

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**

**FACULTAD DE HÁBITAT, INFRAESTRUCTURA Y CREATIVIDAD**

DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DE GRADO DE MÁSTER EN

**GEOTÉCNIA APLICADA**

TRABAJO DE TITULACIÓN:

# “EVALUACIÓN DEL USO DE CENIZA VOLCÁNICA COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS”

**AUTOR:**

ZURITA DURÁN MIREYA ALEJANDRA

**TUTOR:**

PH.D. ALBUJA SÁNCHEZ JORGE DAVID

**Quito, 2026**

## DEDICATORIA

Dedico este logro, fruto de años de esfuerzo, constancia y aprendizaje, a mis padres, quienes han sido el pilar fundamental en cada etapa de mi vida. Gracias por su amor incondicional, por sus sacrificios silenciosos y por creer en mí incluso en los momentos en los que el camino parecía difícil. Todo lo que soy hoy es reflejo de los valores, la fortaleza y el ejemplo que me han brindado.

A mis hermanos, por su compañía, por cada palabra de aliento y por estar presentes en los momentos más importantes de mi vida. Su apoyo y cariño han sido una fuente constante de motivación para seguir adelante.

A mis abuelitos, por su ternura, sabiduría y amor infinito, por enseñarme con su ejemplo el valor de la familia, la humildad y la perseverancia. Y de manera muy especial, a mis abuelitos que hoy me acompañan desde el cielo; aunque ya no estén físicamente, su recuerdo vive en mi corazón y su amor sigue guiando cada uno de mis pasos. Este logro también les pertenece, porque fueron y seguirán siendo una parte fundamental de mi vida.

A todos ustedes, con profundo amor y gratitud, les dedico este trabajo.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas las personas que formaron parte de este proceso y que, de una u otra manera, contribuyeron a la culminación de este trabajo de investigación.

En primer lugar, a mis padres y a mi familia, por su apoyo incondicional, paciencia y comprensión durante este exigente camino académico. Gracias por ser mi refugio en los momentos de dificultad y por impulsarme siempre a dar lo mejor de mí.

A mis profesores de la maestría en geotecnia, por compartir generosamente sus conocimientos, experiencias y enseñanzas, las cuales han sido fundamentales para mi desarrollo profesional. Su guía y exigencia académica han sido clave en la construcción de este trabajo.

Un agradecimiento muy especial a Bernardo Álvarez, por su acompañamiento constante, su dedicación y su calidad humana. Su guía como mentor fue esencial durante todo este proceso; gracias por su paciencia, por sus valiosos aportes y por motivarme a alcanzar un nivel más alto en cada etapa de esta investigación.

A mis amigos que me dio la maestría, con quienes compartí este camino, gracias por su apoyo, compañerismo y por cada momento de aprendizaje compartido. Juntos enfrentamos retos, intercambiamos ideas y crecimos tanto a nivel académico como personal. Su presencia hizo que este proceso fuera más enriquecedor y significativo.

A todas aquellas personas que, con palabras de aliento, apoyo o colaboración, hicieron más llevadero este camino, les extiendo mi más sincero agradecimiento.

Finalmente, agradezco a Dios y  a la vida por permitirme alcanzar esta meta y por brindarme la oportunidad de seguir creciendo como persona demostrándole a la niña que vive en mí que tan lejos puede llegar si se lo propone.

# ÍNDICE GENERAL

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN ..... 13
1. INTRODUCCIÓN ..... 13
1.1 Planteamiento del Problema ..... 14
1.1.1 Importancia del Tema en el Contexto local/nacional/regional ..... 17
1.2 Justificación ..... 19
1.3 Pregunta(s) de Investigación ..... 20
1.4 Objeto de Estudio ..... 20
1.5 Objetivos ..... 21
1.5.1 Objetivo General ..... 21
1.5.2 Objetivos Específicos ..... 21
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO ..... 22
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA ..... 22
2.1 Estado del Arte ..... 22
2.2 Marco Teórico ..... 25
2.2.1 Suelos arcillosos y problemática geotécnica ..... 25
2.2.2 Estabilización de suelos en ingeniería geotécnica ..... 26
2.2.3 Ceniza volcánica: origen, composición y propiedades ..... 27
2.2.4 Mecanismos de estabilización suelo–ceniza volcánica ..... 28
2.2.5 Estudios internacionales sobre estabilización con ceniza volcánica ..... 28
2.2.6 Investigaciones nacionales en el contexto ecuatoriano ..... 29
2.2.7 Vacíos de investigación y aporte del presente estudio ..... 29
2.2.8 Clasificación y comportamiento mecánico de suelos arcillosos ..... 30
2.2.9 Reacciones puzolánicas y formación de compuestos cementantes ..... 31

2.2.10 Implicaciones ambientales y económicas del uso de ceniza volcánica ..... 33
2.2.11 Control de calidad experimental ..... 33
2.2.12 Limitaciones del estudio ..... 34
2.2.13 Justificación metodológica de los ensayos seleccionados ..... 35
CAPITULO III. METODOLOGÍA ..... 36
3. MARCO METODOLÓGICO ..... 36
3.1 Tipo de estudio ..... 36
3.2 Técnicas ..... 36
3.3 Operacionalización de variables ..... 37
3.4 Fases de ejecución ..... 37
3.5 Diseño de la investigación ..... 38
3.6 Procedimiento de revisión documental ..... 39
3.7 Operacionalización de variables ..... 39
3.7.1 Variable independiente ..... 39
3.7.2 Variables dependientes ..... 39
3.7.3 Materiales utilizados ..... 40
3.8 Preparación de las mezclas suelo–ceniza volcánica ..... 40
3.9 Ensayos de laboratorio ..... 41
3.9.1 Ensayos de clasificación (SUCS) ..... 41
3.9.2 Ensayo de compactación ..... 41
3.9.3 Ensayos de resistencia mecánica ..... 41
3.10 Procedimiento experimental ..... 42
3.10.1 Análisis de resultados ..... 42
3.10.2 Consideraciones éticas y técnicas ..... 42
3.11 Metodología experimental ..... 42
3.11.1 Materiales ..... 42
3.11.2 Equipos utilizados ..... 43

3.11.3 Preparación de muestras ..... 44
3.12 Ensayo de compactación Proctor modificado ..... 44
3.13 Ensayo de expansión libre ..... 45
3.14 Ensayo de compresión simple (CS) ..... 46
3.15 Determinación del porcentaje óptimo de ceniza volcánica ..... 47
3.15.1 Descripción detallada del proceso de muestreo ..... 47
3.15.2 Caracterización física inicial del suelo natural ..... 48
3.15.3 Procedimiento de secado, disgregación y tamizado ..... 49
3.15.4 Preparación y acondicionamiento de la ceniza volcánica ..... 49
3.15.5 Definición de los porcentajes de mezcla ..... 50
3.15.6 Proceso de mezclado y homogenización ..... 50
3.15.7 Curado de las muestras ..... 51
3.16 Evaluación del comportamiento volumétrico ..... 51
3.17 Tratamiento estadístico de los datos ..... 52
3.18 Criterios para la determinación del porcentaje óptimo ..... 52
3.19 Reproducibilidad y validación experimental ..... 53
3.20 Criterios ambientales considerados en la investigación ..... 53
3.21 Limitaciones ampliadas del estudio ..... 54
CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN ..... 55
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN ..... 55
4.1 RESULTADOS ..... 55
4.1.1 Caracterizar física y químicamente la ceniza volcánica proveniente de fuentes locales. ..... 55
4.1.2 Determinar las propiedades geotécnicas iniciales de los suelos arcillosos seleccionados. ..... 58
4.1.3 Diseñar mezclas de suelo-ceniza en diferentes proporciones y realizar ensayos de laboratorio (límites de Atterberg, Proctor, corte directo, etc.). ..... 61

4.1.4 Comparar los resultados obtenidos con los de suelos estabilizados con materiales convencionales. ..... 63
4.1.5 Identificar las zonas del Ecuador con mayor disponibilidad de ceniza volcánica y su accesibilidad para fines constructivos. ..... 66
4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS ..... 69
4.3 DISCUSIÓN ..... 71
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... 76
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... 76
5.1 CONCLUSIONES ..... 76
5.2 RECOMENDACIONES ..... 78
6. BIBLIOGRAFÍA ..... 80
7. Anexos ..... 88

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Equipo utilizado para compactar la muestra para el ensayo de compresión simple ..... 88
Ilustración 2. Procedimiento de cómo se realizó las probetas para ensayo de compresión simple ..... 89
Ilustración 3. Equipo Utilizado Para El Ensayo De Compresión Simple ..... 89
Ilustración 4. Equipo Utilizado Para El Ensayo De Expansión Libre ..... 90

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Equipos utilizados en la investigación ..... 43

Tabla 4-1. Resultados de los ensayos de laboratorio ..... 55

Tabla 4-2. Resultados de los ensayos geotécnicos ..... 58

Tabla 4-3. Resultados de las mezclas suelo–ceniza ..... 61

Tabla 4-4. Tabla comparativa de resultados de mezclas suelo–ceniza ..... 64

Tabla 4-5. Zonas con mayor disponibilidad de ceniza volcánica en Ecuador ..... 66

Tabla 7-1. Datos de los anillos para el ensayo de expansión libre ..... 90

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Ensayo De Resistencia A La Compresión Simple ..... 91

Anexo 2. Ensayo De Resistencia A La Compresión Simple ..... 104

Anexo 3. Expansión Libre ..... 114

Anexo 4. Gravedad especifica de solidos ..... 130

Anexo 5. Resultados del ensayo ..... 130

## RESUMEN

La estabilización de suelos arcillosos representa un desafío importante en la ingeniería geotécnica, especialmente en regiones donde predominan materiales con alta plasticidad y susceptibilidad a cambios volumétricos. En este contexto, el presente estudio evaluó el uso de ceniza volcánica proveniente de fuentes locales como material alternativo para la mejora de las propiedades geotécnicas de suelos arcillosos. La investigación incluyó la caracterización física y química de la ceniza volcánica, la determinación de las propiedades geotécnicas iniciales del suelo, el diseño de mezclas suelo–ceniza en diferentes proporciones y la realización de ensayos de laboratorio como límites de Atterberg, compactación Proctor, resistencia a la compresión simple y expansión libre.

Los resultados obtenidos evidenciaron que la incorporación de ceniza volcánica influye positivamente en el comportamiento geotécnico del suelo, reduciendo el potencial de expansión y mejorando en algunos casos la resistencia mecánica del material. Entre las dosificaciones analizadas, las mezclas con porcentajes moderados de ceniza mostraron un desempeño favorable en términos de estabilidad volumétrica y capacidad portante. Asimismo, se identificaron las principales zonas del Ecuador con disponibilidad de ceniza volcánica, destacando su potencial para ser utilizada como recurso local en proyectos de infraestructura.

En general, los resultados de esta investigación demuestran que la ceniza volcánica constituye una alternativa viable, sostenible y económicamente favorable para la estabilización de suelos arcillosos, contribuyendo al desarrollo de soluciones constructivas más eficientes y ambientalmente responsables en el ámbito de la ingeniería civil.



**Palabras clave:** ceniza volcánica, estabilización de suelos, suelos arcillosos, propiedades geotécnicas, ingeniería geotécnica.

## ABSTRACT

The stabilization of clayey soils represents a significant challenge in geotechnical engineering, particularly in regions where soils exhibit high plasticity and susceptibility to volumetric changes. In this context, this study evaluated the use of locally sourced volcanic ash as an alternative material for improving the geotechnical properties of clay soils. The research included the physical and chemical characterization of volcanic ash, determination of the initial geotechnical properties of the soil, the design of soil–ash mixtures in different proportions, and the performance of laboratory tests such as Atterberg limits, Proctor compaction, unconfined compressive strength, and free swell tests.

The results obtained showed that the incorporation of volcanic ash positively influences the geotechnical behavior of the soil by reducing its expansion potential and, in some cases, improving the mechanical strength of the material. Among the evaluated mixtures, moderate percentages of volcanic ash exhibited favorable performance in terms of volumetric stability and bearing capacity. Additionally, the main regions of Ecuador with significant volcanic ash availability were identified, highlighting their potential for use as a local resource in infrastructure projects.

Overall, the findings of this research demonstrate that volcanic ash represents a viable, sustainable, and economically advantageous alternative for the stabilization of clay soils, contributing to the development of more efficient and environmentally responsible construction solutions in civil engineering.



**Keywords:** volcanic ash, soil stabilization, clay soils, geotechnical properties, geotechnical engineering.

# GLOSARIO

**Arcilla:** Material fino compuesto principalmente por minerales de silicatos hidratados de aluminio. Se caracteriza por su alta plasticidad y por su capacidad de expandirse o contraerse dependiendo del contenido de humedad.

**Ceniza volcánica:** Material piroclástico fino expulsado durante una erupción volcánica, compuesto principalmente por partículas de vidrio volcánico, sílice, aluminio y otros minerales. Puede presentar propiedades puzolánicas útiles para la estabilización de suelos.

**Estabilización de suelos:** Proceso mediante el cual se mejoran las propiedades físicas, mecánicas o químicas de un suelo mediante la adición de materiales estabilizantes, con el objetivo de incrementar su resistencia, durabilidad y capacidad portante.

**Geomaterial:** Material natural de origen geológico utilizado en obras de ingeniería civil, como suelos, rocas o depósitos volcánicos.

**Granulometría:** Distribución del tamaño de partículas que componen un suelo o material granular, determinada mediante ensayos de laboratorio como el tamizado o el análisis por sedimentación.

**Límite líquido (LL):** Contenido de humedad en el cual un suelo pasa del estado plástico al estado líquido, determinado mediante el ensayo de límites de Atterberg.

**Límite plástico (LP):** Contenido de humedad en el cual un suelo cambia de estado semisólido a estado plástico.

**Índice de plasticidad (IP):** Diferencia entre el límite líquido y el límite plástico (IP = LL − LP). Indica el rango de humedad en el cual el suelo presenta comportamiento plástico.

**Compactación:** Proceso mediante el cual se incrementa la densidad de un suelo al reducir los vacíos entre partículas mediante la aplicación de energía mecánica.

**Proctor estándar y modificado:** Ensayos de laboratorio utilizados para determinar la densidad seca máxima y la humedad óptima de un suelo bajo diferentes niveles de energía de compactación.

**Resistencia a la compresión simple:** Capacidad de un suelo cohesivo para resistir esfuerzos de compresión sin confinamiento lateral.

**Expansión del suelo:** Incremento volumétrico que experimenta un suelo cuando absorbe agua, fenómeno común en suelos arcillosos.

**Índice de Soporte de California (CBR):** Parámetro utilizado para evaluar la capacidad portante de los suelos, especialmente en el diseño de pavimentos.

**Reacción puzolánica:** Proceso químico en el cual materiales ricos en sílice o alúmina reaccionan con compuestos de calcio en presencia de agua, formando productos cementantes que aumentan la resistencia del material.

**Subrasante:** Capa de suelo natural o mejorado sobre la cual se construye la estructura de un pavimento.

**Capacidad portante:** Capacidad de un suelo para soportar cargas sin experimentar fallas o deformaciones excesivas.

# CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

## 1. INTRODUCCIÓN

La ingeniería geotécnica enfrenta, de manera recurrente, el desafío de mejorar el comportamiento mecánico de suelos con propiedades desfavorables para la construcción de infraestructura. En el contexto ecuatoriano, esta problemática se acentúa debido a la amplia presencia de suelos arcillosos de alta plasticidad, los cuales exhiben baja capacidad portante, elevada compresibilidad y una marcada sensibilidad a las variaciones de humedad. Estas características condicionan negativamente el desempeño de obras civiles, especialmente en zonas rurales y periurbanas donde los recursos técnicos y económicos son limitados.

Paralelamente, Ecuador es un país con intensa actividad volcánica, lo que ha dado lugar a la acumulación significativa de ceniza volcánica en distintas regiones del territorio nacional. Este material, considerado en muchos casos como un residuo natural sin aprovechamiento definido, presenta una composición mineralógica rica en sílice y alúmina, lo que le confieren potencial reactividad frente a ciertos tipos de suelos. No obstante, su uso en aplicaciones geotécnicas, particularmente como agente estabilizante de suelos arcillosos, no ha sido suficientemente investigado ni sistematizado a nivel nacional.

Tradicionalmente, la estabilización de suelos se ha realizado mediante el uso de aditivos como el cemento o la cal, los cuales, si bien resultan efectivos desde el punto de vista técnico, implican elevados costos económicos y un impacto ambiental considerable asociado a su producción y transporte. En este escenario, la búsqueda de materiales alternativos, de origen local y con menor huella ambiental, se convierte en una necesidad prioritaria para el desarrollo de una geotecnia sostenible en el país.

La presente investigación se orienta a evaluar el uso de la ceniza volcánica como material alternativo para la estabilización de suelos arcillosos, mediante un programa experimental de laboratorio que permita analizar su influencia sobre las principales propiedades geotécnicas del suelo. El estudio se enfoca en suelos arcillosos provenientes de la ciudad de Loja y en ceniza volcánica recolectada en el sector de la Mitad del Mundo-Quito, con el objetivo de establecer criterios técnicos que respalden su aplicabilidad en proyectos de ingeniería civil.

Este trabajo pretende aportar conocimiento científico y técnico que contribuya al aprovechamiento de recursos naturales disponibles en el Ecuador, promoviendo soluciones constructivas más económicas, ambientalmente responsables y adaptadas a las condiciones locales. Asimismo, busca generar información que sirva de base para futuras investigaciones y para el eventual desarrollo de lineamientos normativos relacionados con el uso de materiales alternativos en la estabilización de suelos.

## 1.1 Planteamiento del Problema

El desarrollo de la infraestructura vial y civil a nivel mundial depende fundamentalmente de la capacidad portante y la estabilidad del suelo de cimentación o subrasante. Cuando las estructuras se asientan sobre suelos deficientes, se producen deformaciones prematuras, agrietamientos y fallos estructurales que reducen drásticamente la vida útil de los proyectos, incrementando de manera exponencial los costos de mantenimiento y reconstrucción (Bhardwaj y Sharma, 2022). En el ámbito de la ingeniería geotécnica, la estabilización de suelos surge como un procedimiento indispensable para mejorar las propiedades mecánicas y físicas de estos terrenos antes de cualquier intervención constructiva.

Dentro de los suelos problemáticos, los suelos arcillosos representan un desafío constante para la ingeniería debido a su alta plasticidad y susceptibilidad a los cambios de humedad. Estos suelos, ricos en minerales arcillosos expansivos, experimentan severos cambios volumétricos: se expanden cuando absorben agua y se contraen durante los periodos de sequía (Ikeagwuani y Nwonu, 2019). Esta inestabilidad dimensional provoca una baja capacidad de soporte (CBR) y una alta compresibilidad, haciendo que los suelos arcillosos en su estado natural sean inadecuados para soportar cargas estructurales sin un tratamiento previo adecuado. Sin embargo, no todos los suelos arcillosos presentan comportamiento expansivo. Aunque las arcillas poseen partículas de tamaño fino y alta capacidad de retener agua, la expansividad depende principalmente de su composición mineralógica, siendo las arcillas ricas en minerales del grupo de las esmectitas (especialmente la montmorillonita) las que presentan los mayores cambios volumétricos frente a variaciones en el contenido de humedad. En contraste, minerales como la caolinita y, en menor medida, la illita, exhiben una capacidad de expansión considerablemente menor. Además de la mineralogía, factores como el índice de plasticidad, la densidad seca, la estructura del suelo, el esfuerzo de confinamiento y las condiciones ambientales influyen significativamente en el potencial expansivo de un suelo. Por ello, la presencia de arcilla por sí sola no constituye un criterio suficiente para clasificar un suelo como expansivo, siendo necesaria una caracterización geotécnica y mineralógica que permita evaluar su comportamiento de manera confiable. (Fityus & Buzzi, 2009).

Tradicionalmente, la estabilización de este tipo de suelos se ha realizado mediante la incorporación de aditivos químicos convencionales, como el cemento Portland y la cal. Aunque estos materiales son altamente efectivos para mejorar la resistencia y reducir la plasticidad, su uso conlleva una importante problemática ambiental y económica. La

producción de cemento y cal es responsable de aproximadamente el 8% de las emisiones globales de dióxido de carbono ($CO_2$ ), además de requerir un alto consumo energético (Vincevica et al., 2021). Asimismo, el costo de estos estabilizadores comerciales encarece significativamente los presupuestos de las obras públicas y privadas, especialmente en países en vías de desarrollo.

Ante este panorama ecológico y económico, la comunidad científica ha volcado sus esfuerzos hacia la búsqueda de materiales alternativos y sostenibles, promoviendo el uso de subproductos industriales o geomateriales naturales con propiedades puzolánicas. La ceniza volcánica ha destacado recientemente en la literatura como un material estabilizador prometedor debido a su alto contenido de sílice y alúmina reactiva, los cuales, en presencia de agua y los compuestos del suelo, pueden generar reacciones cementantes secundarias que mejoran la microestructura y la resistencia del terreno (Hamada et al., 2023).

El Ecuador, al estar ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, posee una de las mayores densidades de volcanes activos en el mundo (como el Sangay, Tungurahua y Cotopaxi). Las constantes erupciones generan miles de toneladas de ceniza volcánica que se dispersan en diversas regiones del país, provocando graves problemas ambientales, de salud pública y afectaciones a la agricultura (Simbaña et al., 2025). Actualmente, este material es considerado un desecho molesto que debe ser removido y depositado en vertederos, sin que se aproveche su potencial intrínseco como recurso constructivo, a pesar de su amplia disponibilidad y accesibilidad en el territorio nacional.

A pesar de la abundancia de este recurso en el país y del conocimiento general sobre sus propiedades puzolánicas, la información disponible sobre su aplicación en la

estabilización de suelos para infraestructura vial en Ecuador sigue siendo limitada. La literatura señala que el comportamiento estabilizador de la ceniza varía significativamente en función de su origen geológico, composición físico-química y características iniciales del suelo receptor (Rifa'i & Yasufuku, 2014). Aunque existen investigaciones relacionadas con el uso de materiales puzolánicos en la estabilización de suelos, aún se requiere mayor evidencia experimental que permita establecer dosificaciones óptimas y criterios de diseño adaptados a las condiciones geotécnicas locales.

Por lo tanto, el problema central radica en el desaprovechamiento de un abundante recurso natural local (la ceniza volcánica) frente a la necesidad imperante de encontrar soluciones de estabilización geotécnica que sean económicas y sostenibles para los suelos arcillosos problemáticos en Ecuador. Resulta indispensable caracterizar este material, diseñar mezclas experimentales y evaluar rigurosamente su eficacia estabilizadora en comparación con los métodos convencionales, con el fin de transformar un desecho ambiental en una alternativa técnica y ecológica viable para la construcción de infraestructura.

### 1.1.1 Importancia del Tema en el Contexto local/nacional/regional

La investigación sobre el uso de ceniza volcánica para la estabilización de suelos arcillosos reviste una importancia estratégica multidimensional para el Ecuador. En el contexto nacional, el desarrollo y mantenimiento de la infraestructura vial constituye uno de los rubros más fuertes del presupuesto del Estado. Gran parte del territorio ecuatoriano, especialmente en las regiones de la Costa, la Amazonía y ciertos valles interandinos, presenta suelos arcillosos de alta plasticidad. Estos suelos deficientes son los causantes directos del deterioro prematuro de carreteras y cimentaciones, lo que obliga a realizar intervenciones frecuentes (Tafida et al., 2024). Tradicionalmente, la solución técnica ha dependido de la cal

y el cemento Portland, materiales que, además de tener un alto costo comercial, generan un impacto ambiental negativo debido a que la industria cementera es responsable de una gran parte de las emisiones globales de $CO_2$ (Andrew, 2019). Validar una alternativa local representaría un ahorro sustancial para las arcas públicas, permitiendo ampliar la cobertura de obras viales bajo criterios de sostenibilidad.

Desde una perspectiva regional y local, la importancia del tema radica en la geografía volcánica del país. Provincias ubicadas en la Sierra central (como Chimborazo, Tungurahua, Cotopaxi y Pichincha) conviven permanentemente con la actividad de volcanes como el Sangay o el Cotopaxi. Las recurrentes emisiones de ceniza generan graves afectaciones a las comunidades, dañando cultivos, afectando la salud y colapsando infraestructuras básicas (Hidalgo et al., 2023). Actualmente, la disposición final de esta ceniza representa un problema logístico para los municipios. Al proponer la utilización de esta ceniza como material constructivo, el proyecto plantea una solución de economía circular: transforma un desecho ambiental problemático en un recurso valioso (geomaterial puzolánico) para el desarrollo de la infraestructura regional (Robayo-Salazar et al., 2019).

En el ámbito científico y tecnológico local, esta investigación tiene una relevancia fundamental para la ingeniería geotécnica ecuatoriana. A pesar de la abundancia empírica de ceniza volcánica y de la comprobación internacional de sus propiedades puzolánicas (Játiva et al., 2021), existe una escasez de normativas y estudios estandarizados dentro del país que regulen su uso como estabilizador de subrasantes. Al generar datos empíricos mediante ensayos de laboratorio rigurosos (límites de Atterberg, ensayo Proctor, CBR y corte directo) y mapear la disponibilidad del material, este trabajo sentará las bases técnicas necesarias para que ingenieros y entidades gubernamentales puedan incorporar la ceniza

volcánica en sus especificaciones técnicas, fomentando prácticas constructivas adaptadas a la realidad geológica del Ecuador.

## 1.2 Justificación

La ejecución de este proyecto de investigación se justifica fundamentalmente por la necesidad de integrar la sostenibilidad ambiental, la viabilidad económica y la eficiencia técnica en los procesos de construcción de infraestructura vial en el Ecuador. Desde una perspectiva ambiental, la industria de la construcción moderna enfrenta el reto de reducir drásticamente su huella de carbono. La estabilización convencional de suelos expansivos depende casi exclusivamente del cemento Portland y la cal, cuya producción emite cantidades alarmantes de gases de efecto invernadero (Posani et al., 2025). La sustitución de estos aglomerantes comerciales por ceniza volcánica un recurso natural no calcinado y abundante disminuye el impacto ecológico de las obras viales. Además, esta propuesta fomenta la economía circular al otorgarle valor agregado a un material que actualmente es considerado un desecho contaminante tras las erupciones volcánicas, mitigando los problemas de disposición final en los municipios afectados (Simbaña et al., 2025).

Desde un punto de vista económico, la construcción y el mantenimiento de carreteras sobre suelos arcillosos deficientes representan una carga financiera significativa para el Estado y los contratistas privados debido a las fallas estructurales por contracción y expansión del terreno (Ikeagwuani y Nwonu, 2019). La adquisición, transporte y aplicación de estabilizadores químicos tradicionales elevan los presupuestos de obra. Al caracterizar e incorporar la ceniza volcánica local como material estabilizador, se plantea una alternativa de bajo costo. Dado que el material está disponible superficialmente en amplias zonas del Ecuador, los costos asociados a su extracción y procesamiento son mínimos frente a los

materiales industrializados, lo que permitiría optimizar los recursos públicos y abaratar los costos por kilómetro de vía estabilizada (Razeghi et al., 2022).

La justificación técnica y metodológica de este estudio radica en la generación de conocimiento científico aplicado a la realidad geológica local. Aunque la literatura internacional ha demostrado que los aluminosilicatos presentes en la ceniza volcánica reaccionan de manera puzolánica mejorando la microestructura de las arcillas (Melentijević et al., 2025), en Ecuador no existen guías técnicas detalladas que especifiquen las dosificaciones óptimas para los suelos locales. Este trabajo proporcionará datos empíricos rigurosos a través de ensayos estandarizados (límites de Atterberg, Proctor, CBR y corte directo). Los resultados obtenidos no solo validarán el comportamiento mecánico de la mezcla suelo-ceniza, sino que servirán como marco de referencia metodológico para que ingenieros, proyectistas y normativas locales integren este material alternativo en futuros diseños de pavimentos y cimentaciones de forma segura y eficiente.

## 1.3 Pregunta(s) de Investigación

¿Cuál es la eficacia técnica de la ceniza volcánica ecuatoriana como material alternativo sostenible para la estabilización de suelos arcillosos, en comparación con el desempeño de los estabilizadores químicos convencionales?

## 1.4 Objeto de Estudio

El objeto de estudio central de esta investigación es el comportamiento físico, mecánico y geotécnico de los suelos arcillosos deficientes tras ser sometidos a un proceso de estabilización mediante la incorporación dosificada de ceniza volcánica local. Este análisis se enfoca específicamente en evaluar cómo la interacción material y el potencial puzolánico de la ceniza modifican las propiedades fundamentales del terreno natural tales como la plasticidad (límites de Atterberg), la relación humedad-densidad (ensayo Proctor) y

la capacidad de soporte y resistencia al corte (CBR y corte directo), con el fin de determinar la viabilidad técnica de esta mezcla como alternativa sostenible frente a los métodos de estabilización convencionales empleados en la infraestructura vial y civil del Ecuador.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo General

- Evaluar la eficacia de la ceniza volcánica como material alternativo para la estabilización de suelos arcillosos en Ecuador, mediante ensayos de laboratorio y análisis comparativos.

### 1.5.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar física y químicamente la ceniza volcánica proveniente de fuentes locales.
- Determinar las propiedades geotécnicas iniciales de los suelos arcillosos seleccionados.
- Diseñar mezclas de suelo-ceniza en diferentes proporciones y realizar ensayos de laboratorio (límites de Atterberg, Proctor, CBR, corte directo, etc.).
- Comparar los resultados obtenidos con los de suelos estabilizados con materiales convencionales.
- Identificar las zonas del Ecuador con mayor disponibilidad de ceniza volcánica y su accesibilidad para fines constructivos.

# CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

## 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 2.1 Estado del Arte

A nivel global, la búsqueda de alternativas sostenibles para la estabilización de subrasantes ha impulsado numerosas investigaciones centradas en el uso de geomateriales naturales. Diversos autores han demostrado que la ceniza volcánica, debido a su composición rica en aluminosilicatos, representa un estabilizador ecológico altamente efectivo frente a los aglomerantes tradicionales que generan altas emisiones de carbono (Játiva et al., 2021). De hecho, la integración de estos materiales piroclásticos en proyectos de ingeniería civil no solo mitiga el impacto ambiental, sino que promueve la economía circular al reutilizar recursos naturales abundantes en zonas de actividad tectónica (Ali y Atemimi, 2024).

En cuanto a la modificación de las propiedades físicas iniciales del suelo, investigaciones recientes han evaluado el impacto directo de la ceniza volcánica en los límites de consistencia de las arcillas. Estudios de laboratorio confirman que la adición progresiva de ceniza reduce significativamente el límite líquido y el índice de plasticidad del suelo, mejorando su trabajabilidad (Huvaj y Uyeturk, 2018). Este fenómeno se atribuye a la sustitución de partículas finas arcillosas por partículas de ceniza de mayor tamaño y menor afinidad por el agua, lo que altera positivamente la granulometría de la matriz del suelo (Yohanna et al., 2022).

Desde la perspectiva del comportamiento mecánico, la capacidad portante de los suelos deficientes experimenta mejoras notables al ser tratados con este geomaterial.

Definiéndose como capacidad portante a la carga por unidad de área que el suelo puede soportar de manera segura sin experimentar falla por corte o deformaciones inadmisibles.

Evaluaciones del Índice de Soporte de California (CBR) han reportado incrementos superiores al 40% en arcillas estabilizadas con dosificaciones ótimas de ceniza volcánica bajo condiciones de inmersión (Troncoso, 2024). Asimismo, ensayos de compresión simple demuestran que, a medida que aumenta el tiempo de curado, la resistencia a la rotura se incrementa de manera sostenida debido al desarrollo paulatino de reacciones puzolánicas (Khosravifardshirazi, 2024).

El control de la inestabilidad volumétrica en suelos expansivos es otro de los enfoques principales en la literatura actual. Se ha comprobado que la incorporación de ceniza volcánica disminuye drásticamente el potencial de hinchamiento y la presión de expansión de las arcillas ricas en montmorillonita al ser sometidas a ciclos de humedecimiento (Khan et al., 2022). Este beneficio técnico reduce el riesgo de fisuración y asentamientos diferenciales en cimentaciones superficiales y pavimentos rígidos construidos sobre subrasantes reactivas (Abu Yosef, 2024).

Para comprender estos cambios a nivel fundamental, múltiples estudios han recurrido al análisis microestructural mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (XRD). Estos análisis revelan que la sílice amorfa de la ceniza reacciona con el calcio disponible, formando geles de silicato de calcio hidratado (C-S-H) que rellenan los vacíos intersticiales y densifican la estructura del suelo (Salimi et al., 2021). Esta cementación secundaria es la responsable directa del aumento de la cohesión aparente y la disminución de la permeabilidad en la mezcla estabilizada (Turan et al., 2022).

A pesar del potencial de la ceniza por sí sola, algunos investigadores han optado por sistemas de estabilización híbrida, combinando la ceniza volcánica con porcentajes mínimos de cal o cemento Portland. Los resultados indican que la cal actúa como un catalizador alcalino que acelera la disolución de la sílice y la alúmina de la ceniza, optimizando la reacción puzolánica a edades tempranas (Indiramma et al., 2020). Este enfoque mixto permite reducir hasta en un 60% el uso de estabilizadores químicos tradicionales sin sacrificar los requerimientos de resistencia exigidos por las normativas viales (Musa et al., 2020).

En el contexto geográfico latinoamericano y regiones con cordilleras volcánicas activas, el interés por caracterizar las cenizas locales ha crecido exponencialmente. Investigaciones desarrolladas en la región andina y centroamericana han mapeado las propiedades fisicoquímicas de diferentes depósitos volcánicos, concluyendo que la reactividad de la ceniza varía significativamente según su origen magmático y el tiempo de exposición a la intemperie (Carrera et al., 2025). Estos estudios regionales enfatizan la necesidad de calibrar las dosificaciones empíricamente para cada tipo de arcilla y depósito volcánico local (Rendón et al., 2020).

La viabilidad de la ceniza volcánica se ha consolidado mediante análisis de ciclo de vida (ACV) y evaluaciones de costo-beneficio. La literatura concluye que la estabilización con ceniza volcánica reduce significativamente los costos directos de construcción en zonas próximas a depósitos naturales, eliminando los gastos logísticos asociados a la importación de cemento (Hossain et al., 2022). Además, la huella de carbono del proceso constructivo disminuye considerablemente, posicionando a este método como una solución geotécnica

clave para el desarrollo de infraestructuras verdes en la próxima década (Fadmoro et al., 2022).

## 2.2 Marco Teórico

### 2.2.1 Suelos arcillosos y problemática geotécnica

Los suelos arcillosos constituyen uno de los materiales geotécnicos más complejos desde el punto de vista ingenieril, debido a su comportamiento altamente dependiente del contenido de humedad, su estructura mineralógica y su historia de esfuerzos (Mitchell y Soga, 2005). En el contexto de la ingeniería civil, estos suelos suelen asociarse a problemas de baja capacidad portante, elevada plasticidad, deformaciones diferidas y variaciones volumétricas significativas, lo que compromete la estabilidad y durabilidad de las obras construidas sobre ellos (Holtz et al., 1981).

Desde el punto de vista mineralógico, las arcillas están compuestas principalmente por minerales de estructura laminar, como la caolinita, illita y montmorillonita, cuya capacidad de adsorción de agua influye directamente en sus propiedades índice y mecánicas (Mitchell y Soga, 2005). En particular, las arcillas expansivas, ricas en montmorillonita, presentan una marcada tendencia a la expansión y contracción volumétrica frente a ciclos de humedecimiento y secado, generando esfuerzos adicionales sobre las estructuras superficiales y profundas (Bell, 1996).

En Ecuador, la presencia de suelos arcillosos de alta plasticidad es frecuente en diversas regiones del país, particularmente en la Costa y en ciertas zonas de la Sierra y la Amazonía, donde los procesos geológicos, sedimentarios y volcánicos han contribuido a la formación de depósitos finos de comportamiento geotécnico complejo (Vigán et al., 2025). Estas condiciones geológicas, combinadas con un régimen climático variable, intensifican

los problemas asociados al comportamiento mecánico de estos suelos, especialmente en infraestructuras de bajo costo y caminos rurales.

### 2.2.2 Estabilización de suelos en ingeniería geotécnica

La estabilización de suelos es una técnica ampliamente utilizada en ingeniería geotécnica con el objetivo de mejorar las propiedades físicas y mecánicas de suelos naturales que, en su estado original, no cumplen con los requisitos de desempeño para una obra determinada (Ingles y Metcalf, 1972). Esta mejora puede lograrse mediante procedimientos mecánicos, químicos o una combinación de ambos, dependiendo del tipo de suelo y de las exigencias del proyecto (Sherwood, 1993).

La estabilización mecánica se basa principalmente en la modificación de la granulometría del suelo, mediante la adición de materiales granulares o el control del proceso de compactación. Por su parte, la estabilización química implica la incorporación de agentes que reaccionan con los componentes del suelo, generando nuevos compuestos que incrementan la resistencia, reducen la plasticidad y mejoran la durabilidad del material tratado (Bell, 1996).

Tradicionalmente, los estabilizantes químicos más utilizados han sido el cemento Portland y la cal. No obstante, el uso intensivo de estos materiales presenta limitaciones asociadas a su costo, disponibilidad y elevado impacto ambiental, particularmente en términos de emisiones de dióxido de carbono (Rivera et al., 2020). particularmente en términos de emisiones de dióxido de carbono. Esta situación ha motivado el desarrollo de investigaciones orientadas a la identificación de materiales alternativos con propiedades puzolánicas o cementantes, capaces de ofrecer un desempeño técnico adecuado con una menor huella ambiental.

### 2.2.3 Ceniza volcánica: origen, composición y propiedades

La ceniza volcánica es un material piroclástico fino que se genera durante erupciones volcánicas explosivas como resultado de la fragmentación rápida del magma y de las rocas del conducto volcánico (Jiménez et al., 2019). Su tamaño de partícula suele ser inferior a 2 mm, y su morfología es generalmente angular, lo que influye en su comportamiento físico cuando se mezcla con suelos naturales.

Desde el punto de vista químico, la ceniza volcánica está compuesta principalmente por sílice ($SiO_2$) y alúmina ($Al_2O_3$), acompañadas de óxidos de hierro, calcio, sodio y potasio. Esta composición le confiere un potencial puzolánico significativo, permitiendo que, bajo condiciones adecuadas de humedad y temperatura, se desarrollen reacciones químicas que favorecen la formación de compuestos cementantes secundarios (Licuy y Román, 2020).

En el contexto ecuatoriano, existen abundantes depósitos de ceniza volcánica originados por eventos eruptivos históricos y prehistóricos de volcanes como Cotopaxi, Tungurahua, Reventador y Sangay. Estos depósitos se encuentran ampliamente distribuidos en diversas regiones del país y constituyen una fuente potencial de materiales con propiedades puzolánicas. A pesar de su disponibilidad, su aprovechamiento en proyectos de ingeniería civil ha sido limitado en comparación con otros materiales estabilizantes convencionales, por lo que representan un recurso con potencial para aplicaciones geotécnicas. (Rivera et al., 2020).

### 2.2.4 Mecanismos de estabilización suelo–ceniza volcánica

La estabilización de suelos arcillosos mediante la incorporación de ceniza volcánica se basa en una combinación de mecanismos físicos y químicos. Desde el punto de vista físico, la ceniza volcánica actúa como un material de relleno fino que modifica la distribución granulométrica del suelo, reduciendo la proporción de partículas arcillosas activas y mejorando la compactación del material (Sherwood, 1993).

Desde una perspectiva química, la presencia de óxidos reactivos en la ceniza volcánica favorece el desarrollo de reacciones puzolánicas en presencia de agua, lo que conduce a la formación de silicatos y aluminatos de calcio. Estos compuestos contribuyen al aumento de la cohesión aparente y de la resistencia mecánica del suelo estabilizado (Bell, 1996).

Adicionalmente, la incorporación de ceniza volcánica puede reducir el índice de plasticidad de los suelos arcillosos mediante mecanismos fisicoquímicos asociados al intercambio catiónico, la floculación de partículas y la formación de productos cementantes derivados de reacciones puzolánicas. Estos procesos favorecen una estructura más estable y menos sensible a las variaciones de humedad, contribuyendo al control de la expansión volumétrica y a la mejora del comportamiento geotécnico del suelo.

### 2.2.5 Estudios internacionales sobre estabilización con ceniza volcánica

A nivel internacional, diversos estudios han evaluado el uso de materiales volcánicos como agentes estabilizantes de suelos, particularmente en países con alta actividad volcánica. Investigaciones desarrolladas en México, Chile, Indonesia y Colombia han reportado mejoras significativas en las propiedades geotécnicas de suelos arcillosos tratados con ceniza volcánica (Serrano, 2020).

Los resultados más relevantes incluyen la disminución del límite líquido y del índice de plasticidad, así como el incremento de la resistencia al esfuerzo cortante y de la capacidad portante. Sin embargo, estos estudios también señalan que el desempeño del material estabilizado depende en gran medida de la composición química de la ceniza, de la dosificación empleada y de las condiciones de curado, lo que resalta la necesidad de evaluaciones experimentales específicas para cada contexto geológico.

### 2.2.6 Investigaciones nacionales en el contexto ecuatoriano

En el Ecuador, las investigaciones relacionadas con el uso de ceniza volcánica en la estabilización de suelos son aún incipientes. Algunos estudios realizados por instituciones académicas han explorado su aplicación en mezclas suelo–cemento y suelo–cal, principalmente para obras viales y de infraestructura básica (López, 2021).

Los resultados obtenidos indican que la ceniza volcánica puede contribuir a la reducción de la plasticidad y al incremento de la resistencia mecánica de suelos arcillosos. No obstante, también se ha identificado una variabilidad significativa en el comportamiento del material, asociada al origen volcánico de la ceniza y a sus características mineralógicas, lo que evidencia la necesidad de estudios más sistemáticos y comparativos (Troncoso, 2024).

### 2.2.7 Vacíos de investigación y aporte del presente estudio

A pesar de los avances reportados en la literatura internacional y nacional, persisten vacíos importantes en el conocimiento del comportamiento geotécnico de suelos arcillosos estabilizados con ceniza volcánica en el contexto ecuatoriano. En particular, existe una

limitada evaluación experimental de diferentes proporciones de ceniza y de su efecto sobre un conjunto amplio de propiedades geotécnicas.

El presente estudio busca contribuir a la reducción de estos vacíos mediante un análisis experimental detallado del uso de ceniza volcánica como material estabilizante, empleando suelos arcillosos locales y ensayos de laboratorio normalizados. De esta manera, se espera generar información técnica que respalde la viabilidad de esta alternativa y sirva de base para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en la ingeniería geotécnica ecuatoriana.

### 2.2.8 Clasificación y comportamiento mecánico de suelos arcillosos

El comportamiento mecánico de los suelos arcillosos está estrechamente vinculado a su clasificación geotécnica, la cual permite establecer relaciones entre su composición granulométrica, su plasticidad y su respuesta frente a esfuerzos aplicados. Los sistemas de clasificación más empleados en ingeniería geotécnica son el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el sistema de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), los cuales agrupan los suelos en función de parámetros obtenidos mediante ensayos de laboratorio (Abdullah et al., 2019).

En el sistema SUCS, los suelos arcillosos se clasifican principalmente como CL, CH, ML o MH, dependiendo del límite líquido y del índice de plasticidad. Los suelos tipo CL corresponden a arcillas de baja plasticidad, con comportamiento relativamente estable frente a variaciones de humedad, mientras que los suelos tipo CH presentan alta plasticidad y una mayor susceptibilidad a fenómenos de expansión, contracción y pérdida de resistencia en estado saturado. Desde el punto de vista mecánico, los suelos arcillosos de alta plasticidad suelen presentar valores reducidos de módulo de deformación y una resistencia al corte

dependiente en gran medida de la cohesión aparente y del grado de saturación (Umar et al., 2025).

En términos de respuesta esfuerzo-deformación, las arcillas presentan un comportamiento no lineal caracterizado por una fase inicial aproximadamente elástica seguida de un régimen plástico asociado a la reorganización interna de las partículas. Este comportamiento está fuertemente influenciado por factores como el contenido de humedad, el grado de saturación, la composición mineralógica, la estructura del suelo y su historia de esfuerzos, los cuales condicionan su resistencia y deformabilidad (Mitchell & Soga, 2005).

En condiciones no drenadas, típicas de cargas rápidas, la resistencia al corte está controlada principalmente por la cohesión no drenada, mientras que en condiciones drenadas adquiere relevancia el ángulo de fricción interna (Zhang et al., 2019).

El conocimiento de estas características resulta fundamental para la selección de técnicas de estabilización, ya que permite identificar los mecanismos responsables del comportamiento geotécnico de las arcillas y evaluar la efectividad de materiales estabilizantes, como la ceniza volcánica, en la reducción de la plasticidad y el mejoramiento de la resistencia mecánica del suelo. (Afolagboye et al., 2024).

### 2.2.9 Reacciones puzolánicas y formación de compuestos cementantes

Las reacciones puzolánicas constituyen el principal mecanismo químico asociado a la mejora de las propiedades mecánicas en sistemas suelo–ceniza volcánica. Estas reacciones se producen cuando materiales ricos en sílice y alúmina reaccionan con hidróxido de calcio

en presencia de agua, formando productos cementantes secundarios, tales como silicatos de calcio hidratados (CSH) y aluminatos de calcio hidratados (CAH) (Basar et al., 2025).

En el contexto de la estabilización de suelos, estas reacciones generan una progresiva cementación de las partículas, lo que se traduce en un incremento de la cohesión aparente y en una reducción de la plasticidad del sistema. Adicionalmente, la formación de estos compuestos contribuye a disminuir la permeabilidad del suelo estabilizado, al rellenar los poros y reducir la conectividad entre vacíos (Groot et al., 2022).

La velocidad y magnitud de las reacciones puzolánicas dependen de diversos factores, entre los cuales se incluyen la finura del material reactivo, su composición química, el contenido de humedad y la temperatura de curado. En el caso de la ceniza volcánica, su estructura amorfa y su elevado contenido de sílice favorecen este tipo de reacciones, siempre que exista disponibilidad de calcio en el sistema, ya sea proveniente del propio suelo o de aditivos complementarios (Hong et al., 2023).

Desde una perspectiva microestructural, la presencia de ceniza volcánica puede favorecer la floculación y agregación de las partículas arcillosas mediante la modificación de las interacciones electroquímicas y la reducción del espesor de la doble capa difusa. Estos procesos promueven una disposición más estable de las partículas, disminuyendo su susceptibilidad a la dispersión y contribuyendo a la mejora de las propiedades mecánicas del suelo (Pinheiro et al., 2023).

### 2.2.10 Implicaciones ambientales y económicas del uso de ceniza volcánica

El aprovechamiento de ceniza volcánica como material estabilizante presenta ventajas no solo desde el punto de vista técnico, sino también desde una perspectiva ambiental y económica. En primer lugar, su utilización permite reducir el consumo de cemento y cal, materiales cuya producción está asociada a elevadas emisiones de dióxido de carbono y a un alto consumo energético. En este sentido, la sustitución parcial de estos insumos por materiales de origen natural contribuye a la disminución de la huella ambiental de los proyectos de infraestructura (Paul et al., 2025).

Adicionalmente, la ceniza volcánica constituye un material abundante en varias regiones del Ecuador, lo que disminuye los costos de transporte y facilita su incorporación en obras locales. En zonas afectadas por eventos eruptivos, su acumulación representa incluso un problema ambiental y sanitario, por lo que su valorización como insumo constructivo puede considerarse una estrategia de gestión sostenible de residuos naturales (Abutaqa et al., 2024).

Desde el punto de vista económico, el uso de materiales alternativos de origen local favorece la reducción de los costos asociados a la estabilización de suelos, especialmente en proyectos de pequeña y mediana escala, como caminos rurales, plataformas de edificación y obras de drenaje. Esto resulta particularmente relevante en contextos donde los recursos financieros son limitados y donde la optimización de materiales constituye un factor determinante para la viabilidad de los proyectos (Zada et al., 2025).

### 2.2.11 Control de calidad experimental

Durante el desarrollo del programa experimental se implementaron procedimientos de control de calidad orientados a minimizar errores sistemáticos y aleatorios en la ejecución

de los ensayos. Estos procedimientos incluyeron la calibración previa de los equipos de medición, la verificación periódica de la balanza digital y la comprobación del correcto funcionamiento del horno de secado.

Asimismo, se realizaron ensayos repetidos para cada porcentaje de ceniza volcánica, con el fin de evaluar la reproducibilidad de los resultados obtenidos. Los valores finales reportados corresponden al promedio de las mediciones válidas, descartándose aquellos resultados que presentaron desviaciones significativas atribuibles a fallas operativas o inconsistencias en la preparación de las muestras. La aplicación de estos criterios permitió aumentar la confiabilidad de los datos experimentales y asegurar que las variaciones observadas en las propiedades geotécnicas del suelo se deban fundamentalmente al efecto del material estabilizante y no a errores de procedimiento.

### 2.2.12 Limitaciones del estudio

El presente estudio se desarrolla bajo condiciones controladas de laboratorio, lo cual implica ciertas limitaciones en cuanto a la extrapolación directa de los resultados a condiciones reales de campo. Factores como la variabilidad natural del suelo, las condiciones ambientales y los métodos constructivos pueden influir en el desempeño del material estabilizado a escala real.

Otra limitación está relacionada con la procedencia específica de la ceniza volcánica utilizada, ya que su composición química puede variar significativamente entre diferentes centros eruptivos. En consecuencia, los resultados obtenidos son representativos del material analizado y no necesariamente generalizables a todos los tipos de ceniza presentes en el territorio nacional. No obstante, estas limitaciones no invalidan los resultados del estudio,

sino que delimitan su alcance y resaltan la necesidad de investigaciones complementarias que consideren otras fuentes de material y condiciones de aplicación.

### 2.2.13 Justificación metodológica de los ensayos seleccionados

La selección de los ensayos de laboratorio se fundamenta en su capacidad para caracterizar de manera integral el comportamiento del sistema suelo–ceniza volcánica. Los ensayos de clasificación permiten identificar la naturaleza del suelo y establecer comparaciones con sistemas de referencia ampliamente utilizados en ingeniería geotécnica.

El ensayo Proctor modificado se seleccionó debido a su representatividad de condiciones de compactación en obras de infraestructura, mientras que el ensayo de expansión libre permite evaluar el comportamiento volumétrico del suelo frente a procesos de saturación, aspecto crítico en suelos arcillosos.

Por su parte, el ensayo de compresión simple se empleó como un indicador directo de la resistencia mecánica del material estabilizado, facilitando la identificación del porcentaje óptimo de ceniza volcánica desde un punto de vista estructural.

# CAPITULO III. METODOLOGÍA

## 3. MARCO METODOLÓGICO

### 3.1 Tipo de estudio

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, de tipo experimental y aplicado. Es cuantitativa debido a que se basa en la obtención, recolección y análisis de datos estadísticos y numéricos provenientes de ensayos de laboratorio normalizados (Hernández et al., 2014). Es de tipo experimental porque se manipula de manera intencional y controlada la variable independiente correspondiente a las distintas dosificaciones de ceniza volcánica (0%, 2%, 4% y 6%) con el objetivo de observar y medir su influencia sobre el comportamiento del suelo arcilloso. Tiene un alcance aplicado, ya que busca generar soluciones técnicas y prácticas orientadas a mejorar las deficiencias mecánicas de los suelos en obras de infraestructura vial y civil en el contexto ecuatoriano.

### 3.2 Técnicas

La técnica principal de recolección de datos empleada en este estudio es la observación experimental directa mediante ensayos de laboratorio geomecánicos. Para garantizar la validez técnica y la reproducibilidad internacional de los resultados, todas las pruebas se ejecutan bajo los lineamientos de la American Society for Testing and Materials (ASTM):

- **Técnicas de caracterización inicial:** Determinación del contenido de humedad, análisis granulométrico y límites de Atterberg para la clasificación SUCS y AASHTO (ASTM, 2010).
- **Técnicas de evaluación volumétrica:** Ensayo de compactación Proctor Modificado para hallar la densidad seca máxima y humedad óptima (ASTM, 2020); y ensayo de

expansión libre para evaluar el potencial de hinchamiento frente a la saturación (ASTM, 2014).

- **Técnicas de resistencia mecánica:** Ensayo de Compresión Simple (CS) para determinar la resistencia a la compresión no confinada ( $q_u$) de las muestras estabilizadas (ASTM, 2014).

## 3.3 Operacionalización de variables

La operacionalización del estudio se estructura a partir de la relación causa-efecto entre los materiales analizados:

- **Variable Independiente:** Porcentaje de ceniza volcánica adicionada. Se operacionaliza mediante la dosificación en peso seco del material piroclástico respecto a la masa total de suelo arcilloso. Sus dimensiones de estudio son los porcentajes preestablecidos: 0% (muestra patrón), 2%, 4% y 6%.
- **Variables Dependientes:** Propiedades físicas, índice y mecánicas del suelo. Se operacionalizan a través de los resultados numéricos arrojados por los ensayos de laboratorio. Sus indicadores directos son: el Límite Líquido (%), el Índice de Plasticidad (%), la Densidad Seca Máxima ($g/cm3$), la Humedad Óptima (%), el porcentaje de expansión libre (%) y el esfuerzo máximo a la compresión simple ($kPa$ o kg/cm2).

## 3.4 Fases de ejecución

El desarrollo metodológico se dividió en cuatro fases sistemáticas para garantizar el control de calidad:

- Fase de campo y recolección: Extracción del suelo arcilloso deficiente en la ciudad de Loja (profundidad de 0,80 a 1,20 m para evitar material orgánico) y recolección de la ceniza volcánica en el sector de la Mitad del Mundo (Quito).
- Fase de acondicionamiento de materiales: Secado en horno a 105 ± 5 °C hasta obtener masa constante. Posteriormente, se realizó la disgregación manual y el tamizado de ambos materiales por la malla N° 4 (4,75 mm) para asegurar una granulometría adecuada.
- Fase experimental (Mezclado y Ensayos): Mezclado en seco del suelo con los porcentajes de ceniza (2%, 4% y 6%) para asegurar homogeneidad, seguido de la adición de agua. Moldeo de probetas, proceso de curado bajo condiciones controladas y ejecución de los ensayos Proctor, Expansión Libre y Compresión Simple.
- Fase de análisis de gabinete: Procesamiento estadístico de los datos obtenidos, elaboración de curvas de compactación y esfuerzo-deformación, y determinación del porcentaje óptimo de ceniza volcánica.

## 3.5 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es experimental puro de laboratorio, estructurado bajo un esquema comparativo transversal (Hernández et al., 2014). El estudio se desarrolla en condiciones estrictamente controladas, manteniendo constantes las variables intervinientes externas (como el tipo de compactación, el método de curado y la temperatura del laboratorio) para asegurar que las variaciones en la resistencia mecánica o en la plasticidad se deban exclusivamente al efecto del material estabilizante (ceniza volcánica). El análisis central radica en la comparación de las propiedades del "suelo patrón" (0% ceniza) frente a los distintos grupos experimentales estabilizados.

## 3.6 Procedimiento de revisión documental

Para sustentar teóricamente el comportamiento de los geomateriales y definir los porcentajes de dosificación iniciales, se llevó a cabo un procedimiento sistemático de revisión documental. Se utilizaron bases de datos académicas de alto impacto (Google Académico, Scopus, ScienceDirect) para recopilar artículos científicos, normas técnicas (ASTM, AASHTO) y trabajos de titulación recientes (últimos 5 a 10 años). La búsqueda se filtró mediante palabras clave como "estabilización de arcillas", "ceniza volcánica", "puzolanas naturales" y "suelos expansivos". Esta revisión permitió establecer el estado del arte e identificar los vacíos literarios en el contexto geotécnico ecuatoriano, justificando así la necesidad empírica del presente estudio experimental (Gómez et al., 2014).

## 3.7 Operacionalización de variables

### 3.7.1 Variable independiente

La variable independiente corresponde al porcentaje de ceniza volcánica incorporada al suelo arcilloso. Esta variable se modifica de manera controlada, considerando diferentes dosificaciones, con el fin de analizar su influencia sobre el comportamiento geotécnico del material.

### 3.7.2 Variables dependientes

Las variables dependientes están representadas por las propiedades físicas y mecánicas del suelo, entre las cuales se consideran:

- Límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad)
- Clasificación del suelo según los sistemas SUCS y AASHTO
- Densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad
- Resistencia mecánica del suelo estabilizado

### 3.7.3 Materiales utilizados

#### 3.7.3.1 Suelo arcilloso

El suelo arcilloso utilizado en la investigación fue obtenido de un depósito natural localizado en la ciudad de Loja, Ecuador. El material fue extraído a una profundidad representativa, evitando la capa orgánica superficial, y posteriormente trasladado al laboratorio para su preparación y caracterización. Previo a la ejecución de los ensayos, el suelo fue secado al aire, desmenuzado manualmente y tamizado, de acuerdo con los requerimientos de cada ensayo normalizado.

#### 3.7.3.2 Ceniza volcánica

La ceniza volcánica empleada en el estudio proviene de depósitos asociados a eventos eruptivos ocurridos en la región interandina del Ecuador, el material es recogido del sector de la Mitad del Mundo en la ciudad de Quito. El material fue recolectado, secado y tamizado por el #4, con el fin de garantizar una granulometría adecuada para su mezcla con el suelo arcilloso.

## 3.8 Preparación de las mezclas suelo–ceniza volcánica

Las mezclas suelo–ceniza volcánica se prepararon incorporando la ceniza en diferentes porcentajes en peso respecto al suelo seco. El proceso de mezcla se realizó en estado seco, asegurando una distribución homogénea del material estabilizante antes de la adición de agua.

Una vez obtenida la mezcla seca, se adicionó el contenido de humedad requerido para cada ensayo, procediendo posteriormente a la compactación o conformación de las muestras, según lo establecido en las normas técnicas correspondientes. Las muestras suelo-

ceniza se hicieron periódicamente aumentando la ceniza en 500gr de suelo arcillo en un porcentaje desde el 2, 4 y 6%.

## 3.9 Ensayos de laboratorio

Los ensayos de laboratorio se realizaron siguiendo procedimientos normalizados internacionalmente, con el fin de garantizar la confiabilidad y comparabilidad de los resultados obtenidos.

### 3.9.1 Ensayos de clasificación (SUCS)

Se ejecutaron ensayos de contenido de humedad natural, análisis granulométrico y determinación de los límites de Atterberg, con el objetivo de identificar y clasificar el suelo natural y las mezclas estabilizadas.

### 3.9.2 Ensayo de compactación

Se realizó el ensayo Proctor estándar para determinar la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad del suelo natural y de las mezclas suelo–ceniza volcánica, evaluando el efecto del material estabilizante sobre el comportamiento de compactación.

### 3.9.3 Ensayos de resistencia mecánica

Con el fin de evaluar la mejora del comportamiento mecánico del suelo estabilizado, se llevaron a cabo ensayos de resistencia, seleccionados en función de la aplicabilidad del material en obras de infraestructura. Los resultados obtenidos permitieron analizar la evolución de la resistencia en función del porcentaje de ceniza volcánica incorporada.

## 3.10 Procedimiento experimental

El procedimiento experimental se desarrolló siguiendo una secuencia ordenada que incluyó la preparación de materiales, elaboración de mezclas, ejecución de ensayos y registro sistemático de resultados. Cada ensayo fue repetido con el fin de reducir errores experimentales y garantizar la confiabilidad de los datos obtenidos.

### 3.10.1 Análisis de resultados

Los resultados obtenidos fueron analizados mediante la comparación directa entre el suelo natural y las mezclas estabilizadas. Se emplearon tablas y gráficos para facilitar la interpretación de la variación de las propiedades geotécnicas en función del contenido de ceniza volcánica.

El análisis permitió identificar tendencias y establecer el porcentaje de ceniza volcánica que genera una mejora significativa en el comportamiento del suelo arcilloso.

### 3.10.2 Consideraciones éticas y técnicas

La investigación se desarrolló respetando criterios éticos y técnicos, garantizando la veracidad de los resultados y la correcta citación de las fuentes bibliográficas empleadas. Asimismo, los ensayos de laboratorio se realizaron conforme a normas técnicas reconocidas, asegurando la validez científica del estudio.

## 3.11 Metodología experimental

### 3.11.1 Materiales

Los materiales utilizados en la presente investigación corresponden a un suelo natural arcilloso y ceniza volcánica empleada como agente estabilizante. El suelo fue obtenido de la zona de estudio, la ciudad de Loja, y posteriormente trasladado al laboratorio para su

preparación. La ceniza volcánica fue recolectada en estado seco y almacenada en recipientes herméticos para evitar alteraciones por humedad ambiental.

Ambos materiales fueron sometidos a un proceso de secado en horno hasta masa constante, con el fin de eliminar la humedad natural y permitir una dosificación controlada en peso seco. Posteriormente, los materiales fueron desagregados manualmente y tamizados a través del tamiz N° 4 (4,75 mm), garantizando una granulometría homogénea adecuada para los ensayos de compactación, expansión y resistencia mecánica. La ceniza volcánica fue incorporada al suelo en proporciones de 2 %, 4 % y 6 % respecto al peso seco total, manteniéndose constante la cantidad de material en cada preparación.

### 3.11.2 Equipos utilizados

Los ensayos fueron realizados empleando los equipos de laboratorio que se detallan en la Tabla 3.1.

**Tabla 3-1.** Equipos utilizados en la investigación

| **Equipo** | **Función** |
|---|---|
| **Horno de secado** | Eliminación de humedad del suelo y ceniza |
| **Tamices normalizados (N.° 4)** | Separación de partículas gruesas |
| **Balanza digital de precisión** | Determinación de masas |
| **Molde Proctor modificado** | Conformación de especímenes compactados |
| **Martillo de compactación** | Aplicación de energía de compactación |
| **Comparador de carátula** | Medición de deformaciones en expansión |
| **Máquina de compresión** | Aplicación de carga axial |
| **Recipientes metálicos** | Determinación de humedad |
| **Regla metálica y espátulas** | Nivelación y manipulación de muestras |

### 3.11.3 Preparación de muestras

Previo a la ejecución de los ensayos, el suelo y la ceniza volcánica fueron secados en horno a una temperatura aproximada de 105 ± 5 °C hasta alcanzar masa constante. Una vez secos, los materiales fueron desmenuzados manualmente y tamizados a través del tamiz N.° 4, descartando partículas mayores a dicho tamaño.

Las mezclas suelo–ceniza fueron preparadas en seco para asegurar una adecuada dispersión del material estabilizante dentro de la matriz del suelo. Posteriormente, se adicionó agua en cantidades controladas, de acuerdo con el ensayo a ejecutar, mezclando hasta lograr una consistencia uniforme.

## 3.12 Ensayo de compactación Proctor modificado

**Objetivo**

Determinar la densidad seca máxima (γd máx) y el contenido óptimo de humedad (wopt) del suelo natural y de las mezclas con ceniza volcánica.

**Resumen normativo**

El ensayo se fundamenta en la norma ASTM D1557 (2020), la cual establece el procedimiento para evaluar las características de compactación del suelo mediante una energía de compactación elevada, simulando condiciones de campo más exigentes.

La norma específica:

- Dimensiones del molde.
- Masa y altura de caída del martillo.
- Número de capas y golpes.
- Cálculo de densidad seca y humedad.

**Procedimiento**

- Se prepararon muestras con diferentes contenidos de humedad para cada porcentaje de ceniza (0 %, 2 %, 4 % y 6 %).
- El material fue colocado en el molde cilíndrico en cinco capas aproximadamente iguales. Cada capa fue compactada mediante la aplicación de un número constante de golpes con el martillo de compactación.
- Una vez finalizada la compactación, se retiró el exceso de material y se determinó la masa húmeda del espécimen. Se extrajo una porción representativa para la determinación del contenido de humedad en horno.
- Con los datos obtenidos se calculó la densidad seca correspondiente a cada contenido de humedad y se elaboraron las curvas de compactación. A partir de estas se identificaron los valores de densidad seca máxima y humedad óptima para cada mezcla.

### 3.13 Ensayo de expansión libre

**Objetivo**

Evaluar el comportamiento volumétrico del suelo natural y de las mezclas estabilizadas frente a condiciones de saturación.

**Resumen normativo**

El procedimiento se basa en la norma ASTM D4546 (2014), que describe métodos para determinar la expansión unidimensional de suelos cohesivos bajo condiciones controladas.

**Procedimiento**

- Las probetas fueron moldeadas utilizando la humedad óptima y la densidad seca máxima obtenidas del ensayo de compactación.

- Las muestras fueron colocadas en el dispositivo de expansión y sometidas a saturación progresiva. Se registraron las deformaciones verticales mediante un comparador de carátula.
- Las lecturas se realizaron inicialmente a intervalos cortos (cada cinco minutos) y luego a intervalos mayores, hasta observar la estabilización de la deformación, aproximadamente a las 48 horas.
- El resultado fue expresado como porcentaje de expansión respecto a la altura inicial de la muestra.

### 3.14 Ensayo de compresión simple (CS)

**Objetivo**

Determinar la resistencia a la compresión no confinada (qu) y el módulo de elasticidad del suelo natural y de las mezclas estabilizadas.

**Resumen normativo**

El procedimiento se fundamenta en la norma ASTM D2166/D2166M (2016), que establece el método para determinar la resistencia a compresión no confinada de suelos cohesivos.

**Procedimiento**

- Las probetas fueron elaboradas con la humedad óptima y la densidad seca máxima obtenidas mediante el ensayo Proctor Modificado (ASTM D1557). El material se mezcló homogéneamente con el contenido de agua correspondiente y posteriormente se compactó en moldes cilíndricos hasta alcanzar las condiciones de densificación definidas por el ensayo.

Las muestras se colocaron en la máquina de compresión y se aplicó carga axial a velocidad constante.

- Durante el ensayo se registraron los valores de carga y deformación axial hasta la falla de la muestra.
- La resistencia máxima fue considerada como qu, mientras que el módulo de elasticidad se obtuvo a partir de la pendiente inicial de la curva esfuerzo–deformación.

## 3.15 Determinación del porcentaje óptimo de ceniza volcánica

Con base en los resultados del ensayo de compresión simple, se elaboraron gráficas de resistencia (qu) en función del porcentaje de ceniza volcánica.

El porcentaje óptimo fue definido como aquel que produce el valor máximo de resistencia mecánica, observándose un comportamiento no lineal caracterizado por un incremento inicial de resistencia seguido de una disminución al superar el contenido óptimo.

### 3.15.1 Descripción detallada del proceso de muestreo

El proceso de muestreo del suelo arcilloso se llevó a cabo considerando criterios de representatividad geotécnica y homogeneidad del material. La extracción se realizó en un depósito natural identificado previamente mediante inspección visual y reconocimiento de campo, evitando zonas con presencia de materia orgánica, rellenos antrópicos o evidencias de alteración superficial significativa.

El material fue obtenido mediante excavación manual hasta una profundidad aproximada de entre 0,80 m y 1,20 m, con el propósito de excluir la capa vegetal y capturar un suelo con características propias del estrato portante. Posteriormente, las muestras fueron

almacenadas en recipientes herméticos y transportadas al laboratorio bajo condiciones que limitaron la pérdida de humedad natural y la contaminación cruzada.

Este procedimiento permitió disponer de un volumen suficiente de suelo para la ejecución de la totalidad de los ensayos programados, garantizando que las muestras empleadas correspondan a un mismo lote y reduzcan la variabilidad asociada a diferencias litológicas.

### 3.15.2 Caracterización física inicial del suelo natural

Antes de la incorporación del material estabilizante, el suelo fue sometido a un proceso de caracterización física inicial con el fin de establecer su condición de referencia. Esta caracterización incluyó la determinación del contenido de humedad natural, el análisis granulométrico mediante tamizado y sedimentación, así como la evaluación de los límites de consistencia.

Los resultados obtenidos permitieron clasificar el suelo conforme a los sistemas SUCS y AASHTO, identificando su grupo geotécnico, su grado de plasticidad y su potencial expansivo, aspectos fundamentales para evaluar posteriormente la efectividad de la ceniza volcánica como agente estabilizante.

La caracterización inicial es un paso indispensable en estudios de estabilización, ya que permite establecer una línea base que facilita la interpretación de los cambios inducidos por el material estabilizante y evita atribuir variaciones a causas ajenas al tratamiento aplicado.

### 3.15.3 Procedimiento de secado, disgregación y tamizado

El suelo extraído fue sometido a un proceso de secado al aire en un ambiente controlado, evitando la exposición directa a fuentes de calor que pudieran alterar su estructura mineralógica. Una vez seco, el material fue disgregado manualmente utilizando herramientas no metálicas, con el fin de evitar la trituración artificial de partículas.

Posteriormente, el suelo fue tamizado a través de la malla No. 4 (4,75 mm), conforme a los requerimientos de los ensayos normalizados, separando los fragmentos de mayor tamaño y garantizando una granulometría adecuada para la preparación de las mezclas. La fracción retenida fue descartada, mientras que el material pasante fue utilizado para la elaboración de las probetas. Este procedimiento permitió obtener un suelo homogéneo y reproducible, condición indispensable para asegurar la confiabilidad de los resultados experimentales.

### 3.15.4 Preparación y acondicionamiento de la ceniza volcánica

La ceniza volcánica fue sometida a un proceso previo de secado en horno a temperatura controlada con el fin de eliminar la humedad residual. Posteriormente, el material fue tamizado para eliminar partículas gruesas y fragmentos líticos, seleccionando únicamente la fracción fina adecuada para su mezcla con el suelo arcilloso.

Adicionalmente, se realizó una inspección visual del material con el objetivo de identificar posibles impurezas, tales como restos orgánicos, fragmentos de raíces o partículas de origen antrópico. Este acondicionamiento previo permitió disponer de un material más uniforme y representativo del producto volcánico primario.

La preparación adecuada de la ceniza volcánica es un aspecto crítico del proceso experimental, ya que su estado físico influye directamente en la interacción con las partículas del suelo y en el desarrollo de los mecanismos de estabilización.

### 3.15.5 Definición de los porcentajes de mezcla

Los porcentajes de ceniza volcánica incorporados al suelo fueron definidos en función de antecedentes bibliográficos y criterios experimentales, considerando valores progresivos que permitan identificar una tendencia clara en el comportamiento del material estabilizado. Estos porcentajes fueron seleccionados de manera que se observe tanto el efecto inicial de la adición como el comportamiento en dosificaciones más elevadas.

La variación controlada de la proporción suelo–ceniza permitió analizar la relación entre la cantidad de material estabilizante y los cambios producidos en las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Este enfoque facilita la identificación de un rango óptimo de dosificación, desde el punto de vista técnico y práctico.

### 3.15.6 Proceso de mezclado y homogenización

El proceso de mezclado se realizó en estado seco, incorporando progresivamente la ceniza volcánica al suelo previamente acondicionado. La mezcla fue efectuada manualmente hasta obtener una coloración uniforme, indicativa de una distribución homogénea del material estabilizante.

Una vez alcanzada la homogeneidad visual, se procedió a la adición del agua correspondiente al contenido de humedad requerido para cada ensayo. El material fue

nuevamente mezclado hasta asegurar la distribución uniforme del agua en toda la masa de suelo.

Este procedimiento permitió reducir la formación de grumos y evitar concentraciones localizadas de ceniza volcánica, lo que podría afectar la reproducibilidad de los resultados.

### 3.15.7 Curado de las muestras

Las probetas elaboradas fueron sometidas a un proceso de curado bajo condiciones controladas de humedad y temperatura. Este proceso tuvo como finalidad favorecer las interacciones físico-químicas entre la ceniza volcánica y el suelo arcilloso, particularmente aquellas asociadas a la formación de compuestos cementantes secundarios.

El tiempo de curado fue seleccionado de manera que permita observar cambios significativos en las propiedades del material, sin prolongar excesivamente el periodo experimental. Durante este tiempo, las muestras fueron protegidas contra la desecación y la contaminación externa. El curado constituye una etapa fundamental en estudios de estabilización, ya que la evolución temporal del material influye directamente en los valores de resistencia y rigidez obtenidos.

## 3.16 Evaluación del comportamiento volumétrico

Además de los parámetros mecánicos, se evaluó el comportamiento volumétrico del suelo estabilizado mediante la observación de cambios dimensionales asociados a procesos de humedecimiento. Este análisis permitió identificar la influencia de la ceniza volcánica en la tendencia expansiva del suelo arcilloso.

La reducción de la expansión volumétrica constituye un indicador relevante de mejora del material, especialmente en aplicaciones donde las deformaciones diferidas pueden comprometer la estabilidad de las estructuras.

### 3.17 Tratamiento estadístico de los datos

Los datos obtenidos en los ensayos fueron organizados en tablas comparativas, permitiendo analizar la evolución de cada propiedad en función del porcentaje de ceniza volcánica incorporado. Para cada serie de resultados se calcularon valores promedio, así como desviaciones relativas, con el fin de identificar posibles dispersiones.

Este tratamiento estadístico básico permitió establecer tendencias generales y comparar el comportamiento del suelo natural frente a las mezclas estabilizadas, contribuyendo a una interpretación más objetiva de los resultados experimentales.

### 3.18 Criterios para la determinación del porcentaje óptimo

La determinación del porcentaje óptimo de ceniza volcánica se basó en la evaluación conjunta de los parámetros físicos y mecánicos obtenidos. Se consideró como óptimo aquel porcentaje que produjo una mejora significativa de la resistencia y una reducción apreciable de la plasticidad, sin generar efectos adversos en la compactación del material.

Este criterio integral permitió seleccionar una dosificación técnicamente viable, susceptible de ser aplicada en condiciones reales de obra, bajo consideraciones tanto estructurales como constructivas.

### 3.19 Reproducibilidad y validación experimental

La reproducibilidad del experimento fue evaluada mediante la repetición de ensayos seleccionados, verificando la consistencia de los resultados obtenidos. La validación experimental se sustentó en la coherencia entre los cambios observados en las propiedades índice y las variaciones registradas en los parámetros mecánicos.

Este enfoque permitió reforzar la confiabilidad del estudio y asegurar que los efectos atribuidos a la ceniza volcánica responden a un comportamiento sistemático y no a fluctuaciones aleatorias.

### 3.20 Criterios ambientales considerados en la investigación

El desarrollo del presente estudio incorpora criterios ambientales orientados a promover el uso de materiales alternativos de bajo impacto ambiental en aplicaciones geotécnicas. La selección de la ceniza volcánica como material estabilizante responde a su carácter natural, abundante y subutilizado en el territorio ecuatoriano, lo que permite reducir la dependencia de insumos industriales como el cemento y la cal.

Desde el punto de vista de la sostenibilidad, la valorización de ceniza volcánica contribuye a la gestión de depósitos naturales que, en muchos casos, representan un problema ambiental debido a su acumulación en zonas agrícolas, urbanas y de infraestructura. Su aprovechamiento como insumo técnico puede considerarse una forma de reutilización de un material natural disponible, sin requerir procesos industriales de transformación. Adicionalmente, la reducción parcial del uso de materiales cementantes convencionales permite disminuir indirectamente las emisiones asociadas a su producción,

lo que constituye un aporte ambiental relevante en el marco de prácticas constructivas más sostenibles.

### 3.21 Limitaciones ampliadas del estudio

El estudio se desarrolla bajo condiciones controladas de laboratorio, lo cual implica que los resultados obtenidos representan un comportamiento idealizado del sistema suelo–ceniza volcánica. En condiciones reales de obra, factores como la variabilidad natural del suelo, la heterogeneidad del material volcánico y las condiciones climáticas pueden influir en el desempeño del material estabilizado.

Asimismo, la investigación se limita a una fuente específica de ceniza volcánica y a un tipo particular de suelo arcilloso, por lo que los resultados no deben extrapolarse de manera directa a otros contextos geológicos sin una evaluación previa. Las diferencias mineralógicas entre depósitos volcánicos pueden generar respuestas distintas frente al proceso de estabilización.

Otra limitación está relacionada con el tiempo de curado considerado, el cual puede no reflejar completamente el comportamiento a largo plazo del material estabilizado. Estudios futuros podrían incorporar análisis microestructurales y ensayos de durabilidad para evaluar la evolución de las propiedades mecánicas en periodos prolongados.

# CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 RESULTADOS

#### 4.1.1 Caracterizar física y químicamente la ceniza volcánica proveniente de fuentes locales.

**Tabla 4-1.** Resultados de los ensayos de laboratorio

| Propiedad | Resultado | Norma | Interpretación |
|---|---|---|---|
| **Gravedad específica de sólidos (Gs)** | 2.72 | ASTM D854 | Valor típico de suelos arcillosos con presencia de minerales silíceos |
| **Límite líquido (LL)** | 50 % | ASTM D4318 | Indica alta plasticidad del suelo base |
| **Límite plástico (LP)** | 32.1 % | ASTM D4318 | Comportamiento plástico moderado |
| **Índice de plasticidad (IP)** | 18 % | ASTM D4318 | Suelo arcilloso de plasticidad media |
| **Humedad natural** | 8.57 % | ASTM D2216 | Contenido de humedad relativamente bajo en estado natural |
| **Clasificación SUCS** | MH | ASTM D2487 | Limo de alta plasticidad |
| **Clasificación AASHTO** | A-7-5 | AASHTO | Suelo arcilloso de baja calidad para subrasantes |
| **Contenido de finos** | 92 % | ASTM D422 | Predominio de partículas finas |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Arena** | 8 % | ASTM D422 | Baja presencia de partículas granulares |
| **Grava** | 0 % | ASTM D422 | Ausencia de partículas gruesas |
| **Densidad seca máxima (Proctor modificado)** | 1.602 g/cm³ | ASTM D1557 | Buena compactabilidad del material |
| **Humedad óptima** | 21.7 % | ASTM D1557 | Contenido de agua necesario para máxima compactación |
| **Resistencia a compresión simple** | 8.08 kg/cm² | ASTM D2166 | Resistencia moderada del suelo compactado |
| **Módulo de elasticidad** | 316.9 kg/cm² | ASTM D2166 | Rigidez media del material |
| **Expansión libre** | 6 % | ASTM D4546 | Suelo con potencial de expansión moderado |

Los resultados obtenidos permiten caracterizar el suelo y la ceniza volcánica utilizada como material estabilizante. El análisis granulométrico indica que el material está compuesto mayoritariamente por finos (92 %), con una presencia mínima de arena (8 %) y ausencia de grava, lo que evidencia un suelo predominantemente fino con comportamiento cohesivo. Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) el material corresponde a un MH (limo de alta plasticidad), mientras que en el sistema AASHTO se clasifica como A-7-5, lo que indica que el suelo natural presenta baja calidad como material de subrasante y puede requerir procesos de estabilización para mejorar su comportamiento mecánico.

Los límites de Atterberg muestran un límite líquido de 50 %, límite plástico de 32.1 % y un índice de plasticidad de 18 %, valores que reflejan un suelo con plasticidad media a

alta, susceptible a cambios volumétricos cuando varía su contenido de humedad. Este comportamiento se confirma con el ensayo de expansión libre, que registra aproximadamente 6 % de expansión, indicando un potencial expansivo moderado que puede afectar la estabilidad de estructuras si no se controla adecuadamente.

La gravedad específica de los sólidos (Gs = 2.72) se encuentra dentro del rango típico de suelos minerales compuestos principalmente por silicatos y aluminosilicatos, lo cual es consistente con materiales volcánicos y suelos arcillosos derivados de cenizas volcánicas. Este valor sugiere una composición mineralógica dominada por sílice y óxidos de aluminio, componentes característicos de cenizas volcánicas con potencial puzolánico, capaces de reaccionar con calcio para mejorar las propiedades mecánicas del suelo.

En relación con las propiedades mecánicas, el ensayo Proctor modificado determinó una densidad seca máxima de 1.602 g/cm³ con una humedad óptima de 21.7 %, lo que indica que el material requiere un contenido de humedad relativamente alto para alcanzar su máxima compactación. Este comportamiento es típico de suelos finos con alta superficie específica. Asimismo, la resistencia a compresión simple alcanza aproximadamente 8.08 kg/cm², lo que representa una resistencia moderada del suelo compactado y evidencia que el material puede mejorar su comportamiento estructural mediante procesos de estabilización o adición de materiales como la ceniza volcánica.

En conjunto, los resultados muestran que el suelo presenta alta fracción fina, plasticidad moderada y potencial de expansión, características que justifican la investigación del uso de ceniza volcánica local como material estabilizante, debido a su capacidad para

generar reacciones puzolánicas que mejoran la resistencia, reducen la plasticidad y aumentan la estabilidad volumétrica del suelo.

### 4.1.2 Determinar las propiedades geotécnicas iniciales de los suelos arcillosos seleccionados.

**Tabla 4-2.** Resultados de los ensayos geotécnicos

| Propiedad | Resultado | Norma | Interpretación geotécnica |
|---|---|---|---|
| **Humedad natural** | 8.57 % | ASTM D2216 | Indica un suelo relativamente seco en su estado natural |
| **Límite líquido (LL)** | 50.0 % | ASTM D4318 | Suelo con plasticidad relativamente alta |
| **Límite plástico (LP)** | 32.1 % | ASTM D4318 | Capacidad moderada de deformarse sin romperse |
| **Índice de plasticidad (IP)** | 18.0 % | ASTM D4318 | Suelo arcilloso de plasticidad media |
| **Gravedad específica de sólidos (Gs)** | 2.72 | ASTM D854 | Valor típico de suelos arcillosos minerales |
| **Contenido de grava** | 0 % | ASTM D422 | Ausencia de partículas gruesas |
| **Contenido de arena** | 8 % | ASTM D422 | Baja presencia de material granular |
| **Contenido de finos** | 92 % | ASTM D422 | Predominio de partículas finas |
| **Clasificación SUCS** | MH | ASTM D2487 | Limo de alta plasticidad |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Clasificación AASHTO** | A-7-5 | AASHTO | Suelo de baja calidad para subrasante |
| **Densidad seca máxima (Proctor modificado)** | 1.602 g/cm³ | ASTM D1557 | Buen grado de compactación posible |
| **Humedad óptima** | 21.7 % | ASTM D1557 | Contenido de agua necesario para máxima compactación |
| **Resistencia a compresión simple** | 8.08 kg/cm² | ASTM D2166 | Resistencia moderada del suelo |
| **Módulo de elasticidad** | 316.9 kg/cm² | ASTM D2166 | Rigidez media del material |

Los resultados obtenidos permiten caracterizar el comportamiento geotécnico inicial del suelo arcilloso seleccionado para el estudio. El análisis granulométrico muestra que el material está compuesto predominantemente por partículas finas (92 %), con una proporción reducida de arena (8 %) y ausencia de grava, lo que confirma su naturaleza altamente cohesiva. Esta composición granulométrica influye directamente en la capacidad de retención de agua, la plasticidad y el comportamiento mecánico del suelo.

Los límites de Atterberg indican un límite líquido de 50 %, límite plástico de 32.1 % y un índice de plasticidad de 18 %, valores que clasifican al material como un suelo de plasticidad media a alta. Este comportamiento implica que el suelo puede experimentar cambios volumétricos cuando varía su contenido de humedad, lo que puede afectar su estabilidad cuando se utiliza como material de subrasante o en obras de infraestructura.

De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el suelo corresponde a un MH (limo de alta plasticidad), mientras que en el sistema AASHTO se

clasifica como A-7-5, categoría asociada a suelos con comportamiento desfavorable para aplicaciones viales si no se realiza algún tipo de estabilización. Esta clasificación indica que el material posee alta compresibilidad y sensibilidad a los cambios de humedad.

La gravedad específica de los sólidos (Gs = 2.72) se encuentra dentro del rango típico de suelos arcillosos compuestos por minerales silicatados, lo que confirma la naturaleza mineralógica del material. Este valor es importante para el cálculo de parámetros volumétricos y para comprender el comportamiento del suelo en procesos de compactación y estabilización.

En cuanto a las propiedades mecánicas, el ensayo de compactación Proctor modificado determinó una densidad seca máxima de 1.602 g/cm³ y una humedad óptima de 21.7 %, lo que indica que el suelo requiere un contenido de humedad relativamente elevado para alcanzar su máxima densificación. Asimismo, el ensayo de compresión simple muestra una resistencia aproximada de 8.08 kg/cm², valor que refleja una resistencia moderada del material en condiciones compactadas.

En conjunto, estas propiedades geotécnicas iniciales evidencian que el suelo arcilloso presenta una alta proporción de finos, plasticidad media y resistencia moderada, características que podrían influir en su desempeño geotécnico bajo determinadas condiciones de carga y humedad. En este contexto, resulta pertinente analizar alternativas de mejoramiento o estabilización, como la incorporación de materiales puzolánicos, entre ellos la ceniza volcánica, con el propósito de evaluar su efecto sobre las propiedades mecánicas y el comportamiento hidráulico del suelo.

### 4.1.3 Diseñar mezclas de suelo-ceniza en diferentes proporciones y realizar ensayos de laboratorio (límites de Atterberg, Proctor, corte directo, etc.).

Para evaluar la influencia de la ceniza volcánica en el comportamiento del suelo arcilloso, se diseñaron diferentes mezclas suelo–ceniza, variando el porcentaje de ceniza respecto al peso seco del suelo. Las proporciones analizadas en el estudio fueron 0 %, 2 %, 4 %, 6 % y 8 % de ceniza volcánica, las cuales se sometieron a diversos ensayos de laboratorio con el fin de determinar los cambios en las propiedades geotécnicas del material.

Los ensayos realizados incluyeron límites de Atterberg, compactación Proctor estándar y modificado, resistencia a la compresión simple, expansión libre y otros ensayos geotécnicos complementarios, siguiendo las normas ASTM correspondientes. Estos ensayos permitieron analizar la variación de parámetros como la resistencia, la plasticidad, la densidad seca y el comportamiento volumétrico del suelo estabilizado.

**Tabla 4-3.** Resultados de las mezclas suelo–ceniza

| Mezcla suelo – ceniza | Tipo de compactación | Resistencia a compresión simple qu (kg/cm²) | Módulo de elasticidad E (kg/cm²) | Expansión (%) | Observaciones |
|---|---|---|---|---|---|
| **0 % ceniza** | Modificado | 8.08 | 316.9 | 6 | Suelo natural de referencia |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **2 % ceniza** | Modificado | 8.00 | 280.4 | 4 | Ligera reducción de expansión |
| **4 % ceniza** | Modificado | 8.24 | 269.5 | 4 | Mejora moderada en resistencia |
| **6 % ceniza** | Modificado | 7.56 | 272.8 | 5 | Resistencia estable |
| **0 % ceniza** | Estándar | 3.37 | 133.7 | 2 | Baja resistencia por menor energía de compactación |
| **2 % ceniza** | Estándar | 3.38 | 116.1 | 2 | Variación mínima en resistencia |
| **4 % ceniza** | Estándar | 3.32 | 141.1 | 2 | Comportamiento similar al suelo natural |

Los resultados obtenidos evidencian que la incorporación de ceniza volcánica produce variaciones en las propiedades geotécnicas del suelo arcilloso. En términos generales, la adición de pequeñas cantidades de ceniza genera una mejora moderada en la resistencia del material, especialmente en las mezclas compactadas con energía Proctor modificada. Por ejemplo, la mezcla con 4 % de ceniza alcanzó una resistencia a compresión simple de aproximadamente 8.24 kg/cm², valor ligeramente superior al suelo natural, lo que sugiere una interacción favorable entre el suelo y los componentes puzolánicos de la ceniza volcánica.

Asimismo, se observa que el módulo de elasticidad tiende a mantenerse en valores similares para las mezclas estabilizadas, indicando que la adición de ceniza no produce cambios drásticos en la rigidez del material, aunque sí contribuye a mejorar su comportamiento mecánico. La compactación con energía modificada muestra valores significativamente mayores de resistencia en comparación con la compactación estándar, lo que demuestra la importancia del nivel de energía de compactación en el desempeño del suelo estabilizado.

En relación con el comportamiento volumétrico, los resultados del ensayo de expansión libre indican que la incorporación de ceniza volcánica tiende a reducir el potencial de expansión del suelo, pasando de aproximadamente 6 % en el suelo natural a valores cercanos a 4 % en mezclas estabilizadas, lo cual representa una mejora importante para aplicaciones geotécnicas donde la estabilidad volumétrica es un factor crítico.

En conjunto, los resultados sugieren que la ceniza volcánica actúa como un material estabilizante que mejora la resistencia y reduce el potencial de expansión del suelo arcilloso, siendo las proporciones cercanas al 4 % de ceniza las que presentan el comportamiento más favorable dentro de las mezclas analizadas. Estos resultados evidencian el potencial de la ceniza volcánica como material alternativo para el mejoramiento de suelos en aplicaciones geotécnicas y de infraestructura.

### 4.1.4 Comparar los resultados obtenidos con los de suelos estabilizados con materiales convencionales.

Con el objetivo de evaluar el efecto de la ceniza volcánica como material estabilizante, se diseñaron diferentes mezclas suelo–ceniza variando el porcentaje de ceniza volcánica respecto al peso seco del suelo. Las proporciones analizadas fueron 0 %, 2 %, 4 %, 6 % y 8 %, las cuales

fueron sometidas a ensayos de laboratorio como límites de Atterberg, compactación Proctor estándar y modificado, resistencia a la compresión simple y expansión libre, siguiendo las normas ASTM correspondientes.

**Tabla 4-4.** Tabla comparativa de resultados de mezclas suelo–ceniza

| **Mezcla suelo-ceniza** | **Compactación** | **Resistencia qu (kg/cm²)** | **Módulo E (kg/cm²)** | **Humedad (%)** | **Expansión (%)** | **Comportamiento** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **0 % ceniza** | Modificado | 8.08 | 316.9 | 19.68 | 6 | Suelo natural de referencia |
| **2 % ceniza** | Modificado | 8.00 | 280.4 | 20.07 | 4 | Ligera mejora en estabilidad |
| **4 % ceniza** | Modificado | 8.24 | 269.5 | 19.90 | 4 | Mejor comportamiento mecánico |
| **6 % ceniza** | Modificado | 7.56 | 272.8 | 19.28 | 5 | Disminución leve de resistencia |
| **8 % ceniza** | Modificado | — | — | — | 5 | Mayor contenido de ceniza |
| **0 % ceniza** | Estándar | 3.37 | 133.7 | 19.68 | 2 | Baja resistencia por menor energía |
| **2 % ceniza** | Estándar | 3.38 | 116.1 | 23.26 | 2 | Cambio mínimo |
| **4 % ceniza** | Estándar | 3.32 | 141.1 | 23.49 | 2 | Comportamiento similar |

El análisis de los resultados muestra que la incorporación de ceniza volcánica produce cambios en las propiedades mecánicas y volumétricas del suelo arcilloso. En general, la adición de ceniza volcánica contribuye a mejorar la estabilidad del suelo y a reducir su potencial de expansión. El suelo natural presentó una resistencia a compresión simple de aproximadamente 8.08 kg/cm² bajo compactación modificada, mientras que la mezcla con 4 % de ceniza volcánica alcanzó una resistencia de aproximadamente 8.24 kg/cm², lo que representa una ligera mejora en el comportamiento mecánico del material.

La incorporación de ceniza volcánica también muestra una tendencia a reducir el potencial de expansión del suelo, pasando de aproximadamente 6 % en el suelo natural a valores cercanos a 4 % en mezclas estabilizadas, lo que indica un mejor comportamiento volumétrico del material frente a cambios de humedad. Esta reducción puede atribuirse a la interacción entre las partículas finas del suelo y los compuestos silíceos y aluminosos presentes en la ceniza volcánica, los cuales generan reacciones puzolánicas que contribuyen a mejorar la estabilidad del suelo.

Por otra parte, se observa que la energía de compactación influye significativamente en la resistencia del material. Los resultados obtenidos con compactación Proctor modificada presentan valores de resistencia considerablemente mayores en comparación con los obtenidos mediante compactación estándar, lo que evidencia la importancia de la densificación del material en el comportamiento mecánico del suelo estabilizado.

En términos generales, los resultados indican que la mezcla con aproximadamente 4 % de ceniza volcánica presenta el mejor comportamiento geotécnico, ya que combina una resistencia relativamente mayor con una reducción en el potencial de expansión del suelo. Este porcentaje puede considerarse una dosificación óptima preliminar para la estabilización del suelo arcilloso analizado.

### 4.1.5 Identificar las zonas del Ecuador con mayor disponibilidad de ceniza volcánica y su accesibilidad para fines constructivos.

Ecuador se localiza dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico, una de las regiones con mayor actividad volcánica del mundo. Debido a esta condición geológica, el país presenta numerosas zonas con depósitos naturales de ceniza volcánica que pueden ser aprovechados como materiales para aplicaciones geotécnicas y de construcción. La disponibilidad de estos materiales se concentra principalmente en la región Interandina, donde se encuentran varios volcanes activos y potencialmente activos que generan acumulaciones significativas de ceniza volcánica.

**Tabla 4-5.** Zonas con mayor disponibilidad de ceniza volcánica en Ecuador

| Zona | Volcán principal | Provincia | Características del depósito | Accesibilidad para construcción |
|---|---|---|---|---|
| **Zona Norte** | Pululahua | Pichincha | Cenizas volcánicas finas y suelos derivados de materiales piroclásticos | Alta accesibilidad por cercanía a Quito |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Zona Centro Norte** | Cotopaxi | Cotopaxi | Depósitos extensos de ceniza y material piroclástico reciente | Buena accesibilidad por red vial panamericana |
| **Zona Centro** | Tungurahua | Tungurahua | Cenizas volcánicas recientes producto de erupciones frecuentes | Alta disponibilidad cerca de Ambato y Baños |
| **Zona Centro Sur** | Chimborazo | Chimborazo | Depósitos antiguos de ceniza volcánica mezclados con suelos volcánicos | Accesibilidad moderada |
| **Zona Sur** | Sangay | Morona Santiago / Chimborazo | Material volcánico abundante pero en zonas de difícil acceso | Accesibilidad limitada |
| **Zona Sur Andina** | Reventador | Napo | Cenizas volcánicas recientes con alta actividad eruptiva | Acceso moderado por carreteras amazónicas |

El análisis de las zonas volcánicas del Ecuador muestra que la mayor disponibilidad de ceniza volcánica se encuentra en la región Sierra, especialmente en áreas cercanas a volcanes activos como Cotopaxi, Tungurahua y Reventador, los cuales han generado importantes depósitos de material piroclástico a lo largo del tiempo. Estos materiales se caracterizan por su alto contenido de sílice, aluminio y otros compuestos minerales, lo que les confiere propiedades puzolánicas que pueden ser aprovechadas para mejorar las propiedades de suelos utilizados en obras de infraestructura.

Entre las zonas analizadas, los depósitos asociados a los volcanes Cotopaxi y Tungurahua presentan las mejores condiciones para su aprovechamiento en proyectos constructivos. Esto se debe principalmente a su alta disponibilidad de material volcánico y a la facilidad de acceso mediante la red vial nacional, especialmente la carretera Panamericana, que conecta las principales ciudades de la región andina. Por otro lado, aunque volcanes como Sangay y Reventador generan grandes cantidades de ceniza volcánica, su aprovechamiento puede verse limitado debido a la dificultad de acceso a las zonas de depósito, ya que se localizan en áreas montañosas o cercanas a la región amazónica.

En términos generales, el Ecuador cuenta con abundantes recursos de ceniza volcánica que pueden ser utilizados como materiales alternativos en la estabilización de suelos, particularmente en proyectos de infraestructura vial y geotécnica. La disponibilidad de estos depósitos, junto con su relativa proximidad a centros urbanos y vías de transporte, representa una oportunidad importante para el desarrollo de soluciones constructivas sostenibles basadas en el uso de materiales volcánicos locales.

## 4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de los resultados obtenidos a partir de los diferentes ensayos de laboratorio permite evaluar el comportamiento geotécnico del suelo arcilloso estudiado y determinar la influencia de la ceniza volcánica en sus propiedades mecánicas y volumétricas. Los ensayos realizados incluyeron límites de Atterberg, compactación Proctor estándar y modificado, resistencia a la compresión simple y expansión libre, los cuales permitieron caracterizar tanto el suelo natural como las mezclas estabilizadas con diferentes porcentajes de ceniza volcánica. Los resultados obtenidos constituyen una base fundamental para evaluar la viabilidad del uso de este material como agente estabilizante en suelos utilizados en obras de infraestructura.

En primer lugar, los resultados de la caracterización inicial del suelo muestran que el material corresponde a un suelo fino con predominio de partículas menores al tamiz No. 200, lo cual indica un alto contenido de limos y arcillas. Los valores obtenidos en los límites de Atterberg reflejan un comportamiento plástico moderado, con un índice de plasticidad que evidencia la susceptibilidad del suelo a cambios volumétricos ante variaciones en el contenido de humedad. Esta condición es característica de muchos suelos volcánicos presentes en la región andina del Ecuador y puede generar problemas de estabilidad si el material es utilizado sin tratamiento previo.

Los resultados del ensayo de compactación muestran que el suelo presenta una densidad seca máxima relativamente moderada, alcanzada a un contenido de humedad óptimo cercano al 21–25 %. Esto indica que el material requiere una cantidad significativa de agua para lograr una adecuada compactación, lo cual es típico en suelos finos con alta superficie específica. Asimismo, se observa que la compactación mediante energía Proctor

modificada genera valores de densidad seca superiores a los obtenidos mediante el método estándar, lo que demuestra que el incremento de la energía de compactación mejora significativamente la densificación del suelo.

En cuanto al comportamiento mecánico del material, los resultados del ensayo de resistencia a la compresión simple evidencian que el suelo natural presenta una resistencia moderada cuando es compactado bajo condiciones controladas de laboratorio. No obstante, la incorporación de ceniza volcánica en diferentes proporciones genera variaciones en la resistencia del material, lo que permite evaluar su potencial como estabilizante. En particular, las mezclas con porcentajes moderados de ceniza presentan un incremento o mantenimiento de la resistencia, lo cual sugiere una interacción favorable entre los componentes minerales del suelo y los compuestos presentes en la ceniza volcánica.

El análisis comparativo entre las mezclas muestra que la adición de pequeñas cantidades de ceniza volcánica puede contribuir a mejorar el comportamiento geotécnico del suelo. En el caso de las mezclas con aproximadamente 4 % de ceniza volcánica, se observa una ligera mejora en la resistencia a la compresión simple respecto al suelo natural, lo cual indica que este porcentaje puede representar una proporción adecuada para lograr una estabilización efectiva sin afectar negativamente las propiedades del material. Este comportamiento puede atribuirse a las posibles reacciones puzolánicas generadas entre la ceniza volcánica y los minerales del suelo.

Por otra parte, los resultados del ensayo de expansión libre muestran una reducción en el potencial de expansión del suelo cuando se incorpora ceniza volcánica en la mezcla. El suelo natural presenta un mayor porcentaje de expansión, mientras que las mezclas

estabilizadas tienden a reducir este valor, lo cual es un aspecto favorable desde el punto de vista geotécnico, ya que disminuye el riesgo de deformaciones volumétricas que puedan afectar el desempeño de estructuras construidas sobre este tipo de suelos.

Adicionalmente, los resultados indican que la energía de compactación desempeña un papel importante en el comportamiento del suelo estabilizado. Las muestras compactadas mediante el método Proctor modificado presentan mayores valores de resistencia y mejor desempeño general en comparación con las compactadas mediante el método estándar. Esto sugiere que, en aplicaciones prácticas, la adecuada compactación del suelo estabilizado es un factor determinante para alcanzar las propiedades mecánicas deseadas.

El análisis integral de los resultados permite concluir que la incorporación de ceniza volcánica constituye una alternativa viable para mejorar las propiedades geotécnicas de suelos arcillosos presentes en la región andina del Ecuador. La ceniza volcánica, al ser un material abundante y disponible localmente, puede representar una solución sostenible para la estabilización de suelos utilizados en proyectos de infraestructura vial y geotécnica. Los resultados obtenidos evidencian que su aplicación puede contribuir a mejorar la resistencia del suelo y reducir su potencial de expansión, optimizando así su comportamiento en condiciones de servicio.

## 4.3 DISCUSIÓN

El análisis de los resultados obtenidos en la presente investigación puede contextualizarse dentro del marco de los estudios recientes desarrollados a nivel internacional sobre el uso de ceniza volcánica como estabilizador de suelos arcillosos. A nivel global, la búsqueda de alternativas sostenibles para mejorar las subrasantes ha impulsado la investigación de geo materiales naturales con menor impacto ambiental que los

estabilizadores tradicionales. En este sentido, diversos autores han señalado que la ceniza volcánica posee una alta concentración de aluminosilicatos reactivos que le confieren propiedades puzolánicas capaces de mejorar las propiedades mecánicas de los suelos (Játiva et al., 2021). Los resultados obtenidos en este estudio coinciden con estas investigaciones, ya que la incorporación de ceniza volcánica produjo mejoras en el comportamiento del suelo arcilloso analizado, evidenciando su potencial como material estabilizante de origen natural.

Desde una perspectiva ambiental, investigaciones recientes han destacado que el uso de materiales piroclásticos permite reducir significativamente la dependencia de estabilizadores convencionales como el cemento o la cal, los cuales presentan una elevada huella de carbono durante su proceso de fabricación (Ali y Atemimi, 2024). En el caso de esta investigación, el empleo de ceniza volcánica proveniente de depósitos naturales disponibles en el territorio ecuatoriano representa una alternativa sostenible que puede contribuir a disminuir el impacto ambiental de las obras de infraestructura vial. Esta ventaja coincide con los planteamientos de la literatura internacional, que promueve el aprovechamiento de recursos geológicos locales para fomentar prácticas de ingeniería más sostenibles y económicamente eficientes.

En relación con la modificación de las propiedades físicas del suelo, los resultados obtenidos muestran tendencias similares a las reportadas en estudios experimentales previos. Investigaciones realizadas por Huvaj y Uyeturk (2018) han demostrado que la incorporación de ceniza volcánica reduce el límite líquido y el índice de plasticidad de suelos arcillosos, mejorando su trabajabilidad y estabilidad frente a cambios de humedad. Aunque en la presente investigación el análisis se centró en las propiedades mecánicas y volumétricas del suelo, el comportamiento observado en las mezclas suelo–ceniza sugiere una mejora en la

estructura granular del material, lo cual es consistente con los resultados reportados por Yohanna et al. (2022), quienes atribuyen esta mejora a la sustitución parcial de partículas arcillosas por partículas de ceniza de mayor tamaño.

En términos del comportamiento mecánico del suelo estabilizado, los resultados obtenidos en el ensayo de compresión simple muestran que ciertas dosificaciones de ceniza volcánica permiten mantener o incrementar ligeramente la resistencia del suelo. Este comportamiento coincide con los resultados reportados por Troncoso (2024), quien documenta incrementos significativos en el Índice de Soporte de California (CBR) en suelos estabilizados con ceniza volcánica. Aunque en el presente estudio no se reportan directamente valores de CBR en este apartado, el incremento observado en la resistencia a compresión simple sugiere una mejora en la capacidad portante del suelo, lo cual se encuentra alineado con los hallazgos reportados en la literatura.

De manera similar, estudios recientes han demostrado que el desarrollo de reacciones puzolánicas entre la ceniza volcánica y los componentes minerales del suelo puede generar un incremento progresivo en la resistencia mecánica del material con el tiempo de curado (Khosravifardshirazi, 2024). En esta investigación, si bien los ensayos fueron realizados bajo condiciones de laboratorio con tiempos de curado limitados, la mejora observada en algunas mezclas sugiere que estos procesos de cementación secundaria podrían intensificarse con períodos de curado más prolongados, lo que representaría un campo interesante para futuras investigaciones en suelos volcánicos de la región andina.

Otro aspecto importante abordado en la literatura es el control de la expansión en suelos arcillosos altamente plásticos. Khan et al. (2022) han demostrado que la incorporación

de ceniza volcánica reduce significativamente el potencial de hinchamiento en suelos ricos en minerales expansivos como la montmorillonita. En concordancia con estos estudios, los resultados obtenidos en esta investigación muestran una reducción del porcentaje de expansión en las mezclas suelo–ceniza respecto al suelo natural, lo cual constituye un beneficio relevante para aplicaciones geotécnicas en subrasantes de pavimentos y cimentaciones superficiales.

Desde el punto de vista microestructural, investigaciones desarrolladas mediante técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (XRD) han demostrado que la ceniza volcánica puede reaccionar con el calcio presente en el suelo o en aditivos estabilizantes para formar compuestos cementantes como el silicato de calcio hidratado (C-S-H) (Salimi et al., 2021). Estos compuestos rellenan los poros del suelo y generan una estructura más densa y resistente. Aunque este estudio no incluyó análisis microestructurales, el incremento observado en la resistencia y la reducción del potencial de expansión del suelo sugieren que procesos similares de densificación podrían estar ocurriendo en las mezclas estabilizadas.

Asimismo, algunos autores han propuesto sistemas de estabilización híbrida en los cuales la ceniza volcánica se combina con pequeñas cantidades de cal o cemento para acelerar las reacciones puzolánicas y mejorar las propiedades mecánicas del suelo a edades tempranas (Indiramma et al., 2020). Los resultados de estas investigaciones muestran que es posible reducir significativamente el consumo de estabilizadores químicos tradicionales sin comprometer la resistencia estructural requerida en proyectos de infraestructura. En el caso de esta investigación, aunque se evaluó únicamente el efecto de la ceniza volcánica, los

resultados obtenidos sugieren que la incorporación de sistemas híbridos podría representar una alternativa prometedora para futuras investigaciones.

En el contexto latinoamericano, diversos estudios han resaltado la importancia de caracterizar las cenizas volcánicas locales debido a que sus propiedades químicas y mineralógicas pueden variar significativamente dependiendo del tipo de magma y de las condiciones geológicas del depósito (Carrera et al., 2025). Esta variabilidad implica que la dosificación óptima de ceniza volcánica debe determinarse experimentalmente para cada región y tipo de suelo. En este sentido, los resultados obtenidos en esta investigación aportan información relevante para el aprovechamiento de depósitos volcánicos presentes en el Ecuador, especialmente en la región andina.

Diversos análisis de sostenibilidad y estudios de ciclo de vida han demostrado que el uso de ceniza volcánica como estabilizador de suelos puede reducir significativamente los costos de construcción y la huella de carbono asociada a proyectos de infraestructura (Hossain et al., 2022). Estos beneficios económicos y ambientales refuerzan la importancia de continuar investigando el potencial de este material en aplicaciones geotécnicas. En concordancia con estos planteamientos, los resultados obtenidos en el presente estudio evidencian que la ceniza volcánica constituye una alternativa viable, sostenible y técnicamente eficiente para mejorar las propiedades geotécnicas de suelos arcillosos utilizados en obras de ingeniería civil.

# CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

- La caracterización física y química de la ceniza volcánica proveniente de fuentes locales permitió identificar que este material presenta propiedades mineralógicas y granulométricas adecuadas para su uso como estabilizador de suelos. La ceniza volcánica analizada contiene partículas finas con presencia de compuestos ricos en sílice y aluminio, los cuales le confieren propiedades puzolánicas capaces de reaccionar con los componentes del suelo. Estas características favorecen la mejora del comportamiento geotécnico del material cuando se incorpora en mezclas suelo–ceniza, evidenciando su potencial como alternativa sostenible para la estabilización de suelos utilizados en obras de infraestructura.
- La evaluación de las propiedades geotécnicas iniciales del suelo arcilloso permitió determinar que el material presenta un alto contenido de finos, plasticidad moderada y un potencial de expansión significativo. Estas características evidencian que el suelo natural posee limitaciones para su utilización directa en obras de ingeniería civil, especialmente en aplicaciones como subrasantes de pavimentos o cimentaciones superficiales. La identificación de estas propiedades iniciales permitió establecer una línea base para comparar posteriormente el efecto de la incorporación de ceniza volcánica en la mejora del comportamiento geotécnico del suelo.
- El diseño de mezclas suelo–ceniza en diferentes proporciones permitió evaluar la influencia de la ceniza volcánica en las propiedades geotécnicas del suelo arcilloso. Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio evidencian que la incorporación de porcentajes moderados de ceniza volcánica contribuye a mejorar la resistencia mecánica del suelo y a reducir su potencial de expansión. Entre las

dosificaciones evaluadas, las mezclas con contenidos cercanos al 4 % de ceniza presentaron un comportamiento favorable en términos de resistencia y estabilidad volumétrica, lo que sugiere que esta proporción puede considerarse adecuada para procesos de estabilización.

- La comparación entre el comportamiento del suelo estabilizado con ceniza volcánica y los resultados reportados en estudios sobre estabilización con materiales convencionales demuestra que la ceniza volcánica puede representar una alternativa viable desde el punto de vista técnico y ambiental. Si bien los estabilizadores tradicionales como el cemento o la cal pueden generar incrementos mayores en la resistencia del suelo, la ceniza volcánica ofrece ventajas importantes en términos de sostenibilidad, disponibilidad local y reducción de costos. Por lo tanto, su uso puede ser especialmente beneficioso en proyectos donde se priorice el uso de materiales naturales y la reducción del impacto ambiental.
- La identificación de las zonas del Ecuador con mayor disponibilidad de ceniza volcánica permitió determinar que la región interandina presenta importantes depósitos de este material, especialmente en áreas cercanas a volcanes activos como Cotopaxi, Tungurahua y Reventador. La presencia de estos depósitos, junto con su proximidad a vías de transporte y centros urbanos, facilita su aprovechamiento para aplicaciones constructivas. Esto representa una oportunidad significativa para el desarrollo de soluciones geotécnicas basadas en el uso de recursos naturales disponibles localmente.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar estudios adicionales de caracterización mineralógica y química más detallados, utilizando técnicas como difracción de rayos X (XRD) o microscopía electrónica de barrido (SEM), con el fin de identificar con mayor precisión la composición de la ceniza volcánica y su grado de reactividad puzolánica. Además, es importante evaluar la variabilidad de las propiedades de la ceniza proveniente de diferentes depósitos volcánicos del país para determinar su comportamiento en distintos contextos geotécnicos.
- Se recomienda ampliar la caracterización geotécnica de los suelos estudiados mediante la realización de ensayos adicionales como corte directo, consolidación y permeabilidad, con el objetivo de obtener una comprensión más completa del comportamiento del material bajo diferentes condiciones de carga y drenaje. Asimismo, sería conveniente analizar su comportamiento en condiciones de campo para validar los resultados obtenidos en laboratorio.
- Se recomienda realizar ensayos adicionales que incluyan diferentes tiempos de curado y una mayor variedad de porcentajes de ceniza volcánica con el fin de identificar con mayor precisión la dosificación óptima para la estabilización del suelo. Además, es importante incorporar ensayos como el Índice de Soporte de California (CBR) y pruebas de durabilidad para evaluar el comportamiento del material estabilizado bajo condiciones similares a las que experimentará en proyectos reales de infraestructura.
- Se recomienda desarrollar investigaciones comparativas más amplias que incluyan mezclas híbridas de ceniza volcánica con pequeñas cantidades de cal o cemento, con el objetivo de evaluar si es posible optimizar las propiedades mecánicas del suelo manteniendo al mismo tiempo las ventajas ambientales asociadas al uso de materiales

naturales. Este enfoque podría contribuir al desarrollo de soluciones de estabilización más eficientes y sostenibles.

- Se recomienda realizar estudios geológicos y geotécnicos más detallados para cuantificar el volumen y las propiedades de los depósitos de ceniza volcánica presentes en diferentes regiones del Ecuador. Asimismo, sería conveniente desarrollar mapas geotécnicos y bases de datos de materiales volcánicos que faciliten la planificación y el uso eficiente de estos recursos en proyectos de ingeniería civil y desarrollo de infraestructura.

## 6. BIBLIOGRAFÍA


Abdullah, H. H., Shahin, M. A., & Walske, M. L. (2019). Geo-mechanical behavior of clay soils stabilized at ambient temperature with fly-ash geopolymer-incorporated granulated slag. *Soils and Foundations*, *59*(6), 1906–1920. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.08.005

Abu Yosef, S. A. S. (2024). *Sustainable stabilization of expansive soil using fly ash, olive cake ash, and zeolite mixtures: A comparative experimental study with PLAXIS modeling*. https://polen.itu.edu.tr/server/api/core/bitstreams/a5c30b10-90f3-4617-bd61-04e8b7c2aa95/content

Abutaqa, A., Mohsen, M. O., Aburumman, M. O., Senouci, A., Taha, R., Maherzi, W., & Qtiashat, D. (2024). Eco-Sustainable Cement: Natural Volcanic Tuffs' Impact on Concrete Strength and Durability. *Buildings*, *14*(9). https://doi.org/10.3390/buildings14092902

Afolagboye, L. O., Ilesanmi, B. I., & Abdu-Raheem, Y. A. (2024). An appraisal of the problems related to the application of Casagrande Plasticity Chart and Unified Soil Classification System in classifying lateritic soils in Nigeria. *Discover Geoscience*, *2*(1), 22. https://doi.org/10.1007/s44288-024-00024-2

Ali, L. H., & Atemimi, Y. K. (2024). Effective Use of Pozzolanic Materials for Stabilizing Expansive Soils: A Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1374*(1), 012014. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1374/1/012014/meta

Andrew, R. M. (2019). Global CO 2 emissions from cement production, 1928–2018. *Earth System Science Data*, *11*(4), 1675–1710.

ASTM. (2010). *Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. ASTM international.

ASTM, D. (2014). *4546-08. Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils*. American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, USA.

Basar, I., Torrens-Martín, D., Fernández-Carrasco, L., Caiza, C., Martínez-Bofill, J., & Hürlimann, M. (2025). Sample Origin Effect on Chemical Reactivity of Tajogaite Volcanic Ashes for Ancient Mortar Repair. *Sustainable Chemistry*, *6*(3). https://doi.org/10.3390/suschem6030018

Bell, F. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering geology*, *42*(4), 223–237.

Bhardwaj, A., & Sharma, R. K. (2022). Designing thickness of subgrade for flexible pavements incorporating waste foundry sand, molasses, and lime. *Innovative Infrastructure Solutions*, *7*(1), 132. https://doi.org/10.1007/s41062-021-00723-6

Carrera, L., Gavilanes, I., Idrovo, J., Ramos, C., Valverde, V. H., Bravo-Basantes, V., Ramos-Romero, S., Paredes, C., Hernández, F., & Carbonell-Barrachina, Á. A. (2025). Soil Amendments, Physicochemical Properties, and Metal Accumulation in Soils and Vegetables of Volcanic and Non-Volcanic Regions in Ecuador. *Agronomy*, *15*(5), 1166.

Fadmoro, O. F., Kar, S. S., Tiwari, D., & Singh, A. (2022). Environmental and Economic Impact of Mixed Cow Dung and Husk Ashes in Subgrade Soil Stabilization. *International Journal of Pavement Research and Technology*, *15*(4), 835–846. https://doi.org/10.1007/s42947-021-00056-8

Gómez, E., Navas, D., Aponte, G., & Betancourt, L. A. (2014). Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización. *Dyna*, *81*(184), 158–163.

Groot, C., Veiga, R., Papayianni, I., Van Hees, R., Secco, M., Alvarez, J. I., Faria, P., & Stefanidou, M. (2022). RILEM TC 277-LHS report: Lime-based mortars for

restoration–a review on long-term durability aspects and experience from practice. *Materials and Structures*, *55*(10), 245. https://doi.org/10.1617/s11527-022-02052-1

Hamada, H. M., Abed, F., Beddu, S., Humada, A. M., & Majdi, A. (2023). Effect of Volcanic Ash and Natural Pozzolana on mechanical properties of sustainable cement concrete: A comprehensive review. *Case Studies in Construction Materials*, *19*, e02425.

Hernández, R., Fernandez, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la Investigación. 6ta edición McGRAW-HILL. *Educación, México*.

Hidalgo, S., Bernard, B., Mothes, P., Ramos, C., Aguilar, J., Andrade, D., Samaniego, P., Yepes, H., Hall, M., Alvarado, A., Segovia, M., Ruiz, M., Ramón, P., Vaca, M., & IG-EPN staff. (2023). Hazard assessment and monitoring of Ecuadorian volcanoes: Challenges and progresses during four decades since IG-EPN foundation. *Bulletin of Volcanology*, *86*(1), 4. https://doi.org/10.1007/s00445-023-01685-6

Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (1981). *An introduction to geotechnical engineering* (Vol. 733). Prentice-hall Englewood Cliffs, NJ. https://www.academia.edu/download/53733597/libro.pdf

Hong, F., Wang, M., Dong, B., Diao, X., Zhang, X., Pang, K., Zhang, Y., & Hou, D. (2023). Molecular Insight into the Pozzolanic Reaction of Metakaolin and Calcium Hydroxide. *Langmuir*, *39*(10), 3601–3609. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c03115

Hossain, M. U., Wong, J. J., Ng, S. T., & Wang, Y. (2022). Sustainable design of pavement systems in highly urbanized context: A lifecycle assessment. *Journal of Environmental Management*, *305*, 114410.

Huvaj, N., & Uyeturk, E. (2018). Effects of drying on Atterberg limits of pyroclastic soils of Northern Turkey. *Applied Clay Science*, *162*, 46–56.

Ikeagwuani, C. C., & Nwonu, D. C. (2019a). Emerging trends in expansive soil stabilisation: A review. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, *11*(2), 423–440.

Ikeagwuani, C. C., & Nwonu, D. C. (2019b). Emerging trends in expansive soil stabilisation: A review. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, *11*(2), 423–440.

Indiramma, P., Sudharani, C., & Needhidasan, S. (2020). Utilization of fly ash and lime to stabilize the expansive soil and to sustain pollution free environment–An experimental study. *Materials Today: Proceedings*, *22*, 694–700.

Ingles, O. G., & Metcalf, J. B. (1972). *Soil stabilization principles and practice*. https://trid.trb.org/View/137528

Játiva, A., Ruales, E., & Etxeberria, M. (2021a). Volcanic ash as a sustainable binder material: An extensive review. *Materials*, *14*(5), 1302.

Játiva, A., Ruales, E., & Etxeberria, M. (2021b). Volcanic ash as a sustainable binder material: An extensive review. *Materials*, *14*(5), 1302.

Jiménez, L. S., Vega, N., Capa, E. D., Fierro, N. del C., & Quichimbo, P. (2019). Estilos y estrategia de enseñanza-aprendizaje de estudiantes universitarios de la Ciencia del Suelo. *Revista electrónica de investigación educativa*, *21*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1607-40412019000100106&script=sci_arttext

Khan, K., Amin, M. N., Usman, M., Imran, M., Al-Faiad, M. A., & Shalabi, F. I. (2022). Effect of Fineness and Heat Treatment on the Pozzolanic Activity of Natural Volcanic Ash for Its Utilization as Supplementary Cementitious Materials. *Crystals*, *12*(2). https://doi.org/10.3390/cryst12020302

Khosravifardshirazi, B. (2024). *Stabilization of clay soil with glass powder*. University of Exeter (United Kingdom).

https://search.proquest.com/openview/65b5fbaf764a863add012f9bdac24056/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y

Licuy, C. A., & Román, K. E. (2020). *Estudio de la estabilización de arcillas expansivas utilizando el 10, 20 y 30% en peso, de puzolanas de ceniza del volcán Tungurahua y ceniza de la cascarilla de arroz en composiciones iguales* [B.S. thesis, Quito, 2020.]. https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20630

López, J. (2021). *Estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante, en la localidad de Moyobamba–departamento de San Martín*. https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/654616

Melentijević, S., López Marcos, A., Ponce, R., & López-Andrés, S. (2025). Stabilization of expansive clay using volcanic ash. *Geosciences*, *15*(7), 261.

Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior.* https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20053183629

Musa, A., Alhaji, M. M., & Musa, A. (2020). *Stabilization of clay soil using cement and volcanic ash for sustainable pavement structure*. http://irepo.futminna.edu.ng:8080/jspui/handle/123456789/10272

Paul, S., Chakraborty, P., Anwar, A. B., Mortoza, G., & Sukti, L. S. (2025). Effect of cement and sugarcane bagasse ash on the micro-mechanical characteristics of expansive soil. *Results in Engineering*, *27*, 106874. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106874

Pinheiro, V. D., Alexandre, J., Xavier, G. de C., Marvila, M. T., Monteiro, S. N., & de Azevedo, A. R. G. (2023). Methods for Evaluating Pozzolanic Reactivity in Calcined Clays: A Review. *Materials*, *16*(13), 4778. https://doi.org/10.3390/ma16134778

Posani, M., Habert, G., Djombou, Y. I. F., Du, Y., Vereecken, E., Esteve-Bourrel, P., Pinchard, L., Losini, A., Coelho, G., & Ben-Alon, L. (2025). Bio-stabilised earthen materials: A perspective on the potential contribution to climate change adaptation

and mitigation. *1st RILEM Youth Symposium on Building Materials and Construction 2025*. https://www.researchgate.net/profile/Magda-Posani/publication/392094902_Bio-stabilised_earthen_materials_a_perspective_on_the_potential_contribution_to_climate_change_adaptation_and_mitigation/links/68345db16b5a287c30456332/Bio-stabilised-earthen-materials-a-perspective-on-the-potential-contribution-to-climate-change-adaptation-and-mitigation.pdf

Razeghi, H. R., Ghadir, P., & Javadi, A. A. (2022). Mechanical strength of saline sandy soils stabilized with alkali-activated cements. *Sustainability*, *14*(20), 13669.

Rendón, M. I., Viviescas, J. C., Osorio, J. P., & Hernández, M. S. (2020). Chemical, Mineralogical and Geotechnical Index Properties Characterization of Volcanic Ash Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, *38*(3), 3231–3244. https://doi.org/10.1007/s10706-020-01219-3

Rifa'i, A., & Yasufuku, N. (2014). Effect of Volcanic Ash Utilization As Substitution Material for Soil Stabilization in View Point of Geo-Environment. *Ground Improvement and Geosynthetics*, 138–147. https://doi.org/10.1061/9780784413401.014

Rivera, J. F., Aguirre, A. M., de Gutiérrez, R. M., & Orobio, A. (2020). Estabilización química de suelos-Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión). *Informador técnico*, *84*(2), 202–226.

Salimi, M., Dordsheykhtorkamani, A., Afrasiabian, A., & Khajeh, A. (2021). Incorporation of Volcanic Ash for Enhanced Treatment of a Cement-Stabilized Clayey Soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *33*(2), 04020465. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003571

Serrano, J. (2020). *Construcción en tierra en países de riesgo sísmico y reforzamiento sismo resistente: Estado del arte*. https://upcommons.upc.edu/entities/publication/1dae436f-9e81-46be-be33-199bbaab6a2c

Sherwood, P. (1993). *Soil stabilization with cement and lime*. https://trid.trb.org/view/389479?fbclid=IwAR3agFB7FM9UrRJ__MAnWFkWshlIjLCXwDaaqUPwvsP-nl3pKrUut_lB4I

Simbaña, K., Jaramillo, D. S., Guerrero, J. P., Jimbo, R., Sánchez, X., Mulas, M., & Boada, L. D. (2025). Volcanic eruptions and public health in Ecuador: An analysis of institutional gaps and integrated strategies. *Frontiers in Public Health*, *13*, 1705862.

Tafida, A., Alaloul, W. S., Zawawi, N. A. B. W., Musarat, M. A., & Abubakar, A. S. (2024). A review of eco-friendly road infrastructure innovations for sustainable transportation. *Infrastructures*, *9*(12), 216.

Troncoso, E. V. (2024). *Utilization of Ecuadorian volcanic ashes as supplementary material in construction: Reactivity and effect on the performance of mortars, concretes, and soils* [PhD Thesis, Université de Toulouse]. https://theses.hal.science/tel-05045996/

Turan, C., Javadi, A. A., Vinai, R., & Russo, G. (2022). Effects of fly ash inclusion and alkali activation on physical, mechanical, and chemical properties of clay. *Materials*, *15*(13), 4628.

Umar, I. H., Tarauni, Z. A., Bello, A. B., Lin, H., Hassan, J. I., & Cao, R. (2025). Performance Prediction and Optimization of High-Plasticity Clay Lime–Cement Stabilization Based on Principal Component Analysis and Principal Component Regression. *Applied Sciences*, *15*(13). https://doi.org/10.3390/app15137150

Vincevica, Z., Teppand, T., Kriipsalu, M., Krievans, M., Jani, Y., Klavins, M., Hendroko Setyobudi, R., Grinfelde, I., Rudovica, V., & Tamm, T. (2021). Towards sustainable

soil stabilization in peatlands: Secondary raw materials as an alternative. *Sustainability*, *13*(12), 6726.

Viñán, A. P. O., Maldonado, M. D. G., & Vásquez, J. C. G. (2025). Mejoramiento de suelos mediante sustitución química: Estudio de caso de la autopista Azogues-El Descanso (Ecuador). *European Public & Social Innovation Review*, *10*, 1–19.

Yohanna, P., Johnson, P., Victor, B. P., Badamasi, A., Mije, F. G., Ako, T., & Bassey, A. B. (2022). Evaluation of geotechnical properties of black cotton soil reinforced with sisal fibre for waste containment application. *Engineering Science & Technology*, 150–167.

Zada, N. S., Shafiq, N., Waqar, A., Baarimah, A. O., Alawag, A. M., Alajmi, M., & Almujibah, H. (2025). Engineering attributes of coir fibre ash incorporated sustainable lime concrete. *Scientific Reports*, *15*, 45623. https://doi.org/10.1038/s41598-025-30132-z

Zhang, J., Soltani, A., Deng, A., & Jaksa, M. B. (2019). Mechanical behavior of micaceous clays. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *11*(5), 1044–1054. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.04.001

## 7. Anexos

**Ilustración 1.** Equipo utilizado para compactar la muestra para el ensayo de compresión simple

| | | |
|---|---|---|
| PESO | | |
| DIAMETRO | | |
| ALTURA (h) | | |



| | | |
|---|---|---|
| PESO | | |
| ALTURA DE CAIDA | | |



**Ilustración 2.** Procedimiento de cómo se realizó las probetas para ensayo de compresión simple



**Ilustración 3.** Equipo Utilizado Para El Ensayo De Compresión Simple



**Tabla 7-1.** Datos de los anillos para el ensayo de expansión libre

| | |
|---|---|
| DIAMETRO | |
| ALTURA | |
| PESO | |
| AREA | |
| VOLUMEN | |

| | |
|---|---|
| DIAMETRO | |
| ALTURA | |
| PESO | |
| AREA | |
| VOLUMEN | |

**Ilustración 4.** Equipo Utilizado Para El Ensayo De Expansión Libre

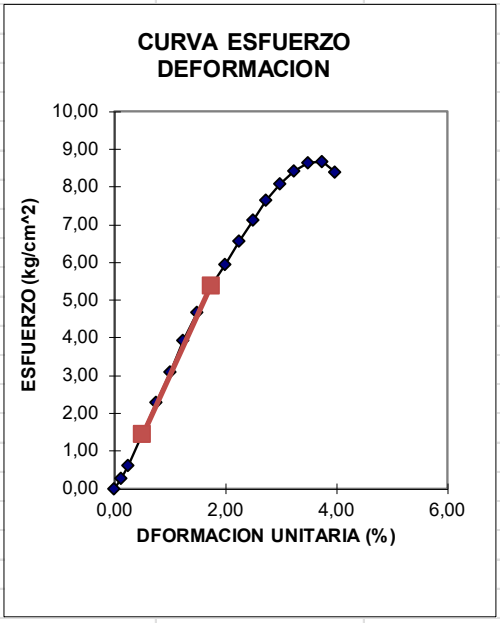


**Anexo 1.** Ensayo De Resistencia A La Compresión Simple

## 0%CENIZA (MODIFICADO)

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **DS** | 5,08 | **Peso inicial** | 404,5 | **Realizado por** | M.Zurita |
| **DC** | 5,08 | **Vol. inicial** | 206,74 | **Calculado por** | M. Zurita |
| **DI** | 5,08 | **mm. inicial** | 1,957 | **Cnte. anillo kg** | lec x 0,3351 |
| **DM** | 5,08 | **md. inicial** | 1,635 | | |
| **AM** | 20,27 | | | | |
| **HM** | 10,20 | | | | |

| DEFORMACION pulg x 10^ -3 | DIAL DE CARGA pulg x 10^ -4 | DEFOR. UNITAR % | ESFUERZO kg/cm^2 |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 17 | 0,12 | 0,28 |
| 10 | 38 | 0,25 | 0,63 |
| 20 | 88 | 0,50 | 1,45 |
| 30 | 140 | 0,75 | 2,30 |
| 40 | 190 | 1,00 | 3,11 |
| 50 | 241 | 1,25 | 3,93 |
| 60 | 287 | 1,49 | 4,67 |
| 70 | 331 | 1,74 | 5,38 |
| 80 | 367 | 1,99 | 5,95 |
| 90 | 406 | 2,24 | 6,56 |
| 100 | 442 | 2,49 | 7,13 |
| 110 | 476 | 2,74 | 7,65 |
| 120 | 504 | 2,99 | 8,08 |
| 130 | 527 | 3,24 | 8,43 |
| 140 | 542 | 3,49 | 8,65 |
| 150 | 546 | 3,74 | 8,69 |
| 160 | 529 | 3,98 | 8,40 |




**RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE**

| | | |
|---|---|---|
| **$q_u$=** | 8,08 | kg/cm^2 |
| **E=** | 316,9 | kg/cm^2 |

**GRAFICO DE LA MUESTRA ENSAYADA**



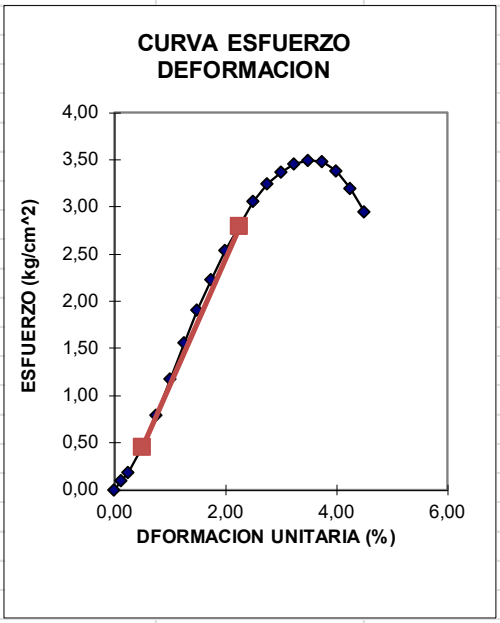
**CONTENIDO DE HUMEDAD**

| | |
|---|---|
| **CAPSULA No** | 310 |
| **P.CAP.+S. HUM.** | 58,91 |
| **P.CAP. +S.SECO** | 52,06 |
| **P. CAPSULA** | 17,26 |
| **HUMEDAD %** | 19,68 |

## 0%CENIZA (ESTÁNDAR)

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **DS** | 5,08 | **Peso inicial** | 394,46 | **Realizado por** | M.Zurita |
| **DC** | 5,08 | **Vol. inicial** | 206,13 | **Calculado por** | M. Zurita |
| **DI** | 5,08 | **mm. inicial** | 1,914 | **Cnte. anillo kg** | lec x 0,3351 |
| **DM** | 5,08 | **md. inicial** | 1,599 | | |
| **AM** | 20,27 | | | | |
| **HM** | 10,17 | | | | |

| DEFORMACION pulg x 10^ -3 | DIAL DE CARGA pulg x 10^ -4 | DEFOR. UNITAR % | ESFUERZO kg/cm^2 |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 6 | 0,12 | 0,10 |
| 10 | 11 | 0,25 | 0,18 |
| 20 | 28 | 0,50 | 0,46 |
| 30 | 48 | 0,75 | 0,79 |
| 40 | 72 | 1,00 | 1,18 |
| 50 | 96 | 1,25 | 1,57 |
| 60 | 117 | 1,50 | 1,91 |
| 70 | 137 | 1,75 | 2,23 |
| 80 | 157 | 2,00 | 2,54 |
| 90 | 173 | 2,25 | 2,80 |
| 100 | 190 | 2,50 | 3,06 |
| 110 | 202 | 2,75 | 3,25 |
| 120 | 210 | 3,00 | 3,37 |
| 130 | 216 | 3,25 | 3,46 |
| 140 | 219 | 3,50 | 3,49 |
| 150 | 219 | 3,75 | 3,49 |
| 160 | 213 | 4,00 | 3,38 |
| 170 | 202 | 4,25 | 3,20 |
| 180 | 187 | 4,50 | 2,95 |




**RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE**

| | | |
|---|---|---|
| **$q_u$=** | 3,37 | kg/cm^2 |
| E= | 133,7 | kg/cm^2 |

GRAFICO DE LA MUESTRA ENSAYADA

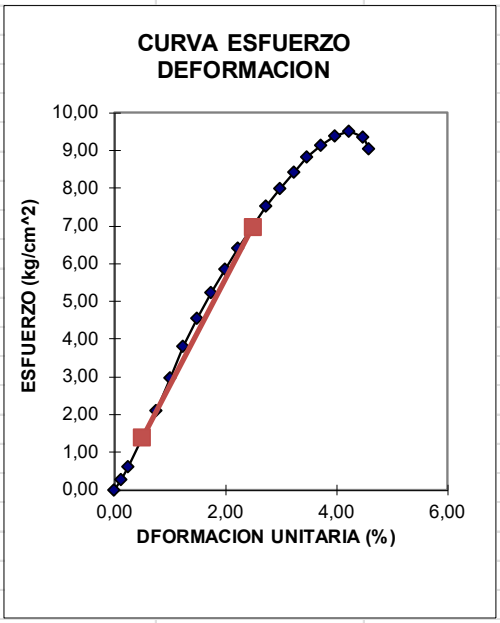
**CONTENIDO DE HUMEDAD**

| | |
|---|---|
| **CAPSULA No** | 310 |
| **P.CAP.+S. HUM.** | 58,91 |
| **P.CAP. +S.SECO** | 52,06 |
| **P. CAPSULA** | 17,26 |
| **HUMEDAD %** | 19,68 |

## 2%CENIZA (MODIFICADO)

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **DS** | 5,08 | **Peso inicial** | 405,03 | **Realizado por** | M.Zurita |
| **DC** | 5,08 | **Vol. inicial** | 207,14 | **Calculado por** | M. Zurita |
| **DI** | 5,08 | **mm. inicial** | 1,955 | **Cnte. anillo kg** | lec x 0,3351 |
| **DM** | 5,08 | **md. inicial** | 1,629 | | |
| **AM** | 20,27 | | | | |
| **HM** | 10,22 | | | | |

| DEFORMACION pulg x 10^ -3 | DIAL DE CARGA pulg x 10^ -4 | DEFOR. UNITAR % | ESFUERZO kg/cm^2 |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 17 | 0,12 | 0,28 |
| 10 | 38 | 0,25 | 0,63 |
| 20 | 85 | 0,50 | 1,40 |
| 30 | 129 | 0,75 | 2,12 |
| 40 | 181 | 0,99 | 2,96 |
| 50 | 233 | 1,24 | 3,80 |
| 60 | 279 | 1,49 | 4,54 |
| 70 | 322 | 1,74 | 5,23 |
| 80 | 362 | 1,99 | 5,87 |
| 90 | 397 | 2,24 | 6,42 |
| 100 | 433 | 2,49 | 6,98 |
| 110 | 469 | 2,73 | 7,54 |
| 120 | 499 | 2,98 | 8,00 |
| 130 | 526 | 3,23 | 8,42 |
| 140 | 554 | 3,48 | 8,84 |
| 150 | 574 | 3,73 | 9,14 |
| 160 | 591 | 3,98 | 9,38 |
| 170 | 601 | 4,23 | 9,52 |
| 180 | 592 | 4,47 | 9,35 |
| 190 | 574 | 4,59 | 9,05 |




**RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE**

| | | |
|---|---|---|
| **$q_u$=** | 8,00 | kg/cm^2 |
| E= | 280,4 | kg/cm^2 |

**CONTENIDO DE HUMEDAD**

| | |
|---|---|
| **CAPSULA No** | 509 |
| **P.CAP.+S. HUM.** | 56,12 |
| **P.CAP. +S.SECO** | 49,41 |
| **P. CAPSULA** | 15,97 |
| **HUMEDAD %** | 20,07 |

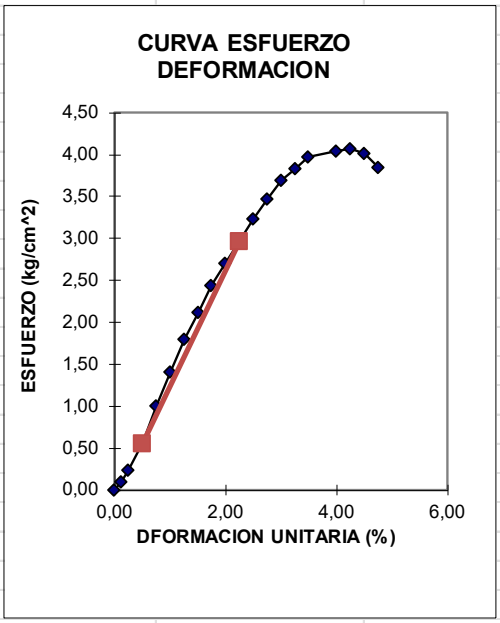
**GRAFICO DE LA MUESTRA ENSAYADA**



## 2%CENIZA (ESTÁNDAR)

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **DS** | 5,08 | **Peso inicial** | 391,23 | **Realizado por** | M.Zurita |
| **DC** | 5,08 | **Vol. inicial** | 205,93 | **Calculado por** | M. Zurita |
| **DI** | 5,08 | **mm. inicial** | 1,900 | **Cnte. anillo kg** | lec x 0,3351 |
| **DM** | 5,08 | **md. inicial** | 1,539 | | |
| **AM** | 20,27 | | | | |
| **HM** | 10,16 | | | | |

| DEFORMACION pulg x 10^ -3 | DIAL DE CARGA pulg x 10^ -4 | DEFOR. UNITAR % | ESFUERZO kg/cm^2 |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 6 | 0,13 | 0,10 |
| 10 | 14 | 0,25 | 0,23 |
| 20 | 34 | 0,50 | 0,56 |
| 30 | 61 | 0,75 | 1,00 |
| 40 | 86 | 1,00 | 1,41 |
| 50 | 110 | 1,25 | 1,80 |
| 60 | 130 | 1,50 | 2,12 |
| 70 | 150 | 1,75 | 2,44 |
| 80 | 167 | 2,00 | 2,71 |
| 90 | 184 | 2,25 | 2,97 |
| 100 | 201 | 2,50 | 3,24 |
| 110 | 216 | 2,75 | 3,47 |
| 120 | 230 | 3,00 | 3,69 |
| 130 | 240 | 3,25 | 3,84 |
| 140 | 249 | 3,50 | 3,97 |
| 160 | 255 | 4,00 | 4,05 |
| 170 | 257 | 4,25 | 4,07 |
| 180 | 254 | 4,50 | 4,01 |
| 190 | 244 | 4,75 | 3,84 |



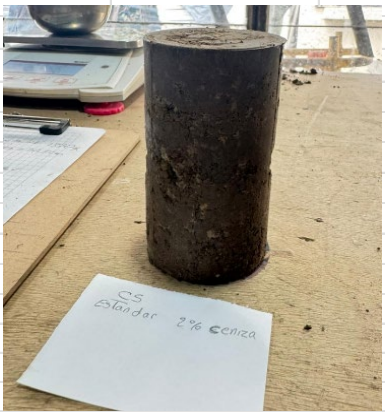

**RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE**

| | | |
|---|---|---|
| **$q_u$=** | 3,69 | kg/cm^2 |
| E= | 137,7 | kg/cm^2 |

**CONTENIDO DE HUMEDAD**

| | |
|---|---|
| **CAPSULA No** | 310 |
| **P.CAP.+S. HUM.** | 56,59 |
| **P.CAP. +S.SECO** | 48,87 |
| **P. CAPSULA** | 15,92 |
| **HUMEDAD %** | 23,43 |

**GRAFICO DE LA MUESTRA ENSAYADA**



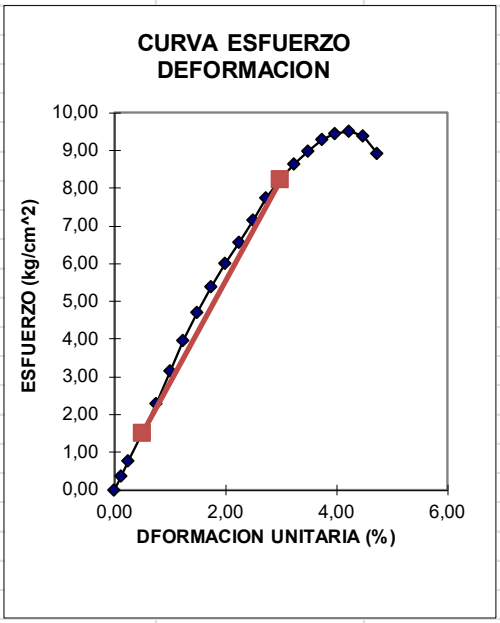
## 4%CENIZA (MODIFICADO)

| | |
|---|---|
| **DS** | 5,08 |
| **DC** | 5,08 |
| **DI** | 5,08 |
| **DM** | 5,08 |
| **AM** | 20,27 |
| **HM** | 10,20 |

| | |
|---|---|
| **Peso inicial** | 389,86 |
| **Vol. inicial** | 206,74 |
| **mm. inicial** | 1,886 |
| **md. inicial** | 1,573 |

| | |
|---|---|
| **Realizado por** | M.Zurita |
| **Calculado por** | M. Zurita |
| **Cnte. anillo kg** | lec x 0,3351 |

| DEFORMACION pulg x 10^ -3 | DIAL DE CARGA pulg x 10^ -4 | DEFOR. UNITAR % | ESFUERZO kg/cm^2 |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 23 | 0,12 | 0,38 |
| 10 | 47 | 0,25 | 0,78 |
| 20 | 93 | 0,50 | 1,53 |
| 30 | 140 | 0,75 | 2,30 |
| 40 | 193 | 1,00 | 3,16 |
| 50 | 243 | 1,25 | 3,97 |
| 60 | 289 | 1,49 | 4,71 |
| 70 | 331 | 1,74 | 5,38 |
| 80 | 371 | 1,99 | 6,01 |
| 90 | 407 | 2,24 | 6,58 |
| 100 | 444 | 2,49 | 7,16 |
| 110 | 482 | 2,74 | 7,75 |
| 120 | 514 | 2,99 | 8,24 |
| 130 | 541 | 3,24 | 8,65 |
| 140 | 563 | 3,49 | 8,98 |
| 150 | 584 | 3,74 | 9,29 |
| 160 | 596 | 3,98 | 9,46 |
| 170 | 600 | 4,23 | 9,50 |
| 180 | 595 | 4,48 | 9,40 |
| 190 | 567 | 4,73 | 8,93 |




**RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE**

| | | |
|---|---|---|
| **$q_u$=** | 8,24 | kg/cm^2 |
| E= | 269,5 | kg/cm^2 |

**CONTENIDO DE HUMEDAD**

| | |
|---|---|
| **CAPSULA No** | 521 |
| **P.CAP.+S. HUM.** | 48,2 |
| **P.CAP. +S.SECO** | 41,69 |
| **P. CAPSULA** | 8,97 |
| **HUMEDAD %** | 19,90 |

**GRAFICO DE LA MUESTRA ENSAYADA**



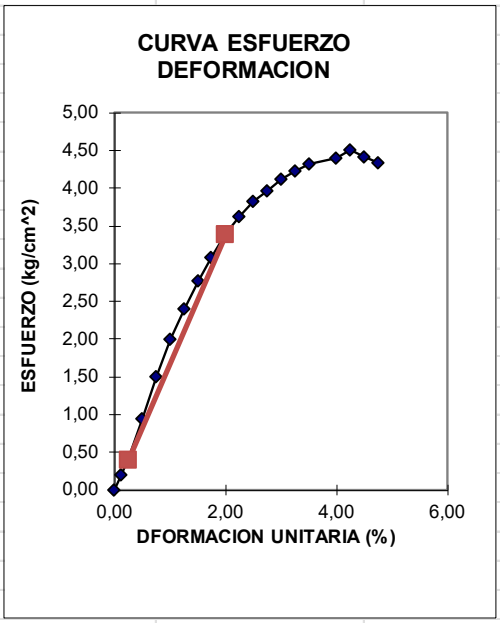
## 4%CENIZA (ESTÁNDAR)

| | |
|---|---|
| **DS** | 5,08 |
| **DC** | 5,08 |
| **DI** | 5,08 |
| **DM** | 5,08 |
| **AM** | 20,27 |
| **HM** | 10,15 |

| | |
|---|---|
| **Peso inicial** | 393,7 |
| **Vol. inicial** | 205,72 |
| **mm. inicial** | 1,914 |
| **md. inicial** | 1,552 |

| | |
|---|---|
| **Realizado por** | M.Zurita |
| **Calculado por** | M. Zurita |
| **Cnte. anillo kg** | lec x 0,3351 |

| DEFORMACION pulg x 10^ -3 | DIAL DE CARGA pulg x 10^ -4 | DEFOR. UNITAR % | ESFUERZO kg/cm^2 |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 12 | 0,13 | 0,20 |
| 10 | 25 | 0,25 | 0,41 |
| 20 | 57 | 0,50 | 0,94 |
| 30 | 92 | 0,75 | 1,51 |
| 40 | 122 | 1,00 | 2,00 |
| 50 | 147 | 1,25 | 2,40 |
| 60 | 170 | 1,50 | 2,77 |
| 70 | 190 | 1,75 | 3,09 |
| 80 | 209 | 2,00 | 3,39 |
| 90 | 224 | 2,25 | 3,62 |
| 100 | 237 | 2,50 | 3,82 |
| 110 | 247 | 2,75 | 3,97 |
| 120 | 257 | 3,00 | 4,12 |
| 130 | 264 | 3,25 | 4,22 |
| 140 | 271 | 3,50 | 4,32 |
| 160 | 277 | 4,00 | 4,40 |
| 170 | 285 | 4,25 | 4,51 |
| 180 | 280 | 4,50 | 4,42 |
| 190 | 275 | 4,75 | 4,33 |




**RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE**

| | | |
|---|---|---|
| **$q_u$=** | 4,12 | kg/cm^2 |
| **E=** | 170,3 | kg/cm^2 |

**CONTENIDO DE HUMEDAD**

| | |
|---|---|
| **CAPSULA No** | 501 |
| **P.CAP.+S. HUM.** | 63,17 |
| **P.CAP. +S.SECO** | 54,05 |
| **P. CAPSULA** | 14,98 |
| **HUMEDAD %** | 23,34 |

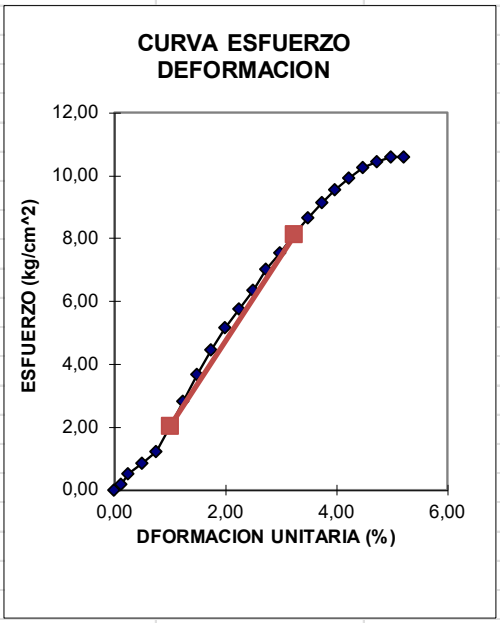
**GRAFICO DE LA MUESTRA ENSAYADA**



## 6%CENIZA (MODIFICADO)

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **DS** | 5,08 | **Peso inicial** | 392,58 | **Realizado por** | M.Zurita |
| **DC** | 5,08 | **Vol. inicial** | 206,74 | **Calculado por** | M. Zurita |
| **DI** | 5,08 | **mm. inicial** | 1,899 | **Cnte. anillo kg** | lec x 0,3351 |
| **DM** | 5,08 | **md. inicial** | 1,592 | | |
| **AM** | 20,27 | | | | |
| **HM** | 10,20 | | | | |

| DEFORMACION pulg x 10^ -3 | DIAL DE CARGA pulg x 10^ -4 | DEFOR. UNITAR % | ESFUERZO kg/cm^2 |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 12 | 0,12 | 0,20 |
| 10 | 31 | 0,25 | 0,51 |
| 20 | 52 | 0,50 | 0,86 |
| 30 | 75 | 0,75 | 1,23 |
| 40 | 124 | 1,00 | 2,03 |
| 50 | 173 | 1,25 | 2,82 |
| 60 | 226 | 1,49 | 3,68 |
| 70 | 274 | 1,74 | 4,45 |
| 80 | 318 | 1,99 | 5,15 |
| 90 | 357 | 2,24 | 5,77 |
| 100 | 395 | 2,49 | 6,37 |
| 110 | 436 | 2,74 | 7,01 |
| 120 | 437 | 2,99 | 7,56 |
| 130 | 509 | 3,24 | 8,14 |
| 140 | 543 | 3,49 | 8,66 |
| 150 | 575 | 3,74 | 9,15 |
| 160 | 602 | 3,98 | 9,56 |
| 170 | 627 | 4,23 | 9,93 |
| 180 | 649 | 4,48 | 10,25 |
| 190 | 663 | 4,73 | 10,44 |
| **200** | **674** | **4,98** | 10,59 |
| **210** | 677 | 5,23 | 10,61 |




**RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE**

| | | |
|---|---|---|
| **$q_u$=** | **7,56** | kg/cm^2 |
| **E=** | **272,8** | kg/cm^2 |

**CONTENIDO DE HUMEDAD**

| | |
|---|---|
| **CAPSULA No** | 321 |
| **P.CAP.+S. HUM.** | 64,07 |
| **P.CAP. +S.SECO** | 56,48 |
| **P. CAPSULA** | 17,11 |
| **HUMEDAD %** | 19,28 |

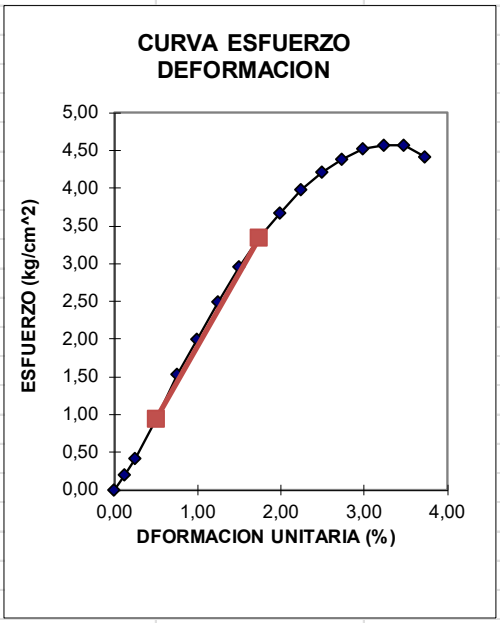
**GRAFICO DE LA MUESTRA ENSAYADA**



## 6%CENIZA (ESTÁNDAR)

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **DS** | 5,08 | **Peso inicial** | 392,5 | **Realizado por** | M.Zurita |
| **DC** | 5,08 | **Vol. inicial** | 206,74 | **Calculado por** | M. Zurita |
| **DI** | 5,08 | **mm. inicial** | 1,899 | **Cnte. anillo kg** | lec x 0,3351 |
| **DM** | 5,08 | **md. inicial** | 1,545 | | |
| **AM** | 20,27 | | | | |
| **HM** | 10,20 | | | | |

| DEFORMACION pulg x 10^ -3 | DIAL DE CARGA pulg x 10^ -4 | DEFOR. UNITAR % | ESFUERZO kg/cm^2 |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 12 | 0,12 | 0,20 |
| 10 | 25 | 0,25 | 0,41 |
| 20 | 57 | 0,50 | 0,94 |
| 30 | 93 | 0,75 | 1,53 |
| 40 | 122 | 1,00 | 2,00 |
| 50 | 153 | 1,25 | 2,50 |
| 60 | 182 | 1,49 | 2,96 |
| 70 | 206 | 1,74 | 3,35 |
| 80 | 227 | 1,99 | 3,68 |
| 90 | 246 | 2,24 | 3,98 |
| 100 | 261 | 2,49 | 4,21 |
| 110 | 273 | 2,74 | 4,39 |
| 120 | 282 | 2,99 | 4,52 |
| 130 | 286 | 3,24 | 4,58 |
| 140 | 286 | 3,49 | 4,56 |
| 150 | 277 | 3,74 | 4,41 |




**RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE**

| | | |
|---|---|---|
| **$q_u$=** | 4,52 | kg/cm^2 |
| **E=** | 194,4 | kg/cm^2 |

**CONTENIDO DE HUMEDAD**

| | |
|---|---|
| **CAPSULA No** | 501 |
| **P.CAP.+S. HUM.** | 62,86 |
| **P.CAP. +S.SECO** | 54,42 |
| **P. CAPSULA** | 17,57 |
| **HUMEDAD %** | 22,90 |

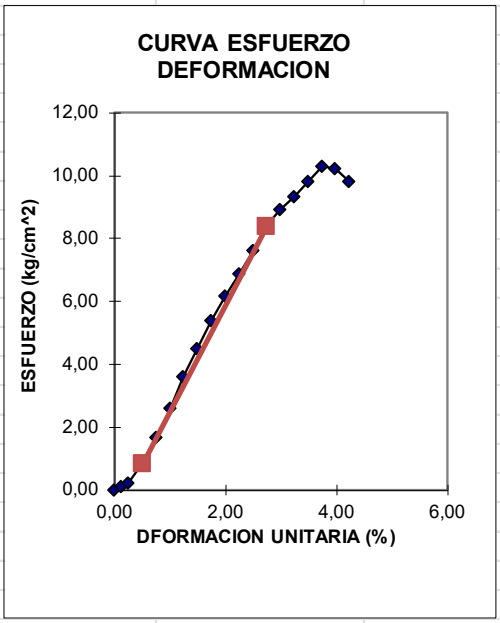
**GRAFICO DE LA MUESTRA ENSAYADA**



## 8%CENIZA (MODIFICADO)

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **DS** | 5,08 | **Peso inicial** | 401,53 | **Realizado por** | M.Zurita |
| **DC** | 5,08 | **Vol. inicial** | 206,74 | **Calculado por** | M. Zurita |
| **DI** | 5,08 | **mm. inicial** | 1,942 | **Cnte. anillo kg** | lec x 0,3351 |
| **DM** | 5,08 | **md. inicial** | 1,630 | | |
| **AM** | 20,27 | | | | |
| **HM** | 10,20 | | | | |

| DEFORMACION pulg x 10^ -3 | DIAL DE CARGA pulg x 10^ -4 | DEFOR. UNITAR % | ESFUERZO kg/cm^2 |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 7 | 0,12 | 0,12 |
| 10 | 14 | 0,25 | 0,23 |
| 20 | 51 | 0,50 | 0,84 |
| 30 | 102 | 0,75 | 1,67 |
| 40 | 160 | 1,00 | 2,62 |
| 50 | 222 | 1,25 | 3,62 |
| 60 | 276 | 1,49 | 4,49 |
| 70 | 332 | 1,74 | 5,39 |
| 80 | 382 | 1,99 | 6,19 |
| 90 | 425 | 2,24 | 6,87 |
| 100 | 472 | 2,49 | 7,61 |
| 110 | 522 | 2,74 | 8,39 |
| 120 | 557 | 2,99 | 8,93 |
| 130 | 584 | 3,24 | 9,34 |
| 140 | 616 | 3,49 | 9,83 |
| 150 | 647 | 3,74 | 10,30 |
| 160 | 644 | 3,98 | 10,22 |
| 170 | 619 | 4,23 | 9,80 |




RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE

| | | |
|---|---|---|
| **$q_u$=** | **8,93** | **kg/cm^2** |
| **E=** | 337,1 | kg/cm^2 |

CONTENIDO DE HUMEDAD

| | |
|---|---|
| **CAPSULA No** | **501** |
| **P.CAP.+S. HUM.** | 60,72 |
| **P.CAP. +S.SECO** | 53,67 |
| **P. CAPSULA** | 16,87 |
| **HUMEDAD %** | 19,16 |

**GRAFICO DE LA MUESTRA ENSAYADA**

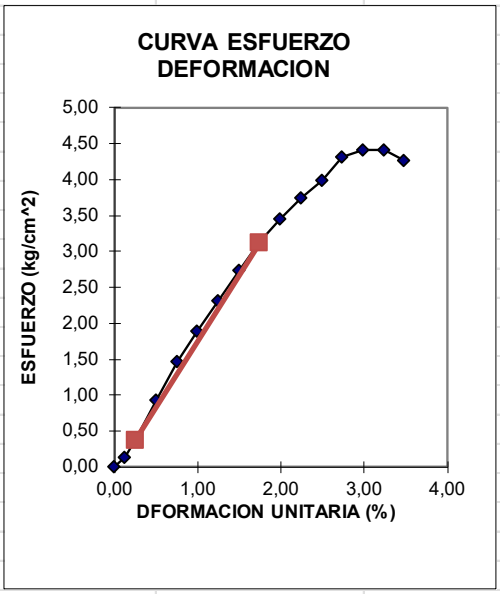


## 8%CENIZA (ESTÁNDAR)

| | |
|---|---|
| **DS** | 5,08 |
| **DC** | 5,08 |
| **DI** | 5,08 |
| **DM** | 5,08 |
| **AM** | 20,27 |
| **HM** | 10,20 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Peso inicial** | 391,91 | **Realizado por** | M.Zurita |
| **Vol. inicial** | 206,74 | **Calculado por** | M. Zurita |
| **mm. inicial** | 1,896 | **Cnte. anillo kg** | lec x 0,3351 |
| **md. inicial** | 1,554 | | |

| DEFORMACION pulg x 10^ -3 | DIAL DE CARGA pulg x 10^ -4 | DEFOR. UNITAR % | ESFUERZO kg/cm^2 |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 8 | 0,12 | 0,13 |
| 10 | 23 | 0,25 | 0,38 |
| 20 | 57 | 0,50 | 0,94 |
| 30 | 89 | 0,75 | 1,46 |
| 40 | 116 | 1,00 | 1,90 |
| 50 | 142 | 1,25 | 2,32 |
| 60 | 168 | 1,49 | 2,74 |
| 70 | 192 | 1,74 | 3,12 |
| 80 | 213 | 1,99 | 3,45 |
| 90 | 232 | 2,24 | 3,75 |
| 100 | 247 | 2,49 | 3,98 |
| 110 | 268 | 2,74 | 4,31 |
| 120 | 275 | 2,99 | 4,41 |
| 130 | 276 | 3,24 | 4,42 |
| 140 | 267 | 3,49 | 4,26 |




**RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE**

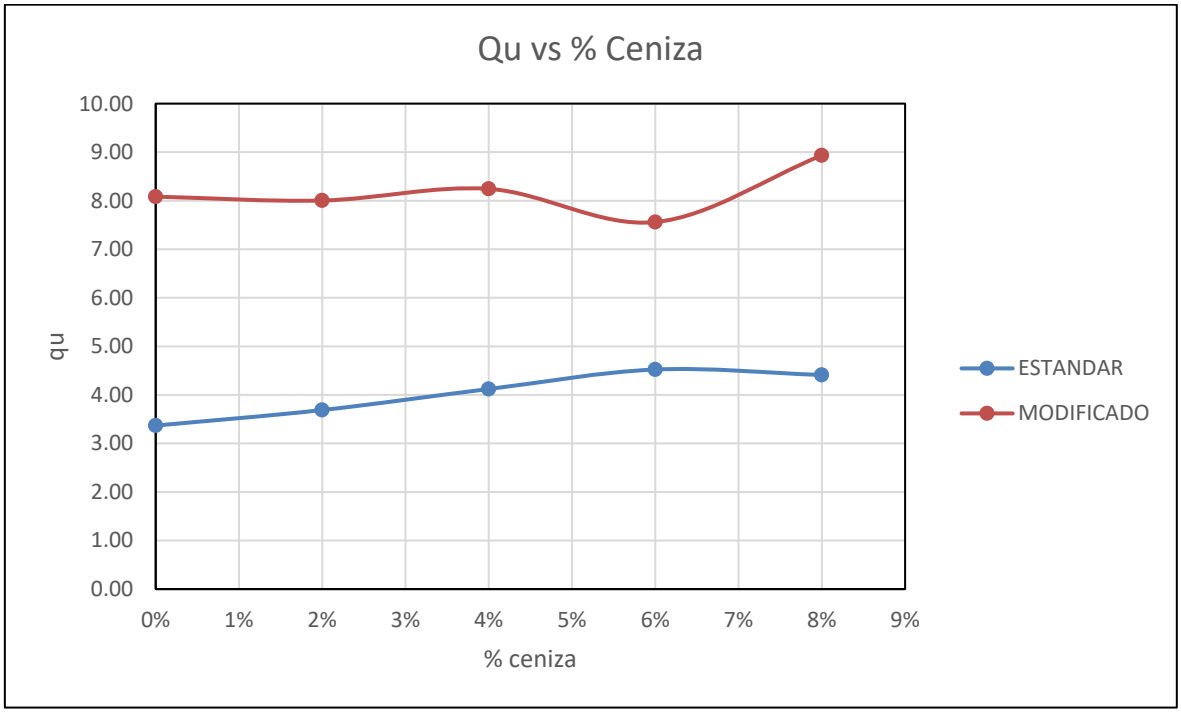
| | | |
|---|---|---|
| **$q_u$=** | 4,41 | kg/cm^2 |
| **E=** | 183,9 | kg/cm^2 |

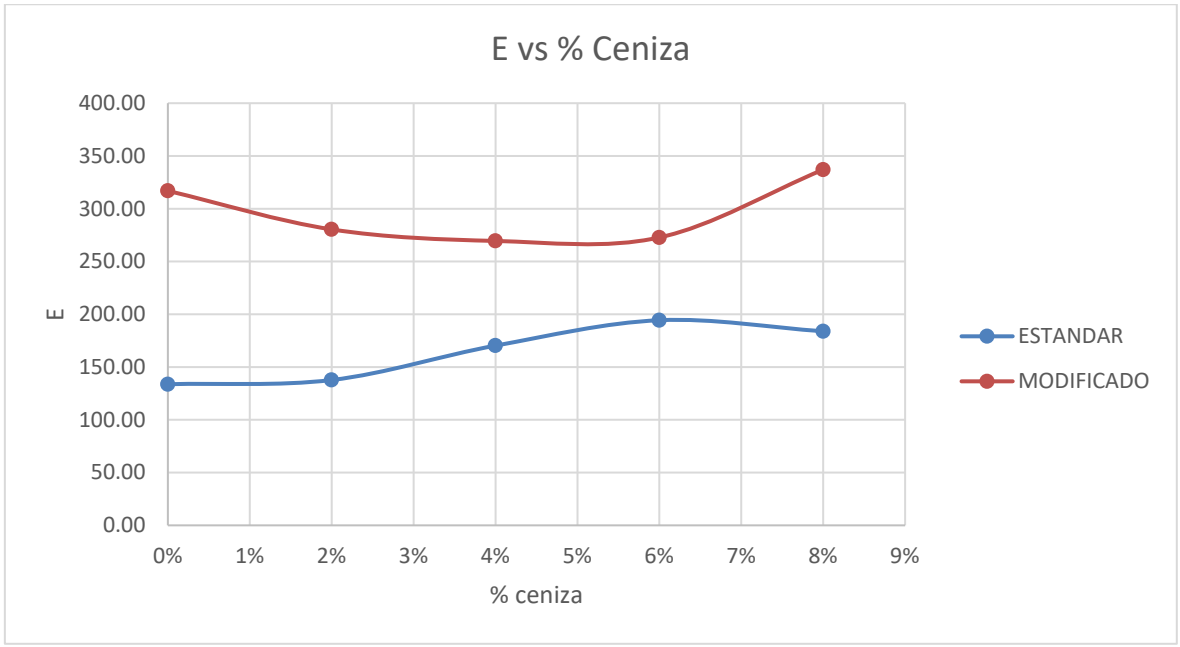
**GRAFICO DE LA MUESTRA ENSAYADA**

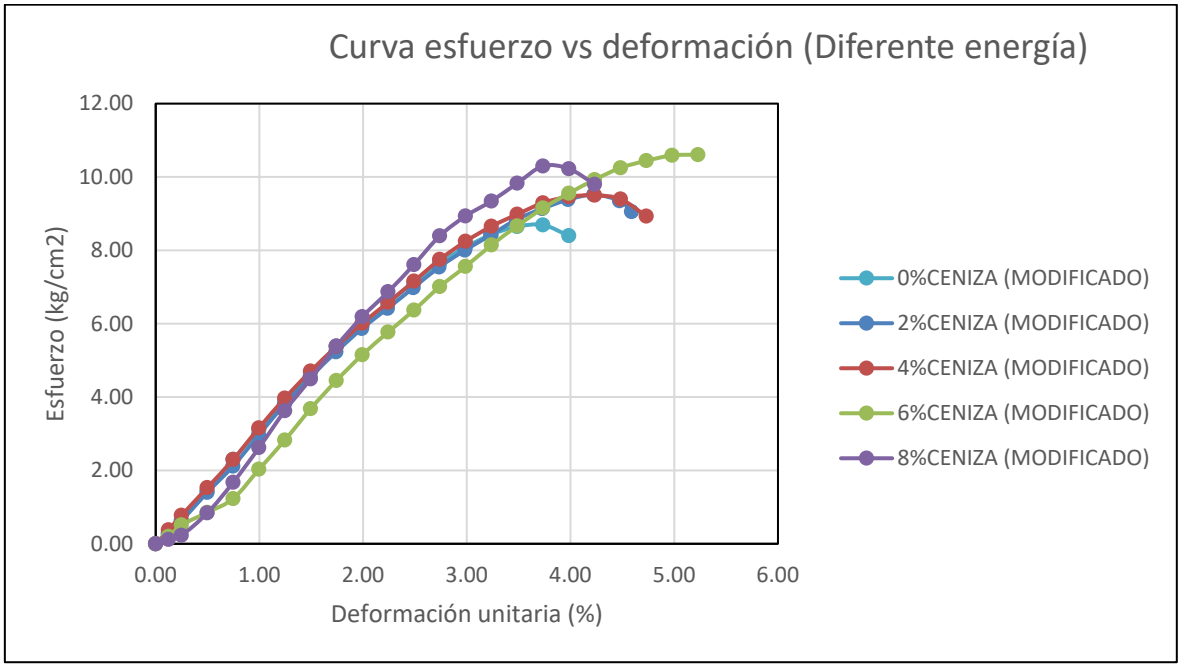


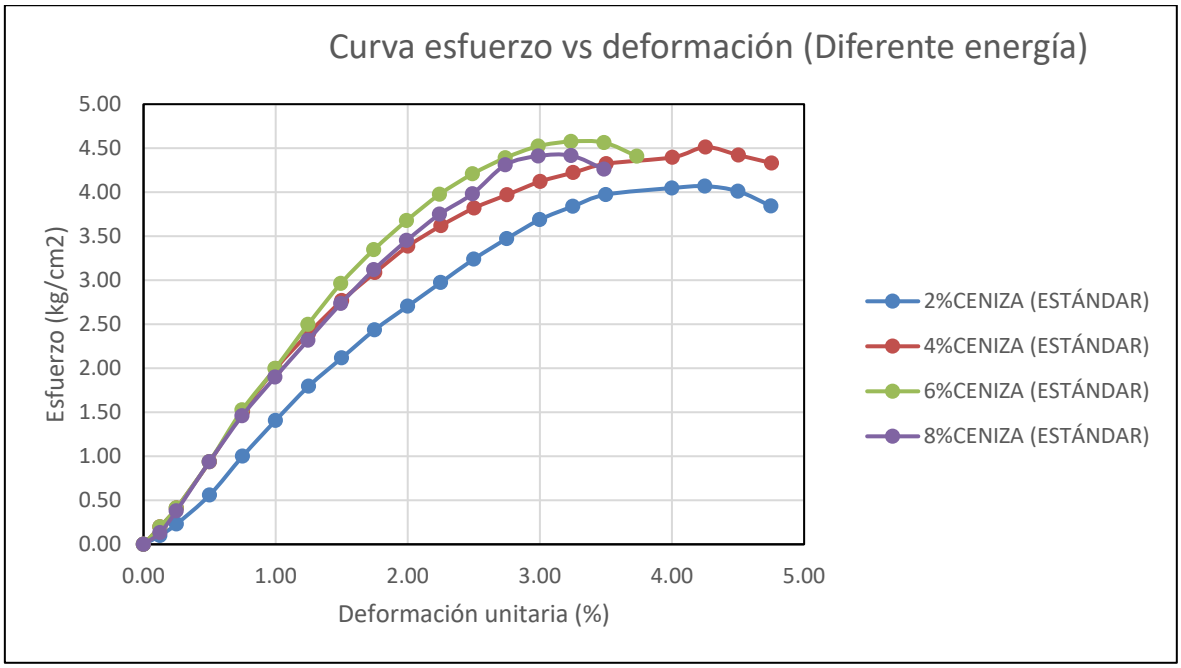

**CONTENIDO DE HUMEDAD**

| | |
|---|---|
| **CAPSULA No** | 724 |
| **P.CAP.+S. HUM.** | 55,43 |
| **P.CAP. +S.SECO** | 48,61 |
| **P. CAPSULA** | 17,62 |
| **HUMEDAD %** | 22,01 |


Qu vs % Ceniza
10.00
9.00
8.00
7.00
6.00
5.00
4.00
3.00
2.00
1.00
0.00
qu
0%
1%
2%
3%
4%
5%
6%
7%
8%
9%
% ceniza
ESTANDAR
MODIFICADO


E vs % Ceniza
400.00
350.00
300.00
250.00
200.00
150.00
100.00
50.00
0.00
E
0%
1%
2%
3%
4%
5%
6%
7%
8%
9%
% ceniza
ESTANDAR
MODIFICADO


Curva esfuerzo vs deformación (Diferente energía)
Esfuerzo (kg/cm2)
12.00
10.00
8.00
6.00
4.00
2.00
0.00
0.00
1.00
2.00
3.00
4.00
5.00
6.00
Deformación unitaria (%)
0%CENIZA (MODIFICADO)
2%CENIZA (MODIFICADO)
4%CENIZA (MODIFICADO)
6%CENIZA (MODIFICADO)
8%CENIZA (MODIFICADO)

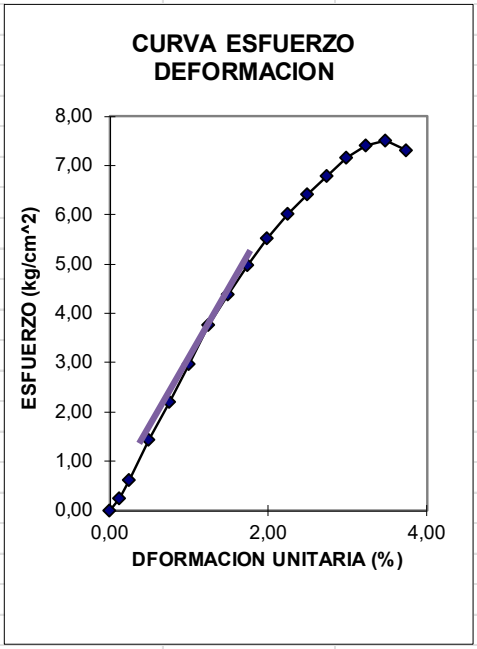

Curva esfuerzo vs deformación (Diferente energía)
Esfuerzo (kg/cm2)
5.00
4.50
4.00
3.50
3.00
2.50
2.00
1.50
1.00
0.50
0.00
0.00
1.00
2.00
3.00
4.00
5.00
Deformación unitaria (%)
2%CENIZA (ESTÁNDAR)
4%CENIZA (ESTÁNDAR)
6%CENIZA (ESTÁNDAR)
8%CENIZA (ESTÁNDAR)

**Anexo 2.** Ensayo De Resistencia A La Compresión Simple

**2 % CENIZA (MODIFICADO)**

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **DS** | 5,08 | | **Peso inicial** | 390,06 | **Realizado por** | M Zurita |
| **DC** | 5,08 | | **Vol. inicial** | 206,74 | **Calculado por** | M Zurita |
| **DI** | 5,08 | | **mm. inicial** | 1,887 | **Cnte. anillo kg** | lec x 0,3351 |
| **DM** | 5,08 | | **md. inicial** | 1,560 | | |
| **AM** | 20,27 | | | | | |
| **HM** | 10,20 | | | | | |

| DEFORMACION pulg x 10^ -3 | DIAL DE CARGA pulg x 10^ -4 | DEFOR. UNITAR % | ESFUERZO kg/cm^2 |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 15 | 0,12 | 0,25 |
| 10 | 37 | 0,25 | 0,61 |
| 20 | 88 | 0,50 | 1,45 |
| 30 | 135 | 0,75 | 2,22 |
| 40 | 182 | 1,00 | 2,98 |
| 50 | 230 | 1,25 | 3,76 |
| 60 | 270 | 1,49 | 4,40 |
| 70 | 307 | 1,74 | 4,99 |
| 80 | 341 | 1,99 | 5,53 |
| 90 | 373 | 2,24 | 6,03 |
| 100 | 398 | 2,49 | 6,42 |
| 110 | 422 | 2,74 | 6,79 |
| 120 | 446 | 2,99 | 7,15 |
| 130 | 463 | 3,24 | 7,41 |
| 140 | 470 | 3,49 | 7,50 |
| 150 | 460 | 3,74 | 7,32 |




**RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE**

| | | |
|---|---|---|
| **qu=** | 7,50 | kg/cm^2 |
| **E=** | 285,5 | kg/cm^2 |

**GRÁFICO DE LA MUESTRA ENSAYADA**

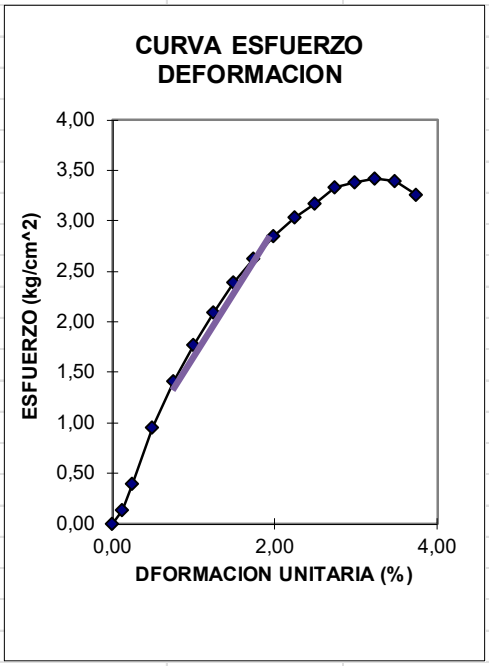
**CONTENIDO DE HUMEDAD**

| | |
|---|---|
| **CAPSULA No** | 349 |
| **P.CAP.+S. HUM.** | 48,3 |
| **P.CAP. +S.SECO** | 42,62 |
| **P. CAPSULA** | 15,5 |
| **HUMEDAD %** | 20,94 |

2% ESTANDAR

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **DS** | 5,08 | | **Peso inicial** | 388,41 | **Realizado por** | M Zurita |
| **DC** | 5,08 | | **Vol. inicial** | 206,74 | **Calculado por** | M Zurita |
| **DI** | 5,08 | | **mm. inicial** | 1,879 | **Cnte. anillo kg** | lec x 0,3351 |
| **DM** | 5,08 | | **md. inicial** | 1,524 | | |
| **AM** | 20,27 | | | | | |
| **HM** | 10,20 | | | | | |

| DEFORMACION pulg x 10^ -3 | DIAL DE CARGA pulg x 10^ -4 | DEFOR. UNITAR % | ESFUERZO kg/cm^2 |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 8 | 0,12 | 0,13 |
| 10 | 24 | 0,25 | 0,40 |
| 20 | 58 | 0,50 | 0,95 |
| 30 | 86 | 0,75 | 1,41 |
| 40 | 108 | 1,00 | 1,77 |
| 50 | 128 | 1,25 | 2,09 |
| 60 | 147 | 1,49 | 2,39 |
| 70 | 162 | 1,74 | 2,63 |
| 80 | 176 | 1,99 | 2,85 |
| 90 | 188 | 2,24 | 3,04 |
| 100 | 197 | 2,49 | 3,18 |
| 110 | 207 | 2,74 | 3,33 |
| 120 | 211 | 2,99 | 3,38 |
| 130 | 214 | 3,24 | 3,42 |
| 140 | 213 | 3,49 | 3,40 |
| 150 | 205 | 3,74 | 3,26 |




**RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE**

| | | |
|---|---|---|
| **$q_u$=** | 3,38 | kg/cm^2 |
| **E=** | 116,1 | kg/cm^2 |

**GRÁFICO DE LA MUESTRA ENSAYADA**

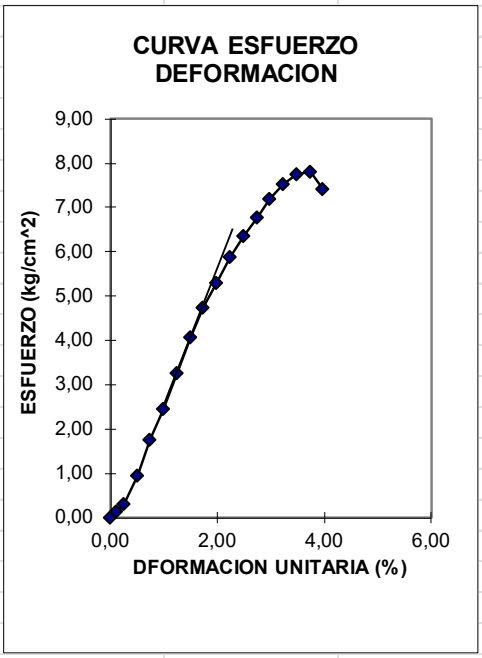
**CONTENIDO DE HUMEDAD**

| | |
|---|---|
| **CAPSULA No** | 228 |
| **P.CAP.+S. HUM.** | 63,3 |
| **P.CAP. +S.SECO** | 54,52 |
| **P. CAPSULA** | 16,77 |
| **HUMEDAD %** | 23,26 |

4% CENIZA (MODIFICADO)

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **DS** | 5,08 | | **Peso inicial** | 390,04 | **Realizado por** | M Zurita |
| **DC** | 5,08 | | **Vol. inicial** | 206,74 | **Calculado por** | M Zurita |
| **DI** | 5,08 | | **mm. inicial** | 1,887 | **Cnte. anillo kg** | lec x 0,3351 |
| **DM** | 5,08 | | **md. inicial** | 1,570 | | |
| **AM** | 20,27 | | | | | |
| **HM** | 10,20 | | | | | |

| DEFORMACION pulg x 10^ -3 | DIAL DE CARGA pulg x 10^ -4 | DEFOR. UNITAR % | ESFUERZO kg/cm^2 |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 8 | 0,12 | 0,13 |
| 10 | 18 | 0,25 | 0,30 |
| 20 | 58 | 0,50 | 0,95 |
| 30 | 107 | 0,75 | 1,76 |
| 40 | 150 | 1,00 | 2,46 |
| 50 | 199 | 1,25 | 3,25 |
| 60 | 250 | 1,49 | 4,07 |
| 70 | 292 | 1,74 | 4,74 |
| 80 | 327 | 1,99 | 5,30 |
| 90 | 364 | 2,24 | 5,88 |
| 100 | 395 | 2,49 | 6,37 |
| 110 | 421 | 2,74 | 6,77 |
| 120 | 448 | 2,99 | 7,19 |
| 130 | 471 | 3,24 | 7,54 |
| 140 | 485 | 3,49 | 7,74 |
| 150 | 490 | 3,74 | 7,80 |
| 160 | 467 | 3,98 | 7,41 |




**RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE**

| | | |
|---|---|---|
| **$q_u$=** | 7,80 | kg/cm^2 |
| **E=** | 262,4 | kg/cm^2 |

**GRÁFICO DE LA MUESTRA ENSAYADA**

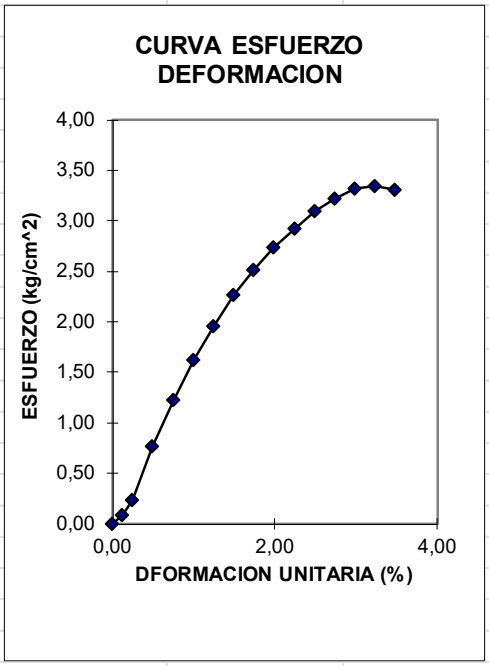
**CONTENIDO DE HUMEDAD**

| | |
|---|---|
| **CAPSULA No** | 591 |
| **P.CAP.+S. HUM.** | 65,32 |
| **P.CAP. +S.SECO** | 56,94 |
| **P. CAPSULA** | 15,42 |
| **HUMEDAD %** | 20,18 |

4% ESTANDAR

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **DS** | 5,08 | | **Peso inicial** | 390,4 | **Realizado por** | M Zurita |
| **DC** | 5,08 | | **Vol. inicial** | 206,74 | **Calculado por** | M Zurita |
| **DI** | 5,08 | | **mm. inicial** | 1,888 | **Cnte. anillo kg** | lec x 0,3351 |
| **DM** | 5,08 | | **md. inicial** | 1,529 | | |
| **AM** | 20,27 | | | | | |
| **HM** | 10,20 | | | | | |

| DEFORMACION pulg x 10^ -3 | DIAL DE CARGA pulg x 10^ -4 | DEFOR. UNITAR % | ESFUERZO kg/cm^2 |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 5 | 0,12 | 0,08 |
| 10 | 14 | 0,25 | 0,23 |
| 20 | 47 | 0,50 | 0,77 |
| 30 | 75 | 0,75 | 1,23 |
| 40 | 99 | 1,00 | 1,62 |
| 50 | 120 | 1,25 | 1,96 |
| 60 | 139 | 1,49 | 2,26 |
| 70 | 155 | 1,74 | 2,52 |
| 80 | 169 | 1,99 | 2,74 |
| 90 | 181 | 2,24 | 2,93 |
| 100 | 192 | 2,49 | 3,10 |
| 110 | 200 | 2,74 | 3,22 |
| 120 | 207 | 2,99 | 3,32 |
| 130 | 209 | 3,24 | 3,34 |
| 140 | 207 | 3,49 | 3,30 |




**RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE**

| | | |
|---|---|---|
| **$q_u$=** | 3,32 | kg/cm^2 |
| **E=** | 141,1 | kg/cm^2 |

**GRÁFICO DE LA MUESTRA ENSAYADA**

**CONTENIDO DE HUMEDAD**

| | |
|---|---|
| **CAPSULA No** | 343 |
| **P.CAP.+S. HUM.** | 60,55 |
| **P.CAP. +S.SECO** | 52,36 |
| **P. CAPSULA** | 17,5 |
| **HUMEDAD %** | 23,49 |

6% CENIZA (MODIFICADO)

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **DS** | 5,08 | | **Peso inicial** | 395,27 | **Realizado por** | M Zurita |
| **DC** | 5,08 | | **Vol. inicial** | 206,74 | **Calculado por** | M Zurita |
| **DI** | 5,08 | | **mm. inicial** | 1,912 | **Cnte. anillo kg** | lec x 0,3351 |
| **DM** | 5,08 | | **md. inicial** | 1,600 | | |
| **AM** | 20,27 | | | | | |
| **HM** | 10,20 | | | | | |

| DEFORMACION pulg x 10^ -3 | DIAL DE CARGA pulg x 10^ -4 | DEFOR. UNITAR % | ESFUERZO kg/cm^2 |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 24 | 0,12 | 0,40 |
| 10 | 48 | 0,25 | 0,79 |
| 20 | 96 | 0,50 | 1,58 |
| 30 | 141 | 0,75 | 2,31 |
| 40 | 188 | 1,00 | 3,08 |
| 50 | 241 | 1,25 | 3,93 |
| 60 | 283 | 1,49 | 4,61 |
| 70 | 322 | 1,74 | 5,23 |
| 80 | 355 | 1,99 | 5,75 |
| 90 | 388 | 2,24 | 6,27 |
| 100 | 420 | 2,49 | 6,77 |
| 110 | 452 | 2,74 | 7,27 |
| 120 | 478 | 2,99 | 7,67 |
| 130 | 506 | 3,24 | 8,09 |
| 140 | 527 | 3,49 | 8,41 |
| 150 | 543 | 3,74 | 8,64 |
| 160 | 545 | 3,98 | 8,65 |
| 170 | 515 | 4,23 | 8,15 |

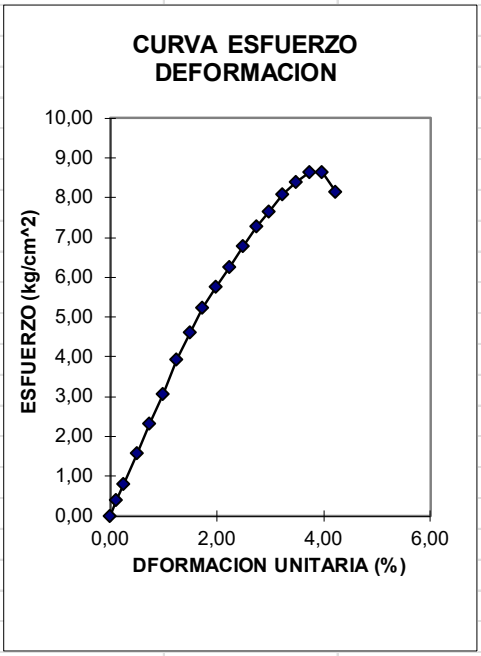



**GRÁFICO DE LA MUESTRA ENSAYADA**

**RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE**

| | | |
|---|---|---|
| $q_u$= | 8,65 | kg/cm^2 |
| **E=** | 260,8 | kg/cm^2 |

GRAFICO DE LA MUESTRA ENSAYADA

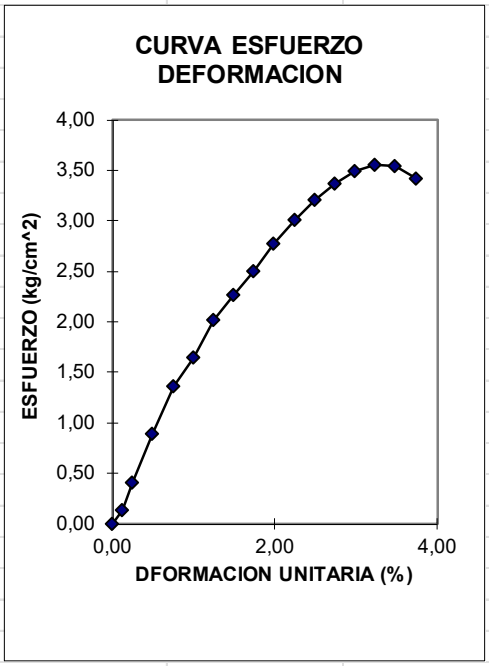
**CONTENIDO DE HUMEDAD**

| | |
|---|---|
| **CAPSULA No** | 408 |
| **P.CAP.+S. HUM.** | 66,73 |
| **P.CAP. +S.SECO** | 58,87 |
| P. CAPSULA | 18,53 |
| HUMEDAD % | 19,48 |

6% ESTANDAR

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **DS** | 5,08 | | **Peso inicial** | 387,02 | **Realizado por** | M Zurita |
| **DC** | 5,08 | | **Vol. inicial** | 206,74 | **Calculado por** | M Zurita |
| **DI** | 5,08 | | **mm. inicial** | 1,872 | **Cnte. anillo kg** | lec x 0,3351 |
| **DM** | 5,08 | | **md. inicial** | 1,521 | | |
| **AM** | 20,27 | | | | | |
| **HM** | 10,20 | | | | | |

| DEFORMACION pulg x 10^ -3 | DIAL DE CARGA pulg x 10^ -4 | DEFOR. UNITAR % | ESFUERZO kg/cm^2 |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 8 | 0,12 | 0,13 |
| 10 | 25 | 0,25 | 0,41 |
| 20 | 54 | 0,50 | 0,89 |
| 30 | 83 | 0,75 | 1,36 |
| 40 | 101 | 1,00 | 1,65 |
| 50 | 124 | 1,25 | 2,02 |
| 60 | 139 | 1,49 | 2,26 |
| 70 | 154 | 1,74 | 2,50 |
| 80 | 171 | 1,99 | 2,77 |
| 90 | 186 | 2,24 | 3,01 |
| 100 | 199 | 2,49 | 3,21 |
| 110 | 210 | 2,74 | 3,38 |
| 120 | 218 | 2,99 | 3,50 |
| 130 | 222 | 3,24 | 3,55 |
| 140 | 222 | 3,49 | 3,54 |
| 150 | 215 | 3,74 | 3,42 |




RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE

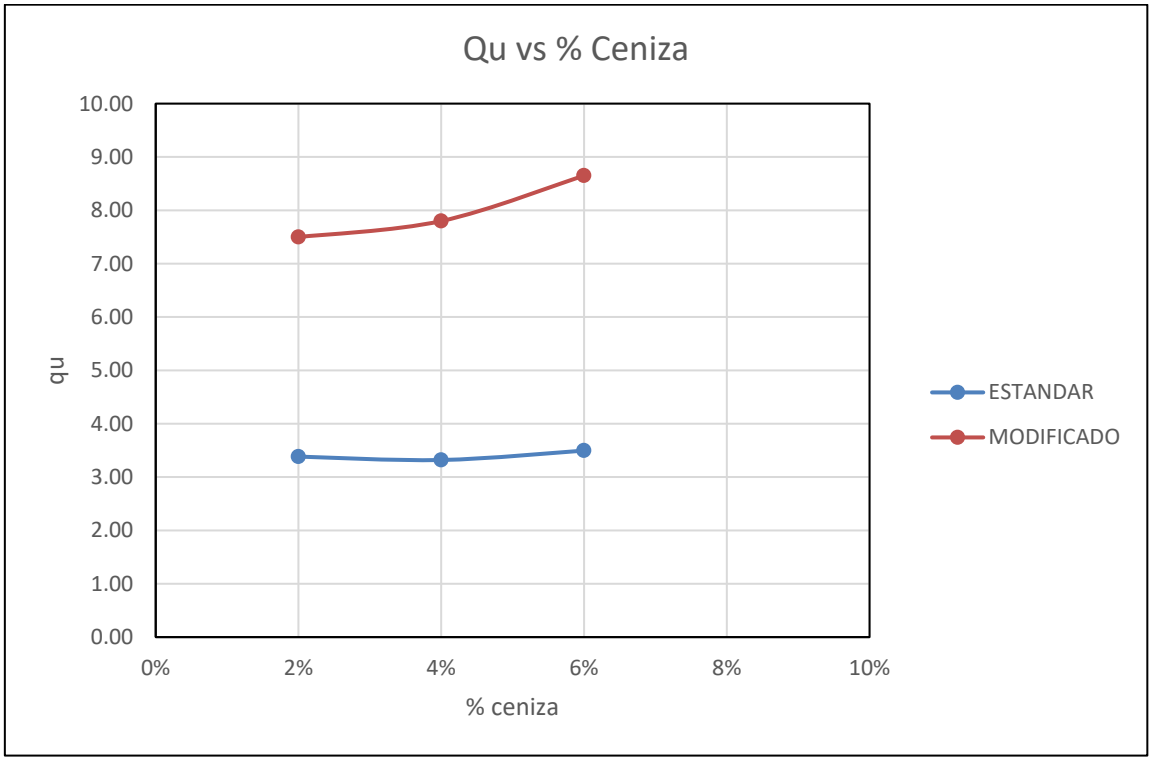
| | | |
|---|---|---|
| **$q_u$=** | **3,50** | **kg/cm^2** |
| **E=** | 147,6 | kg/cm^2 |

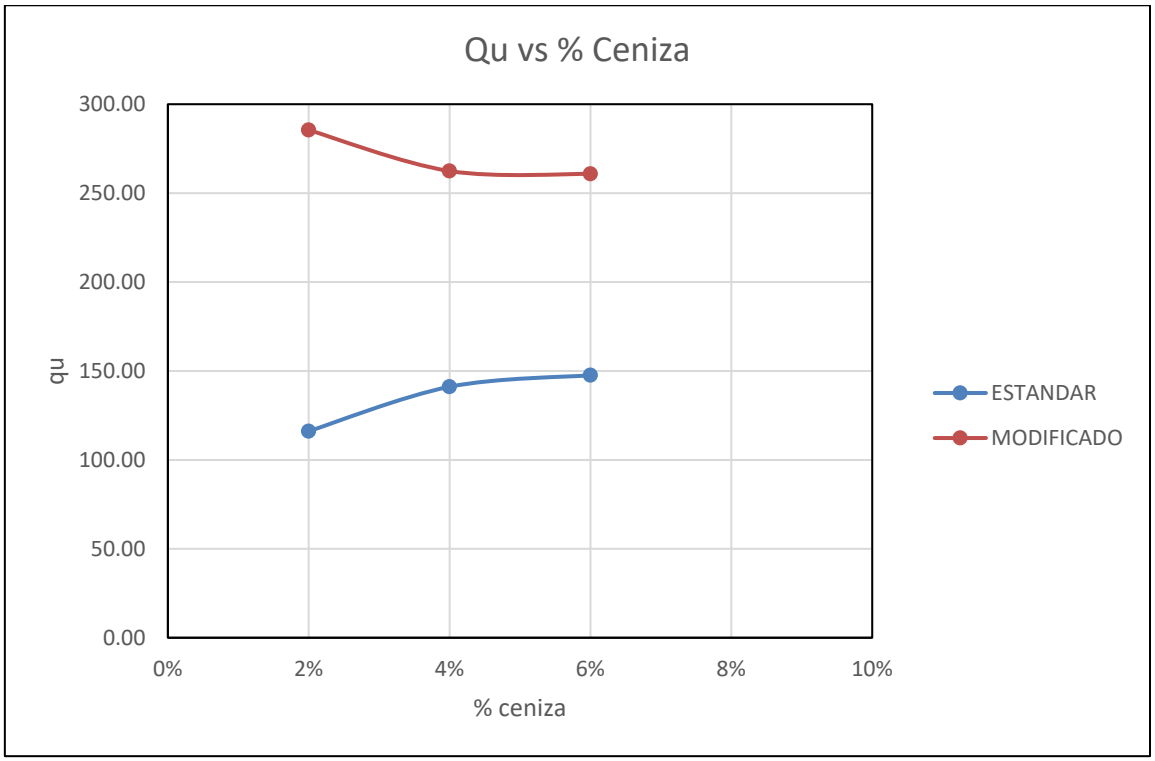
**GRÁFICO DE LA MUESTRA ENSAYADA**

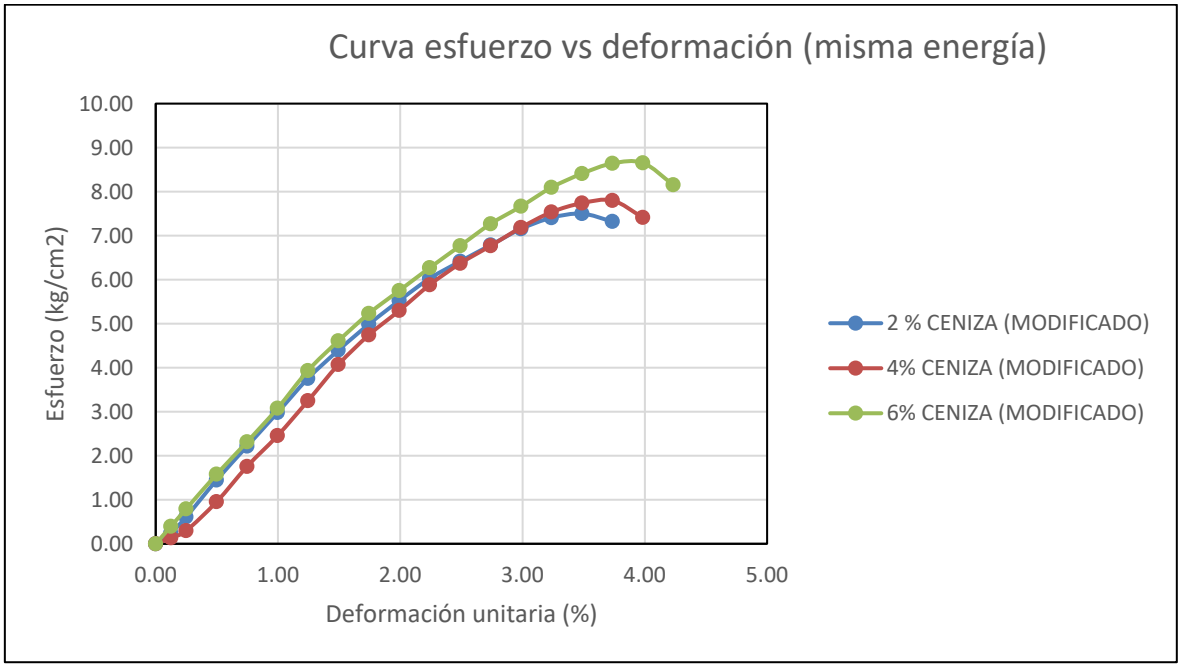
GRAFICO DE LA MUESTRA ENSAYADA

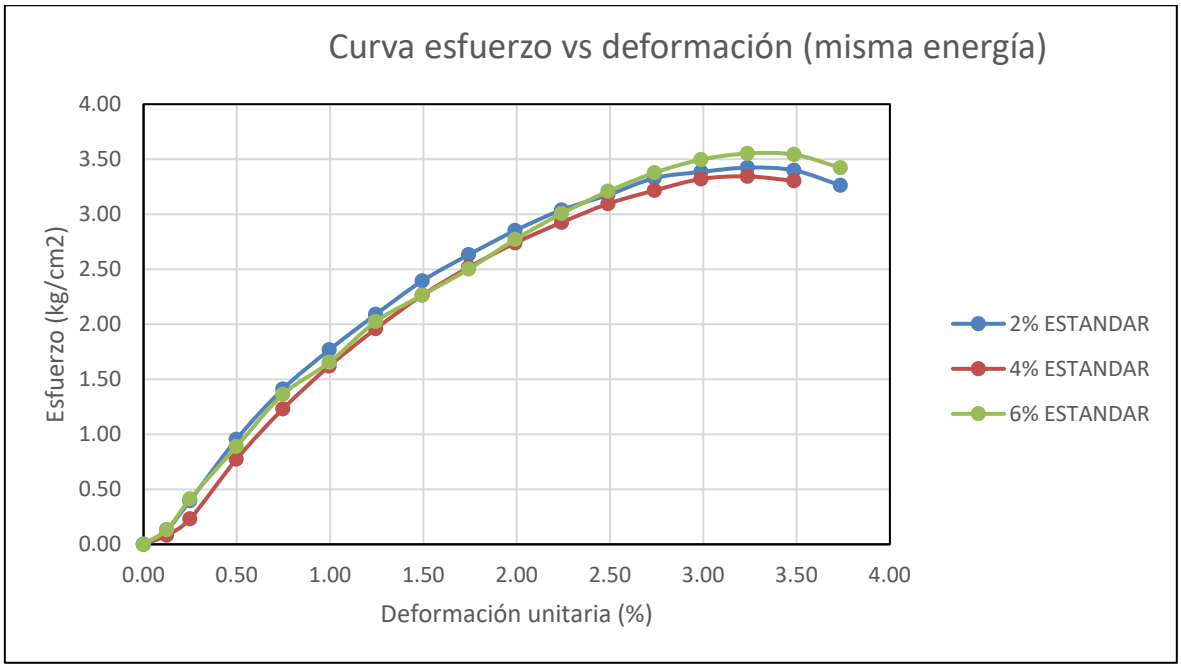
CONTENIDO DE HUMEDAD

| | |
|---|---|
| **CAPSULA No** | 553 |
| **P.CAP.+S. HUM.** | 64,96 |
| **P.CAP. +S.SECO** | 55,89 |
| **P. CAPSULA** | 16,53 |
| **HUMEDAD %** | 23,04 |


Qu vs % Ceniza
10.00
9.00
8.00
7.00
6.00
5.00
4.00
3.00
2.00
1.00
0.00
qu
0%
2%
4%
6%
8%
10%
% ceniza
ESTANDAR
MODIFICADO


Qu vs % Ceniza
300.00
250.00
200.00
150.00
100.00
50.00
0.00
qu
0%
2%
4%
6%
8%
10%
% ceniza
ESTANDAR
MODIFICADO


Curva esfuerzo vs deformación (misma energía)
Esfuerzo (kg/cm2)
Deformación unitaria (%)
2 % CENIZA (MODIFICADO)
4% CENIZA (MODIFICADO)
6% CENIZA (MODIFICADO)


Curva esfuerzo vs deformación (misma energía)
Esfuerzo (kg/cm2)
Deformación unitaria (%)
2% ESTANDAR
4% ESTANDAR
6% ESTANDAR

# ENSAYO DE CLASIFICACIÓN

(NORMA ASTM D2487-06)

| | | | |
|---|---|---|---|
| **PROYECTO:** | ENSAYOS PARA TESIS MAESTRIA DE GEOTECNIA MIREYA ZURITA | **MUESTRA No.** | 1 |
| **UBICACIÓN:** | Suelo de la ciudad de Loja | | |
| **FECHA:** | ene-26 | | |
| **CALCULADO POR:** | M ZURITA | | |

**CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL NORMA ASTM D 2216-05**

| No.gol | ápsula N | P.Húmedo | P.Seco | P.cápsula | Humedad | Media/valor |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 60,94 | 57,39 | 16,31 | 8,64 | |
| | 2 | 55,54 | 52,57 | 17,61 | 8,50 | 8,57 |

**LÍMITE LÍQUIDO NORMA ASTM D 4318-05**

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 35 | 710 | 44,69 | 36,82 | 20,55 | 48,37 | |
| 25 | 254 | 40,92 | 31,94 | 14,04 | 50,17 | |
| 15 | 545 | 46,16 | 36,07 | 16,79 | 52,33 | 50,02 |

**LÍMITE PLÁSTICO NORMA ASTM D 4318-06**

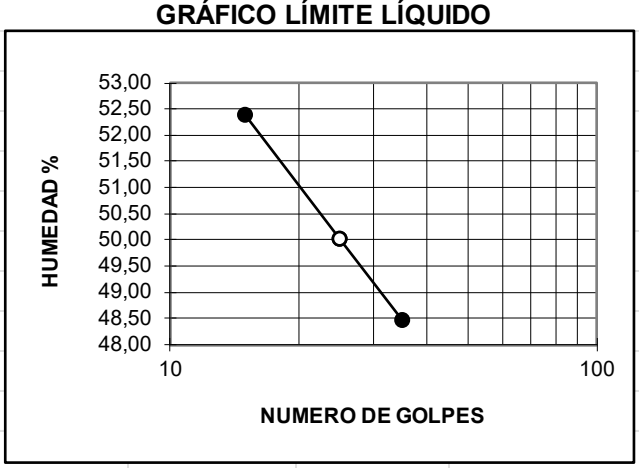
| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 32 | 18,03 | 15,85 | 8,84 | 31,10 | |
| | 10A | 18,04 | 15,83 | 8,97 | 32,22 | |
| | Z19 | 14,46 | 12,98 | 8,48 | 32,89 | 32,07 |

| | | |
|---|---|---|
| **PESO DE LA MUESTRA HÚMEDA** | 136,09 | g |
| **PESO DE LA MUESTRA SECA** | 125,35 | g |

**GRANULOMETRÍA NORMA ASTM D422-63**

| TAMIZ | P.retenido | % retenido | % q' pasa |
|---|---|---|---|
| 2" | | 0,00 | 100,00 |
| 1 1/2" | | 0,00 | 100,00 |
| 1" | | 0,00 | 100,00 |
| 3/4" | | 0,00 | 100,00 |
| 1/2" | | 0,00 | 100,00 |
| 3/8" | | 0,00 | 100,00 |
| No 4 | | 0,00 | 100,00 |
| No 10 | | 0,00 | 100,00 |
| No 40 | 0,65 g | 0,52 | 99,48 |
| No 200 | 10,35 g | 8,26 | 91,74 |

**GRÁFICO LÍMITE LÍQUIDO**




| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Grava** | 0% | | **LL** | 50,0% | | **SUCS** | MH |
| **Arena** | 8% | | **LP** | 32,1% | | **AASHTO** | A-7-5 |
| **Finos** | 92% | | **IP** | 18,0% | | **IG(86)** | 20 |

## ENSAYO DE CLASIFICACIÓN

(NORMA ASTM D 2487-06)

| | | | |
|---|---|---|---|
| **PROYECTO** | ENSAYOS PARA TESIS MAESTRIA DE GEOTECNIA MIREYA ZURITA | | |
| **UBICACIÓN** | Suelo de la ciudad de Loja | **MUESTRA No** | 1 |
| **FECHA** | ene-26 | | |
| **CALCULADO POR** | M. ZURITA | | |

| | NORMA ASTM | P.CAP. S. HUM. (g) | P.CAP. S. SECO (g) | P.CAP (g) | HUMEDAD (%) | HUMEDAD PROMEDIO (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **HUMEDAD NATURAL** | D 2216-05 | 45,26 | 42,36 | 15,96 | 10,98 | |
| | | 43,83 | 43,36 | 14,36 | 1,62 | 6,30 |
| **LÍMITE LÍQUIDO** | D 4318-05 | **MATERIAL NO PLÁSTICO** | | | | |
| **LÍMITE PLÁSTICO** | D4318-06 | **MATERIAL NO PLÁSTICO** | | | | |

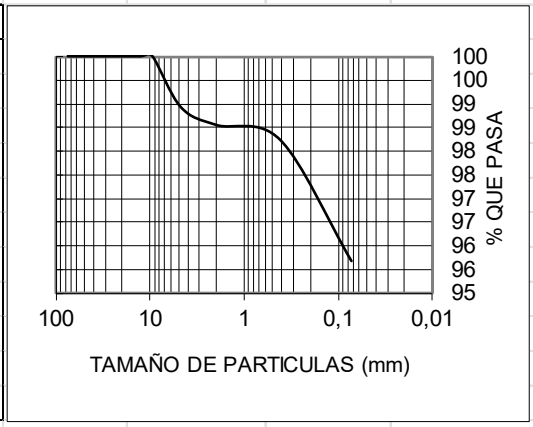
| | | |
|---|---|---|
| **PESO DE LA MUESTRA HÚMEDA** | 144,27 | g |
| **PESO DE LA MUESTRA SECA** | 135,72 | g |

### GRANULOMETRÍA

(NORMA ASTM D 422-63)

| TAMIZ | P.RETENIDO | % RETENIDO | % Q' PASA |
|---|---|---|---|
| 3" | | 0,0 | 100,0 |
| 2" | | 0,0 | 100,0 |
| 1 1/2" | | 0,0 | 100,0 |
| 1" | | 0,0 | 100,0 |
| 3/4" | | 0,0 | 100,0 |
| 1/2" | | 0,0 | 100,0 |
| 3/8" | | 0,0 | 100,0 |
| No 4 | 1,46 | 1,1 | 98,9 |
| No 10 | 1,97 | 1,5 | 98,5 |
| No 40 | 2,40 | 1,8 | 98,2 |
| No 200 | 5,87 | 4,3 | 95,7 |

### CURVA GRANULOMÉTRICA




| | |
|---|---|
| **GRAVA** | 1% |
| **ARENA** | 3% |
| **FINOS** | 96% |

| | |
|---|---|
| **SUCS** | ML |
| **AASHTO** | A-4 |
| **IG.** | 0 |

## **Anexo 3.** Expansión Libre

**0% CENIZA (MODIFICADO)**

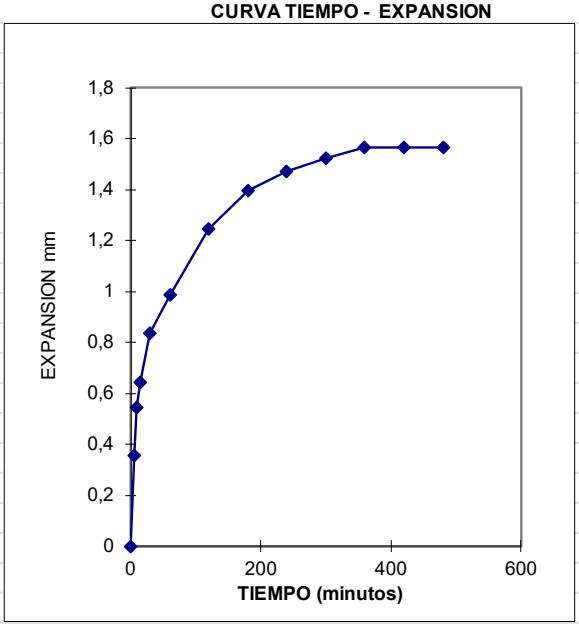
**HUMEDAD**

| CONDICION | ANTES DEL ENSAYO | | DESPUES DEL ENSAYO | |
|---|---|---|---|---|
| CAPSULA + SUELO HUMEDO | 49,65 | 50,21 | 43,14 | 48,16 |
| CAPSULA + SUELO SECO | 43,03 | 42,92 | 35,86 | 39,87 |
| PESO CAPSULA | 15,69 | 16,70 | 15,42 | 15,67 |
| HUMEDAD % | 24,21 | 27,80 | 35,62 | 34,26 |
| HUMEDAD PROMEDIO % | 26,01 | | 34,94 | |

**DENSIDAD**

| | | |
|---|---|---|
| DIAMETRO DEL ANILLO | 6,35 | |
| AREA DE LA MUESTRA | 31,67 | |
| ALTURA DE LA MUESTRA | 2,54 | |
| VOLUMEN DE LA MUESTRA | 80,44 | |
| PESO DEL ANILLO | 512,5 | |
| CONDICION: | ANTES DEL ENSAYO | DESPUES DEL ENSAYO |
| PESO ANILLO + MUESTRA | 618,14 | 628,88 |
| PESO DE LA MUESTRA | 105,64 | 116,38 |
| DENSIDAD HUMEDA | 1,313 | 1,447 |
| DENSIDAD SECA | 1,042 | 1,072 |
| % DE AGUA ABSORBIDA | 10,17 | |
| % DE EXPANSIÓN | 6 | |

**CURVA TIEMPO - EXPANSION**




**EXPANSION LIBRE**

| TIEMPO MINUTOS | LECTURA DIAL X0,0025 | EXPANSION mm |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 141 | 0,36 |
| 10 | 214 | 0,54 |
| 15 | 254 | 0,65 |
| 30 | 330 | 0,84 |
| 60 | 389 | 0,99 |
| 120 | 490 | 1,25 |
| 180 | 550 | 1,40 |
| 240 | 580 | 1,47 |
| 300 | 600 | 1,52 |
| 360 | 616 | 1,57 |
| 420 | 617 | 1,57 |
| 480 | 617 | 1,57 |

## 0% CENIZA (ESTÁNDAR)

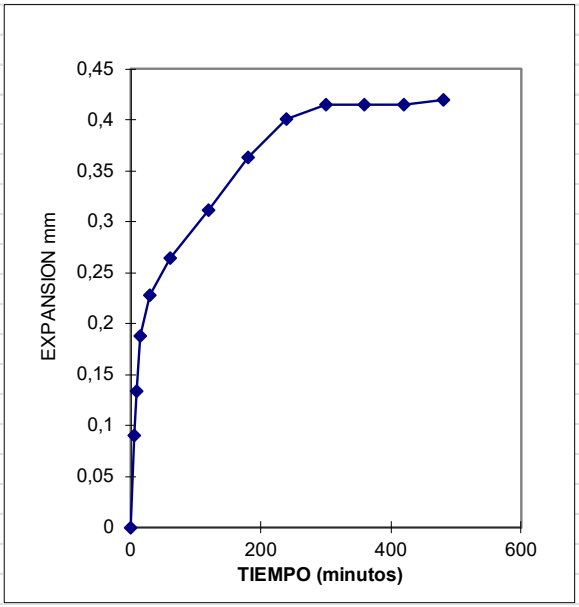
**HUMEDAD**

| CONDICION | ANTES DEL ENSAYO | | DESPUES DEL ENSAYO | |
|---|---|---|---|---|
| CAPSULA + SUELO HUMEDO | 58,22 | 49,27 | 48,63 | 49,38 |
| CAPSULA + SUELO SECO | 49,79 | 42,18 | 40,12 | 41,57 |
| PESO CAPSULA | 18,18 | 15,56 | 16,32 | 15,87 |
| HUMEDAD % | 26,67 | 26,63 | 35,76 | 30,39 |
| HUMEDAD PROMEDIO % | 26,65 | | 33,07 | |

**DENSIDAD**

| | | |
|---|---|---|
| DIAMETRO DEL ANILLO | 6,35 | |
| AREA DE LA MUESTRA | 31,67 | |
| ALTURA DE LA MUESTRA | 2,52 | |
| VOLUMEN DE LA MUESTRA | 79,81 | |
| PESO DEL ANILLO | 525 | |
| CONDICION: | ANTES DEL ENSAYO | DESPUES DEL ENSAYO |
| PESO ANILLO + MUESTRA | 670,16 | 675,25 |
| PESO DE LA MUESTRA | 145,16 | 150,25 |
| DENSIDAD HUMEDA | 1,819 | 1,883 |
| DENSIDAD SECA | 1,436 | 1,415 |
| % DE AGUA ABSORBIDA | 3,51 | |
| % DE EXPANSIÓN | 2 | |

**CURVA TIEMPO - EXPANSION**




**EXPANSION LIBRE**

| TIEMPO MINUTOS | LECTURA DIAL X0,0025 | EXPANSION mm |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 35 | 0,090 |
| 10 | 53 | 0,134 |
| 15 | 74 | 0,188 |
| 30 | 90 | 0,228 |
| 60 | 104 | 0,264 |
| 120 | 123 | 0,312 |
| 180 | 143 | 0,363 |
| 240 | 158 | 0,401 |
| 300 | 163 | 0,415 |
| 360 | 163 | 0,415 |
| 420 | 163 | 0,415 |
| 480 | 165 | 0,420 |

## 2% CENIZA (MODIFICADO)

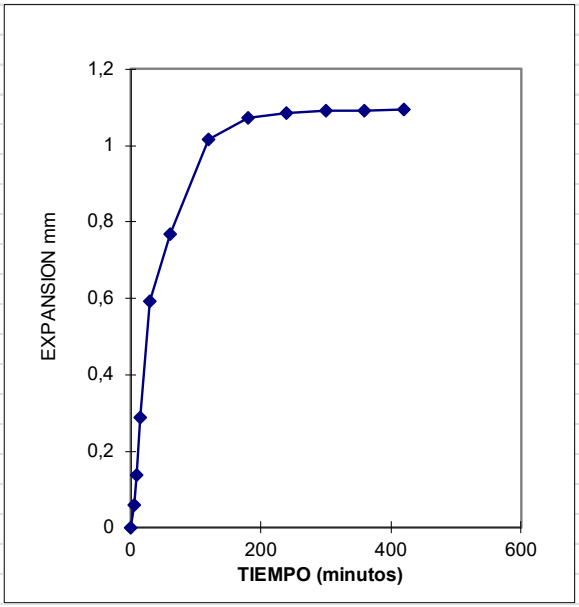
**HUMEDAD**

| CONDICION | ANTES DEL ENSAYO | | DESPUES DEL ENSAYO | |
|---|---|---|---|---|
| CAPSULA + SUELO HUMEDO | 47,25 | 46,76 | 47,59 | 47,98 |
| CAPSULA + SUELO SECO | 42,38 | 41,68 | 41,42 | 40,46 |
| PESO CAPSULA | 17,61 | 16,06 | 16,45 | 15,21 |
| HUMEDAD % | 19,66 | 19,83 | 24,71 | 29,78 |
| HUMEDAD PROMEDIO % | 19,74 | | 27,25 | |

**DENSIDAD**

| | | |
|---|---|---|
| DIAMETRO DEL ANILLO | 6,35 | |
| AREA DE LA MUESTRA | 31,67 | |
| ALTURA DE LA MUESTRA | 2,54 | |
| VOLUMEN DE LA MUESTRA | 80,44 | |
| PESO DEL ANILLO | 512,5 | |
| CONDICION: | ANTES DEL ENSAYO | DESPUES DEL ENSAYO |
| PESO ANILLO + MUESTRA | 665,35 | 675,93 |
| PESO DE LA MUESTRA | 152,85 | 163,43 |
| DENSIDAD HUMEDA | 1,900 | 2,032 |
| DENSIDAD SECA | 1,587 | 1,597 |
| % DE AGUA ABSORBIDA | 6,92 | |
| % DE EXPANSIÓN | 4 | |

**CURVA TIEMPO - EXPANSION**




**EXPANSION LIBRE**

| TIEMPO MINUTOS | LECTURA DIAL X0,0025 | EXPANSION mm |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 24 | 0,06 |
| 10 | 54 | 0,14 |
| 15 | 113 | 0,29 |
| 30 | 234 | 0,59 |
| 60 | 302 | 0,77 |
| 120 | 400 | 1,02 |
| 180 | 422 | 1,07 |
| 240 | 427 | 1,08 |
| 300 | 429 | 1,09 |
| 360 | 430 | 1,09 |
| 420 | 431 | 1,10 |

## 2% CENIZA (ESTÁNDAR)

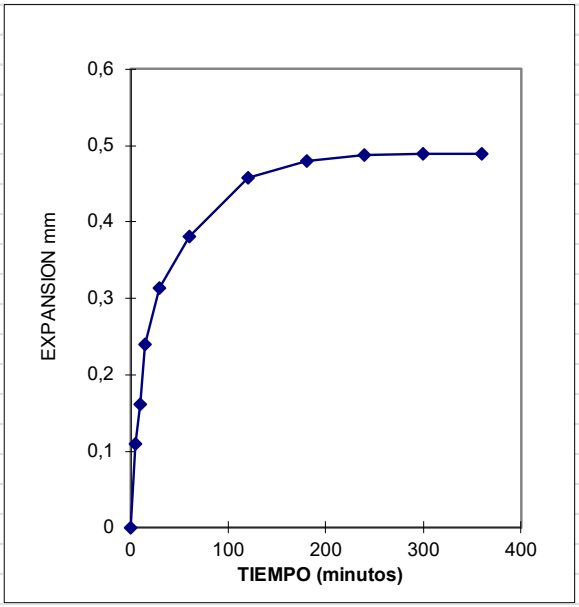
**HUMEDAD**

| CONDICION | ANTES DEL ENSAYO | | DESPUES DEL ENSAYO | |
|---|---|---|---|---|
| CAPSULA + SUELO HUMEDO | 48,04 | 42,69 | 44,32 | 46,90 |
| CAPSULA + SUELO SECO | 42,04 | 37,24 | 38,54 | 40,55 |
| PESO CAPSULA | 16,57 | 14,36 | 16,78 | 16,30 |
| HUMEDAD % | 23,56 | 23,82 | 26,56 | 26,19 |
| HUMEDAD PROMEDIO % | 23,69 | | 26,37 | |

**DENSIDAD**

| | | |
|---|---|---|
| DIAMETRO DEL ANILLO | 6,35 | |
| AREA DE LA MUESTRA | 31,67 | |
| ALTURA DE LA MUESTRA | 2,52 | |
| VOLUMEN DE LA MUESTRA | 79,81 | |
| PESO DEL ANILLO | 525 | |
| CONDICION: | ANTES DEL ENSAYO | DESPUES DEL ENSAYO |
| PESO ANILLO + MUESTRA | 671,33 | 676,17 |
| PESO DE LA MUESTRA | 146,33 | 151,17 |
| DENSIDAD HUMEDA | 1,834 | 1,894 |
| DENSIDAD SECA | 1,482 | 1,499 |
| % DE AGUA ABSORBIDA | 3,31 | |
| % DE EXPANSIÓN | 2 | |

**CURVA TIEMPO - EXPANSION**




**EXPANSION LIBRE**

| TIEMPO MINUTOS | LECTURA DIAL X0,0025 | EXPANSION mm |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 43 | 0,11 |
| 10 | 64 | 0,16 |
| 15 | 94 | 0,24 |
| 30 | 124 | 0,31 |
| 60 | 150 | 0,38 |
| 120 | 180 | 0,46 |
| 180 | 189 | 0,48 |
| 240 | 192 | 0,49 |
| 300 | 193 | 0,49 |
| 360 | 193 | 0,49 |

## 4% CENIZA (MODIFICADO)

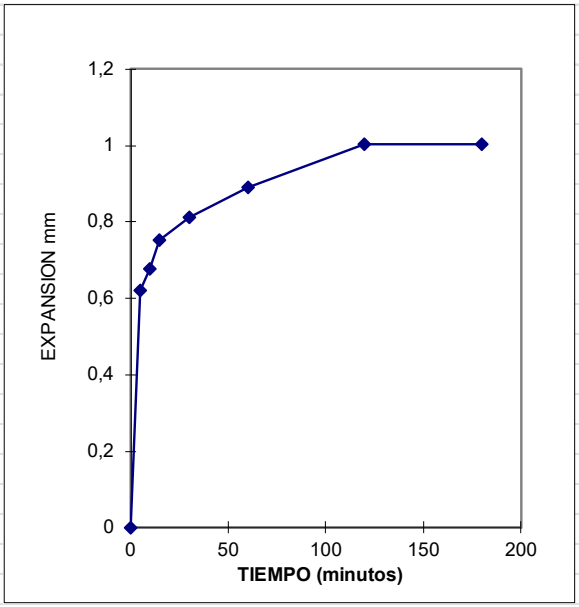
**HUMEDAD**

| CONDICION | ANTES DEL ENSAYO | | DESPUES DEL ENSAYO | |
|---|---|---|---|---|
| CAPSULA + SUELO HUMEDO | 44,59 | 43,43 | 61,11 | 55,70 |
| CAPSULA + SUELO SECO | 39,90 | 39,28 | 49,94 | 45,99 |
| PESO CAPSULA | 14,94 | 16,70 | 15,42 | 15,68 |
| HUMEDAD % | 18,79 | 18,38 | 32,36 | 32,04 |
| HUMEDAD PROMEDIO % | 18,58 | | 32,20 | |

**DENSIDAD**

| | | |
|---|---|---|
| DIAMETRO DEL ANILLO | 6,35 | |
| AREA DE LA MUESTRA | 31,67 | |
| ALTURA DE LA MUESTRA | 2,54 | |
| VOLUMEN DE LA MUESTRA | 80,44 | |
| PESO DEL ANILLO | 512,5 | |
| CONDICION: | ANTES DEL ENSAYO | DESPUES DEL ENSAYO |
| PESO ANILLO + MUESTRA | 643,36 | 661,36 |
| PESO DE LA MUESTRA | 130,86 | 148,86 |
| DENSIDAD HUMEDA | 1,627 | 1,851 |
| DENSIDAD SECA | 1,372 | 1,400 |
| % DE AGUA ABSORBIDA | 13,76 | |
| % DE EXPANSIÓN | 4 | |

**CURVA TIEMPO - EXPANSION**




**EXPANSION LIBRE**

| TIEMPO MINUTOS | LECTURA DIAL X0,0025 | EXPANSION mm |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 244 | 0,62 |
| 10 | 267 | 0,68 |
| 15 | 296 | 0,75 |
| 30 | 320 | 0,81 |
| 60 | 351 | 0,89 |
| 120 | 396 | 1,01 |
| 180 | 396 | 1,01 |

## 4% CENIZA (ESTÁNDAR)

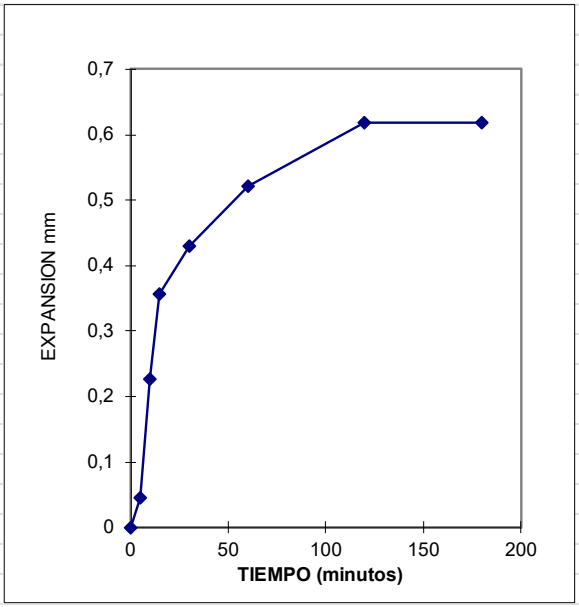
**HUMEDAD**

| CONDICION | ANTES DEL ENSAYO | | DESPUES DEL ENSAYO | |
|---|---|---|---|---|
| CAPSULA + SUELO HUMEDO | 52,53 | 44,15 | 57,29 | 62,14 |
| CAPSULA + SUELO SECO | 45,86 | 38,97 | 48,05 | 52,23 |
| PESO CAPSULA | 16,90 | 16,84 | 16,45 | 16,21 |
| HUMEDAD % | 23,03 | 23,41 | 29,24 | 27,51 |
| HUMEDAD PROMEDIO % | 23,22 | | 28,38 | |

**DENSIDAD**

| | | |
|---|---|---|
| DIAMETRO DEL ANILLO | 6,35 | |
| AREA DE LA MUESTRA | 31,67 | |
| ALTURA DE LA MUESTRA | 2,52 | |
| VOLUMEN DE LA MUESTRA | 79,81 | |
| PESO DEL ANILLO | 525 | |
| CONDICION: | ANTES DEL ENSAYO | DESPUES DEL ENSAYO |
| PESO ANILLO + MUESTRA | 668,64 | 675,59 |
| PESO DE LA MUESTRA | 143,64 | 150,59 |
| DENSIDAD HUMEDA | 1,800 | 1,887 |
| DENSIDAD SECA | 1,461 | 1,470 |
| % DE AGUA ABSORBIDA | 4,84 | |
| % DE EXPANSIÓN | 2 | |

**CURVA TIEMPO - EXPANSION**




**EXPANSION LIBRE**

| TIEMPO MINUTOS | LECTURA DIAL X0,0025 | EXPANSION mm |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 18 | 0,05 |
| 10 | 89 | 0,23 |
| 15 | 141 | 0,36 |
| 30 | 169 | 0,43 |
| 60 | 205 | 0,52 |
| 120 | 243 | 0,62 |
| 180 | 243 | 0,62 |

## 6% CENIZA (MODIFICADO)

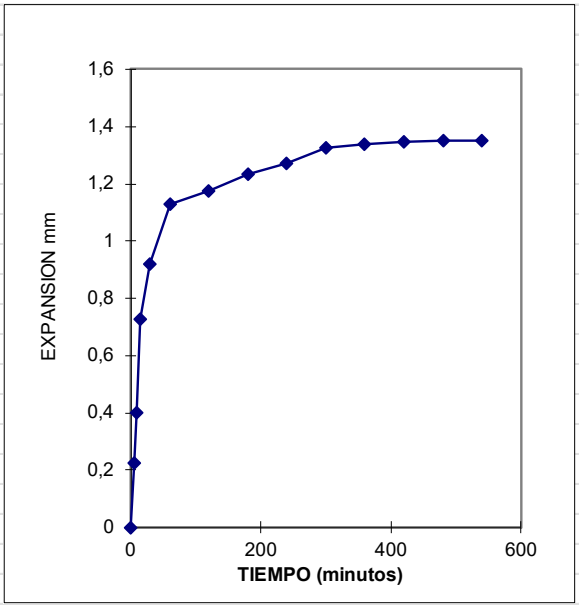
**HUMEDAD**

| CONDICION | ANTES DEL ENSAYO | | DESPUES DEL ENSAYO | |
|---|---|---|---|---|
| CAPSULA + SUELO HUMEDO | 42,79 | 40,29 | 57,76 | 55,59 |
| CAPSULA + SUELO SECO | 38,49 | 36,59 | 48,95 | 47,46 |
| PESO CAPSULA | 15,96 | 16,47 | 16,61 | 18,30 |
| HUMEDAD % | 19,09 | 18,39 | 27,24 | 27,88 |
| HUMEDAD PROMEDIO % | 18,74 | | 27,56 | |

**DENSIDAD**

| | | |
|---|---|---|
| DIAMETRO DEL ANILLO | 6,35 | |
| AREA DE LA MUESTRA | 31,67 | |
| ALTURA DE LA MUESTRA | 2,54 | |
| VOLUMEN DE LA MUESTRA | 80,44 | |
| PESO DEL ANILLO | 512,5 | |
| CONDICION: | ANTES DEL ENSAYO | DESPUES DEL ENSAYO |
| PESO ANILLO + MUESTRA | 663,03 | 674,85 |
| PESO DE LA MUESTRA | 150,53 | 162,35 |
| DENSIDAD HUMEDA | 1,871 | 2,018 |
| DENSIDAD SECA | 1,576 | 1,582 |
| % DE AGUA ABSORBIDA | 7,85 | |
| % DE EXPANSIÓN | 5 | |

**CURVA TIEMPO - EXPANSION**




**EXPANSION LIBRE**

| TIEMPO MINUTOS | LECTURA DIAL X0,0025 | EXPANSION mm |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 89 | 0,23 |
| 10 | 157 | 0,40 |
| 15 | 286 | 0,73 |
| 30 | 361 | 0,92 |
| 60 | 444 | 1,13 |
| 120 | 462 | 1,17 |
| 180 | 485 | 1,23 |
| 240 | 500 | 1,27 |
| 300 | 522 | 1,33 |
| 360 | 527 | 1,34 |
| 420 | 530 | 1,35 |
| 480 | 531 | 1,35 |
| 540 | 531 | 1,35 |

## 6% CENIZA (ESTÁNDAR)

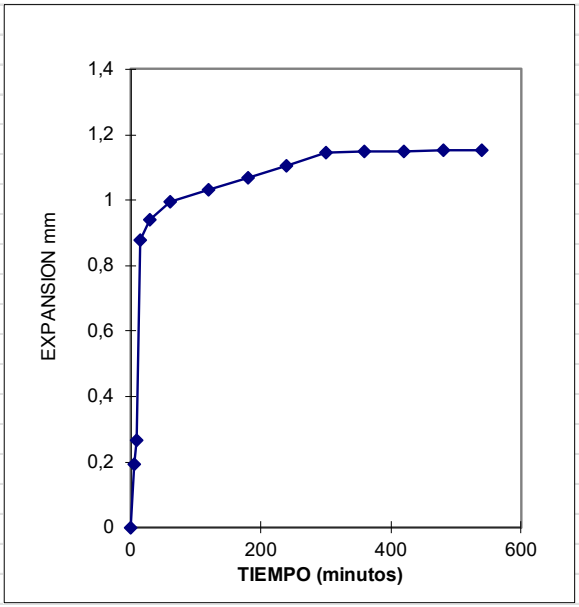
**HUMEDAD**

| CONDICION | ANTES DEL ENSAYO | | DESPUES DEL ENSAYO | |
|---|---|---|---|---|
| CAPSULA + SUELO HUMEDO | 49,39 | 48,03 | 55,01 | 55,70 |
| CAPSULA + SUELO SECO | 43,46 | 42,09 | 46,92 | 47,38 |
| PESO CAPSULA | 16,90 | 16,30 | 16,42 | 16,46 |
| HUMEDAD % | 22,33 | 23,03 | 26,52 | 26,91 |
| HUMEDAD PROMEDIO % | 22,68 | | 26,72 | |

**DENSIDAD**

| | | |
|---|---|---|
| DIAMETRO DEL ANILLO | 6,35 | |
| AREA DE LA MUESTRA | 31,67 | |
| ALTURA DE LA MUESTRA | 2,52 | |
| VOLUMEN DE LA MUESTRA | 79,81 | |
| PESO DEL ANILLO | 525 | |
| CONDICION: | ANTES DEL ENSAYO | DESPUES DEL ENSAYO |
| PESO ANILLO + MUESTRA | 671,09 | 678,13 |
| PESO DE LA MUESTRA | 146,09 | 153,13 |
| DENSIDAD HUMEDA | 1,831 | 1,919 |
| DENSIDAD SECA | 1,492 | 1,514 |
| % DE AGUA ABSORBIDA | 4,82 | |
| % DE EXPANSIÓN | 5 | |

**CURVA TIEMPO - EXPANSION**




**EXPANSION LIBRE**

| TIEMPO MINUTOS | LECTURA DIAL X0,0025 | EXPANSION mm |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 77 | 0,20 |
| 10 | 104 | 0,27 |
| 15 | 345 | 0,88 |
| 30 | 370 | 0,94 |
| 60 | 392 | 1,00 |
| 120 | 406 | 1,03 |
| 180 | 420 | 1,07 |
| 240 | 435 | 1,10 |
| 300 | 451 | 1,15 |
| 360 | 452 | 1,15 |
| 420 | 453 | 1,15 |
| 480 | 454 | 1,15 |
| 540 | 454 | 1,15 |

## 8% CENIZA (MODIFICADO)

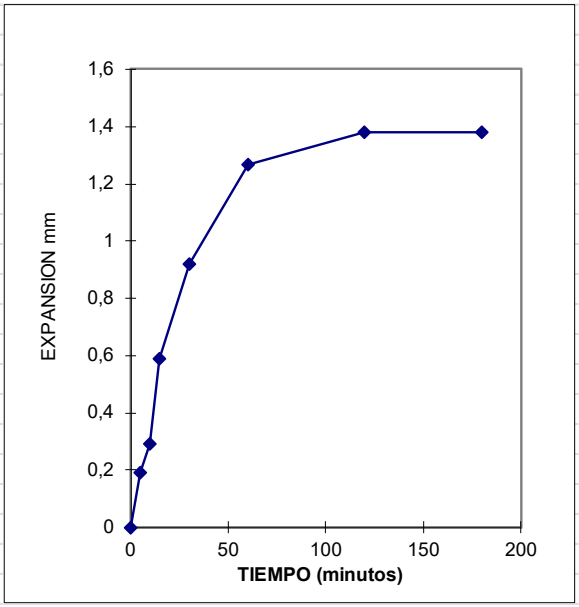
**HUMEDAD**

| CONDICION | ANTES DEL ENSAYO | | DESPUES DEL ENSAYO | |
|---|---|---|---|---|
| CAPSULA + SUELO HUMEDO | 44,87 | 41,80 | 42,17 | 52,79 |
| CAPSULA + SUELO SECO | 40,52 | 38,04 | 36,66 | 45,49 |
| PESO CAPSULA | 15,69 | 15,90 | 16,16 | 18,48 |
| HUMEDAD % | 17,52 | 16,98 | 26,88 | 27,03 |
| HUMEDAD PROMEDIO % | 17,25 | | 26,95 | |

**DENSIDAD**

| | | |
|---|---|---|
| DIAMETRO DEL ANILLO | 6,35 | |
| AREA DE LA MUESTRA | 31,67 | |
| ALTURA DE LA MUESTRA | 2,54 | |
| VOLUMEN DE LA MUESTRA | 80,44 | |
| PESO DEL ANILLO | 512,5 | |
| CONDICION: | ANTES DEL ENSAYO | DESPUES DEL ENSAYO |
| PESO ANILLO + MUESTRA | 665,21 | 676,85 |
| PESO DE LA MUESTRA | 152,71 | 164,35 |
| DENSIDAD HUMEDA | 1,898 | 2,043 |
| DENSIDAD SECA | 1,619 | 1,609 |
| % DE AGUA ABSORBIDA | 7,62 | |
| % DE EXPANSIÓN | 5 | |

**CURVA TIEMPO - EXPANSION**




**EXPANSION LIBRE**

| TIEMPO MINUTOS | LECTURA DIAL X0,0025 | EXPANSION mm |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 75 | 0,19 |
| 10 | 115 | 0,29 |
| 15 | 231 | 0,59 |
| 30 | 362 | 0,92 |
| 60 | 498 | 1,26 |
| 120 | 544 | 1,38 |
| 180 | 544 | 1,38 |

## 8% CENIZA (ESTÁNDAR)

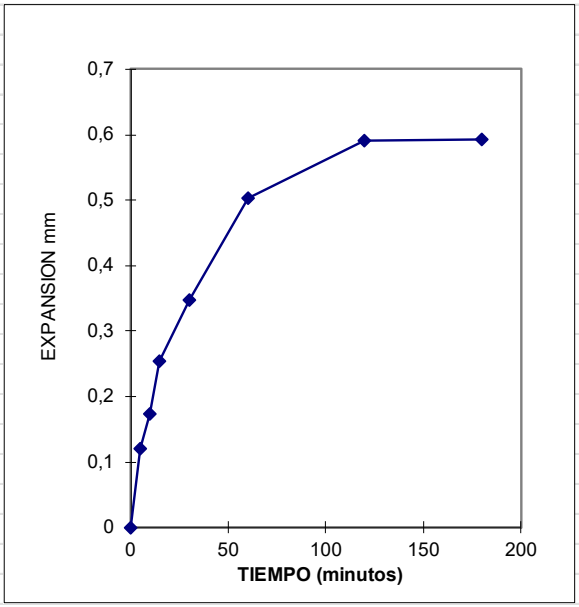
**HUMEDAD**

| CONDICION | ANTES DEL ENSAYO | | DESPUES DEL ENSAYO | |
|---|---|---|---|---|
| CAPSULA + SUELO HUMEDO | 49,26 | 47,67 | 46,90 | 38,15 |
| CAPSULA + SUELO SECO | 43,45 | 42,17 | 41,32 | 33,39 |
| PESO CAPSULA | 15,48 | 15,66 | 19,76 | 15,43 |
| HUMEDAD % | 20,77 | 20,75 | 25,88 | 26,50 |
| HUMEDAD PROMEDIO % | 20,76 | | 26,19 | |

**DENSIDAD**

| | | |
|---|---|---|
| DIAMETRO DEL ANILLO | 6,35 | |
| AREA DE LA MUESTRA | 31,67 | |
| ALTURA DE LA MUESTRA | 2,52 | |
| VOLUMEN DE LA MUESTRA | 79,81 | |
| PESO DEL ANILLO | 525 | |
| CONDICION: | ANTES DEL ENSAYO | DESPUES DEL ENSAYO |
| PESO ANILLO + MUESTRA | 670,42 | 674,22 |
| PESO DE LA MUESTRA | 145,42 | 149,22 |
| DENSIDAD HUMEDA | 1,822 | 1,870 |
| DENSIDAD SECA | 1,509 | 1,482 |
| % DE AGUA ABSORBIDA | 2,61 | |
| % DE EXPANSIÓN | 2 | |

**CURVA TIEMPO - EXPANSION**




**EXPANSION LIBRE**

| TIEMPO MINUTOS | LECTURA DIAL X0,0025 | EXPANSION mm |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 47 | 0,12 |
| 10 | 68 | 0,17 |
| 15 | 100 | 0,25 |
| 30 | 137 | 0,35 |
| 60 | 198 | 0,50 |
| 120 | 233 | 0,59 |
| 180 | 233 | 0,59 |

## 10% CENIZA (MODIFICADO)

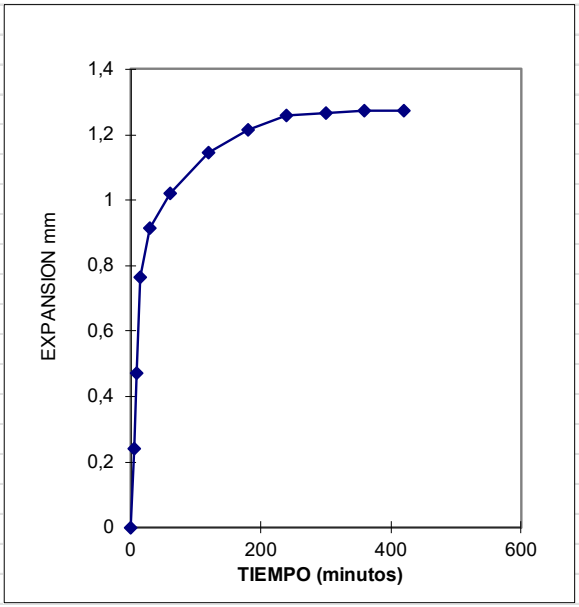
**HUMEDAD**

| CONDICION | ANTES DEL ENSAYO | | DESPUES DEL ENSAYO | |
|---|---|---|---|---|
| CAPSULA + SUELO HUMEDO | 45,87 | 48,62 | 46,58 | 51,12 |
| CAPSULA + SUELO SECO | 41,30 | 43,96 | 39,86 | 43,77 |
| PESO CAPSULA | 15,39 | 16,56 | 16,28 | 17,69 |
| HUMEDAD % | 17,64 | 17,01 | 28,50 | 28,18 |
| HUMEDAD PROMEDIO % | 17,32 | | 28,34 | |

**DENSIDAD**

| | | |
|---|---|---|
| DIAMETRO DEL ANILLO | 6,35 | |
| AREA DE LA MUESTRA | 31,67 | |
| ALTURA DE LA MUESTRA | 2,54 | |
| VOLUMEN DE LA MUESTRA | 80,44 | |
| PESO DEL ANILLO | 512,5 | |
| CONDICION: | ANTES DEL ENSAYO | DESPUES DEL ENSAYO |
| PESO ANILLO + MUESTRA | 657,75 | 670,07 |
| PESO DE LA MUESTRA | 145,25 | 157,57 |
| DENSIDAD HUMEDA | 1,806 | 1,959 |
| DENSIDAD SECA | 1,539 | 1,526 |
| % DE AGUA ABSORBIDA | 8,48 | |
| % DE EXPANSIÓN | 5 | |

**CURVA TIEMPO - EXPANSION**




**EXPANSION LIBRE**

| TIEMPO MINUTOS | LECTURA DIAL X0,0025 | EXPANSION mm |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 94 | 0,24 |
| 10 | 186 | 0,47 |
| 15 | 301 | 0,77 |
| 30 | 359 | 0,91 |
| 60 | 402 | 1,02 |
| 120 | 451 | 1,15 |
| 180 | 478 | 1,22 |
| 240 | 495 | 1,26 |
| 300 | 498 | 1,27 |
| 360 | 501 | 1,27 |
| 420 | 501 | 1,27 |

## 10% CENIZA (ESTÁNDAR)

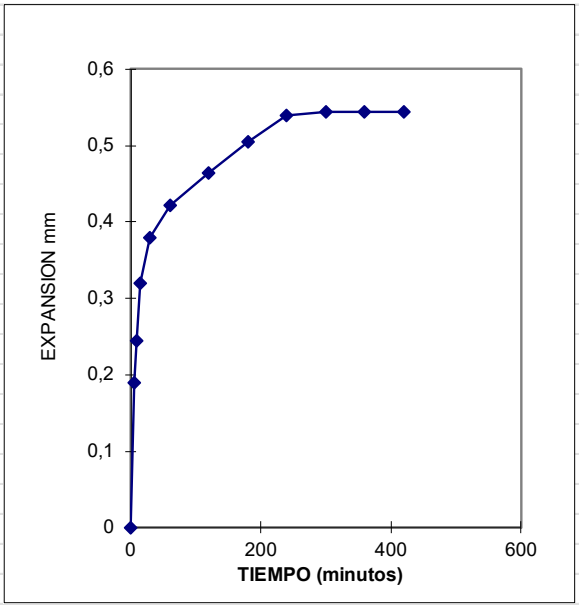
**HUMEDAD**

| CONDICION | ANTES DEL ENSAYO | | DESPUES DEL ENSAYO | |
|---|---|---|---|---|
| CAPSULA + SUELO HUMEDO | 51,96 | 49,02 | 43,15 | 42,09 |
| CAPSULA + SUELO SECO | 45,68 | 43,12 | 37,77 | 36,60 |
| PESO CAPSULA | 16,86 | 15,52 | 16,90 | 15,49 |
| HUMEDAD % | 21,79 | 21,38 | 25,78 | 26,01 |
| HUMEDAD PROMEDIO % | 21,58 | | 25,89 | |

**DENSIDAD**

| | | |
|---|---|---|
| DIAMETRO DEL ANILLO | 6,35 | |
| AREA DE LA MUESTRA | 31,67 | |
| ALTURA DE LA MUESTRA | 2,52 | |
| VOLUMEN DE LA MUESTRA | 79,81 | |
| PESO DEL ANILLO | 525 | |
| CONDICION: | ANTES DEL ENSAYO | DESPUES DEL ENSAYO |
| PESO ANILLO + MUESTRA | 671,23 | 677,65 |
| PESO DE LA MUESTRA | 146,23 | 152,65 |
| DENSIDAD HUMEDA | 1,832 | 1,913 |
| DENSIDAD SECA | 1,507 | 1,519 |
| % DE AGUA ABSORBIDA | 4,39 | |
| % DE EXPANSIÓN | 2 | |

**CURVA TIEMPO - EXPANSION**




**EXPANSION LIBRE**

| TIEMPO MINUTOS | LECTURA DIAL X0,0025 | EXPANSION mm |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 75 | 0,19 |
| 10 | 96 | 0,25 |
| 15 | 126 | 0,32 |
| 30 | 150 | 0,38 |
| 60 | 166 | 0,42 |
| 120 | 183 | 0,46 |
| 180 | 199 | 0,51 |
| 240 | 213 | 0,54 |
| 300 | 214 | 0,54 |
| 360 | 214 | 0,54 |
| 420 | 214 | 0,54 |

## 15% CENIZA (MODIFICADO)

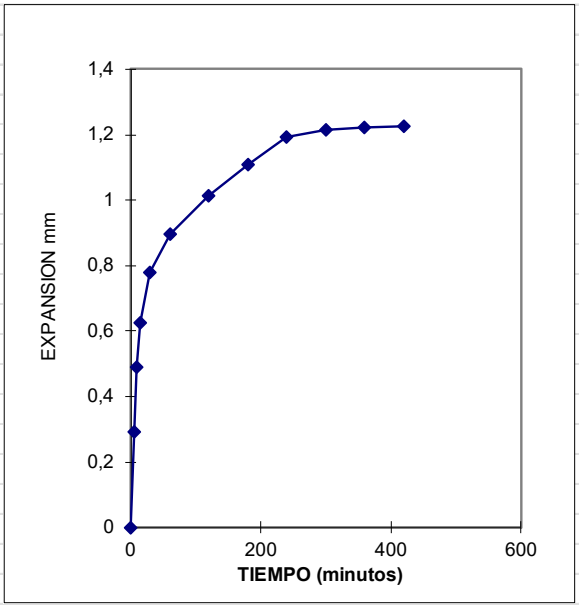
**HUMEDAD**

| CONDICION | ANTES DEL ENSAYO | | DESPUES DEL ENSAYO | |
|---|---|---|---|---|
| CAPSULA + SUELO HUMEDO | 48,86 | 46,23 | 47,93 | 39,33 |
| CAPSULA + SUELO SECO | 44,29 | 42,18 | 41,31 | 34,18 |
| PESO CAPSULA | 17,44 | 17,68 | 15,50 | 16,27 |
| HUMEDAD % | 17,02 | 16,53 | 25,65 | 28,75 |
| HUMEDAD PROMEDIO % | 16,78 | | 27,20 | |

**DENSIDAD**

| | | |
|---|---|---|
| DIAMETRO DEL ANILLO | 6,35 | |
| AREA DE LA MUESTRA | 31,67 | |
| ALTURA DE LA MUESTRA | 2,54 | |
| VOLUMEN DE LA MUESTRA | 80,44 | |
| PESO DEL ANILLO | 512,5 | |
| CONDICION: | ANTES DEL ENSAYO | DESPUES DEL ENSAYO |
| PESO ANILLO + MUESTRA | 657,71 | 672,13 |
| PESO DE LA MUESTRA | 145,21 | 159,63 |
| DENSIDAD HUMEDA | 1,805 | 1,984 |
| DENSIDAD SECA | 1,546 | 1,560 |
| % DE AGUA ABSORBIDA | 9,93 | |
| % DE EXPANSIÓN | 5 | |

**CURVA TIEMPO - EXPANSION**




**EXPANSION LIBRE**

| TIEMPO MINUTOS | LECTURA DIAL X0,0025 | EXPANSION mm |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 115 | 0,29 |
| 10 | 193 | 0,49 |
| 15 | 246 | 0,63 |
| 30 | 307 | 0,78 |
| 60 | 352 | 0,90 |
| 120 | 399 | 1,01 |
| 180 | 436 | 1,11 |
| 240 | 470 | 1,19 |
| 300 | 479 | 1,22 |
| 360 | 481 | 1,22 |
| 420 | 482 | 1,23 |

## 15% CENIZA (ESTÁNDAR)

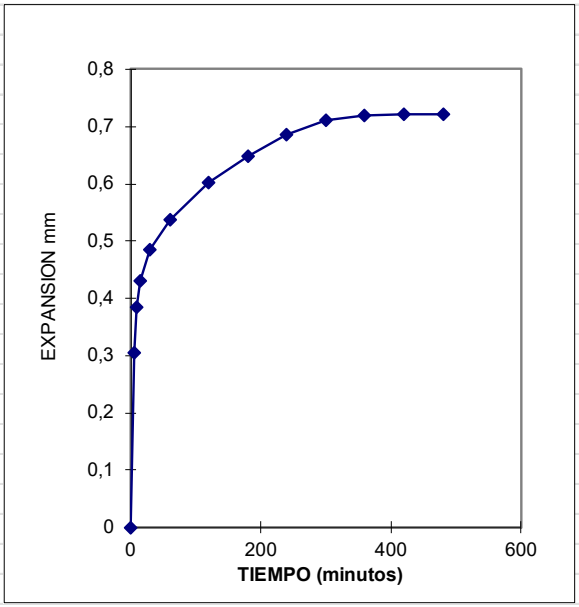
**HUMEDAD**

| CONDICION | ANTES DEL ENSAYO | | DESPUES DEL ENSAYO | |
|---|---|---|---|---|
| CAPSULA + SUELO HUMEDO | 49,91 | 50,17 | 42,50 | 46,24 |
| CAPSULA + SUELO SECO | 44,40 | 44,26 | 36,95 | 40,19 |
| PESO CAPSULA | 17,62 | 15,50 | 15,97 | 17,12 |
| HUMEDAD % | 20,58 | 20,55 | 26,45 | 26,22 |
| HUMEDAD PROMEDIO % | 20,56 | | 26,34 | |

**DENSIDAD**

| | | |
|---|---|---|
| DIAMETRO DEL ANILLO | 6,35 | |
| AREA DE LA MUESTRA | 31,67 | |
| ALTURA DE LA MUESTRA | 2,52 | |
| VOLUMEN DE LA MUESTRA | 79,81 | |
| PESO DEL ANILLO | 525 | |
| CONDICION: | ANTES DEL ENSAYO | DESPUES DEL ENSAYO |
| PESO ANILLO + MUESTRA | 666,83 | 675,49 |
| PESO DE LA MUESTRA | 141,83 | 150,49 |
| DENSIDAD HUMEDA | 1,777 | 1,886 |
| DENSIDAD SECA | 1,474 | 1,493 |
| % DE AGUA ABSORBIDA | 6,11 | |
| % DE EXPANSIÓN | 3 | |

**CURVA TIEMPO - EXPANSION**




**EXPANSION LIBRE**

| TIEMPO MINUTOS | LECTURA DIAL X0,0025 | EXPANSION mm |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 120 | 0,31 |
| 10 | 152 | 0,39 |
| 15 | 169 | 0,43 |
| 30 | 191 | 0,49 |
| 60 | 212 | 0,54 |
| 120 | 237 | 0,60 |
| 180 | 255 | 0,65 |
| 240 | 270 | 0,69 |
| 300 | 280 | 0,71 |
| 360 | 283 | 0,72 |
| 420 | 284 | 0,72 |
| 480 | 284 | 0,72 |

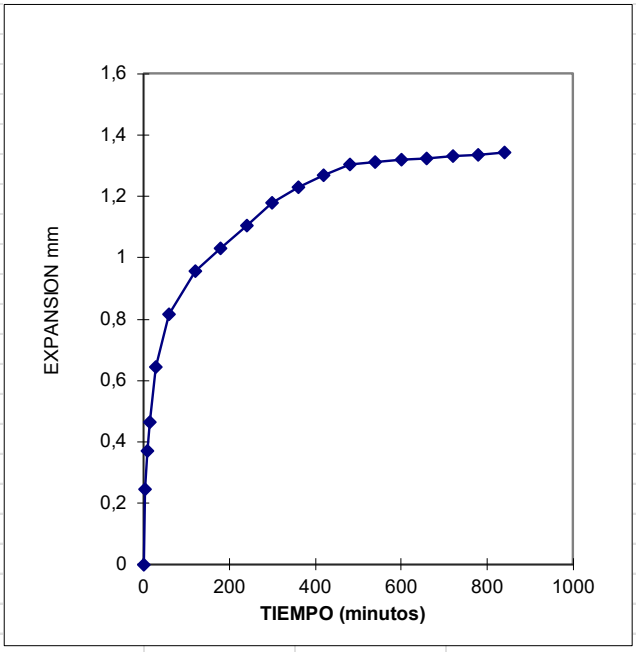
**HUMEDAD**

| CONDICION | ANTES DEL ENSAYO | | DESPUES DEL ENSAYO | |
|---|---|---|---|---|
| CAPSULA + SUELO HUMEDO | 45,87 | 48,62 | 46,58 | 51,12 |
| CAPSULA + SUELO SECO | 41,30 | 43,96 | 39,86 | 43,77 |
| PESO CAPSULA | 15,39 | 16,56 | 16,28 | 17,69 |
| HUMEDAD % | 17,64 | 17,01 | 28,50 | 28,18 |
| HUMEDAD PROMEDIO % | 17,32 | | 28,34 | |

**DENSIDAD**

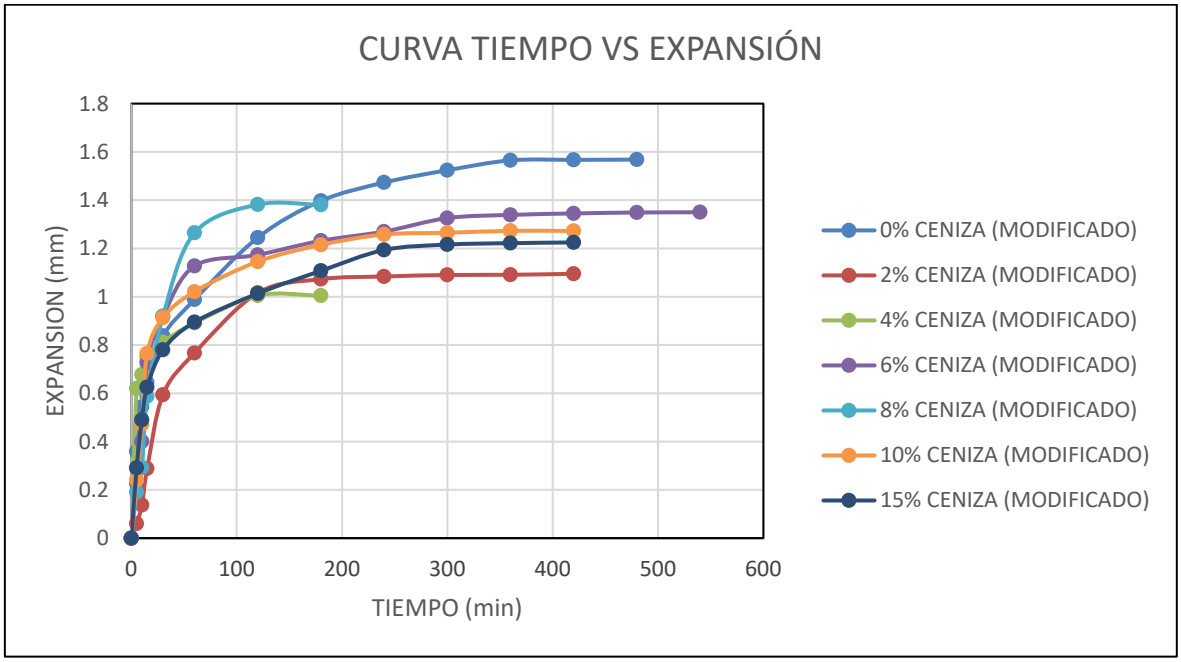
| | | |
|---|---|---|
| DIAMETRO DEL ANILLO | 6,35 | |
| AREA DE LA MUESTRA | 31,67 | |
| ALTURA DE LA MUESTRA | 2,54 | |
| VOLUMEN DE LA MUESTRA | 80,44 | |
| PESO DEL ANILLO | 512,5 | |
| CONDICION: | ANTES DEL ENSAYO | DESPUES DEL ENSAYO |
| PESO ANILLO + MUESTRA | 664,00 | 675,01 |
| PESO DE LA MUESTRA | 151,50 | 162,51 |
| DENSIDAD HUMEDA | 1,883 | 2,020 |
| DENSIDAD SECA | 1,605 | 1,574 |
| % DE AGUA ABSORBIDA | 7,27 | |
| % DE EXPANSIÓN | 5 | |

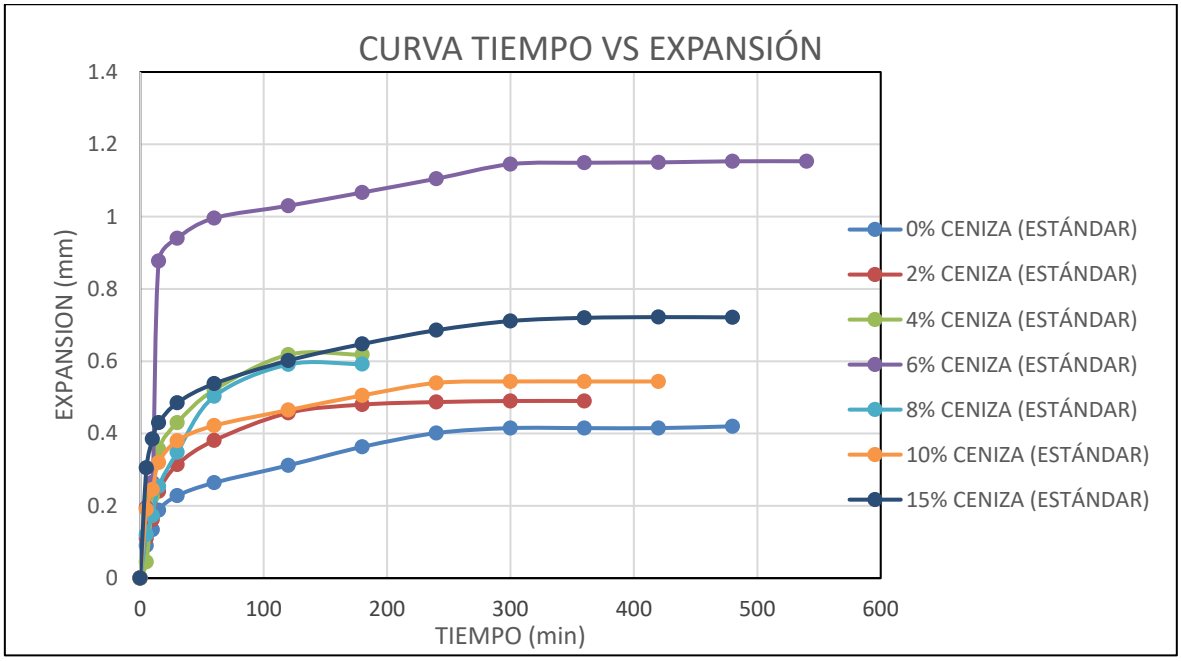
**CURVA TIEMPO - EXPANSION**




**EXPANSION LIBRE**

| TIEMPO MINUTOS | LECTURA DIAL X0,0025 | EXPANSION mm |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 97 | 0,25 |
| 10 | 146 | 0,37 |
| 15 | 183 | 0,47 |
| 30 | 254 | 0,65 |
| 60 | 321 | 0,82 |
| 120 | 376 | 0,96 |
| 180 | 406 | 1,03 |
| 240 | 435 | 1,10 |
| 300 | 464 | 1,18 |
| 360 | 484 | 1,23 |
| 420 | 500 | 1,27 |
| 480 | 513 | 1,30 |
| 540 | 516 | 1,31 |
| 600 | 520 | 1,32 |
| 660 | 522 | 1,33 |
| 720 | 524 | 1,33 |
| 780 | 526 | 1,34 |
| 840 | 530 | 1,35 |


CURVA TIEMPO VS EXPANSIÓN
EXPANSION (mm)
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
100
200
300
400
500
600
TIEMPO (min)
0% CENIZA (MODIFICADO)
2% CENIZA (MODIFICADO)
4% CENIZA (MODIFICADO)
6% CENIZA (MODIFICADO)
8% CENIZA (MODIFICADO)
10% CENIZA (MODIFICADO)
15% CENIZA (MODIFICADO)


CURVA TIEMPO VS EXPANSIÓN
EXPANSION (mm)
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
100
200
300
400
500
600
TIEMPO (min)
0% CENIZA (ESTÁNDAR)
2% CENIZA (ESTÁNDAR)
4% CENIZA (ESTÁNDAR)
6% CENIZA (ESTÁNDAR)
8% CENIZA (ESTÁNDAR)
10% CENIZA (ESTÁNDAR)
15% CENIZA (ESTÁNDAR)

**Anexo 4.** Gravedad especifica de solidos

| MUESTRA SUELO ARCILLOSO NATURAL | | | |
|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 |
| PESO DEL PICNOMETRO LLENO DE AGUA A 20° C | (gr.) | 163,11 | 157,795 |
| PESO DEL SUELO SECO + RECIPIENTO | (gr.) | 86,46 | 103,15 |
| PESO DEL RECIPIENTE | (gr.) | 55,11 | 69,97 |
| PESO DEL SUELO SECO | (gr.) | 31,35 | 33,18 |
| PESO DEL PICNOMETRO +SUELO+AGUA | (gr.) | 182,97 | 178,74 |
| GRAVEDAD ESPECIFICA | (gr/cm^3) | 2,728 | 2,712 |
| GRAVEDAD ESPECIFICA PROMEDIO | (gr/cm^3) | 2,720 | |

**Anexo 5**. Resultados del ensayo

MODIFICADO

| ENSAYOS | ENSAYO COMPRESIÓN SIMPLE | | | | | | ENSAYO EXPANSIÓN LIBRE | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % Ceniza | DIFEREN.ENERGIA | | | MISMA ENERGIA | | | %expansión | %w antes | %w despues |
| | Qu | E | %w | Qu | E | %w | | | |
| **0,00** | 0,00 | 8,08 | 17,26 | | | | 6,17 | 26,01 | 34,94 |
| **2,00** | 0,00 | 8,00 | 15,97 | 0,00 | 7,50 | 15,50 | 4,31 | 19,74 | 27,25 |
| **4,00** | 0,00 | 8,24 | 8,97 | 0,00 | 7,80 | 15,42 | 3,96 | 18,58 | 32,20 |
| **6,00** | 0,00 | 7,56 | 17,11 | 0,00 | 8,65 | 18,53 | 5,31 | 18,74 | 27,56 |
| **8,00** | 0,00 | 8,93 | 16,87 | | | | 5,44 | 17,25 | 26,95 |
| **10,00** | | | | | | | 5,01 | 17,32 | 28,34 |
| **15,00** | | | | | | | 4,82 | 16,78 | 27,20 |

ESTANDAR

| ENSAYOS | ENSAYO COMPRESIÓN SIMPLE | | | | | | ENSAYO EXPANSIÓN LIBRE | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % Ceniza | DIFEREN.ENERGIA | | | MISMA ENERGIA | | | %expansión | %w antes | %w despues |
| | Qu | E | %w | Qu | E | %w | | | |
| **0,00** | 0,00 | 3,37 | 17,26 | | | | 1,67 | 26,65 | 33,07 |
| **2,00** | 0,00 | 3,69 | 15,92 | 0,00 | 3,38 | 16,77 | 1,94 | 23,69 | 26,37 |
| **4,00** | 0,00 | 4,12 | 14,98 | 0,00 | 3,32 | 17,50 | 2,45 | 23,22 | 28,38 |
| **6,00** | 0,00 | 4,52 | 17,57 | 0,00 | 3,50 | 16,53 | 4,58 | 22,68 | 26,72 |
| **8,00** | 183,89 | 0,00 | 0,00 | | | | 2,35 | 20,76 | 26,19 |
| **10,00** | | | | | | | 2,16 | 21,58 | 25,89 |
| **15,00** | | | | | | | 2,87 | 20,56 | 26,34 |

SUCS CENIZA

| %w | %GRAVA | %ARENA | %FINOS | SUCS | AASHTO | IG |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 6,30 | 1,08 | 3,25 | 95,67 | ML | A-4 | 0,00 |

SUCS MUESTRA SUELO

| %w | %GRAVA | %ARENA | %FINOS | %LL | %LP | %IP | SUCS | AASHTO | IG |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8,57 | 0,00 | 8,26 | 91,74 | 50,02 | 32,07 | 17,95 | MH | A-7-5 | 20,30 |

## ENSAYO DE COMPACTACIÓN MODIFICADO

| dmáx | % w ópt |
|---|---|
| 1,60 | 21,70 |

## ENSAYO DE COMPACTACIÓN ESTÁNDAR

| dmáx | % w ópt |
|---|---|
| 1,52 | 25,10 |

## GRAVEDAD ESPECIFICA DE SÓLIDOS

| | | |
|---|---|---|
| **GRAVEDAD ESPECIFICA PROMEDIO** | (gr/cm^3) | 2,73 |