

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



CARACTERIZACIÓN DE CENIZAS DE RESIDUO
SÓLIDO URBANO COMO UN NUEVO MATERIAL
REMEDIANDO PROBLEMAS GEOTÉCNICOS Y
AMBIENTALES

TESIS

Para optar el Título Profesional de:
INGENIERO CIVIL

CRISTIAN CHACÓN QUISPE

Lima- Perú

2015

Dedico este trabajo a mi madre
Marcelina Marina Quispe Loayza,
mi padre Darío L. Chacón Iporre que está en el cielo
y mi hermano Edwin F. Ccente Quispe.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser mi mayor respaldo desde el día en que nací.

A mi padre, Dario L. Chacón Iporre, quien a pesar de todo siempre confió en mi, en mi capacidad y gracias a él y a la promesa que le hice ahora estoy acabando un gran paso.

A mi madre, Marcelina M. Quispe Loayza, por ser el mejor ejemplo que tengo en la vida, ejemplo de esfuerzo y perseverancia para conseguir cualquier objetivo en la vida.

A mi hermano, Edwin F. Ccente Quispe, por siempre apoyarme, ayudarme y ser un ejemplo de vida para mí.

A la Universidad Nacional de Ingeniería y a la Facultad de Ingeniería Civil, por la oportunidad de estudiar en esta prestigiosa institución y brindarme los mejores conocimientos gracias al mejor cuerpo docente.

A mi asesor, Luis S. Gonzales Híjar, por la confianza que me brindó desde el primer día que propuse mi tema de tesis. Muchas gracias por haberme aceptado como tesista y haberme orientado en varios momentos que necesité. Gracias por ser más que un asesor y ser un amigo con quien siempre voy a quedar agradecido.

Al Ing. Wilfredo Gutierrez con quien inicie mi plan de tesis y fue de mucha ayuda para poder lograr el avance que tuve. Muchas gracias Ing. Gutierrez también quedo agradecido por la confianza y disposición para conmigo.

A mis amigos de toda la vida, Jhon, Marco, Diego, Joao, Hans, etc, por su apoyo, tiempo y consejos cada vez que hablaba sobre esta tesis.

A mis amigos de la UNI, con quienes he compartido gratos momentos y ahora forman parte de una gran familia que tengo, una familia profesional que nunca voy abandonar.

A mi gran amigo Ing. Herbert Juan Peña, quien siempre me orientó y apoyó de una manera incondicional, además de formar parte importante en los últimos pasos de la realización de

este sueño. Quedo totalmente agradecido contigo por el gran apoyo brindado y este es el inicio de otras grandes metas.

A los profesores de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI por las clases brindadas con mucho esmero y de las cuales aprendí bastante.

Por último, a todas esas personas que estuvieron alentándome a acabar este trabajo en diferentes momentos y de lo cual quedo muy agradecido

ÍNDICE

RESUMEN	4
LISTA DE TABLAS	5
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	10
INTRODUCCIÓN	13
1.0 CAPÍTULO I: GENERALIDADES	15
1.1 ANTECEDENTES	15
1.2 JUSTIFICACIÓN	19
1.3 OBJETIVOS	19
1.3.1 Objetivo principal	19
1.3.2 Objetivos específicos	20
1.4 METODOLOGIA	20
2.0 CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE	22
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL	22
2.2 APLICACIÓN DE LAS CENIZAS DE RSU	22
3.0 CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO	29
3.1 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	29
3.1.1 Suelo – Cal	31
3.1.2 Suelo – Cemento	34
3.1.3 Suelo – Ceniza de Carbón	35
3.2 PRODUCCIÓN DE CENIZAS DE RESIDUO SOLIDO URBANO	37
3.2.1 Proceso de Incineración	38
3.3 ENSAYOS TRIAXIALES	43
4.0 CAPÍTULO IV: PROGRAMA EXPERIMENTAL Y ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN PARA LOS MATERIALES Y LAS MIXTURAS	46
4.1 MATERIALES	46
4.1.1 Suelo	46
4.1.2 Ceniza Volante	47

4.1.3	Mezclas Suelo - Ceniza	48
4.2	CANTIDAD Y CRONOGRAMA DE ENSAYOS	49
4.2.1	Cantidad de Ensayos	49
4.3	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS	50
4.3.1	Ensayos de Caracterización Física	51
4.3.1.1	<i>Densidad de los granos</i>	51
4.3.1.2	<i>Límites de Atterberg</i>	51
4.3.1.3	<i>Análisis Granulométrico</i>	51
4.3.2	Ensayos de Caracterización Química	51
4.3.2.1	<i>Composición Química</i>	52
4.3.2.2	<i>Cantidad de Materia Orgánica</i>	53
4.3.2.3	<i>Solubilización y Lixiviación</i>	54
5.0	CAPÍTULO V: ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA PARA LOS MATERIALES Y LAS MIXTURAS	55
5.1	ENSAYOS DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL	55
5.2	ENSAYOS TRIAXIALES CONSOLIDADO DRENADO	55
5.2.1	Equipo utilizado	56
5.2.2	Preparación de los cuerpos de prueba antes del ensayo triaxial	57
5.2.3	Procedimiento de saturación de los cuerpos de prueba	62
5.2.4	Consolidación y cálculo del t_{100}	62
5.2.5	Cálculo de la velocidad de corte y etapa de corte.	63
5.2.6	Análisis de resistencia	64
6.0	CAPÍTULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	66
6.1	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA	66
6.1.1	Gravedad Específica de los granos (Gs)	66
6.1.2	Límites de Atterberg (LL y LP)	66
6.1.3	Granulometría	67
6.1.4	Clasificación SUCS	68

6.2	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN QUÍMICA	69
6.2.1	Composición Química	69
6.2.3	Cantidad de Materia Orgánica	72
6.2.4	Ensayo de Lixiviación	73
6.2.5	Ensayo de Solubilización	74
6.3	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA	75
6.3.1	Ensayo de compactación Proctor Normal	75
6.3.2	Ensayos Triaxiales CD	76
6.3.2.1	<i>Influencia de la Cantidad de Ceniza</i>	78
6.3.2.2	<i>Envolventes y Parámetros de resistencia al corte comparando la influencia de la cantidad de ceniza.</i>	80
6.3.2.3	<i>Influencia del Tiempo de Cura</i>	81
6.3.2.4	<i>Envolventes y Parámetros de resistencia al corte comparando la influencia del tiempo de cura.</i>	84
7.0	CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
7.1	CONCLUSIONES	89
7.2	RECOMENDACIONES	91
	BIBLIOGRAFÍA	92

RESUMEN

La administración de los residuos sólidos urbanos es un problema creciente que existe en los diferentes países, afectando a todos los sectores de la sociedad. En Perú la cantidad de residuos sólidos urbanos generados va en aumento al igual que la economía, por lo tanto se plantea un sistema de incineración el cual estabilice esta cantidad de residuos, genere energía y también cenizas. Este tipo de generación de energía es utilizada en diferentes países del mundo pero también son generados cenizas las cuales están en proceso de investigación para su futura utilización.

Este estudio presenta el comportamiento de un suelo arcilloso estabilizado con cenizas de residuo sólido urbano bajo cargamento estático, teniendo como principal objetivo evaluar el comportamiento de las mezclas suelo-ceniza de residuo sólido urbano como un nuevo material geotécnico estabilizante.

Para esto fueron realizados ensayos de caracterización física, química y mecánica, como ensayos de compactación (Proctor) y ensayos de corte tipo triaxiales (CD), para el suelo puro y las mezclas suelo-ceniza. Fue evaluado la influencia de la cantidad de ceniza (30% y 40% de ceniza volante), bien como el tiempo de cura (30 días). Los resultados presentan que todas las mezclas suelo-ceniza tienen un mejor comportamiento en comparación al suelo puro presentando parámetros de resistencia más altos. Los resultados de la variación de cantidad de cenizas adicionado al suelo, muestra que para los ensayos sin tiempo de cura el parámetro de cohesión disminuye con el aumento de ceniza adicionado. Con relación al tiempo de cura presentó una mejoría con respecto a los ensayos sin tiempo de cura, destacando que con 40% de ceniza volante presentó casi el triple de cohesión comparado al suelo puro. La mixtura con 40% de ceniza volante presenta las mejores características de resistencia y podría ser utilizada como estabilizante del suelo estudiado, cumpliendo exigencias geotécnicas y ambientales, además de rebajar los costos de obra y dar un destino más noble a las cenizas de residuo sólido urbano.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 - Total de Residuos Sólidos Generados en el Perú años 2010 y 2011	16
Tabla 2.1 - Uso potencial de la ceniza volante de RSU.....	23
Tabla 2.2 - Comparación de diferentes opciones para la aplicación de ceniza volante de RSU.	25
Tabla 3.1 - Previsión de la cantidad de cal en función del tipo de suelo.....	32
Tabla 3.2 - Cemento requerido por volume para la estabilización efectiva de diferentes suelos.	34
Tabla 4.1 - Símbolos utilizados para los materiales y las mezclas.	48
Tabla 4.2 - Cantidad de ensayos	50
Tabla 6.1 - Resultados del ensayo de Gravedad Especifica de los granos para el suelo y ceniza volante.....	66
Tabla 6.2 - Resultados de los ensayos de Límites de Atterberg para el suelo y mezclas.	67
Tabla 6.3 - Resultados de las granulometrías.....	68
Tabla 6.4 - Clasificación SUCS.....	68
Tabla 6.5 - Análisis químicos de capacidad de cambio catiónico (CTC) y de ataque sulfúrico	69
Tabla 6.6 - Análisis químicos total en porcentaje de peso.....	69
Tabla 6.7 - Análisis mineralógica	70
Tabla 6.8 - Composición química de la ceniza volante de RSU	71
Tabla 6.9 - Composición química de las mezclas suelo-ceniza volante de RSU	71
Tabla 6.10 - Cantidad de materia orgánica del suelo y ceniza volante.....	72
Tabla 6.11 - Cantidad de materia orgánica de las mezclas suelo-ceniza.	72
Tabla 6.12 - Resultados del ensayo de lixiviación – Parámetros Inorgánicos en la Ceniza Volante	73
Tabla 6.13 - Resultados del ensayo de solubilización – Parámetros Inorgánicos en la Ceniza Volante.	74

Tabla 6.14 - Resultados de los ensayos de compactación Proctor Normal para las muestras.....	75
Tabla 6.15 - Resumen de los parámetros de resistencia para el S100 y mezclas S70CV30 y S60CV40 sin tiempo de cura.	81
Tabla 6.16 - Resumen de los parámetros de resistencia para el S100 y mezclas S70CV30 y S60CV40 sin tiempo de cura y con 30 días de tiempo de cura.....	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Generación Total de residuos Sólidos Municipales.....	16
Figura 1.2 - Residuos Sólidos Reaprovechables vs. Segregados.....	17
Figura 1.3 - Total de Residuos Sólidos municipales dispuestos en Rellenos Sanitarios a nivel del País.	18
Figura 3.1 - Efecto de la cantidad de cal sobre la resistencia a compresión simple para algunos suelos tratados con cal y curados por 7 días.	33
Figura 3.2 - Efecto del tiempo de cura sobre la resistencia a compresión simple para algunos suelos estabilizados con cal.	33
Figura 3.3 - Composición del RSU de COMLURB y de la Usina Verde	37
Figura 3.4 - Segregación de materiales para reciclado en la Usina Verde	40
Figura 3.5 - Proceso de generación de energía eléctrica en la Usina Verde	41
Figura 3.6 - Etapas del proceso de incineración de RSU en la Usina Verde S/A	42
Figura 4.1 - Localización del Campo Experimental II PUC-Rio.	46
Figura 4.2 - Arcilla utilizada - suelo coluvial.	47
Figura 4.3 - Ceniza Volante de RSU.....	48
Figura 4.4 - Equipo de EDX del LABEST de la COPPE/UFRJ	52
Figura 4.5 - Horno de 440 °C usada para las mezclas suelo-ceniza del Laboratorio de Geotecnia y Medio Ambiente de la PUC-Rio.	53
Figura 5.1 – Equipo triaxial.	56
Figura 5.2 – Hardware y Software utilizados para el ensayo triaxial.....	57
Figura 5.3 - Cuerpo cilíndrico compactado.....	58
Figura 5.4 - Etapas de moldeado de cuerpos de prueba.....	58
Figura 5.5 - Cápsulas con mezclas suelo-ceniza retirados del moldeado.	59
Figura 5.6 - Prueba de la membrana	59
Figura 5.7 – Etapas previas al ensayo triaxial.....	59
Figura 5.8 - Colocación del papel filtro.....	60

Figura 5.9 – Colocación de cuerpo de prueba.	60
Figura 5.10 - Colocación del papel filtro e la piedra porosa en la parte superior del cuerpo de prueba.	61
Figura 5.11 – Cuerpo de prueba antes del inicio del ensayo triaxial.....	61
Figura 5.12 - Diferentes criterios para definición de ruptura.	65
Figura 6.1 - Distribución granulométrica del suelo y ceniza volante.	67
Figura 6.2 - Distribución granulométrica del suelo, ceniza volante y mezclas con 30% y 40% de cantidad de ceniza volante.....	68
Figura 6.3 - Curvas de compactación Proctor Normal del suelo y mezclas suelo-ceniza volante.....	75
Figura 6.4 - Curvas tensión y deformación volumétrica versus deformación axial para el suelo puro, ensayos triaxial.	77
Figura 6.5 - Curvas de tensión de desviación y deformación volumétrica versus deformación axial para el S100, mezclas S70CV30 y S60CV40 en ensayos de compresión triaxial.	78
Figura 6.6 - Comparación entre las envolventes de S100 y mezclas S70CV30 y S60CV40.....	80
Figura 6.7 - Curvas de tensión de desviación y deformación volumétrica versus deformación axial para el S100, mezclas S70CV30 sin tiempo de cura y con 30 días en ensayos de compresión triaxial. .	82
Figura 6.8 - Curvas de tensión de desviación y deformación volumétrica versus deformación axial para el S100, mezclas S60CV40 sin tiempo de cura y con 30 días en ensayos de compresión triaxial. .	84
Figura 6.9 - Comparación entre las envolventes de S100, mezclas de S70CV30 sin tiempo de cura y con 30 días.....	85
Figura 6.10 - Comparación entre las envolventes de S100, mezclas de S60CV40 sin tiempo de cura y con 30 días.....	86
Figura 6.11 - Variación de la cohesión para diferentes mezclas suelo-ceniza y tiempo de cura.	87
Figura 6.12 - Variación del ángulo de fricción para diferentes mezclas suelo-ceniza y tiempo de cura.	87

Figura 6.13 - Muestras de S60CV40 T30d..... 88

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

ABNT	: Asociación Brasileira de Normas Técnicas
CBR	: <i>California Bearing Ratio</i>
CD	: Consolidado y Drenado
CH	: Arcilla arenosa de baja plasticidad
CTC	: Capacidad de cambio catiónico
CV	: Ceniza Volante
EDX	: Espectrometría de fluorescencia de Rayos X
EUA	: Estados Unidos da América
IP	: Índice de Plasticidad
LL	: Limite líquido
LP	: Limite Plástico
LVDT	: <i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MVV	: Medidores de Variación Volumétrica
RSU	: Residuo Sólido Urbano
SM	: Arenas limosas
SP	: Suelo Puro
SP-SC	: Arenas mal graduadas con arcilla
SUCS	: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
SW-SC	: Arena bien graduada con arcillas.
$w_{ótm}$: Humedad óptima de compactación
$Y_d máx$: Peso específico máximo seco
Y_d	: Masa específica seca
w	: Humedad
r	: Densidad del suelo
G_s	: Densidad de los granos
e	: Cantidad de vacíos
$e_{máximo}$: Cantidad máxima de vacíos
$e_{mínimo}$: Cantidad mínima de vacíos
t_r	: Tiempo mínimo de ruptura
L	: Altura del cuerpo de prueba
u	: Coeficiente de Poisson
v	: Velocidad de corte

*	: Relativo a tensiones efectivas
"	: Pulgadas
e_a	: Deformación axial
e_v	: Deformación volumétrica
t	: Tensión de corte
s_1, s_2	: Tensiones principales, mayor y menor
σ'_c	: Tensión de consolidación efectiva
σ_d	: Tensión de desvío
$\Delta\sigma_c$: Incremento de tensión de consolidación aplicada
Δu	: Incremento de presión de poros generado
ϕ'	: Ángulo de fricción
c'	: Cohesión
p'	: $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ (Tensión efectiva media normal)
q	: $(\sigma'_1 - \sigma'_3) / 2$ (Tensión de Desvío)
E	: Módulo de Young
h	: Altura final de la muestra
kPa	: Kilo Pascales
h_i	: Altura inicial de la muestra
%	: Porcentaje
mm	: Milímetro
cm	: Centímetros
°C	: Grados centígrados
meq	: Miliequivalentes
t	: Tonelada
kg	: Kilogramos
H ₂ O	: Agua
SiO ₂	: Sílice
Al ₂ O ₃	: Aluminio
Fe ₂ O ₃	: Oxido de Hierro
SO ₃	: Anhidro Sulfúrico
CaO	: Óxido de Calcio
Cl	: Cloro
TiO ₂	: Dióxido de Titanio

K_2O	: Óxido de Potasio
P_2O_5	: Pentóxido Fosfórico
ZnO	: Óxido de Zinc
Cr_2O_3	: Óxido de Cromo (III)
MnO	: Óxido de Manganeso (II)
SrO	: Óxido de Estroncio
CuO	: Óxido de Cobre (II)
PbO	: Óxido de Plomo (II)
MgO	: Óxido de Magnesio
Na_2O	: Óxido de Sodio
V_2O_5	: Pentóxido de Vanadio
KI	: Yodato de Potasio
KCl	: Cloruro de Potasio
H_2SO_4	: Ácido sulfúrico
$NaOH$: Hidróxido de sodio
CO_2	: Dióxido de Carbono
pH	: Medida de material ácido o básico

INTRODUCCIÓN

El suelo natural es un material complejo y variable, siendo común que este no satisfaga parcial o totalmente las exigencias de un proyecto geotécnico. Una alternativa disponible que permita realizar obras de cimentación sobre suelos blandos es removiendo el material existente en el lugar y sustituirlo por otros con características adecuadas o modificar y mejorar las propiedades del suelo existente, de modo que se pueda crear un nuevo material con características de resistencia y deformación adecuados para ser utilizado en obras de cimentación.

El aumento de la producción anual de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), las preocupaciones ambientales con los métodos de disposición tradicionales y la falta de espacio para la instalación de rellenos sanitarios, han llevado a que sean incentivadas nuevas alternativas de administración de los residuos, tales como la incineración.

La incineración, además de ser frecuentemente asociada a la recuperación de energía como una componente en la administración de RSU, genera como subproducto las cenizas, que vienen siendo utilizados en varias formas en otros países desarrollados como Suecia, Dinamarca, Francia, Estados Unidos y otros.

El estudio se llevó a cabo con la finalidad de generar un nuevo material geotécnico mezclando un suelo blando (arcilla) con cenizas volantes de RSU y obtener sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. Se tiene como principal interés mejorar los parámetros de resistencia del suelo adicionando diferentes porcentajes de ceniza volante, para optimizar la mezcla, y comparando los resultados con los del suelo puro para muestras sin tiempo de cura y con 30 días de tiempo de cura.

El trabajo fue dividido en siete capítulos. El primer capítulo presenta una revisión de la problemática actual de la disposición de los residuos sólidos en Perú seguido por la justificación, objetivos y metodología de trabajo. El segundo capítulo presenta el estado del arte donde se realiza una descripción general y la aplicación de las cenizas de residuo sólido urbano. El tercer capítulo presenta la estabilización de suelos con diferentes compuestos como cal, cemento y cenizas de carbón. Además de la producción de las cenizas de residuo sólido urbano y ensayos triaxiales. El cuarto capítulo presenta el programa experimental y ensayos de caracterización para los materiales y las mixturas suelo-ceniza donde

se hace una descripción detallada de los materiales, la cantidad y cronograma de ensayos, los métodos y procedimientos de ensayos. El capítulo cinco presenta los ensayos de caracterización mecánica para los materiales y mixturas suelo-ceniza donde se describe los ensayos proctor normal y los ensayos triaxiales consolidado drenado. El capítulo seis presenta el análisis y discusión de resultados de todos los ensayos. Por último, en el capítulo siete se presentan las conclusiones y recomendaciones finalizando con la bibliografía y anexos.

1.0 CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

El uso de residuos constituye un área de estudio en expansión, en diferentes lugares del mundo, principalmente debido a las perspectivas de racionalización y conformidad ambiental que el tema envuelve.

En este contexto es importante destacar diversos tipos de cenizas como, las cenizas obtenidas de la quema de carbón, quema de residuos sólidos urbanos u otros tipos de residuos, etc. que pueden ser usados como material de refuerzo para el suelo por la presencia de características puzolánicas en su estructura de composición, además de promover mecanismos de mejora y optimización del desempeño de suelos en cualquier tipo de aplicación (carreteras, cimentaciones, capas de rellenos sanitarios, etc).

Un caso histórico es presentado por Ceratti (1979) que destaca el empleo de suelo volcánico como aditivo para hacer más resistente al agua los morteros de cal destinados al revestimiento de cisternas, en la Isla de Santorin, en el siglo VII a.C. Aún según este autor, se puede observar que 1936 es la fecha considerada como marco para la utilización de cenizas volantes provenientes de termoeléctricas como agente cementante en el concreto en EEUU.

Las cenizas provenientes de la incineración de residuo sólido urbano han sido estudiadas para usos como agentes estabilizantes de suelos y en capas de cobertura de relaves (Lee et al. 1996). Las mezclas conteniendo ese material se están constituyendo en alternativas viables para esas aplicaciones, dado que sus características físicas, químicas y mecánicas son bastante semejantes a las cenizas volantes.

En el Perú, a partir del año 1991 empieza a obtener una conciencia sobre los impactos que puede causar los residuos sólidos urbanos. En el año 2000 se publica la Ley General de Residuos Sólidos, Ley N°27314, el cual establece el marco normativo de la gestión y manejo de los residuos sólidos en el país, modernizando y dinamizando el mercado de los residuos sólidos. A lo largo de los años el estado peruano ha ido promulgando decretos los cuales regulan la administración de los residuos, estableciendo características de los residuos y penalidades para los que hacen mala colocación de estos en territorio nacional.

Según el cuarto Informe Nacional de Residuos Sólidos Municipales y No Municipales, Gestión 2010-2011, en el Perú se produjeron 4' 217 274 toneladas de residuos domiciliarios en el 2010 y 5' 042 228 toneladas de residuos domiciliarios en el 2011 como se presenta en la Tabla 1.1 y la Figura 1.1.

Tabla 1.1 – Total de Residuos Sólidos Generados en el Perú años 2010 y 2011.

Año	Residuos Domiciliarios	Residuos Comerciales y Otros Municipales	Total de Residuos Municipales
	(t/año)		
2010	4 217 274	1 807 403	6 024 677
2011	5 042 228	2 160 955	7 203 183

Fuente: Cuarto Informe de Residuos Sólidos, Gestión 2010-2011.

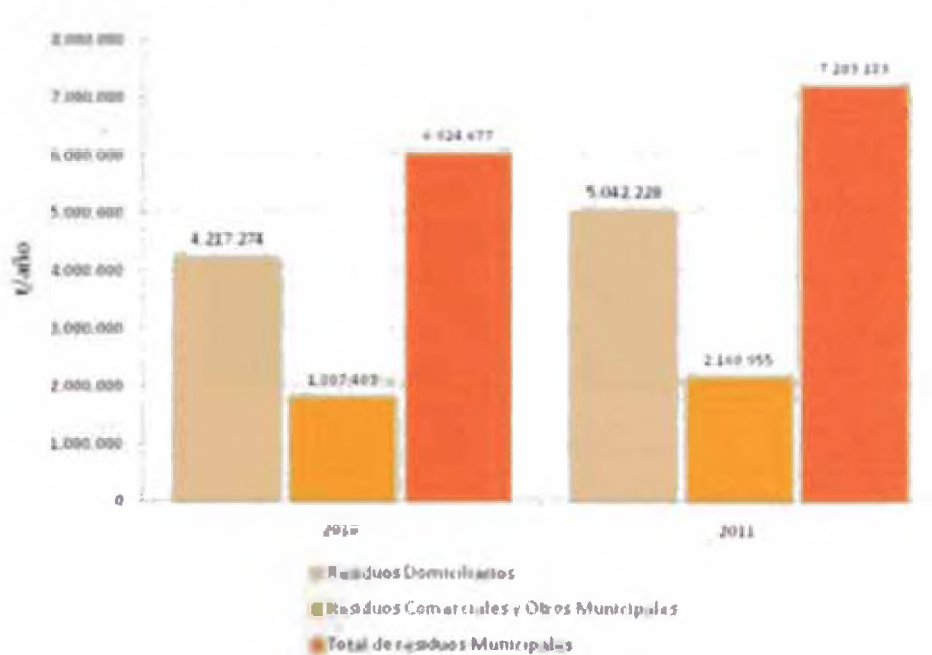


Figura 1.1 – Generación Total de residuos Sólidos Municipales.

Fuente: Cuarto Informe de Residuos Sólidos, Gestión 2010-2011.

La clase de residuos analizados en esta tesis son los Residuos Domiciliarios debido a que estos son los que forman parte en la incineración para convertirse en cenizas.

La cantidad de residuo generado en el año 2011 fue por el 51% de la población (15 140 062 personas) según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, Nota de Prensa).

En el Perú, en el año 2010 se produjo 0.52 kg/hab/día de residuos sólidos y aumentó a 0.61 kg/hab/día en el año 2011 (cuarto Informe Nacional de Residuos Sólidos Municipales y No Municipales, Gestión 2010-2011), lo que generó los 4.2 millones de toneladas de residuos en 2010 y 5.1 millones de toneladas de residuos en el 2011. Al menos el 90% de todo ese material puede ser reaprovechado, reutilizado o reciclado. Apenas en el año 2010, se ha informado de 40 836 toneladas de residuos recuperados en fuente, equivalente al 0.97% de los residuos domiciliarios generados, en el año 2011 este valor bajó. En la Figura 1.2 se presenta la cantidad de residuos reaprovechables y segregados.

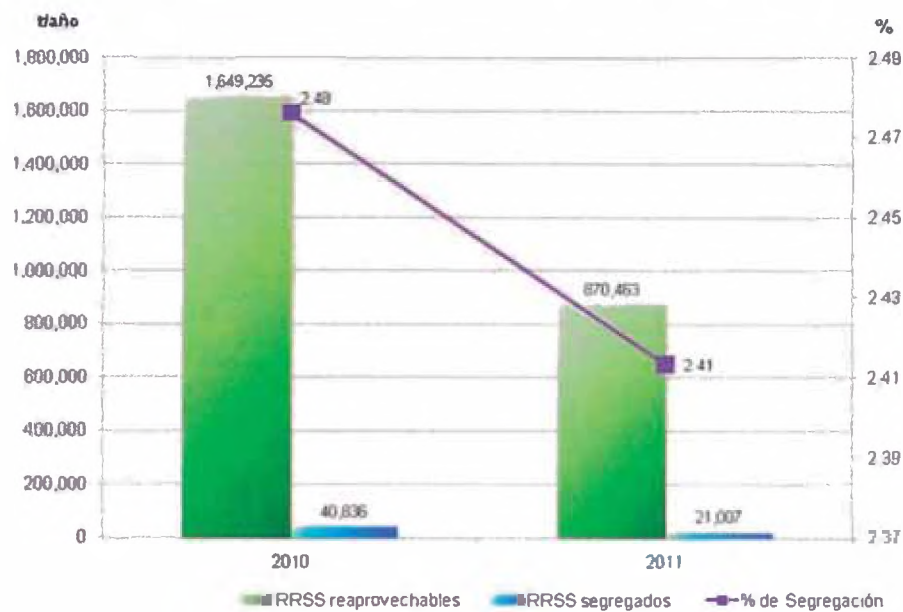


Figura 1.2 – Residuos Sólidos Reaprovechables vs. Segregados.

Fuente: Cuarto Informe de Residuos Sólidos, Gestión 2010-2011.

La cantidad de relleno sanitarios autorizados a fines de Diciembre del 2010 fue de nueve, pero a finales de Diciembre de 2011 solo quedaron ocho instalaciones, toda vez que el relleno sanitario de Ancón fue clausurado en Setiembre del 2011, sin embargo este no registra ingreso de residuos durante los años 2010 y 2011. Cerca de 2.57 millones de toneladas de residuos sólidos municipales fueron dispuestos formalmente en el año 2010 y 2.74 millones de toneladas en el 2011. La diferencia con la cantidad de residuos sólidos totales producidos no son especificados donde son colocados, los cuales deben acabar en botaderos o rellenos sanitarios no autorizados contaminando el medio ambiente y convirtiéndose en un foco infeccioso, peligroso para la sociedad. La Figura 1.3

presenta la cantidad de residuos sólidos municipales dispuestos en rellenos sanitarios a nivel del país.

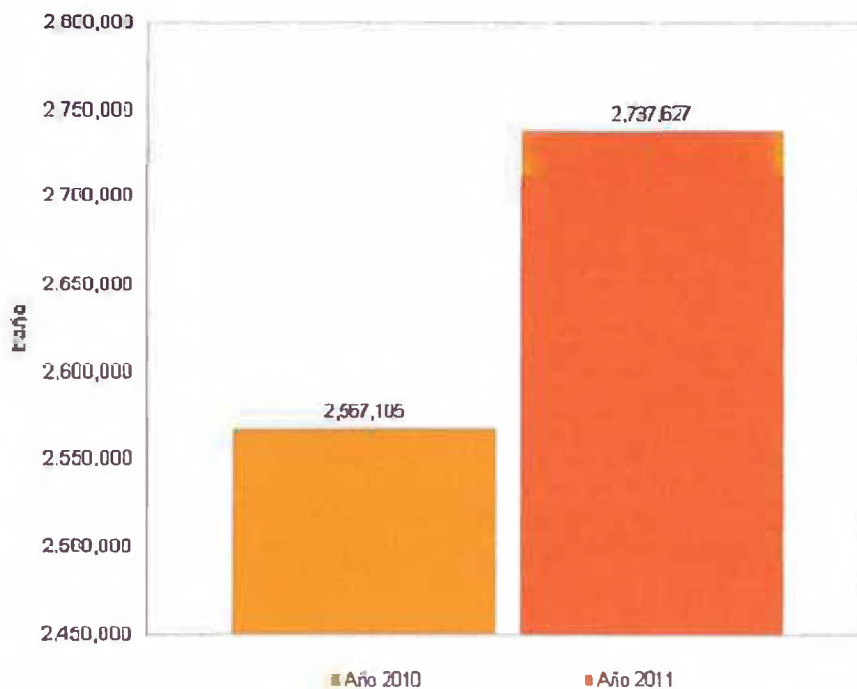


Figura 1.3 – Total de Residuos Sólidos municipales dispuestos en Rellenos Sanitarios a nivel del País.

Fuente: Cuarto Informe de Residuos Sólidos, Gestión 2010-2011.

Para el año 2030 la cantidad producida será 26.6 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos, lo cual hace pensar que se debería plantear un sistema de incineración que establezca esta cantidad de residuos y no provoque un problema de salud y ambiental a un país que se encuentra en constante crecimiento económico.

El aumento de estos residuos sólidos urbanos provoca una serie de problemas que afectan diferentes ámbitos de la sociedad de tipo ambiental, salud y espacio. Estos problemas están reflejados en la proliferación de enfermedades cuando los residuos son colocados en lugares inadecuados, también con la falta de espacio para la disposición de estos, debido a la expansión de las ciudades, afectando al medio ambiente contaminando suelos y ríos.

La implementación de un sistema de incineración genera energía al mismo momento que reduce la cantidad de residuos sólidos urbanos generados por la sociedad. Por ejemplo en Rio de Janeiro, Brasil, se implementó una incineradora piloto llamada USINA VERDE, la cual trabaja con 150 ton/día de residuo urbano

de los cuales recicla 15 ton/día, genera una energía nueva de 3.3 MWh de la cual establece 2.8 MWh en la red y es capaz de atender 14 000 residencias familiares. Pero dentro de todo también genera cenizas de residuo sólido urbano (fly ash y bottom ash) los cuales son utilizados para la realización de ladrillos de construcción.

Según los datos obtenidos por el cuarto Informe Nacional de Residuos Sólidos Municipales y No Municipales, Gestión 2010-2011, se nota que la generación de residuos sólidos urbanos tiene un aumento significativo con el tiempo y el gobierno peruano debe garantizar un tipo de solución a este problema futuro. Un tipo de reutilización es presentado en esta tesis, como cenizas de residuos sólido urbano, que puede servir como estabilizante al mezclarlo con el suelo.

La producción de este tipo de cenizas de residuo sólido urbano, volante y de fondo, así como su proceso de incineración es presentado en el Capítulo 3 de esta investigación.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La utilización de cenizas de residuos sólidos urbanos como material estabilizante puede potenciar la disminución de la exploración de recursos naturales, contribuir con la minimización de pasivos ambientales, agregar valor a los residuos y evitar problemas ambientales, eliminando problemas actuales de disposición de residuos en botaderos y rellenos sanitarios.

La técnica de adición de materiales alternativos en obras geotécnicas ayuda en la disminución de costos de obra, incentivando la inversión en este tipo de infraestructura y atendiendo partes de la sociedad que son menos favorecidas.

1.3 OBJETIVOS

Se distinguen dos tipos de objetivos: el objetivo principal y los objetivos específicos.

1.3.1 Objetivo principal

- Caracterización de las cenizas de residuo sólido urbano y evaluación del comportamiento de las mezclas suelo-ceniza como un nuevo material geotécnico estabilizante.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar ensayos de caracterización física y química del suelo puro, de las cenizas de residuos sólidos urbanos y de las mezclas de suelo-ceniza, a través de ensayos de laboratorio normados.
- Evaluar el comportamiento mecánico del suelo puro y las mezclas con 2 porcentajes de ceniza volante (30% y 40%), a través de ensayos de compactación (Proctor) y ensayos de corte tipo triaxiales CD.
- Analizar la influencia del porcentaje de ceniza adicionado al suelo y del tiempo de cura (30 días) en las mezclas suelo-ceniza evaluando los parámetros de resistencia de cohesión y ángulo de fricción en comparación al suelo puro.

1.4 METODOLOGIA

El trabajo de Investigación se ha venido desarrollando en el Laboratorio de Geotecnia y Medio Ambiente de la Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro (PUC-Rio).

Para lograr los objetivos indicados, se ha previsto las siguientes tareas:

- Una revisión general de estado del arte con el fin de conocer los resultados, recomendaciones y limitaciones de estudios previos.
- Realización de ensayos de plasticidad (LL y LP) para obtener una idea de la humedad óptima de compactación de los materiales y las mezclas suelo-ceniza.
- Realización de ensayos de compactación Proctor (Normal) en el suelo puro y las mezclas suelo-ceniza para determinar su humedad óptima y la máxima densidad seca.
- Con los resultados obtenidos se preparan las muestras de prueba para someterlas a ensayos de corte triaxiales tipo CD, tanto para el suelo puro como para las mezclas y poder comparar sus parámetros de resistencia, cohesión y ángulo de fricción (c' y ϕ').

- También se dejarán muestras de prueba compactadas, completamente envueltas y dentro de una cámara húmeda para que no pierdan humedad, esperando ser ensayados después de 30 días y notar los cambios que se pueden obtener al reaccionar el suelo con los compuestos de las cenizas de los residuos sólidos urbanos, entre ellos el CaO.
- Por último, los resultados obtenidos serán analizados y comparados con respecto al suelo puro y obtener una visión general del comportamiento del suelo con la adición de las cenizas.

2.0 CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

El residuo sólido urbano (RSU) es resultante de la actividad doméstica y comercial de la sociedad. Su composición varía, dependiendo de la situación socio-económica y de las condiciones y hábitos de vida de cada uno. Esos residuos pueden ser clasificados de las siguientes formas: materia orgánica, papel, plásticos, vidrios, metales y otros (ropas, aceite de cocina y aceites de motor, residuos electrónicos).

También existen algunos tipos de residuos diferentes de los comúnmente encontrados que son denominados como tóxicos. Estos necesitan de un destino especial para que no contaminen el ambiente y los seres que en él habitan, como los aerosoles vacíos, pilas, baterías, lámparas fluorescentes, restos de medicamentos y otros.

La incineración es un componente importante de la administración integral de los residuos sólidos urbanos en varios países. El proceso de incineración con generación de energía transforma materiales orgánicos en CO_2 y H_2O , pero genera residuos orgánicos, a partir de metales ferrosos y no ferrosos. Estos residuos son clasificados como ceniza de fondo y ceniza volante. El primero es el subproducto del proceso de combustión, mientras las cenizas volantes son los residuos provenientes de la cámara de combustión y son recogidos a partir del reactor y filtros.

Es importante el conocimiento de diferentes tipos de usos y nuevas técnicas de ingeniería para aprovechar las cenizas obtenidas de la quema de residuos sólidos urbanos, para contribuir con nuevas soluciones a los problemas de ingeniería, con menor costo y preservando el medio ambiente al mismo tiempo.

2.2 APLICACIÓN DE LAS CENIZAS DE RSU

Según Ferreira et al. (2003) para identificar el área potencial para la aplicación de las cenizas volantes de RSU y evaluar cada uso individual existen tres factores principales: adecuación para el procesamiento, rendimiento de la técnica y el impacto ambiental.

El primer factor, la adecuación para el procesamiento, depende de las propiedades físico-químicas de las cenizas volantes, tales como tamaño de partícula y propiedades químicas, que pueden constituir una limitación para un determinado proceso (aunque en algunos casos estas características se pueden ajustar en conformidad con los requisitos de procesamiento). El rendimiento de la técnica es el segundo factor considerado. Incluso si la ceniza volante puede ser procesada fácilmente, el producto final no se puede utilizar a menos que presente buenas propiedades técnicas. Por último, el tercer factor considerado es el impacto ambiental. La toxicidad no desaparece necesariamente con la recuperación de las cenizas volantes. Los riesgos impuestos sobre el medio ambiente, para cada posible aplicación, deben ser cuidadosamente sopesados frente a la creación de nuevas fuentes de contaminación en otros lugares. (Ferreira et al. 2003).

Con estos tres factores, Ferreira et al. (2003) presenta la Tabla 2.1 con nueve potenciales aplicaciones agrupadas en cuatro categorías principales.

Tabla 2.1 - Uso potencial de la ceniza volante de RSU.

Categoría	Aplicación
Materiales de construcción	Producción de cemento
	Concreto
	Cerámicas
	Vidrio y cerámicas de vidrio
Geotecnia	Pavimento
	Terraplén
Agricultura	Condicionador de suelo
Diversos	Absorbente
	Condicionador de lodo

Fuente: Ferreira et al, 2003.

En este trabajo se presenta el uso potencial de las cenizas volantes de los RSU para la categoría de Geotecnia, tales como capas de rellenos sanitarios, terraplenes sobre suelos blandos, estabilización de taludes.

Investigaciones sobre el uso de cenizas de RSU mezclado con los suelos son recientes en comparación con otros residuos reutilizados como agentes cementantes, como la ceniza de carbón. Sin embargo, se puede decir que fueron motivados por razones de reutilización de los residuos y de la gran cantidad que

se genera en todo el mundo, en busca de un empleo no contaminable y a bajo costo.

Según Ferreira et al. (2003), la ceniza volante de RSU se puede aplicar en el pavimento como sustituto de la arena en la base o sub-base de cemento estabilizado, sin embargo, tiene problemas ambientales relacionados con la contaminación del suelo y las aguas subterráneas por sustancias liberadas a partir de la base del pavimento. Los estudios ambientales realizados en Holanda, del producto obtenido después del pre-lavado seguido de cementación tienen como resultado satisfacer las normas para materiales de construcción. Los estudios se centran en los temas ambientales y también incluyen una estimación de los costos globales, resultando que el pre-lavado más la aplicación es menos costosa que la eliminación de las cenizas como un material peligroso.

Ferreira et al. (2003) comenta que una aplicación potencial para la ceniza volante de RSU está en la estabilización del suelo, como un sustituto de cal o cemento, aprovechando sus características puzolánicas, que se utilizan en la práctica común cuando el suelo de fundación no posee las propiedades geotécnicas deseable. Mediante la adición de cal o cemento al suelo se reduce la compresibilidad y aumenta la resistencia al corte, mejorando las propiedades de ingeniería. La gravedad específica de la ceniza volante de RSU es inferior al de otros materiales de relleno utilizados en la construcción de terraplenes, los valores de densidad típicos para cenizas volantes de RSU es 1,7 a 2,4, mientras que la arena es 2,65.

Goh y Tay (1991, apud Ferreira et al. 2003) investigaron la posibilidad de utilizar la ceniza volante de RSU en aplicaciones geotécnicas como un sustituto de material de colocación en terraplenes y encontraron que las cenizas volantes de RSU presenta propiedades pre-requisitos para este tipo aplicación como una alta resistencia y libre drenaje, típico de un material granular y menor densidad de compactación que los rellenos convencionales de tierra. También se evaluó la posibilidad de utilizar las cenizas volantes de RSU en la estabilización de suelos (en sustitución de la cal o cemento), encontrando que las mezclas de suelo – ceniza volante de RSU presentaron una mejoría de la resistencia al corte y baja compresibilidad en comparación con otros suelos no tratados. El principal problema de esta aplicación es la misma que la base de carretera, es decir, la

posibilidad de contaminación del suelo y las aguas subterráneas del terraplén construido.

En este caso Goh y Tay (1991, apud Ferreira et al, 2003) compararon los ensayos de lixiviación para las cenizas volantes de RSU con lixiviación de cenizas volantes de RSU estabilizadas con cal o cemento, y los resultados fueron que las cenizas volantes de RSU no estabilizadas superaron los estándares de calidad, mientras que las cenizas volantes de RSU estabilizados presentó valores más bajos. Sin embargo, limitaron sus estudios a la lixiviación de las cenizas volantes de RSU y no observaron lo que puede suceder en las mezclas de suelo – ceniza volante, lo que podría dar una indicación más precisa del comportamiento de lixiviación de terraplenes construidos con estos materiales.

La Tabla 2.2 presenta el resumen de los principales aspectos con relación a las aplicaciones de la ceniza volante de RSU.

Tabla 2.2 – Comparación de diferentes opciones para la aplicación de ceniza volante de RSU.

Aplicación	Estado actual	Nivel de aplicación	Pre-tratamiento	Valorización	Posibles usos	Comportamiento Lixivante	Ventajas Principales	Posibles Desventajas
Pavimento	Probado	Medio	Exigido	Bajo	Relleno /Cimentación	Bajo	Rentable (menos caro que la eliminación)	-
Presas	Probado	Medio	Aconsejado	Bajo	Relleno /Cimentación	Medio/Alto	Fácil implementación, compactación de suelos de baja resistencia	Lixiviación excede los padrones de agua.

Fuente: Ferreira et al. 2003

El método usado por Ferreira et al. (2003) para identificar el área potencial para la aplicación de las cenizas volantes de RSU, también podría ser usado para las cenizas de fondo de RSU, con la finalidad de tener un mejor conocimiento de la aplicación de este tipo de ceniza.

Según Forteza et al. (2004) desde que comenzó la incineración de RSU, otras posibilidades de uso además de la disposición en rellenos sanitarios ha sido buscada. La mayoría de estas iniciativas tienden a utilizar estos residuos como un sustituto de agregado en pavimentos de carreteras, terraplenes y otros elementos de construcción. Para tener una utilización eficaz de las cenizas de fondo de los RSU, algunos aspectos deben ser considerados:

- La ceniza de fondo que proviene de la incineración de RSU es un material tan altamente heterogéneo y variable que los resultados no pueden

garantizar el comportamiento de la ceniza obtenida en cualquier momento y bajo cualquier condición. Por lo tanto, un control continuo del producto químico principal y de las propiedades de ingeniería (resaltando lixiviados, distribución de tamaño de partícula, capacidad de carga, etc.) tienen que ser realizados, con diferentes distribuciones de muestra que permitan cubrir una amplia gama de eventualidades relacionadas al residuo de incineración, además de evaluar las condiciones de funcionamiento del incinerador;

- En segundo lugar, a partir de algunos resultados, se puede deducir que una administración más rigurosa de la colecta selectiva podría dar lugar a un cambio significativo en la composición de la ceniza de fondo. Por lo tanto, una reducción en la cantidad de vidrio incinerado provocaría la reducción del volumen de la ceniza de fondo debido a que el vidrio es el componente dominante. Cabe subrayar, porque la ceniza de fondo resultante vendrá a ser polvo y las aplicaciones que deben ser considerados serían bastante limitadas;
- Por último, el comportamiento de las cenizas de fondo en la pavimentación y en condiciones reales sólo puede ser evaluado mediante la realización de tramos experimentales, donde el comportamiento a largo plazo tiene que ser evaluado. En este sentido, es importante hacer hincapié en las normas de la Generalitat de Cataluña, España, en la evaluación de las cenizas de fondo, que fue tomada como referencia y establece limitaciones para el uso de la ceniza, que se refieren principalmente a su uso en áreas de real o potencial contacto con el agua, a fin de limitar las emisiones de lixiviados.

Becquart et al. (2008) llevaron a cabo pruebas de cargas cíclicas y ensayos triaxiales sobre las cenizas de fondo de RSU puro y con adición de un agente de unión que es el cemento con la visión de comprender las características mecánicas de esta ceniza pura y sus posibles usos en pavimentos. Los resultados presentan un comportamiento mecánico similar a los materiales denso convencionales (arena, materiales granulares) y una dependencia de la presión aplicada promedio que es característica del comportamiento mecánico de los medios granulares. Es de destacar que las características mecánicas de las cenizas de fondo de RSU pura, los resultados muestran una alta rigidez, índice bajo de compresión y un ángulo de fricción alto, lo que da al material una utilización

potencial semejante a la grava natural utilizado clásicamente en la pavimentación. Los ensayos triaxiales drenados realizados en las cenizas de fondo de RSU tratados con cemento (1% - 5 %) presentaron un comportamiento más frágil, típico de los materiales a base de cemento (por ejemplo, mortero u hormigón), los ángulos de fricción interna aumentan la resistencia pico, así como en grandes deformaciones, estas diferencias parecen aumentar con la cantidad de cemento.

Vizcarra (2010) señala que la cantidad de plantas incineradoras de RSU es aún mucho más bajo que los que utilizan carbón. El comportamiento reportado de los efectos de las cenizas y sus mecanismos de estabilización son comparadas con las cenizas de carbón, desde que el RSU sea compuesto principalmente de materia orgánica. En Brasil no se encontraron informes sobre el uso del tipo de cenizas de RSU en la pavimentación de carreteras durante su búsqueda.

En este contexto, Vizcarra (2010) realizó un estudio con el objetivo de evaluar la aplicación de las cenizas de RSU en las capas de base de pavimentos mediante la mezcla de las cenizas a un suelo arcilloso. Realizó ensayos de caracterización física, química y mecánica para el suelo puro y mezclas suelo-ceniza de RSU con diferentes cantidades de ceniza (20% y 40%), por otra parte, se realizaron ensayos ambientales de lixiviación y solubilización viendo al peligro que podría causar el uso de las cenizas procedentes de la incineración de RSU.

Las mezclas con inserción de cenizas presentaron un comportamiento mecánico compatible con las exigencias de un pavimento de bajo volumen de tráfico. Los parámetros de compactación están influenciados por el contenido y el tipo de ceniza adicionado, siendo que para cada contenido debe obtener una curva de compactación. Concluye que para la prueba de módulo resiliente, la cantidad de ceniza puede mejorar o empeorar el comportamiento del suelo y otros factores que influyen en el comportamiento resiliente son: el contenido de humedad, el tiempo de retardo de la compactación después de mezclar los materiales y el tiempo cura el cual tiene una influencia favorable.

Los ensayos CBR en el suelo puro presentan que no pueden ser usados en base de pavimentos pero con la adición de la ceniza los resultados mejoran y con adición de 40% de ceniza volante consigue reducir la expansión del suelo en hasta 0.5% menos, viabilizando así su empleo en base de pavimentos. Dentro de los ensayos químicos se evaluó ensayos de lixiviación y solubilización para las

cenizas (volante y de fondo) puras y La mezcla con 40% de ceniza volante que consiguió mejor comportamiento en comparación con las otras mezclas estudiadas. Los resultados para el ensayo de lixiviación presentan que según el anexo F de la norma ABNT/NBR 10004:2004, la ceniza volante, ceniza de fondo y la mezcla con 40% de ceniza volante de RSU son Clase IIA – Residuos No Peligrosos y para el ensayo de solubilización según el anexo G de la norma ABNT/NBR 10004:2004 son residuos No Inertes lo que es un aporte aún más importante en comparación con el trabajo de Goh y Tay (1991).

Fontes (2008) concluye en su estudio que el mortero ensayado conteniendo ceniza volante de RSU presentó resultados mecánicos, físico y de durabilidad superiores a los resultados de referencia. La presencia de la ceniza probablemente promovió el aumento de estos parámetros a través de la acción física de refinamiento de los poros. La distribución de los poros presento la reducción de los poros capilares grandes, proporcionando el aumento en el volumen de los medios y pequeños capilares en un concreto de alto rendimiento.

Ambientalmente se puede observar que los residuos orgánicos, colocados en lugares inadecuados, son potencialmente peligrosos y contaminan el medio ambiente. El producto de la generación de energía por medio de incineración y la producción de cenizas de residuo sólido urbano reduce la cantidad de residuos orgánicos, además de generar energía. La presente investigación procura utilizar estas cenizas residuales de la incineración para fines geotécnicos generando un nuevo material y reduciendo la cantidad de cenizas que puedan ser colocados en rellenos sanitarios, solucionando así un problema ambiental que es la generación de residuos y reutilizándolos.

Es importante el conocimiento de diferentes tipos de usos y nuevas técnicas de ingeniería para aprovechar las cenizas obtenidas de la quema de residuos sólidos urbanos, para contribuir con nuevas soluciones a los problemas de ingeniería, con menor costo y preservando el medio ambiente al mismo tiempo.

La presente investigación, se presenta como una alternativa más para la disminución de residuos sólidos urbanos y a la vez el cuidado del medio ambiente reutilizando este material en la estabilización de suelos.

3.0 CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

3.1 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

La estabilización de suelos es el procedimiento que ve la mejora y estabilidad de las propiedades de los suelos (resistencia, deformación, permeabilidad, etc). El tipo de estabilización puede ser de las siguientes formas: Físico-Químico; Mecánico (estabilización granulométrica, compactación).

De acuerdo con Vendruscolo (1996) la estabilización de los suelos es una técnica antigua desenvuelta principalmente para pavimentos, por eso tal conjunto de procesos ha sido ampliamente utilizado, no solamente en el área de pavimentos, en diversas otras áreas como cimentaciones, contención de taludes y terraplenes.

Según Baptista (1976), estabilizar el suelo es utilizar un proceso de cualquier forma para tornar el suelo en estable para los límites de su utilización y aun hacer con que esta estabilidad permanezca sub acciones de las cargas exteriores y acciones climáticas variables.

Escoger uno u otro tipo de estabilización es influenciado por el costo, finalidad de la obra, y en particular, por las características de los materiales y propiedades del suelo que debe ser corregido.

Según Das (2001) el suelo en un lugar de construcción no es siempre totalmente adecuado para soportar estructuras como edificios, puentes, carreteras y presas, entonces se escoge un tipo de estabilización de suelo, dependiendo de los costos y tiempo, para mejorar la resistencia del suelo y pueda cumplir con las diferentes especificaciones de las estructuras. Por ejemplo, en depósitos de suelo granular el suelo in situ tal vez este muy suelto e indique un gran asentamiento elástico. En tal caso, tiene que ser densificado para incrementar su peso específico así como su resistencia cortante. Algunas veces, las capas superiores del suelo no son adecuados y deben retirarse y reemplazarse con mejor material sobre el cual pueda construirse una cimentación estructural. El suelo usado como relleno debe estar bien compactado para soportar la carga estructural deseada. Otro tipo de agente estabilizador puede ser la cal, que produce una alteración considerable en suelos expansivos como arcillas.

De acuerdo con Santos et al. (1995, apud Lopes, 2011), la compactación se refiere al proceso de tratamiento de un suelo con la finalidad de minimizar su porosidad

por la aplicación sucesiva de carga, suponiendo que la reducción del volumen de vacíos está relacionada a mayor resistencia. En cambio la estabilización mecánica por corrección granulométrica corresponde a la mezcla del suelo con uno o más suelos u otro tipo de materiales que posibiliten la obtención de un "nuevo producto" con propiedades adecuadas a los requisitos del proyecto.

Según Horpibulsuk et al. (2012) una de las técnicas utilizadas ampliamente para mejorar los suelos problemáticos en estados relativamente seco es la compactación de suelo *in situ*, mezclando con pasta de cemento. Una ventaja de esta técnica es que la resistencia adecuada puede ser conseguida en un corto plazo. Los efectos de algunos factores de influencia (cantidad de agua, cemento, tiempo de cura y energía de compactación) sobre la microestructura y característica de ingeniería de suelos estabilizados con cemento han sido ampliamente investigados. Para reducir el costo de estabilización, la sustitución de cemento por residuos, como cenizas volantes, cenizas de cascara de arroz y cenizas de biomasa (cenizas de incineración de material orgánico), han sido ampliamente aplicados en la práctica. Cenizas volantes liberan los aglomerados de solo-cemento en aglomerados menores, aumentando así la superficie activa para la hidratación y las reacciones puzolánicas.

Bleskina (2005) presenta una forma de estabilización de suelos arenosos con resina de urea donde los ácidos clorhídricos y oxálico se utilizan principalmente como endurecedores. El Instituto de Investigación Científica de Cimentaciones y estructuras Subterráneas de Rusia han desarrollado nuevas fórmulas a base de resina de urea y los siguientes endurecedores complejos: $Fe_2(SO_4) + Al_2(SO_4)_3$ e $FeCl_3 + Al_2(SO_4)_3$. Es conveniente utilizar la resina de urea para la estabilización de suelo apenas en los casos en que otros métodos utilizados son ineficaces. Por ejemplo, al realizar pozos en tierra movediza y cuando la carga sobre las cimentaciones de un edificio están aumentadas o la capacidad de soporte del suelo es reducida en la base de cimentación, así como, cuando surge la necesidad de efectuar la estabilización del suelo sin interrumpir el trabajo de un centro comercial.

Otro tipo de estabilización de suelo es el propuesto por Lisbona et al. (2012) que utiliza papel calcinado y cemento. Los ensayos fueron realizados en dos fases, la primera fue en el laboratorio y la segunda fue en campo, desarrollada para la estabilización *in situ* de 250 m. de base de pavimentación utilizando los métodos

de mezcla en seco. La capacidad de carga del suelo estabilizado fue determinada en laboratorio y la densidad de la base de pavimentación fue medida en campo después de la compactación y deformaciones a los 7 días. La evolución de la resistencia a compresión simple fue medida a lo largo de 90 días. Los resultados presentan que el papel calcinado puede ser utilizado como un ligante para la estabilización de suelos con cantidades superiores a 3% en peso de suelo a ser estabilizado. La mezcla de cemento Portland con papel calcinado consigue mejorar el comportamiento mecánico del suelo estabilizado. Se estima que para mayores resistencias a compresión puede ser obtenido con misturas de papel calcinado y cantidades de cemento aproximado en la relación de 25:75 (en peso).

3.1.1 Suelo – Cal

La utilización de cal como agente estabilizante de suelo es el método de estabilización química más conocido y con diferentes tipos de aplicaciones, como por ejemplo, en terraplenes o pavimentos. Sus propiedades como aditivo del suelo, para mejorar en la resistencia, deformación y permeabilidad, son conocidas desde la antigüedad.

Se utiliza suelo-cal cuando no se dispone de un material o mezcla de materiales con las características de resistencia, deformación y permeabilidad adecuada para el proyecto.

La estabilización con cal es comúnmente empleada en la construcción de carreteras, siendo generalmente utilizada como base o sub base de pavimentos. Otra importante aplicación del suelo-cal ha sido en la protección de taludes contra la erosión en obras hidráulicas. La técnica de mejoramiento también puede ser utilizada en las cimentaciones de edificios de pequeña envergadura, en suelos con baja capacidad portante o que presenta baja estabilidad volumétrica. Tales condiciones son problemáticas en la medida en que pueden causar severos daños en la edificación. La cal tiene poco efecto en suelos altamente orgánicos y también en suelos con poca o ninguna cantidad de arcilla. Siendo más eficiente en suelos arcillosos, llegando a ser más efectivo que el cemento en gravas arcillosas (Ingles & Metcalf, 1972).

De acuerdo con Lopes (2011), las características del suelo a ser mejorado, el uso y las características mecánicas deseadas de la mezcla son factores determinantes

para la cantidad de cal necesaria para el tratamiento de suelos y puede ser clasificado en dos categorías generales:

- **Modificación del Suelo:** reducción de la plasticidad, mejora de la trabajabilidad y aumento de la resistencia a la defloculación y erosión;
- **Estabilización del Suelo:** aumento definitivo de la resistencia y rigidez del suelo debido a la ocurrencia de reacciones puzolánicas.

La Tabla 3.1 presenta un indicativo de la cantidad de cal a ser adicionada para la estabilización de acuerdo con el tipo de suelo.

Tabla 3.1 – Previsión de la cantidad de cal en función del tipo de suelo.

Tipo de Suelo	Cantidad de Cal para Modificación	Cantidad de Cal para Estabilización
Grava angulosa	2 a 4	No recomendado
Grava arcillosa bien graduada	1 a 3	≥3
Arenas	No recomendado	No recomendado
Arcilla arenosa	No recomendado	≥5
Arcilla con limo	1 a 3	2 a 4
Arcillas	1 a 3	3 a 8
Suelos orgánicos	No recomendado	No recomendado

Fuente: Inglês & Metcalf, 1972

Inglês & Metcalf (1972), presentan que la resistencia a compresión simple aumenta con la cantidad de cal hasta cierto nivel y a partir de este punto la tasa de aumento de resistencia disminuye con la cantidad de cal, debido al lento efecto cementante, dependiendo del tipo de suelo, como es presentado en la Figura 3.1.

Mateos (1964 apud Rosa, 2009), afirmó que la resistencia de las mezclas es fuertemente influenciada por la temperatura de cura, recomendando la construcción de camadas de pavimento estabilizadas con cal en el inicio del verano. Carraro (1997, apud Rosa, 2009) verificó que la energía de compactación influencia y es de fundamental importancia en la determinación de la resistencia mecánica de los suelos tratados con cal y ceniza volante.

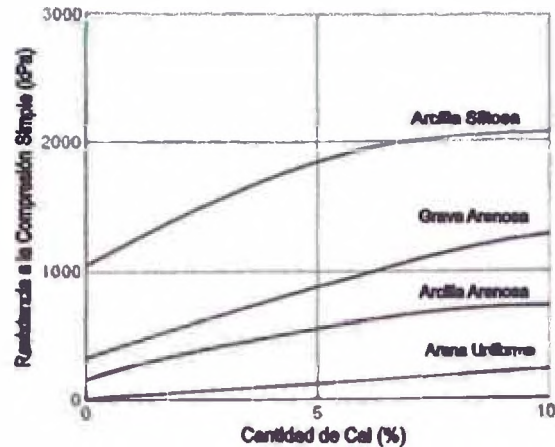


Figura 3.1 – Efecto de la cantidad de cal sobre la resistencia a compresión simple para algunos suelos tratados con cal y curados por 7 días.

Fuente: Ingles & Metcalf, 1972.

Ingles & Metcalf (1972) presentan un estudio sobre la influencia del tiempo de cura en diferentes tipos de suelo, observaron que las gravas arenosas presentan mayor resistencia conforme a la Figura 3.2.

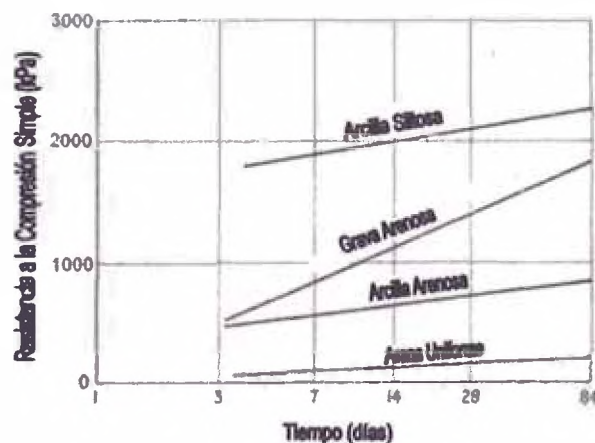


Figura 3.2 – Efecto del tiempo de cura sobre la resistencia a compresión simple para algunos suelos estabilizados con cal.

Fuente: Ingles & Metcalf, 1972.

El comportamiento del suelo con diferentes tipos de cal es diverso y es sujeto a diferentes variables como: tiempo de cura, cantidad de cal, reacciones puzolánicas, cantidad de agua, temperatura de cura, presencia o no de materia orgánica.

3.1.2 Suelo – Cemento

Según Das (2001) el cemento es cada vez más utilizado como estabilizador para suelos, principalmente en la construcción de pavimentos y diques. La primera construcción controlada con suelo.cemento en EUA fue realizada cerca de Johnsonville, Carolina del Sur, en 1935. El cemento es utilizado para estabilizar suelos arenoso y arcilloso. El cemento ayuda a disminuir el límite líquido e incrementar el índice de plasticidad y administrar los suelos arcillosos de la misma forma que la cal. En suelos arcillosos, la estabilización con cemento es efectiva cuando el límite líquido es menor que 45-50 y el índice de plasticidad es menor que 25 aproximadamente. Los suelos granulares y arcillosos con baja plasticidad son los más adecuados para la estabilización con cemento. Las arcillas cálcicas son estabilizadas fácilmente con adición de cemento, las arcillas con sodio e hidrogenadas de naturaleza expansiva presentan mejor comportamiento con cal. Por estas razones se debe tener mucha atención en la selección del material estabilizador.

La Tabla 3.2 presenta los óptimos porcentajes de cemento por volumen para la estabilización efectiva de varios tipos de suelo.

Tabla 3.2 – Cemento requerido por volumen para la estabilización efectiva de diferentes suelos.

Tipo de Suelo		Porcentaje de cemento por Volumen
Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS	
A-2 e A-3	GP,SP e SW	6-10
A-4 e A-5	CL,ML e MH	8-12
A-6 e A-7	CL, CH	10-14

Fuente: Michelli & Freitag, 1959 apud Das, 2001.

Consoli et al. (2009) realizaron una ampliación de un estudio realizado por el mismo autor en el año 2007, a través de la cuantificación de la influencia de la relación de vacíos/cemento sobre el módulo de corte inicial G_0 y parámetros de resistencia efectivos (c' y ϕ') de una arena artificial cementada. Fueron realizados ensayos de compresión simple y ensayos de compresión triaxial con mediciones de *bender elements*. Los resultados presentan que la relación de índice de vacíos/cemento definida como razón entre el volumen de vacíos de la mezcla compactada y el volumen de cemento (V_v/V_{ce}) es un parámetro adecuado para

evaluar tanto la rigidez inicial y la resistencia efectiva de la mezcla de arena con cemento estudiado. Con este parámetro se puede escoger la cantidad de cemento y de energía de compactación adecuado para obtener una mezcla que reúna la resistencia y rigidez exigida por el proyecto con un costo optimizado.

3.1.3 Suelo – Ceniza de Carbón

Según Siqueira (2011) los productos de la combustión de carbón son los subproductos generados a partir de la quema de carbón mineral en los procesos de combustión pulverizada. Estos residuos son denominados de cenizas. En el proceso de incineración, son generados los siguientes tipos de ceniza: escórias, cenizas de fondo (pesadas) y cenizas volantes (leves). La utilización de las cenizas de carbón como subproducto resulta en numerosos beneficios, entre los cuales pueden ser citados : una disminución significativa de la necesidad de áreas destinadas a los rellenos sanitarios, la conservación de recursos naturales, un ambiente más limpio y seguro, la reducción general del costo de la generación de electricidad. La norma americana ASTM C 618 clasifica las cenizas volantes en dos tipos: clase F y clase C. las cenizas volantes de clase F presentan baja cantidad de calcio (menos de 10% de CaO) y es obtenida de la quema de antracito o carbón betuminoso y presentan propiedades puzolanicas pero no cementantes. Las cenizas volantes de clase C presentan alta cantidad de calcio (entre 10 a 30 % de CaO) y son productos de quema de lignito o carbón sub-betuminoso y tiene propiedades puzolanicas y cementantes.

Los suelos arenosos, con escasas de arcilla coloidal, no reaccionan satisfactoriamente a la cal, para ese caso se puede usar cemento, pero este puede acabar siendo una solución muy cara, entonces la función de la ceniza volante es substituir la fracción fina (arcilla) del suelo, una vez que puede reaccionar con la cal, siempre y cuando el tamaño de la ceniza sea diferente al de la arcilla.

De acuerdo con Tastan et al. (2011), la adición de ceniza volante en los suelos orgánicos puede incrementar la resistencia a la compresión no confinada, pero este incremento depende del tipo de suelo y de las características de la ceniza volante. El módulo resiliente de los suelos ligeramente orgánicos u orgánicos también puede ser significativamente mejorado. El aumento de la resistencia y la rigidez son atribuidos principalmente a la cementación causada por reacciones puzolanicas, por lo tanto, la disminución de cantidad de agua, resultante de la

adición de ceniza volante que contribuye al aumento de la resistencia. El contenido orgánico del suelo es una característica perjudicial para la estabilización de suelos. El aumento de la cantidad de materia orgánica el suelo indica que la resistencia de la mezcla suelo-ceniza volante disminuye exponencialmente. Para la mayoría de las mezclas solo-ceniza volante ensayada, la resistencia a la compresión simple y el módulo resiliente aumentan cuando la cantidad de ceniza volante aumenta.

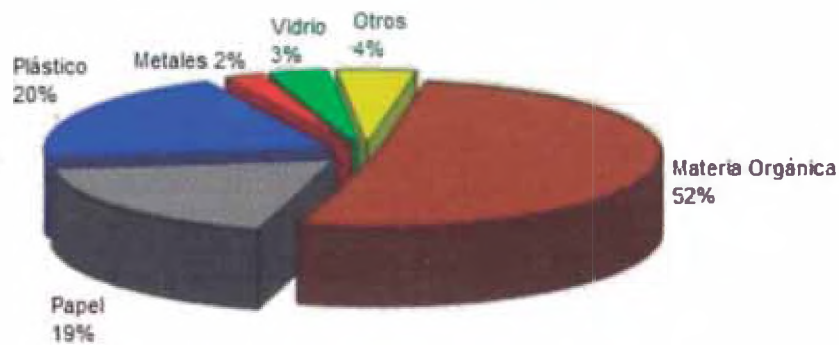
Lopes (2011) estudio la aplicación de las cenizas de carbón (volante y de fondo) en camadas de pavimentos. Utilizó un suelo arenoso-siltoso no laterítico. Fueron realizados ensayos de caracterización física, química, mecánica y ambiental de solubilización y lixiviación. Las cantidades de cenizas de fondo fueron 30% y 40% y de ceniza volante fue 10% y 20% relacionados al peso del suelo seco. También se realizaron ensayos con adición de 3% de cal. Los resultados de los ensayos ambientales indicaron que la ceniza volante fue clasificada como residuo de Clase II-B residuo Inerte y la ceniza de fondo Clase II A – Residuo No Inerte. La adición de cenizas al suelo genera un aumento en el contenido óptimo de humedad del material y disminución en el máximo peso específico, en diferentes proporciones. Los análisis mecánicos-empíricos con los valores de módulo resiliente presentaron que es viable la utilización de cenizas como aditivo al suelo para utilización en base de pavimentos de bajo volumen de tráfico. Los ensayos triaxiales de cargas repetidas demostraron que la tensión confinante es más influyente en el suelo estudiado y el comportamiento no varía con la adición de cenizas. Los análisis de los resultados del módulo resiliente comprobaron que el tiempo de cura, el tipo y cantidad de ceniza mejoran el comportamiento de la mezcla, presentando mejores resultados en las mezclas con ceniza volante y cal.

Kim et al. (2005) estudiaron los usos en terraplenes de pavimentos para las cenizas volantes y de fondo de carbón y realizaron ensayos de caracterización mecánica como compactación, resistencia, consolidación y permeabilidad. Los resultados presentaron que la permeabilidad de las mezclas con las cenizas compactadas fue disminuyendo ligeramente con el aumento de la cantidad de ceniza volante. Esto es principalmente debido al aumento del peso específico con el aumento de la cantidad de finos, lo que genera más resistencia al flujo de agua a través del llenado de espacios vacíos entre partículas. Los valores fueron semejantes al de una mezcla de arena con cal. Los resultados de los ensayos

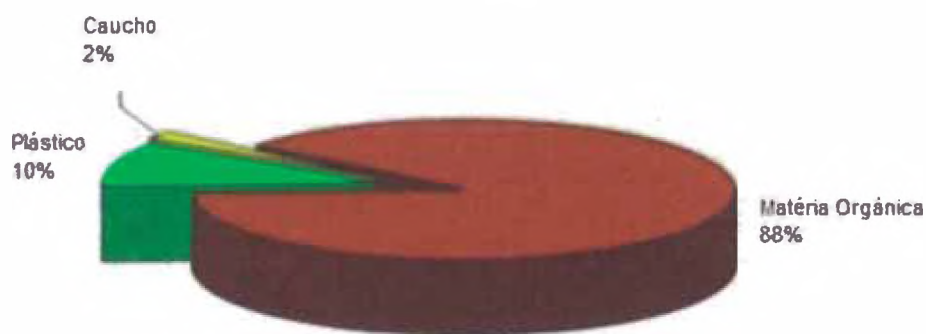
mecánicos indicaron que las mezclas con la ceniza volante y de fondo pueden ser más compresibles que las arenas típicas compactadas en los mismos niveles de compactación.

3.2 PRODUCCIÓN DE CENIZAS DE RESIDUO SOLIDO URBANO

La Usina Verde es una empresa de capital privado situado en la Ciudad Universitaria de la Universidad Federal de Rio de Janeiro (UFRJ) – Isla de Fundao y tiene como objetivo presentar soluciones ambientales para el destino final de los residuos sólidos urbanos, a través del proceso de incineración con cogeneración de energía. Actualmente, la Usina Verde viene tratando el RSU y pretende a través del proceso de incineración, propiciar el aprovechamiento racional de basura, convertirlos, si es posible, en insumos. (Vizcarra, 2010)



(a) COMLURB



(b) Usina Verde

Figura 3.3 – Composición del RSU de COMLURB y de la Usina Verde.

Fuente: FONTES, 2008.

El RSU utilizado en la Usina Verde viene ya pre-tratado de la Compañía Municipal de Limpieza Urbana de Rio de Janeiro (Comlurb), proveniente del relleno sanitario

de Comlurb, en el municipio de Cajú/RJ. Al llegar a la usina pasa por un nuevo triaje. La composición de los RSU después del proceso de reciclado de Comlurb y de la Usina Verde se encuentra en la Figura 3.3. La Usina Verde está en funcionamiento desde el 2004 y recibe diariamente 30 toneladas de residuos sólidos. (Vizcarra, 2010)

3.2.1 Proceso de Incineración

Esta descripción está basada en Fontes (2008), que estudio estos residuos para uso en concreto de cemento Portland para construcción civil.

“El RSU, después de la etapa de pesado, pasa por el proceso de triaje, como dicho anteriormente, donde los materiales reciclables son segregados manualmente y con ayuda de detectores de metales localizados en las dos esteras, por donde los residuos son conducidos. Después la segunda estera, el RSU es triturado y el material fino separado con la ayuda de una malla rotativa y encaminada para el secado, viendo la reducción del contenido de humedad. Luego, el RSU triturado pasa por un nuevo humedecimiento, en molino de cuchillas, y es depositado en un silo Combustible Derivado de Residuo (CDR). Estos residuos (materia orgánica y residuos combustibles no reciclables) son encaminados para el horno de incineración, que opera a una temperatura de 950°C. Durante el proceso de combustión, son producidos dos cenizas: ceniza de fondo y ceniza volante. La ceniza de fondo (*bottom-ash*) es depositada en el fondo de la cámara de pos-combustión, encaminada al tanque de decantación y dispuesta en pozos. Los gases calientes y la ceniza volante (*fly-ash*) son expulsados de la cámara de pos-combustión y aspirados para la caldera de recuperación donde ocurre el aprovechamiento energético (cogeneración de energía). Hay una generación efectiva de 0.6 MW de energía eléctrica por tonelada de basura tratada. Lo que es suficiente para abastecer cerca de 2300 residencias con consumo medio de 200 KW/mes. Posteriormente, los gases son neutralizados en un conjunto de lavadores y en seguida, los gases limpios son aspirados y descargados en la atmosfera. La solución del lavado es recogido en los tanques de decantación donde ocurre la neutralización con las cenizas del propio proceso e hidróxido de calcio, lo que ocasiona la mineralización (decantación de las sales), siendo esta solución posteriormente reaprovechada en el proceso de lavado (recirculación). En seguida, la ceniza volante es encaminada para los tanques de decantación donde periódicamente es retirada y almacenada en pozos. Al final del proceso de

incineración para cada tonelada de RSU que entra en el horno, se obtiene 120 kg de las dos cenizas, que representa cerca del 80% de ceniza de fondo y 20% de ceniza volante (datos enviados por la Usina Verde S/A). La ceniza de fondo está siendo ensayada, en sustitución de la arena, en la fabricación de ladrillos y pisos. Las cenizas no utilizadas son encaminadas al Relleno Metropolitano Jardin Gramacho, localizado en Duque de Caxias/RJ”.

Las Figuras 3.4 hasta 3.6 presentan las etapas del proceso de incineración a las cuales son sometidos los residuos para la generación de energía eléctrica en la Usina Verde.

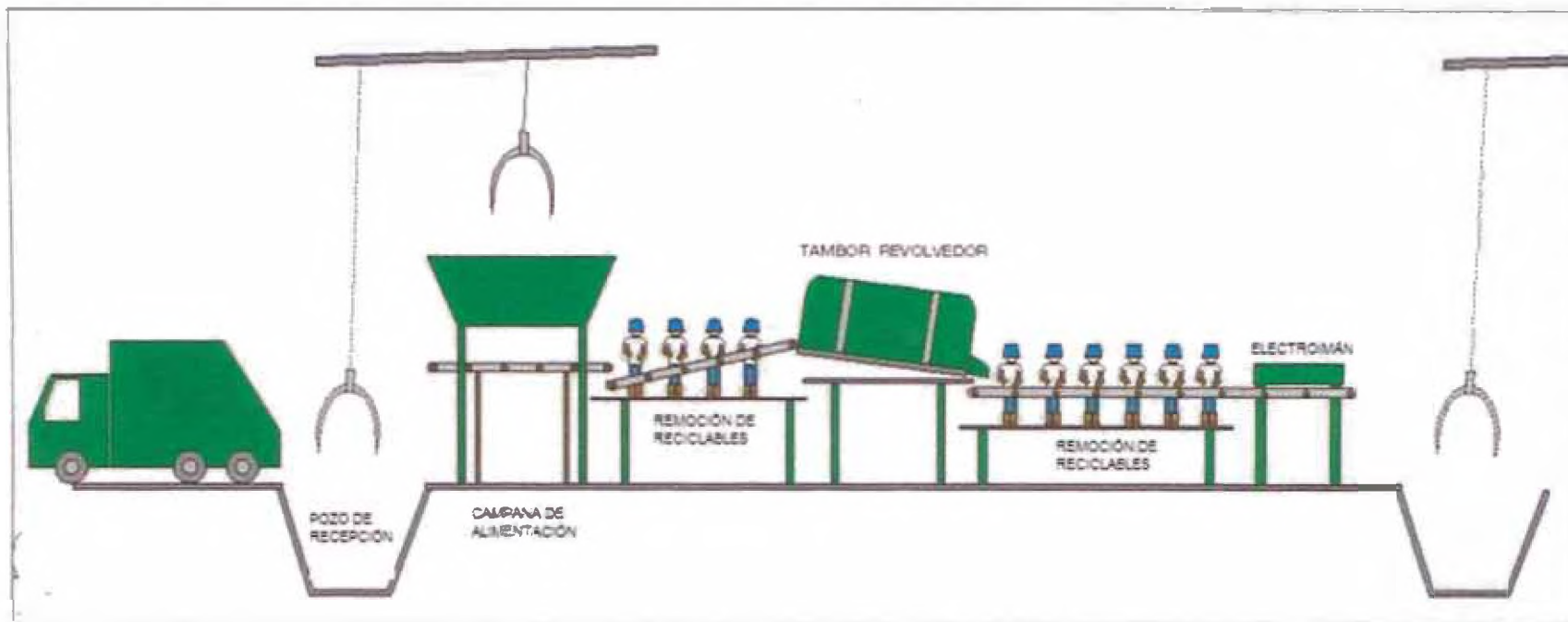


Figura.3.4 – Segregación de materiales para reciclado en la Usina Verde.

Fuente: USINA VERDE, 2009.

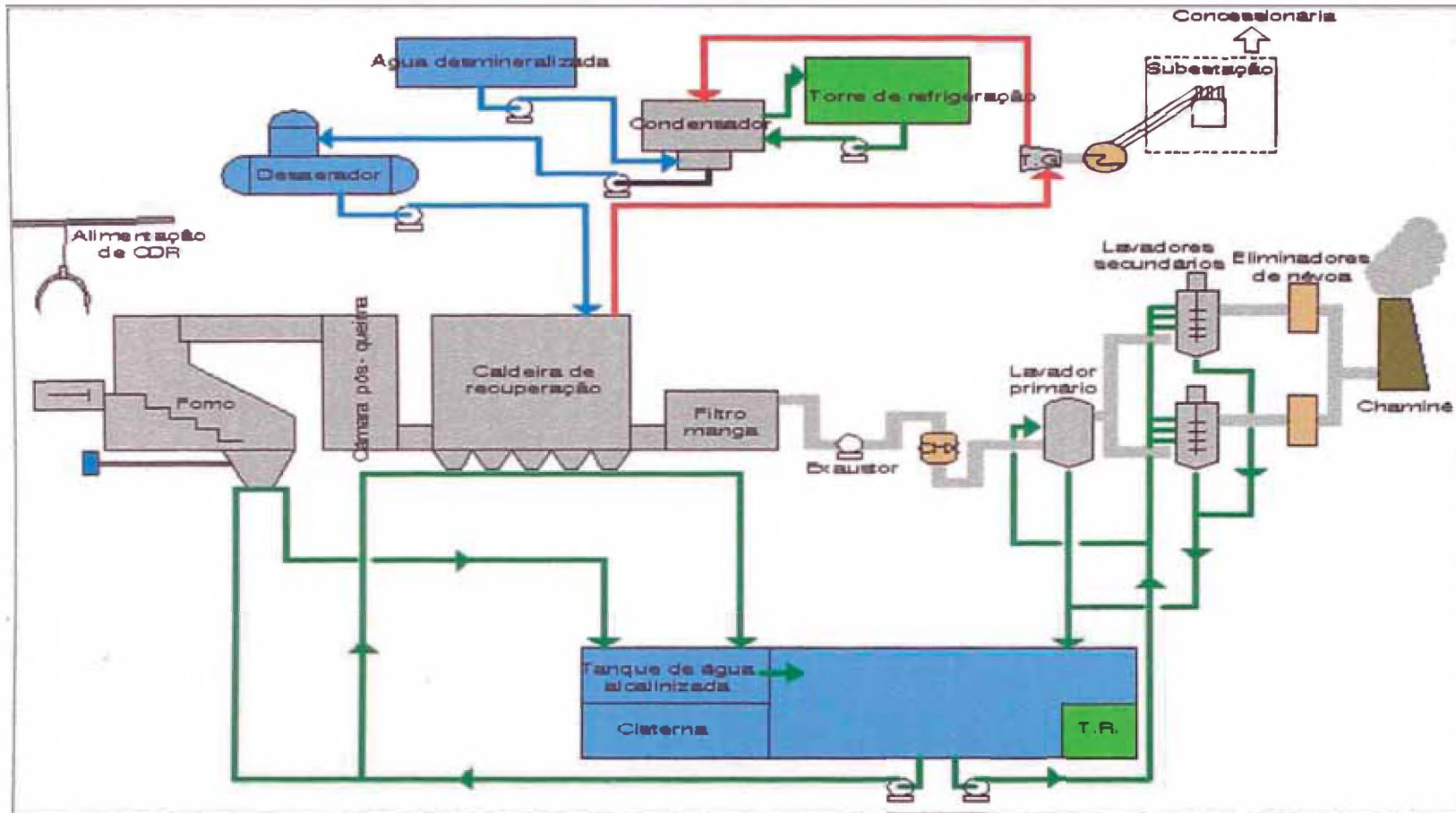


Figura 3.5 – Proceso de generación de energía eléctrica en la Usina Verde.

Fuente: USINA VERDE, 2009.



(a) Pesado del RSU



(b) Proceso de Triaje



(c) Cámara de pos combustión



(d) Sistema de lavado de los gases



(e) Ceniza de fondo



(f) Ceniza volante

Figura 3.6 – Etapas del proceso de incineración de RSU en la Usina Verde S/A.

Fuente: Fontes, 2008.

3.3 ENSAYOS TRIAXIALES

Las obras geotécnicas como diques y estructuras de cimentación han sido comprobadas por ensayos triaxiales para evaluar el desempeño de estos materiales debido a que son obras que son solicitadas en la mayor parte de su vida útil por cargamentos estáticos. Se destaca que el ensayo triaxial estático permite la simulación de condiciones variadas de campo y determinación del comportamiento mecánico de los suelos según diferentes niveles de tensiones.

Los ensayos de laboratorio son para reproducir en los cuerpos de prueba las sollicitaciones al que el suelo será sometido en campo. El objetivo de esto es la obtención de parámetros mecánicos de resistencia y deformación que puedan representar el comportamiento del material en métodos de análisis.

Según Spannenberg (2003) los ensayos triaxiales permiten el control efectivo de las tensiones confinante y axial, sub condiciones axisimétricas aplicadas en el cuerpo de prueba. El ensayo triaxial dicho convencionalmente sigue una trayectoria de cargamento axial. En este tipo de trayectoria, la tensión axial (σ_a) es aumentada, en cuanto la tensión confinante (σ_c) es mantenida constante. La ejecución del ensayo puede ser dividida en dos fases: consolidación y corte.

Los ensayos triaxiales son clasificados de acuerdo con las condiciones de drenado en las fases de consolidación y corte. Son tres tipos de ensayos descritos por Lambe (1951): **no consolidado no drenado (UU)** con drenajes cerrados durante todo el ensayo, también conocido como un ensayo rápido; el contenido de humedad del cuerpo de prueba permanece constante y las tensiones medidas son tensiones totales; **consolidado no drenado (CU)** con drenado permitido durante el proceso de consolidación e impedido durante la fase de corte, también conocido como ensayo consolidado rápido; no se altera la humedad del cuerpo de prueba y las tensiones medidas en ese ensayo son totales y se puede tener las tensiones efectivas si fuese realizado medidas de presión neutra después de la consolidación inicial; y el **consolidado drenado (CD)** donde las fases de consolidación y corte son realizados en condición drenada, conocido como ensayo lento; se aplica la tensión confinante y se espera que el cuerpo de prueba consolide, luego la tensión axial es aumentada lentamente para que el agua sub presión pueda filtrar para afuera del cuerpo de prueba, hasta la ruptura, de esta forma la presión neutra durante el cargamento permanece prácticamente nula y

las tensiones totales medidas son las tensiones efectivas. El procedimiento de este último tipo de ensayo es descrito en el Capítulo V de este trabajo.

Según Bishop y Henkel (1962), los cuerpos de prueba deben tener una relación altura/diámetro igual a 2.0, pudiendo variar entre 1.5 y 2.5. Estos límites planteados son para minimizar los efectos de fricción en las extremidades del cuerpo de prueba, manteniendo una condición adecuada de esbeltez.

Los cálculos de tensión de desvío ($\sigma_a - \sigma_c$), deben ser efectuados suponiendo que el cuerpo de prueba, al deformarse, mantiene el formato de un cilindro recto.

La resistencia al corte de los suelos es afectada por diversos fenómenos entre los cuales podemos destacar la tensión confinante, la fricción y la cohesión.

La resistencia por fricción está en función de la tensión normal al plano de deslizamiento relativo de cada partícula. Según Terzagui en su "Teoría Adhesiva de la fricción" la superficie de contacto real entre dos cuerpos constituye apenas una parte de la superficie aparente de contacto, dado que en un nivel microscópico las superficies de los materiales son efectivamente rugosas. Considerando que el coeficiente de fricción debe ser gobernado por lo que ocurre en los puntos reales de contacto, las características de rugosidad y de adsorción de la superficie de la partícula serán relevantes para controlar la resistencia que se desenvuelve. La rugosidad gobierna el tamaño de las protuberancias, que en general son diferentes las cuales se consideran partículas gruesas o partículas finas. Por otro lado, la adsorción del agua y otras sustancias tiende a afectar la naturaleza y tamaño del área de contacto entre partículas (Dias, 2007).

Según Dias (2007), la cohesión consiste en la parte de resistencia de un suelo que existe independientemente de cualquier tensión aplicada, además de eso, existe varios orígenes de la cohesión en los suelos, por ejemplo la cementación entre partículas proporcionada por carbonatos, silicio, óxidos de fierro y responde muchas veces por altos valores de cohesión; otros son las fuerzas de atracción y repulsión causadas por los fenómenos electrostáticos y electromagnéticos.

Existe una correspondencia entre la plasticidad de un suelo y su cohesión. La plasticidad es una propiedad exclusiva de los suelos finos (arcillas y limos), siendo producto de las relaciones electroquímicas que se establecen entre las superficies de los elementos que forman el agregado que compone el suelo (partículas

elementales de limo o arcilla). Los suelos granulares, formados exclusivamente por elementos de granulometría gruesa (arena, grava o cantos rodados) no presentan plasticidad.

De acuerdo con Dias (2007) existe un tipo de cohesión que no está ligado con la cementación o con las atracciones químicas, esa cohesión, llamada "aparente", ocurre en suelos no saturados a través de la absorción provocada por la presión neutra.

4.0 CAPÍTULO IV: PROGRAMA EXPERIMENTAL Y ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN PARA LOS MATERIALES Y LAS MIXTURAS

El programa de ensayos establecido tiene como objetivo principal evaluar el efecto de la adición de las cenizas de Residuo Sólido Urbano (RSU) en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso.

Las etapas del programa experimental propuesto son detalladamente descritos en este capítulo, así como la descripción de los materiales utilizados en esta investigación, los métodos utilizados en la preparación de las muestras, detalles de ejecución de ensayos y equipos utilizados en los ensayos de laboratorio.

Los ensayos del programa experimental de esta investigación fueron realizados en el Laboratorio de Geotecnia y Medio Ambiente y en el Laboratorio de Química de la Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro (PUC-Rio).

4.1 MATERIALES

4.1.1 Suelo

La arcilla, utilizada en este trabajo, es un suelo coluvial, arcillo – arenoso, no saturado (Soares, 2005 apud Ramirez, 2012). Este suelo fue extraído del Campo Experimental II, localizado al interior del campus de la PUC-Rio, conforme al esquema mostrado en la Figura 4.1. El material fue retirado hasta 2.0 m de profundidad desde la superficie.



Figura 4.1 - Localización del Campo Experimental II PUC-Rio.

Fuente: Soares 2005.

Este suelo posee características de tonalidad roja amarillenta, textura microgranular y con aspecto homogéneo, siendo constituido básicamente por cuarzo, minerales de arcilla (esencialmente caulinita) y óxidos de fierro y aluminio, como producto del intemperismo de los minerales primarios de los gneis de biotita (Soares, 2005 apud Ramirez, 2012). La Figura 4.2 presenta una foto del suelo coluvial utilizado.

Las características físicas geotécnicas de este material son presentadas y analizadas en el ítem 6.1.

El material fue retirado manualmente y depositado en baldes cilíndricos de plástico, en un día soleado. Aproximadamente 100 kg. de este suelo fue llevado para el laboratorio y colocados en una estufa a 60°C. Después de llegar a una humedad constante, fue colocado en sacos de plástico cerrados y guardados en la cámara húmeda.



Figura 4.2 - Arcilla utilizada - suelo coluvial.

4.1.2 Ceniza Volante

La ceniza volante es proveniente de la incineración del RSU en la Usina Verde, que está localizada en la Isla del Fundao – Rio de Janeiro.

La incineración y recolección fueron realizadas en el mes de enero del 2012 para la ceniza volante, donde la cantidad total de ceniza usada para los ensayos de caracterización física, química y mecánica fue de 15 kg. La Figura 4.3 ilustra la ceniza volante, donde es posible notar que presenta una uniformidad de granos siendo casi un material homogéneo.



Figura 4.3 - Ceniza Volante de RSU

4.1.3 Mezclas Suelo - Ceniza

El suelo fue preparado como esta descrito en el ítem 4.1.1 y la ceniza fue secada en la estufa a 60°C hasta llegar a una humedad constante. Después fueron preparadas las mezclas calculadas en relación al peso total del suelo seco. Luego de la mezcla fue adicionada agua en función de la humedad óptima resultante de los ensayos de Compactación Proctor Normal. Las mezclas utilizadas fueron de 30% y 40% de ceniza volante calculada en relación al peso seco del suelo seco. Al inicio de la investigación solo fue analizada la mezcla con 40% de ceniza volante considerando como referencia los ensayos realizados por Vizcarra (2010), que evaluó la influencia de las cenizas de RSU sub cargamento dinámico; pero después de los análisis fue necesario realizar ensayos con 30% de ceniza volante para tener un valor comparativo al inicial y saber cómo reacciona el suelo con menor cantidad de ceniza adicionado.

La tabla 4.1 presenta los símbolos utilizados para describir cada tipo de material y mezclas.

Tabla 4.1 - Símbolos utilizados para los materiales y las mezclas.

Material / Mistura	Suelo (%)	Ceniza Volante (%)	Símbolos
Suelo	100	0	S100
Ceniza Volante	0	100	CV
Mezcla 1	70	30	S70CV30
Mezcla 2	60	40	S60CV40

Fuente: Elaboración propia.

Para las mezclas con tiempo de cura de 30 días fue adicionada la sigla T30d.

4.2 CANTIDAD Y CRONOGRAMA DE ENSAYOS

En este ítem se presenta la cantidad de ensayos de caracterización física, química y mecánicas realizadas y el cronograma de los ensayos de Compactación Proctor Normal y los ensayos Triaxiales Consolidado Drenado (CD) sin tiempo de cura y con tiempo de cura de 30 días.

4.2.1 Cantidad de Ensayos

Los ensayos fueron divididos en 3 etapas, que son: caracterización física, caracterización química y ambiental y resistencia mecánica, los cuales son presentados en la Tabla 4.2.

Uno de los objetivos de esta tesis fue la influencia del tiempo de cura en el parámetro de resistencia mecánica. Cada mezcla de suelo-ceniza fue sometido a ensayos sin tiempo de cura y con tiempo de cura de 30 días.

En la Tabla 4.2 se presenta la cantidad de ensayos que no presentaron problemas, pero la cantidad total de ensayos realizados fueron superiores debido a que en todo estudio experimental ocurre diferentes tipos de problemas. La mayor parte de los problemas presentados fueron en los ensayos de caracterización mecánica (Proctor Normal y Triaxiales CD).

Los ensayos Proctor Normal eran repetidos cada vez que los resultados de las mezclas suelo-ceniza presentaba un comportamiento diferente al presentado en otras investigaciones, donde fue usado el mismo tipo de ceniza, como el de Vizcarra (2010). Este tipo de comportamiento era debido a que el material presentaba una pequeña humedad inicial o porque el ensayo no fue realizado correctamente.

En los ensayos triaxiales CD los tipos de problemas presentado fueron variables, al comienzo en el moldeado del cuerpo de prueba, donde muchas veces estos se fisuraban (por mal moldeamiento) y se tenía que repetir el ensayo Proctor Normal para rehacer un nuevo cuerpo de prueba. Otro tipo de problema presentado fue cuando la membrana que recubre al cuerpo de prueba presentaba un pequeño orificio al momento del ensayo triaxial y los resultados finales eran incorrectos. Tómese en cuenta que estas membranas eran verificadas que no cuenten con ningún orificio antes y después del ensayo triaxial. También algunas veces el equipo triaxial presentaba filtración en los conductos de agua, las lecturas eran

erradas o los datos resultantes no fueron guardados correctamente en el computador y se perdía todo el ensayo. Todo este tipo de problemas ocasionó que la cuantificación final de los ensayos sea mayor al que se presenta como resultados finales en esta investigación.

Tabla 4.2 - Cantidad de ensayos

Ensayos Símbolos	Etapas									
	Caracterización Física				Caracterización Química y Ambiental				Resistencia Mecánica	
	Gs	LL	LP	Granulometría	Composición Química	Cantidad de Materia Orgánica	Lixiviación	Solubilización	Proctor Normal	Ensayo Triaxial CD
SP	Oau	Oau	Oau	Oau	Oau	1			1	3
CV	Oau			Oau	Oau	Oau	Oau	Oau		
SP70CV30	1	1	1	1	1	1			1	3
SP70CV30 T30d										3
SP60CV40	1	1	1	1	1	1			1	3
SP60CV40 T30d										3
Total	2	2	2	2	2	3	0	0	3	15

Fuente: Elaboración Propia.

*Oau=Ensayos realizados por otros autores y resultados tomados en este trabajo.

** Los espacios en blanco son ensayos que no fueron realizados por la condición del material o no eran necesarios.

Los ensayos de compactación Proctor Normal fueron realizados un día antes de los ensayos triaxial CD para los cuerpos de prueba sin tiempo de cura y al mismo tiempo fueron realizados los ensayos de compactación para los ensayos triaxial con tiempo de cura de 30 días.

Los moldes compactados para los ensayos con 30 días de tiempo de cura fueron finamente envueltos con plástico y guardados en la cámara húmeda para que no pierdan humedad.

4.3 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS

En este ítem son presentados las metodologías y procedimientos utilizados para los análisis físicos y químicos del suelo, la ceniza y las mezclas suelo-ceniza.

El objetivo de la realización de este programa experimental fue la caracterización del suelo y de la mezcla suelo-ceniza para conocer su comportamiento después de los ensayos mecánicos (compactación Proctor Normal y Triaxial CD), además de conocer sus parámetros de resistencia y tener una idea de como la ceniza volante puede actuar como estabilizante en el suelo.

4.3.1 Ensayos de Caracterización Física

Para determinar las propiedades índices de las muestras de suelo y de las mezclas suelo-ceniza, fueron realizados ensayos de caracterización física en el Laboratorio de Geotecnia y Medio Ambiente de la PUC-Rio. El suelo fue preparado según lo recomendado en las normas técnicas brasileras (Asociación Brasileira de Normas Técnicas – ABNT) los cuales están basados en las normas americanas ASTM. Los ensayos realizados fueron realizados según las normas:

- NBR 6457/1986 (ASTM - D1557);
- NBR 7181/1984 (ASTM – D2487 / D282);
- NBR 6508/1984 (ASTM – D854);
- NBR 6459/1984 (ASTM – D4318);
- NBR 7180/1984 (ASTM – D4318).

4.3.1.1 Gravedad Específica de los granos

La densidad de los granos de las mezclas suelo-ceniza fue determinada utilizando el material que pasó la malla #4 (4.8 mm), según la norma NBR 6508/1984 de la ABNT.

4.3.1.2 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg, limite líquido y limite plástico, fueron determinados utilizando el material que pasa la malla #40 (0.425 mm). El material usado fue ensayado a temperatura ambiente según las normas NBR 6459/1984 y NBR 7180/1984 de la ABNT.

4.3.1.3 Análisis Granulométrico

Para la determinación de la curva granulométrica del suelo, se pasó 1.0 kg del material por todas las mallas que determina las normas NBR 7181/1984 e NBR 5735 da ABNT.

4.3.2 Ensayos de Caracterización Química

Estos ensayos fueron realizados para conocer las características químicas de la ceniza y de las mezclas suelo-ceniza, porque es la mayor preocupación con relación a su clasificación como residuo peligroso o no peligroso y escoger el tipo de disposición final que debería tener.

4.3.2.1 Composición Química

La composición química del suelo fue obtenida de los estudios anteriores realizados por Duarte (2004) y por Sertã (1986), que también resaltaron un análisis mineralógico del material.

La composición química total de la muestra de ceniza volante fue obtenida mediante la técnica de “*Espectrometría de fluorescencia de Rayos X por Energía Dispersa (EDX)*”. Las muestras de ceniza volante pura fue sometida al análisis por EDX en un Espectrómetro de fluorescencia de Rayos X por Energía Dispersa, modelo EDX-720, marca Shimadzu en el Laboratorio de Estructuras (LABEST) de la COPPE/UFRJ. El ensayo fue desarrollado por Vizcarra (2010).

La composición química de las mezclas suelo-ceniza fueron realizadas en esta investigación mediante la técnica EDX en un modelo EDX-700 en el laboratorio de Química de la PUC-Rio.

El Espectrómetro de fluorescencia de Rayos X es un instrumento que determina cualitativamente y semi cuantitativamente los elementos presentes en una determinada muestra. Esto es posible a través de la aplicación de Rayos X en la superficie de la muestra y el posterior análisis de los fluorescentes rayos X emitidos. Es una técnica no destructiva para todos los tipos de muestras, incluyendo sólidos, líquidos, siendo por esta razón interesante para la caracterización de los materiales. El equipo es ilustrado en la Figura 4.4.



Figura 4.4 - Equipo de EDX del LABEST de la COPPE/UFRJ.

Fuente: Vizcarra, 2010.

4.3.2.2 Cantidad de Materia Orgánica

Para el suelo y la ceniza volante, la cantidad de carbono orgánico es determinado por oxidación con dicromato de potasio en medio sulfúrico, usando el sulfato de plata como catalizador, siendo el exceso de dicromato después de la oxidación, dosificado por titulación como solución patrón de sulfato de amonio de fierro, utilizando difenilamina como indicador (Dias y Lima, 2004). Los ensayos para la ceniza volante de RSU fue realizado por Vizcarra (2010) y del suelo fue desarrollado en esta investigación; todos en el Laboratorio de Geotecnia/Química de suelos de la COPPE/UFRJ.

La cantidad de carbono obtenido es multiplicado por 1.724 obteniéndose la cantidad de materia orgánica. Este factor es utilizado en virtud de admitir que en la composición media de humus, el carbono participa con 58% (EMBRAPA, 1997).

Para las mezclas suelo-ceniza, los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Geotecnia y Medio Ambiente de la PUC-Rio, de acuerdo con la Norma ABNT NBR 13600/1996. Se utilizó un horno de 440°C presentada en la Figura 4.5



Figura 4.5 - Horno de 440 °C usada para las mezclas suelo-ceniza del Laboratorio de Geotecnia y Medio Ambiente de la PUC-Rio.

4.3.2.3 Solubilización y Lixiviación

El ensayo de solubilización fue realizado por el laboratorio TASQA Servicios Analíticos Ltda., según la Norma ABNT NBR 10006/2004 con la finalidad de clasificar el residuo. Para esta clasificación fue utilizado la lista de la Norma ABNT NBR 10004/2004 – Anexo G. Esta lista presenta los valores máximos permitidos para extractos solubilizados. Por lo tanto, cuando el análisis de los elementos químicos del extracto solubilizado presenta algún valor superior al de la referida lista, el residuo es clasificado como no inerte, caso contrario, este es clasificado como residuo inerte de acuerdo con las definiciones presentadas en la norma NBR 10004/2004 para residuos sólidos. El ensayo de solubilización es realizado dos veces y fue realizado por Vizcarra (2010).

El ensayo de lixiviación también fue realizado por el laboratorio TASQA Servicios Analíticos Ltda., según la norma ABNT NBR 10005/2004, realizado por Vizcarra (2010).

Los resultados de estos ensayos de solubilización y lixiviación son comparados para normas brasileñas que supervisan la calidad del agua y teniendo en cuenta para normas peruanas existe el D.S. N° 031-2010-SA que es el “Reglamento de la Calidad del Agua” en el cual podremos encontrar los valores permisibles de compuestos inorgánicos para su comparación.

5.0 CAPÍTULO V: ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA PARA LOS MATERIALES Y LAS MIXTURAS

Los ensayos fueron realizados para conocer el comportamiento del suelo y las mezclas suelo-ceniza cuando son sometidos a los ensayos de compactación Proctor Normal y ensayos Triaxiales Consolidados Drenados (CD).

5.1 ENSAYOS DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL

Los ensayos de compactación fueron realizados para el suelo y las mezclas suelo-ceniza, para determinar la óptima humedad de compactación ($w_{ótm}$) y el máximo peso específico seco ($\gamma_{dmáx}$). Estos ensayos fueron realizados según la norma NBR 7182 de la ABNT (ASTM-D698), utilizándose la energía de compactación Proctor Normal y reutilizando el material, debido a que esta tesis de investigación visa inicialmente la utilización de materiales para cimentaciones de menor porte con maquinarias no tan pesadas para la compactación.

Después de secar el suelo en la estufa de 60°C, se inicia el proceso de minimización del volumen del suelo por medio del chancado con un martillo de goma dentro de una vasija de cerámica, para luego ser pasado por la malla #4, después se dejó en la estufa de 60°C de un día para otro. Al día siguiente se retiró el material de la estufa y se dejó enfriar hasta llegar a la temperatura ambiente. En seguida, se adicionó una determinada cantidad de agua al material, a fin de que este quede con cerca de 5% de humedad por debajo del óptimo contenido de humedad, esto fue realizado tanto para el suelo como para las mezclas suelo-ceniza. Después de la mezcla del material (suelo y mezcla suelo-ceniza) con el volumen de agua calculado, se procede a homogenizarlo.

Los valores de $\gamma_{dmáx}$ y $w_{ótm}$ obtenidos de la curva de compactación fueron utilizados para los moldes que luego van a ser utilizados en los ensayos triaxiales CD. Todo el proceso fue repetido cinco veces como mínimo para cada mezcla suelo-ceniza, siendo por lo menos dos al lado seco y dos al lado húmedo de la curva de compactación.

5.2 ENSAYOS TRIAXIALES CONSOLIDADO DRENADO

Los tipos de ensayos triaxiales y su utilización son descritos en el ítem 3.3 de este trabajo. En este ítem se describe el ensayo Triaxial tipo Consolidado Drenado (CD). Resaltando que fueron realizados ensayos triaxiales CD con la visión de

obtener parámetros totales por ser esta una tesis de investigación. Todos los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Geotecnia y Medio Ambiente de la Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro (PUC-Rio). Seguidamente, se describen los equipos utilizados para estos ensayos, así como las metodologías empleadas, en la preparación de los cuerpos de prueba, proceso de saturación, consolidación y corte.

5.2.1 Equipo utilizado

La prensa utilizada es de la marca Wykeham - Ferrance de velocidad de desplazamiento controlada, con capacidad de 10 toneladas. El ajuste de las velocidades de desplazamiento del pistón es determinado mediante la selección adecuada de los pares de engranajes y la respectiva marcha (Ramirez, 2012).

La cámara triaxial empleada es propia para cuerpos de prueba con diámetro de 1.5". la cámara posee un cuerpo de acrílico que soporta una presión confinante máxima de 1000 kPa.

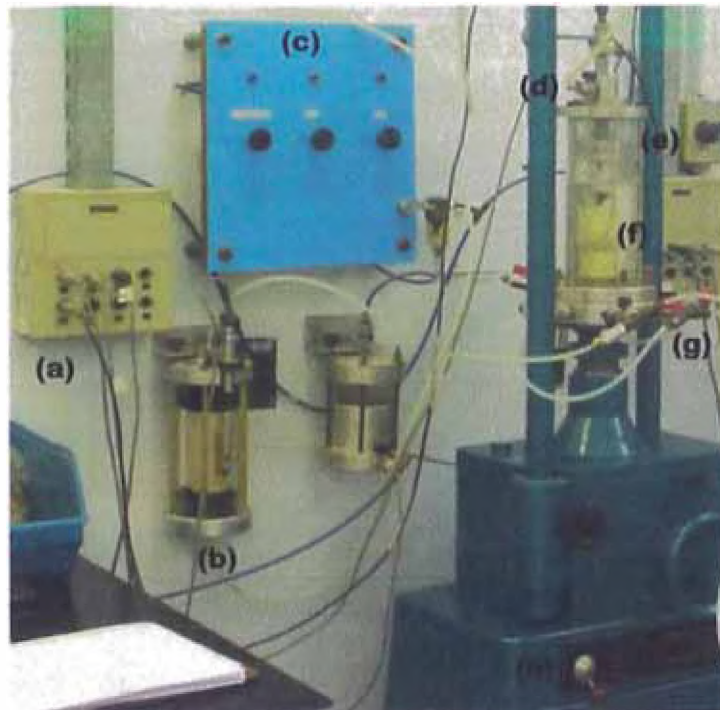


Figura 5.1 - Equipo triaxial. (a) Caja lectora de datos; (b) Medidor de Variación de Volumen tipo Imperial College; (c) Panel de control de las Presiones; (d) Aplicación de Presión de confinamiento; (e) Cilindro de Acrílico; (f) Cuerpo de prueba; (g) Válvulas de la prensa Triaxial; (h) Control de inicio de corte.

La célula de carga utilizada es del fabricante ELE International Ltd. con capacidad máxima de 5000 kN y prensas de 0.1 kN. Para la obtención de los desplazamientos fueron utilizados LVDT's de marca Wykwham – Ferrance, con cursos de 25 mm y resolución de precisión de 0.01 mm. Los transductores usados en la medida de las presiones en la cámara, en el medidor de variación de volumen y de las presiones de poro son de la marca Schaevitz, con variaciones de ± 2.0 kPa y capacidad máxima de 1700 kPa.

Las variaciones de volumen son obtenidas a través de medidores de variación volumétrica (MVV), fabricados en la PUC-Rio, según el modelo del Imperial College. Todas las partes del equipo son presentadas en la Figura 5.1.

Para la grabación de los datos, obtenidos por medio del transductor, fue utilizado el sistema de adquisición de datos compuesto por el hardware QuantumX de ocho canales de la empresa alemana HBM y por el software CatmanEasy (Ramirez, 2012). Ver Figura 5.2.



Figura 5.2 - Hardware y software utilizados para el ensayo triaxial. (a) Software CatmanEasy en la etapa de corte, (b) Sistema de adquisición de datos.

Fuente: Ramirez, 2012.

Con todo este equipo, el hardware y software utilizado se consigue realizar y monitorear en tiempo real todas las etapas del ensayo.

5.2.2 Preparación de los cuerpos de prueba antes del ensayo triaxial

Para la preparación de los cuerpos de prueba del suelo y las mezclas con suelo-ceniza, inicialmente se compactó un cuerpo cilíndrico, con la energía Proctor Normal, utilizando el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca obtenida para el suelo y cada mezcla (descripción presentada en el ítem 5.1). Ver Figura 5.3.

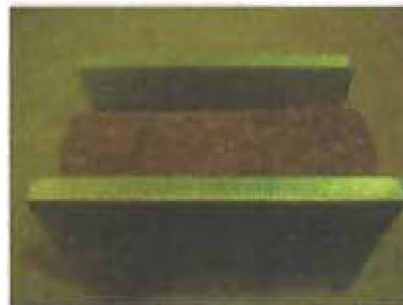


Figura 5.3 - Cuerpo cilíndrico compactado

Obtenido el material compactado (Figura 5.3), se procede a moldear el cuerpo de prueba utilizando un aparato de fabricación propia del laboratorio de la PUC-Río, las dimensiones de estos cuerpos de prueba son de 78.2 mm de altura por 38.0 mm de diámetro (ver Figura 5.4). Se retira 3 pequeños cuerpos de prueba, de cada cuerpo compactado, para así tener las mismas condiciones para cada ensayo.



(a)



(b)

Figura 5.4 – Etapas de moldeado de cuerpos de prueba. (a) Cuerpo de prueba después del moldeado; (b) Cuerpo de prueba después de perfilado las caras superior e inferior.

Al momento de moldear el cuerpo de prueba se retiran 3 cápsulas con el suelo o la mezcla suelo-ceniza (según sea el ensayo), para después pesar y dejar en la estufa de 105°C por 24 horas para conocer su humedad inicial. Ver Figura 5.5.



Figura 5.5 - Cápsulas con mezclas suelo-ceniza retirados del moldeado.

Antes de montar el cuerpo de prueba en la prensa se prueba la membrana (con ayuda de un molde de acero) para tener la seguridad que no tenga algún orificio y pueda pasar el agua hacia el cuerpo de prueba (es recomendable no reutilizar las membranas después de cada ensayo). Luego pesar el cuerpo de prueba perfilado para tener su peso inicial y verificar el correcto funcionamiento de cada válvula de la prensa triaxial. Ver Figuras 5.6 y 5.7.



Figura 5.6 - Prueba de la membrana



(a)



(b)

Figura 5.7 – Etapas previas al ensayo triaxial. (a) Pesado del cuerpo de prueba para montar en la prensa triaxial; (b) Verificación de la prensa antes del ensayo

Al momento de montar el cuerpo de prueba se debe colocar un papel filtro en la base (ver si la prensa presenta o no una piedra porosa en la base, si no, colocar una antes del papel filtro) para evitar el lavado de los finos al momento del paso del agua por el cuerpo de prueba. En seguida, colocar el cuerpo de prueba cuidadosamente, colocar la membrana con ayuda de un molde de acero. Ver Figuras 5.8 y 5.9.



Figura 5.8 - Colocación del papel filtro.



(a) (b)
Figura 5.9 – Colocación de cuerpo de prueba. (a) Colocación del cuerpo de prueba en la prensa triaxial; (b) Colocación de la membrana con ayuda de un molde de acero.

Una vez que el cuerpo de prueba se encuentre fijo junto con la membrana, se coloca un papel filtro más en la parte superior, seguido de la piedra porosa. Ver Figura 5.10.



Figura 5.10 - Colocación del papel filtro e la piedra porosa en la parte superior del cuerpo de prueba.

Para finalizar se coloca el cap en la parte superior del cuerpo de prueba, seguida de la membrana, se fija con 2 anillos de jebe en la base y en la parte superior y se retira el molde de acero. Después se coloca la cámara de acrílico, se cierra las llaves, rellenar con agua hasta la mitad del cap superior y se coloca el tubo de presión confinante en la parte superior de la cámara para iniciar la etapa de saturación el cual esta detallado en el siguiente ítem. Ver Figura 5.11.



(a) (b) (c)
Figura 5.11 – Cuerpo de prueba antes del inicio del ensayo triaxial. (a) Fijado de la membrana con los anillos de jebe; (b) Llenado de la cámara triaxial con agua (c) Colocación de la conexión de presión confinante.

5.2.3 Procedimiento de saturación de los cuerpos de prueba

Las técnicas de saturación utilizadas para los cuerpos de prueba de suelo y mezclas suelo-ceniza, fueron de saturación por percolación de agua a través de la muestra y de saturación por contrapresión. En el caso de la percolación la diferencia de presión entre la base y la parte superior del cuerpo de prueba fue de 7 kPa, siendo que el agua fluye de la base para la parte superior. En la saturación por contrapresión, la presión confinante aplicada al cuerpo de prueba excedía la contrapresión en 10 kPa, donde el flujo de agua era permitido por la parte superior y la base.

Para verificar si el grado de saturación presentaba un nivel satisfactorio, se calculaba el parámetro B de Skempton por medio de la siguiente ecuación:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_c}$$

Dónde:

Δu : Exceso de presión de poros generado,

$\Delta \sigma_c$: Aumento de la tensión confinante aplicada

Para las muestras de suelo y mezcla suelo-ceniza fueron considerados valores de B aceptables mayores o igual a 0.95.

Para los cuerpos de prueba de las mezclas suelo-ceniza el tiempo de saturación fue variable, pero la mayoría de ellos saturaba después de las 24 horas, solo los cuerpos de prueba con tiempo de cura de 30 días, necesitaron un poco más de 24 horas para completar la saturación.

5.2.4 Consolidación y cálculo del t_{100}

Después de la saturación del cuerpo de prueba, inicia la etapa de consolidación. Durante 24 horas fueron recolectados los datos de variación de volumen.

Con estos datos se dibujaba el gráfico de variación de volumen (ml) vs raíz del tiempo ($\text{min}^{0.5}$). Según la recomendación de Head (1986), se prolonga la línea recta inicial hasta encontrar la prolongación horizontal de la línea final. Esta última línea corresponde a la estabilización de la variación de volumen. El punto de intersección de estas dos líneas prolongadas corresponde a la raíz de t_{100} ($\text{min}^{0.5}$)

en el eje de las abscisas. Luego con el valor de t_{100} (min) se calcula la velocidad de corte.

5.2.5 Cálculo de la velocidad de corte y etapa de corte.

Como los ensayos triaxiales son drenados, la expresión utilizada es la siguiente (Head, 1986):

$$v = \frac{\epsilon_f \cdot L}{100 \cdot t_f}$$

Dónde:

v: Velocidad máxima de corte en mm/min,

L: Altura del cuerpo de prueba en mm,

ϵ_f : Deformación axial estimada en la ruptura en %,

t_f : Tiempo mínimo de ruptura en min.

Donde el t_f para el ensayo triaxial (CD) es:

$$t_f = 8,5 \cdot t_{100}$$

Head (1986) apunta que: "si el valor calculado de t_f es menor que 120 minutos (2 horas) el actual tiempo de ruptura no debería ser menor que 2 horas", entonces se adopta $t_f=120$ min porque todos los ensayos (para el suelo y las mezclas suelo-ceniza) tuvieron un tiempo de ruptura menor que 120 min.

El objetivo de definir una velocidad suficientemente lenta para la aplicación de la compresión axial es permitir el total drenado del agua del cuerpo de prueba sin generar exceso de presión de poros.

Para los cuerpos de prueba realizados con el suelo y las mezclas suelo-ceniza se definió que la ruptura ocurriría para una deformación axial de 5%. Así, la velocidad máxima (v) calculada fue la misma para todos, siendo la velocidad adoptada igual a 0.030 mm/min.

Con la velocidad de corte definida, se procede a colocar un par de engranajes en la prensa, que define la velocidad deseada. Para los cálculos fue adoptado 15% de deformación axial como deformación máxima para todos los ensayos.

Para los ensayos triaxiales, las variables de tensión q (tensión desviadora) y p' (tensión efectiva media normal) fueron calculados con las formulaciones de Lambe (1951). Para los parámetros de resistencia del suelo y las mezclas suelo-ceniza se utilizó los valores de la envoltória de resistencia (α') y de la cohesión (a') obtenida en el espacio $p':q$, para calcular los parámetros de resistencia en el espacio de Mohr-Coulomb ($\varphi' - c'$). Las formulaciones de Lambe y los parámetros de resistencia se definen como:

$$q = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2}$$

$$p' = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2}$$

$$\tan(\alpha') = \text{sen}(\varphi')$$

$$a' = c' \cdot \cos(\varphi')$$

Dónde:

α' : Inclinación de la envoltória de resistencia en el plano $p':q$,

a' : Intercepción con el eje q de la envoltória de resistencia en el espacio $p':q$,

φ' : Inclinación de la envoltória de resistencia del plano $\sigma:\tau$ (Mohr Coulomb),

c' : Intercepción de la envoltória de resistencia del plano $\sigma:\tau$ (Mohr Coulomb).

5.2.6 Análisis de resistencia

Para obtener la tensión de ruptura se puede analizar el pico de las curvas de tensión versus deformación trazadas en función de la diferencia de las tensiones principales ($\sigma_1 - \sigma_3$) o de la relación σ_1/σ_3 dependiendo de la finalidad del ensayo. De acuerdo con Head (1986), la relación σ_1/σ_3 es preferencialmente utilizada en las arcillas, en ensayos no drenados, en que la tensión de desvío continua aumentando para grandes deformaciones. Head (1986) resalta que otras "opciones de ruptura" pueden ser escogidas, como la resistencia residual o la resistencia obtenida para el corte a volumen constante, quiere decir en la condición de estado crítico, o aun definir a partir de las deformaciones máximas permisibles en el proyecto en cuestión.

La Figura 5.12 presenta los criterios para la determinación de ruptura.

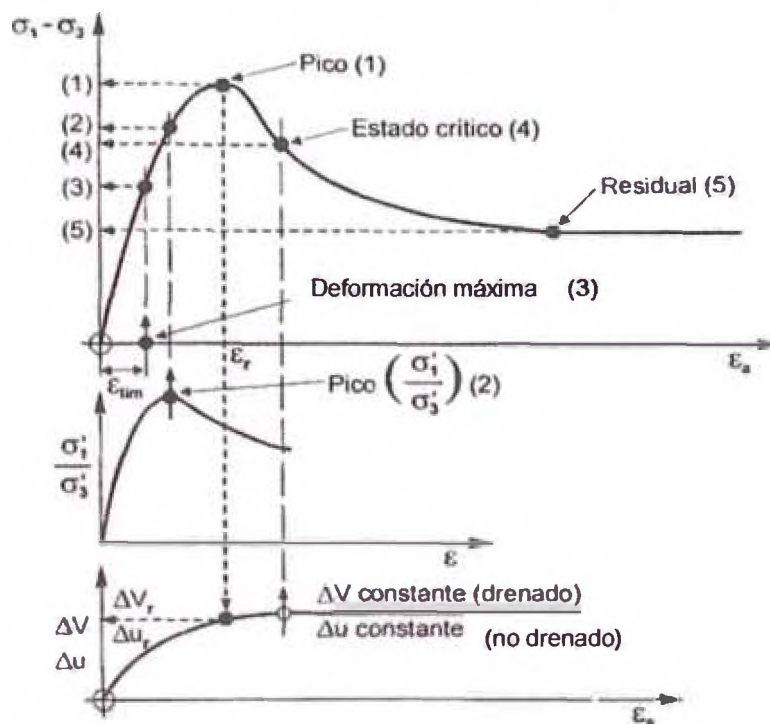


Figura 5.12 - Diferentes criterios para definición de ruptura.

Fuente: Head, 1986.

6.0 CAPÍTULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo son presentados los resultados y análisis de los ensayos descritos en los capítulos IV y V para las muestras de suelo, ceniza volante y las mezclas suelo-ceniza estudiadas. Como el objetivo de esta investigación es evaluar las cenizas de Residuo Sólido Urbano (RSU) cuanto al potencial de su uso como un material aditivo y estabilizante para obras geotécnicas con cargamento estático, la muestra de ceniza volante fue caracterizada a partir de ensayos geotécnicos, químicos y ambientales. Estos ensayos tienen el objetivo de mejorar la comprensión del comportamiento del material en estudio.

6.1 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA

6.1.1 Gravedad Específica de los granos (Gs)

Los valores obtenidos de Gs son presentados en la Tabla 6.1. El valor de Gs del suelo fue obtenido por Ramírez (2012), además de esto, este suelo ya fue objeto de varias investigaciones anteriores y los valores de Gs no varían. El valor de Gs de ceniza volante fue obtenido por Vizcarra (2010), quien utilizó el mismo tipo de ceniza para su investigación.

Tabla 6.1 - Resultados del ensayo de Gravedad Específica de los granos para el suelo y ceniza volante.

Material	Cantidad de Ceniza (%)	Gravedad Específica de los Granos (Gs)
S100	0	2,720
CV	100	2,412

Fuente: Elaboración propia

Los valores presentados indican que los granos del suelo tienen una mayor Gs que la de la ceniza volante, lo cual es coherente según el tipo de material.

6.1.2 Límites de Atterberg (LL y LP)

Los resultados del Límite Líquido (LL), Límite Plástico (LP) e Índice Plástico (IP) del suelo y las mezclas suelo-ceniza son presentados en la Tabla 6.2. Se resalta que no fue posible determinar los Límites de Atterberg para la ceniza volante pura, debido al comportamiento granular del material, que durante el ensayo no presentó características plásticas para su realización. Se nota que el aumento de

ceniza volante en la mezcla suelo-ceniza produce una disminución del límite líquido, plástico e índice plástico.

Tabla 6.2 - Resultados de los ensayos de Límites de Atterberg para el suelo y mezclas .

Material	Cantidad de Ceniza (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
S100	0	53	28	25
S70CV30	30	37	27	10
S60CV40	40	33	24	9

Fuente: Elaboración propia

6.1.3 Granulometría

En este ítem se presenta las curvas granulométricas para el suelo y la ceniza volante pura, además de la granulometría para las mezclas suelo-ceniza comparando con el suelo puro. Todos los ensayos fueron realizados con dispersante (hexametáfosfato de sodio) para la sedimentación. La Figura 6.1 presenta la comparación entre las curvas granulométricas del suelo y la ceniza volante. La Figura 6.2 presenta la comparación entre el suelo y las mezclas suelo-ceniza con 30% y 40% de ceniza volante. Al final se presenta la Tabla 6.3 con los resultados, en porcentajes, de los ensayos de granulometría para el suelo, ceniza volante y mezclas suelo-ceniza.

Se nota que para la mezcla con 40% de ceniza volante presenta un comportamiento no-uniforme, pero para 30% de ceniza volante mejora la granulometría presentando un comportamiento bien graduado.

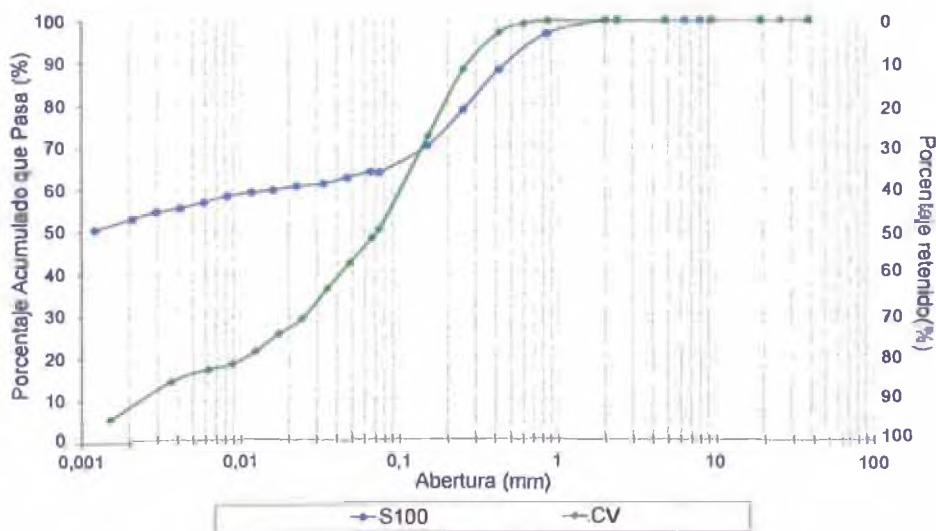


Figura 6.1 - Distribución granulométrica del suelo y ceniza volante.

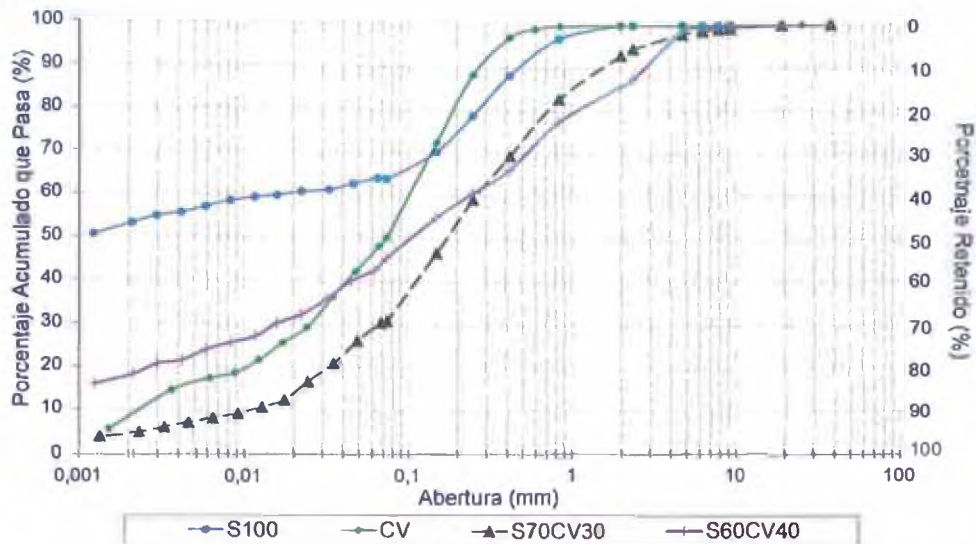


Figura 6.2 - Distribución granulométrica del suelo, ceniza volante y mezclas con 30% y 40% de cantidad de ceniza volante.

Tabla 6.3 - Resultados de las granulometrías.

Material	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena			Grava (%)
			Fina (%)	Media (%)	Gruesa (%)	
S100	53	10	12	19	6	0
S70CV30	4	25	25	24	15	7
S60CV40	18	24	16	14	13	15
CV	8	38	35	18	1	0

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6.3 se nota que con el aumento de la ceniza volante, aumenta la cantidad de grava, lo que es notable en la conformación de granos de ceniza volante pura. En todos los casos la adición de la ceniza volante mejora la granulometría inicial del suelo puro.

6.1.4 Clasificación SUCS

Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el suelo, la ceniza volante y las mezclas suelo-ceniza fueron clasificados y obtuvieron los índices presentados en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4 - Clasificación SUCS.

Material	Índice
S100	CH
S70CV30	SM
S60CV40	SM
CV	SM

Fuente: Elaboración propia

El suelo es clasificado como CH, correspondiendo a una arcilla inorgánica de plasticidad media y la ceniza volante es clasificada como SM, que son arenas limosas que tienen un mejor comportamiento mecánico en comparación al suelo puro. En el caso de las mezclas suelo-ceniza, como fue observado en la Figura 6.2, la mezcla S70CV30 presenta un índice de SM, que es una arena limosa bien graduada con arcilla y la mezcla S60CV40 es clasificada también como SM, que es una arena limosa pero mal graduada y en todos los casos mejoran el comportamiento del suelo.

6.2 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

6.2.1 Composición Química

Los resultados de la composición química de las muestras de suelo son presentados en la Tabla 6.5, donde los análisis químicos de capacidad de cambio catiónico (CTC) y de ataque sulfúrico del suelo fueron obtenidos del trabajo de Duarte (2004, apud Soares, 2005). El análisis químico total en porcentaje de peso fue obtenido de un estudio químico y mineralógico detallado del campo experimental II de la Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro (PUC-Rio), de donde pertenece el suelo y fue realizado por Sertã (1986). El resultado es presentado en la Tabla 6.6.

Tabla 6.5 - Análisis químicos de capacidad de cambio catiónico (CTC) y de ataque sulfúrico.

Complejo Sortivo (meq/100g)							
Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H ⁺	CTC	
0,00	0,4	0,11	0,15	1,3	3,3	5,3	
Ataque por H ₂ SO ₄ (1:1) - NaOH (0,8%) g/Kg						pH (1:2,5)	
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	KI	Kr	Agua	KCl
170	204	103	11,1	1,49	1,13	4,3	4,0

Fuente: Duarte, 2004 apud Soares, 2005.

Tabla 6.6 - Análisis químicos total en porcentaje de peso.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O
55,4%	22,0%	<0,05%	<0,10%	11,0%	1,30%	0,11%	0,01%

Fuente: Sertã, 1986.

Analizando los resultados de las tablas 6.5 y 6.6 se puede concluir que la gran cantidad de Al₂O₃ y Fe₂O₃ encontrada en el suelo, indica que este sufrió un proceso de laterización. Por otro lado, la pequeña cantidad de CaO, MgO, K₂O e

Na₂O encontradas, sugiere que se trata de un material altamente intemperizado, debido a la lixiviación intensa de los álcalis. La presencia de cambio catiónico de este suelo sugiere que es un material de baja actividad (actividad=IP/% de arcilla=0.26). Los valores de pH indican que es un suelo ácido (Soares, 2005).

La Tabla 6.7 presenta el resultado del análisis mineralógico realizado por Sertã (1986) en el suelo puro (arcilla). Para la identificación de la microestructura del material fueron realizados análisis de microscopio óptico y microscopio electrónico de barrido, siendo descrito en la siguiente tabla.

Tabla 6.7 - Análisis mineralógica.

Fracción de suelo	Mineral	Cantidad / observaciones
Grava	Cuarzo	granos aristados de coloración transparente a lechosa
	Granito alterada	algunos fragmentos
Arena	Cuarzo	granos aristados
	Granito muy alterada	corresponde aproximadamente 5% de la muestra total
	Agregados Ferrosos	
	Magnetita	pequeños trozos
Limo	Cuarzo	Presencia
	Caulinita	Presencia
	Goetita	Presencia
Arcilla	Caulinita	presencia marcante
	Goetita	algunos trozos

Fuente: Sertã, 1986.

Vizcarra (2010) realizó los análisis químicos para la ceniza volante de RSU. La ceniza volante es comparada con los análisis realizados por Fontes (2008) del mismo tipo de ceniza y de la misma usina, y también con los análisis de cenizas volantes de RSU de diversos países recopilados por Lam (2010, apud Vizcarra, 2010). Los resultados son presentados en la Tabla 6.8. Se nota claramente la diferencia de las cantidades de óxidos principales (SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃), en comparación a las cantidades de CaO e SO₃, los cuales tienen influencia en las

reacciones de estabilización debido a que son compuestos mundialmente conocidos (Oxido de Calcio, conocido como Cal y Oxido de Silicio) (Vizcarra, 2010).

Tabla 6.8 - Composición química de la ceniza volante de RSU.

Compuesto	Concentración (%)		
	Vizcarra (2010)	Fontes (2008)	Lam (2010)
SiO ₂	21,2 - 12,9	44,26	6,35 - 27,52
Al ₂ O ₃	15,4 - 12,2	18,16	0,92 - 12,7
Fe ₂ O ₃	5,3 - 7,7	9,27	0,63 - 5,04
SO ₃	9,8 - 5,2	0,64	5,18 - 14,4
CaO	32,3 - 45,3	15,39	16,6 - 45,42
Cl	6,6 - 4,7	-	-
TiO ₂	3,3 - 4,7	3,25	0,85 - 3,12
K ₂ O	2,6 - 4,1	2,61	2,03 - 8,9
P ₂ O ₅	1,28 - 0	2,94	1,56 - 2,7
ZnO	0,5 - 1,1	0,46	-
Cr ₂ O ₃	0,1 - 0,2	0,16	-
MnO	0,1 - 0	0,13	-
SrO	0,1 - 0,2	0,04	-
ZrO ₂	0,08 - 0,1	0,04	-
CuO	0,08 - 0	0,06	-
PbO	0,08 - 0	0,11	-
MgO	-	2,23	1,38 - 3,16
Na ₂ O	-	-	2,93 - 8,9
V ₂ O ₅	0 - 0,25	-	-

Fuente: Vizcarra, 2010.

Para las mezclas de suelo-ceniza, los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Química de la PUC-Rio. Los resultados son presentados en la Tabla 6.9. Se nota una disminución en las cantidades de los óxidos principales (SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃) cuando disminuye la cantidad de suelo dentro de la mezcla, pero hay un aumento de las cantidades de CaO de <0.05% a 16.25 - 19.05% con el aumento de ceniza el cual influencia en las reacciones de estabilización y no hay presencia de SO₃, como en la ceniza volante pura.

Tabla 6.9 - Composición química de las mezclas suelo-ceniza volante de RSU.

Compuesto	Concentración (%)	
	S70CV30	S60CV40
SiO ₂	32,18	31,62
Al ₂ O ₃	39,34	37,20
Fe ₂ O ₃	6,24	5,41
SO ₃	-	-
CaO	16,25	19,05
Cl	1,15	0,97
TiO ₂	1,49	1,67
K ₂ O	0,94	1,11
P ₂ O ₅	-	-

Compuesto	Concentración (%)	
	S70CV30	S60CV40
ZnO	0,44	0,52
Cr ₂ O ₃	-	-
MnO	0,05	0,06
SrO	0,03	0,03
ZrO ₂	0,04	0,04
CuO	-	-
PbO	-	-
MgO	-	-
Na ₂ O	-	-
V ₂ O ₅	0,13	0,19

Fuente: Elaboración propia

6.2.3 Cantidad de Materia Orgánica

Los resultados de los ensayos de determinación de cantidad de materia orgánica del suelo y la ceniza volante son presentados en la Tabla 6.10. Cabe resaltar que estos resultados fueron obtenidos por oxidación con dicromato de potasio en medio sulfúrico (ítem 4.3.2.1).

Tabla 6.10 - Cantidad de materia orgánica del suelo y ceniza volante.

Muestra	Carbono Orgánico		Materia Orgánica	
	(g/Kg)	(%)	(g/Kg)	(%)
S100	4,93	0,493	8,5	0,850
CV	4,52	0,452	7,80	0,780

Fuente: Elaboración propia

Se nota que la cantidad de materia orgánica presente en la ceniza volante es menor en comparación con el suelo puro. Además se sabe del trabajo de Winterkorn (1990) que una cantidad alta de carbono puede inhibir la actividad puzolánica severamente. Para las mezclas suelo-ceniza fueron realizados los análisis de cantidad de materia orgánica por quema. Los resultados son presentados en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11 - Cantidad de materia orgánica de las mezclas suelo-ceniza.

Muestra	Matéria Orgânica (%)
S70CV30	6,314
S60CV40	5,450

Fuente: Elaboración propia

Las mezclas suelo-ceniza volante presentan un aumento de cantidad de materia orgánica mucho mayor en comparación al suelo y la ceniza volante pura, además

se nota que con el aumento de ceniza volante en la mezcla disminuye el porcentaje de materia orgánica.

Según Dias (2004), los valores más elevados obtenidos por la técnica de quema, se debe a que el calentamiento en la estufa y en el horno de 440°C provoca la pérdida de componentes inorgánicos volátiles que contiene la muestra, como el agua de constitución, por ejemplo, además de las sustancias orgánicas. Luego, se observa una cantidad de materia orgánica encima de lo esperado de acuerdo con este procedimiento.

Por lo tanto se comprueba que las técnicas en la obtención de la cantidad de materia orgánica influyen en los resultados, el cual con la técnica de oxidación con dicromato de potasio se obtiene un valor verdadero mientras que con la técnica de quema se obtiene un valor referencial para tener una idea inicial. Estas dos técnicas se diferencian en su costo y su maniobra.

6.2.4 Ensayo de Lixiviación

Los resultados para la ceniza volante fue obtenido del trabajo de Vizcarra (2010) según la norma NBR 10005:2004 y es presentado en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12 - Resultados del ensayo de lixiviación – Parámetros Inorgánicos en la Ceniza Volante.

Parámetros	Resultados analíticos (mg/L)	VMP	Método de Referencia
Arsénico	0,27	1	SM21 3120 B
Bario	0,52	70	SM21 3120 B
Cadmio	0,05	0,5	SM21 3120 B
Plomo	< 0,03	1	SM21 3120 B
Cromo Total	0,75	5	SM21 3120 B
Fluoruros	2,01	150	SM21 4500-F C
Mercurio	< 0,0005	0,1	EPA 7470 A
Plata	0,02	5	SM21 3120 B
Selenio	< 0,05	1	SM21 3120 B

Fuente: Vizcarra, 2010.

VMP: Valor máximo permitido según la norma NBR 10004:2004

Los parámetros inorgánicos presentados en la Tabla 6.12 como también los parámetros orgánicos encontrados en el extracto obtenido en el ensayo de lixiviación presentan concentraciones menores que los límites máximos establecidos en el anexo F de la Norma NBR 10004:2004, luego los residuos son

clasificados como **No Peligrosos** (Vizcarra, 2010). Estos valores máximos permitidos son acordes con los presentados en el D.S. N° 031-2010-SA de las normas peruanas.

6.2.5 Ensayo de Solubilización

Los resultados para la ceniza volante fue obtenido del trabajo de Vizcarra (2010) según la norma NBR 10006:2004 y es presentado en la Tabla 6.13.

Tabla 6.13 - Resultados del ensayo de solubilización – Parámetros Inorgánicos en la Ceniza Volante.

Parámetros	Resultados analíticos (mg/L)	VMP	Método de Referencia
Aluminio	0,31	0,2	SM21 3120 B
Arsenico	< 0,001	0,01	SM21 3120 B mod
Bario	0,41	0,7	SM21 3120 B
Cadmio	< 0,003	0,005	SM21 3120 B
Plomo	< 0,002	0,01	SM21 3113 B
Cianuros	< 0,005	0,07	SM21 4500-CN C/4500-CN F
Cloruros	783	250	SM21 4500- Cl- D
Cobre	0,01	2	SM21 3120 B
Cromo Total	1,99	0,05	SM21 3120 B
Hierro	0,22	0,3	SM21 3120 B
Fluoruros	0,56	1,5	SM21 4500-F C
Manganeso	< 0,002	0,1	SM21 3120 B
Mercurio	< 0,0005	0,001	EPA 7470 A
Nitrato (como N)	2,10	10	SM21 4500- NO ₃ F
Plata	< 0,003	0,05	SM21 3120 B
Selenio	< 0,002	0,01	SM21 3113 B
Sodio	85,2	200	SM21 3120 B
Sulfato (expresado como SO ₄)	650	250	SM21 4500- SO ₄ ²⁻ E
Surfactantes	< 0,40	0,5	SM21 5540 C
Zinc	0,04	5	SM21 3120 B

Fuente: Vizcarra, 2010.

VMP: Valor máximo permitido según la norma NBR 10004:2004

Los parámetros inorgánicos presentados en la Tabla 6.13 como también los parámetros orgánicos encontrados en el extracto obtenido en el ensayo de solubilización presentan concentraciones menores que los límites máximos establecidos en el anexo G de la Norma NBR 10004:2004, excepto el Aluminio, Cloro, Cromo Total y Sulfatos para la ceniza volante, por lo que, los residuos son

clasificados como **Clase IIA – Residuos No Inertes** (Vizcarra, 2010). Estos valores máximos permitidos son acordes con los presentados en el D.S. N° 031-2010-SA de las normas peruanas.

Basados en los resultados de los ensayos de solubilización y lixiviación, se concluye que las mezclas suelo-ceniza no son peligrosas y no inertes.

6.3 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

6.3.1 Ensayo de compactación Proctor Normal

La Figura 6.3 presenta la curva de compactación Proctor Normal NBR 7182 de la ABNT (ASTM-D698), del suelo y las mezclas suelo-ceniza volante. La Tabla 6.14 presenta un resumen de los valores del óptimo contenido de humedad (w_{opt}) y de la máxima densidad seca ($\gamma_{m\acute{a}x}$).

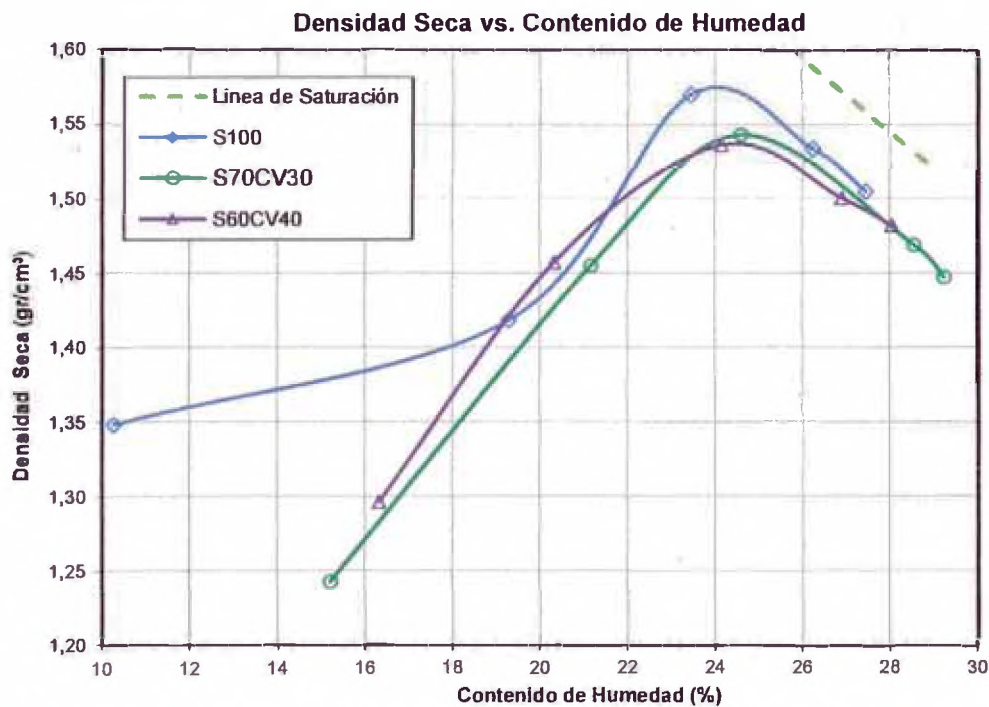


Figura 6.3 - Curvas de compactación Proctor Normal del suelo y mezclas suelo-ceniza volante.

Tabla 6.14 – Resultados de los ensayos de compactación Proctor Normal para las muestras.

	S100	S70CV30	S60CV40
Máxima Densidad Seca (gr/cm³)	1,575	1,545	1,540
Óptimo Contenido de Humedad (%)	24,0	24,8	24,6

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de compactación presentan que al aumentar la cantidad de ceniza volante en la mezcla, la máxima densidad seca comienza a disminuir de acuerdo con la investigación realizado por Nicholson (1993) sobre la utilización de cenizas de carbón para estabilizar los suelos tropicales y también con la investigación realizada por Vizcarrá (2010) para la misma ceniza volante de RSU de la misma usina, siendo en ambas investigaciones mezclas de arcilla con cenizas.

Además, esta disminución de máxima densidad seca puede estar asociado a los minerales de arcilla que componen el suelo puro (como Dolomita, Hematita, Calcita, etc) que reaccionan con la ceniza volante al ser mezclado, y según Szeliga (2014) que realizó ensayos mezclando arena con las mismas cenizas de RSU no presentaron resultados similares que las mezclas presentadas en esta tesis.

6.3.2 Ensayos Triaxiales CD

En este ítem son presentados los resultados de los ensayos triaxiales CD, realizados en muestras de suelo puro (S100) y mezclas suelo-ceniza en cantidades de 30% y 40% en relación al peso del suelo seco. Fueron aplicadas tensiones efectivas de 50, 200 y 400 kPa en todos los casos. Además fue analizado el tiempo de cura (30 días) para todas las mezclas luego de conocer la presencia de elementos estabilizantes dentro de las mezclas suelo-ceniza como el CaO y el SiO₃ y que reaccionan con el tiempo. Las trayectorias, envolventas de resistencia y los parámetros de resistencia al corte son presentados en este ítem. Todos los ensayos fueron realizados siguiendo la metodología descrita en el ítem 5.2.

Son presentados los análisis de la influencia de la cantidad de ceniza y la influencia del tiempo de cura en el comportamiento durante la etapa de corte en los ensayos, teniendo en cuenta que los análisis fueron realizados al 15% de deformación axial para todos los ensayos. También son presentados fotografías de los cuerpos de prueba más relevantes al final del corte.

La mayoría de los ensayos triaxiales CD de las mezclas suelo-ceniza alcanzan una resistencia máxima antes del 15% de deformación axial, pero el S100 no presenta resistencia pico para esta deformación, para tensiones confinantes de 200 kPa y 400 kPa, entonces es necesario conocer cuál es la resistencia máxima que puede alcanzar el S100 y su deformación axial correspondiente, para poder

comparar con los resultados de los ensayos triaxiales de las mezclas suelo-ceniza.

En la tesis de maestría de Ramirez (2012), se presenta el resultado del ensayo triaxial CD, del mismo suelo utilizado en esta investigación, para deformaciones más grandes y alcanzando una máxima resistencia. Los resultados son presentados en la Figura 6.4.

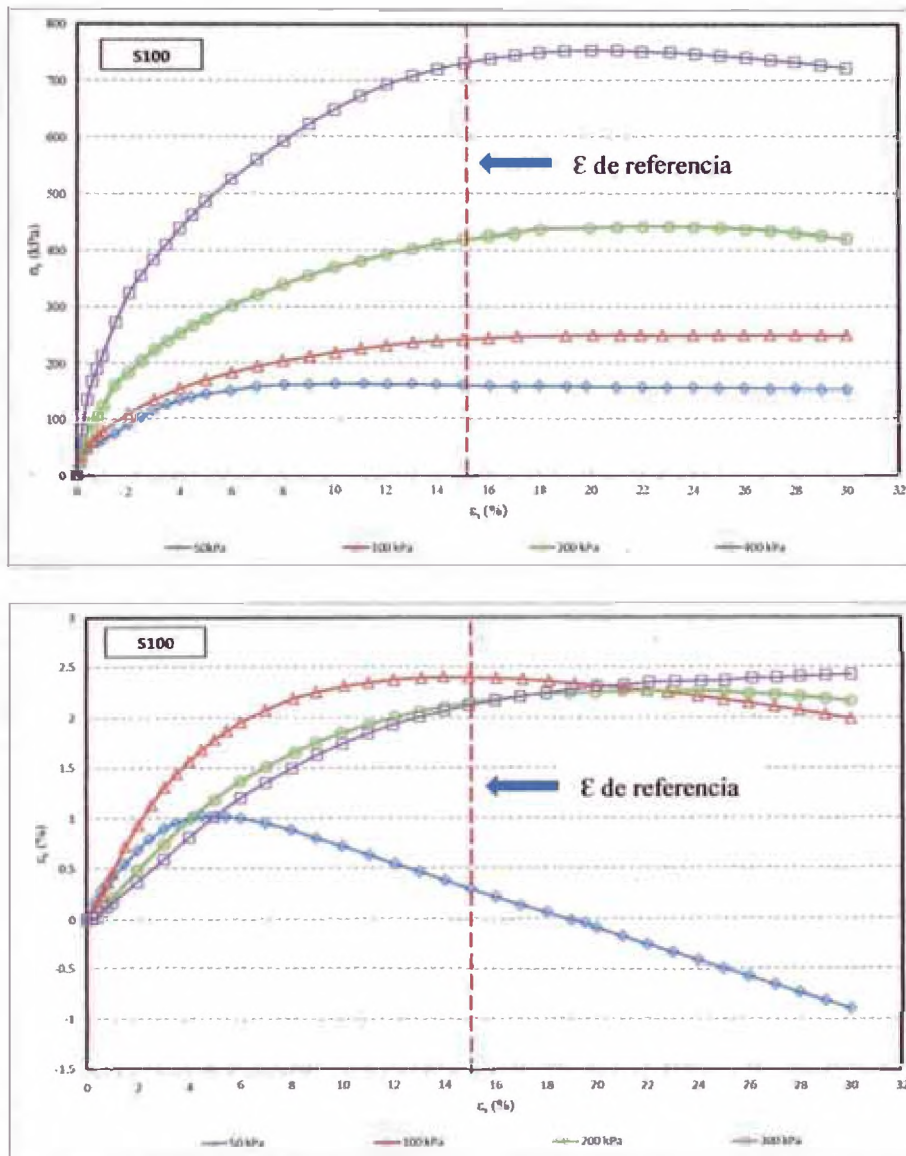


Figura 6.4 - Curvas tensión y deformación volumétrica versus deformación axial para el suelo puro, ensayos triaxial.

Fuente: Ramirez, 2012

6.3.2.1 Influencia de la Cantidad de Ceniza

El comportamiento de la tensión de desviación y deformación volumétrica versus deformación axial de los ensayos con suelo (S100) y mezclas de suelo con 30% y 40% de ceniza volante (S70CV30 y S60CV40) sin tiempo de cura es presentado y comparado en la Figura 6.5.

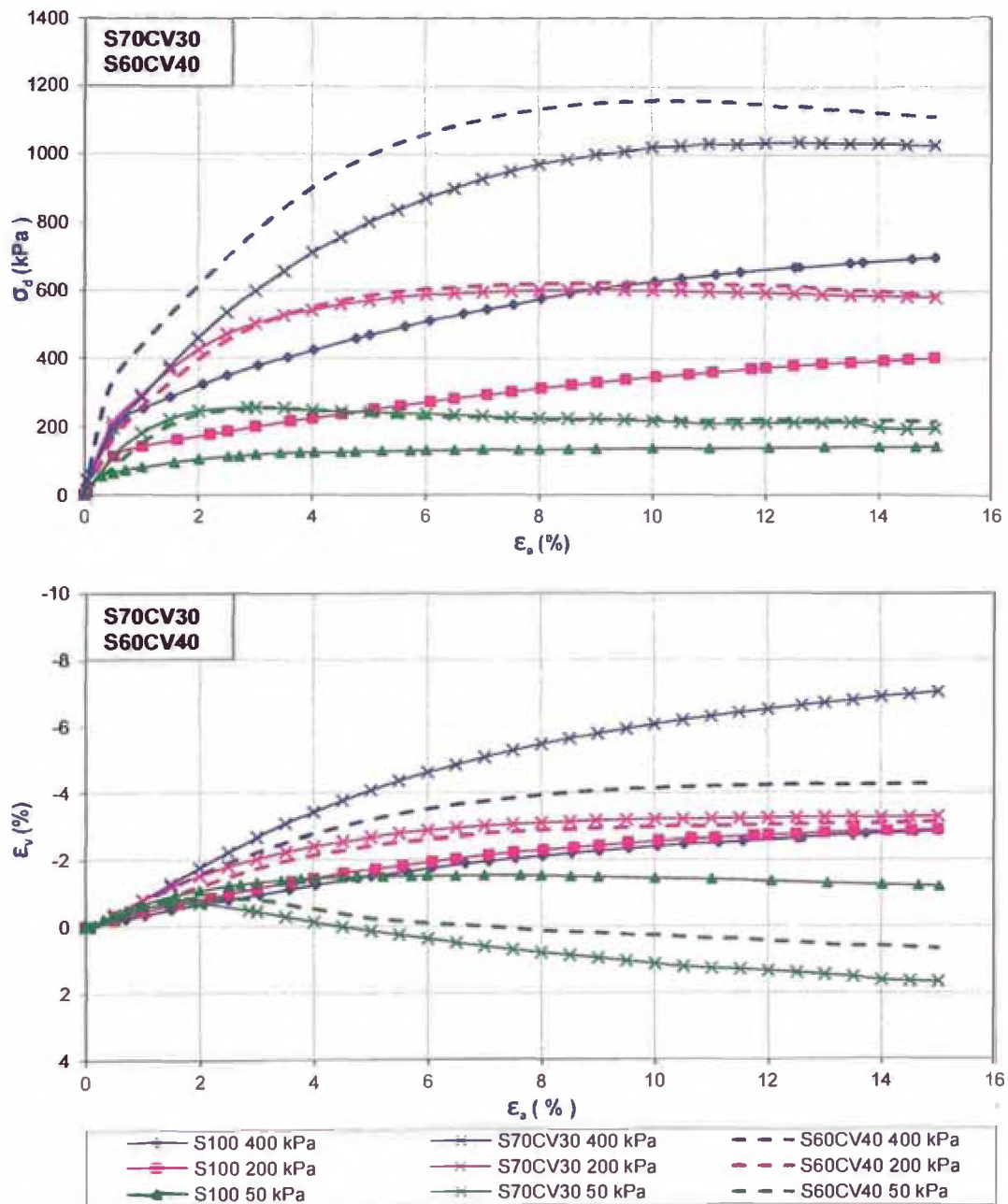


Figura 6.5 - Curvas de tensión de desviación y deformación volumétrica versus deformación axial para el S100, mezclas S70CV30 y S60CV40 en ensayos de compresión triaxial.

Se nota que para la tensión confinante de 50 kPa, las mezclas de S70CV30 y S60CV40 presentan un mejor comportamiento que la muestra de S100 y con el aumento de la deformación axial estas dos mezclas de suelo-ceniza tienden a tener el mismo comportamiento. También las mezclas suelo-ceniza alcanzan una resistencia máxima entre 1% a 3% de deformación axial pero el S100 alcanza una resistencia máxima después del 6% de deformación axial. Las mezclas suelo-ceniza presentan un comportamiento rígido diferente al S100.

La muestra de S100 para la tensión confinante de 50 kPa se expande y las mezclas de suelo-ceniza se expanden al inicio del ensayo y varían entre 3% y 6% de deformación axial para su volumen inicial. La mezcla de S70CV30 se comprime más que la mezcla de S60CV40. Por lo tanto, no existe una tendencia clara del comportamiento de las muestras con el aumento de la cantidad de ceniza volante y solo que se expande en un inicio y acaba comprimiéndose para deformaciones axiales mayor a 6% para esta tensión confinante. Además la mezcla S60CV40 presenta más deformación volumétrica de expansión al compararlo con la mezcla S70CV30 pero menos que el S100 al alcanzar la resistencia máxima.

Para la tensión confinante de 200 kPa, las mezclas suelo-ceniza presentan casi la misma trayectoria con un ligero incremento después del 6% de deformación axial para la mezcla S60CV40. El comportamiento de las mezclas suelo-ceniza es mejor que el S100 para esta tensión confinante.

El S100 y las mezclas suelo-ceniza presentan el mismo comportamiento de expansión en todo el ensayo para la tensión confinante de 200 kPa, con la diferencia que las mezclas suelo-ceniza presentan más deformación volumétrica al alcanzar la resistencia máxima.

Para la tensión confinante de 400 kPa, la mezcla S60CV40 presenta un mejor comportamiento y se diferencia notablemente de la mezcla S70CV30 y aún más del S100. La mezcla S60CV40 presenta un comportamiento más rígido que la mezcla S70CV30 y S100, alcanzando una mayor resistencia a 10% de la deformación axial.

Las mezclas de suelo-ceniza y S100 se expanden para la tensión confinante de 400 kPa y la deformación volumétrica de la mezcla S70CV30 es mayor que de la mezcla S60CV40 y el S100.

Se nota que la mezcla S70CV30 presenta unos porcentajes de expansión y compresión más notorios que la mezcla S60CV40 y el S100 para todas las tensiones confinantes. Entonces se puede concluir que el porcentaje de deformación volumétrica de las muestras es inversamente proporcional a la cantidad de ceniza que contiene cada mezcla de suelo-ceniza.

6.3.2.2 Envoltentes y Parámetros de resistencia al corte comparando la influencia de la cantidad de ceniza.

La Figura 6.6 presenta las envoltentes de resistencia para el S100 y las mezclas de suelo-ceniza S70CV30 y S60CV40 sin tiempo de cura, las cuales son comparadas en sus trayectorias y parámetros de resistencia de Lambe y Mohr.

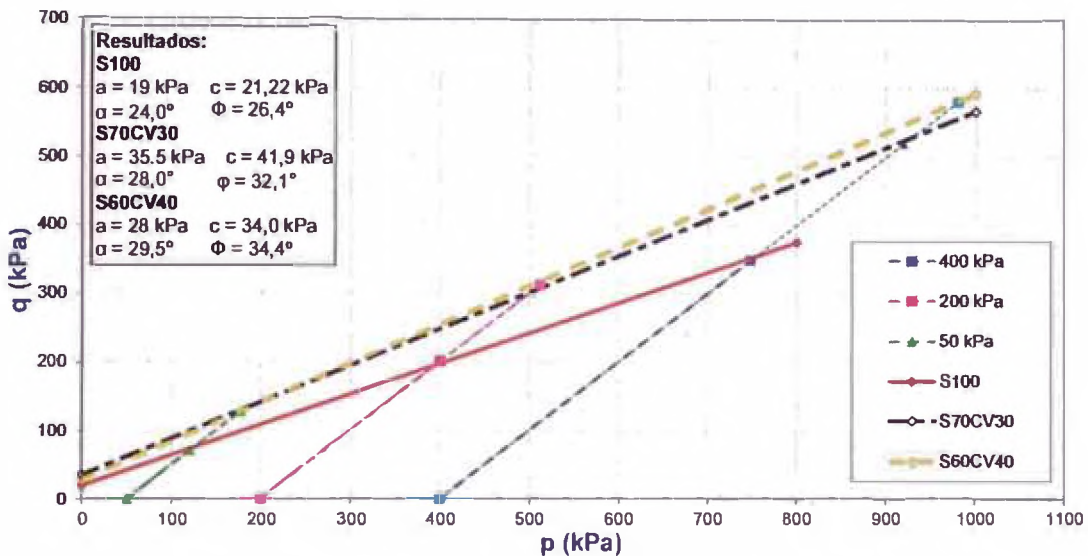


Figura 6.6 - Comparación entre las envoltentes de S100 y mezclas S70CV30 y S60CV40.

Es notable la diferencia que existe entre el S100 y las mezclas de suelo-ceniza, presentando mejores resultados para tensiones confinantes más altas. Entre las mezclas de S70CV30 y S60CV40 se puede decir que a medida que aumenta la cantidad de ceniza en la mezcla, el parámetro de cohesión disminuye y el ángulo de fricción aumenta, por lo cual se puede concluir que la mezcla S70CV30 presenta mejores parámetros de resistencia debido a que la diferencia de ángulo de fricción es solo de 2° con respecto a la mezcla S60CV40.

La Tabla 6.15 presenta los parámetros de resistencia del S100 y de las mezclas suelo-ceniza para las diferentes cantidades de ceniza ensayadas sin tiempo de cura.

Se nota que todas las mezclas suelo-ceniza ensayadas presentan un mejor comportamiento que el S100 y se puede decir que la adición de ceniza volante ayuda en el comportamiento del suelo y mejora sus parámetros de resistencia.

Tabla 6.15 - Resumen de los parámetros de resistencia para el S100 y mezclas S70CV30 y S60CV40 sin tiempo de cura.

Comparación de resultados				
Mezclas de Suelo	Parámetros de Lambe		Parámetros de Mohr	
	a (kPa)	α (°)	c (kPa)	ϕ (°)
S100	19,0	24,0	21,2	26,4
S70CV30	35,5	28,0	41,9	32,1
S60CV40	28,0	29,5	34,0	34,4

Fuente: Elaboración propia

Visualizando lo parámetros de Mohr, es notable que la cohesión aumenta casi en el doble con respecto al S100 para las mezclas suelo-ceniza y el ángulo de fricción en 6° a 8° lo que también colabora con la estabilización del suelo. Comparando las mezclas suelo ceniza, se puede determinar que la mezcla S70CV30 es la que presenta mejor comportamiento.

6.3.2.3 Influencia del Tiempo de Cura

Las muestras compactadas de las mezclas suelo-ceniza fueron pesadas después de ser envueltas con plástico y guardadas en una cámara para retener su humedad. Las muestras fueron pesadas después de 30 días de tiempo de cura para ser ensayados y se notó que todos perdieron un pequeño porcentaje de humedad entre 1% a 1.5% menos del peso inicial. Se puede pensar que esta pérdida de humedad es debido a la reacción química que puede existir entre la ceniza volante, el agua y el suelo.

El comportamiento de la tensión de desviación y deformación volumétrica versus deformación axial de los ensayos con suelo (S100) y mezclas de suelo con 30% de ceniza volante (S70CV30) sin tiempo de cura y con 30 días de tiempo de cura son presentados y comparados en la Figura 6.7.

Se nota que el comportamiento para la mezcla de S70CV30 sin tiempo de cura y con 30 días son semejantes para todas las tensiones confinantes ensayadas, sin embargo, las muestras sin tiempo de cura presentan un comportamiento más rígido que con 30 días y el S100 en las tensiones de 50 kPa y 200 kPa. En todos

los casos el comportamiento de la mezcla S70CV30 (sin tiempo de cura y con 30 días de tiempo de cura) es mucho mejor que el S100.

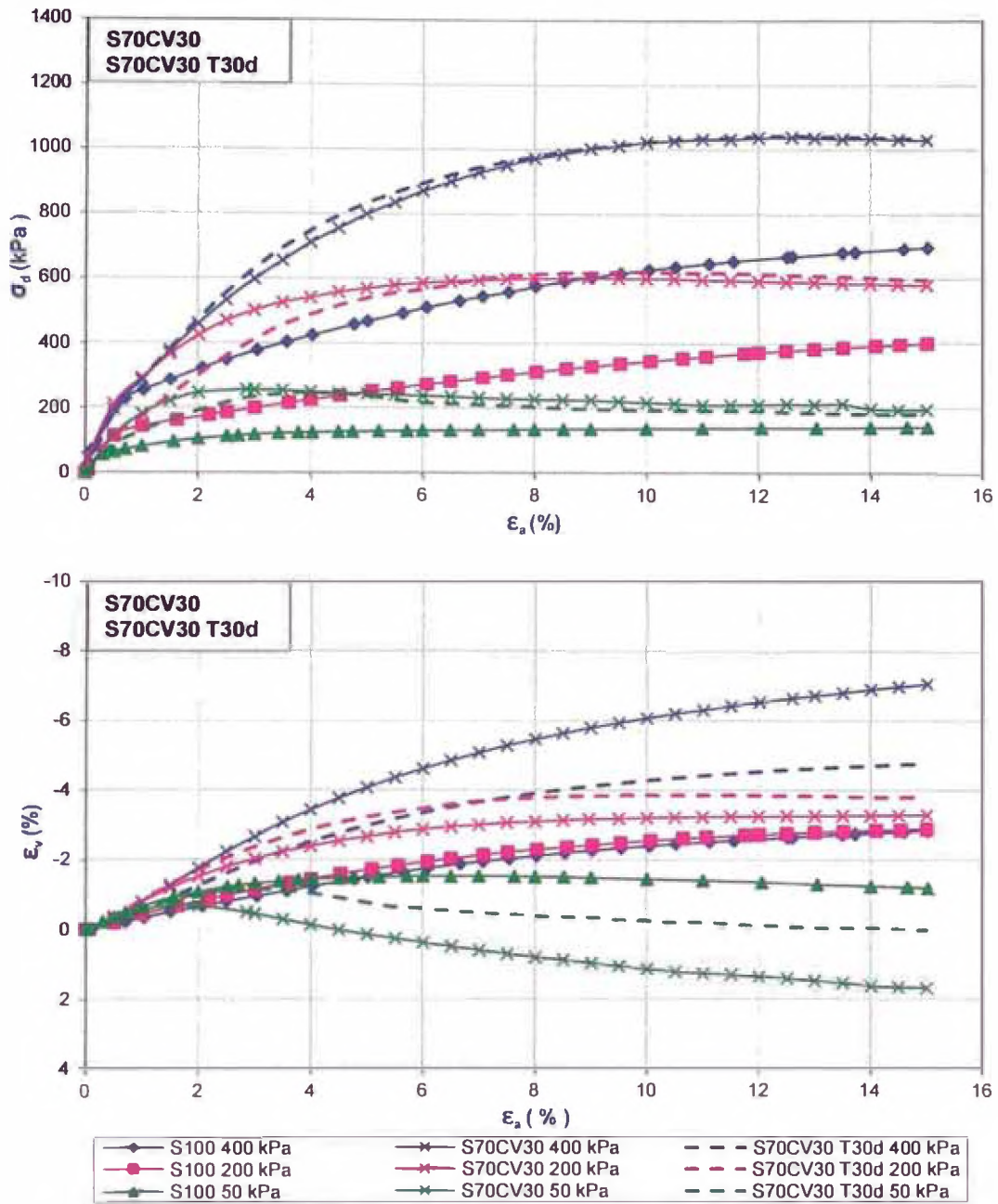


Figura 6.7 - Curvas de tensión de desviación y deformación volumétrica versus deformación axial para el S100, mezclas S70CV30 sin tiempo de cura y con 30 días en ensayos de compresión triaxial.

Para la variación volumétrica, se nota que el S100, para la tensión de 50 kPa, siempre se está expandiendo, mientras que la mezcla de S70CV30 sin tiempo de cura se expande hasta recuperar su volumen inicial con 4% de deformación axial

y con 30 días recupera su volumen inicial al final del ensayo. Para la tensión de 200 kPa las mezclas sin tiempo de cura y con 30 días presentan una deformación volumétrica más grande que la muestra de S100. Para la tensión de 400 kPa, las mezclas de S70CV30 presentan el mismo comportamiento que con 200 kPa expandiéndose más que el S100 pero la deformación volumétrica es más grande sin tiempo de cura que con 30 días de tiempo de cura. Los ensayos con 30 días de tiempo de cura siempre se encuentran en expansión.

El comportamiento de la tensión de desviación y deformación volumétrica versus deformación axial de los ensayos con suelo (S100) y mezclas de suelo con 40% de ceniza volante (S60CV40) sin tiempo de cura y con 30 días de tiempo de cura son presentados y comparados en la Figura 6.8.

Para este ensayo, se observa una diferencia en la mezcla de S60CV40 para el tiempo de cura de 30 días, el cual presenta un mejor comportamiento para todas las tensiones confinantes de 50 kPa, 200 kPa y 400 kPa. La mezcla S60CV40 con 30 días de tiempo de cura presenta un comportamiento más rígido para tensiones confinantes de 50 y 200 kPa en comparación con la mezcla SP60CV40 sin tiempo de cura. Para todos los casos la mezcla S60CV40 (sin tiempo de cura y con tiempo de cura) presenta un mejor comportamiento en comparación al S100, presentando una máxima resistencia de 1200 kPa para una tensión confinante de 400 kPa.

Para la variación volumétrica, se nota que para la tensión de 50 kPa, el S100 siempre se encuentra en expansión, mientras que la mezcla S60CV40 se expande al inicio del ensayo, luego recupera su volumen inicial para después comprimirse, además, la mezcla con 30 días de tiempo de cura se expande para una menor deformación axial y luego se comprime mucho más. Para la tensión confinante de 200 kPa, el comportamiento de la mezcla S60CV40, sin tiempo de cura y con tiempo de cura, es semejante al del S100. Por último, para la tensión confinante de 400 kPa, la mezcla S60CV40 se expande en todo el ensayo, presentando un ligero aumento la muestra sin tiempo de cura, pero la expansión de las muestras de suelo-ceniza es notablemente mayor que la del S100.

Se nota que los valores de expansión para la mezcla S60CV40, sin tiempo de cura y con 30 días de tiempo de cura, son menores que la presentada por la mezcla de S70CV30, presentando valores máximos de -4%, mientras que la mezcla S70CV30 presenta valores de -8% al final del ensayo.

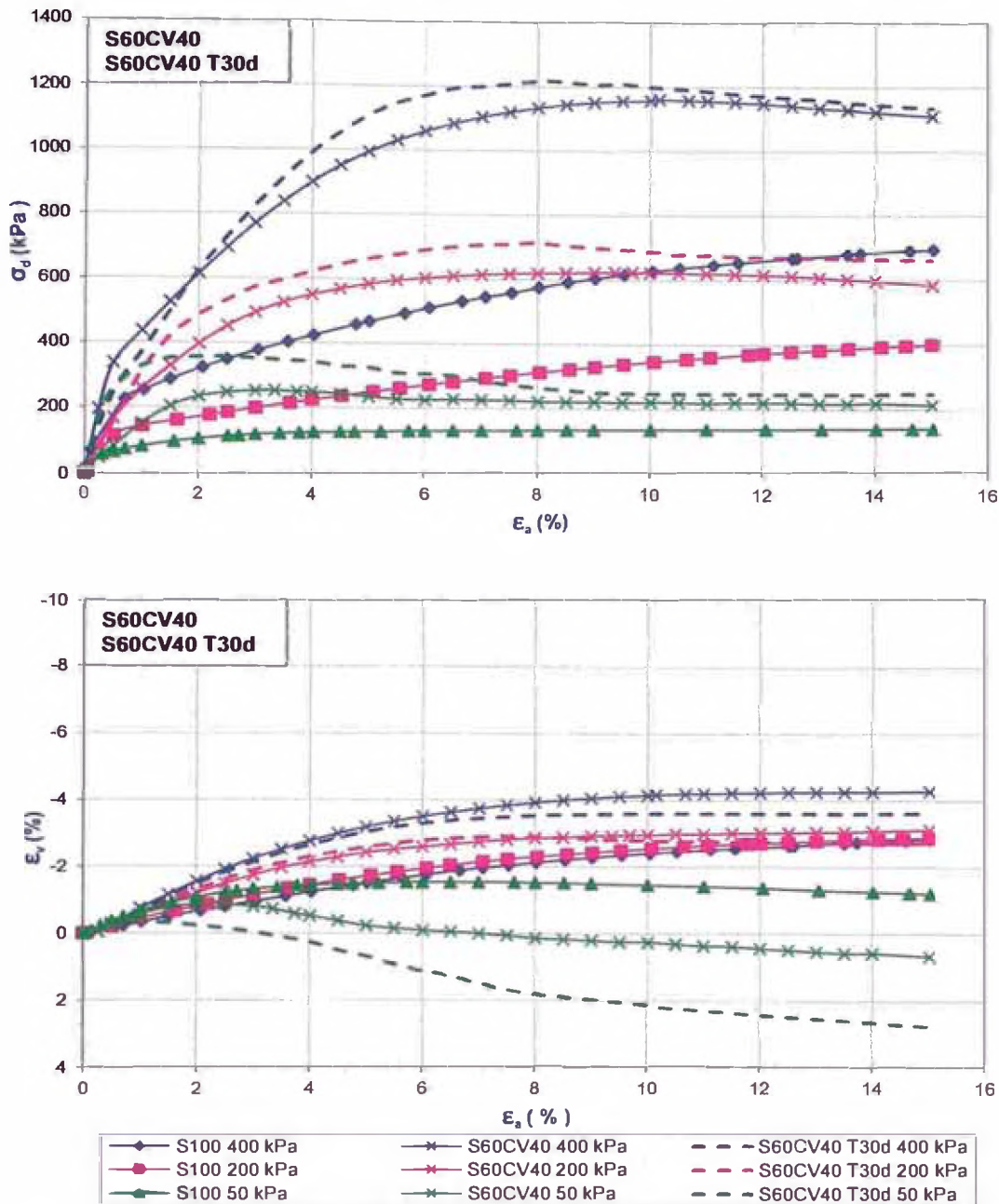


Figura 6.8 - Curvas de tensión de desviación y deformación volumétrica versus deformación axial para el S100, mezclas S60CV40 sin tiempo de cura y con 30 días en ensayos de compresión triaxial.

6.3.2.4 Envolventes y Parámetros de resistencia al corte comparando la influencia del tiempo de cura.

La Figura 6.9 presenta las envolventes de resistencia para el S100 y las mezclas de suelo-ceniza S70CV30 sin tiempo de cura y con 30 días de tiempo de cura, las

cuales son comparadas en sus trayectorias y parámetros de resistencia de Lambe y Mohr.

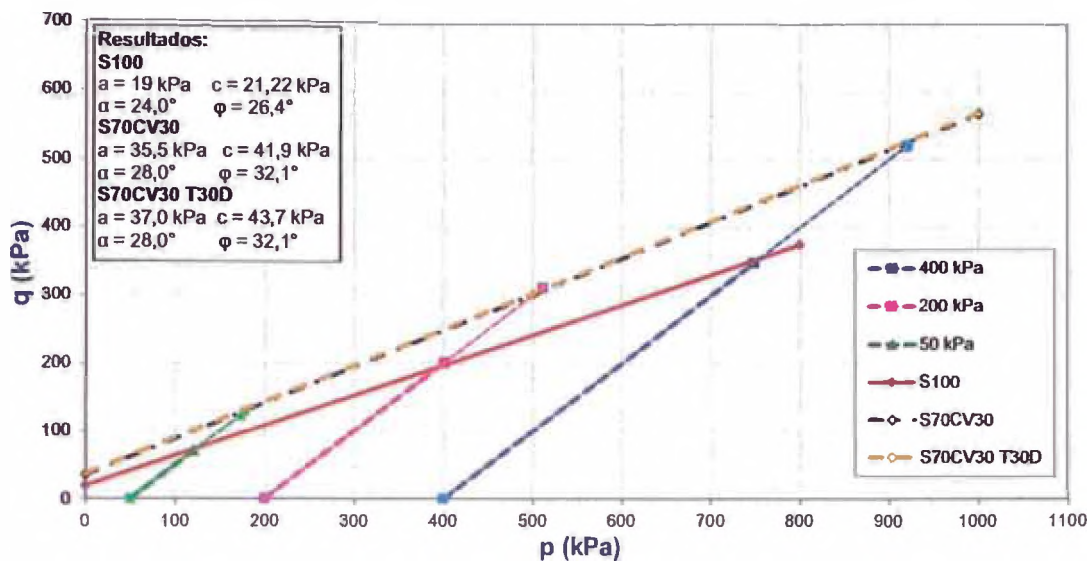


Figura 6.9 – Comparación entre las envolventes de S100, mezclas de S70CV30 sin tiempo de cura y con 30 días.

Se observa la diferencia que existe entre el S100 y la mezcla S70CV30, donde la mezcla presenta un mejor comportamiento a lo largo de la trayectoria. Es notable que casi no existe diferencia entre las mezclas suelo-ceniza sin tiempo de cura y con tiempo de cura, por lo cual se puede decir que el tiempo de cura no afecta a los parámetros de resistencia para esta mezcla (S70CV30). Las mezclas presentan un parámetro de cohesión más del doble que del S100. También los ángulos de fricción son los mismos para la mezcla sin tiempo de cura y con tiempo de cura y ambos son mayores en 5° con respecto al del S100.

La Figura 6.10 presenta las envolventes de resistencia para el S100 y las mezclas de suelo-ceniza S60CV40 sin tiempo de cura y con 30 días de tiempo de cura, las cuales son comparadas en sus trayectorias y parámetros de resistencia de Lambe y Mohr.

En el caso de la mezcla S60CV40, es notable que parámetro de resistencia de cohesión aumenta y el ángulo de fricción se mantiene entre 33° y 34° . En todos los casos el comportamiento de la mezcla con diferentes tiempos de cura son mejores que del S100, presentando una gran diferencia para tensiones confinantes bajas (50 kPa), tendiendo a igualarse para tensiones confinantes altas

(200 kPa y 400 kPa). La mezcla S60CV40 T30d presenta un aumento en la cohesión en más del triple que del S100 y el ángulo de fricción aumentó en 7°.

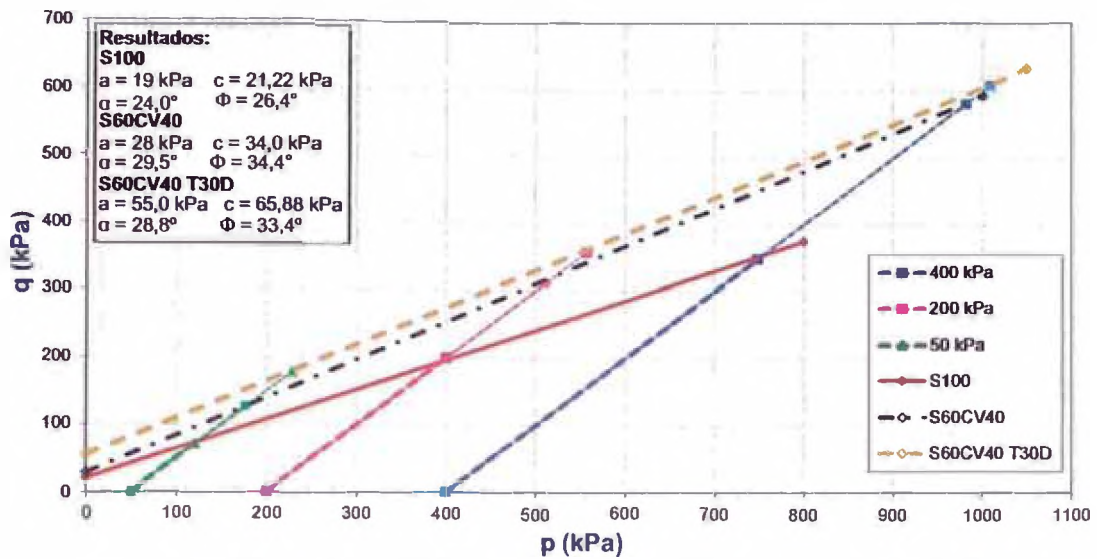


Figura 6.10 – Comparación entre las envolventes de S100, mezclas de S60CV40 sin tiempo de cura y con 30 días.

La Tabla 6.16 presenta los parámetros de resistencia del S100 y de las mezclas suelo-ceniza para las diferentes cantidades de ceniza ensayadas sin tiempo de cura y con 30 días de tiempo de cura.

Tabla 6.16 – Resumen de los parámetros de resistencia para el S100 y mezclas S70CV30 y S60CV40 sin tiempo de cura y con 30 días de tiempo de cura.

Mezclas de Suelo	Parámetros de Lambe		Parámetros de Mohr	
	a (kPa)	α (°)	c (kPa)	ϕ (°)
S100	19,0	24,0	21,2	26,4
S70CV30	35,5	28,0	41,9	32,1
S70CV30 T30d	37,0	28,0	43,7	32,1
S60CV40	28,0	29,5	34,0	34,4
S60CV40 T30d	55,0	28,8	65,9	33,4

Fuente: Elaboración propia

Es notable que todas las mezclas suelo-ceniza ensayadas presentan un comportamiento mucho mejor que el S100, por lo cual se puede decir que la adición de ceniza volante ayuda a mejorar el comportamiento del suelo y mejora sus parámetros de resistencia. Entre todas las mezclas suelo-ceniza, el mejor comportamiento fue presentando por la muestra S60CV40 T30d, porque alcanzó una cohesión de 65.9 kPa y un ángulo de fricción de 33.4° lo cual fue mucho mayor

que el S100 y las otras mezclas suelo-ceniza. También el tiempo de cura ayuda en el aumento de la resistencia, presentándose de mejor manera en la mezcla de S60CV40 y manteniendo el ángulo de fricción entre 32° y 34°. Se puede concluir que la ceniza volante sirve para estabilizar la arcilla coluvial estudiada, recomendándose la adición de 40% de ceniza volante la cual fue que presentó mejores parámetros de resistencia en el tiempo, en comparación con la mezcla con 30% de ceniza volante.

Las Figuras 6.11 y 6.12 presentan la variación de los parámetros de cohesión y ángulo de fricción para las mezclas suelo-ceniza con diferentes cantidades y tiempo de cura, para una mejor visualización de la variación de los parámetros de resistencia con diferentes variables.

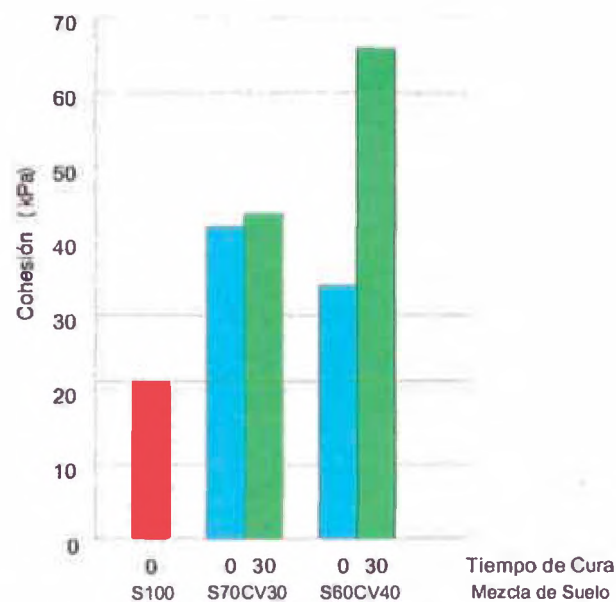


Figura 6.11 – Variación de la cohesión para diferentes mezclas suelo-ceniza y tiempo de cura.

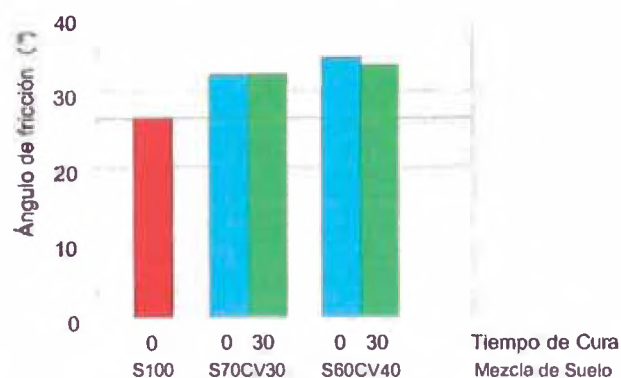


Figura 6.12 – Variación del ángulo de fricción para diferentes mezclas suelo-ceniza y tiempo de cura.

La Figura 6.13 presenta la fotografía de las muestras S60CV40 T30d acabado el ensayo triaxial para cada tensión confinante el cual presentó mejores parámetros de resistencia.



(a) (b) (c)
Figura 6.13 – Muestras de S60CV40 T30d - (a) Muestra a 50 kPa; (b) Muestra a 200 kPa; (c) Muestra a 400 kPa.

7.0 CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

A partir de los resultados presentados y de los análisis realizados fue posible llegar a las conclusiones abordadas en este Capítulo final.

La adición de ceniza volante de Residuo Sólido Urbano (RSU) en el suelo arcilloso coluvial estudiado, proporcionó la mejora en gran parte de las propiedades mecánicas del suelo, obteniendo un nuevo material geotécnico con características propias.

A continuación están resumidas las principales conclusiones relacionadas a la adición de cenizas de RSU al suelo utilizado en este trabajo:

- Según el sistema de clasificación SUCS y los análisis realizados, el suelo fue clasificado como CH (arcilla inorgánica de plasticidad media) y la ceniza volante como SM (arena limosa). Esta última tiene un mejor comportamiento mecánico cuando es comparado al suelo puro. Sin embargo, el suelo mezclado con diferentes cantidades de ceniza, es clasificado como SM, teniendo en la mezcla S70CV30 una arena bien graduada, el cual presenta un mejor comportamiento.
- Los resultados de la composición química de la ceniza volante y del suelo presentaron elevadas cantidades de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , además de bajas cantidades de materia orgánica, que en conjunto son positivos para la ocurrencia de reacciones puzolánicas que integran el proceso de estabilización química del suelo y es reflejado en los resultados en las mezclas suelo-ceniza. Se destaca que las mezclas suelo-ceniza presentan una disminución de las cantidades de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 con el aumento de cantidades de ceniza en la mezcla.
- Visando el problema ambiental, estas cenizas al ser ensayadas por Lixiviación y Solubilización presentaron resultados favorables al No ser Peligrosos e Inertes.
- El suelo presenta una baja cantidad de CaO (cal) en su composición química, en cambio la ceniza volante presenta valores entre 30% y 40%, lo cual da como resultado en las mezclas suelo-ceniza valores de 16% y 19%. El CaO

es un componente químico que ayuda a la estabilización del suelo y es reflejado en los resultados de caracterización mecánica.

- Los parámetros de compactación (γ_{dmax} y w_{opt}) de las mezclas suelo-ceniza son influenciados por la cantidad de ceniza. La adición de ceniza al suelo genera una disminución en la máxima densidad seca y un aumento en el óptimo contenido de humedad. Esta disminución de máxima densidad seca puede estar asociado a los minerales de arcilla que componen el suelo puro que reaccionan con la ceniza volante al ser mezclado.
- Los análisis de los resultados de los ensayos triaxiales CD comprobaron la influencia de los siguientes factores: cantidad de ceniza y tiempo de cura.
 1. Con respecto a la cantidad de ceniza, los resultados fueron analizados sin tiempo de cura: todas las mezclas suelo-ceniza presentaron mejores parámetros de resistencia en comparación al suelo puro, principalmente para la mezcla S70CV30, pero el parámetro de cohesión disminuye al aumentar 10% de ceniza a la mezcla.
 2. Con respecto al tiempo de cura: la cura fue un factor a ser estudiado debido a que se piensa que el aumento de tiempo de cura mejora los parámetros de resistencia, y debido a los resultados obtenidos, se podría afirmar que este factor si influencia positivamente en las mezclas, mostrando su mejor resultado en la mezcla SP60CV40 T30d que aumento el parámetro de cohesión en más del triple en comparación al suelo puro manteniendo el mismo ángulo de fricción.
- De los ensayos triaxiales CD, se concluye que las mezclas suelo-ceniza alcanzan su mayor resistencia con menores deformaciones axiales en comparación al suelo puro. Este nivel de deformación axial, para alcanzar la mayor resistencia, aumenta para tensiones confinantes más altas, pero disminuye con el aumento de la cantidad de ceniza.
- La cantidad de ceniza, el tiempo de cura y la tensión confinante influyen en la deformación volumétrica de las mezclas suelo-ceniza, presentando menores deformaciones volumétricas (expansión o compresión) para mayor cantidad de ceniza y mayor tiempo de cura.
- Las mezclas suelo-ceniza presentan un comportamiento más rígido en comparación al suelo puro sin tiempo de cura y con tiempo de cura.
- Por los resultados obtenidos se recomendaría, para utilización en obras geotécnicas, la mezcla con 40% de ceniza volante por el mejor

comportamiento presentando en el tiempo, al alcanzar el mayor valor de cohesión a los 30 días de tiempo de cura y sin alteración significativa del ángulo de fricción

7.2 RECOMENDACIONES

A continuación se citan algunas recomendaciones para ampliar el conocimiento y proseguir con los estudios sobre el reforzamiento de suelos con la adición de cenizas de RSU:

- Analizar el comportamiento mecánico de otras cantidades de ceniza volante de RSU cuando son adicionadas a otros tipos de suelos.
- Evaluar el comportamiento ambiental de las mezclas suelo-ceniza de RSU realizando ensayos de lixiviación y solubilización para las mezclas que presentan mejores comportamientos mecánicos y realizar un monitoreo de estas mezclas cuando sean colocadas en campo.
- Evaluar el comportamiento de las mezclas suelo-ceniza de RSU con adición de cal, por los resultados obtenidos en otras investigaciones realizadas con ceniza de carbón y cal.
- Desarrollar modelos de análisis numérico, que reproduzcan el comportamiento de suelos mezclados con cenizas de RSU.
- Evaluar el potencial de la utilización de cenizas de RSU a través de ensayos en campo de verdadera magnitud, monitoreando su comportamiento mecánico y las interacciones ambientales a través del tiempo.
- Analizar el comportamiento mecánico del suelo mezclando con ceniza de fondo de RSU.
- Evaluar el comportamiento de otros tipos de ceniza como, cenizas de carbón o de cáscara de arroz para compatibilizar con los resultados obtenidos en esta investigación, utilizando la misma metodología.
- Desarrollar un modelo económico a detalle, de la cantidad de ahorro que puede resultar la utilización de ceniza de RSU u otros tipos de ceniza en obras geotécnicas.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984) ABNT NBR 6459: SOLO – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro/RJ.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984) ABNT NBR 6508: SOLO – Determinação da densidade real dos grãos. Rio de Janeiro/RJ.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984) ABNT NBR 7180: SOLO – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro/RJ.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984) ABNT NBR 7181: SOLO – Análise granulométrica. Rio de Janeiro/RJ.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1986) ABNT NBR 6457: AMOSTRAS DE SOLOS – Preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro/RJ.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1986) ABNT NBR 7182: SOLO – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro/RJ.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1996) ABNT NBR 13600: SOLO – Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C. Rio de Janeiro/RJ.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2004) ABNT NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro/RJ.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2004) ABNT NBR 10005: Lixiviação de Resíduos - Procedimento. Rio de Janeiro/RJ.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2004) ABNT NBR 10006: Solubilização de Resíduos - Procedimento. Rio de Janeiro/RJ.
11. Baptista, C.F.N. Pavimentação. Editora Globo, Tomoll, 2a ed. -Porto alegre: Globo, 1976.
12. BECQUART, F.; BERNARD, F.; ABRIAK, N.E.; ZENTAR, R. Monotonic aspects of the mechanical behaviour of bottom ash from municipal solid waste incineration and its potencial use for road construction. Waste management, vol 29, p. 1320 - 1329. 2009.

13. BISHOP, A.W. & HENKEL, D. J. The measurement of soil properties in the triaxial test, 2 ed. London, UK: Edward Arnold Ltd., 1962. 227p.
14. BLESKINA, N.A. Experience with urea-rsin stabilization of soils. Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol 42, No. 4, p. 139 - 141. 2005.
15. CERATTI, J. A. P. Efeitos da Adição de Cal e Cinza Volante nas Propriedades de um Solo Residual Compactado. 1979. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
16. CONSOLI, N.C.; DA FONSECA, A.V.; CRUZ, R.C.; HEINECK, K.S. Fundamental Parameters for the Stiffness and Strength Control of Artificially Cemented Sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, p. 1347 - 1353. 2009
17. CUARTO INFORME NACIONAL DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES Y NO MUNICIPALES. Gestión 2010 - 2011. Ministerio del Ambiente, Viceministerio de Gestion Ambiental. Disponible en: <http://www.redrrss.pe/material/20130104110940.pdf>. Acceso en 25 de Mayo, 2013
18. DAS, BRAJA M. Principios de Ingenieria de Cimentaciones. PWS, 4ta ed., Thomsom Learning, Mexico, p. 764-813, 2001.
19. DIAS, C. R. C., Estudo de misturas de areia-asfalto e cinza-cal para emprego em pavimentos urbanos. Dissertação de Mestrado, UFRGS. Porto Alegre, 2004
20. DIAS, I. DE M. Estudo de solos tropicais para uso em pavimetnação a partir de ensaios triaxiais estáticos. Dissertação de Mestrado, EESC/USP, São Carlos, 2007.
21. DIAS, J.C., LIMA, W. N. Comparação de métodos para a determinação de matéria orgânica em amostras ambientais. Revista Científica da UFPA Vol 4, Abril 2004.
22. DUARTE, A. P. L., Avaliação de Propriedades Termo-Hidráulicas de Solos Requeridas na Aplicação da Técnica de Dessorção Térmica, Tese de Doutorado, DEC, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2004.

23. EMBRAPA. Manual de Métodos de Análise de Solos - 2a Edição. ISBN 85-85864-03-6. 212p. 1997
24. FERREIRA, C., RIBEIRO, A., OTTOSEN, L., Possible applications for municipal solid waste fly ash. *Journal of Hazardous Material B96* p. 201-216. 2003.
25. FONTES, Cintia Maria Ariani. Utilização das cinzas de lodo de esgoto e de residuo solido urbano em concretos de alto desempenho. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2008.
26. FORTEZA, R.; FAR, M.; SEGUI, C.; CERDÁ, V. Characterization of bottom ash in municipal solid waste incinerators for its use in road base. *Waste management*, vol 24, p. 899 - 909. 2004.
27. GOH A. T. C., TAY J. H., *J. Geotech. Eng.* p. 119-811. 1993.
28. HEAD, K. H. *Manual of Soil Laboratory Testing: Effective Stress Test*. Wiley, 2da ed., vol. 3, West Sussex, Inglaterra, p. 227, 1986.
29. HORPIBULSUK, S.; PHETCHUAY, CH.; CHINKULKIJNIWAT, A. Soil stabilization by calcium carbide residue and fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, p. 184 - 193. 2012.
30. INEI, 2011, INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA E INFORMATICA - NOTA DE PRENSA. Disponible en <http://www.inei.gob.pe/web/NotaPrensa/Attach/13171.pdf>. Acceso en 20 de Enero, 2014
31. INGLES, O.G.; METCALF, J.B. *Soil stabilization - principles and practice*. Sideney: Butterworks, 1972.
32. KIM, B.; PREZZI, M.; SALGADO, R. Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments. *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, p. 914 - 924. 2005.
33. LAMBE, T.W. *Soil testing*. New York: John Wiley & Sons, USA. 1951. 165p.
34. LEE, M. T.; DING, M.; NICHOLSON, P. G. A study of use of H-power ash mixtures as a landfill final cover and soil stabilization agent. In:

- ENVIROMENTAL GEOTECHNICS, 1996, Osaka. Proceedings. Rotterdam:
A. A. Balkema, 1996, v.2. p.803-807.
35. LISBONA, A.; VEGAS, I.; AINCHIL, J.; RÍOS, C. Soil stabilization with calcined paper sludge: laboratory and field tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 24, p. 666 - 673. 2012.
 36. LOPES, L.S.E. Análise do Comportamento Mecânico e Ambiental de Misturas Solo-Cinzas de Carvão Mineral para Camadas de Base de Pavimentos. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2011.
 37. NICHOLSON, P.G., Fly Stabilization of Tropical Hawaiian Soils. Fly Ash for soil improvement. ASCE. 1993.
 38. RAMIREZ, G.G.D., Estudo Experimental de Solos Reforçados com Borracha Moída de Pneus Inservíveis. Dissertação de Mestrado, PUC-RJ, Rio de Janeiro, 2012.
 39. ROSA, A.D. Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal. Dissertação de mestrado, UFRGS, Porto Alegre. 2009.
 40. SERTÃ, H. B. C., Aspectos geológicos e geotécnicos do solo residual do Campo Experimental II da PUC/RJ, Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 1986.
 41. SIQUEIRA, J. S. D. Reciclagem de Resíduo a partir de cinzas de carvão mineral: Produção de Argamassas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil. 2011.
 42. SOARES, R.M. Resistência ao Cisalhamento de um Solo Coluvionar Não Saturado do Rio de Janeiro, RJ. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2005.
 43. SPANNENBERG, M.G. Caracterização Geotécnica de um Depósito de Argila Mole da baixada Fluminense. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2003.
 44. SZELIGA, L., Estudo Experimental de um solo Arenoso Estabilizado com Cinzas de Resíduo Sólido Urbano e Cal. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2014.

45. TASTAN, E.O.; EDIL, T, B.; BENSON, C.H.; AYDILEK, A.H. Stabilization of organic soils with fly ash. *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, p. 819 - 833. 2011.
46. USINA VERDE S.A. Disponível em: <<http://www.usinaverde.com.br/>>. Acesso em: 15 de Março, 2012.
47. VENDRUSCOLO, M.A. Análise Numérica e Experimental do Comportamento de Fundações Superficiais Assentes em Solo Melhorado. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Rio Grande do Sul, 1996.
48. VIZCARRA, G.O.C. Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2010.
49. WINTERKORN, H. F., PAMUKCU, S. Soil Stabilization and Grouting. *Foundation engineering handbook* editado por Fang, Hsai-Yang. 2a edição, 1990