Figura 5.10 Difractograma de la Ceniza Volante	63
Figura 5.11 Difractograma Detallado de la Arcilla	63
Figura 5.12 Difractograma de la Arcilla.....	64
Figura 5.13 Curvas de Compactación de Suelo, Ceniza Volante y Mezclas	66
Figura 5.14 Curvas de Compactación de Suelo, Ceniza Volante y Mezcla con Cemento	66
Figura 5.15 Variación de la MDS con el Contenido de Humedad en Mezclas de Arcilla y Ceniza Volante	67
Figura 5.16 Variación de la MDS con el Contenido de Humedad en Mezclas de Arcilla, Ceniza Volante y Cemento 3%.....	67
Figura 5.17 Variación del Optimo Contenido de Humedad y el Contenido de Ceniza Volante	68
Figura 5.18 Variación del Optimo Contenido de Humedad Incluye Cemento 3% en la Mezcla y Ceniza Volante.....	68
Figura 5.19 Variación de la Expansión en la Mezcla y Contenido de Ceniza Volante..	70
Figura 5.20 Variación de la Expansión en la Mezcla con Adición de Cemento 3% y Contenido de Ceniza Volante	71
Figura 5.21 Curva de CBR de la Mezcla vs. Contenido de Ceniza Volante	73
Figura 5.22 Curva de CBR de la Mezcla con Cemento 3% vs. Contenido de Ceniza Volante	73
Figura 5.23 Gráfico de Comparación de Costos con Mezclas de Arcilla y Ceniza Volante	77
Figura 5.23 Gráfico de Curvas para Determinar el Espesor de la capa de Revestimiento Granular	74
Figura 5.24 Gráfico de Curvas Espesor de la Capa de Revestimiento Granular y el Contenido de Ceniza Volante	75

Figura 5.25 Gráfico de Curvas para Determinar el Espesor de la Capa de Revestimiento Granular y el Contenido de Ceniza Volante incluye Cemento 3%	76
Figura 5.27 Gráfico de Comparación de Costos de Pavimentos para Diferentes Mezclas Incluyendo 3% de Cemento.....	78

Lista de Tablas

Tabla 2.01 Coeficientes del Modelo Realizado con el Programa STATISTICA para los Módulos de Resiliencia de los materiales Estudiados	18
Tabla 2.02 Coeficientes del Modelo Realizado con el Programa STATISTICA para los Módulos de Resiliencia de los materiales Estudiados	19
Tabla 3.01 Requerimientos Químicos de Ceniza Volante de acuerdo a ASTM C 618..	32
Tabla 4.01.- Carbones Utilizados en la C.T. ILO21	43
Tabla 4.02 – Proporción de Mezcla y Símbolos Referentes a cada Material	44
Tabla 4.03: Tipo y Tamaño de Partículas.....	46
Tabla 4.04: Índice de Plasticidad y Característica de los Materiales	48
Tabla 4.05 Niveles de Materia Orgánica	51
Tabla 5.01 Resultados de Ensayos de Análisis Granulométricos.....	53
Tabla 5.02 Resultados de Ensayos de Análisis Granulométricos.....	54
Tabla 5.03 Resultados de Límites de Consistencia	54
Tabla 5.04 Resultados de Límites de Consistencia	55
Tabla 5.05 Resultados de Ensayos de Gravedad Específica de Sólidos.....	58
Tabla 5.06 Resultados de Ensayos de Gravedad Específica de Sólidos.....	58
Tabla 5.07 Clasificación de Suelos y Mezclas	60
Tabla 5.08 Clasificación de Materiales y Mezclas de Suelo Arcilloso, Ceniza Volante y Cemento 3%	60
Tabla 5.09 Elementos Químicos Presentes en la Arcilla.....	61
Tabla 5.10 Elementos Químicos Presentes en la Ceniza Volante	61
Tabla 5.11 Elementos Químicos Presentes en Ceniza Volante Determinados en Central Termoeléctrica de Ilo 21	62
Tabla 5.12 Niveles de Materia Orgánica	64
Tabla 5.13 Resultados de Ensayos de Compactación de Materiales de Suelo y Ceniza Volante	65
Tabla 5.14 Resultados de Ensayos de Compactación de Materiales de Suelos y Combinación con Ceniza Volante y Cemento 3%	65
Tabla 5.15 Resultados de Ensayos de Compactación de Materiales de Este Estudio entre Suelo Arcilloso y Ceniza Volante	69

Tabla 5.16 Resultados de Ensayos de Compactación de Materiales de Este Estudio entre Suelo Arcilloso, Ceniza Volante y Cemento 3%.....	70
Tabla 5.17 Resultados de Ensayos de Compactación de Materiales de este Estudio entre Suelo Arcilloso y Ceniza Volante	72
Tabla 5.18 Resultados de Ensayos de Compactación de Materiales de este Estudio entre Suelo Arcilloso, Ceniza Volante y Cemento 3%.....	72
Tabla 5.19 Resultados de Espesores de Pavimento con Diferentes Contenidos de Ceniza	75
Tabla 5.20 Resultados de Espesores de Pavimento con Diferentes Contenidos de Ceniza y Cemento 3%	76
Tabla 5.21 Comparación de Costos de Pavimentos para Diferentes Mezclas.....	77
Tabla 5.22 Comparación de Costos de Pavimentos para Diferentes Mezclas de Materiales	78

Lista de Símbolos

Al = Aluminio

Ca=Calcio

cm=Centímetro

Fe = Fierro

GWh= Gigavatio hora

IP = Índice de plasticidad

Kg = kilogramos

Kv= Kilo vatio

Km=kilómetro

LL=Límite Líquido

LP= Límite Plástico

M = metro

Mva=Mega vatio

MWh= Megavatio hora

Na=Sodio

O=Oxígeno

S= Azufre

Si = Silicio

t= Tonelada

Lista de Abreviaturas

BM=Banco Mundial

CV = Ceniza Volante

EIA= Estudio de Impacto Ambiental

FBC=Combustión Fondo de Fluido

M.O. = Materia orgánica

Mr = Modulo Resiliente

PCC=Producto Combustión Calor

Min.=Mínimo

Max=Máximo

ACAA = American Coal Ash Association

SPCC = Southern Perú Copper Corporation

PPA = Power Purchase Agreement

Introducción

Algunos suelos arcillosos, debido a su baja capacidad de soporte y mala calidad no siempre cumplen con los requerimientos necesarios para ser empleados en proyectos de pavimentación. Una alternativa de solución es mejorar las características mecánicas del material, estabilizándolo con productos adicionados. Los pavimentos de carreteras que se construyen sobre suelo de baja capacidad de soporte, presentan un elevado costo porque su diseño demanda mayores espesores. Luego su vida útil disminuye por problemas de hundimientos o asentamientos. Un problema adicional, en zona de selva, es el escaso número de canteras de material granular, que justifican realizar trabajos de estabilización de suelos.

Las plantas termoeléctricas, como la ubicada en la provincia de Ilo, utilizan carbón mineral bituminoso como fuente de calor y que producen cenizas y escorias como residuo de su proceso industrial, podrían ser usadas en pavimentos, tal como sucede en otros países.

La presente tesis evalúa el comportamiento de un suelo arcilloso con la adición de ceniza volante y cemento en diferentes concentraciones.

Las cenizas son granos finos compuestos básicamente por silicatos, aluminios, cal libre y algunos óxidos que permiten una reacción puzolánica con el suelo reduciendo el índice de expansión y mejorando la capacidad de soporte.

La presente investigación contribuye con la interpretación del comportamiento de los suelos estabilizados con ceniza volante de la central termoeléctrica de Ilo, potenciando el conocimiento y su utilización en obras de pavimentación de carreteras.

CAPITULO I.- ANTECEDENTES

El estudio de las cenizas volantes, en países desarrollados alcanza en los últimos años un gran auge debido al crecimiento registrado en la producción de energía eléctrica vía carbón. La generación de residuos, tales como la ceniza volante se ha convertido en un problema ambiental, motivando un especial interés de estudiar su aprovechamiento en la ingeniería civil, minimizando el impacto que genera su producción.

La planta termoeléctrica Ilo 21, ubicada en la provincia de Ilo, utiliza el carbón como fuente de calor, produciendo cenizas y escorias en su proceso industrial. Estos residuos generan un problema ambiental, al ser dispuestos en rellenos sanitarios acondicionados, demandando espacio y generando costos, sin contemplar aplicación alguna que equilibre el excedente de ceniza con técnicas innovadoras.

1.1 Planteamiento del Problema

Algunos suelos arcillosos no cumplen con los requerimientos necesarios para un proyecto de pavimentación, por su baja capacidad de soporte y mala calidad debido a su naturaleza.

Para solucionar este problema se emplean alternativas de estabilización para el mejoramiento de las características mecánicas del material evitando elevados costos de obra por los grandes espesores de pavimento a ser proyectados.

La vida útil de los pavimentos, que descansan sobre suelos blandos es menor que el promedio de la mayoría, pues se producen hundimientos o asentamientos que deterioran rápidamente la vía.

La zona de selva se caracteriza porque no existen canteras de material granular adecuado que puedan emplearse en las diversas capas de la estructura del pavimento.

1.2 Alcance de la Investigación

La investigación se orienta a evaluar las características mecánicas de los suelos estabilizados con cenizas de carbón para su empleo como subrasante o de sub base en pavimentos.

Se evaluarán las características físicas, químicas y mecánicas del suelo a estabilizar, de las cenizas de carbón como material estabilizante y del producto de la mezcla suelo-ceniza, mediante ensayos de laboratorio.

Finalmente se realiza el dimensionamiento de una estructura típica de pavimento con fines de comparación del desempeño de los materiales estudiados.

1.3 Justificación

La zona de selva se caracteriza porque no existen canteras de material granular adecuado que puedan ser usados en las diversas capas de la estructura del pavimento, debiéndose encontrar alternativas como la estabilización, que permita mejorar la capacidad de soporte de los suelos.

Una de las alternativas corresponde al empleo de materiales como la ceniza volante.

En diversos países, se han empleado cenizas de carbón, como material de pavimentación. Existiendo referencia de su buen desempeño en investigaciones realizadas, en Estados Unidos, Europa y Brasil, concluyendo que la ceniza volante estabiliza el suelo mejorando sus propiedades mecánicas para su utilización en pavimentación.

1.4 Organización de la Tesis

La presente tesis se inició con la obtención de las muestras a investigar. El suelo se obtuvo de la ciudad de Villarica, provincia de Oxapampa y departamento de Pasco, Km. 132 de la carretera Villarica – Puerto Bermúdez; recolectándose 800kg de material arcilloso. Asimismo de la ciudad de Ilo se recolectó la muestra de ceniza volante de la

Central Termoeléctrica de Ilo 21; recolectándose 500 kg de ceniza volante. Las muestras se llevaron al Laboratorio N°2 Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional de Ingeniería.

La investigación se ha desarrollado en cinco capítulos. El Capítulo 1, Antecedentes realiza un análisis y formulación del problema indicando los objetivos. El Capítulo 2, Estado del Arte, presenta información sobre la ceniza volante, cemento en general y sus aplicaciones en la ingeniería utilizando estos aditivos. El Capítulo 3, Marco Teórico, trata sobre la revisión de la literatura existente y de las investigaciones similares realizadas como temas de investigación y de la mejora de los suelos con ceniza volante. El Capítulo 4, Programa Experimental, describe los materiales empleados, los trabajos y ensayos de laboratorio, los equipos y normas de ensayos. El capítulo 5, Análisis de Resultados, presenta los resultados de ensayos físicos, químicos y geotécnicos de las mezclas de cenizas volante y suelo realizadas. Los resultados se analizan y discuten en comparación con otras investigaciones realizadas. Finalmente se presenta las principales Conclusiones y Recomendaciones obtenidas durante esta investigación.

CAPÍTULO II.- ESTADO DEL ARTE

La información relativa a la clasificación, las aplicaciones y los procesos para la obtención de cenizas volantes y algunas estadísticas sobre su utilización.

2.1 Ceniza Volante de Carbón (Fly Ash)

Las restricciones en el suministro de primeras materias energéticas surgidas a partir de los años 70, pusieron de manifiesto, en casi todas las áreas geográficas, la necesidad de evitar la dependencia del petróleo en la producción de energía eléctrica. En la década comprendida entre 1975 y 1985 el uso del carbón se duplicó en la mayoría de los países desarrollados.

En los últimos 30 años las técnicas de modificación de los suelos se han convertido en una parte importante de la práctica de la ingeniería civil (Hausmann, 1990). El mejoramiento de las zonas con presencia de arcilla débil o compresible se hace comúnmente mediante la eliminación de los suelos arcillosos de baja capacidad de soporte y se reemplazan por otros más competentes, tales como grava arenosa compactada, piedra triturada, o agregados livianos para aumentar la capacidad de carga (Kukko, 2000). Aunque esto se considera una buena solución, por lo general tiene el inconveniente de alto costo debido al material de reemplazo. El uso de aditivos, derivados de la combustión de carbón, como cenizas volantes se considera una solución más rentable. Resulta con adecuadas propiedades o mejoras de la ingeniería, al tratar los suelos de fundación.

En países como EE.UU., India, Japón, China y de Europa, de la combustión del carbón se obtiene los subproductos de la combustión del carbón que se utilizan en múltiples aplicaciones (IEA, 2005). De acuerdo con el American Coal Ash Association (ACAA), en 2003 se generaron más de 121 millones de toneladas de los productos de Combustión del calor (PCC) se tiene que 70 millones de toneladas fueron cenizas volantes y 18,1 millones de toneladas fueron cenizas de fondo

El consumo de carbón en el Perú se inicio en junio del año 2000 con la central térmica a vapor ILO21 de Ener Sur, que es la única que utiliza esta fuente de energía. La energía

producida en el año 2002 fue de 845,9 GWh (0.363 t/MWh), y representa el 21,5% de generación por centrales térmicas y el 3,8% del total nacional. El consumo de carbón mineral en el 2002 ascendió a 307,660 toneladas en la generación de energía eléctrica.

2.2 Aplicaciones de Ceniza de Carbón en Pavimentación

Según Nardi (1975), el primer registro de uso de la ceniza volante en pavimentación se produjo en 1938, en los Estados Unidos, cuando el Distrito Sanitario de Chicago utilizó de 20 a 50% de cenizas volantes como un sustituto del cemento en pavimento en un tramo de media milla de una carretera local. El autor describe una construcción de pistas de aterrizaje en el aeropuerto de Newark, también en los Estados Unidos, donde se utilizó aproximadamente 730,000 toneladas de cenizas, juntamente con el uso de arena de mar dragada que se utiliza en terraplén. Y con la instrumentación instalada pudo ser verificado, después de 5 años de operación, que los costos de mantenimiento fueron mucho más bajos que los de pavimentos comunes.

De acuerdo con Rohde et al. (2006) en Europa, el uso de cenizas de carbón como aglutinantes estabilizado en bases, sub-bases y refuerzos de sub-base de pavimentos se difundió mucho, desde 1960. Y en países como Inglaterra, Francia, Suecia, Rusia, entre otros, el uso de las cenizas en la pavimentación es parte de las alternativas convencionales.

En el Brasil, en la investigación desarrollada por Nardi (1975) y más tarde complementado por la investigación de Marcon (1977) fue comprobada la estabilización de arena con ceniza volante y cal. Este trabajo dio lugar a la implantación de un tramo experimental de prueba que se encuentra en las orillas de la BR-101 en ciudad de Imbituba, en donde fue construido una sub-base de arena estabilizada con cenizas y cal, sobre arena de la subrasante con éxito (Motta, 1991).

Estos residuos de las centrales térmicas son utilizados tradicionalmente en materiales de construcción de la ingeniería civil. Normalmente se usan en bruto o en forma aglomerada Umaña (2002). En forma aglomerada para la elaboración de diferentes tipos de cemento y hormigón, en la fabricación de ladrillos, áridos artificiales, materiales refractarios y como aditivo sustitutivo en la industria cerámica y en bruto para la

construcción de caminos y ferrovías, como material para pavimento y material de relleno en minería.

En el Perú no se tiene conocimiento de que se ha utilizado aún la ceniza volante en estabilización de subrasante o como sub base para carreteras. Pero sí se ha usado como un aditivo para el concreto con una función puzolánica, de esta manera se logra utilizar menos cantidad de cemento, por lo que las empresas que elaboran concreto se llevan cantidades de la central termoeléctrica de Ilo, que es la única central termoeléctrica a carbón que existe en el Perú.

En Brasil se han realizado investigaciones sobre el tema, siendo la más reciente de Louise dos Santos Erasmi Lopes, sobre el Tema “Análise do Comportamento Mecânico e Ambiental de Misturas Solo-Cinzas de Carvão Mineral para Camadas de Base de Pavimentos”, en la Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro en el año 2011. La investigación presentó la caracterización de dos tipos de ceniza de fondo y volante obtenidos como residuos del carbón mineral usado en una central termoeléctrica, siendo su objetivo utilizar los materiales en obras de pavimentación, a través de mezclas con cenizas y un suelo arenoso y limoso (clasificación SUCS: SM, clasificación AASHTO: A-2-4) característico del estado de Rio de Janeiro; se realizaron ensayos de caracterización física, química y mecánica, así como definir ensayos ambientales. Los ensayos fueron realizados en suelo puro y mezclas de suelo ceniza de fondo (30-40% de ceniza de fondo) y suelo ceniza volante (10-20% de ceniza volante, relacionados al peso seco. También fueron ensayados muestras con la adición de 3% de cal. Con los resultados de ensayos mecánicos se procedió a calcular los espesores para una estructura típica del pavimento. Las mezclas de suelo con ceniza presentan un comportamiento mecánico compatible con los requisitos de un pavimento de bajo volumen de tránsito. Los resultados muestran que el suelo es dependiente de la presión de confinamiento, la adición de cenizas volantes y el curado previo aumentan considerablemente el valor del módulo de resiliencia con la correspondiente disminución de los espesores de capas de base del pavimento en el diseño, en comparación a un suelo puro para un mismo nivel de carga y mismos criterios de diseño. A continuación en las Tablas 2.01 y 2.02 se presentan algunos resultados obtenidos de sus ensayos:

Tabla 2.01 Coeficientes del Modelo Realizado con el Programa STATISTICA para obtener los Módulos de Resiliencia de los Materiales Estudiados

Material	Cura días	Compactación		Módulo de Resiliencia			
		O.C,H. %	M.D.S. g/cm3	k1	k2	k3	Coef. De Correlac. R ²
S	0	9.72	2.065	251	0.54	-0.30	0.827
				129	0.05	-0.04	0.064
				197	0.46	-0.32	0.718
S90/CV7/C3	0	11.39	1.902	455	0.52	-0.23	0.904
	7			489	0.38	-0.24	0.723
	28			1209	0.43	0.01	0.969
	90			1209	0.33	-0.03	0.812
	0	11.47	1.895	455	0.52	-0.17	0.930
	7			543	0.40	-0.12	0.798
	28			1150	0.48	0.01	0.935
	90			981	0.31	-0.03	0.779
	0	11.25	1.926	479	0.47	-0.11	0.736
	7			317	0.23	-0.24	0.573
	28			1467	0.49	-0.02	0.988
	90			1237	0.32	-0.03	0.821
S80/CV17/C3	0	12.59	1.824	383	0.48	-0.22	0.830
	7			871	0.47	-0.05	0.937
	28			1434	0.45	0.05	0.978
	90			1854	0.53	0.11	0.952
	0	12.79	1.798	382	0.45	-0.21	0.875
	7			771	0.43	-0.05	0.916
	28			1303	0.46	0.05	0.975
	90			1297	0.42	0.09	0.955
	0	12.78	1.803	383	0.46	-0.19	0.824
	7			843	0.47	-0.04	0.906

	28			1267	0.45	0.02	0.951
	90			1355	0.41	0.12	0.974

Nota: S= Suelo, CV= Ceniza Volante, C=Cal.

Tabla 2.02 Coeficientes del Modelo Realizado con el Programa STATISTICA para obtener los Módulos de Resiliencia de los Materiales Estudiados

Material	Cura días	Compactación		Módulo de Resiliencia			
		O.C.H. %	M.D.S. g/cm ³	k1	k2	k3	Coef. De Correlac. R ²
90S/10CV	0	10.87	1.958	208	0.48	-0.25	0.798
	35			254	0.39	-0.17	0.729
	90			276	0.43	-0.10	0.860
	0	11.58	1.963	180	0.45	-0.36	0.630
	35			230	0.49	-0.21	0.778
	90			139	0.42	-0.17	0.789
	0	11.32	1.960	244	0.45	-0.21	0.800
	35			231	0.39	-0.26	0.637
	90			311	0.42	-0.12	0.855
80S/20CV	0	11.27	1.920	242	0.42	-0.22	0.777
	35			185	0.33	-0.32	0.540
	90			305	0.39	-0.11	0.839
	0	11.32	1.924	114	0.26	-0.24	0.510
	35			169	0.33	-0.40	0.536
	90			333	0.40	-0.07	0.866
	0	11.44	1.884	X	X	X	X
	35			241	0.40	-0.20	0.685
	90			277	0.40	-0.10	0.816

Nota: S= Suelo, CV= Ceniza Volante.

De este modo considerando los coeficientes k2 y k3, presentados en las Tablas 2.01 y 2.02, se puede concluir que tanto en el suelo natural como en todas las mezclas

estudiadas, la presión confinante ejerce mayor influencia en el comportamiento resiliente, así como ocurre en la mayoría de los materiales granulares.

Se concluye que todas las mezclas analizadas, con la presencia de cal, son adecuadas a la utilización de en la capa de base de pavimentos típico, haciendo que el suelo, antes inadecuado a este proyecto tenga un comportamiento mecánico necesario para pavimentos de bajo volumen de tránsito. Siendo la mezcla de S90/CV7/C3 la que presentó mejores resultados.

Los resultados con ceniza de fondo también presentaron resultados satisfactorios, con una combinación de mezcla de S70/CF27/C3.

En Brasil también se presentó en la revista de Soils and Rocks de fecha Enero a Abril del presente año 2012, un artículo titulado “Modification of a Lateritic Soil with Lime and Cement: An Economical Alternative for Flexible Pavement Layers”, F.H.M. Portelinha, D.C. Lima, M.P.F. Fontes, C.A.B. Carvalho; donde se explica la investigación realizada sobre suelos lateríticos de Brasil y que están ampliamente extendidos en el territorio nacional y que han sido utilizados como sub-base de capas de pavimentos. Específicamente, los suelos arcillosos de color rojo y amarillo se caracterizan como materiales de baja capacidad de carga para las capas de pavimentos flexibles. Como una solución convencional, se ha utilizado como pavimento de refuerzo de subrasante la estabilización de suelos con cal hidratada o cemento Portland. No obstante, la adición de bajos contenidos de estabilizadores en la modificación del suelo, no se han aplicado de manera regular en los diseños de carreteras. El propósito de este trabajo es evaluar el uso de bajo contenido de cal y cemento en la modificación de las propiedades de los suelos lateríticos y una relación con el comportamiento de las mezclas desde el inicio de la construcción hasta el producto final resultante. En este punto se evaluaron, la manejabilidad, propiedades químicas, comportamiento mecánico y la composición mineralógica. Los análisis mecanicistas se realizaron con el fin de verificar las fallas por fatiga de las capas de pavimento en carreteras. Los resultados experimentales mostraron que la adición de 2% y 3% de cal o cemento fue suficiente para cambiar la trabajabilidad y la resistencia mecánica del suelo. Además, del análisis mecanicista apoyó la técnica de estabilización del suelo como una valiosa práctica con

bajas tensiones elásticas en la capa de asfalto cuando se aplican en capas de base de pavimento.

Los resultados respaldan la estabilización de las prueba de suelo con cal y cemento, lo cual es una técnica eficiente y económica para el diseño de pavimento flexible y su construcción, se presenta las conclusiones del estudio y son las siguientes:

- Bajos contenidos de cal y cemento fueron eficientes en cambios de trabajabilidad de suelos lateríticos de color rojo-amarillo, destacando mejores cambios por adición de 3% de cemento. Otras adiciones de cal y cemento no cambian el IP del suelo. Ver Figuras 2.01 y 2.02.

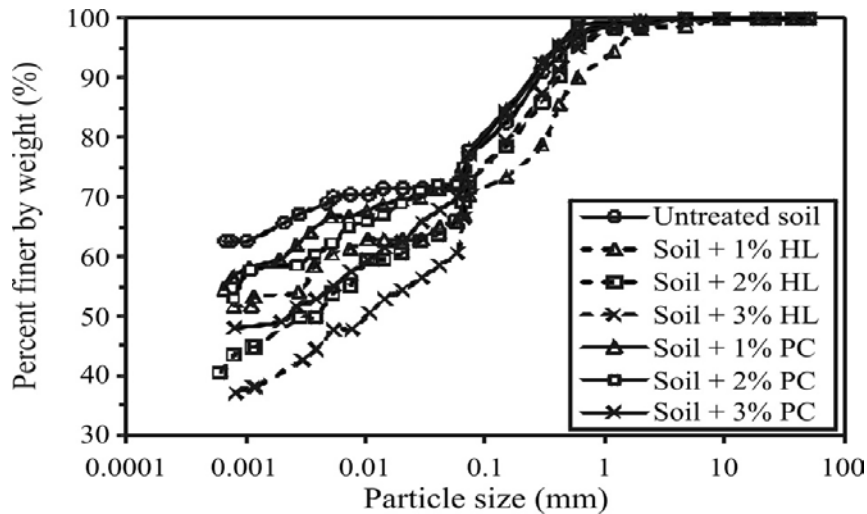


Figura 2.01 Distribución de Partículas de Mezclas de Suelo Cal y Suelo Cemento

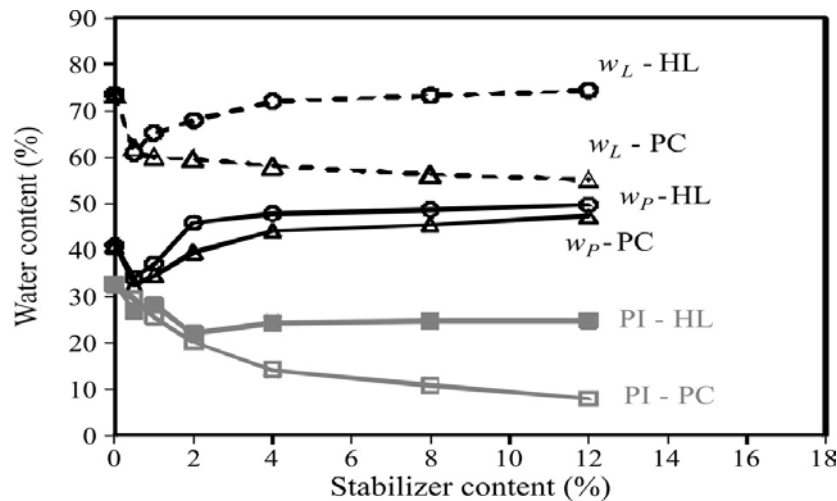


Figura 2.02 Limites de Atterberg vs Contenidos de Estabilizadores

- Las propiedades químicas de las mezclas son compatibles con el comportamiento de plasticidad, mostrando que la cantidad de cal es de alrededor de 3% en este suelo. Por lo tanto, puede soportar las alteraciones mineralógicas. Hidratación y reacción del cemento favorece la disminución del IP.
- La cal estabiliza y elimina la hinchazón del suelo, mientras que la adición del 2% de cemento la incrementa; ver Figura 2.03.

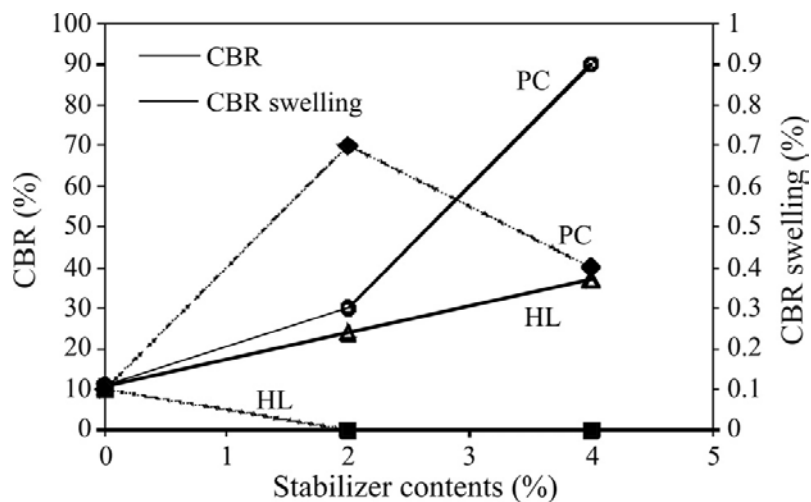


Figura 2.03 %CBR y % Expansión del CBR vs. Contenido de Estabilizadores

- El suelo estabilizado promueve el incremento de esfuerzos y el módulo inicial tangente, principalmente después de 28 días de curado, donde el cemento es el material más eficiente. Las alteraciones mayores de esfuerzos ocurrieron con 2% y 3% de cal y cemento, aunque la adición de 1% era suficiente para proporcionar 50% del aumento de resistencia a la compresión no confinada en comparación con el suelo sin tratar. Aumentó el modulo tangente inicial y fueron significativamente mayores que la compresión no confinada de esfuerzos (UCS) y generadas por adición de bajos contenidos de estabilizadores. Ver Figura 2.04.

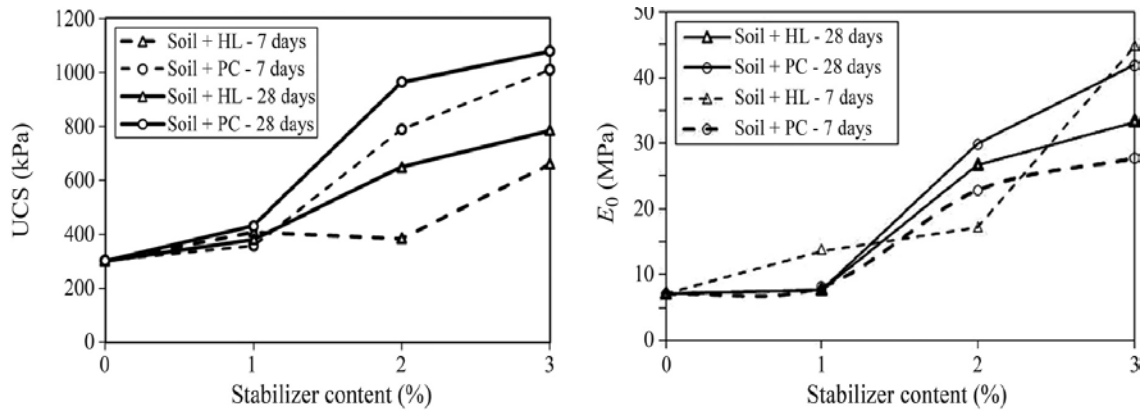


Figura 2.04 UCS a) Modulo Tangente Inicial b) Mezclas de Limo, Cemento, después de 7 y 28 Días de Curado

- Se observó que las alteraciones mineralógicas han ocurrido en muestras que presentan aumentos significativos de esfuerzos.
- Los análisis mecanicistas mostraron que la estabilización del suelo se puede aplicar a la base de diseño de pavimentos flexibles produciendo bajas tensiones elásticas y niveles de esfuerzo. Adicionalmente, la más eficiente (económica y mecánicamente) configuración de pavimentos se sugiere en este estudio fue la mejora de la sub rasante de suelo o estabilización de la base.

CAPÍTULO III.- MARCO TEÓRICO

La técnica de estabilización de suelos con cenizas de carbón se basa en la interacción de los elementos presentes en el suelo, de los componentes del medio ambiente y de la ceniza adicionada. El suelo influye de acuerdo con su mineralogía, o sea, presencia de cuarzo y minerales de arcillas; el medio ambiente influencia por medio de factores como temperatura, agua y aire; y las cenizas interactúan con el sistema debido a la presencia de óxido de calcio o magnesio. Esta interdependencia se manifiesta en función de las reacciones físicas, químicas y físico-químicas, predominantemente de las que ocurren entre las cenizas y el suelo. Así, el proceso de estabilización envuelve cuatro reacciones distintas que son: intercambio iónico, la floculación y aglomeración, reacciones puzolánicas y carbonatación.

3.1 Origen y Proceso de Obtención de Ceniza Volante

El problema originado por la masiva utilización del carbón, en la producción de energía eléctrica se basa en su combustión que origina residuos sólidos constituidos mayormente por la materia incombustible presente en este material; este puede representar entre el 6 y el 20% del carbón alimentado a la central termoeléctrica.

Las cenizas volantes se originan cuando se lleva a cabo el proceso de combustión del carbón pulverizado, utilizado como combustible, en las centrales térmicas. García (2003).

Su composición química y mineralógica depende principalmente del contenido de minerales no combustibles que posee el carbón, y de las reacciones ocurridas durante el proceso de combustión (M.C. Alonso et al. 1995).

La ceniza volante (CV) es la porción más fina, que se separa de la corriente de gases en combustión en la central termoeléctrica entre el caldero u hogar y la chimenea mediante equipos convenientemente diseñados (ciclones, filtros, precipitaciones electrostáticas o una combinación de ellos); si no existieran dichos elementos la ceniza se expandiría a la

atmósfera desde la chimenea con lo que resultaría dispersada en amplias zonas geográficas.

La otra porción de la materia incombustible del carbón se separa en el cenicero del hogar en forma de escorias. La proporción escoria: ceniza depende del tipo de Caldero u hogar y del carbón (tipo y forma de alimentación), en el caso de una central térmica moderna de carbón pulverizado.

En general, las características físicas de las CV son difíciles de predecir. Las partículas miden entre $0.5+100\mu\text{m}$ con un tamaño medio entre $8+30\mu\text{m}$ según la central térmica y los equipos de separación usados; son partículas esféricas de color grisáceo amarillento, más claro si contienen álcalis, y más oscuro si hay carbón inquemado. Los carbones pobres (Lignitos) suelen dar CV muy densas y de color claro. La composición genérica de las CV es la típica de rocas y suelos, estando relacionada con la geología y minería del yacimiento de carbón proveniente, con las condiciones de combustión. En la mayoría de los casos, los óxidos de Si, Al, Fe, Ca y Na suponen el 95 al 99% de la CV aunque también se han identificado hasta 45 elementos que se distribuyen según los tamaños de la partícula. Mineralógicamente hay diferencias importantes según el tipo de carbón que origina las CV. Mientras que el cuarzo y las hematites aparecen en las cenizas de todos los carbones, las especies magnetita y mullita se presentan más frecuentemente en las de origen bituminoso, mientras que periclasa y CaO son más comunes en los casos de carbones pobres (sub bituminosos y lignitos).

Algunas CV que reúnen unas especiales cualidades de finura y composición, se pueden aplicar como sustituto del cemento en ciertas formulaciones de concreto y morteros, a los que se les exige determinadas resistencias y durabilidad. El carácter puzolánico de las cenizas volantes (reactividad con cal) unido a su gran finura, permite sustituciones de cemento de gran interés técnico y económico, lo cual permite la utilización racional de una gran parte, y son en promedio el 15% de la CV producidas en la preparación de concreto. Otra gran parte de las CV pueden ser consumidas como primera materia en la fabricación del clinker y en los cementos con adiciones. El carbón llega a la Central Termoeléctrica por medio de barcos de hasta 70,000 toneladas, los mismos que atracan junto a la plataforma de descarga donde dos grúas tipo canguro retiran el carbón sobre la faja transportadora. En su segunda faja transportadora conducen el carbón a lo largo

del muelle hasta la cancha de carbón donde es distribuido por medio del apilador de carbón (stacker) para formar las pilas de carbón.

La cancha de carbón tiene una capacidad de almacenar hasta 200,000 toneladas. El carbón de la cancha es recogida por dos equipos semi automáticos, que son los recuperadores de carbón (reclaimers), los cuales por medio de una banda de paleta, recogen el carbón de la pila y lo depositan sobre fajas transportadoras, las cuales conducen el carbón hasta los silos de almacenamiento de calderos. Esta operación de cargado de silos hasta el alimentador y luego al pulverizador de carbón donde es triturado y molido hasta convertirse en polvo (70% pasante malla N°200) y luego a través de un flujo de aire templado, es transportado por los tubos hacia los quemadores del caldero, donde las partículas de carbón se encienden formando la llama hogar.

Los gases calientes pasan por el exterior de los tubos del sobre calentador, recalentador y economizador antes de dejar el caldero. Luego pasan por el precipitador electrostático donde queda atrapada la ceniza volante y finalmente son emitidas a la atmosfera a través de la chimenea. Ver Figura 3.01 Sobre proceso de obtención de Carbón Pulverizado.

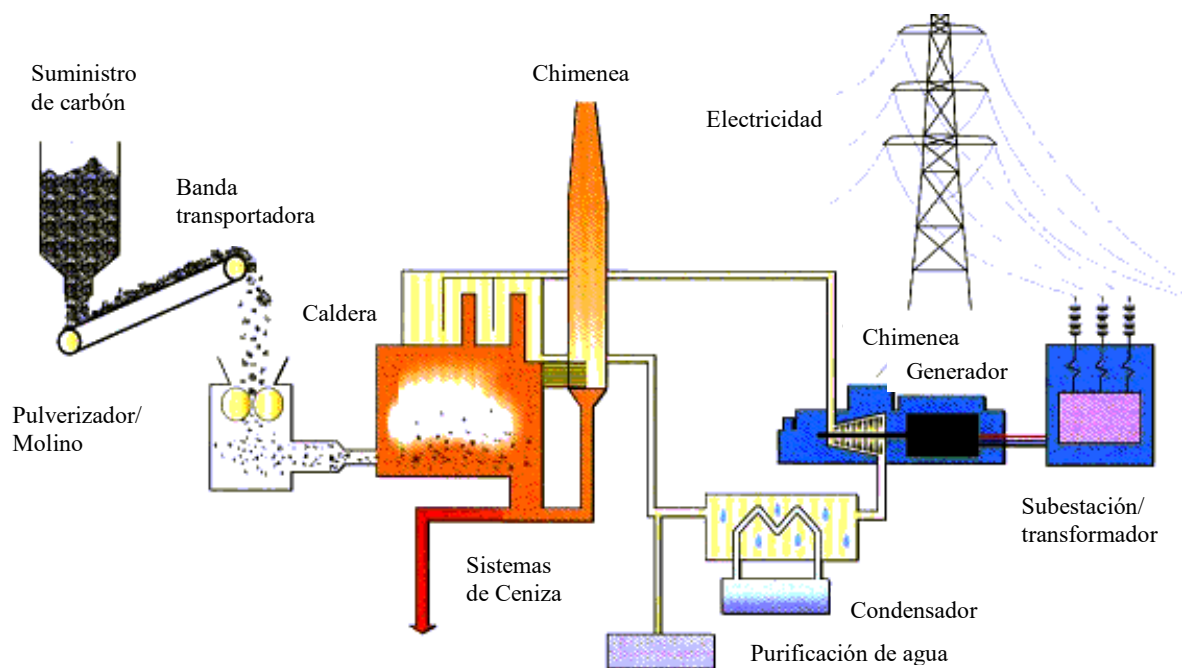


Figura 3.01 Proceso de Obtención de Carbón Pulverizado

EnerSur se constituyó en septiembre de 1996 bajo la denominación social de Powerfin Perú S. A., denominación que cambia en febrero de 1997 a Energía del Sur S. A., como

Ener Sur S. A. como forma abreviada, para adquirir los activos para generación de electricidad de propiedad de Southern Perú Copper Corporation, SPCC, en ese entonces Southern Perú Limited y suscribir el Power Purchase Agreement (PPA). (Fuente :www.enersur.com.pe y elaboración propia)

La Planta posee una turbina a vapor con una potencia nominal de 135 MW, cuenta con una cancha de carbón con capacidad de almacenamiento para 200 mil toneladas y un muelle de 1,250 metros de largo diseñado para buques de 70 mil toneladas de desplazamiento. Dispone de dos plantas desalinizadoras que proveen de agua industrial y potable a la operación de la central y una planta de tratamiento de aguas servidas destinada a la forestación de las áreas circundantes a la central.

Consciente de la necesidad de utilizar adecuadamente los recursos naturales, cuidarlos y preservarlos para las futuras generaciones, Ener Sur S.A. tiene como meta prevenir y mitigar los efectos ambientales que pudieran causar la producción y transmisión de la energía eléctrica.

Ener Sur S.A. cuenta con un plan de manejo ambiental orientado a un estricto cumplimiento de los requisitos legales relacionados a sus actividades y a otros que las empresas de SUEZ Energy International en el Perú adopten, para lo cual cuentan con la certificación ISO 14000.

Algunas de las acciones que Ener Sur S.A. viene realizando para el cuidado y preservación del medio ambiente son:

- Uso y tratamiento del agua de mar
- Tratamiento de las aguas servidas.
- Proyecto de forestación.
- El precipitador electrostático, el cual atrapa casi el 100% de las partículas de ceniza volante que acompañan a los gases de combustión del caldero; es decir limpia estos gases antes de su salida a la atmósfera, evitando así que el aire se contamine.

El carbón de diseño garantizado contractualmente es el carbón: “PT Adaro de Indonesia”, cuyas propiedades físico químicas del carbón de garantía está dentro del

rango de las especificaciones del Estudio de Impacto Ambiental comprometidas por Ener Sur S.A. para la Central Térmica de ILO21.

La combustión de carbón pulverizado (PF) es el método usado para quemar carbón para generación eléctrica.

El sistema de preparación del carbón, secado, molienda al tamaño especificado y alimentación del combustible mediante transporte neumático a los quemadores, está completamente integrado con la caldera. El aire que transporta el carbón es una pequeña fracción del aire total de combustión. El resto del aire de combustión es inyectado separadamente y mezclado con el combustible en la cámara de combustión. Las paredes de la cámara de combustión están refrigeradas por vapor. El diseño de la cámara de combustión tiene que suministrar suficiente tiempo de residencia para garantizar una perfecta combustión y enfriar las cenizas volantes por debajo de su temperatura de reblandecimiento evitando su acumulación sobre los intercambiadores de calor.

El carbón es molido, pulverizado e inyectado con aire a la caldera. El carbón pulverizado tiene una gran área superficial, lo cual facilita su combustión en los quemadores. El calor generado es usado para producir vapor a altas presiones y temperaturas para activar las turbinas y generar electricidad. En la actualidad casi toda la electricidad generada en el mundo en plantas térmicas a carbón es producida usando sistemas de carbón pulverizado.

Las emisiones de la combustión de carbón pulverizado pueden ser reducidas mediante tecnologías de limpieza. Los precipitadores electrostáticos y/o filtros de manga pueden remover más del 99% de la ceniza volante de los gases de combustión. Los métodos de desulfurización de gases de combustión pueden remover entre 90-97% de los óxidos de azufre de los gases y pueden convertirlos en yeso para uso en construcción.

El edificio de turbinas está situado con su eje mayor orientado en dirección NO-SE, prácticamente paralelo a la línea de playa. Los ejes de cada caldera y del edificio de turbinas son perpendiculares. Entre el edificio de turbinas y cada caldera se encuentran situados los silos de carbón del tipo cilíndrico cónico, son tres silos por grupo, con sus pulverizadores correspondientes en la parte inferior. El eje de los precipitadores electrostáticos está a continuación de las calderas, seguido se encuentra la chimenea,

con un tubo común para los gases de salida de las dos calderas. Tiene 130 m de altura, 4,95 m. de diámetro interior y es de hormigón con un liner de acero. También se encuentran dentro de esta área los silos de cenizas y de escoria, dotados de una fácil accesibilidad. Ver: Figura 3.02 Vista General de la Central termoeléctrica ILO 21, Figura 3.03 Vista interior de Central Termoeléctrica y Figura 3.04 Vista de los Silos donde se almacena la ceniza volante.



Figura 3.02. Vista General de la Central Termoeléctrica ILO21



Figura 3.03. Vista Interior de las Instalaciones de Central Termoeléctrica ILO21



Figura 3.04: Vista de los Silos donde se Almacena la Ceniza Volante

3.2 Ceniza Volante

Se define a la ceniza volante mediante la norma ASTM C593-95 como el residuo finamente dividido que resulta de la combustión de carbón en polvo que es transportado desde la caldera por los gases de combustión.

Las características físicas y químicas de las cenizas volantes varían gradualmente dependiendo del método de combustión y forma de las partículas de las cenizas volantes.

De acuerdo con el significado, los carbones procedentes de fuentes diferentes producen diferentes características de combustión y estas diferencias influyen en la eficacia de la ceniza volante como un estabilizador de suelo. Estas diferentes fuentes se pueden clasificar en carbón sub-bituminoso, bituminoso y de antracita. Cada uno de ellos tiene diferentes propiedades basadas en el contenido de carbón, la dureza y la edad geológica.

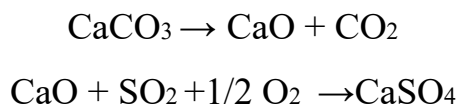
Este apartado de la norma ASTM C593-95 contiene información básica relacionada con la composición de la ceniza volante, va a ayudar a ilustrar el rango de valores de las propiedades que este material puede tener.

Dos de las principales tecnologías basadas para la generación de energía son: carbón pulverizado (PC), y combustión de fondo fluido (FBC). La tecnología del PC es el método más popular y se refiere a cualquier proceso de combustión que utiliza el carbón molido muy fino en el proceso. En este tipo de sistema, el carbón se procesa mediante la molienda a una consistencia muy fina para la combustión y la ceniza es formada en la cámara de combustión, mientras sucede la combustión carbón, Undeerc (2007).

Este proceso resulta en 65% a 85% de cenizas volantes, mientras que el resto de material es de cenizas de fondo y escorias en la caldera.

La tecnología FBC utiliza una caldera de carbón en donde se lleva a cabo la combustión de carbón, mediante la mezcla de carbón con un absorbente como la piedra caliza (CaCO_3), dolomita o material de fondo. Es un método de combustión de bajo costo para la obtención de la energía sobre todo a partir del carbón con alto contenido de azufre en una forma ambientalmente aceptable.

La mezcla de material combustible y el fondo se vuelven fluido durante el proceso de combustión para permitir la combustión completa y la eliminación del gas azufre. En este proceso el azufre en el carbón sale como dióxido de azufre (SO_2) y se convierte en sulfato cálcico (CaSO_4) Anthony et al., 2003.



3.3 Clasificación de Ceniza Volante

De acuerdo con la norma ASTM C618, las cenizas volantes se pueden clasificar en dos tipos principales, la clase C de ceniza volante y la clase F. Esta clasificación depende principalmente de los porcentajes de sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), y óxido férrico (Fe_2O_3). Los requerimientos químicos de ambas clases de Cenizas Volantes se

muestran en la Tabla 3.01. Las cenizas volantes de clase C se produce normalmente de lignito o por la combustión del carbón sub-bituminoso. Este tipo de ceniza volante tiene propiedades cementantes y puzolánicas. El término cementante significa que el material se endurece en presencia del agua y el término puzolánico significa que en presencia de agua, las cenizas volantes reaccionan con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias, para producir también compuestos de cemento. Las cenizas volantes clase F se produce a partir de la combustión del carbón de antracita o bituminoso y se considera que solo tienen propiedades puzolánicas.

Tabla 3.01 Requerimientos Químicos de Ceniza Volante de acuerdo a ASTM C 618

Composición Química		Clase	
		F	C
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	Min %	70	50
SO ₃	Max %	5	5
Contenido de Humedad	Max %	3	3
Pérdida por Ignición	Max %	6	6

Estas dos clases de cenizas volantes (C y F) se consideran los tipos más comunes de ceniza volante. Sin embargo, como se mencionó antes, los materiales de ceniza volante tienen una amplia gama de propiedades y características que dependen de factores tales como tipo de carbón, proceso de combustión, aditivos, entre otros. Muchas cenizas volantes no pueden caer dentro de estas dos categorías.

3.4 Propiedades de la Ceniza Volante

De acuerdo con M.C. Alonso et al. (1995) las cenizas volantes presentan las siguientes propiedades:

1. Capacidad reactiva, lo que las hace aptas para múltiples aplicaciones. Otra de sus propiedades es la puzolánica e hidráulica, aunque se necesita de un período más o menos largo de tiempo para que se manifieste su reactividad puzolánica.

2. Las cenizas volantes aumentan la trabajabilidad del material en estado plástico, debido a un aumento en la dispersión de las partículas del sistema.

3. Las cenizas volantes en los morteros disminuyen las expansiones asociadas a la reacción árido-álcalis, disminuyendo la pérdida por durabilidad.

4. El contenido de agua libre (que no reacciona con el cemento) es mayor en presencia de cenizas volantes a primeras edades, y por lo tanto la porosidad del sistema también será mayor. Sin embargo, dado que las cenizas volantes aumentan la trabajabilidad, es posible reducir la relación agua / cemento, contrarrestando la mayor porosidad.

5. Las resistencias mecánicas al utilizar cenizas volantes serán menores en las primeras edades, comparadas con las alcanzadas en cementos Portland. Las cenizas actúan como un diluyente inerte, durante el tiempo de incubación de la reacción puzolánica. A edades largas se produce un refinamiento de la estructura porosa debido a la evolución de la actividad puzolánica.

6. Las cenizas volantes reducen el calor de hidratación en el cemento debido al menor contenido de alita (C_3S) procedente del clinker Portland. Este compuesto es el responsable en su mayor parte del calor desprendido durante la hidratación del cemento Portland. La reacción puzolánica también es exotérmica, pero su desprendimiento es progresivo en el tiempo.

7. Las cenizas volantes incorporadas al cemento mejoran su durabilidad en determinados ambientes sulfatados y de agua de mar. Esto se debe a una mayor impermeabilidad y a la reducción en el contenido de portlandita (SC_3). Esto último, inhibe la formación de etringita expansiva. El aumento en la impermeabilidad se debe a que los productos formados durante la actividad puzolánica se depositan en el interior de los poros capilares interconectados, dificultando la penetración de los iones sulfato y cloruro.

Este subproducto industrial posee muchas ventajas para ser empleado en la construcción. Al tener un alto volumen de producción garantiza los volúmenes de suministro que se requieren en este sector; se constituye además, en un material con una

reactividad tal que en determinadas condiciones puede comportarse de manera similar como lo hace un cemento Portland y al presentarse en estado pulverulento, hace innecesario cualquier tipo de transformación previa a su uso, constituyéndose además en una materia prima viable económicamente Criado et al. (2006). Las cenizas volantes permiten que la industria del concreto utilice grandes cantidades de este material cementante suplementario con el fin de reducir el consumo de cemento Portland por unidad de volumen de hormigón Fernández C.y Vásquez (2008b).

3.5 Estabilización de Suelo Arcilloso con Cenizas de Carbón

Las cenizas volantes son procedentes de la combustión en las centrales termoeléctricas. La composición de cada una de las clases de ceniza y el porcentaje de carbón encontrado en éstas, depende del proceso que se realice en cada una de las plantas de la termoeléctrica. Las cenizas son granos finos compuestos básicamente por silicatos, aluminios, cal libre y algunos óxidos que permiten una reacción puzolánica con el suelo arcilloso que al igual que otras sustancias reduce el índice de expansión.

Una concentración de 25% de cenizas en el suelo puede resultar muy beneficiosa, afectando la granulometría, floculando los porcentajes de arcillas del suelo y reduciendo el límite líquido y el índice plástico del suelo. Las reacciones puzolánicas permiten incrementar la capacidad de soporte de la subrasante y con ello mejorar las estructuras viales en carreteras.

Muchos investigadores han estudiado el mecanismo que contribuye al proceso de estabilización de suelos tratados con cenizas volantes. Según Acosta et al. (2003) existen tres mecanismos principales contribuyendo a la estabilización. El primero es que la resistencia del suelo aumenta como resultado de la cementación producida a partir de la hidratación de aluminato tricálcico presentes en las cenizas volantes. Otro mecanismo es que la cal libre (CaO) en las cenizas volantes reacciona con los minerales de arcilla, causando compresión de la capa de absorción y la reducción en la plasticidad. Finalmente, la cal libre que no hace reaccionar con los minerales de arcilla se encuentra disponible para el proceso de cementación adicional a través de la reacción puzolánica con los compuestos de sílice y alúmina.

Cokca (2001) explica que la estabilización de los suelos tratados con cenizas volantes es el resultado de intercambio de catión entre las partículas de arcilla y aluminio (Al^{3+}), calcio (Ca^{2+}) y hierro (Fe^{3+}) en las cenizas volantes. Se describe el proceso de estabilización indicando que las cenizas volantes pueden proporcionar una adecuada matriz de cationes divalentes y trivalentes que bajo condiciones ionizadas origina la floculación de dispersión de las partículas de arcilla.

Cuando las cenizas volantes se mezclan con el suelo arcilloso, las características de compactación (densidad y óptimo contenido de humedad) de los suelos cambian. El proceso de hidratación se produce durante el contacto entre el suelo, la ceniza y el agua hace que la unión y cementación generen altos valores de densidad.

Todos los mecanismos de estabilización están relacionados con un cambio químico o proceso.

3.6 Capacidad de Soporte de la Subrasante

La determinación de la capacidad de soporte de los suelos, responde a la realización de ensayos sujetos a las recomendaciones de las Normas de uso general. La determinación del valor de CBR se realiza de acuerdo a las recomendaciones de las referencias en la cual requieren de los resultados del ensayo de Próctor para hallar el CBR a una determinada densidad. Sin embargo el requerimiento para determinar la estructura del pavimento para carreteras pavimentadas, demanda la determinación del valor del Módulo Resiliente, ensayos que en el Perú la mayoría de los laboratorios no cuentan con el equipo necesario para su ejecución. Sólo en el Laboratorio de la Oficina de Apoyo Tecnológico (OAT) del MTC cuenta con el equipo especial, pero poco se ha realizado como investigación. Uno de los trabajos de investigación del Laboratorio de Suelos de la UNI correlacionó estos valores empleando el equipo triaxial dinámico del Laboratorio Geotécnico del CISMID, Gutiérrez (2007).

Ante la escasez de equipos idóneos se recurre al empleo de correlaciones existentes entre CBR y el modulo resiliente de los suelos, para lo cual debido a diferentes trabajos

de investigación se han referido a más de tres decenas de fórmulas, aparte de las recomendadas por la AASHTO 2000. El problema que actualmente se presenta, es la falta de correspondencia entre los ensayos y la realidad. Mientras que los trabajos se presenten en zonas áridas o de baja precipitación, los valores de la compactación del Próctor y la determinación del valor de CBR, cumplen porque la cantidad óptima de agua (OCH) se logra añadiendo agua a la muestra. Gutiérrez (2007).

A partir de la determinación del CBR, se evalúa el método sugerido por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE), El procedimiento de este método se basa en ecuaciones que permiten determinar el espesor de material requerido sobre una capa o subrasante de un CBR conocido. La condición es que el CBR del material de la capa superior sea mayor que el de la subyacente. El espesor del pavimento obtenido mediante este método es tal que permite un cierto número de repeticiones, antes que la estructura alcance un nivel de deformación que corresponda a una serviciabilidad baja. Este método ha sido desarrollado para los caminos de bajo tránsito con repeticiones de hasta 1'000,000 de ejes equivalentes de 18,000 libras.

Para el diseño del pavimento de bajo volumen de tránsito se empleará el “Manual Para El Diseño de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito – MTC (2008)”. Teniendo en cuenta la capacidad de soporte en condiciones de servicio, junto con el tránsito y las características de los materiales de construcción de la superficie de rodadura, constituyen las variables básicas para el diseño del afirmado, que se colocará encima.

Se identifican en el manual del MTC cinco categorías de subrasante:

- S0 : SUBRASANTE MUY POBRE CBR < 3%
- S1 : SUBRASANTE POBRE CBR = 3% - 5%
- S2 : SUBRASANTE REGULAR CBR = 6 - 10%
- S3 : SUBRASANTE BUENA CBR = 11 - 19%
- S4 : SUBRASANTE MUY BUENA CBR > 20%

Otros de los problemas que se presentan es la profundidad adecuada en la cual se deba determinar el valor de soporte asociado a un punto de evaluación o calicata de

exploración. Luego es conveniente evaluar la transmisión de esfuerzos en una masa de suelo, basado en teoría de Boussinesq y la elaboración del bulbo de presión para la determinación de las Isóbaras.

3.7 Diseño del Pavimento

Para la presente investigación se realizará el dimensionamiento del pavimento por el Método USACE, por tratarse de vías rurales de bajo tránsito y donde hay escasez de materiales de canteras que cumplan las especificaciones técnicas; esto mayormente ocurre en zonas de selva. También se puede utilizar el método NAASRA (National Association of Australian State Road Authorities) para el diseño del pavimento en función del CBR de la subrasante. A continuación describiremos los métodos a emplear:

El método USACE consiste en que el valor de CBR se ubica en las abscisas de la Figura 3.1 luego se traza una recta vertical hasta intersectar con la curva correspondiente que representa los valores de los Ejes Equivalentes (N18), luego se traza una recta horizontal por el punto de intersección hallada anteriormente hasta intersectar con el eje vertical de la Figura 3.05 Curva para Diseño de espesores de pavimento y finalmente el punto de intersección hallado anteriormente, es el valor del espesor requerido para el pavimento con capa de rodadura granular en pulgadas.

**CURVAS PARA DISEÑO DE ESPESORES DE PAVIMENTOS
CON SUPERFICIE DE RODADURAS GRANULARES
(Método USACE)**

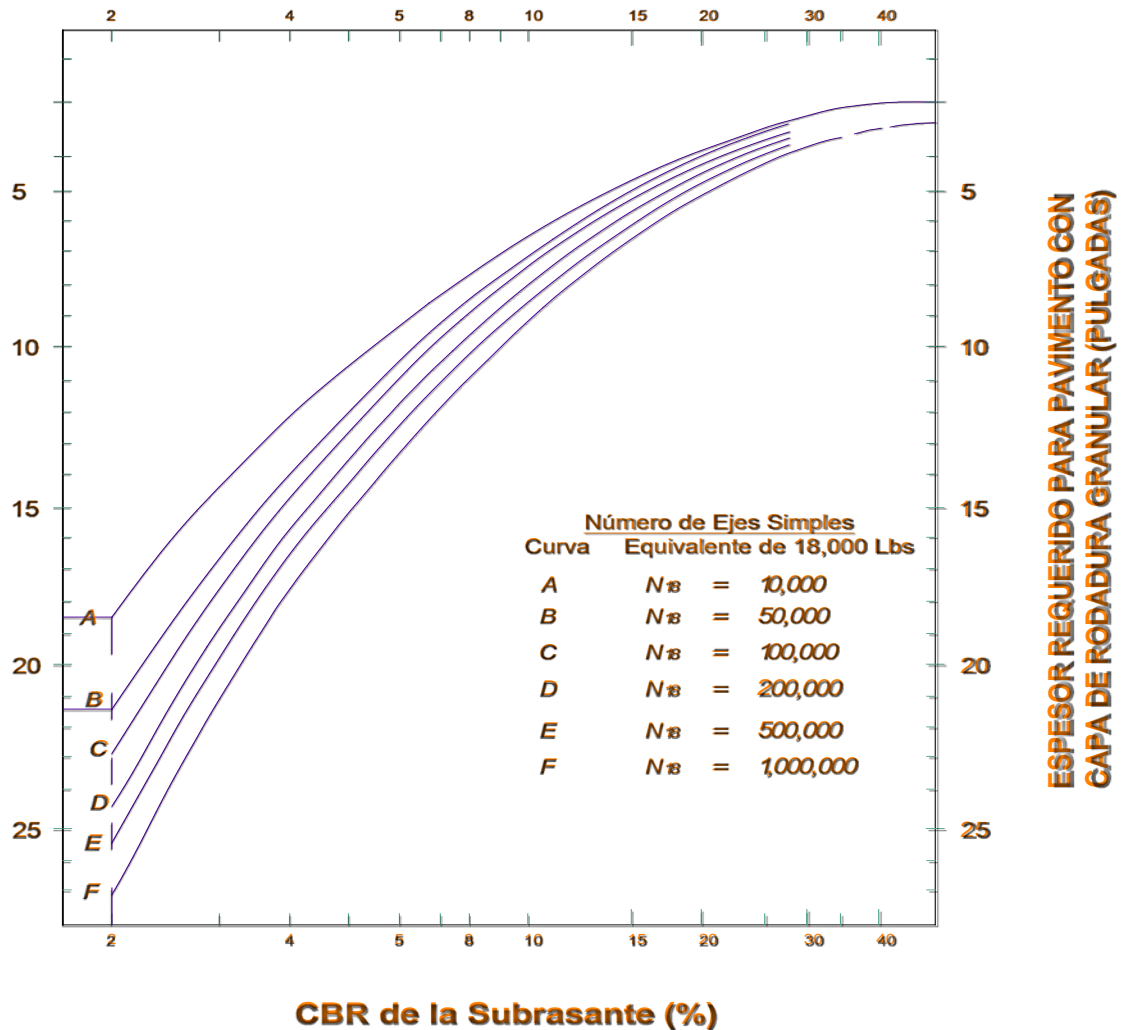


Figura 3.05: Curvas para Diseño de Espesores de Pavimento (MTC, 2008)

El método de diseño de pavimentos NAASRA: Consiste en el dimensionamiento de los espesores de la capa de afirmado, que se adoptó como representativa la siguiente ecuación del método NAASRA (National Association of Australian State Road Authorities (hoy AUSTROADS) que relaciona el valor de soporte del suelo (CBR) y la carga actuante sobre el afirmado, expresada en número de repeticiones de EE (ejes equivalentes). En la Figura 3.06 se aprecia las curvas para subrasante de acuerdo a los CBRs obtenidos de ensayos en la misma y de acuerdo al tráfico ligero, se puede obtener el espesor de la capa de afirmado.

$$e = [219 - 211 \times (\log_{10} \text{CBR}) + 58 \times (\log_{10} \text{CBR})^2] \times \log_{10} (N_{\text{rep}}/120)$$

Donde:

e = espesor de la capa de afirmado en mm.

CBR = valor de CBR de la subrasante.

N_{rep} = número de repeticiones de EE para el carril de diseño.

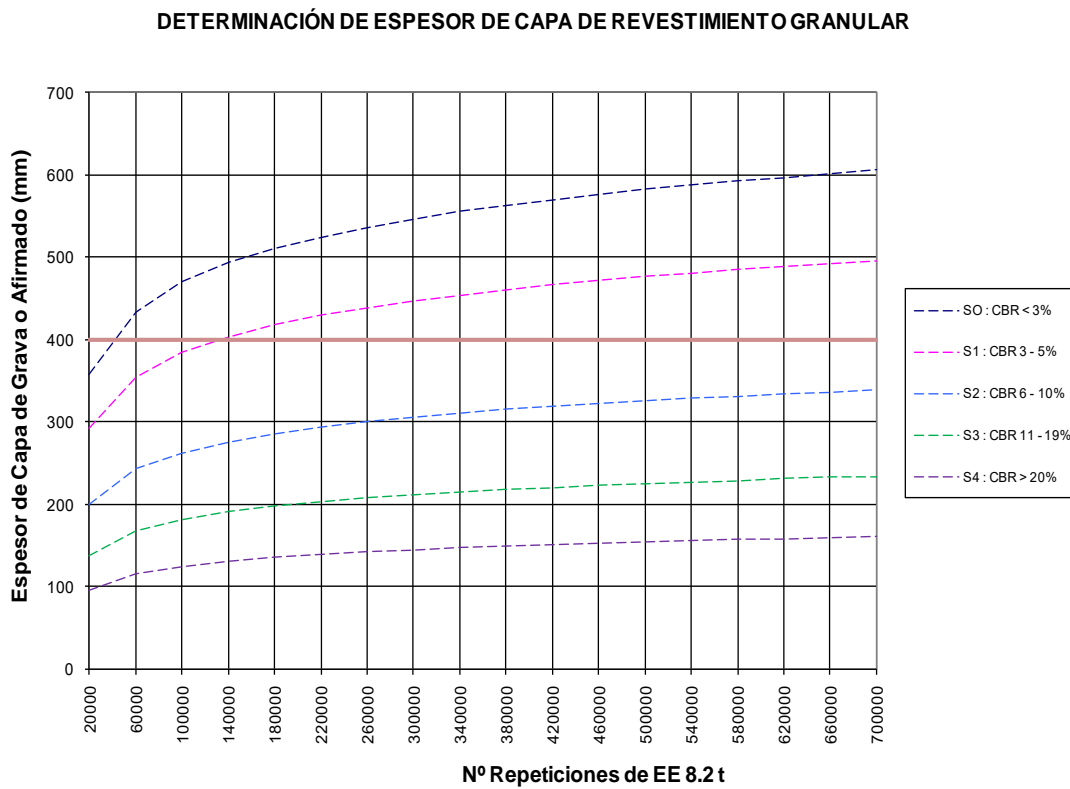


Figura 3.06: Curvas para Diseño de Espesores de Pavimento (MTC, 2008)

CAPITULO IV.- PROGRAMA EXPERIMENTAL

El programa experimental considera primero hacer ensayos a la muestra en estado natural (arcilla al 100% denominada subrasante) y luego con la adición de la ceniza volante proveniente de la central termoeléctrica de Ilo. Se ha considerado adicionar cemento al suelo natural además de la ceniza volante a fin de obtener mejores resultados.

Los ensayos de laboratorio de evaluación de la mezcla han permitido caracterizar mecánicamente a los materiales. Se ha considerado ensayos de CBR del material natural y de la mezcla de materiales de arcilla con ceniza volante y cemento.

Más adelante se detalla los ensayos que conforman el programa experimental, los materiales utilizados y los métodos empleados para la investigación; así como los detalles de ejecución de las pruebas y equipos utilizados en los ensayos de laboratorio.

Los ensayos de laboratorio fueron realizados, en el Laboratorio N°02 de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional de Ingeniería, asimismo el análisis multielemental de rayos X a las muestras de arcilla y ceniza volante fueron realizadas en el Laboratorio de INGEMMET y los ensayos de materia orgánica a los dos materiales ceniza y arcilla se realizaron en el Laboratorio Químico LASA.

4.1 Materiales Investigados

Los materiales utilizados en el presente trabajo son: suelo natural (arcilla), cenizas volantes y cemento, así como la combinación de los mismos en diferentes proporciones. El suelo arcilloso natural se obtuvo en el talud del km. 132, lado derecho de la carretera Villarica - Puerto Bermúdez, correspondiente a zona de selva central, ubicada en la provincia de Oxapampa y departamento de Pasco, ver Figura 4.01 y 4.02. Mientras que la ceniza volante se trajo de la Central Termoeléctrica de Ilo 21, ubicada en Moquegua.

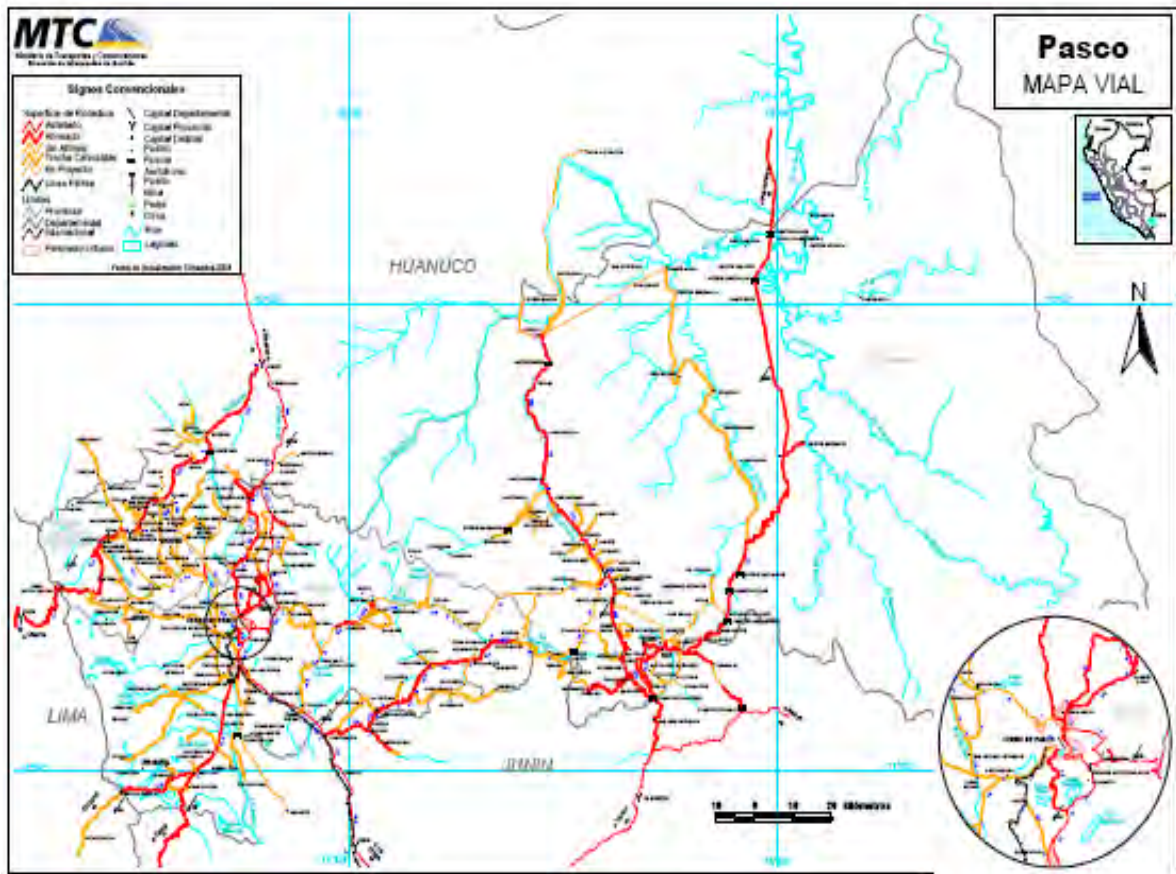


Figura 4.01 Ubicación de la Zona en Estudio



Figura4.02 Vista del Lugar de Obtención de Arcilla en Villarica y Producto Final Pasante la Malla N°4

4.1.1 Ceniza Volante

La recolección de la muestra se realizó en la central termoeléctrica Ilo 21, ubicada en la Región Moquegua, ciudad de Ilo, a 1240.5 Km al sur de Lima. En la Figura 4.03 Vista de la Planta y Zona de Obtención de Ceniza Volante y Figura 4.04 Ceniza Volante. Es la única planta en el Perú que opera con carbón y que genera un total de 141.83 MW de potencia efectiva. Las operaciones se inician con la llegada de buques de hasta 70,000 toneladas, que atracan en la plataforma del muelle propio de más de 1 km. Una faja transportadora agiliza las labores y las canchas de carbón acopian 200,000 toneladas. (Fuente :www.enersur.com.pe y elaboración propia).



Figura 4.03: Vista de la Planta y Zona de Obtención de Ceniza Volante



Figura 4.04: Ceniza Volante

Entre las tecnologías limpias de carbón para la combustión de carbón pulverizado que reducen emisiones de nitrógeno, se encuentran los quemadores y las técnicas de requemado. Estas modifican el proceso de combustión para reducir emisiones hasta el 50% y están siendo ampliamente adoptadas, por cuanto ellas pueden ser instaladas en plantas existentes. El método de reducción catalítica selectiva es una tecnología de post-combustión que puede lograr reducciones del 80-90%. Quiroz (2005).

Los carbones más utilizados en la Central Termoeléctrica se encuentran en la Tabla 4.01.

Tabla 4.01.- Carbones Utilizados en la C.T. ILO21

compañía	Adaro*	Carbones del Guasare**	Glencore**	Carbocol**
Mina	Tutupan	Paso Diablo	Singleton	El Cerrejon
Carbon	Envirocal	P. D. Premium	Singleton	D
Puerto de Carga	Banjarmasin	Bulkwayuu	Newcastle	P. Bolivar
Pais de Origen	Indonesia	Venezuela	Australia	Colombia
US\$/t	44.38	47.13	43.08	48.0
US\$/GJ	1.96	1.60	1.50	1.780
Embarque	1	2	3	4

*El carbón ADARO es el carbón de diseño y según las condiciones contractuales utilizado para el cálculo del consumo específico de calor y cálculo del rendimiento de la unidad.

** Carbones utilizados en la operación de la central, que si bien el costo por unidad másica es mayor que el ADARO, el costo por unidad de energía es menor, que explica el uso de combustibles.

4.1.2 Cemento Portland

El cemento utilizado, Andino (Portland Tipo I), está destinado al uso común y corriente en construcciones de concreto y trabajos de albañilería. Su uso está recomendado en todas aquellas obras en las cuales requieren características que cumplen la Norma

ASTM C150 y NTP 334.009. La planta de fabricación se encuentra en Condorcocha-Tarma. En la Figura 4.05 se muestra el cemento utilizado.



Figura 4.05: Cemento Portland Tipo I

4.1.3 Mezcla de Suelo Arcilloso y Ceniza Volante

El suelo arcilloso y las cenizas volantes se secaron en horno a 60°C y luego se almacenaron en bolsas plásticas. Las mezclas de suelo, ceniza volante y cemento se midieron en peso respectivamente de acuerdo a las proporciones indicadas en Tabla 4.02 Proporción de mezcla y Símbolos Referentes a cada Material.

Tabla 4.02 – Proporción de Mezcla y Símbolos Referentes a cada Material.

Material/Mezcla	% de Suelo arcilloso	% de Ceniza Volante	% de Cemento	Símbolo
Suelo	100	0	0	S
Ceniza Volante	0	100	0	CV
Mezcla 1	80	20	0	S80/CV20
Mezcla 2	60	40	0	S60/CV40
Mezcla 3	90	7	3	S90/CV7/C3
Mezcla 4	80	17	3	S80/CV17/C3
Mezcla 5+ 7 días de curado	60	27	3	S60/CV27/C3

4.1.4 Mezcla de Suelo Arcilloso y Cemento

La estabilización con cemento se puede dividir en las categorías siguientes Medina, (1987):

- Suelo-cemento: una es endurecida por curado una mezcla íntima con el suelo compactado mecánicamente pulverizado, cemento portland y agua, y este endurecimiento evaluado por criterios de resistencia y durabilidad a la compresión de probetas de ensayo. Se utiliza normalmente como una base o sub-base; Solo algunas modificaciones o mejoras: un material que no es templado o semi-endurecido que se juzga por el cambio de los índices físicos y / o capacidad de carga del suelo. Se utiliza un bajo contenido de cemento no debe ser mayor que 5%. Puede ser utilizado como la sub-base o sub-base;
- Suelo-cemento plástico: se utiliza para una mayor cantidad de agua durante la mezcla para producir una consistencia de mortero en el momento de colocación. Se utiliza para el revestimiento de acequias, canales y terraplenes.

4.2. Ensayos de Laboratorio a Realizar

Las muestras representativas de arcilla, ceniza volante y la mezcla adicionando cemento fueron sometidas a los ensayos siguientes:

Características Físicas:

- Análisis Granulométrico por Tamizado (MTC E 107-ASTM D422)
- Humedad Natural (MTC E 108-ASTM D2216)
- Límites de Atterberg
 - Límite Líquido (MTC E 110–ASTM D4318)
 - Límite Plástico (MTC E 111-ASTM D4318)
 - Índice de Plasticidad (MTC E 111-ASTM D4318)
- Clasificación de Suelos método SUCS (ASTM D2487)
- Clasificación de Suelos método AASHTO (ASTM D3282)

Características Mecánicas:

- Próctor Modificado (MTC E 115-ASTMD1557)
- California Bearing Ratio (MTC E 132-ASTM D1883)

Los ensayos de laboratorio fueron realizados en el Laboratorio N°2 Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional de Ingeniería, de acuerdo a Normas ASTM. Los resultados de estos ensayos se presentan en el Anexo I. Los análisis químicos de materia orgánica en el Laboratorio "LASA" Ingenieros y el Análisis Mineralógico de Difracción de Rayos "X" en el Laboratorio de INGEMMET.

4.2.1 Ensayos Físicos y Mecánicos

El análisis granulométrico de un suelo tiene por finalidad determinar la proporción de sus diferentes elementos constituyentes, clasificados en función de su tamaño. Ver Figura 4.06 Ensayo granulométrico por tamizado.

De acuerdo al tamaño de las partículas de suelo, se definen los siguientes términos en la Tabla 4.03:

Tabla 4.03: Tipo y Tamaño de Partículas

Tipo de Material	Tamaño de las partículas
Grava	75 mm – 2 mm
Arena	Arena gruesa: 2 mm - 0.2 mm
	Arena fina: 0.2 mm - 0.05 mm
Limo	0.05 mm – 0.005 mm
Arcilla	Menor a 0.005 mm

El análisis de tamaño de partículas se realizó de acuerdo con la norma ASTM D 422. El suelo en cuestión está compuesto de una fracción gruesa y fina, por lo que se llevó a cabo esta prueba usando el material retenido en la malla N°200 y para el material que pasa se realizó la prueba de sedimentación. Para la fase correspondiente a los ensayos de sedimentación se utilizó la solución dispersante de hexametáfosfato de sodio.



Figura 4.06 : Ensayo de Análisis Granulométrico por Tamizado

Los llamados límites de Atterberg, son: el límite líquido (LL) determinación según norma ASTM D 4318 ó MTC E 110, el límite plástico (LP) determinación según norma MTC E 111. Ver Figura 4.07 Ensayo de Limite Liquido con la copa de Casagrande.



Figura 4.07: Ensayo de Limite Liquido con la Copa de Casagrande

El índice de plasticidad permite clasificar bastante bien un suelo. Un IP alto corresponde a un suelo de alta plasticidad. Por el contrario, un IP bajo es característico de un suelo de baja a nula plasticidad. Sobre todo esto se puede dar en la clasificación siguiente de la Tabla 4.04 Índice de Plasticidad y Característica de los Materiales.

Tabla 4.04: Índice de Plasticidad y Característica de los Materiales

INDICE DE PLASTICIDAD	CARACTERISTICA
IP > 20	Suelos muy arcillosos
20 > IP > 10	Suelos arcillosos
10 > IP > 4	Suelos poco arcillosos
IP = 0	Suelos exentos de arcilla

Para determinar la gravedad específica de la prueba de suelo se realizó de acuerdo a la norma ASTM D854. Ver Figura 4.08, Bomba de Vacíos para el Ensayo de Gravedad Específica.



Figura 4.08: Bomba de Vacíos para el Ensayo de Gravedad Específica

Se realizó el ensayo de Próctor Modificado método A y CBR según norma ASTM D 1883. Ver Figuras 4.09 y 4.10 de equipo de CBR y ensayos en ejecución.



Figura 4.09: Ensayo de CBR



Figura 4.10: Proceso de Saturación y Medición de Expansión en CBR

4.3 Ensayos de Caracterización Química

Debido a que se trabaja con las cenizas volantes que son provenientes de residuos del carbón de una central termoeléctrica, es importante realizar las pruebas para la determinación de compuestos químicos, peligrosos o no. Así que para asegurar la viabilidad de utilizar este tipo de residuos en la mezcla con el suelo arcilloso y que no

presente agresividad se ha realizado la caracterización mineralógica y el ensayo de materia orgánica del suelo y de la ceniza volante.

4.3.1 Caracterización Mineralógica (Difracción de Rayos X - DRX)

La composición química total de la muestra de cenizas y de la arcilla se obtuvo mediante la técnica de "Espectrometría de fluorescencia de rayos X dispersivo de energía".

Las muestras fueron examinadas por un espectrómetro de fluorescencia de rayos X modelo dispersivo de energía, de marca Shimadzu. Laboratorio de Rayos X (INGEMMET), SOFTWARE XRD 6000 VS. 4.1 que se ilustra en la Figura 4.11.



Figura 4.11: Vista de Equipo de Laboratorio para Difracción de Rayos X

El espectrómetro de fluorescencia de rayos X es un instrumento que determina el cualitativa y semi-cuantitativamente los elementos presentes en una muestra dada. Esto es posible mediante la aplicación de rayos X sobre la superficie de la muestra y posterior análisis de la fluorescencia de rayos X emitida. Es una técnica no destructiva para todos los tipos de muestras, incluyendo sólidos, líquidos o polvos, y por esta razón de interés para la caracterización de los materiales.

4.3.2 Análisis de Materia Orgánica

El ensayo se realizó por el método Walkley y Black. La materia orgánica es una mezcla heterogénea de sustancias de origen vegetal, animal y microbiana que, dentro del suelo, influyen sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas.

El método se basa en la oxidación por medio del Dicromato de Potasio que reacciona en un volumen con dos de Acido Sulfúrico concentrado. El exceso de Dicromato de Potasio se determina valorando con solución de Sulfato Ferroso Amoniacal en presencia como indicador Difenilamina Sulfúrica.

Previamente a la determinación de materia orgánica debemos estar seguros que no existen sales de cloro ya que pueden ser la fuente de error, en caso que existan se deben eliminar las sales solubles antes de la determinación. En la Tabla 4.05 se muestra los Niveles de Materia Orgánica.

Tabla 4.05 Niveles de Materia Orgánica

Niveles de Contenido	Porcentaje de materia orgánica
Bajo	0 - 2
Medio	2 - 4
Alto	Más de 4

CAPÍTULO V.- PRESENTACION Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se presenta e interpreta los resultados de ensayos de laboratorio realizados a las muestras de arcilla proveniente de la Selva Central, ceniza volante proveniente de la Central Termoeléctrica de Ilo y mezclas de las mismas adicionando cemento Portland Tipo I.

5.1 Ensayos de Caracterización Física

5.1.1 Distribución Granulométrica

Los análisis granulométricos se realizaron según norma ASTM D422. La Figura 5.01 se muestran las curvas granulométricas correspondientes al suelo arcilloso, ceniza volante y a las combinaciones de suelo arcilloso con ceniza volante.

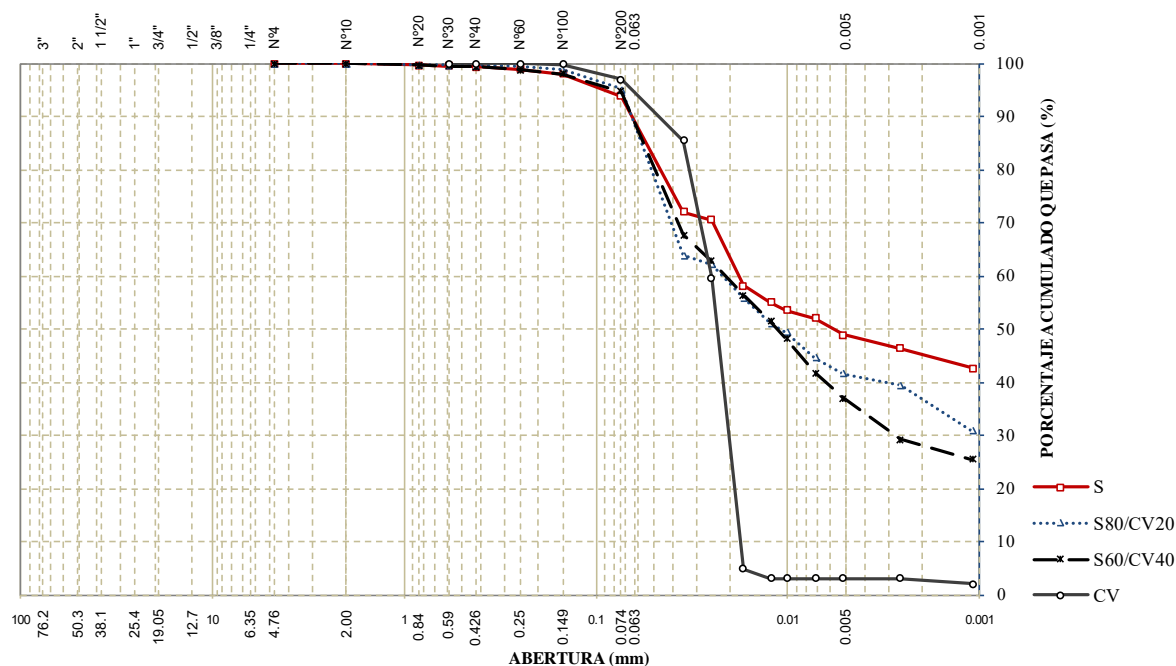


Figura 5.01 Curvas Granulométricas de Suelo Arcilloso, Ceniza Volante y Mezclas con Ceniza Volante

En la Figura 5.02 se tienen las curvas granulométricas correspondientes a la arcilla, ceniza volante y combinaciones de las mismas con el cemento portland tipo I, de acuerdo a la norma de ensayo ASTM D422.

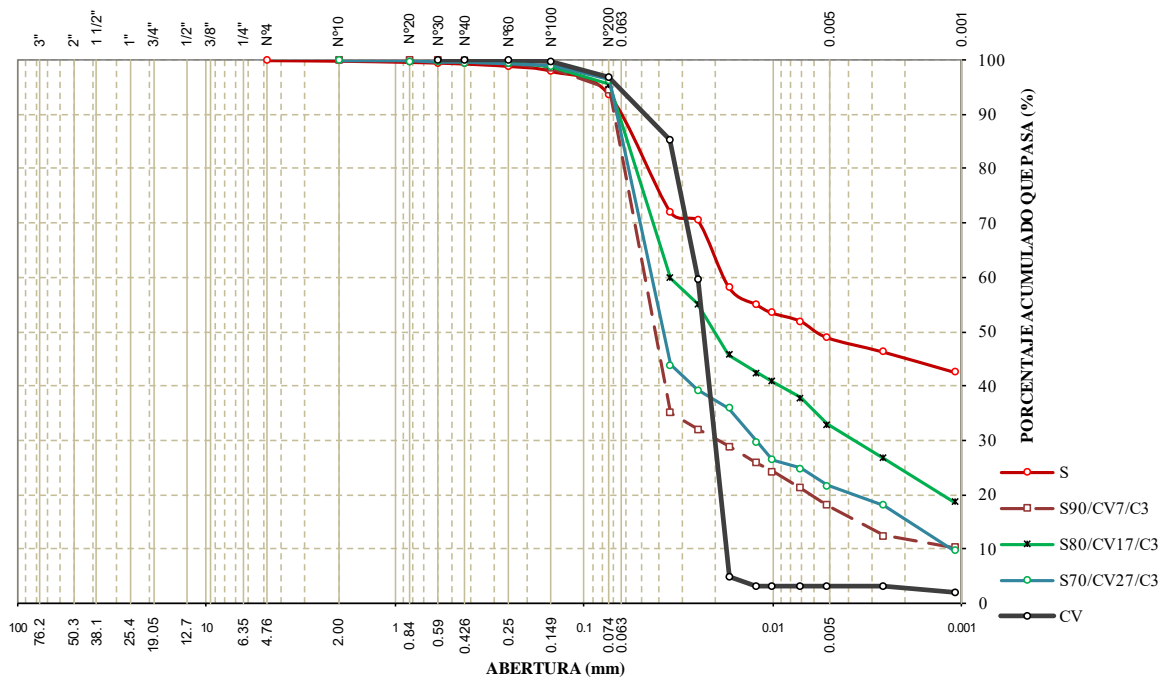


Figura 5.02 Curva Granulométrica de Suelo Arcilloso, Ceniza Volante y Mezclas con Ceniza Volante y Cemento

La Tabla 5.01 presenta los resultados, en porcentajes del ensayo de análisis granulométrico para un suelo, ceniza volante y mezclas, obtenidos en el presente estudio.

Tabla 5.01 Resultados de Ensayos de Análisis Granulométricos

MUESTRA	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR SEDIMENTACIÓN			
	Gravas (%)	Arenas (%)	Limos (%)	Arcillas y Coloides (%)
S	0.0	6.3	47.4	46.3
S80/CV20	0.0	4.9	55.8	39.3
S60/CV40	0.0	4.6	68.5	26.8
CV	0.0	5.4	82.2	12.4

En la Tabla 5.02 se presentan los resultados de los ensayos granulométricos de la arcilla, ceniza volante y cemento.

Tabla 5.02 Resultados de Ensayos de Análisis Granulométricos

MUESTRA	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR SEDIMENTACIÓN			
	Gravas (%)	Arenas (%)	Limos (%)	Arcillas y Coloides (%)
S	0.0	6.3	47.4	46.3
S90/CV7/C3	0.0	6.3	90.7	3.1
S80/CV17/C3	0.0	5.3	65.5	29.2
S70/CV27/C3	0.0	3.7	62.3	34.0
CV	0.0	5.4	82.2	12.4

5.1.2 Límites de Atterberg

Los ensayos para determinar el Límite Líquido (LL) y el Límite Plástico (LP), fueron realizados conforme a Norma ASTM D4318. Los resultados se pueden observar que la ceniza volante no presenta plasticidad y que la arcilla es de alta plasticidad. A medida que se adiciona la ceniza volante en el suelo arcilloso la mezcla baja la plasticidad a la arcilla. En las Tabla 5.03 y 5.04, se observan los resultados de Límite Líquido, Límite Plástico e Índice Plástico de la arcilla, ceniza volante y combinaciones.

Tabla 5.03 Resultados de Límites de Consistencia

Material/Mezcla	Límites de Consistencia		
	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice Plástico (%)
S	52	24	28
S80/CV20	48	22	26
S60/CV40	40	18	22
CV	-	NP	NP

Tabla 5.04 Resultados de Límites de Consistencia

Material/Mezcla	Límites de Consistencia		
	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice Plástico (%)
S	52	24	28
S90/CV7/C3	46	27	19
S80/CV17/C3	48	33	15
S70/CV27/C3	46	32	14
CV	-	NP	NP

En la Fig. 5.03 y Fig. 5.04, se observa la variación de los resultados de los límites de consistencia de la arcilla, ceniza volante y combinaciones con cemento. También se observa que a medida que se incrementa el contenido de ceniza volante disminuye la humedad de los valores de límites de consistencia e índice plástico.

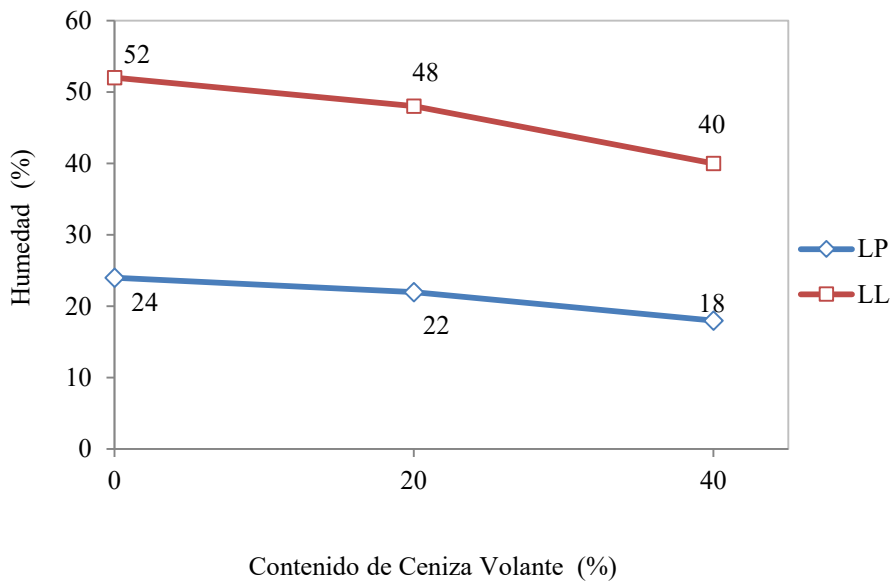


Figura 5.03 Variación de Límites de Consistencia con el Contenido de Ceniza Volante

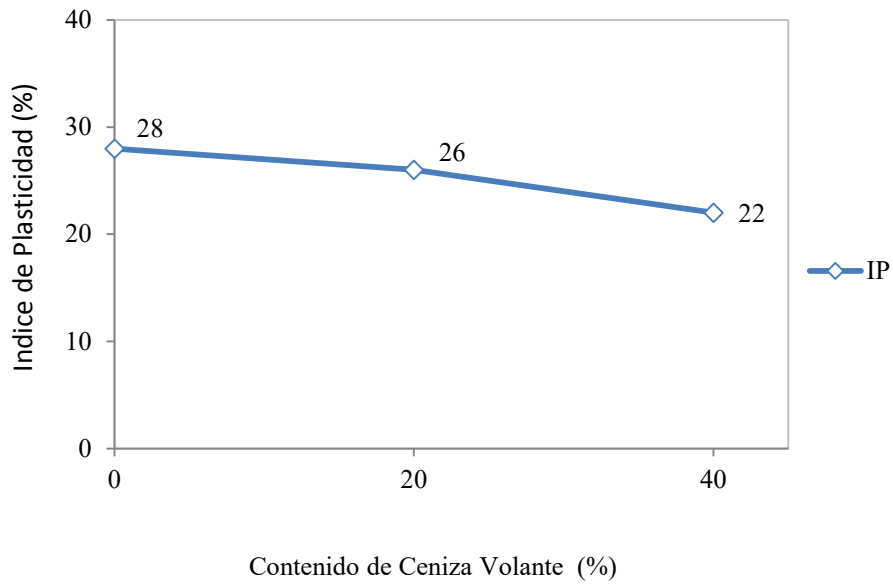


Figura 5.04 Variación de Índice de Plasticidad con el Contenido de Ceniza Volante

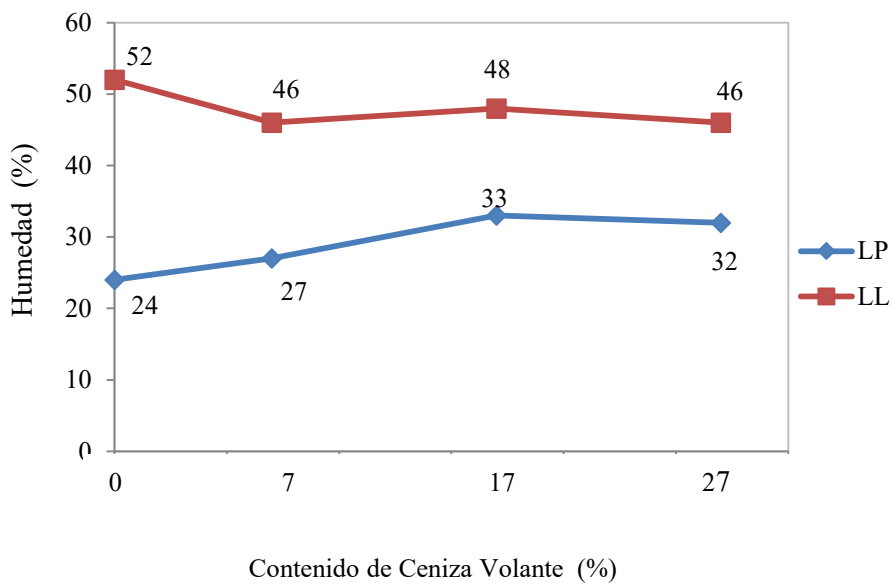


Figura 5.05 Variación de Límites de Consistencia con el Contenido de Ceniza Volante y Cemento 3%

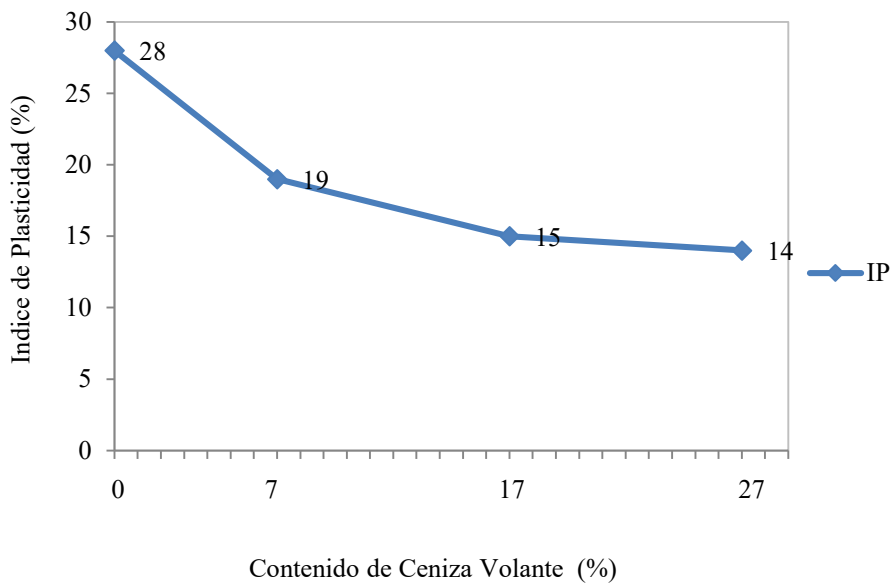


Figura 5.06 Variación de Índice de Plasticidad con el Contenido de Ceniza Volante y Cemento 3%

En las Figuras 5.05 y 5.06 se observa la variación de los resultados de los límites de consistencia de la mezcla de arcilla, ceniza volante y combinaciones con cemento. También se observa que a medida que se incrementa el contenido de ceniza volante el límite líquido disminuye y el límite plástico se incrementa, la humedad de los valores de límites de consistencia e índice plástico.

5.1.3 Gravedad Específica de Sólidos

Los ensayos de gravedad específica se realizaron según norma ASTM D698.

En las Tablas 5.05, 5.06 y Figuras 5.07 y 5.08, se observan los resultados de ensayos, donde se observa que a medida que se adiciona la ceniza volante, disminuye el valor de la gravedad específica de sólidos.

Tabla 5.05 Resultados de Ensayos de Gravedad Específica de Sólidos

Material/Mezcla	Gravedad Especifica de Sólidos (Gs)
S	2.670
S80/CV20	2.574
S60/CV40	2.605
CV	2.420

Tabla 5.06 Resultados de Ensayos de Gravedad Específica de Sólidos

Material/Mezcla	Gravedad Especifica de Sólidos (Gs)
S	2.670
S90/CV7/C3	2.695
S80/CV17/C3	2.683
S70/CV27/C3	2.672
CV	2.420

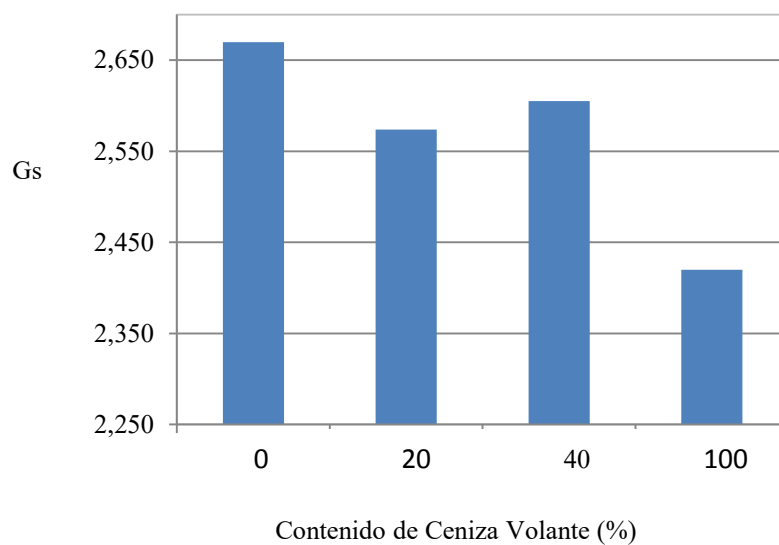


Figura 5.07 Variación de la Gravedad Específica con el Contenido de Ceniza Volante

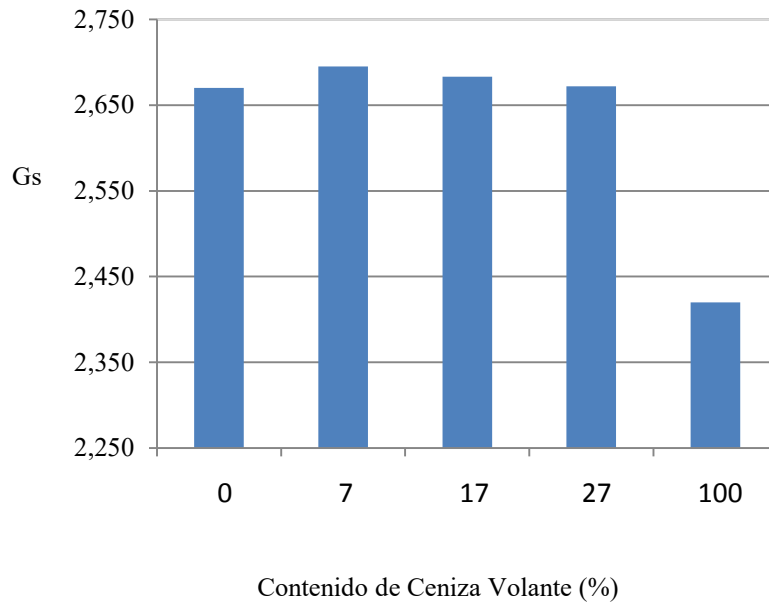


Figura 5.08 Variación de la Gravedad Específica con el Contenido de Ceniza Volante y Cemento 3%.

5.1.4 Clasificación de Suelos

La clasificación de la arcilla estudiada es un material tipo CH, se trata de un suelo tipo “Arcilla inorgánica de alta plasticidad”. En el caso de un material CL se denomina “Arcillas inorgánicas de compresibilidad baja” y para un material ML se trata de un material “Limo Inorgánico de baja compresibilidad”. En las Tablas N°5.07 y 5.08 sobre Clasificación SUCS y AASHTO de materiales, se observa el grupo al que pertenece cada muestra y la denominación del material encontrado.

La clasificación AASHTO, se realizó mediante la norma ASTM D 3282.

El material natural arcilloso (S) corresponde al grupo A-7-6 lo que corresponde a suelos arcillosos, que es deficiente para el caso de un terreno de fundación. En el caso de las combinaciones A-6, A-7-6 y A-7-5 resultan suelos arcillosos, deficientes para ser usados en carretera pero de mejores características que la arcilla y finalmente en el caso

de la ceniza volante (CV) corresponde al grupo A-4(0) de materiales limosos, que es regular para ser usado como fundación.

Tabla 5.07 Clasificación de Suelos y Mezclas

Material/Mezcla	Clasificación SUCS		Clasificación AASHTO	
	Grupo	Material	Grupo	Material
S	CH	Suelos arcillosos	A-7-6 (14)	Arcilla de alta plasticidad
S80/CV20	CL	Suelos arcillosos	A-7-6 (13)	Arcilla
S60/CV40	CL	Suelos arcillosos	A-6 (20)	Arcilla
CV	ML	Suelos limosos	A-4 (0)	Limo

CV= Ceniza Volante, S= Suelo.

Tabla 5.08 Clasificación de Materiales y Mezclas de Suelo Arcilloso, Ceniza Volante y Cemento 3%

Material/Mezcla	Clasificación SUCS		Clasificación AASHTO	
	Grupo	Material	Grupo	Material
S	CH	Suelos arcillosos	A-7-6 (14)	Arcilla de alta plasticidad
S90/CV7/C3	CL	Suelos arcillosos	A-7-6 (7)	Arcilla
S80/CV17/C3	ML	Suelos arcillosos	A-7-5 (3)	Limo
S70/CV27/C3	ML	Suelos arcillosos	A-7-5 (3)	Limo
CV	ML	Suelos limosos	A-4 (0)	Limo

CV= Ceniza Volante, S= Suelo y C=Cemento.

5.2 Ensayos de Caracterización Química

5.2.1 Composición Mineralógica de Materiales Investigados

Los resultados de la composición química de las muestras de suelo están presentados en las Tablas 5.09 y 5.10 y 5.11, ensayos que fueron realizados en el Laboratorio de INGEMMET. En las Figuras 5.09, 5.10, 5.11 y 5.12 se muestran las salidas gráficas del ensayo a las muestras de arcilla y ceniza estudiadas.

Los componentes principales del suelo arcilloso son SiO_2 , Al_2O_3 , y Fe_2O_3 , los cuales participan activamente en el proceso de estabilización (REZENDE, 1999).

Tabla 5.09 Elementos Químicos Presentes en la Arcilla

N°	Mineral	Fórmula	%
1	Cuarzo	SiO_2	89.37
2	Lepidolita	$\text{K}(\text{Li}, \text{Al})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$	4.78
3	Anatasa	TiO_2	2.15
4	Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	1.79
5	Hematita	Fe_2O_3	1.19
6	Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$	0.72

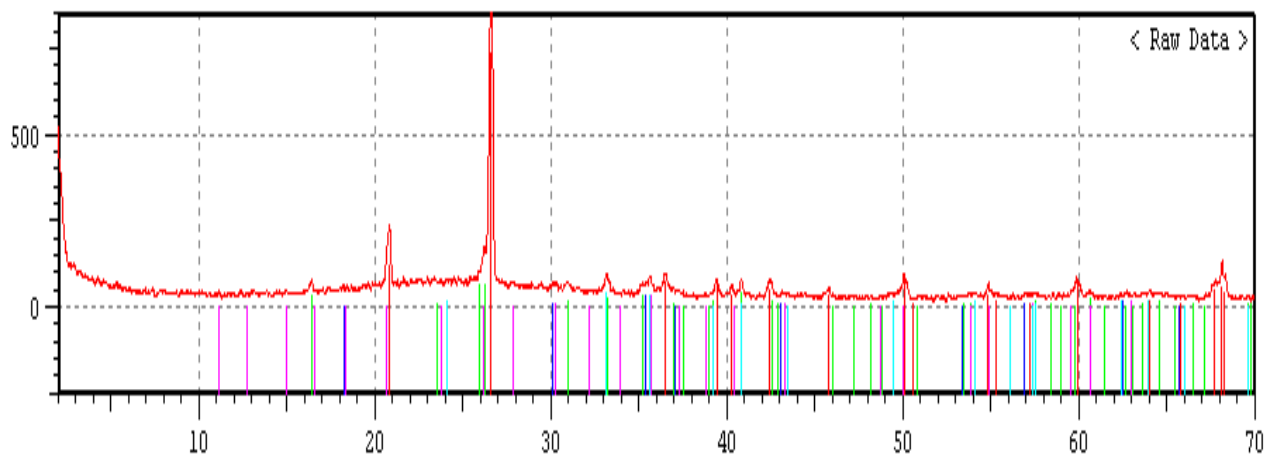
Tabla 5.10 Elementos Químicos Presentes en la Ceniza Volante

N°	Mineral	Fórmula	%
1	Cuarzo	SiO_2	73.67
2	Amorfo	-	11.67
3	Mullita	$\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$	6.50
4	Hematita	Fe_2O_3	3.50
5	Maghemita	Fe_2O_3	2.83
6	Magnetita	Fe_3O_4	1.83

Tabla 5.11 Elementos Químicos Presentes en Ceniza Volante Determinados en Central Termoeléctrica de Ilo 21

N°	Fórmula	%
1	SiO ₂	57.100
2	Al ₂ O ₃	28.700
3	Fe ₂ O ₃	4.400
4	CaO	2.000
5	K ₂ O	2.600
6	MgO	0.720
7	TiO ₂	1.300
8	ZrO ₂	0.130
9	S	0.400
10	PbO	<200ppm
11	Cl-	0.090
12	SO ₃	1.000

[GroupName] ORD EXT-2011 [DataName] OT 017-11 CENIZA VOLANTE [Date/Time] 11-08-11 10:04:06



No	Card	Chemical Formula	Chemical Name	Mineral Name
1	46-1045	SiO ₂	Silicon Oxide	Quartz
2	15-0776	Al ₆ Si ₂ O ₁₃	Aluminum Silicate	Mullite
3	19-0629	Fe+2Fe ₂ +3O ₄	Iron Oxide	Magnetite
4	25-1402	Fe ₂ O ₃	Iron Oxide	Maghemite-\ITQ\R
5	33-0664	Fe ₂ O ₃	Iron Oxide	Hematite

Figura 5.09 Difractograma Detallado de la Ceniza Volante

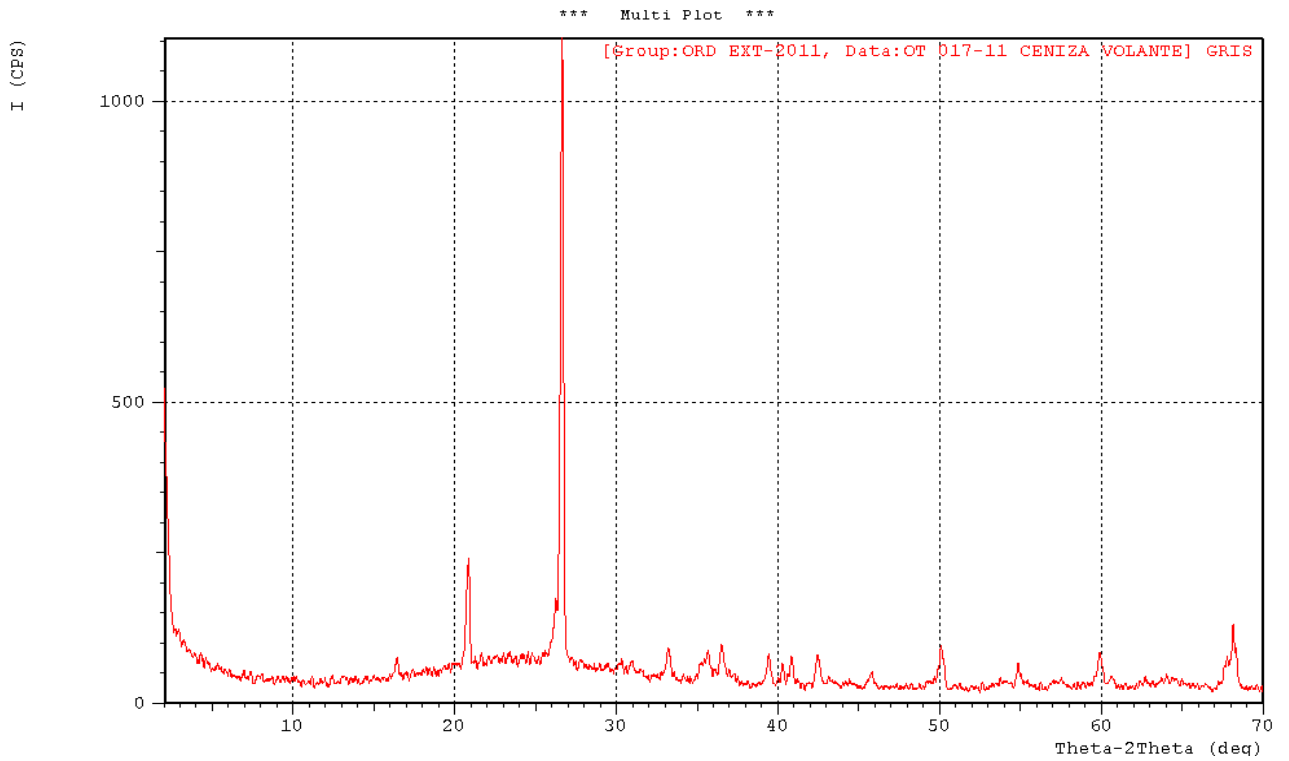
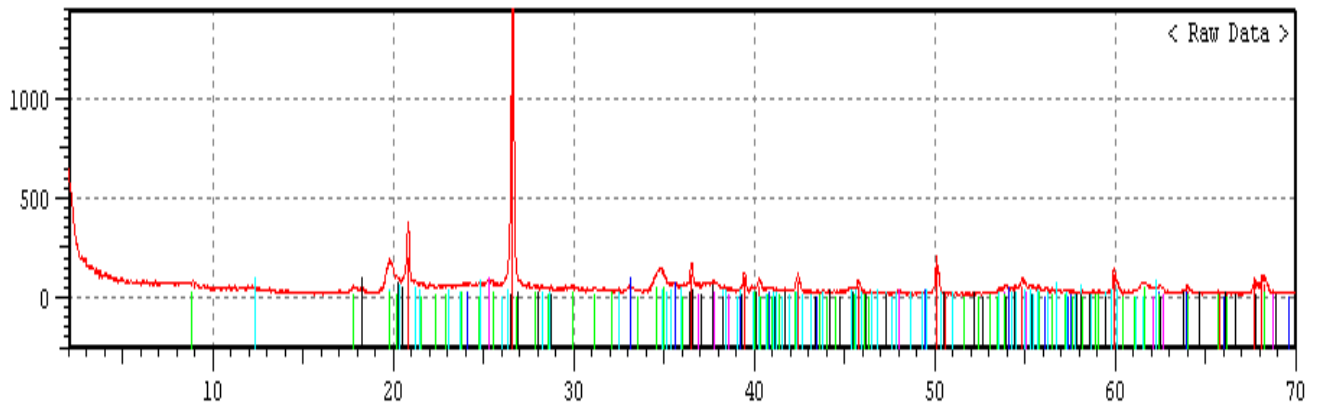


Figura 5.10 Difractograma de la Ceniza Volante

[GroupName] ORD EXT-2011 [DataName] OT 017-11 ARCILLA [Date/Time] 11-08-11 09:27:54



No	Card	Chemical Formula	Chemical Name	Mineral Name
1	46-1045	SiO ₂	Silicon Oxide	Quartz
2	14-0164	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Aluminum Silicate Hydroxid	Kaolinite-1\ITA\
3	33-0664	Fe ₂ O ₃	Iron Oxide	Hematite
4	21-1272	TiO ₂	Titanium Oxide	Anatase
5	24-0594	K(Li,Al) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀	Lithium Potassium Aluminum	Lepidolite-2\ITM
6	33-0018	Al(OH) ₃	Aluminum Hydroxide	Gibbsite

Figura 5.11 Difractograma Detallado de la Arcilla

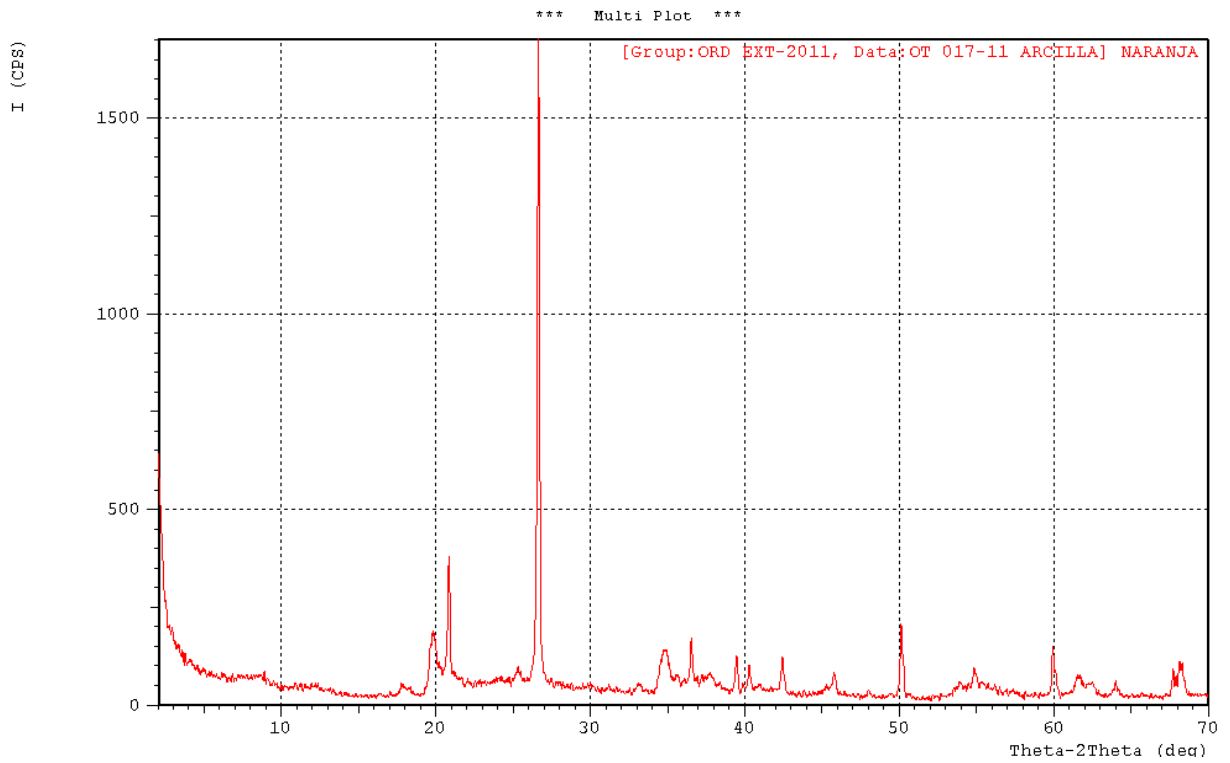


Figura 5.12 Difractograma de la Arcilla

5.2.2 Contenido de Materia Orgánica

Los resultados de ensayos de materia orgánica se presentan en la Tabla 5.12 Niveles de Materia Orgánica, donde se observa que la presencia de materia orgánica en la arcilla es baja y mientras que en la ceniza volante el contenido de materia orgánica es medio.

Tabla 5.12 Niveles de Materia Orgánica

Material	% de Materia Orgánica	Niveles de Materia Orgánica	Porcentaje
Arcilla	0.24	Bajo	0 - 2
Ceniza Volante	3.70	Medio	2 - 4

5.3 Ensayos de Caracterización Mecánica

5.3.1 Variación del Ensayo Próctor con el Contenido de Ceniza y/o Cemento

Se presenta los resultados del ensayo Próctor modificado donde se indica valores de Máxima densidad Seca y el Optimo Contenido de Humedad en las Tablas 5.13, 5.14 y en las figuras 5.13 y 5.14 los gráficos del ensayo Próctor Modificado. De los resultados se aprecia que la máxima densidad seca disminuye con la adición de la ceniza volante. En las Figuras 5.15 y 5.16 las variaciones de la máxima densidad seca con el contenido de ceniza volante presente en cada una. En las Figuras 5.17 y 5.18 se puede ver como la humedad disminuye a medida que se incrementa el contenido de ceniza volante en la arcilla.

Tabla 5.13 Resultados de Ensayos de Compactación de Materiales Con suelo y Ceniza Volante

Material/Mezcla	Próctor Modificado	
	Optimo Contenido de Humedad % (OCH)	Máxima Densidad Seca g/cm ³ (MDS)
S	21.5	1.646
S80/CV20	21.0	1.639
S60/CV40	19.3	1.648
CV	20.9	1.555

Tabla 5.14 Resultados de Ensayos de Compactación de Materiales de Suelos y combinación con Ceniza Volante y Cemento 3%

Material/Mezcla	Próctor Modificado	
	Optimo Contenido de Humedad % (OCH)	Máxima Densidad Seca g/cm ³ (MDS)
S	21.5	1.646
S90/CV7/C3	21.2	1.629
S80/CV17/C3	20.1	1.633
S70/CV27/C3	19.4	1.622
CV	20.9	1.555

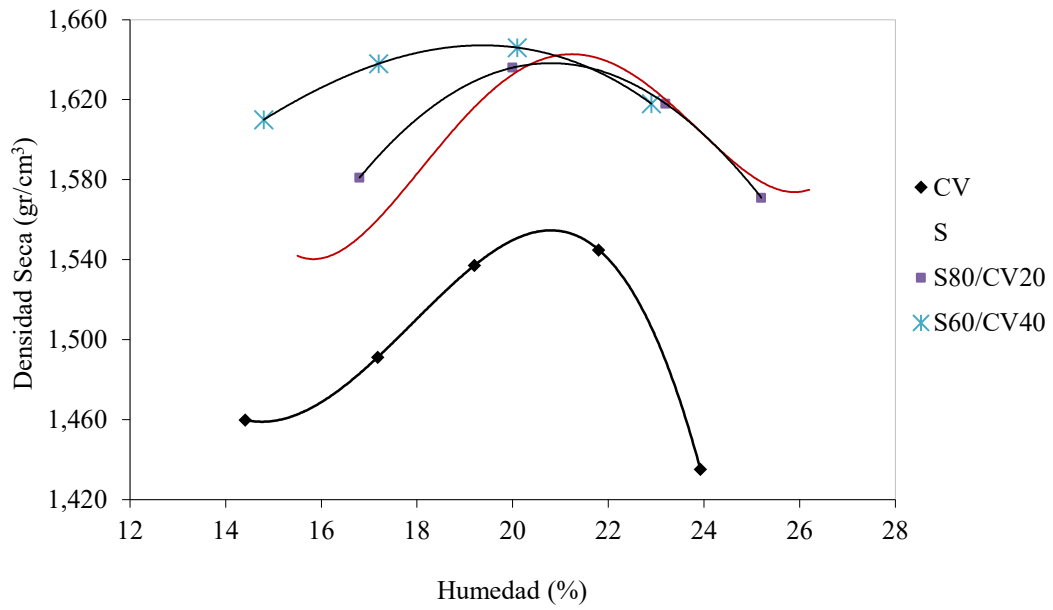


Figura 5.13 Curvas de Compactación de Suelo, Ceniza Volante y Mezclas

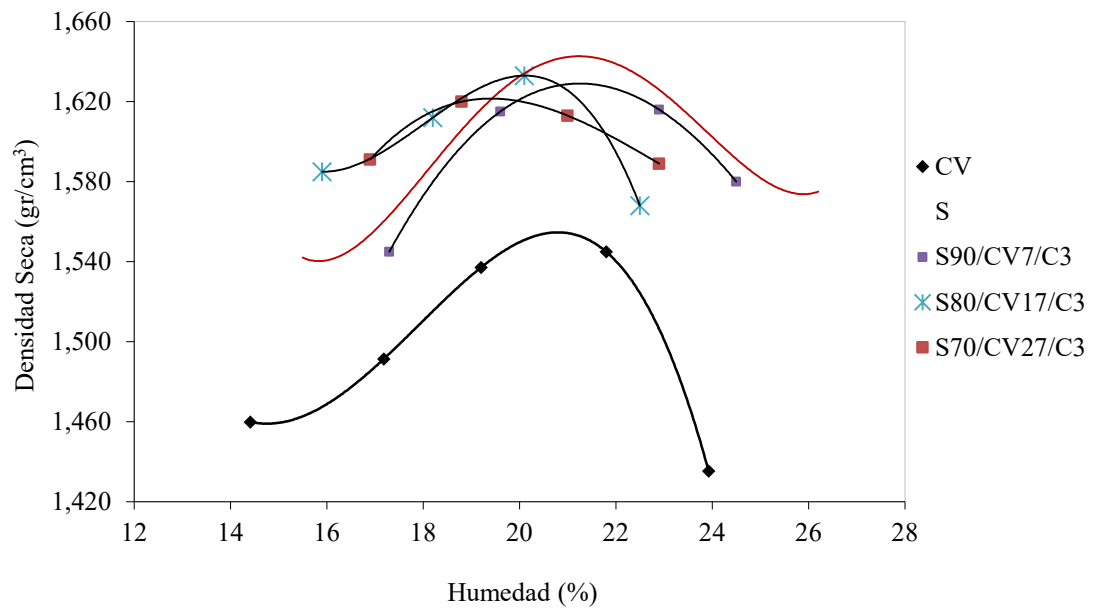


Figura 5.14 Curvas de Compactación de Suelo, Ceniza Volante y Mezcla con Cemento

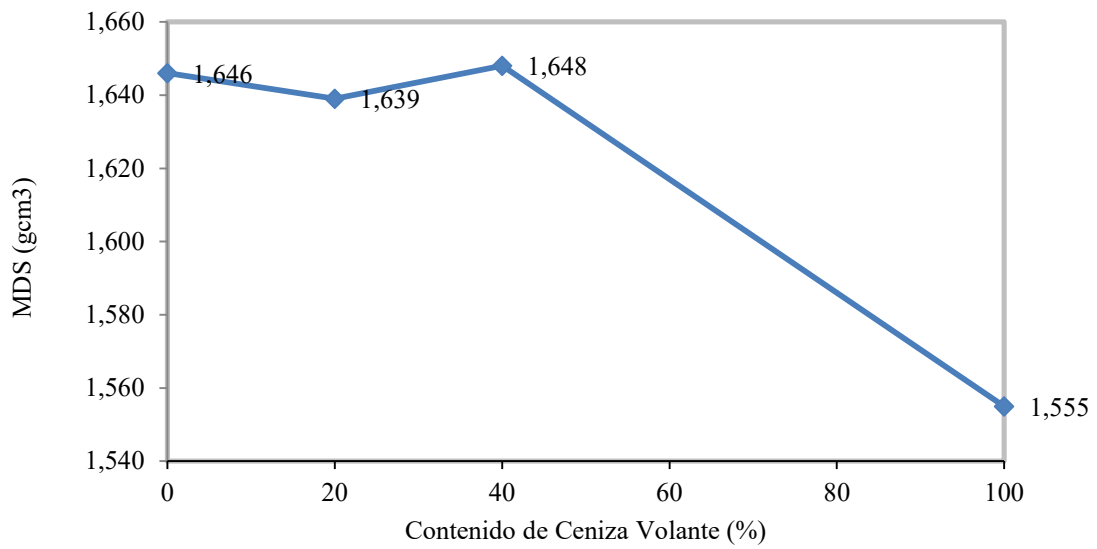


Figura 5.15 Variación de la MDS con el Contenido de Humedad en Mezclas de Arcilla y Ceniza Volante

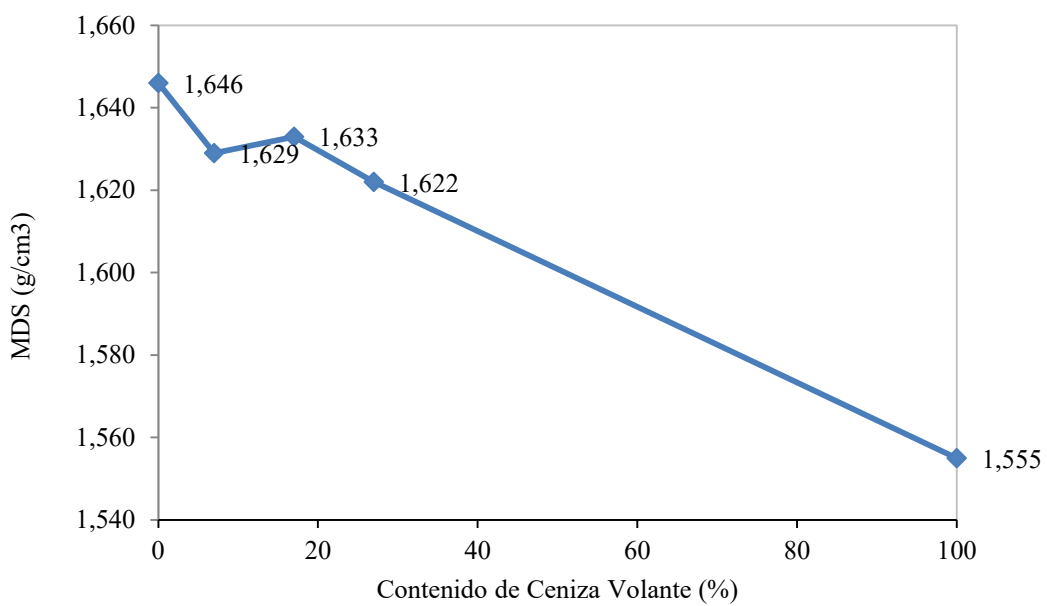


Figura 5.16 Variación de la MDS con el Contenido de Humedad en Mezclas de Arcilla, Ceniza Volante y Cemento 3%

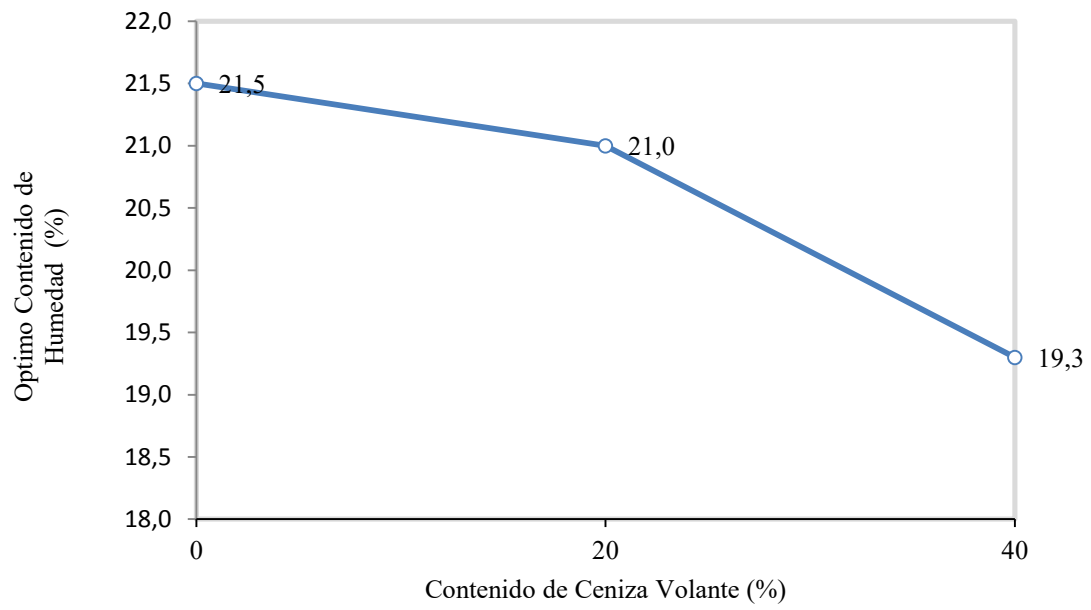


Figura 5.17 Variación del Óptimo Contenido de Humedad y el Contenido de Ceniza Volante

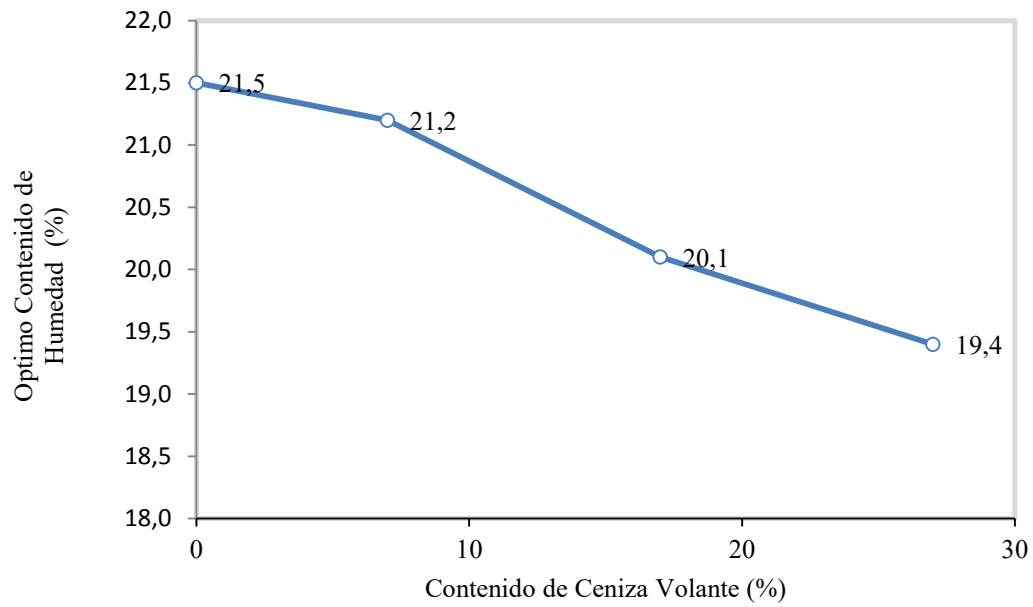


Figura 5.18 Variación del Óptimo Contenido de Humedad Incluye Cemento 3% en la Mezcla y Ceniza Volante

5.3.2 Ensayo CBR

Los valores de expansión del ensayo de CBR son presentados en las Tablas 5.15 y 5.16 en las que se muestran los materiales y/o mezclas realizadas.

Se observa en la Tabla 5.16 que el material de ceniza volante en diversas proporciones al ser combinado con la arcilla, produce una disminución considerable de la expansión del material desde 5.7%, correspondiente a un suelo arcilloso (CH), y bajar a una expansión de 0.7% para una clasificación de suelo arcilloso (CL). En la Tabla 5.17 se aprecia en el caso de las combinaciones de arcilla, ceniza volante y donde se ha incluido cemento en un 3%, la combinación va con una expansión de 5.7%, bajando hasta llegar a 2.5%, teniendo una clasificación tipo limosa (ML). Por lo que el material puede ser utilizado en pavimentos. En la Figura 5.19 se muestran los porcentajes de expansión de los ensayos CBR y en la Figura 5.20 se muestra los porcentajes de expansión de las mezclas que contienen ceniza volante y cemento 3%.

Tabla 5.15 Resultados de Ensayos de Compactación de Materiales de Este Estudio entre Suelo Arcilloso y Ceniza Volante

Material/Mezcla	Símbolo	Expansión a los 4 días (%)
Suelo	S	5.7
Mezcla N°1	S80/CV20	1.2
Mezcla N°2	S60/CV40	0.7

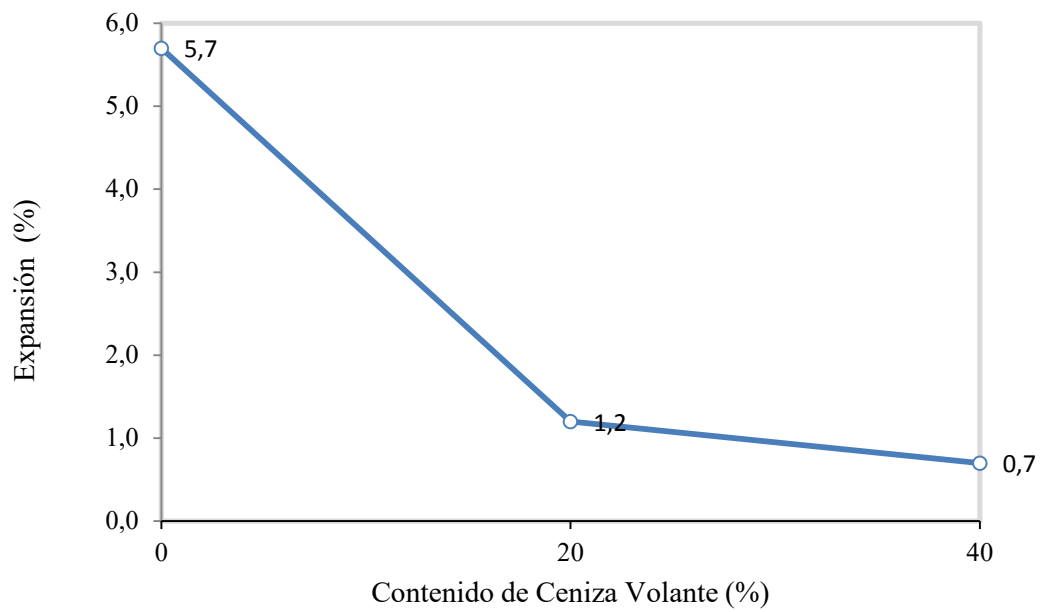


Figura 5.19 Variación de la Expansión en la Mezcla y Contenido de Ceniza Volante

Tabla 5.16 Resultados de Ensayos de Compactación de Materiales de Este Estudio entre Suelo Arcilloso, Ceniza Volante y Cemento 3%

Material/Mezcla	Símbolo	Expansión a los 4 días (%)
Suelo	S	5.7
Mezcla N°1	S90/CV7/C3	3.9
Mezcla N°2	S80/CV17/C3	3.6
Mezcla N°3	S70/CV27/C3	2.5

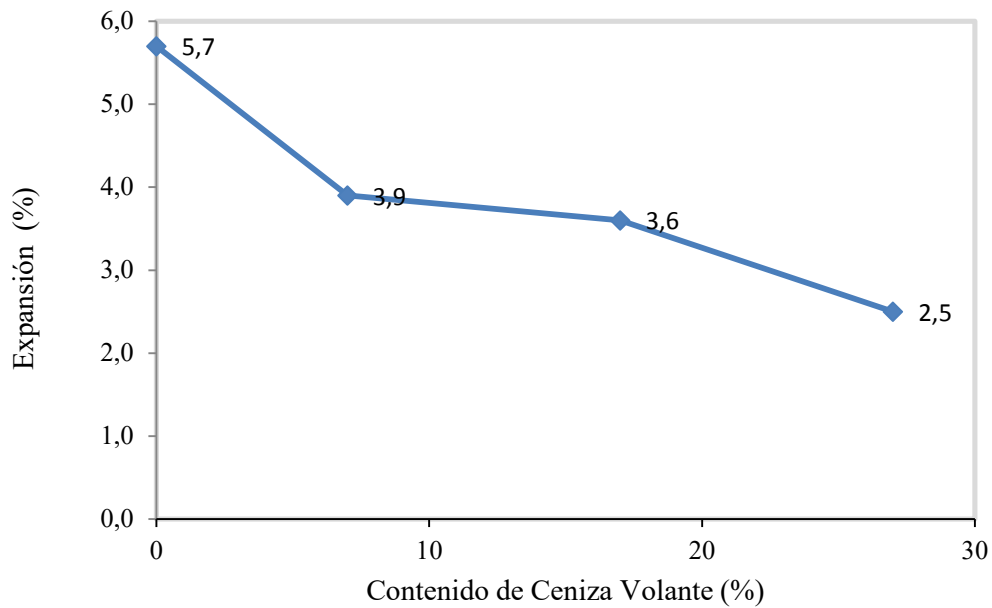


Figura 5.20 Variación de la Expansión en la Mezcla con Adición de Cemento 3% y Contenido de Ceniza Volante

En la Tabla 5.17, se presentan los resultados de ensayos de CBR al 100% de la MDS para cada tipo de material y/o mezcla; se observa que el valor de CBR se incrementa desde 7.7% correspondiente a un suelo arcilloso (CH) hasta un valor de CBR de 23.5% para una combinación de material arcilloso en un 60% y ceniza volante en un 40%.

En la Tabla 5.18, se presentan los resultados de ensayos de CBR al 100% de la MDS para cada tipo de material y/o mezcla; se observa que el valor de CBR se incrementa notablemente desde 7.7% correspondiente a un suelo arcilloso (CH) hasta un valor de CBR de 51.0% para una combinación de material arcilloso en un 70%, ceniza volante en un 27% y cemento 3%. Por lo que puede ser usado en pavimentación.

Tabla 5.17 Resultados de Ensayos de Compactación de Materiales de este Estudio entre Suelo Arcilloso y Ceniza Volante

Material/Mezcla	Símbolo	CBR al 100% DE LA MDS (%)
Suelo	S	7.7
Mezcla N°1	S80/CV20	16.9
Mezcla N°2	S60/CV40	23.5

Tabla 5.18 Resultados de Ensayos de Compactación de Materiales de este Estudio entre Suelo Arcilloso, Ceniza Volante y Cemento 3%

Material/Mezcla	Símbolo	CBR al 100% DE LA MDS (%)
Suelo	S	7.7
Mezcla N°1	S90/CV7/C3	21.9
Mezcla N°2	S80/CV17/C3	39.3
Mezcla N°3	S70/CV27/C3	51.0

Nota.- En la mezcla N°3 se considero siete días de fragua.

En la Figura 5.21, se observa el incremento del valor de CBR para los diferentes contenidos de ceniza volante en la muestra de arcilla, llegando a 23.5% de CBR al 100% de la MDS.

En la Figura 5.22, se observa el incremento del valor de CBR para los diferentes contenidos de ceniza volante y arcilla con 3% de cemento y se puede apreciar que el incremento es mucho mayor al considerado sin considerar cemento en la mezcla, llegando el valor máximo de CBR al 51% al 100% de la MDS.

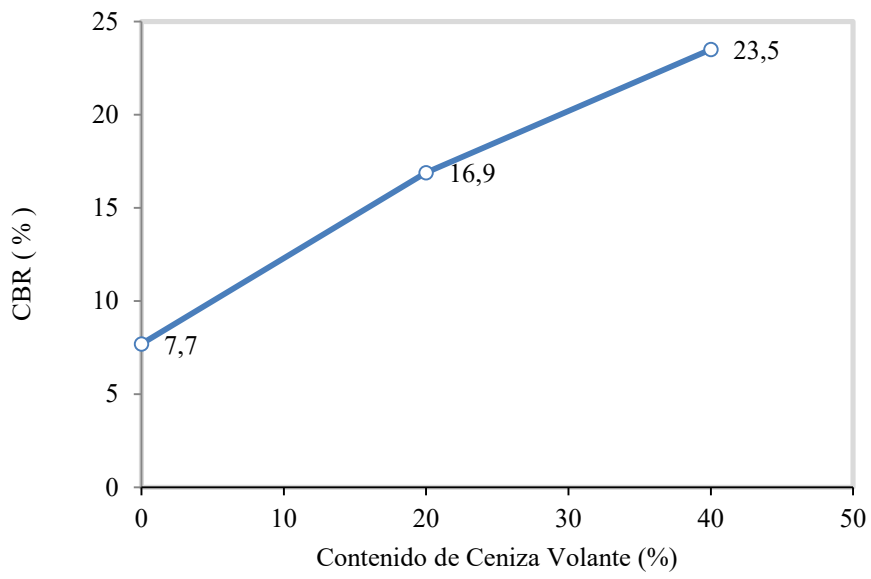


Figura 5.21 Curva de CBR de la Mezcla vs. Contenido de Ceniza Volante

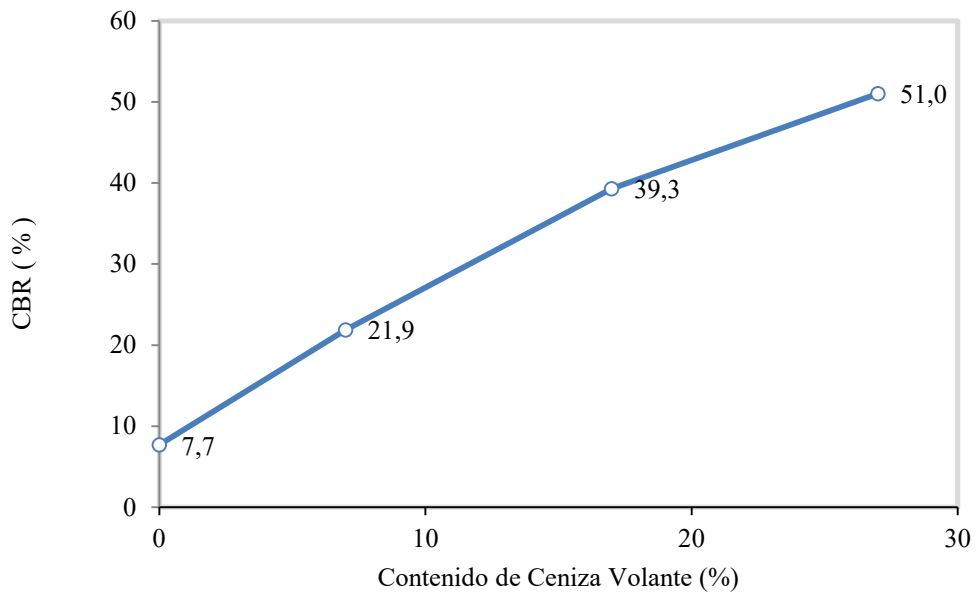


Figura 5.22 Curva de CBR de Mezcla con Cemento 3% vs. Contenido de Ceniza Volante

5.4 Dimensionamiento de Pavimento Típico

Para el diseño de la estructura del pavimento se ha considerado un tráfico ligero para vías rurales de 119,1821.66 EE, considerando solo una capa de afirmado en la superficie. Asimismo se ha utilizado el método NAASRA, ver Figura. 5.23 Grafico de Curvas para Determinar el Espesor de Capa de Revestimiento Granular, asimismo se ha considerado un período de diseño de 5 años. En las Figuras 5.24 y 5.25 se presentan como disminuyen los espesores de la capa de revestimiento granular en relación al contenido de ceniza volante y/o cemento. En las Tablas 5.19 y 5.20 se muestran los resultados de espesores de revestimiento de las capas granulares donde se observa que a medida que se incrementa el contenido de ceniza volante el espesor de la capa de afirmado disminuye.

Obteniéndose los siguientes resultados en el método NAASRA:

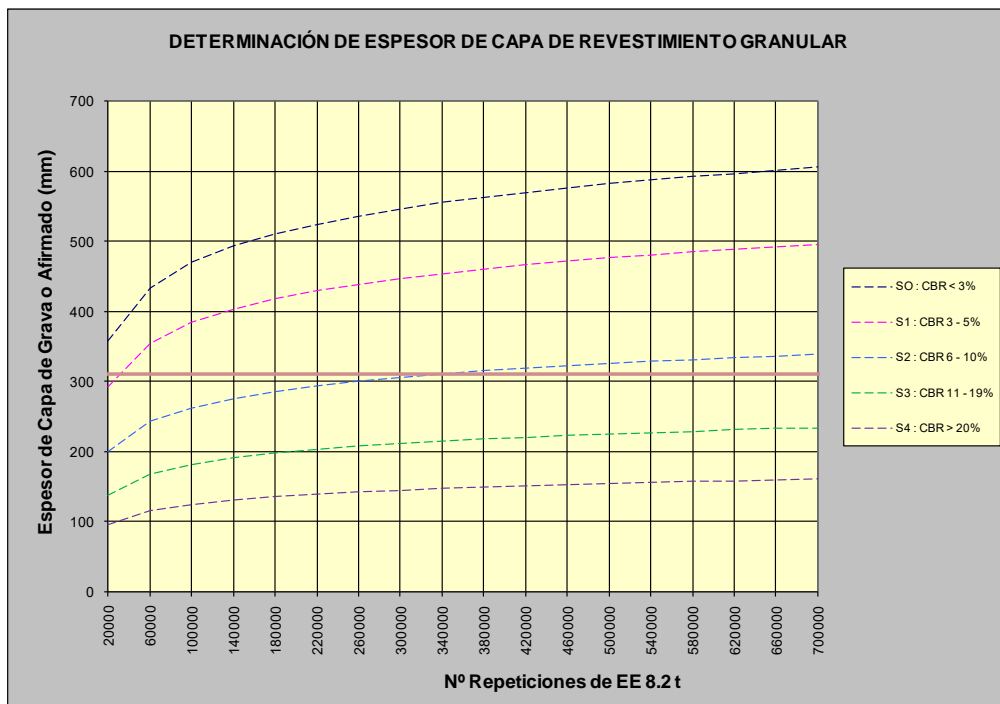


Figura 5.23 Gráfico de Curvas para Determinar el Espesor de la Capa de Revestimiento Granular

Tabla 5.19 Resultados de Espesores de Pavimento con Diferentes Contenidos de Ceniza

Material/Mezcla	N (años)	CBR (100%) subrasante	N 18 (Equivalentes)	Espesor de la Capa de Rodadura (mm)
Suelo S	5	7.7	1191821.66	310
S80/CV20	5	16.9	1191821.66	189
S60/CV40	5	23.5	1191821.66	155

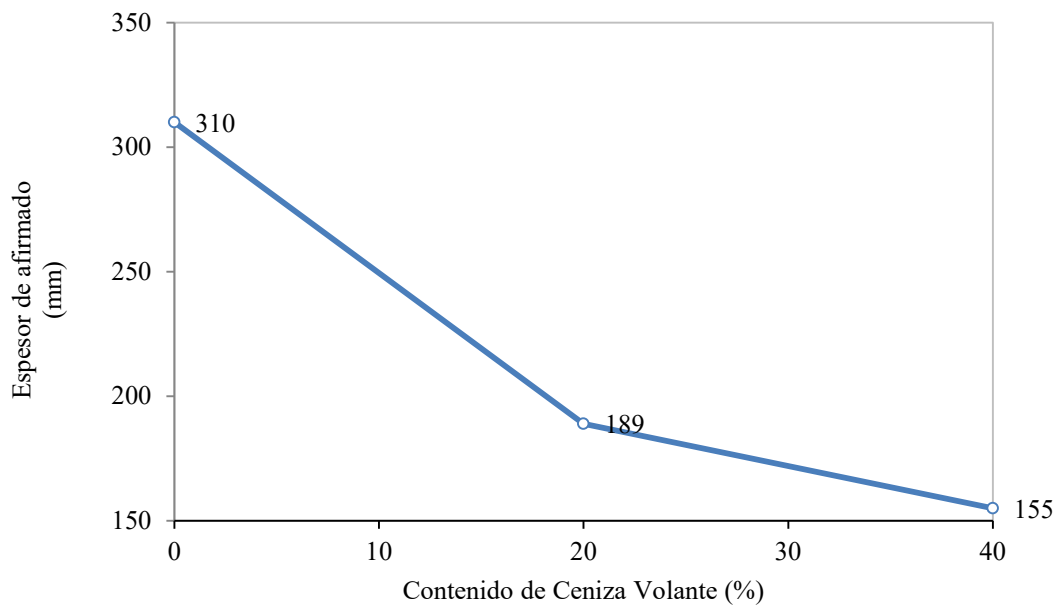


Figura 5.24 Gráfico de Curvas Espesor de la Capa de Revestimiento Granular y el Contenido de Ceniza Volante

Se observa una sección típica del pavimento, formada por una capa de rodadura y subrasante o terreno natural:

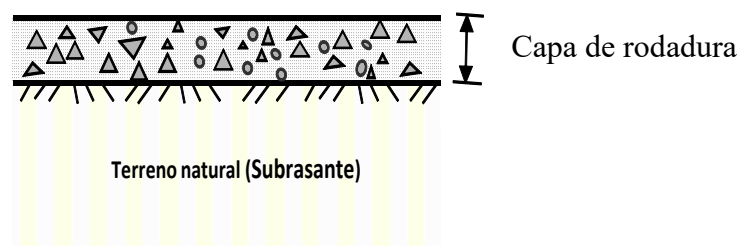


Tabla 5.20 Resultados de Espesores de Pavimento con Diferentes Contenidos de Ceniza y Cemento 3%

Material/Mezcla	N (años)	CBR (100%) subrasante	N 18 (Equivalentes)	Espesor de la Capa de Rodadura (mm)
Suelo S	5	7.7	1191821.66	310
S90/CV7/C3	5	21.9	1191821.66	161
S80/CV17/C3	5	39.3	1191821.66	120
S70/CV27/C3	5	51.0	1191821.66	111

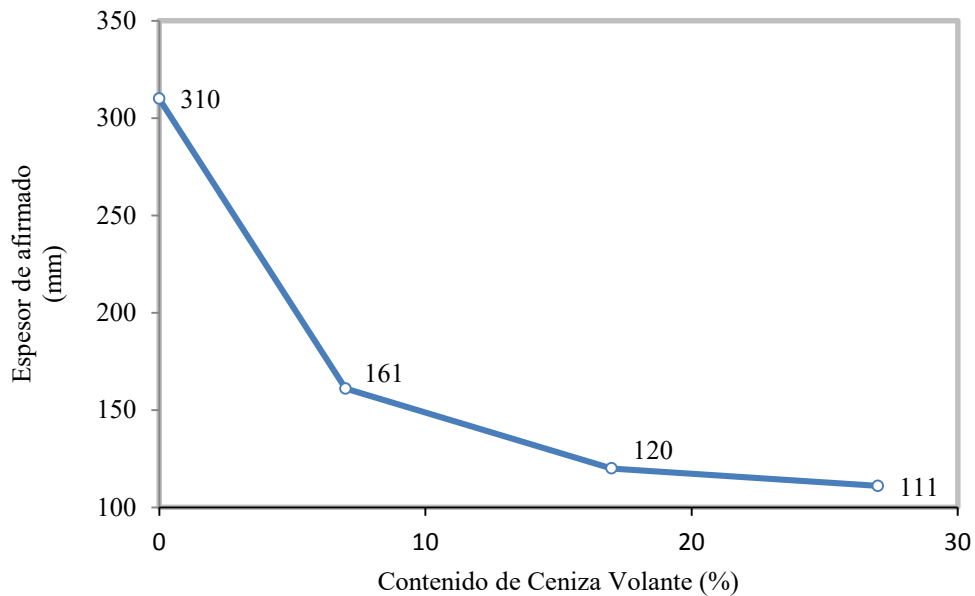


Figura 5.25 Gráfico de Curvas para Determinar el Espesor de la Capa de Revestimiento Granular y el Contenido de Ceniza Volante incluye Cemento 3%

5.5 Consideraciones sobre Presentación y Discusión de Resultados.

Los resultados obtenidos en el presente estudio se muestran satisfactorios y cumplen con los objetivos iniciales propuestos con relación al propósito de la presente investigación y a la combinación de suelo arcilloso y ceniza volante.

5.6 Evaluación Económica

La ceniza volante es un material que es desechado en las centrales térmicas, por lo que no cuesta. En zonas de selva donde las canteras son escasas es posible realizar la estabilización con este material. La estabilización con cenizas volantes puede resultar factible bajo ciertas condiciones (distancia de canteras, disponibilidades de materiales, distancia a la central térmica, tipo de suelo, etc.)

Se ha realizado el análisis de costos teniendo cuenta lo siguiente:

- Longitud de Carretera ubicada en Villa Rica: 1 km
- Ancho de plataforma: 7 m.
- Distancia total de Ilo hacia Villarica de 1560 km.
- Cantera de préstamo a 100km de la obra formado por material de afirmado.

Tabla 5.21 Comparación de Costos de Pavimentos para Diferentes Mezclas

Material/Mezcla	Espesor (m)	Volumen Total (m3)	Suelo natural (m3)	Ceniza volante (m3)	Costo Total (Soles)
Afirmado (material de préstamo a 100 km de distancia)	0.31	2170	-	-	217,000.00
S80/CV20	0.19	1323	1058	265	100,680.00
S60/CV40	0.15	1085	651	434	154,070.00

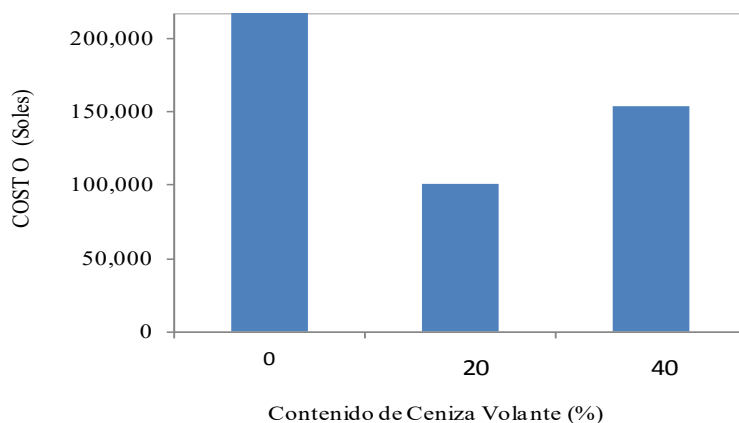


Figura 5.26 Gráfico de Comparación de Costos con Mezclas de Arcilla y Ceniza Volante

Tabla 5.22 Comparación de Costos de Pavimentos para Diferentes Mezclas incluyendo 3% de Cemento

Material/Mezcla	Espesor (m)	Volumen Total (m3)	Suelo natural (m3)	Ceniza volante (m3)	Cemento (m3)	Costo Total (Soles)
Afirmado (material de préstamo a 100 km de distancia)	0.31	2170	-	-	-	217,000.00
S90/CV7/C3	0.16	1120	1008	78.4	33.6	51,251.00
S80/CV17/C3	0.12	840	672	142.8	25.2	66,158.00
S70/CV27/C3	0.11	770	539	207.9	23.1	86,055.00

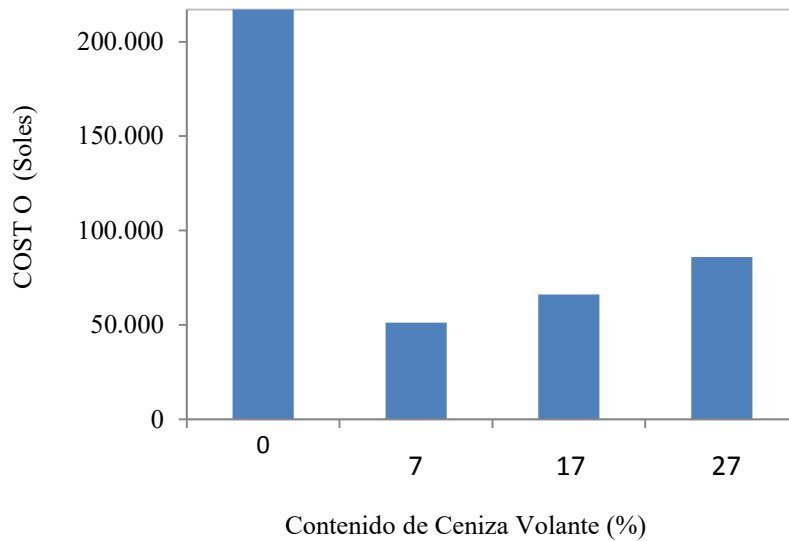


Figura 5.27 Gráfico de Comparación de Costos de Pavimentos para Diferentes Mezclas Incluyendo 3% de Cemento

En las Tablas 5.26 y 5.27 se observa que el costo por kilómetro de pavimento convencional con afirmado que es mucho mayor al compararse con el pavimento estabilizado con Ceniza volante y cemento.

Conclusiones

A partir de los resultados presentados y analizados anteriormente se obtienen las siguientes conclusiones:

- Las cenizas volantes funcionan como aditivo inhibidor de las propiedades expansivas del material, pero este requiere ser adicionado en porcentajes excesivos, al menos en el caso de una arcilla expansiva, en promedio mayor a 20%.
- La ceniza volante empleada como materia prima es una ceniza tipo F, ya que la suma de porcentaje de sus principales constituyentes (SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3) es mayor a 70%.
- La Difracción de Rayos X muestra que el suelo arcilloso y la ceniza volante están constituidos principalmente por Cuarzo (SiO_2)
- Los resultados permiten concluir que el suelo estudiado tipo CH/A-7-6 (14) es arcilla inorgánica de alta plasticidad, por lo que este material no es recomendable para el uso como subrasante en pavimentos.
- Las arcillas en combinación con cenizas volantes y cemento en un 3%, da buenos resultados mejorando la resistencia del suelo arcilloso desde 7.7% hasta 51% de CBR al 100% de la MDS del Próctor Modificado y obteniéndose menores costos en su construcción.
- Los valores de espesores de pavimento se reducen conforme se incrementa el valor de CBR.
- La adición de ceniza volante en la muestra de arcilla disminuye los efectos de expansión, disminuye la gravedad específica y la plasticidad y humedad de la arcilla.

Recomendaciones

- Se recomienda realizar ensayos de modulo resiliente con el equipo correspondiente lo cual no fue posible en la presente tesis porque en Perú solo existe el equipo en el Laboratorio de la OAT del MTC, pero ellos no dan servicio a terceros y tampoco permiten que los tesisistas lo usen a menos que se haga un convenio con la universidad.
- Se recomienda profundizar los estudios sobre utilización de ceniza volante en pavimentos, ensayando con otros tipos de suelos.

Bibliografía

ACOSTA H.A., EDIL, T.B., BENSON, C.H. (2003). **“Soil stabilization and drying using fly ash”**. Geo Engineering Report No. 03-03 Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison.

AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION (ACAA) **Fly Ash Facts for Highway Engineers**. Edição 4.2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, CD 5239-98. **Standard Practice for Characterizing Fly Ash Use in Soil Stabilization**. Estados Unidos. 1998.

ANTHONY E.J., JIA, L., and CARIS, M. (2003). **“CFBC ash hydration studies.”**. International Ash utilization symposium, Kentucky, 1-9. Anthony (2003).

BENTO, P. F., **Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para utilização em estruturas de pavimentos**. Dissertação de M.Sc. Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Brasília, UnB. 2006.

CALDERON, G. **Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos**. Dissertação de M.Sc. Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro. 2010.

COKCA, E. **“Use of Class C fly ashes for the stabilization of an expansive soil.”** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(7), 568-573. 2001

CRIADO, M.; PALOMO, Á. y FERNÁNDEZ A. **Nuevos materiales cementantes basados en cenizas volantes. Influencia de los aditivos en las propiedades reológicas (2006)**. Monografía del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, N ° 413, pág. 11-49.

ERASMI, L. **Análise do Comportamento Mecânico e Ambiental de Misturas Solo-Cinzas de Carvão Mineral para Camadas de Base de Pavimentos**. Dissertação de

M.Sc. Departamento de Engenharia Civil. Pontificia Universidade Católica de Rio de Janeiro. 2010.

FARIAS, Edney Rodrigues de. **A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação - análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental.** Dissertação de MSc., UFSC, Santa Catarina, SC, Brasil. 2005.

FERGUSON, G. **Use of self-cementing fly ashes as a soil stabilization agent.** Fly Ash for soil improvement. ASCE. 1993.

FERNÁNDEZ CARRASCO, LUCIA Y VÁSQUEZ E. **Formación de etringita en mezclas ternarias. X Congreso Nacional de materiales.** (2008b). Volumen II. Donostia-San Sebastián. Parte 10, pág. 979-982.

GARCIA, C, **Reutilización de cenizas de centrales térmicas.** Ambient 2002-2003 (2003). Edición 23. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, pág. 43-46.

GUTIERREZ, J. **Modelación Geotécnica de Pavimentos Flexibles con Fines de Análisis y Diseño en el Perú.** Tesis de MSc. UNI. Perú 2007.

HAUSMANN, M. (1990)- **Engennering Principles of Ground Modification.**- Mc Graw Hill Publishing Company.- U.S.A.

IEA, International Energy Agency.org., 2005

KUKKO, H. **“Stabilization of clay with inorganic by-products”.** “Journal of materials in Civil Engineering 2000

LAMBE, T. W. & WITHMAN, R. **Mecánica de Suelos.** John Wiley & Sons, Inc. Editorial Limusa. Mexico. 582 p. 1976.

MARCON A.F. **Durabilidad e Módulo de Elasticidade de Misturas Areia-Cal-Cinza Volante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1977

MEDINA, J., **Apostila de Estabilização do Solos**. COPPE-URFJ (1987)

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2ª Edição. Editora UFRJ. Rio de Janeiro. Brasil. 2005

M.C. ALONSO; M. P. DE LUXÁN. **Aplicaciones de las cenizas volantes en el campo de la construcción**. Experiencia española (1995). Instituto de Ciencias de la Construcción. Eduardo Torroja. Madrid, pág. 12-50.

MTC, **Diseño de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volúmen de Tránsito, Perú 2008**

MOTTA, L.M.G. , **Método de Dimensionamiento de pavimentos Flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

NARDI, J.V., **Estabilização de Areia com Cinza Volante e Cal; Efeito do Cimento como Aditivo e de Brita na Mistura**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 1975.

PINTO, S. **Estabilização de Areia com Adição de Cal e Cinza Volante**. Dissertação de Mestrado, UFRJ-Brasil, 1971.

PINTO, S., GUIDA, H. **Estudos de Estabilização de Solos**. Publicação técnica N° 23.73 COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. Brasil. 1973.

QUIROZ, R., **“Evaluación Energética y Económica de La Central Térmica a Carbón Ilo 21”**, Tesis para obtener El título de Ingeniería Mecánica / UNI-PERÚ. 2005.

REZENDE, LILIAN RIBEIRO D.E., **Técnicas Alternativas para a Construção de Bases de Pavimentos Rodoviários**. Dissertação de M.Sc., UnB, Brasília, DF, 1999.

ROHDE, G.M.; ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, N.I.W., **Cinzas de Carvão fóssil no Brasil –Aspectos Técnicos e ambientais**. Vol 1 Porto Alegre: CIENTEC, (2006)

RODRIGUEZ, M. **Estudio de Aplicaciones de las Cenizas Volantes a la Estabilización/Solidificación de Residuos Industriales**. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.1996.

SOILS AND ROCKS, **An International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Sao Paulo-Brasil, Enero a Abril 2012

UMAÑA-PEÑA, J. C. **Síntesis de Zeolitas a partir de Cenizas Volantes de Centrales Termoeléctricas de Ccarbón**. Tesis de Doctorado – Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2002.

UNDEERC, **“Pulverized Coal Combustion System”**. Coal Ash Research Center, Undeerc.org. 2007

WINTERKORN, H. F., PAMUKCU, S. **Soil Stabilization and Grouting**. Foundation engineering handbook editado por Fang, Hsai-Yang. 2da edición. 1990

NORMATIVA

Norma ASTM C 593-95

Norma ASTM C 618