



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS COHESIVOS A TRAVÉS
DE LA UTILIZACIÓN DE CAL - CENIZA VOLANTE**

Angel José Francisco González Guerra

Asesorado por el Ing. Harold Estuardo Guerra Ralda

Guatemala, marzo de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS COHESIVOS A TRAVÉS
DE LA UTILIZACIÓN DE CAL - CENIZA VOLANTE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ANGEL JOSÉ FRANCISCO GONZÁLEZ GUERRA

ASESORADO POR EL ING. HAROLD ESTUARDO GUERRA RALDA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MARZO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

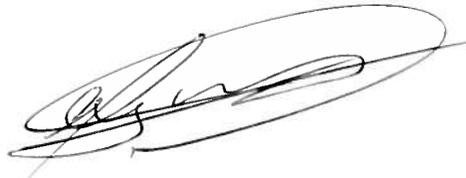
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Claudio César Castañón Contreras
EXAMINADOR	Ing. Manuel Alfredo Arrivillaga Ochaeta
EXAMINADORA	Inga. María del Mar Girón Córdón
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS COHESIVOS A TRAVÉS DE LA UTILIZACIÓN DE CAL - CENIZA VOLANTE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha noviembre de 2012.



Angel José Francisco González Guerra

GUATEMALA, 16 DE ENERO DE 2014

INGENIERO CIVIL
GUILLERMO FRANCISCO MELINI SALGUERO
COORDINADOR DEL ÁREA DE CONSTRUCCIONES
CIVILES Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

ESTIMADO INGENIERO MELINI:

POR MEDIO DE LA PRESENTE EN MI CALIDAD DE ASESOR DE TESIS ME PERMITO INFORMARLE QUE EL TRABAJO DE GRADUACIÓN DENOMINADO "ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS COHESIVOS A TRAVÉS DE LA UTILIZACIÓN DE CAL - CENIZA VOLANTE", ELABORADO POR EL ESTUDIANTE ANGEL JOSÉ FRANCISCO GONZÁLEZ GUERRA, HA SIDO REVISADO POR MI PERSONA Y FINALIZADO A ENTERADA SATISFACCIÓN POR LO QUE NO TENGO NINGÚN IMPEDIMENTO EN EXTENDER LA PRESENTE CARTA DE APROBACIÓN PARA CONTINUAR CON LOS TRÁMITES PERTINENTES.

SIN NADA MÁS QUE AGREGAR ME DESPIDO.

ATENTAMENTE,


HAROLD ESTUARDO GUERRA RALDA
INGENIERO CIVIL
COLEGIADO 5,021

HAROLD ESTUARDO GUERRA RALDA
INGENIERO CIVIL
COLEGIADO NO. 5,021
ASESOR



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>



Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil

Guatemala,
24 de febrero de 2014

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS COHESIVOS A TRAVÉS DE LA UTILIZACIÓN DE CAL-CENIZA VOLANTE**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Angel José Francisco González Guerra, quien contó con la asesoría del Ing. Harold Estuardo Guerra Ralda.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

Guillermo

~~Ing. Civil Guillermo Francisco Melini Salguero~~
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles

/bbdeb,
Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Harold Estuardo Guerra Ralda y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Angel José Francisco González Guerra, titulado ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS COHESIVOS A TRAVÉS DE LA UTILIZACIÓN DE CAL-CENIZA VOLANTE, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, marzo 2014.

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua



Universidad de San Carlos
de Guatemala

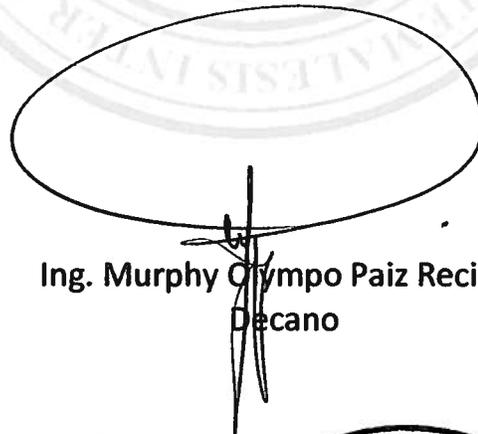


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 137.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTABILIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS COHESIVOS A TRAVÉS DE LA UTILIZACIÓN DE CAL – CENIZA VOLANTE**, presentado por el estudiante universitario **Angel José Francisco González Guerra**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 24 de marzo de 2014

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme sabiduría, guiarme y colmarme de bendiciones.
- Mis padres** Francisco Celestino González Coronado y Azalia Magaly Guerra Ralda de González, por guiarme por el buen camino, ser ejemplo de dedicación, esfuerzo, amor y apoyo incondicional.
- Mis hermanos** María de los Angeles y Andrea Conchita González Guerra, por su cariño, comprensión y apoyo.
- Mis abuelos** Angel José Ramón González Álvarez (q.e.p.d.) y Mirtha Concepción Coronado Vela de González, José Guerra Aceituno y Marta Alicia Ralda de Guerra (q.e.p.d.), por su amor, apoyo y sabios consejos.
- Mis tíos** Harold Estuardo Guerra Ralda, Angel Francisco, Jorge Emilio, Angel José Ramón y Antonio Adolfo González Coronado, por su cariño, apoyo y sabios consejos.
- Mis primos** Por su cariño y apoyo.
- Mi novia** Stacy Thamara Chacón Avilés, por su cariño incondicional y apoyo en el transcurso de mi carrera.

Mi amigo

Juan Antonio Rivera Ticas, por su apoyo y sincera amistad compartida durante muchos años de mi vida.

Mis amigos

André Juárez, Ricardo González, Diego Nájera, Rubén Larrañaga, Jonathan Sandoval, Axel Guzmán, Byron Quelex, Leonel Barrera, Kenneth Figueroa y Erick Monroy, por su apoyo y sincera amistad.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por ser quien me bendice con sabiduría y guía mis pasos todos los días de mi vida.
- Mi asesor** Ing. Harold Estuardo Guerra Ralda, por su comprensión, apoyo y consejos para realizar el presente trabajo de graduación.
- OPTESA** En especial al ingeniero agrónomo Nicolás Acevedo, por su colaboración, apoyo y brindarme la oportunidad de realizar la práctica final en la empresa que eficientemente dirige.
- CII/USAC** Por permitirme elaborar los ensayos de laboratorio, del presente trabajo de graduación.
- Facultad de Ingeniería** Por brindarme los conocimientos que pondré en práctica durante el transcurso de mi vida profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XV
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. El suelo y sus propiedades.....	1
1.1.1. Granulometría de los suelos.....	5
1.1.2. Clasificación granulométrica de los suelos.....	6
1.1.3. Características de la naturaleza de los suelos.....	6
1.2. Generalidades sobre la cal.....	8
1.2.1. La cal viva.....	8
1.2.1.1. Cal magra.....	9
1.2.1.2. Cal grasa.....	10
1.2.2. Las cales hidratadas.....	10
1.2.3. Cales hidráulicas.....	10
1.3. Producción de vapor para la generación de energía eléctrica.....	11
1.3.1. Bomba.....	16
1.3.1.1. Bombas recíprocas.....	16
1.3.1.2. Bombas centrífugas.....	17
1.3.1.3. Bombas rotativas.....	19
1.3.2. Calderas.....	19

1.3.2.1.	Calderas pirotubulares	20
1.3.2.2.	Calderas acuatubulares.....	20
1.3.2.3.	Combustibles	21
1.3.2.3.1.	Derivados del petróleo ..	21
1.3.2.3.2.	Carbón natural	23
1.3.2.3.3.	Carbón mineral y sus residuos.....	25
1.3.3.	Turbinas de vapor	30
1.3.3.1.	Turbinas de impulso	30
1.3.3.2.	Turbinas de reacción	31
1.3.4.	Turbogenerador	31
1.3.5.	Condensador	32
1.3.6.	Torre de enfriamiento	33
1.4.	Generalidades de la ceniza	34
1.4.1.	Clasificación de tipos de ceniza según proceso de producción	36
1.4.1.1.	Ceniza volante seca	36
1.4.1.2.	Ceniza de fondo seca.....	37
1.4.1.3.	Ceniza compuesta seca	37
1.4.1.4.	Ceniza compuesta hidratada.....	37
1.4.2.	Origen de las ceniza volante	37
1.4.3.	Propiedades de la ceniza volante.....	38
1.5.	Estabilización del suelo.....	41
1.5.1.	Tipos de estabilización	41
1.5.1.1.	Estabilización física	42
1.5.1.2.	Estabilización química.....	42
1.5.1.3.	Estabilización mecánica	43
1.6.	Influencia de la plasticidad.....	43
1.6.1.	Índice de plasticidad	45

1.6.2.	Índice de liquidez	46
2.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	47
2.1.	Estabilización de suelos cohesivos a través de la utilización de cal y ceniza volante.....	47
2.1.1.	Recolección de muestra de suelo.....	49
2.1.1.1.	Cohesivo.....	50
2.1.1.1.1.	Características químicas y geológicas del material cohesivo	50
2.2.	Ensayos de laboratorio	51
2.2.1.	Límites de Atterberg.....	51
2.2.2.	Proctor.....	53
2.2.3.	CBR.....	54
2.2.4.	Granulometría	54
2.2.5.	Gravedad específica	55
2.2.6.	Corte directo.....	56
2.2.7.	Triaxial.....	56
2.2.8.	Permeabilidad	57
3.	RESULTADOS OBTENIDOS	59
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	67
4.1.	Comportamiento de los tres escenarios	67
4.2.	Resultados de proctor	68
4.3.	La humedad óptima	69
4.4.	Porcentaje de CBR	69
4.5.	Suelo utilizado para la investigación.....	70
4.6.	Gravedad específica	71

4.7.	Ensayos de corte directo y triaxial	72
4.8.	Análisis de la permeabilidad	73
CONCLUSIONES.....		75
RECOMENDACIONES.....		77
BIBLIOGRAFÍA.....		79
APÉNDICES		81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema para análisis de energías en elementos mecánicos.....	13
2.	Diagrama de una central termoeléctrica de combustión externa.....	15
3.	Diagrama de Rankine.....	16
4.	Ciclo del carbón en una termoeléctrica.....	38
5.	Ubicación del banco donde se tomó la muestra del suelo.....	49
6.	Gráfica de numero de muestra versus índice de plasticidad y límite líquido	67
7.	Gráfica de número de muestra versus densidad seca máxima.....	68
8.	Gráfica de número de muestra versus humedad óptima.....	69
9.	Gráfica de número de muestra versus CBR al 95 por ciento de C (porcentaje).....	70
10.	Gráfica de número de muestra versus grava (porcentaje), arena (porcentaje) y finos (porcentaje).....	71
11.	Gráfica de número de muestra versus gravedad específica	72
12.	Gráfica de número de muestra versus cohesión (Cu)	73

TABLAS

I.	Escala granulométrica	6
II.	Características de los derivados del petróleo utilizados comúnmente en la industria	23
III.	Proporciones de las muestras por estudiar.....	48
IV.	Resultado de la medición de ph en las muestras	48

V.	Resultados de ensayo de límites de Atterberg obtenidos en las muestras.....	59
VI.	Resultados de ensayo de proctor obtenidos en las muestras	60
VII.	Resultado de ensayo de CBR obtenido en la muestra No. 1	60
VIII.	Resultado de ensayo de CBR obtenido en la muestra No. 2	60
IX.	Resultado de ensayo de CBR obtenido en la muestra No. 3	61
X.	Resultado de ensayo de granulometría obtenido en la muestra No. 1	62
XI.	Resultado de ensayo de granulometría obtenido en la muestra No. 2.....	63
XII.	Resultado de ensayo de granulometría obtenido en la muestra No. 3.....	63
XIII.	Resultados de ensayo de gravedad específica obtenidos en las muestras.....	64
XIV.	Resultados de ensayo de corte directo obtenidos de las muestras	64
XV.	Resultados de ensayo de triaxial obtenidos de las muestras	65
XVI.	Resultados de ensayo de permeabilidad obtenidos de las muestras....	65

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Z	Altura
hp	Caballos de fuerza
H	Carga estática
cm	Centímetro
k	Coefficiente de permeabilidad
Δ	Delta o cambio
E	Energía
u	Energía interna
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
g	Gravedad
ω_n	Humedad de suelo en estado normal
I_L	Índice de liquidez
IP	Índice de plasticidad
kg	Kilogramo
Kv	Kilovoltios
lb	Libra
LL	Límite líquido del suelo
LP	Límite plástico del suelo
MW	Mega Watts
γ	Peso específico
ft	Pie
%	Porcentaje
P	Presión

s	Segundo
t	Tonelada
W	Trabajo
Btu	Unidad térmica británica
Q	Valor añadido al sistema
V	Velocidad
v	Volumen

GLOSARIO

AASHTO	American Association of State Highway Officials.
Anisotrópicos	Característica de los cuerpos cuyas propiedades mecánicas dependen de la dirección en que son examinadas.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
Cationes	Iones con carga positiva.
CBR	California Bearing Ratio.
Coaxial	Figura o cuerpo compuesto de diferentes partes cilíndricas, que tienen en común su eje de simetría.
Convección	Transporte en un fluido de una magnitud física, como masa, electricidad o calor, por desplazamiento de sus moléculas debido a diferencias de densidad.
Desaireación	Proceso que consiste en romper las burbujas de aire o gas ocluido que se han formado en cualquier tipo de líquido o pasta, mediante vacío.

Erosión	Desgaste o destrucción producidos en la superficie de un cuerpo por la fricción continua o violenta de otro.
Fluctuación	Dicho de un cuerpo, se refiere a vacilar sobre las aguas por el movimiento agitado de ellas.
Granulometría	Parte de la petrografía que trata de la medida del tamaño de las partículas, granos y rocas de los suelos.
Hogar	Sitio donde la combustión se produce en contacto directo con el aire, cocinas, chimeneas, calderas, hornos de fundición, etc.
Lixiviación	Proceso en el cual un solvente líquido se pone en contacto con un sólido pulverizado produciendo disolución.
Permeabilidad	Propiedad que tiene el suelo de transmitir el agua y el aire. Mientras más permeable sea un suelo, mayor será la infiltración.
Rasqueta	Planchuela de hierro de cantos afilados.
SUCS	Sistema unificado de clasificación de suelos.
Tamiz	Malla metálica constituida por barras tejidas y que dejan un espacio entre sí por donde pasa el suelo.

RESUMEN

En Guatemala hay empresas que se dedican a la cogeneración utilizando como combustible carbón mineral, el cual al ser quemado produce residuos de ceniza que se pueden dividir en dos grupos: ceniza de fondo y volante.

Al observar que la ceniza volante es considerada como puzolana artificial surgió la idea de determinar la posibilidad de estabilizar suelos cohesivos utilizando ceniza volante y cal.

Para determinar si esto era posible se recolectó muestra de suelo cohesivo, ceniza volante y cal. Luego, en el laboratorio de la Sección de Mecánica de Suelos se llevaron a cabo los siguientes ensayos:

- Límites de Atterberg
- Próctor
- Valor soporte California (CBR)
- Granulometría
- Gravedad específica
- Corte directo
- Triaxial
- Permeabilidad

Las muestras que se utilizaron en los ensayos fueron las siguientes:

- Limo de alta plasticidad, color café oscuro 100 %
- Mezcla: limo 80 % - cal 3 % - ceniza volante 17 %

- Mezcla: limo 80 % - cal 5 % - ceniza volante 15 %

Al realizar todos los ensayos a las muestras de suelo se pudo determinar que es factible estabilizar suelos cohesivos utilizando cal y ceniza volante.

OBJETIVOS

General

Determinar la factibilidad de la estabilización de los suelos cohesivos por medio de ceniza volante y cal.

Específicos

1. Conocer el comportamiento de suelos cohesivos estabilizados con ceniza volante y cal.
2. Realizar ensayos para conocer el cambio de las propiedades mecánicas del suelo cohesivo a estudiar.
3. Conocer la mejor proporción de suelo, ceniza volante y cal para la estabilización del suelo por estudiar.
4. Profundizar en los conocimientos que tienen relacionados con la estabilización de suelos cohesivos.

INTRODUCCIÓN

Las diferentes fuentes de generación transforman diversas formas de energía en electricidad, una de las formas de generar energía eléctrica es por medio del carbón mineral; en Guatemala hay estaciones que utilizan este método y unos ingenios azucareros están modificando sus calderas para producir energía eléctrica en el periodo que ha culminado la zafra.

En el presente trabajo de graduación se espera determinar la posibilidad de utilizar la ceniza volante, residuo que queda después de quemar el carbón, y la cal para la estabilización de suelos cohesivos.

Para determinar la factibilidad del problema en estudio se llevarán a cabo diversos ensayos con mezclas de diferentes proporciones entre cal, ceniza volante y suelo cohesivo. Por medio del análisis de resultados se podrán obtener conclusiones de la manera cómo reaccionan dichos materiales.

Se debe de tomar en cuenta que si llegara a ser factible la estabilización de suelos cohesivos por medio de ceniza volante y cal, se podrían disminuir los costos, ya que se pretende bajar el porcentaje de cal necesaria para la estabilización del suelo cohesivo agregándole una mayor cantidad de ceniza volante.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. El suelo y sus propiedades

Hay diferentes concepciones de suelo, las cuales dependen del punto de vista de la persona y lo que para ellos representa esta expresión, entre las que se pueden tomar como referencia están:

- Geólogo N. J. Chiossi: “Material resultante de la descomposición y desintegración de la roca por el ataque de agentes atmosféricos”.¹
- El agrónomo G. P. Tschebotarioff: “Delgada parte superior del manto de rocas en donde penetran las raíces de las plantas y de donde estas toman el agua y las demás sustancias necesarias para su existencia”.²
- Los ingenieros civiles A. Rico y H. del Castillo: “Conjunto de partículas minerales, producto de la desintegración mecánica o de la descomposición química de rocas preexistentes”.³
- Dr. en ingeniería, Alfred R. Jumikis: “Sedimentos no consolidados y depósitos de partículas sólidas derivadas de la desintegración de las rocas”.⁴

¹ CRESPO VILLALAZ, Carlos. Mecánica de suelos y cimentaciones. p.18.

² Ibid.

³ Ibid.

⁴ Ibid.

- Ing. civil Carlos Crespo Villalaz: “Suelo es una delgada capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que sobre ella se asientan”.⁵

Entre los agentes físicos que contribuyen en la generación del suelo a partir de los cambios en las rocas se encuentran el sol, el agua, los glaciares y el viento; estos agentes son los encargados de producir la erosión en las rocas; dicho de otra manera son los que contribuyen en la formación del suelo.

La manera en la que el sol actúa sobre las rocas consiste en calentar más la superficie que el interior provocando diferentes expansiones que ocasiona esfuerzos fuertes. El agua cuando se encuentra en movimiento ocasiona la erosión de las rocas, si la arrastra genera fricción entre ellas formando lo que se conoce como canto rodado; pero si cae en forma de lluvia llena las cavidades, abre grietas y tiende a llenar los espacios huecos; al congelarse el agua se expande y genera esfuerzos que pueden llegar a fracturar la roca que la encierra. El viento erosiona el suelo cuando arrastra arenas o grava. Los glaciares ejercen una gran acción abrasiva y de transporte de los materiales.

Los suelos están compuestos por materiales heterogéneos y anisotrópicos, lo que significa que no están compuestos con el mismo material en toda su masa.

Es una mezcla de materiales sólidos, líquidos (agua) y gaseosos (aire), la adecuada relación y proporción de los componentes determina una serie de propiedades que se conocen como propiedades físicas y químicas del suelo.

⁵ CRESPO VILLALAZ, Carlos. Mecánica de suelos y cimentaciones. p.20.

Entre las propiedades físicas del suelo se encuentran:

- Textura: que depende de la proporción de partículas minerales de diverso tamaño presentes en el suelo. Las partículas minerales se clasifican por su tamaño en cuatro grupos:
 - Grava
 - Arena
 - Limo
 - Arcilla

- Estructura: es la manera en que las partículas del suelo se reúnen para formar agregados. De acuerdo a esta característica se distinguen suelos de estructura esferoidal (agregados redondeados), laminar (agregados en láminas), prismática (en forma de prisma), blocosa (en bloques), y granular (en granos).

- Peso volumétrico (γ): se refiere al peso de dicho suelo contenido en la unidad de volumen y generalmente se expresa en kilogramos sobre metro cúbico. Se le denomina peso volumétrico seco y suelto (γ_{ss}), al peso volumétrico que resulta del proceso de secado del suelo en horno a temperatura constante.

- Consistencia: es la resistencia que presenta el suelo a la deformación o ruptura. Según dicha resistencia el suelo puede ser suelto, suave, duro, muy duro, etc.

- Densidad absoluta del suelo: es la masa del mismo contenida en la unidad de volumen, sin incluir sus vacíos. La densidad aparente es la masa contenida en la unidad de volumen, pero incluyendo sus vacíos.
- Densidad relativa de un suelo: es la relación de la densidad absoluta o aparente del suelo, a la densidad absoluta del agua destilada a temperatura de 4 grados centígrados.
- Absorción: hace referencia a la capacidad del suelo de retener el líquido en un lapso de 24 horas.
- Aireación: hace referencia al abastecimiento de oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono en el suelo, para el buen desarrollo de microorganismos.
- Temperatura: es importante porque determina la distribución de las plantas e influye en los procesos bióticos y químicos.
- Color: depende de sus componentes y puede usarse como una medida indirecta de ciertas propiedades. El color varía con el contenido de humedad. El color rojo indica contenido de óxido de hierro y manganeso; el amarillo indica óxidos de hierro hidratado; el blanco y el gris indican presencia de cuarzo, yeso y caolín; el negro y marrón indican materia orgánica. Cuanto más negro es un suelo, más productivo será por los beneficios de la materia orgánica.

Propiedades químicas del suelo:

Son aquellas que permiten reconocer ciertas cualidades, cuando se provocan cambios o reacciones que alteran la composición y acción de los mismos, provocadas por agentes químicos, tales como:

- Oxidación: reacción química que puede ocurrir en las rocas al recibir el agua de lluvia, porque el oxígeno de aire en presencia de humedad, reacciona químicamente produciendo el fenómeno de oxidación.
- Carbonatación: es el ataque que el ácido carbónico efectúa sobre las rocas que contienen hierro, calcio, magnesio, sodio y potasio, de esta manera son descompuestas las rocas ígneas que contienen dichos elementos.
- Hidratación: es la acción y efecto de combinar un cuerpo con agua para formar hidratos. El agua se absorbe y se combina químicamente para formar nuevos minerales.

1.1.1. Granulometría de los suelos

Es la medición y gradación que se realiza con granos de materiales que forman los suelos, con fines de análisis, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica.

1.1.2. Clasificación granulométrica de los suelos

Se realiza a través de un análisis granulométrico que tiene como objetivo calcular la cantidad en porcentaje de los diversos tamaños de las partículas que constituyen un suelo. Para la clasificación por tamaño de las partículas, el procedimiento más sencillo es hacer pasar las partículas por una serie de mallas de distintos anchos de entramado (a modo de coladores) que actúen como filtros de los granos que se llama, comúnmente, columna de tamices (también conocido como tamizado); sin embargo, al aumentar la finura de los granos el tamizado se dificulta, teniendo entonces que recurrir a procedimientos por sedimentación.

Tabla I. Escala granulométrica

Partícula de suelo	Rangos de Tamaños
Piedras	>200 mm
Gujarros	20 – 200 mm
Gravas	2 – 20 mm
Arenas	0,02 – 2 mm
Limos	0,002 – 0,02 mm
Arcillas	<0,002 mm

Fuente: CRESPO VILLALAZ, Carlos. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. p. 60.

1.1.3. Características de la naturaleza de los suelos

Según el origen de los elementos, los suelos se dividen en dos amplios grupos: orgánicos e inorgánicos.

Los suelos orgánicos se forman casi siempre en el lugar donde se encuentran; se denominan así por contener humus, materia no descompuesta o materia en descomposición, entre sus características se encuentran: el alto nivel de carbono en relación a los minerales que contiene y el alto nivel de humedad.

Los suelos inorgánicos: se les denomina de dicha manera por la ausencia de carbono y por estar formados por minerales; entre los que prevalecen: las gravas, arenas, limos y arcillas.

- Las gravas: son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas, cuando son acarreadas por el agua sufren desgastes en sus aristas y son redondeadas; la forma de las partículas de las gravas y su composición mineralógica dependen de la historia de su formación; ocupan grandes extensiones, pero casi siempre se encuentran mezcladas con cantos rodados, arenas, limos o arcillas.
- Arenas: es el nombre que se le da a los materiales de granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial, las arenas estando limpias no se contraen al secarse, no son plásticas, son menos compresibles que la arcilla, al aplicar una carga sobre la superficie se comprimen casi de manera instantánea, la arena y la grava suelen encontrarse en el mismo depósito.
- Limos: son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, pueden ser inorgánicos como los producidos en canteras u orgánicos como los que se encuentran en los ríos, siendo este último caso de característica plástica, su color varía desde gris claro a muy oscuro, la permeabilidad de los limos orgánicos es muy baja y su compresibilidad

muy alta, los limos que no se encuentran densos son considerados como suelos pobres para cimentar.

- Arcillas: son las partículas sólidas con diámetro menor de 0,005 milímetros y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al contacto con agua, químicamente es un silicato de aluminio hidratado, pero en pocas ocasiones también contiene silicatos de hierro o magnesio hidratados. Generalmente tiene una estructura cristalina y complicada y sus átomos están compuestos de forma laminar, de hecho se puede decir que hay dos tipos clásicos de dichas láminas: silícico y alumínico.

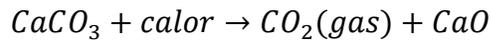
1.2. Generalidades sobre la cal

La cal es un material aglomerante producido por la eliminación del agua que contiene el carbonato de calcio, por medio de un proceso de calcinación. Sus propiedades aglomerantes se originan por la reabsorción del agua expulsada y la formación de los mismos compuestos químicos de que estaba formado el material original.

La composición y propiedades de las cales son extraordinariamente variadas, de acuerdo a la clasificación actual, la denominación de cales comienza en la cal blanca pura y alcanza hasta el cemento natural.

1.2.1. La cal viva

La piedra caliza está entre los minerales más importantes en la industria, la cal es el producto de la descomposición de rocas calizas y la caliza calentada a temperaturas superiores a los 900 grados centígrados da como resultado la siguiente ecuación:



Esto indica que al elevar la temperatura del carbonato de calcio, la calcinación evapora el agua de la piedra y expulsa dióxido de carbono (CO₂) en forma de gas, obteniendo como resultado el óxido de calcio (CaO) que comúnmente se conoce como cal viva.

La cal viva destinada a la construcción se debe combinar primero con la cantidad correcta de agua para formar una pasta de cal, acción que se conoce como proceso de apagado. Cuando la cal viva se mezcla con dos o tres veces su peso de agua, el óxido de calcio se combina con el agua para formar hidróxido de calcio y se desprende suficiente calor para que toda la masa entre en ebullición, el resultado es una suspensión de hidróxido de calcio finamente divididos que, al enfriar se forma una pasta muy trabada y adquiere la consistencia de masticue. Este masticue o pasta, después de un periodo de curado, se utiliza sobre todo en el mortero para albañilería, pues facilita trabajarlo. También puede utilizarse como aditivo en el concreto para mejorar la docilidad.

1.2.1.1. Cal magra

Este tipo de cal presenta un contenido de hasta 5 por ciento de arcilla y más de 10 por ciento de magnesio, aumenta poco su volumen y temperatura durante el proceso de hidratación.

1.2.1.2. Cal grasa

Presentan un contenido de hasta 5 por ciento de arcilla y menos del 10 por ciento de carbonato de magnesio. Forma una pasta blanda y untosa, que aumenta bastante el volumen al hidratarse.

1.2.2. Las cales hidratadas

Se preparan a partir de cal viva añadiendo una cantidad limitada de agua durante el proceso de hidratación. La cal hidratada se desarrolló a fin de ejercer mayor control sobre el apagado, al hacerlo durante la fabricación y no en la obra de construcción. Después que el proceso de hidratación deja de desprender calor, se tiene un polvo fino y seco como producto.

La cal hidratada puede usarse en el campo de la misma manera que la cal viva, como pasta o masa, pero no requiere de un largo periodo de curado, puede mezclarse en seco con arena, antes de agregar agua. La cal hidratada puede manejarse con más facilidad que la cal viva, porque no es tan sensible a la humedad. La plasticidad de los morteros hechos con cal hidratada, aunque es mejor que la obtenida con la mayoría de los cementos, no es tan buena como la de los morteros hechos con la cantidad equivalente de pasta de cal apagada en la obra.

1.2.3. Cales hidráulicas

La cal hidráulica se forma por medio de la calcinación de una roca caliza que contenga arcilla, a una temperatura menor a la de una fusión incipiente, de manera similar a la que se produce en la cal viva. Al hidratarla (apagarla) se debe de agregar únicamente el agua suficiente para hidratar solamente la cal

libre (CaO) formada, para dejar sin hidratar los suficientes silicatos de calcio, con el objetivo de que el polvo seco tenga sus propiedades aglomerantes. Las cales hidráulicas son de poca resistencia debido a que tienen bajo contenido de silicato y alto de cal.

1.3. Producción de vapor para la generación de energía eléctrica

Para comprender de mejor manera la generación de energía a partir del calentamiento del agua se debe comprender lo siguiente:

La primera ley de la termodinámica es la conservación de la energía, porque la misma no puede crearse ni destruirse. Este principio quiere decir que debe de prevalecer un balance exacto entre la energía de entrada y la de salida, en los diferentes tipos de energía que se introduzcan o extraigan de un sistema, no puede existir exceso o deficiencia de la misma. Dentro de un sistema, la energía puede pasar de una forma a otra (ejemplo de calor a trabajo), pero debe conservarse su totalidad en el sistema.

La ecuación con la que se expresa la ley de conservación de la energía es:

$$E_2 - E_1 + E_{(T)} = Q - W$$

$E_2 - E_1 = \Delta E$ es la ecuación del cambio de la energía almacenada en los estados frontera 1 y 2 del sistema y, E_T expresa los cambios de la energía debido a los comportamientos no estacionarios para los sistemas que se encuentren en estado estacionario $E_T = 0$. Q representa el valor añadido al sistema y W es el trabajo que realiza el sistema.

Si el sistema es abierto, entiéndase como sistema en donde entra y sale masa, el término ΔE refleja la energía almacenada que ingresa y sale con la masa utilizada para el proceso de generación de energía. Los problemas que se dan en el campo de potencia conciernen; por lo general a los sistemas abiertos. Por lo mismo, los sistemas abiertos cuentan con una forma alterna de la ecuación, que descomponen los términos ΔE en energía almacenada interna y externa, que entra y sale del proceso con base en una masa unitaria. A esta alternativa de la ecuación se le denomina como ecuación general de la energía, para un fluido que se encuentra en movimiento es:

$$\Delta u + \Delta(Pv) + \Delta \frac{V^2}{2g} + \Delta Z = Q - W$$

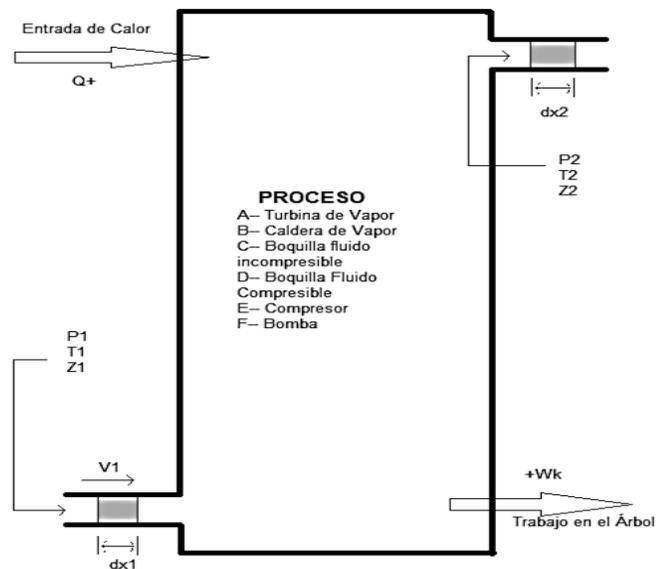
En la que Δu representa la diferencia de la energía almacenada internamente asociada con las fuerzas o movimientos moleculares y atómicos, a esta expresión se le conoce como el cambio de energía interna, que toma en cuenta todas las formas de energía aparte de la energía cinética y potencial de las masas colectivas de las moléculas.

$\Delta(Pv)$ es la energía almacenada externamente y representa la diferencia en el trabajo requerido para mover una unidad de masa hacia adentro y hacia afuera del sistema. Se debe tener en cuenta que tanto $\Delta(Pv)$ y Δu como se emplean aquí difiere de otras formas de energía almacenada, en que únicamente dependen de variables de estado de P, v y T a través de una ecuación de estado.

Los términos restantes de energía almacenada externa como ΔZ y $\Delta \frac{V^2}{2g}$, dependen de otros aspectos físicos del sistema. ΔZ representa cualquier diferencia de energía que ocasionen cambios de elevación en el campo de

fuerza gravitacional. $\Delta \frac{v^2}{2g}$ representa una diferencia en la energía cinética total del fluido. Las cantidades de calor son positivas cuando entran al sistema y el trabajo es positivo cuando sale del sistema.

Figura 1. **Esquema para análisis de energías en elementos mecánicos**



Fuente: ROSALER, Robert C. Manual de mantenimiento industrial, p. 4-11.

El proceso fundamental de funcionamiento de las centrales termoeléctricas en la producción de vapor para la generación de energía eléctrica, está basado en la conversión de energía térmica (calor) en energía mecánica, para posteriormente ser transformada en energía eléctrica.

La conversión de energía térmica en energía mecánica se origina a través del uso de un fluido (agua) que producirá trabajo en su proceso de expansión (evaporación), en las turbinas térmicas. La conversión de la energía mecánica

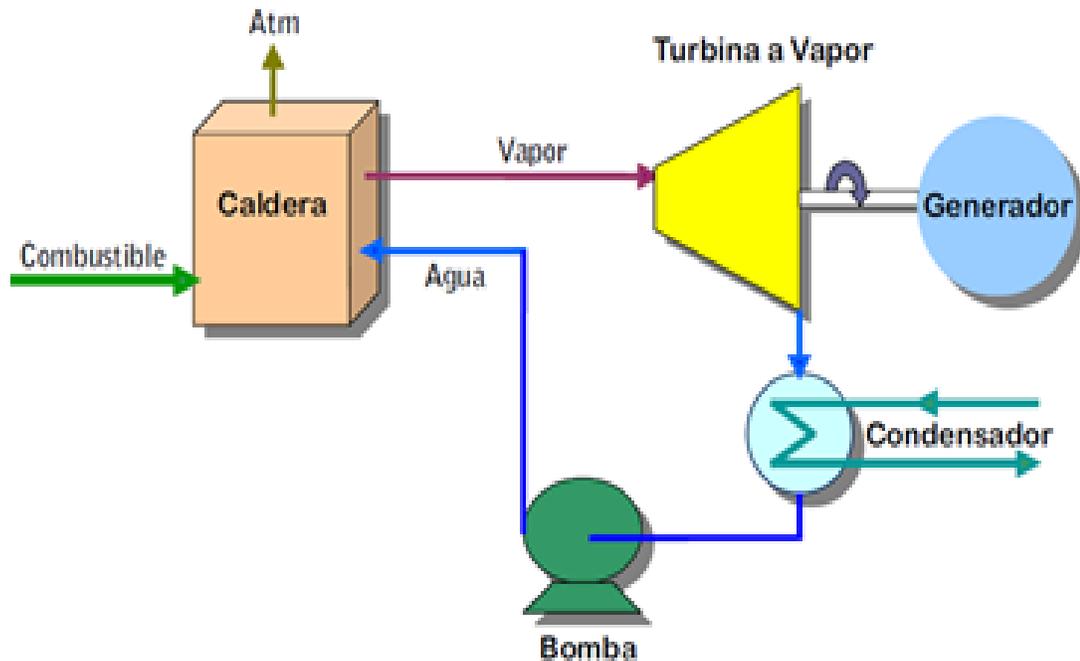
en eléctrica se efectúa a través del accionamiento mecánico de un generador eléctrico acoplado al eje de la turbina. La producción de energía térmica se genera por la transformación de energía química de los combustibles a través del proceso de combustión o de origen nuclear de los combustibles radioactivos a través de la fisión del núcleo.

Las centrales termoeléctricas convencionales pueden ser clasificadas de acuerdo con el método de combustión que utilicen de la siguiente manera:

- Combustión externa: aquella donde el combustible no entra en contacto con el fluido de trabajo. Es un proceso utilizado, principalmente en las centrales térmicas a vapor, donde el combustible calienta el fluido de trabajo, en general agua, en una caldera hasta producir vapor que luego se expande en una turbina donde producirá trabajo mecánico.
- Combustión interna: aquella donde la combustión se efectúa sobre una mezcla de aire y combustible, siendo el fluido de trabajo el conjunto de productos de combustión. Este proceso se produce en las turbinas a gas y en las unidades térmicas de movimiento alternativo (pistón) como los motores de ciclo Otto (gasolina) o diesel.

En la figura 2 se muestra un diagrama simplificado de una central termoeléctrica de combustión externa (a vapor). Al quemar el combustible se produce calor dentro de la caldera que transforma el líquido en vapor. El vapor se expande a medida que la presión se reduce en la turbina a vapor, generando energía mecánica. El vapor que sale de la turbina va al condensador donde se extrae el calor, retornando nuevamente al estado líquido. Finalmente el líquido es bombeado nuevamente a la caldera cerrando el ciclo.

Figura 2. Diagrama de una central termoeléctrica de combustión externa

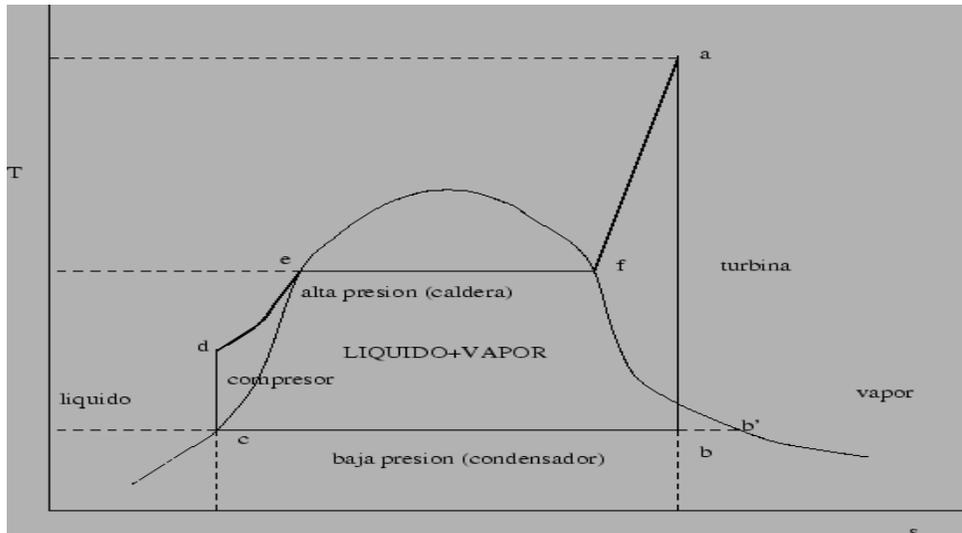


Fuente: ROSALER, Robert C. Manual de mantenimiento industrial, p. 4-18.

Para generar electricidad se utiliza el ciclo Rankine, en el cual las calderas son parte fundamental de las centrales termoeléctricas.

Como se muestra en la figura 3, en el ciclo de Rankine, el líquido se comprime isentrópicamente desde c a d . Desde d a a , se añade calor reversiblemente en los estados de dos fases de líquido comprimido y sobre calentado. La expansión isentrópica con salida de trabajo tiene lugar desde a a b , y el calor no disponible se rechaza al suministro atmosférico desde b a c .

Figura 3. Diagrama de Rankine



Fuente: ROSALER, Robert C. Manual de mantenimiento industrial, p. 4-16.

1.3.1. Bomba

Una bomba hidráulica es un medio para convertir energía mecánica en energía fluida o hidráulica, es decir, que añade energía al agua. En el bombeo de un fluido incompresible verdadero, toda la energía agregada como trabajo va idealmente a elevar la carga estática H.

$$W=H ft$$

1.3.1.1. Bombas recíprocas

Comprende dos unidades colocadas una al lado de la otra consistiendo cada una en dos cilindros con pistones fijos en el mismo eje. Uno de los cilindros constituye un pequeño motor de vapor de acción directa, es decir, con

admisión completa durante toda la carrera y da movimiento a los pistones. El otro cilindro es una bomba aspirante y repelente.

Estas son bombas de doble acción: uno de los lados del pistón trabaja en la succión y el otro en la descarga, durante el retorno de la carrera y durante el avance de la misma.

Dado que esta máquina consiste en dos bombas colocadas lado a lado, la admisión del vapor en uno de los cilindros se asegura por una válvula de corredera controlada por el otro pistón al final de su carrera: cuando el primer pistón llega al fin de su curso, en la derecha, empieza la admisión del vapor y el movimiento del otro pistón hacia la derecha y así sucesivamente.

1.3.1.2. Bombas centrífugas

El flujo es constante por completo y prácticamente no hay límites en cuanto a la potencia requerida para el flujo. La presión de descarga varía entre baja y alta, pero las presiones altas se obtienen con bombas de etapa múltiple a velocidades altas. Las selecciones económicas para altas presiones se justifican únicamente en los casos de grandes flujos que requieran alta potencia.

Con el desarrollo de la electrificación, las bombas de pistón han sido reemplazadas por las bombas centrífugas con motor eléctrico acoplado directamente a las mismas. La principal desventaja de estas bombas es que la velocidad del motor eléctrico se determina una sola vez y no puede ajustarse: 2 900, 1 450 o 960 revoluciones por minuto (corriente alterna de 50 ciclos).

El ajuste del gasto tiene que hacerse con una válvula, la que siempre debe colocarse en el lado de descarga y no en la succión. De otra manera, el impulsor se desgasta rápidamente. Este método de regulación puede usarse sin inconveniente hasta cerrar completamente la válvula cuando se hace marchar la bomba. La potencia absorbida por la bomba así ajustada, disminuye con el gasto, aunque no proporcionalmente. Sin embargo, el $\cos(\varphi)$ del motor también disminuye y puede llegar a ser muy bajo.

El ajuste por medio de la válvula de descarga no siempre permite regular el gasto de la bomba a las variaciones continuas y a veces notables, de su gasto.

Para prestar atención continua a esta válvula es conveniente proveer a cada bomba de un dispositivo consistente en una válvula balanceada que trabaja a flotación y que se coloca en un tanque intermedio, el que regula el gasto de la bomba. De esta manera, el gasto se hace proporcional a la cantidad del líquido que llega al tanque intermedio B. Si el nivel de este tanque está sobre cierta marca N1, el flotador cierra la válvula completamente y todo el líquido se fuerza a través del tubo T. Si el nivel llega debajo de N2, el flotador abre la válvula completamente y todo el líquido escurre en un circuito cerrado entre el tanque B, la bomba y la válvula. En una operación normal la válvula recircula cierta proporción del líquido.

Este aparato es útil para asegurar el funcionamiento satisfactorio de la bomba centrífuga y para evitar fluctuaciones en la alimentación de las unidades colocadas corriente abajo, en relación con la bomba.

1.3.1.3. Bombas rotativas

Esta es una bomba de desplazamiento que consiste en un impulsor de sección elíptica, que gira dentro de la armadura de la bomba y en el que descansa una rasqueta de resortes. Estas bombas se proveen junto con su motor o con un engrane reductor y un volante de mando. La reducción de velocidad entre el volante y la bomba debe hacerse con bandas trapezoidales o con un engrane con piñón de cuero. Anteriormente las bombas acopladas al motor tenían una reducción cónica que disminuía la eficiencia notablemente, pero que simplificaba la reducción de velocidad. A la fecha estos aparatos se venden con un reductor de velocidad coaxial cuya eficiencia es mucho mayor.

1.3.2. Calderas

Es una máquina o dispositivo de ingeniería que se diseña para generar vapor saturado. Este vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante. En el cual, el fluido originalmente se encuentra en estado líquido que al calentarse cambia a estado gaseoso (vapor).

La caldera se suspenderá de la parte superior por una estructura de acero y estará libre para expandirse hacia abajo, de manera que los esfuerzos por temperatura se mantengan dentro de los límites de diseño. Toda la estructura deberá estar diseñada para resistir, además de las cargas del generador de vapor, las fuerzas producidas por velocidades de viento y sismo.

La combustión en la caldera se da en el hogar de la misma y esta depende del tipo de combustible y la forma de la combustión.

Desde el punto de vista del desarrollo del fuego y de la colocación de los quemadores, los hogares pueden clasificarse en:

- Paralelos: con quemadores al frente o al frente y atrás.
- Turbulento: con quemadores colocados en las esquinas que inyectan el combustible de forma tangencial cerca del centro.

La carga térmica en el hogar depende directamente del tipo de combustible; existiendo en las calderas mayores una tendencia a reducirse. Entonces la temperatura del hogar depende del tipo de combustible y la carga térmica en el mismo.

1.3.2.1. Calderas pirotubulares

En este tipo de caldera, el fluido en estado líquido se encuentra en un recipiente y es atravesado por tubos en los cuales circula fuego y gases producto de un proceso de combustión.

1.3.2.2. Calderas acuotubulares

Son aquellas en las que el fluido de trabajo se desplaza a través de tubos mediante su calentamiento. Son las más utilizadas en centrales termoeléctricas, porque permiten altas presiones de salida y gran capacidad de generación.

1.3.2.3. Combustibles

Es cualquier material capaz de arder en determinadas condiciones y liberar energía cuando se oxida de forma violenta, que poco a poco realiza desprendimiento de calor. Supone la liberación de una energía de su forma potencial (poder calorífico) a una forma utilizable sea directamente (energía térmica) o energía mecánica (motores térmicos), dejando como residuo calor (energía térmica), dióxido de carbono y algún otro compuesto químico. Para la generación de fuego es necesario que haya un combustible, chispa (calor) y oxígeno.

1.3.2.3.1. Derivados del petróleo

Los depósitos de petróleo se encuentran por todo el mundo y se han localizado yacimientos en cada continente. La mayoría de estos depósitos se encuentran a varios cientos de metros de profundidad y el mismo se obtiene a través de pozos perforados para penetrar hasta donde se encuentra.

Los petróleos crudos son mezclas muy complejas, que consisten en hidrocarburos y en compuestos que contienen nitrógeno, azufre, oxígeno y trazas de metales, como constituyentes menores. Las características físicas y químicas de los petróleos crudos varían mucho, según los porcentajes de sus diversos compuestos. La densidad específica cubre un intervalo amplio, pero para la mayoría de los petróleos crudos se encuentran entre 0,8 y 0,97 gramos sobre mililitro, o la gravedad tiene valores comprendidos entre 45 y 15 grados API. También hay una variedad de viscosidades, pero para la mayor parte de los crudos se encuentran entre 2,3 y 23 centistokes. La composición última señala un contenido de 84 a 86 por ciento de carbón, 10 al 14 por ciento de hidrógeno y pequeños porcentajes de azufre, oxígeno y nitrógeno. El contenido

de nitrógeno, por lo general es menor al 1,0 por ciento pero podría llegar a ser hasta de 5,0 por ciento.

El petróleo es la fuente de energía más importante en la actualidad, además es materia prima en numerosos procesos de la industria química. El origen del petróleo se encuentra en las rocas sedimentarias, pero procede de la descomposición de materia orgánica (especialmente restos de animales u grandes masas de plancton en un medio marino). El petróleo crudo se utiliza raras veces como combustible, porque son más valiosos cuando se refinan para formar otros productos. Los derivados que se obtienen del petróleo por medio del proceso de destilación son:

- Gases: metano, etano y gases licuados de petróleo (propano y butano).
- Nafta, ligroína o éter de petróleo
- Gasolina
- Queroseno
- Gasóleo (ligero y pesado)
- Fuelóleo
- Aceites lubricantes
- Asfalto
- Alquitrán

Entre los derivados del petróleo utilizados en la industria se encuentran los aceites combustibles que se gradúan de acuerdo a su gravedad y viscosidad; el más ligero es el número 1 y el más pesado es el 6. Los análisis y valores caloríficos de la clasificación de los aceites se muestran en la tabla II.

Tabla II. **Características de los derivados del petróleo utilizados comúnmente en la industria**

Características	No.1	No.2	No.4	No.5	No.6
Peso (%)	---	---	---	---	---
Azufre	0,01 – 0,5	0,05 - 1,0	0,2 – 2,0	0,5 – 3,0	0,7 - 3,5
Hidrógeno	13,3 - 14,1	11,8 - 13,9	(10,6 – 13,0)	(10,5 – 12,0)	(9,5 - 12,0)
Carbono	85,9-86,7	86,1 – 88,2	(86,5 – 89,2)	(86,5 – 89,2)	(86,5 – 90,2)
Nitrógeno	Nil-0,1	Nil-0,1	---	---	---
Oxígeno	---	---	---	---	---
Ceniza	---	---	0 – 0,1	0 – 0,1	0,01 - 0,05
Gravedad					
Grado API	40 - 44	28 - 40	15 - 30	14 - 22	7 - 22
Específica	0,825 – 0,806	0,887 – 0,825	0,966 – 0,876	0,972 – 0,922	1,022 – 0,922
Lb/gal.	6,87 – 6,71	7,39 – 6,87	8,04 – 7,30	8,10 – 7,68	8,51 – 7,68
Punto de Fluidez (F)	0 a -50	0 a -40	-10 a +50	-10 a +80	+15 a +85
Viscosidad	---	---	---	---	---
Centistokes @ 100F	1,4 – 2,2	1,9 – 3,0	10,5 - 65	65 - 200	260 - 750
SSV @ 100F	---	32 - 38	60 - 300	---	---
SSF @ 122F	---	---	---	20 - 40	45 - 300
Agua y sedimento, % en vol.	---	0 – 0,1	0,05 – 1,0	0,05 – 1,0	0,05 – 2,0
Valor calorífico, Btu/lb., bruto	19 670 - 19 860	19 170 - 19 750	18 280 - 19 400	18 100 - 19 020	17 410 - 18 990

() Estimado.

Fuente: ROSALER, Robert C. Manual de mantenimiento industrial, p. 4-77.

1.3.2.3.2. Carbón natural

El carbón vegetal o de madera se prepara por el calentamiento de la madera a temperatura elevada en ausencia de aire. Se pierde arriba del 75 por ciento en peso y el 50 por ciento de volumen, debido a la eliminación de la humedad y de materia volátil. Como resultado, el carbón vegetal tiene un poder calorífico por pie cúbico más elevado que la madera en sí, especialmente si el producto final se compacta en briquetas. El carbón vegetal no es lo único que se utiliza como combustible natural, también se utiliza la turba y la madera.

La turba representa una etapa de la metamorfosis de la materia vegetal en carbón, constituye un producto de la desintegración y descomposición parcial de plantas de pantanos o ciénagas en ausencia de aire. Hay cuatro grandes tipos de turba, clasificados de acuerdo con su origen genérico y al contenido de fibra: turba de musgo sphagnum (turba de musgo), hypnum, turba de juncos y de humus. Las otras clases de turba no las ha clasificado las American Society for Testing and Materials (ASTM). Como todos los materiales de origen vegetal, la turba es una mezcla de carbón, hidrógeno y oxígeno en relación similar a la mezcla de celulosa y lignina. En general, el contenido de azufre, nitrógeno y ceniza de la vegetación de origen son bajos. Estos contaminantes penetran la ciénaga, o bien son productos de la lixiviación con los estratos adyacentes.

El contenido de humedad de la turba de pantano sin drenar es de 92 a 95 por ciento; pero se reduce del 10 al 55 por ciento, cuando se utiliza como combustible comercial. Normalmente la turba se recolecta con equipos removedores de suelo, de pantanos drenados que se secaron por estar expuestos al viento y al sol. Pero el método más frecuentemente utilizado en Irlanda y la Unión Soviética consiste en el desgarre de la turba y el secado en el campo antes de recolectarse mecánica o neumáticamente.

La madera, cuando se emplea como combustible, generalmente es un producto secundario de aserraderos o de la industria papelera. En la conversión de los troncos de madera generalmente se pierde el 50 por ciento por la corteza, por cepilladura y aserrín. Si la madera es fresca contiene del 30 al 50 por ciento de humedad, la mayor parte de la estructura celular; después de secarse durante un año, el contenido de humedad se reduce del 18 al 25 por ciento. La madera secada en hornos contiene, aproximadamente 8 por ciento de humedad.

La madera seca puede tener un poder calorífico de 8 750 unidad térmica británica sobre libra, pero con el 80 por ciento de humedad, una libra de madera tiene un poder calorífico de solamente 1 750 unidad térmica británica sobre libra. El calor requerido para evaporar el agua es mayor a 900 unidad térmica británica sobre libra.

Otro combustible muy utilizado en los ingenios azucareros es el bagazo, que consiste en el material sólido, fibroso que sale de la abertura trasera del último de los molinos de la batería, después de la extracción del jugo. Cuando el trabajo de los molinos es deficiente, el contenido de humedad del bagazo será de aproximadamente el 50 por ciento, mientras que en un buen trabajo de los mismos su contenido de humedad será del 40 por ciento.

Algunas fábricas famosas tienen humedades de 38 por ciento, estas cifras son excepcionales. El valor calorífico del bagazo seco es aproximadamente de 8 293 unidad térmica británica sobre libra, pero con el 45 por ciento de humedad se obtiene aproximadamente un poder calorífico de 1 850 unidad térmica británica sobre libra.

1.3.2.3.3. Carbón mineral y sus residuos

El carbón mineral es un combustible sólido negro o negro pardusco que se forma por la descomposición de la antigua vegetación en ausencia de aire, por medio de la influencia de acción bioquímica, humedad, calor y presión. Esencialmente se compone de carbono, hidrógeno y azufre. Es un material heterogéneo, que varía de acuerdo a los componentes de la planta que le dio origen y el grado de cambio metamórfico. Asociados a la matriz orgánica se encuentran el agua y una gran variedad de materiales inorgánicos (que

contienen hasta 65 elementos químicos). El carbón mineral es ampliamente utilizado como combustible y en menor cantidad como fuente de productos químicos orgánicos.

El carbón mineral según su clase puede clasificarse de varias formas, esto se debe al grado de metamorfosis o alteración progresiva, en las series naturales desde lignito hasta antracita. El esquema básico de clasificación por la ASTM es de acuerdo con el carbono fijo y por el poder calorífico calculado sobre base libre de materia. Los carbones minerales de baja clase se clasifican de acuerdo al poder calorífico (Btu) sobre base húmeda, mientras que los de clase más alta se clasifican de acuerdo con el carbón fijo sobre base seca. El poder aglutinante se utiliza para diferenciar ciertos grupos adyacentes. Los carbones son considerados aglutinantes, si en un ensayo para determinar la cantidad de material volátil producen un botón que soporte 500 gramos de peso sin pulverizar o un botón que presente crecimiento o estructura de celdas.

El análisis inmediato, el contenido de azufre y el poder calorífico constituyen las determinaciones analíticas más comunes para la caracterización industrial del carbón. El análisis inmediato es el método más simple para determinar la distribución de los productos obtenidos durante el calentamiento. Los productos se clasifican en cuatro grupos:

- Agua o humedad
- Materia volátil
- Carbón fijo
- La ceniza derivada de las impurezas minerales del carbón

La humedad es la pérdida de peso resultante del secado del carbón a temperaturas comprendidas entre 104 y 110 grados centígrados en condiciones

especificadas durante 24 horas. El calentamiento posterior a temperaturas más elevadas puede eliminar agua, pero esta se considera como parte del carbón.

La materia volátil se toma como la pérdida de peso menos la humedad obtenida por calentamiento del carbón durante 7 minutos, en un recinto cubierto a una temperatura alrededor de 950 grados centígrados, en condiciones específicas. La materia volátil no existe en el carbón como tal, sino que se produce por la descomposición del mismo al ser calentado.

El carbón fijo se obtiene restando de 100 la suma de los porcentajes de humedad, materia volátil y ceniza que da el análisis inmediato. Es el residuo carbonoso, menos la ceniza que queda en el recipiente de ensayo para la determinación de la materia volátil.

Entre la clasificación de carbón mineral según la Norma ASTM, se puede nombrar la meta-antracita, que es un carbón cuya composición y estructura son semejantes a la del grafito. En general, requiere tiempo para entrar en ignición y es difícil de quemar. En la actualidad, tiene poca importancia comercial.

La antracita (llamada algunas veces carbón duro) es dura, compacta y de color negro brillante, en general, con una fractura en forma de concha. Entra en ignición con cierta dificultad y se quema con llama azul, corta y sin humo. Se utiliza para calentamiento y como fuente de carbón. En la industria del hierro y el acero, la antracita se utiliza mezclada con carbón bituminoso para hacer coque.

La semiantracita es densa, pero es más suave que la antracita. Cuando se quema genera una llama azulada, corta, limpia y se enciende un poco más fácilmente que la antracita.

El carbón bituminoso, poco volátil es negro grisáceo, de estructura granular y frágil en cuanto su manejo. Se apelmaza en el fuego y se quema con flama corta, en general, es considerado sin humo en cualquier condición de quemado. Se utiliza para calentamiento y producción de vapor. Los carbones bituminosos poco volátiles no pueden ser carbonizados solo en hornos de tipo de abertura, porque se expanden y dañan las paredes.

El carbón bituminoso medianamente volátil corresponde a un estado intermedio entre los carbones bituminosos de alta y baja volatilidad y en consecuencia, tiene algunas características de ambos. Algunos son muy suaves y frágiles, pero otros son duros y no se desintegran al manejarlos. Se apelmaza en el lecho combustible y cuando se quema de forma inadecuada, produce humo. Cuando se carbonizan solos, únicamente aquellos carbones que no se expanden en manera apreciable pueden usarse sin peligro de dañar las paredes del horno.

El carbón bituminoso con contenido alto de material volátil se clasifica en:

- Tipo A

Tiene distintas bandas de lustre, es duro y se maneja bien con pocas fracturas. Al quemarse en un lecho combustible, se apelmaza y produce humo si se quema en forma inadecuada.

- Tipo B

Es similar al tipo A, pero tiene un contenido de humedad y de oxígeno en el yacimiento ligeramente mayor y es menos coquizante. Es bueno para producción de vapor y calefacción.

- Tipo C

Se encuentra en una etapa más baja en clase que el carbón bituminoso B y, en consecuencia, tiene un contenido progresivamente más alto de humedad y oxígeno. Sus usos son los mismos que el tipo B.

Los carbones subbituminosos presentan, en general, menos evidencia de bandas que los bituminosos. Tienen mayor contenido de humedad que los bituminosos y cuando se exponen al aire se desintegran, debido a las fracturas ocasionadas por la pérdida de humedad. Principalmente es utilizado para calefacción y producción de vapor.

Los lignitos tienen colores que van del café al negro y un contenido de humedad en el yacimiento que va del 30 al 45 por ciento, con el resultante menor poder calorífico con respecto a los carbones de clase más elevada. El lignito puede quemarse en hogares grandes o móviles y en forma pulverizada.

Los tipos de residuos del carbón mineral de uso industrial en la producción de vapor se pueden clasificar principalmente en:

- Ceniza de fondo

Es el residuo de fondo que no está en el aire proveniente del carbón quemado en una caldera; una concentración de materiales no combustibles que cae al fondo de la caldera.

- Ceniza volante

Partículas residuales no combustibles y livianas que son expulsadas de la chimenea, por medio de los gases generados por la combustión de carbón mineral en una caldera.

1.3.3. Turbinas de vapor

La turbina es una maquinaria que tiene como objetivo la conversión de la energía cinética que lleva un flujo (vapor) en energía mecánica. En la actualidad se fabrican de muchas formas y diferentes distribuciones. Se emplean para el accionamiento de diferentes tipos de aparatos, por ejemplo, generadores eléctricos, bombas, compresores y para transmitir movimiento a las hélices de los barcos, a través de los engranajes adecuados.

La capacidad de las turbinas de vapor abarca un amplio campo, que va de unos cuantos caballos de potencia (hp) hasta unos 1 000 Mega Watts, donde a más grandes son utilizadas para mover los generadores de las centrales eléctricas.

Existen dos tipos de turbinas de vapor, dependiendo de la forma de expansión de vapor en las etapas de la turbina.

1.3.3.1. Turbinas de impulso

Son también llamadas turbinas de acción, la caída total de presión se toma en las toberas o elementos fijos, lo que ocasiona que el flujo que pasa a través de los cangilones o paletas móviles se mantenga a una presión estática constante. Esto puede ampliarse cuando se agrega un grupo adicional de

paletas fijas intermedias y una hilera de paletas móviles, por lo cual se obliga a pasar al flujo.

1.3.3.2. Turbinas de reacción

La caída total de presión correspondiente a esta etapa se divide por igual entre ambas series de paletas. En el paso de acción los álabes deben hacer que la corriente gire a un ángulo mayor, mientras que en el paso de reacción la forma de los cangilones o álabes es muy parecida a la de las toberas o paletas fijas.

1.3.4. Turbogenerador

En este elemento mecánico se transforma la energía mecánica a energía eléctrica; por lo general se encuentra directamente acoplado a la flecha de la turbina.

Los principales problemas de fabricación son los de límite de volumen y peso para transporte, condiciones tecnológicas de forja del rotor, sistemas de enfriamiento, etc.

En la fabricación del rotor se consideran velocidades periféricas del orden de 230 metros sobre segundo y diámetros de 1,2 metros.

Generalmente se utiliza nitrógeno para el enfriamiento del estator y rotor. Para potencias de 600 Mega Watts se requiere enfriamiento directo del rotor, pero para potencias de 1 000 Mega Watts se necesita enfriamiento de todo el generador. Una diferencia de temperatura de 60 grados centígrados entre el hierro y el cobre producen dilataciones inadmisibles. La temperatura admisible

en la superficie del rotor es de 140 grados centígrados, lo cual permite un calentamiento del agua de enfriamiento de 50 grados centígrados.

El voltaje de generación es de 6 a 24 kilovoltios dependiendo de las características y capacidad de transformación.

El factor de potencia deberá de ser de 0,80 inductivo hasta capacidades de 160 a 500 Mega Watts y 0,90 inductivo en capacidades de 600 Mega Watts y mayores.

1.3.5. Condensador

En el condensador se da la condensación del vapor de escape de la turbina y drenes, además de la extracción de algunos gases incondensables. Se fabrica como intercambiador de calor con mezcla de agua de enfriamiento, de superficie con enfriamiento de agua y de superficie con enfriamiento de aire. En las plantas termoeléctricas se utilizan condensadores de superficie con enfriamiento del agua, con excepción de los condensadores barométricos o de mezcla empleadas en las plantas termoeléctricas.

La selección del condensador es un problema complejo, que requiere la consideración del sistema completo al que se relaciona.

En un condensador, la desaireación se realiza por la aplicación de la Ley de Henry, la cual dice que la concentración del gas disuelto en una solución es directamente proporcional a la presión parcial de ese gas en el espacio libre sobre el líquido, con excepción de los gases que establecen una reacción química con el solvente.

Las gotas de condensado que caen en un condensador se limpian en forma continua con el vapor, con lo cual liberan el O_2 y permiten la remoción del aire cuando circula por la sección de baja presión, donde el equipo removedor lo descarga a la atmósfera.

Para eliminar los últimos vestigios de O_2 del condensado es normal agregar un compuesto de amoníaco, como la hidrazina. El condensador se localiza a la salida de la turbina de baja presión, para minimizar la caída de presión.

El cuerpo del condensador y la entrada deben estar diseñados para evitar remolinos y pérdidas de presión en el recorrido del vapor; los tubos deben distribuirse de manera que facilite el recorrido del vapor hasta la parte inferior del condensador.

El número de pasos del agua pueden ser uno, dos o tres, dependiendo del estudio de optimización; la velocidad del agua en los tubos varía de 1,8 a 2,3 metros sobre segundo y las pérdidas de presión en un solo paso son de alrededor de 0,3 kilogramos sobre centímetro cuadrado.

1.3.6. Torre de enfriamiento

Las torres de enfriamiento son dispositivos de enfriamiento artificial del agua. Se clasifican como cambiadores de calor entre un volumen en circuito cerrado de agua y aire atmosférico.

Básicamente, las torres de enfriamiento son cambiadores de calor, efectuando la transmisión de calor por medio de sustancia y convección de calor entre los medios. El agua le cede calor al aire sobre todo por evaporación,

lo hace por convección, pero en forma secundaria. La convección interviene más cuando el ambiente es frío y hay una mayor diferencia de temperaturas entre el agua y el aire.

El objetivo de una torre de enfriamiento en un proceso de generación de vapor es enfriar el agua y de esta manera devolverle sus propiedades al momento de reutilizarla.

Este sistema es utilizado, generalmente en lugares con limitación de la disponibilidad del agua, en donde la contaminación de la reserva de agua por temperatura está prohibida, en el lugar que debe efectuarse la correcta conservación del agua o donde deben de evitarse otras fuentes de contaminación.

Los mayores problemas de las torres de enfriamiento son los siguientes:

- Primero: consiste en la cantidad de agua que se pierde en forma de vapor al momento de que la misma salga caliente y choca con el aire.
- Segundo: que la torre de enfriamiento trabaja de manera menos eficiente cuando el clima atmosférico es caluroso.

1.4. Generalidades de la ceniza

La ceniza es uno de los residuos resultantes de la incineración del carbón mineral, es de suma importancia el manejo adecuado de la misma, de tal forma que se debe estimar la facilidad en el manejo, almacenaje y procesamiento de los productos derivados de la combustión del carbón para su posterior reutilización.

La cogeneración produce cenizas livianas (*fly ash*) y pesadas (*bottom ash*) que forman parte del contenido del carbón son residuos de carbón que no fueron quemados y partículas de cal con una cubierta de sulfatos. Estos materiales han sido extensamente evaluados y clasificados como no peligrosos y conceptualizados como productos con usos benéficos.

A continuación se nombran algunos de los usos beneficiosos técnicamente documentados, de los productos derivados de la combustión del carbón:

- Material geotécnico
- Relleno y relleno estructural
- Agrícola
- Secado y estabilización de lodos y desperdicios
- Solidificación de desperdicios líquidos
- Estabilización de suelos
- Cubierta de vertederos
- Base para carreteras
- Agregado manufacturado
- Relleno de minas
- Relleno de trincheras

Actualmente se encuentran en procesos de aprobación de permisos, otros usos en la construcción y planes de mitigación de minas.

1.4.1. Clasificación de tipos de ceniza según proceso de producción

En el proceso de cogeneración se pueden obtener los siguientes tipos de residuos:

- Ceniza volante seca
- Ceniza de fondo seca
- Ceniza compuesta seca
- Ceniza compuesta hidratada

1.4.1.1. Ceniza volante seca

Se obtiene de los sistemas de recolección de polvo de las calderas, se encuentra en los gases de combustión y es recolectada primero en los *hoppers* de ceniza localizados abajo del calentador de aire y la ceniza que no es recolectada por los mismos, es recolectada por los *hoppers* del *baghouse* (casa de filtros de tejidos).

La ceniza que se almacena temporalmente en los *hoppers* y el *baghouse*, necesita ser removida de los mismos, por lo que resulta necesario contar con un sistema para el manejo y almacenamiento de la ceniza volante.

El sistema de manejo y almacenamiento de la ceniza volante es el encargado de transportar toda la ceniza que se encuentra almacenada en los *hoppers* hacia un filtro separador, que tiene como finalidad separar el aire y la ceniza, posteriormente la ceniza es depositada en el silo almacenador, luego se descarga del silo a un camión, para su almacenamiento en la pila de ceniza o su venta para usos industriales.

1.4.1.2. Ceniza de fondo seca

Este tipo de ceniza precipita al fondo de la caldera, donde es extraída por gravedad y posteriormente es transportada a silos para su almacenamiento; está formada por partículas visibles de colores café, negro y blanco.

1.4.1.3. Ceniza compuesta seca

Es la mezcla de ambos tipos de ceniza (ceniza volante y ceniza de fondo), dicha mezcla se realiza en el silo de almacenamiento.

1.4.1.4. Ceniza compuesta hidratada

Se hidrata la ceniza compuesta seca, para posteriormente, ser transportada hacia un acopio o relleno ubicado en el interior de la planta. La hidratación se realiza para evitar que se disperse al momento de transportarse de un punto de la planta a otro.

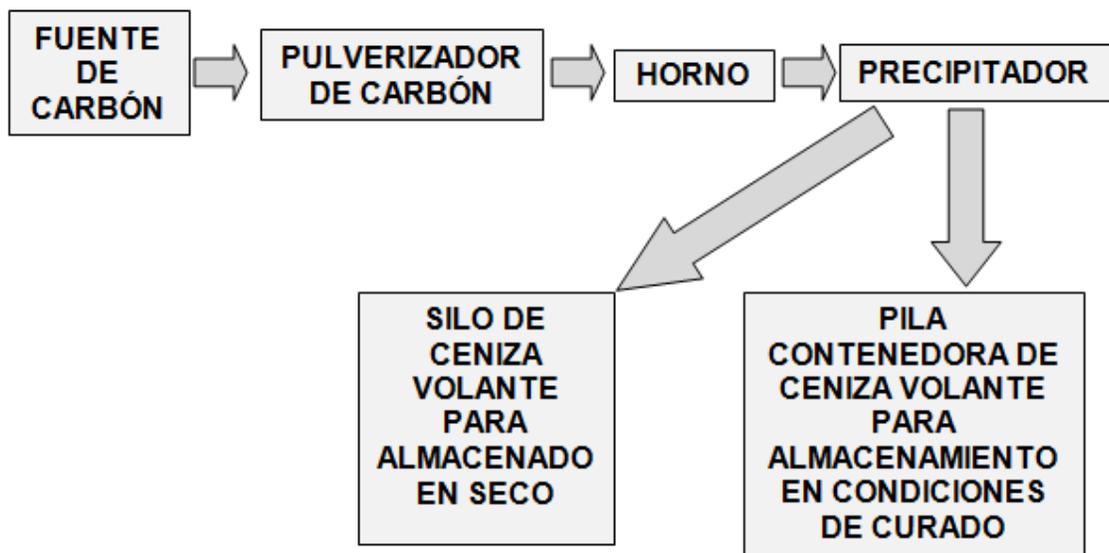
1.4.2. Origen de las ceniza volante

Uno de los mayores problemas que se originan por la utilización masiva de carbón mineral en la cogeneración es la formación de residuos sólidos constituidos por la materia incombustible presente en este material, que puede representar entre el 6 y el 20 por ciento del carbón utilizado en las centrales térmicas.

A la porción más fina de la ceniza, que se separa de la corriente de gases de combustión en las centrales termoeléctricas, mediante equipos convenientemente diseñados (*hoppers y baghouse*), se le denomina ceniza

volante. Sin dichos equipos, la ceniza sería proyectada a la atmósfera por la chimenea lo que tendría por efecto la dispersión del residuo en amplias zonas geográficas.

Figura 4. **Ciclo del carbón en una termoeléctrica**



Fuente: elaboración propia.

1.4.3. **Propiedades de la ceniza volante**

La ceniza volante es considerada una puzolana artificial, entre sus propiedades importantes se encuentran las siguientes:

- Propiedad puzolánica

Está indicada por la manera y la rapidez con que el sílice que contiene la ceniza volante se combina con el hidróxido de calcio liberado por la

hidratación del cemento portland. La ceniza volante tiene una velocidad de reacción menor que la mayoría de las puzolanas naturales.

- Pérdida por ignición

La ceniza volante con un alto valor de pérdida por ignición (carbón no quemado) da como resultado una decoloración de la superficie del acabado, por causa de las partículas de carbón que ascienden a la superficie.

La eficiencia de la ceniza volante como puzolana se reduce a causa de la disminución de óxidos principales, tales como: óxido de sílice, de aluminio o de hierro, lo que puede ocasionar un fraguado más lento.

- Granulometría

La variable más significativa de la ceniza volante es la distribución del tamaño de las partículas. Mientras la ceniza se encuentra en la corriente del gas saliente del horno, la granulometría es constante, pero es afectada por la eficiencia de los molinos de carbón, por el origen del carbón y por la operación del horno.

De una fuente a otra la granulometría de la ceniza varía considerablemente, a consecuencia de los métodos de precipitación, que pueden tener de 3 a 5 etapas y en cada una de ellas se elimina una fracción más fina de ceniza.

- Fineza

Para controlar el grado de fineza en la ceniza, se ha aportado la prueba de material retenido en la malla de 45 micras, mientras mayor sea la cantidad de ceniza volante que pase por dicha malla, mayor será su efecto sobre la resistencia.

- Forma de la partícula

Las partículas de la ceniza volante están conformadas por un polvo granulado con características únicas, esto se debe a la mayoría de las mismas por ser de forma esférica. En la fracción más gruesa se encuentra en un rango de 300 a 45 micras, la mayoría de las partículas son negras y porosas. La pérdida por ignición de este material grueso y arenoso es de 3 a 10 veces mayor que la fracción que pasa la malla de 45 micras, lo que indica presencia de carbón quemado parcialmente.

- Densidad

La densidad en la ceniza volante es una propiedad con un nivel de variación alto que depende directamente de la distribución del tamaño de las partículas o la pérdida por ignición.

- Composición química y mineralógica

Según la Norma ASTM C 618 exige un mínimo de 70 por ciento de óxidos principales, tales como: los de sílice, hierro, aluminio y un máximo de 5 por ciento de sulfatos.

Existen otros requerimientos químicos opcionales de magnesia y álcalis disponibles (óxido de sodio).

Mineralógicamente las cenizas volantes están compuestas por una gran fase de vidrio consistente en aproximadamente un 80 por ciento de las cenizas y una fase cristalina consistente, principalmente de mullita, cuarzo, magnetita y yeso.

1.5. Estabilización del suelo

Se le denomina estabilización de suelos al proceso por el cual se mejora las propiedades de una porción de suelo, para que cumpla con los requisitos ingenieriles fijados.

También se puede definir la estabilización de suelos, como el proceso por el cual se modifican las deficiencias que posee un suelo natural; entre dichas deficiencias se encuentran la compactación, el drenaje, la pre-consolidación, la protección de la superficie contra la erosión y la infiltración de la humedad.

1.5.1. Tipos de estabilización

El método de estabilización a utilizar depende directamente del tipo de suelo y de la propiedad que se pretenda modificar para que cumpla con las condiciones necesarias.

Los tipos de estabilización se clasifican en los siguientes grupos:

1.5.1.1. Estabilización física

Es utilizado para generar mejora en el suelo produciendo cambios físicos en él. Entre los que se pueden encontrar:

- Mezcla de suelos

Es agregar un tipo de suelo que cumpla con las características necesarias para la mejora del mismo. Por lo general va acompañado por la compactación.

- Geotextiles

Son telas permeables no degradables que pueden emplearse como filtro y como control de la erosión de suelo y transporte de lodos.

- Consolidación

Proceso mediante el cual el suelo es sometido a cargas sobre un determinado tiempo, ocasionando que se drene el agua que posea dicha masa de suelo, que disminuya su volumen, que haya un mayor contacto entre sus granos y así pueda soportar la carga externa a la que será sometido. En este método disminuyen de tamaño los granos de suelo y generan un desgaste entre ellos.

1.5.1.2. Estabilización química

Consiste en alterar las propiedades del suelo usando un cierto aditivo, el cual al mezclarse con un determinado suelo ocasionan cambios significativos

en las moléculas del mismo. Esto se debe a la reacción química que se genera entre el suelo y el aditivo.

Entre los aditivos utilizados comúnmente están:

- Cal
- Cemento Portland
- Productos asfálticos
- Escoria de fundición
- Cloruro de sodio (sal)
- Cloruro de calcio
- Polímeros
- Hule de neumáticos

1.5.1.3. Estabilización mecánica

Se le denomina estabilización mecánica al proceso de alteración de las propiedades del suelo por medio de la compactación del mismo. Regularmente se realiza dicho proceso en la subbase, base y carpetas asfálticas.

1.6. Influencia de la plasticidad

Se le denomina plasticidad a la propiedad que presentan los suelos de deformarse hasta cierto límite sin romperse. Es una propiedad tan evidente, que ha servido desde tiempos inmemorables para la clasificación de suelos en forma puramente descriptiva. Los suelos que generalmente presentan dicha propiedad son las arcillas, aunque lo hacen en grado variable. Dicha propiedad permite resistir deformaciones rápidas, sin cambiar su volumen, sin rebote elástico, sin agrietarse ni desagregarse.

Estos suelos al estar en contacto con el agua pasan a estado plástico permitiendo que se puedan remoldear.

La plasticidad es consecuencia de parámetros como:

- La morfología laminar
- El tamaño extremadamente pequeño que ocasiona un aumento en el área superficial
- La capacidad de hinchamiento que depende de la habilidad de atracción de cationes y agua.

La magnitud de la deformación que puede soportar un suelo con determinado contenido de humedad, depende de la distancia que las partículas pueden moverse sin perder su cohesión. La presión requerida para producir una deformación específica es un indicador de la magnitud de las fuerzas de cohesión que mantienen las partículas unidas. Estas fuerzas varían dependiendo directamente del espesor de las películas de agua entre partículas.

Los límites indicadores del tipo de suelo que se desea estudiar son: límite líquido (LL), límite plástico (LP) y límite de contracción (LC). Para la determinación de dichos límites se emplea suelo que pase por la malla No. 40.

El límite líquido es el contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra, con el cual el suelo cambia del estado líquido al plástico. Es de mucha importancia hacer hincapié que en el límite líquido la cohesión prácticamente es nula.

El límite plástico es el contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra secada en el horno, en el cual los suelos pasan de estado semisólido a estado plástico.

El límite de contracción es el porcentaje de humedad con respecto al peso seco de la muestra, en el cual la reducción de agua no ocasiona ya disminución en el volumen del suelo.

1.6.1. Índice de plasticidad

Se le denomina índice plástico o índice de plasticidad (IP) a la diferencia numérica entre los límites líquido y plástico e indica el margen de humedades en el cual el suelo se encuentra en estado plástico. El índice plástico depende de la cantidad de arcilla contenida en el suelo de estudio.

Según Atterberg, si el suelo tiene un índice de plasticidad igual a cero, el suelo no es plástico; cuando el índice de plasticidad es menor a 7 se dice que el suelo es de baja plasticidad; si el índice de plasticidad se encuentra entre 7 y 17, se dice que el suelo es de mediana plasticidad y si el suelo tiene un índice de plasticidad mayor a 17 es considerado el suelo como altamente plástico.

La expresión utilizada para la obtención del índice de plasticidad es:

$$IP=LL-LP$$

Donde:

IP: índice plástico

LL: límite líquido del suelo

LP: límite plástico del suelo

1.6.2. Índice de liquidez

El índice de liquidez (I_L) es un indicador de los esfuerzos a los que ha estado sometido el suelo. Si el valor del índice de liquidez es cercano a cero, se considera que el suelo está preconsolidado y si es cercano a uno entonces es considerado el suelo como normalmente consolidado.

La expresión utilizada generalmente para la obtención del Índice de liquidez es:

$$I_L = \frac{\omega_n - LP}{IP}$$

Donde:

I_L : índice de liquidez

ω_n : humedad del suelo en estado normal

LP: límite plástico del suelo

IP: índice de plasticidad del suelo

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1. Estabilización de suelos cohesivos a través de la utilización de cal y ceniza volante

Es de mucha importancia hacer hincapié que cuando se quiere estabilizar un suelo con propiedades plásticas, se debe apoyar en una estabilización química.

De tal manera que, para la estabilización del suelo en estudio, se utilizará cal grasa hidratada que cumple con la Norma COGUANOR NGO 41018, ASTM C-206 y ASTM C-207 (American Society for Testing Material). La cantidad de cal no puede exceder del 5 por ciento del volumen total estabilizado, según sección 302-5 (4) de; Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes (Libro azul de la Dirección General de Caminos).

Pero, por ser un suelo muy plástico se debe de implementar el uso de puzolana para poder obtener un mejor resultado en la estabilización. Se implementará el uso de la ceniza volante (puzolana artificial) de una termo-generador ubicado en el departamento de Escuintla. La ceniza volante proveniente de las termo-generadoras es prehidratada, debido a que hace más fácil su transporte y trabajabilidad.

Las cantidades utilizadas no deben exceder de un veinte por ciento del volumen total estabilizado según estudio llevado a cabo (Fournier y Geoffray, 1978) en Francia basado en normas francesas.

De tal manera que se utilizará un 20 por ciento de material estabilizador (cal y ceniza volante) a diferentes proporciones para estudio del suelo.

Los ensayos se realizaron a las siguientes muestras y sus proporciones:

Tabla III. **Proporciones de las muestras por estudiar**

Muestra	Suelo (%)	Cal (%)	Ceniza volante (%)
No. 1	100,00	0,00	0,00
No. 2	80,00	3,00	17,00
No. 3	80,00	5,00	15,00

Fuente: elaboración propia.

Entre las pruebas realizadas para el cálculo de la proporción de cal se encuentra la descrita en el Manual de estabilización de suelo tratado con cal, publicación de la National Lime Association; donde establece que el suelo estabilizado con cal debe de tener un Ph mayor o igual a 10,5. Los resultados obtenidos se observan en la tabla IV:

Tabla IV. **Resultado de la medición de ph en las muestras**

Muestra	ph
No. 1	6
No. 2	11
No. 3	12

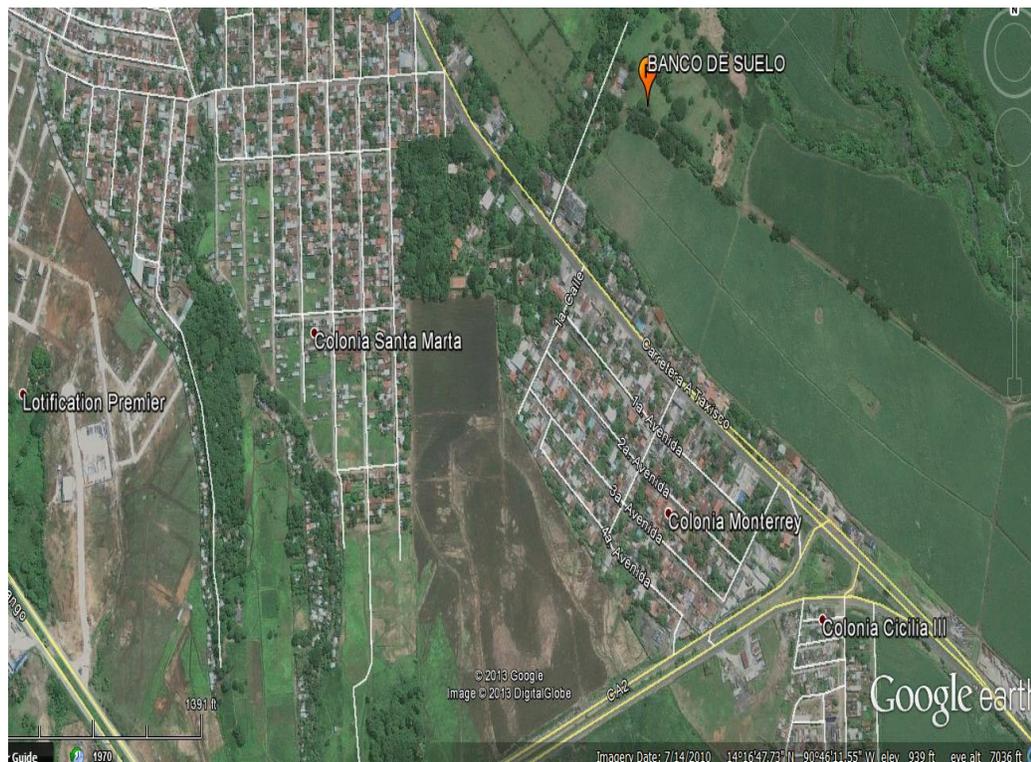
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

2.1.1. Recolección de muestra de suelo

El suelo se obtuvo en el kilómetro 60,5 carretera CA-2 a Taxisco, finca El Refugio Escuintla, Escuintla. Con una latitud de 14 grados 16 minutos 59,90 segundos norte, longitud de 90 grados 46 minutos 2,20 segundos oeste, a una profundidad de dos metros en un pozo de agua que se estaba realizando.

Por inspección visual se observó que era plástico, lo cual es un indicador que el suelo es cohesivo.

Figura 5. Ubicación del banco donde se tomó la muestra del suelo



Fuente: Google Earth. Google 2013. Consulta: 08 de agosto de 2013.

2.1.1.1. Cohesivo

Se les denomina suelos cohesivos (arcillas y limos en menor medida) a los que tienen la propiedad de atracción intermolecular, ya que sus granos no son independientes entre sí sino están unidos por enlaces químicos. La cohesión se encuentra en la resistencia al corte en las capas absorbidas que separan las partículas en dicho punto al hidratarse, dependiendo de la humedad del suelo así será su cohesión.

2.1.1.1.1. Características químicas y geológicas del material cohesivo

Químicamente los suelos cohesivos están compuestos por los siguientes elementos: silicatos de alúmina, silicatos de hierro o silicatos de magnesio, siendo de estos el primero el más común, que al ser hidratados adoptan su propiedad cohesiva y plástica. La estructura de dichos minerales es, generalmente, compleja y cristalina y sus átomos se encuentran colocados de forma laminar, dichos suelos contienen un ángulo de fricción interno menor a veinte grados.

Son terrenos con drenados muy limitados, cuando se les carga van sufriendo un asiento diferido en el tiempo, a medida que van expulsando el agua que tienen embebida, proceso que puede durar años. Además de ser suelos no fiables y muy impredecibles.

2.2. Ensayos de laboratorio

Los ensayos que se le realizaron a las muestras son los siguientes:

2.2.1. Límites de Atterberg

Dicho ensayo es utilizado para conocer la plasticidad de un suelo, y de esta manera dar una idea del tipo de suelo de estudio.

- Determinación del límite líquido (LL)

AASHTO T089-02: Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils.

ASTM D423-66 (1982): Method of Test for Liquid Limit of Soils.

El límite líquido es el contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra, con el cual el suelo se encuentra entre el estado líquido y el plástico. Un suelo plástico tiene poca resistencia a esfuerzos cortantes.

El límite líquido puede utilizarse para estimar asentamiento en problemas de consolidación y apoyado con el límite plástico, ocasionalmente puede predecir la máxima densidad en estudios de compactación. También se sabe que la cohesión de un suelo en el límite líquido es aproximadamente nula.

Como no existe una separación clara entre los estados de consistencia (semilíquido, plástico y semisólido), se ha ideado el procedimiento establecido por Arthur Casagrande, denominado Método Mecánico, que para determinar

dicho límite se apoya en la medida de la resistencia al corte del suelo con un determinado contenido de humedad, donde cada golpe necesario para cerrar un surco de suelo que se moldea en la copa de Casagrande, equivale a un esfuerzo aproximado de 1 gramo por centímetro cuadrado.

- Determinación del límite plástico (LP)

AASHTO T090-00: Standard Method of Test for Determining the Plastic Limit and Plasticity index of Soils.

ASTM D424-54 (1982): Standard Method of Test for Plastic Limit.

Se le denomina límite plástico al contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra secada al horno a 105 grados centígrados, en el cual el suelo pasa de un estado semisólido a uno plástico.

Dicho límite es afectado por la cantidad de suelo orgánico que contiene la muestra, porque dicha cantidad eleva su valor sin aumentar simultáneamente el límite líquido. Por tal razón es que los suelos con contenido orgánico tienen bajo índice plástico pero alto el límite líquido.

- Determinación del índice de plasticidad (IP)

Numéricamente es la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP). Representa el rango de humedad que puede tener un suelo que se encuentra en estado plástico, tal como lo definen los ensayos. El índice de plasticidad depende de la cantidad de arcilla en el suelo.

IP=LL-LP

2.2.2. Proctor

AASHTO T180-01: Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 4,54 kg (10 lb) Rammer and a 457 mm (18 in).

ASTM D1557-07: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56 000 ft-lbf/ft³ (2 700 kN-m/m³)).

Dicha prueba hace referencia al peso por unidad de volumen de una muestra de suelo que ha sido compactado por un procedimiento establecido.

La prueba reproduce en el laboratorio el tipo de compactación uniforme de la parte inferior, hacia la superficie de la capa compactada. Al incrementar la humedad del suelo, se aplica un medio lubricante entre sus partículas que ocasiona un cierto acomodo y una mayor cohesión de estas cuando se sujetan a un esfuerzo de compactación.

Al mejor acomodo de las partículas del suelo y mayor peso volumétrico se le denomina humedad óptima. La humedad óptima es lo que se pretende encontrar con dicho ensayo, ya que de esta manera se puede aumentar la resistencia al corte del suelo, mejora la estabilidad, la capacidad de carga de cimentaciones y pavimentos, reduce la permeabilidad y los riesgos a los asentamientos.

Uno de los factores que son determinantes en la humedad óptima es la cantidad de arcilla que pueda tener un suelo, de tal manera que al conocer el

índice de plasticidad se puede obtener una idea del comportamiento que tendrá el material al momento de realizar el ensayo de proctor.

2.2.3. CBR

AASHTO T193-99: Standard Method of Test for The California Bearing Ratio.

ASTM D1883-07: Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils.

También conocido como valor relativo de soporte de un suelo, siendo un indicador de su resistencia a esfuerzos cortantes en condiciones determinadas de humedad y compactación. El ensayo permite obtener un porcentaje de la relación de soporte al corte, bajo condiciones de humedad y densidad controladas en el laboratorio.

Para la elaboración del ensayo CBR es de vital importancia haber realizado el ensayo de Proctor, con la finalidad de que se lleve a cabo en óptimas condiciones de humedad.

2.2.4. Granulometría

AASHTO T087-86: Standard Method of Test for Dry Preparation of Disturbed Soil and Soil-Aggregate Samples for Test.

ASTM D421-98: Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants.

AASHTO T088-00: Standard Method of Test for Particle Size Analysis of Soils.

ASTM D422-02: Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.

El ensayo hace referencia a la determinación de la cantidad en porcentaje de los diversos tamaños de las partículas que forman el suelo. El tamizado es el procedimiento más utilizado para clasificar por tamaños estandarizados las partículas gruesas del suelo.

La información obtenida del análisis granulométrico en ocasiones puede utilizarse para predecir el movimiento del agua a través del suelo. Además sirve para determinar las proporciones relativas de los diferentes tamaños de grano, presentes en una porción dada del suelo. Para que el resultado del ensayo sea referente al suelo bajo estudio, la muestra debe de ser estadísticamente representativa de la masa del suelo que se requiera conocer.

2.2.5. Gravedad específica

AASHTO T100-06: Standard Method of Test for Specific Gravity of Soils.

ASTM D854-07: Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.

Se define como el peso unitario del suelo en estudio, respecto al peso unitario del agua destilada a cuatro grados Celsius. Este ensayo es utilizado para el cálculo de la cantidad de vacíos que tiene un suelo, predecir el peso unitario del suelo y para la elaboración gráfica de la recta de saturación máxima en el ensayo de proctor.

2.2.6. Corte directo

AASHTO T236-03: Standard Method of Test for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions.

ASTM D3080-03: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions.

La cohesión y el ángulo de fricción interna del suelo son componentes de la resistencia a los esfuerzos cortantes del mismo y una de las formas para el cálculo de dicha resistencia es por medio del aparato ideado por Arthur Casagrande.

La muestra inalterada se coloca en el interior del aparato y se somete a un esfuerzo tangencial T (resistencia al corte del suelo) y una carga P se deben observar los correspondientes esfuerzos de ruptura T y con esos valores se traza la envolvente de los círculos de Mohr, que dará a conocer el valor de la cohesión del suelo y el ángulo de fricción interna ϕ del suelo en cuestión.

2.2.7. Triaxial

AASHTO T296-05: Standard Method of Test for Unconsolidated, Undrained Compressive Strength of Cohesive Soils in Triaxial Compression.

ASTM D2850-03a: Standard Test Method for Unconsolidated, Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils.

T297-94: Standard Method of Test for Consolidated, Undrained Triaxial Compression.

D4767-02: Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils.

En la actualidad, este ensayo es el más utilizado para la determinación de los parámetros de resistencia al corte de los suelos. Además es considerado el método más versátil y común en el estudio de la propiedad esfuerzo-deformación.

Por medio de la prueba a compresión triaxial se puede llevar a cabo el estudio de la línea de resistencia intrínseca (envolvente de Mohr).

Es necesario establecer un criterio para decidir sobre el tipo de prueba que se empleará y las condiciones en que se deben preparar los especímenes, debido a que en la mayoría de suelos es posible obtener una vasta variedad de envolventes de Mohr, que dependen de las condiciones en que se desarrollen las pruebas. La probeta se preparará no consolidada y sin drenar.

2.2.8. Permeabilidad

AASHTO T215-70: Standard Method of Test for Permeability of Granular Soils.

ASTM D2434-00: Standard Test Method for Permeability of Granular Soils.

El método que se utilizará es el de Cabeza Constante, el cual permite obtener una cantidad de agua a la salida en un tiempo constante, con una cabeza hidráulica a través de la muestra también constante.

La muestra se compacta por medio del proctor estándar, es decir, tres capas de 25 golpes cada una con el martillo de 5,5 libras y 14 pulgadas de caída.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados a las muestras son:

- Límites de Atterberg

Tabla V. **Resultados de ensayo de límites de Atterberg obtenidos en las muestras**

Muestra No.	LL (%)	IP (%)	S.U.C.S.	Descripción del suelo
1	62,14	27,64	MH	Limo de alta plasticidad color café oscuro.
2	50,58	15,90	MH	Limo de alta plasticidad color café oscuro.
3	43,67	11,21	ML	Limo con poca plasticidad color café oscuro.

S.U.C.S.: Sistema unificado de clasificación de suelos.

Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

- Proctor

Tabla VI. **Resultados de ensayo de proctor obtenidos en las muestras**

MUESTRA NO. 1						
No.	Golpes No.	COMPACTACIÓN		C (%)	Expansión (%)	CBR (%)
		H (%)	Yd (lb/pie³)			
1	10	29,44	75,84	86,08	0,57	3,40
2	30	29,44	83,79	95,11	0,79	18,39
3	65	29,44	88,10	100,00	0,72	20,05

Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

Tabla VII. **Resultado de ensayo de CBR obtenido en la muestra No. 1**

MUESTRA NO. 2						
No.	Golpes No.	COMPACTACIÓN		C (%)	Expansión (%)	CBR (%)
		H (%)	Yd (lb/pie³)			
1	10	29,44	75,84	86,08	0,57	3,4
2	30	29,44	83,79	95,11	0,79	18,39
3	65	29,44	88,10	100,00	0,72	20,05

Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

Tabla VIII. **Resultado de ensayo de CBR obtenido en la muestra No. 2**

MUESTRA NO. 2						
No.	Golpes No.	COMPACTACIÓN		C (%)	Expansión (%)	CBR (%)
		H (%)	Yd (lb/pie³)			
1	10	27,96	73,30	82,50	0,50	22,70
2	30	27,96	80,00	90,00	0,50	51,40
3	65	27,96	86,70	97,50	0,40	75,70

Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

Tabla IX. **Resultado de ensayo de CBR obtenido en la muestra No. 3**

MUESTRA NO. 3						
No.	Golpes No.	COMPACTACIÓN		C (%)	Expansión (%)	CBR (%)
		H (%)	Yd (lb/pie³)			
1	10	33,58	79,87	89,29	0,13	47,02
2	30	33,58	84,71	94,71	0,09	74,33
3	65	33,58	87,57	97,90	0,11	81,66

Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

- Granulometría

Tabla X. **Resultado de ensayo de granulometría obtenido en la muestra No. 1**

MUESTRA No. 1			
Tamiz	Abertura en (milímetros)	Porcentaje que pasa (%)	
1 1/2"	38,10	100,00	
3/4"	19,05	100,00	% grava: 0,00
4	4,76	100,00	
10	2,00	99,87	% arena: 5,58
40	0,42	98,56	
200	0,074	94,42	% fino: 94,42

Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

Tabla XI. **Resultado de ensayo de granulometría obtenido en la muestra No. 2**

MUESTRA No. 2			
Tamiz	Abertura en (milímetros)	Por ciento que pasa (%)	
1 1/2"	38,10	100,00	% grava: 0,00
3/4"	19,05	100,00	
4	4,76	100,00	
10	2,00	99,99	% arena: 4,46
40	0,42	98,85	% fino: 95,54
200	0,074	95,54	

Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

Tabla XII. **Resultado de ensayo de granulometría obtenido en la muestra No. 3**

MUESTRA No. 3			
Tamiz	Abertura en (milímetros)	Por ciento que pasa (%)	
1 1/2"	38,10	100,00	% grava: 0,00
3/4"	19,05	100,00	
4	4,76	100,00	
10	2,00	99,99	% arena: 4,46
40	0,42	98,85	% fino: 95,54
200	0,074	95,54	

Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

- Gravedad específica

Tabla XIII. **Resultados de ensayo de gravedad específica obtenidos en las muestras**

Muestra No.	Gs	S.U.C.S.	Descripción del suelo
1	2,71	MH	Limo de alta plasticidad color café oscuro.
2	2,64	MH	Limo de alta plasticidad color café oscuro.
3	2,48	ML	Limo con poca plasticidad color café oscuro.

S.U.C.S.: Sistema unificado de clasificación de suelos.

Gs: gravedad específica

Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

- Corte directo

Tabla XIV. **Resultados de ensayo de corte directo obtenidos de las muestras**

Muestra No.	Ángulo de fricción interna (grados)	Carga Última (T/m ²)
1	35,40	1,4
2	27,24	1,4
3	27,78	1,1

Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

- Triaxial

Tabla XV. **Resultados de ensayo de triaxial obtenidos de las muestras**

Muestra No.	Ángulo de fricción interna (grados)	Carga Última (T/m²)
1	23,84	4,18
2	16,3	2,32
3	22,69	1,41

Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

- Permeabilidad

Tabla XVI. **Resultados de ensayo de permeabilidad obtenidos de las muestras**

Muestra No.	Permeabilidad (cm/s)
1	$1,63 \times 10^{-7}$
2	$1,46 \times 10^{-6}$
3	$1,21 \times 10^{-6}$

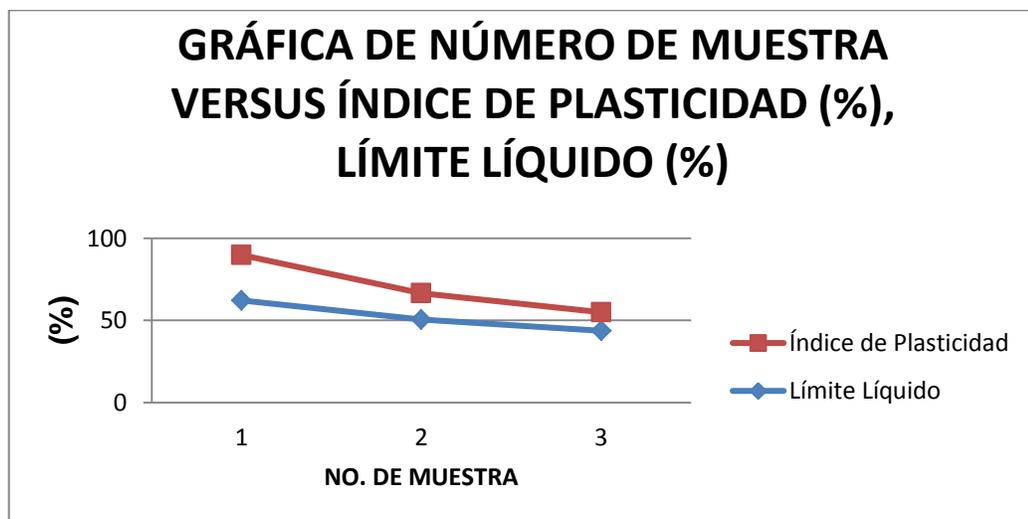
Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Comportamiento de los tres escenarios

Al observar el comportamiento de los tres escenarios en el estudio de límites de Atterberg se puede observar que la disminución de plasticidad es proporcional a la cantidad de cal aplicada al suelo, esto quiere decir que mientras mayor sea la cantidad de cal, menor será su índice de plasticidad.

Figura 6. **Gráfica de número de muestra versus índice de plasticidad y límite líquido**

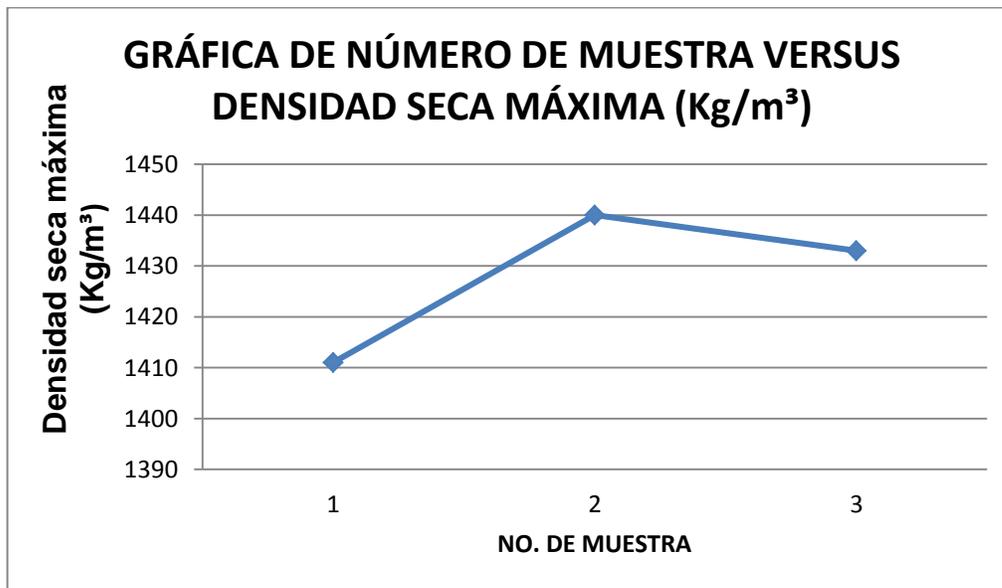


Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

4.2. Resultados de proctor

Se puede observar que mientras mayor es la cantidad de ceniza volante aplicada a la muestra, esta presentará un mayor número de densidad seca máxima; debido a que la ceniza volante ocupa de mejor manera los espacios vacíos generados por el suelo, por tener partículas más pequeñas que las partículas finas del suelo.

Figura 7. Gráfica de número de muestra versus densidad seca máxima

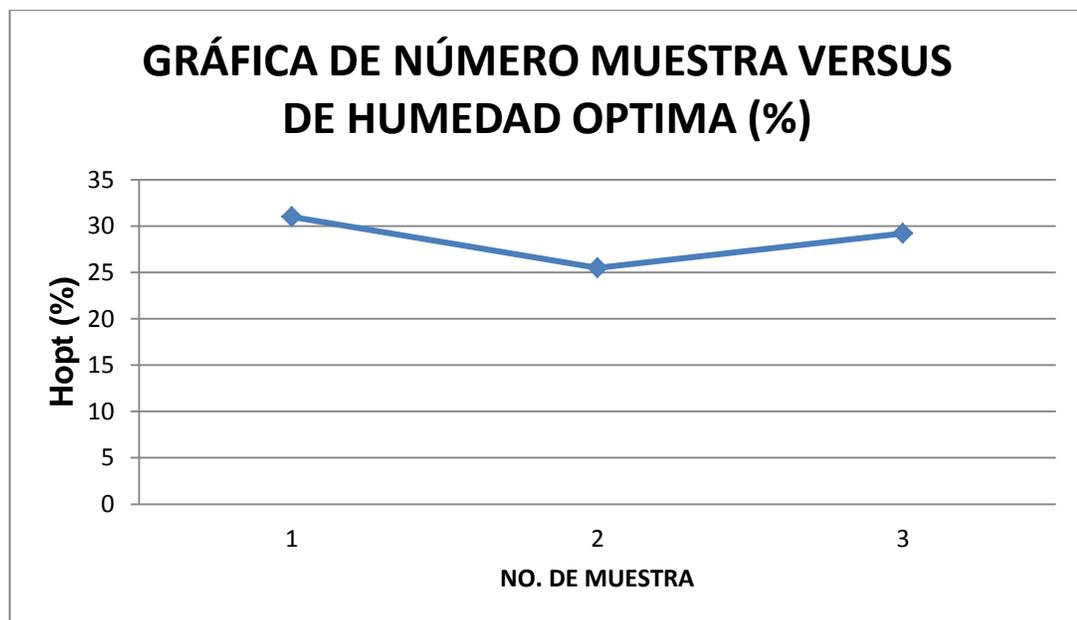


Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

4.3. La humedad óptima

Es menor en la muestra que contiene mayor cantidad de ceniza volante, debido a que la ceniza se encuentra prehidratada, generando una mayor humedad inicial.

Figura 8. Gráfica de número de muestra versus humedad óptima

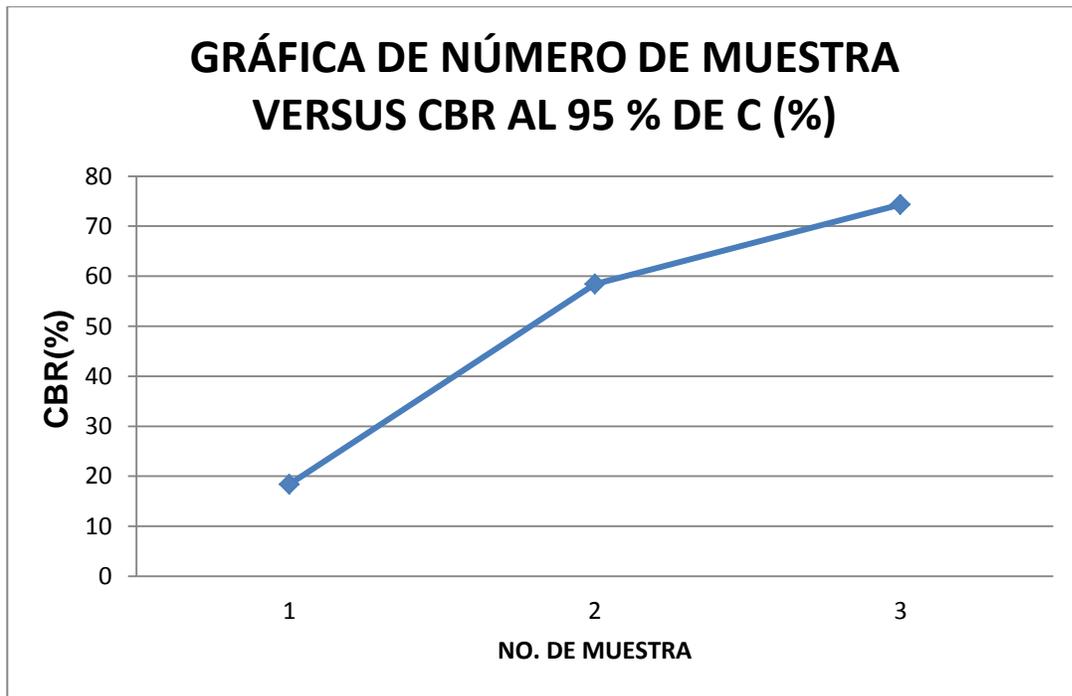


Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

4.4. Porcentaje de CBR

El porcentaje de CBR es mayor en la muestra que contiene mayor cantidad de cal, esto sucede porque al ser menos plástico soporta mayores esfuerzos cortantes de penetración y se puede observar una mejora de hasta un 400 por ciento.

Figura 9. **Gráfica de número de muestra versus CBR al 95 por ciento de C (porcentaje)**

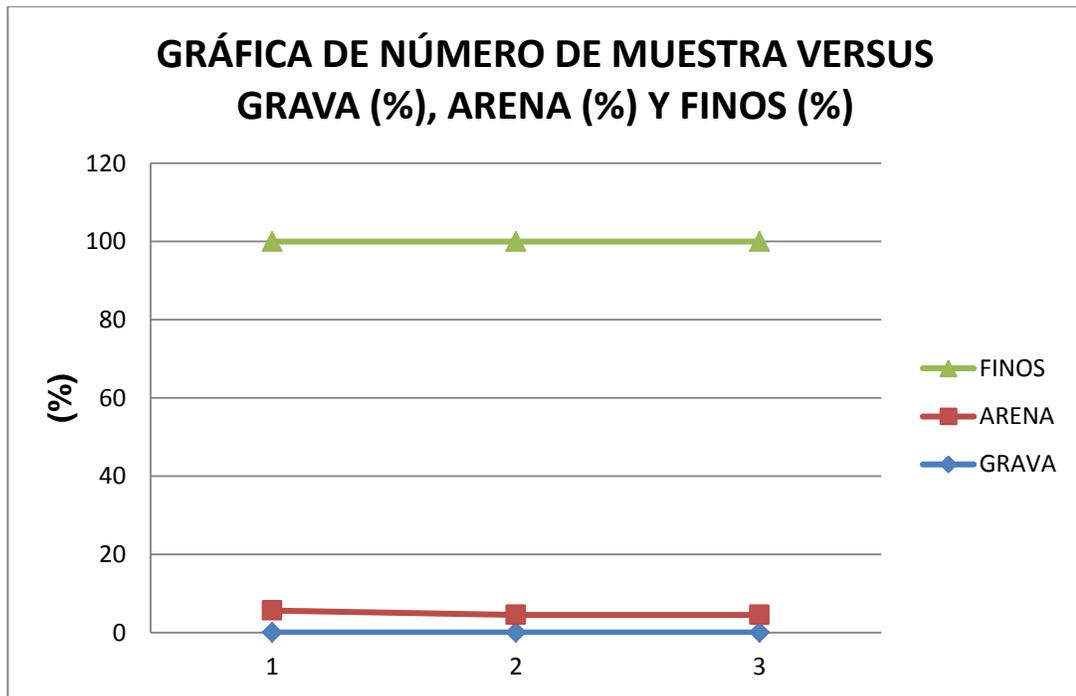


Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

4.5. **Suelo utilizado para la investigación**

El suelo utilizado para la investigación contiene una gran cantidad de material fino y poca arena, ocasionando que después de estabilizarlo con cal-ceniza (fino) se incremente el porcentaje de finos y disminuya el de arena.

Figura 10. **Gráfica de número de muestra versus grava (porcentaje), arena (porcentaje) y finos (porcentaje)**

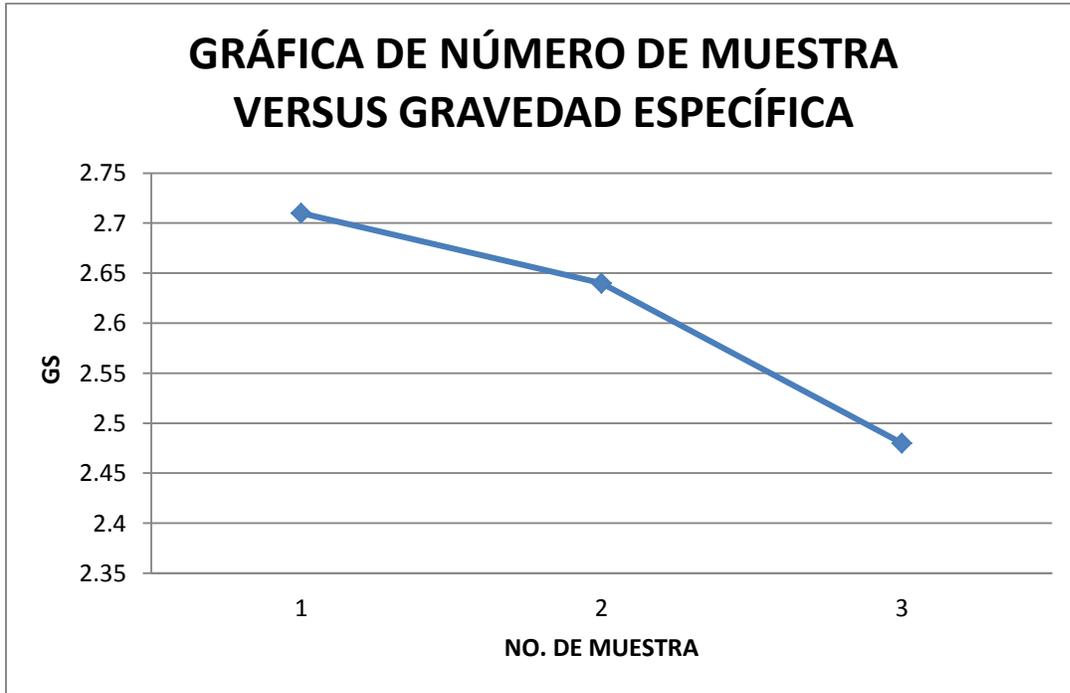


Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

4.6. Gravedad específica

El ensayo de gravedad específica demostró que a mayor cantidad de cal menor es la densidad del suelo estabilizado, generando una disminución en la gravedad específica.

Figura 11. **Gráfica de número de muestra versus gravedad específica**

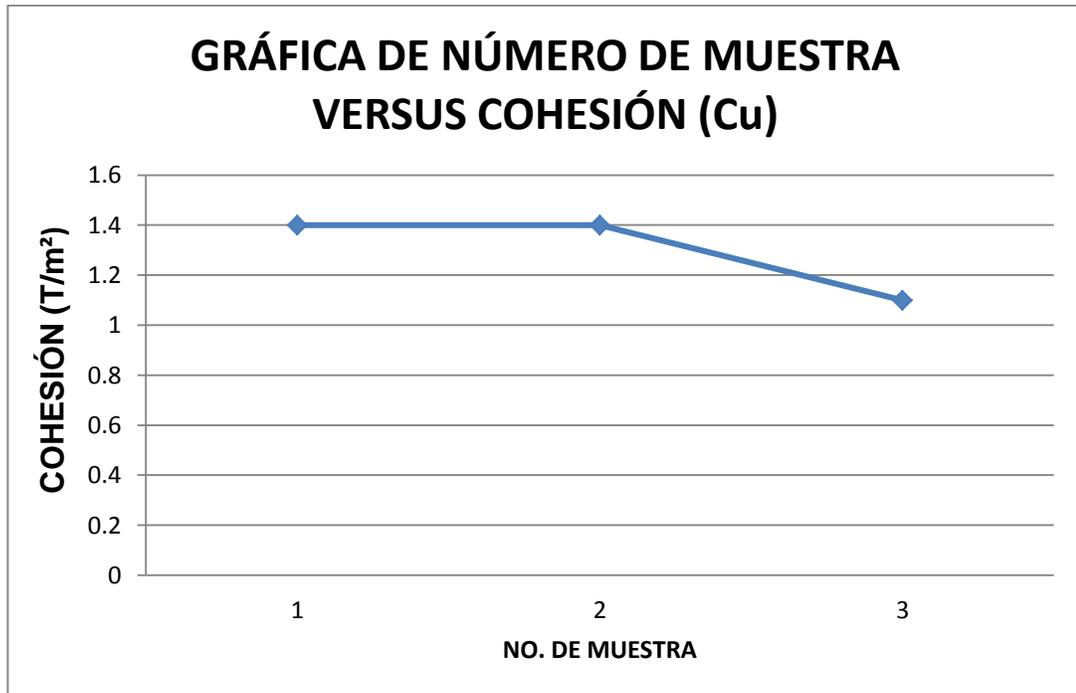


Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

4.7. **Ensayos de corte directo y triaxial**

Se observó en los resultados de los ensayos de corte directo y triaxial, que al aumentar la cantidad de cal baja la resistencia a esfuerzos cortantes, esto se debe a la disminución de la cohesión entre sus partículas. Y al analizar el resultado con ceniza volante en mayor cantidad, menor es el ángulo de fricción interna. Es de suma importancia hacer hincapié que la muestra No. 1 es la de mayor cohesión debido a la alta plasticidad de la misma.

Figura 12. Gráfica de número de muestra versus cohesión (Cu)



Fuente: elaboración propia, con datos proporcionados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

4.8. Análisis de la permeabilidad

Al analizar la permeabilidad en los ensayos se demostró que el suelo presentó un comportamiento bajo de permeabilidad y al estabilizar mejora sus propiedades de manera mínima a la permeabilidad, esto se debe a que la aplicación de la cal disminuye la cohesión del suelo.

CONCLUSIONES

1. La aplicación de la cal y ceniza volante dentro de la construcción de carreteras en Guatemala es un producto innovador, la misma permite que al trabajar las subrasantes de la estructura de pavimento, aporte al número estructural de diseño un mejor resultado.
2. En los ensayos realizados se obtuvo mejor resultado del valor soporte normal del suelo, en la muestra que contenía un ochenta por ciento de suelo, cinco por ciento de cal y quince por ciento de ceniza volante.
3. Se verificó en las tres muestras ensayadas, que al estabilizar suelos plásticos con cal y ceniza volante, se genera una disminución de resistencia a corte, esto se debe a que el suelo pierde propiedades cohesivas.
4. La estabilización con cal y ceniza volante no generó resultados considerables en la permeabilidad del suelo.
5. Como resultado del estudio realizado se puede concluir, que la utilización de cal y ceniza volante para la estabilización de suelo cohesivo es eficaz, por generar un mejoramiento de hasta cuatro veces el valor inicial de CBR a 95 por ciento.

RECOMENDACIONES

1. No debe haber estabilidad de cal-ceniza volante, donde se requiere un suelo con buena resistencia a corte directo.
2. Ser cuidadoso en la recolección de ceniza volante, porque cuando sale del silo se encuentra a altas temperaturas y puede provocar quemaduras.
3. Es importante que la cal que se utilice para estabilizar el suelo no esté en contacto con la humedad y, de esta forma evitar que inicie su proceso de fraguado antes de estabilizar el suelo.
4. Al realizar ensayos de laboratorio se deben seguir las normas que rigen al mismo, para obtener resultados más precisos.
5. Para desarrollar el proceso de estabilización de suelo, se debe considerar de manera importante el porcentaje de humedad con el cual se alcanza la máxima compactación para cada una de las proporciones.
6. Al realizar cualquier tipo de construcción civil se debe efectuar un estudio de suelo, con la finalidad de conocer las propiedades y características que determinan la calidad del mismo, para poder seleccionar el método más eficaz de estabilización.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR, Martiniano. *Criterios de diseño de plantas termoeléctricas*. México: Limusa, 1981. 379 p.
2. CRESPO, Carlos. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. 6a ed. México: Limusa, 2010. 644 p.
3. HERNÁNDEZ, Juan. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 466 p.
4. JUÁREZ, Eulalio; RICO, Alfonso. *Mecánica de suelos: fundamentos de la mecánica de suelos*. México: Rabasa, 1963. 642 p.
5. ORTIZ, Byron. *Estado actual de los principales materiales para la construcción en Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1995. 119 p.
6. ROSALER, Robert; RICE, James. *Manual de mantenimiento industrial*. México: McGraw-Hill, 1988. 286 p.
7. RUIZ, Carlos. *Manual para ingenieros azucareros*. 2a ed. México: Compañía Editorial Continental, 1964. 803 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Límites de Atterberg de muestra 1



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME No. 506 S.S.

O.T.: 31,074

Interesado: Angel José Francisco González Guerra

Proyecto: Tesis "Estabilización Mecánica de Suelos Cohesivos a través de la utilización de Cal-Ceniza Volante"

Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG

Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: 3a. Av. 7-68, Zona 1, Escuintla, Escuintla

FECHA: miércoles, 31 de julio de 2013

RESULTADOS:

ENSAYO No.	MUESTRA No.	L.L. (%)	I.P. (%)	CLASIFICACIÓN*	DESCRIPCION DEL SUELO
1	1	62.14	27.64	MH	Limo de alta plasticidad color café oscuro

(*) CLASIFICACIÓN = CLASIFICACION SEGÚN CARTA DE PLASTICIDAD

Observaciones:

Muestra tomada por el interesado.
Suelo en estado natural.

Atentamente,



Omar E. Medrano Méndez
Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

Vo. Bo.

Telma Malicela Cano Morales
Inga. Telma Malicela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Fuente: elaboración propia, con el apoyo del Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

Apéndice 2. Proctor de muestra 1



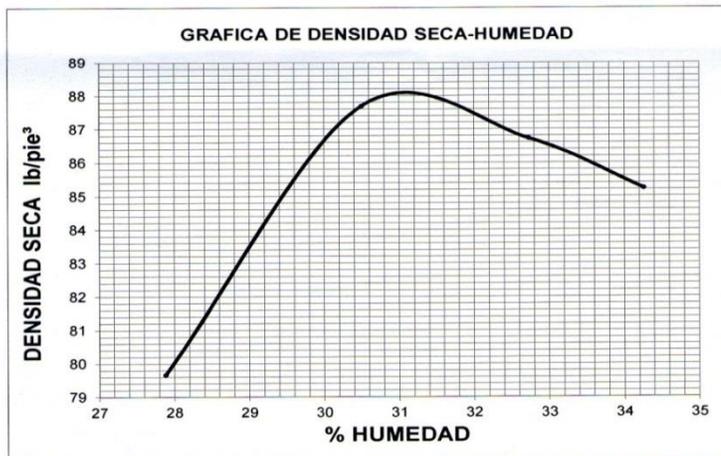
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME No. 509 S.S.

O.T. No.: 31,074

Interesado: Angel José Francisco González Guerra
Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN Proctor Estándar: () Norma:
Proyecto: Tesis "Estabilización Mecánica de Suelos cohesivos a través de la utilización de Cal-Ceniza Volante" Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.T.H.O. T-180
Ubicación: 3a. Av. 7.68, Zona 1, Escuintla, Escuintla
Fecha: miércoles, 31 de julio de 2013



Descripción del suelo: Limo de Alta Plasticidad Color Café Oscuro
Densidad seca máxima γ_d : 1,411.36 Kg/m³ 88.10 lb/ft³
Humedad óptima H_{op} : 31.0 %
Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.:

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria, zona 13

Fuente: elaboración propia, con el apoyo del Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

Apéndice 3. CBR de muestra 1



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME No.: 510 S.S.

O.T. No.: 31,074

Interesado: Angel José Francisco González Guerra

Asunto: **Ensayo de Razón Soporte California (C.B.R.)** Norma: A.A.S.H.T.O.T-193

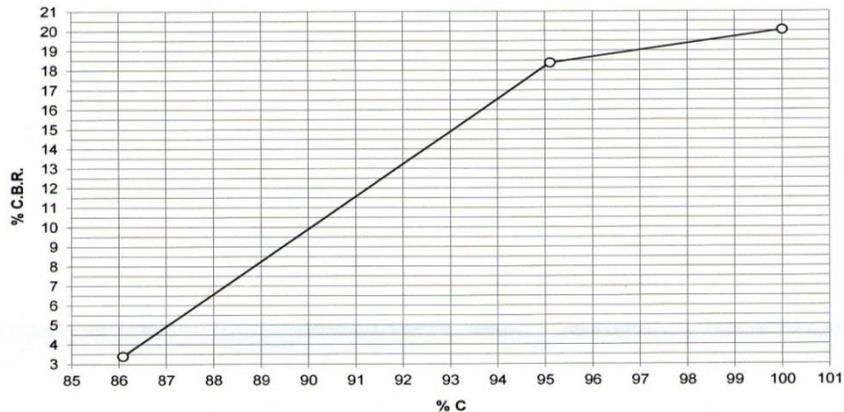
Proyecto: Tesis "Estabilización Mecánica de Suelos cohesivos a través de la utilización de Cal-Ceniza Volante"

Ubicación: 3a. Av. 7-68, Zona 1, Escuintla, Escuintla

Descripción del suelo: Limo de Alta Plasticidad Color Café Oscuro

Fecha: miércoles, 31 de julio de 2013

PROBETA	GOLPES	A LA COMPACTACION		C	EXPANSION	C.B.R.
No.	No.	H (%)	Yd (Lb/pie ³)	(%)	(%)	(%)
1	10	29.44	75.84	86.08	0.57	3.40
2	30	29.44	83.79	95.11	0.79	18.39
3	65	29.44	88.10	100.00	0.72	20.05



Atentamente,

Vo. Bo.:

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
Edificio T-5 Ciudad Universitaria zona 12

Fuente: elaboración propia, con el apoyo del Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

Apéndice 4. Granulometría de muestra 1



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

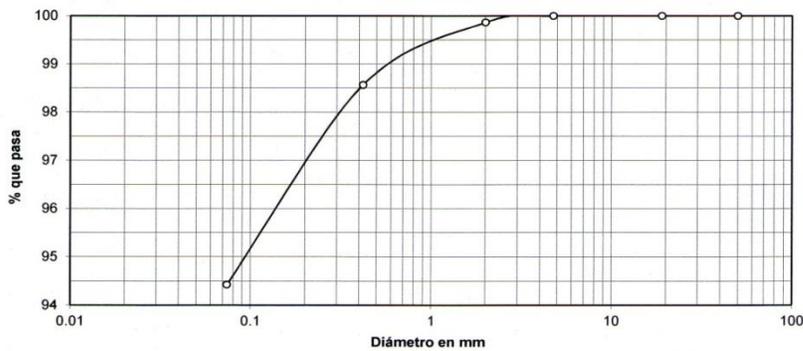


INFORME No.: 507 S.S: O.T.: 31,074

Interesado: Angel José Francisco González Guerra
Tipo de Ensayo: Análisis Granulométrico, con tamices y lavado previo.
Norma: A.A.S.H.T.O. T-27,
Proyecto: Tesis "Estabilización Mecánica de Suelos Cohesivos a través de la utilización de Cal-Ceniza Volante"
Fecha: miércoles, 31 de julio de 2013

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50	100.00
3/4"	19.00	100.00
4	4.76	100.00
10	2.00	99.87
40	0.42	98.56
200	0.074	94.42

% de Grava: 0.00
% de Arena: 5.58
% de Finos: 94.42



Descripción del suelo: Limo de Alta Plasticidad Color Café Oscuro
Clasificación: S.C.U.: MH P.R.A.: A-7-5
Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

Vo. Bo.:



Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

Fuente: elaboración propia, con el apoyo del Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

Apéndice 5. Gravedad Específica de muestra 1



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME No. 508 S.S.

O.T.: 31,074

INTERESADO: Angel José Francisco González Guerra

PROYECTO: Tesis "Estabilización Mecánica de Suelos Cohesivos a través de la utilización de Cal-Ceniza Volante"

ASUNTO: ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA

NORMA: ASTM D 854-05

UBICACIÓN: 3a. Av. 7-68, Zona 1, Escuintla, Escuintla

FECHA: miércoles, 31 de julio de 2013

RESULTADO DEL ENSAYO:

$$G_{20^{\circ}\text{C}} = 2.71$$

DESCRIPCIÓN DEL SUELO: Limo de Alta Plasticidad Color Café Oscuro

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,



Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Omar Enrique Medrano Méndez
Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

Fuente: elaboración propia, con el apoyo del Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

Apéndice 6. Corte Directo de muestra 1



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

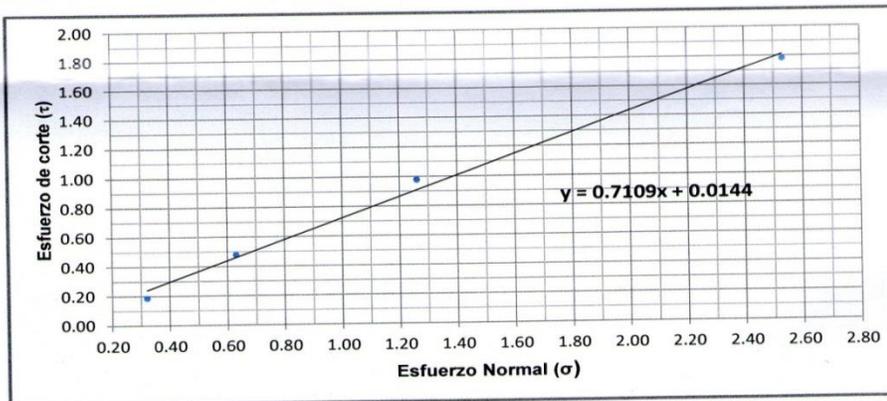


ENSAYO DE CORTE DIRECTO, NORMA ASTM 3080/79

Informe No.: 511 S.S.

O.T.: 31,075

INTERESADO: Angel José Francisco González Guerra
PROYECTO: Tesis "Estabilización Mecánica de Suelos cohesivos a través de la utilización de Cal-Ceniza Volante"
UBICACIÓN: 3a. Av. 7-68, Zona 1, Escuintla, Escuintla
Profundidad: X m Muestra: 1
Fecha: miércoles, 31 de julio de 2013



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 35.40^\circ$ COHESIÓN: $C_u = 0.14 \text{ T/m}^2$

DESCRIPCION DEL SUELO: Limo de alta plasticidad color café oscuro

DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 1.0"

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/cm^2)	0.32	0.63	1.26	2.53
ESFUERZO DE CORTE (kg/cm^2)	0.19	0.48	0.98	1.78
DENSIDAD SECA (T/m^3)	1.57	1.57	1.57	1.57
DENSIDAD HUMEDA (T/m^3)	1.14	1.14	1.14	1.14
HUMEDAD (%H)	38.3	38.3	38.3	38.3

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CI/USAC

Atentamente,

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección de Mecánica de Suelos



Fuente: elaboración propia, con el apoyo del Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.

Apéndice 8. Permeabilidad de muestra 1



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME No.: 513 S.S. O.T. No.: 31,075

INTERESADO: Angel José Francisco González Guerra
PROYECTO: Tesis "Estabilización Mecánica de Suelos cohesivos a través de la utilización de Cal-Ceniza Volante"
ASUNTO: Ensayo de Permeabilidad Cabeza Variable
NORMA: ASTM D5856-95
UBICACIÓN: 3a. Av. 7-68, Zona 1, Escuintla, Escuintla
MUESTRA No.: 1 **PROFUNDIDAD:** X m
DESCRIPCIÓN DEL SUELO: Limo de Alta Plasticidad Color Café Oscuro
FECHA: miércoles, 31 de julio de 2013

RESULTADO DEL ENSAYO:

Coefficiente de Permeabilidad= $1,63 \times 10^{-07}$ cm/s

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,



Omar Enrique Medrano Méndez
Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

Vo. Bo.

Telma Maricela Caño Morales
Inga. Telma Maricela Caño Morales
DIRECTORA CII/USAC

Fuente: elaboración propia, con el apoyo del Laboratorio de Mecánica de Suelos, CII – USAC.