

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN GEOTECNIA APLICADA

DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DE TÍTULO

MAESTRÍA EN GEOTECNIA APLICADA



**TEMA:** “ESTABILIZACIÓN DE ARENA POROSA (PUMITA)  
MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO Y  
TERRASIL”

AUTOR:

JORGE IVÁN BURBANO DEL CASTILLO

DIRECTOR:

JUAN ENRIQUE MERIZALDE AGUIRRE

QUITO, DICIEMBRE DE 2024

# ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO.....	i
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	v
GLOSARIO.....	vi
RESUMEN.....	x
CAPÍTULO I.....	13
INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 GENERALIDADES.....	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	15
1.3.1 MECANISMOS DE ESTABILIZACIONES.....	18
1.3.1.1 MECÁNICOS (COMPACTACIÓN):.....	18
1.3.1.2 QUÍMICOS (ESTABILIZACIONES):.....	18
1.3.1.3 FÍSICOS:.....	18
1.4 METODOLOGÍA.....	19
1.4.1 ETAPA I.....	19
1.4.1.1. PROBLEMÁTICA.....	19
1.4.2 ETAPA II.....	19
1.4.2.1 MUESTREO.....	19
1.4.2.2 ENSAYOS DE LABORATORIO.....	20
1.4.2.3 CUADRO DE ENSAYOS DE LABORATORIO.....	22
1.4.3 ETAPA III.....	23
1.4.3.1 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	23
1.4.4 ETAPA IV.....	23
1.4.4.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE LOS RESULTADOS.....	23
CAPÍTULO II (ANÁLISIS DE LOS MATERIALES).....	24
2.1 PUMITA.....	24
2.1.1 ORIGEN Y COMPOSICIÓN.....	24
2.1.1.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA PUMITA.....	25
2.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LA PUMITA.....	28
2.2 MUESTREO DE LOS AGREGADOS.....	29

<b>2.3</b>	<b>DESCRIPCIÓN Y EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS</b>	30
2.3.1	<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS (ASTM C136 – 19)</b>	30
2.3.4	<b>CLASIFICACIÓN DEL SUELOS</b>	32
2.3.4.1	<b>SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE LA AASHTO (ASTM 3282 – 24)</b>	33
2.3.4.2	<b>SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE LA SUCS (ASTM D2487 – 19)</b>	34
2.3.5	<b>RELACIONES PESO UNITARIO – HUMEDAD DE LOS SUELOS</b>	36
2.3.5.1	<b>PRINCIPIO DE COMPACTACIÓN</b>	39
2.3.6	<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIN CONFINAMIENTO DE MUESTRAS DE SUELO-CEMENTO (ASTM 1633-17)</b>	43
2.3.6.1	<b>MÉTODOS DE MOLDEO PARA ENSAYOS A COMPRESIÓN SUELO CEMENTO</b>	44
2.3.6.1.1	<b>Método A</b>	44
2.3.6.1.2	<b>Método B</b>	45
2.4	<b>TERRASIL</b>	46
2.4.1	<b>BENEFICIOS DEL TERRASIL (Zydex)</b>	48
2.4.2	<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL TERRASIL</b>	49
2.5	<b>CEMENTO</b>	49
2.5.1	<b>CONGLOMERANTES</b>	49
2.5.2	<b>CEMENTO PORTLAND</b>	50
2.5.3	<b>TIPOS DE CEMENTO PORTLAND</b>	52
2.5.4	<b>PRODUCCIÓN</b>	53
2.5.4.1	<b>CLINKER DEL CEMENTO PORTLAND:</b>	56
2.5.4.2	<b>TIPOS DE CEMENTO HIDRÁULICO</b>	57
2.5.5	<b>CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO TIPO HE</b>	58
<b>CAPÍTULO III (ESTABILIZACIÓN DE SUELOS)</b>		59
3.1	<b>GENERALIDADES</b>	59
3.1.1	<b>MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN</b>	62
3.1.1.1	<b>MECÁNICA:</b>	62
3.1.1.2	<b>QUÍMICA:</b>	62
3.1.2	<b>ESTIMACIÓN DE CEMENTO PARA ESTABILIZACIÓN</b>	63
3.1.3	<b>PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS DE SUELOS TRATADAS CON CEMENTO</b>	66
3.1.3.1	<b>ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA</b>	67
3.1.3.2	<b>RESISTENCIA</b>	67
3.1.3.3	<b>PERMEABILIDAD</b>	68

3.1.3.4	COMPRESIBILIDAD .....	69
3.1.3.5	DURABILIDAD .....	70
CAPÍTULO IV (ANÁLISIS DE RESULTADOS) .....		71
4.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	71
4.2.1	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS .....	71
4.2.2	CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN SUCS Y AASHTO .....	72
4.2.3	RELACIONES PESO UNITARIO – HUMEDAD DE LOS SUELOS.....	72
4.2.3.1	SUELO EN ESTADO NATURAL .....	72
4.2.3.2	SUELO ESTABILIZADO.....	73
4.2.4	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE .....	78
CAPÍTULO V (CONCLUSIONES) .....		80
REFERENCIAS VI .....		82
ANEXOS VII.....		85
7.1	Ensayo de Análisis Granulométrico de los agregados (Pumita Natural)	85
7.2	Ensayo de Relación Peso Unitario – Humedad de los Suelos (Pumita Natural).....	89
7.2	Ensayo de Relación Peso Unitario – Humedad de los Suelos (Pumita + TerraSil (1:200) + 4% Cemento) .....	93
7.3	Ensayo de Relación Peso Unitario – Humedad de los Suelos (Pumita + TerraSil (1:200) + 5% Cemento) .....	97
7.4	Ensayo de Relación Peso Unitario – Humedad de los Suelos (Pumita + TerraSil (1:200) + 6% Cemento) .....	101
7.5	Ensayo de Relación Peso Unitario – Humedad de los Suelos (Pumita + TerraSil (1:200) + 7% Cemento .....	105
7.6	Ensayo de Relación Peso Unitario – Humedad de los Suelos (Pumita + TerraSil (1:200) + 8% Cemento) .....	109
7.7	Ensayo de Resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos ...	113
7.8	Validación y recolección de datos.....	114

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Ensayo de Compresión Simple .....	13
Ilustración 2 Estabilización Química Utilizando Cemento .....	14
Ilustración 3 Estructura del Pavimento.....	16
Ilustración 4 Preparación de capa Subrasante.....	17
Ilustración 5 Toma de muestras de Stock de material .....	20
Ilustración 6 Ensayo de Análisis Granulométrico de los Áridos, Ensayo de Relación de Peso Unitario-Humedad de los Suelos .....	21
Ilustración 7 Ensayo de Relación de Peso Unitario-Humedad de los Suelos, Ensayo de Compresión Simple.....	22
Ilustración 8 Organigrama de la Metodología de la Investigación.....	23
Ilustración 9 Tipos de Piedra Pumita.....	24
Ilustración 10 Yacimientos de Pumita .....	27
Ilustración 11 Ubicación del yacimiento.....	29
Ilustración 12 Ensayo de Análisis Granulométrico de los Áridos.....	31
Ilustración 13 Curva de Distribución de Tamaño de Partícula .....	31
Ilustración 14 Relaciones Volumétricas .....	37
Ilustración 15 Control de Compactación.....	38
Ilustración 16 Principios de la Compactación .....	40
Ilustración 17 Compactación Subrasante.....	41
Ilustración 18 Curva de Compactación, Densidad Máxima y Humedad Óptima.....	42
Ilustración 19 Briqueta de Suelo-Cemento para Ensayo de Compresión Simple.....	43
Ilustración 20 Briqueta de Suelo-Cemento (Método A).....	45
Ilustración 21 Impermeabilización del Suelo con Terrasil.....	47
Ilustración 22 Acción Impermeabilizante del Terrasil .....	48
Ilustración 23 Cemento Portland.....	50
Ilustración 24 Polvo Fino del Cemento Portland .....	51
Ilustración 25 Horno Rotatorio para Manufactura del Clinker .....	52
Ilustración 26 Etapas en la Producción Tradicional del Cemento Portland .....	55
Ilustración 27 Sistema de Estabilización de Suelos de la Fuerza Aérea.....	61
Ilustración 28 Compactación .....	62
Ilustración 29 Estabilización de Suelos con Emulsión Asfáltica .....	63
Ilustración 30 Falla en Carpeta Asfáltica Producida por Suelos Expansivos.....	67
Ilustración 31 Compactación de Suelo Estabilizado.....	68
Ilustración 32 Baja Durabilidad de una Subrasante Natural.....	70
Ilustración 33 Curva de análisis granulométrico pumita.....	71
Ilustración 34 Curva de Densidades Máximas y Humedades Óptimas, sin Estabilizar	73
Ilustración 35 Resumen de Densidades Máximas.....	74
Ilustración 36 Resumen de Humedades Óptimas.....	75
Ilustración 37 Resumen de Compactaciones Máximas y Humedades Óptimas.....	77
Ilustración 38 Resistencia a la compresión 7 días .....	78
Ilustración 39 Resistencia a la compresión a 28 días.....	79

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resumen de Ensayos para la Investigación.....	22
Tabla 2 Composición Química de la Pumita.....	25
Tabla 3 Producción Mundial de Pumita .....	26
Tabla 4 Sistema de Clasificación de Suelo AASHTO.....	34
Tabla 5 Sistema de Clasificación de Suelo SUCS.....	35
Tabla 6 Grado de Compactación Mínima .....	39
Tabla 7 Especificaciones para la Prueba Proctor Estándar (Basadas en la designación ASTM D-1557) .....	42
Tabla 8 Límites para la Resistencia del Suelo-Cemento a Compresión .....	46
Tabla 9 Especificaciones Técnicas del Terrasil.....	49
Tabla 10 Composición Química del Cemento .....	50
Tabla 11 Fuentes para Materia Prima Usada en la Fabricación de Cemento Portland	53
Tabla 12 Composición Química del Clinker .....	56
Tabla 13 Contenido de Cemento para Estabilización de Suelos según Clasificación AASHTO .....	64
Tabla 14 Valores de k (permeabilidad) .....	69
Tabla 15 Resumen de análisis granulométrico pumita.....	71
Tabla 16 Clasificación de la pumita, ASSHTO - SUCS.....	72
Tabla 17 Resumen de Densidad Máxima y Humedad Óptima, sin Agentes Externos .	73
Tabla 18 Resumen de Ensayos de Compactación Proctor .....	76
Tabla 19 Resistencia a la compresión de probetas de suelo-cemento .....	78

## GLOSARIO

- **Absorción del agua:** Debido a la presencia de minerales en los suelos, estos son capaces de realizar un intercambio catiónico para absorber el agua.
- **Aluminatos hidratados:** Compuestos químicos que se forman cuando los compuestos de aluminio reaccionan con agua.
- **Anhidrita:** La anhidrita es un mineral que pertenece al grupo de los sulfatos. Su fórmula química es  $\text{CaSO}_4$  y se presenta en forma anhidra, es decir, sin agua de hidratación.
- **American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO):** (Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras y Transportes Estatales), organismo normativo que publica especificaciones, protocolos de ensayos y directrices que se utilizan en el diseño y construcción de carreteras.
- **Cambio de volumen:** Los suelos que son propensos a cambiar de volumen debido a la absorción del agua pueden hincharse o contraerse.
- **Capacidad de carga:** La capacidad de carga, se refiere a la máxima presión o carga que puede soportar un suelo sin que se produzcan fallas o deformaciones excesivas.
- **Capilaridad:** La capilaridad es un fenómeno físico que ocurre cuando un líquido asciende o desciende en un tubo delgado, conocido como capilar, debido a las fuerzas intermoleculares entre el líquido y las paredes del tubo.
- **Cementante:** Material que se incorpora para endurecer.
- **Clinker:** Fundamental en la creación del cemento, surge de la combinación de arcilla y piedra caliza molida.
- **Cohesión:** La cohesión se refiere a la capacidad del suelo de mantenerse unido debido a las fuerzas de atracción entre las partículas individuales que lo componen. Esta propiedad es especialmente relevante en suelos finos como arcillas y limos, donde las partículas son muy pequeñas y tienen una gran superficie de contacto.
- **Conglomerado:** Tipo de roca sedimentaria clástica compuesta principalmente por fragmentos redondeados de diferentes tamaños y materiales que están unidos por un cemento natural.
- **Deformación:** Cambio de la forma de un material o una estructura, debido a la aplicación de cargas.
- **Densidad:** La densidad se refiere a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen de una sustancia.

- **Estabilización:** Proceso por el cual se combinan uno o varios materiales y/o agentes químicos, para modificar el comportamiento de un suelo.
- **Etringita:** Es un mineral del grupo de los sulfatos. Es importante en el contexto del cemento y el concreto, ya que se forma cuando el aluminato de calcio en el cemento reacciona con sulfatos presentes en el agua o el suelo. Esta reacción puede influir en la durabilidad y la resistencia del concreto, siendo relevante para ingenieros y constructores en términos de mantenimiento y diseño de estructuras.
- **Expansión:** Fenómeno en el cual ciertos tipos de suelos aumentan su volumen debido a la absorción de agua.
- **Fatiga:** Reducción progresiva de la resistencia de un material debido a la aplicación repetida de esfuerzos que se aplican sobre dicho elemento o estructura.
- **Fragua:** Proceso de endurecimiento o solidificación de ciertos materiales, como el cemento, debido a una reacción química de hidratación que genera calor y provoca que el material se vuelva sólido y resistente.
- **Granulometría:** Distribución estadística de los tamaños de los elementos de un material fraccionado.
- **Hidratación del cemento:** Proceso químico fundamental en la química de los materiales de construcción. Cuando el cemento se mezcla con agua, se inicia una serie de reacciones químicas que resultan en la formación de compuestos sólidos que confieren resistencia y durabilidad al concreto.
- **Hidrofílico:** Término que se utiliza para describir sustancias o materiales que tienen afinidad o atracción por el agua. Esto significa que las moléculas de agua tienden a interactuar favorablemente con las moléculas o superficie del material hidrofílico.
- **Hidrofóbico:** Describe la propiedad de un material o superficie que repele el agua o que no permite que el agua se adhiera o penetre en ella fácilmente.
- **Hidrólisis:** Proceso que implica la ruptura de enlaces químicos mediante la adición de agua.
- **Homogéneo:** Describe la uniformidad y la consistencia en la composición de una sustancia, mezcla o material, donde todas las partes son idénticas en su naturaleza y propiedades en toda su extensión.
- **Impermeabilidad:** Propiedad de un material o sustancia de no permitir el paso de líquidos, gases o sólidos a través de él.

- **Índice de plasticidad:** Medida utilizada en geología e ingeniería de suelos para describir la plasticidad de un suelo. El índice de plasticidad proporciona información sobre la capacidad del suelo para deformarse sin romperse.
- **Límite líquido:** Contenido de humedad mínimo en el cual un suelo cambia su estado de semi-líquido a plástico, representa la cantidad de agua necesaria para que un suelo pueda fluir bajo la acción de un esfuerzo mínimo.
- **Límite plástico:** El límite plástico es el contenido de humedad máximo en el cual un suelo puede ser moldeado sin que se agriete. Es decir, es el punto de transición entre un estado semisólido (plástico) y un estado sólido (frágil) para un suelo.
- **Lixiviable:** Capacidad de un material o sustancia de ser disuelto y arrastrado por el agua u otro líquido a través del suelo o de un medio poroso.
- **Lubricidad:** Propiedad que describe la capacidad de un material para reducir la fricción y facilitar el deslizamiento entre superficies en contacto.
- **Meteorización:** Se refiere específicamente al proceso por el cual los materiales que componen un suelo experimentan cambios físicos, químicos y biológicos debido a la acción de factores ambientales y biológicos. Este proceso es fundamental para la formación, evolución y caracterización de los suelos.
- **Molécula Polar:** Aquella que tiene una distribución desigual de carga eléctrica dentro de la molécula. Esto ocurre cuando los átomos que la componen tienen una diferencia significativa en su electronegatividad, es decir, su capacidad para atraer electrones hacia sí mismos en un enlace químico.
- **Número Estructural:** Valor numérico que define la capacidad del sistema para soportar las solicitaciones del tráfico, el número estructural es una función del espesor de las capas, coeficientes de capa, y coeficientes de drenaje de la estructura que conforma el pavimento.
- **Organosalino:** Este término se utiliza para describir suelos que tienen una combinación de materia orgánica y sales minerales, especialmente en áreas áridas o semiáridas donde se acumulan sales debido a la evaporación alta y la escasa precipitación.
- **Peso unitario – humedad de los suelos (Proctor):** Ensayo que determina la relación entre la humedad (contenido óptimo de agua) y la densidad (máxima) de la mezcla del suelo cuando se compacta.
- **Porosidad:** Propiedad fundamental de los suelos y otros materiales que describe la cantidad de espacios vacíos que existen dentro de ellos.

- **Pumita:** Roca ígnea vítrea que se forma durante erupciones volcánicas. Se caracteriza por su textura porosa y ligera, debido a la presencia de burbujas de gas atrapadas en el magma mientras se enfría rápidamente.
- **Resistencia:** Capacidad de un material para resistir fuerzas externas o tensiones que intentan deformarlo, romperlo o cambiar su forma.
- **Saturación (suelos):** Estado en el cual todos los poros del suelo están llenos de agua. En este punto, la capacidad de retención de agua del suelo está al máximo.
- **Silicato de calcio:** Es un componente clave en la fabricación de cemento portland. Durante el proceso de fabricación del cemento, la mezcla de piedra caliza y arcilla se calcina para producir clinker de cemento.
- **Sintetizar:** Se refiere al proceso de combinar elementos o componentes para crear algo nuevo o compuesto.
- **Soluble:** Capacidad de una sustancia para disolverse en un líquido, generalmente agua. Cuando una sustancia es soluble en agua, se mezcla completamente con ella, formando una solución homogénea.
- **Subrasante:** Es la superficie terminada de capa de suelo natural, donde se colocan las capas subsiguientes de la estructura del pavimento.
- **Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS):** Sistema utilizado en ingeniería civil y geotécnica para clasificar suelos con base en sus propiedades físicas y su comportamiento.
- **Suelo pulverizado:** Técnica versátil y eficiente para mejorar las características (estabilización) del suelo natural, haciendo que sea adecuado para diversas aplicaciones de ingeniería y construcción.
- **Sulfato de calcio:** Sulfato de calcio se encuentra en la naturaleza en forma de minerales como el yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y la anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ). Es el mineral más común y se encuentra en depósitos sedimentarios, mientras que la anhidrita es menos común y se forma en ambientes más secos.
- **Susceptibilidad:** Se refiere a la predisposición o sensibilidad que tiene algo o alguien hacia ciertas influencias, condiciones o estímulos. Este término se utiliza en varios contextos, incluyendo ciencias
- **Terrasil:** Agente impermeabilizante de suelos, que aporta ventajas adicionales a la estabilización de suelos.
- **Viscoso:** La viscosidad es una propiedad física que describe la resistencia de un fluido a fluir. Cuanto mayor es la viscosidad, más difícil es para el fluido fluir.

## RESUMEN

La presente disertación tiene como objetivo el análisis y comparación de los resultados del comportamiento de la pumita, donde se busca estabilizar y mejorar las propiedades físicas calificándolo como material que será utilizado como capa de subrasante, al que se realizarán ensayos de laboratorio para conocer sus propiedades naturales como son: relación peso unitario – humedad de los suelos y resistencia a la compresión sin confinamiento. Estos ensayos de caracterización se llevarán a cabo en un laboratorio donde serán realizados en condiciones ideales o controladas, es decir que los factores naturales que pueden alterar los resultados de los ensayos como el viento, sol o lluvia no afectarán el desempeño y comportamiento de los ensayos. Se evaluarán los resultados del material en estado natural, para ver si cumplen con los requisitos mínimos que necesita un material para ser calificado como una subrasante. Posteriormente a la pumita se le incorporarán agentes cementantes e impermeabilizantes de acuerdo a la dosificación recomendada por el fabricante, lo que provocará que cambie su comportamiento mecánico; se analizarán los resultados de la subrasante en cuestión con la incorporación de los agentes externos que son: cemento y Terrasil. Para posteriormente se compara con los resultados originales del material, y así poder determinar cuáles son los cambios de las propiedades físicas y mecánicas del mismo, y concluir el incremento de su densidad y el valor relativo de soporte.

**Capítulo I:** Revisión de la literatura cubriendo conceptos básicos sobre la estabilización de suelos, y tipos de estabilización, estructura del pavimento. **Capítulo II:** Análisis de las propiedades de los materiales, origen y composición de la pumita, caracterización: ensayo de Análisis Granulométrico, ensayo de Relación del peso unitario – Humedad de los suelos y ensayo de Resistencia a la Compresión sin confinamiento de muestras de suelo-cemento. Terrasil como aditivo reductor de agua, su composición y dosificación a utilizar según recomendación del fabricante (1:200 + 4, 5, 6, 7 y 8% de cemento), finalmente composición y origen del cemento. **Capítulo III:** Estabilización de suelos, propiedades de las mezclas tratadas con cemento, mejoras en las propiedades, cambio del comportamiento del suelo estabilizado. **Capítulo IV:** Análisis de los resultados obtenidos de los ensayos realizados con la pumita en estado natural (sin estabilizar), los resultados de los ensayos de Relación peso unitario – humedad de los suelos, se obtienen valores similares en dichos ensayos, y de igual manera en el ensayo de Resistencia a la Compresión sin confinamiento de muestras de suelo-cemento, los resultados obtenidos serán calificados y comparados con los requisitos del MOP. Posteriormente se ensaya el material con los agentes externos, siguiendo la dosificación

del fabricante y se obtienen los resultados de los ensayos realizados. **Capítulo V:** Los resultados obtenidos en cuanto a la cantidad necesaria de agua para alcanzar la densidad máxima se reduce y la densidad máxima aumenta gracias a la adición del cemento y el Terrasil proporcionando una mayor resistencia a la compresión simple.

## ABSTRACT

The present dissertation aims to analyze and compare the performance of pumice, with the goal of stabilizing and improving its physical properties for use as a subbase layer. Laboratory tests will be conducted to determine its natural properties, including the unit weight-moisture relationship and unconfined compressive strength. These characterization tests will be performed under controlled laboratory conditions to eliminate natural factors such as wind, sunlight, or rain that could alter the test results and performance. The material's performance in its natural state will be evaluated to determine if it meets the minimum requirements for qualification as a subbase material.

Subsequently, cementitious and waterproofing agents will be added to the pumice according to the manufacturer's recommended dosage. This addition will alter its mechanical behavior. The results of the subbase material with these added agents—cement and Terrasil—will be analyzed and compared with the original material results to assess the changes in its physical and mechanical properties, particularly focusing on density increase and relative support value. **Chapter I:** Literature Review covering basic concepts of soil stabilization, types of stabilization, and pavement structure. **Chapter II:** Analysis of material properties, origin and composition of pumice, characterization including Grain Size Analysis, Unit Weight-Moisture Relationship test, and Unconfined Compressive Strength test of soil-cement samples. Terrasil as a water-reducing additive, its composition, and recommended dosage (1:200 + 4, 5, 6, 7 y 8% of cement), and finally the composition and origin of cement. **Chapter III:** Soil stabilization, properties of cement-treated mixes, improvements in properties, and change in behavior of stabilized soil. **Chapter IV:** Analysis of results obtained from tests conducted on natural state pumice (without stabilization), Unit Weight-Moisture Relationship test results showing similar values in these tests, and likewise in the Unconfined Compressive Strength test of soil-cement samples. These results will be assessed and compared against Ministry of Public Works (MOP) requirements. Subsequently, the material will be tested with external agents following the manufacturer's dosage, and the results of these tests will be obtained. **Chapter V:** Results show reduced water requirement to achieve maximum density and increased maximum density due to the addition of cement and Terrasil, resulting in higher compressive strength.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 GENERALIDADES

El presente estudio tiene como objetivo analizar el comportamiento de una subrasante natural y conocer el cambio de las propiedades mecánicas de la misma, una vez que sea estabilizada con Terrasil y cemento. Para obtener estos resultados, se desarrolla el presente estudio en el laboratorio de suelos de la empresa INGGEOPAV

El ensayo de relación peso unitario – humedad de los suelos, y el ensayo de resistencia a la compresión sin confinamiento de muestras de suelo-cemento (Ilustración 1), son dos ensayos fundamentales para determinar las propiedades mecánicas de los suelos, tales como la densidad máxima, humedad óptima y la resistencia relativa de un suelo a la compresión, para evaluar su capacidad de soportar cargas y deformaciones, lo que ayuda en la selección de materiales adecuados para el diseño de pavimentos y estructuras.

*Ilustración 1*  
*Ensayo de Compresión Simple*



*Fuente: (Burbano Iván, 2024)*

La estabilización de suelos es una técnica que implica la utilización de un agente externo, puede ser de origen natural o químico, se utiliza cuando los materiales que se disponen no son aptos para su determinada función, es decir que sus propiedades mecánicas son muy pobres (Ilustración 2). Es por ese motivo

que se utilizan agentes externos para mejorar las características mecánicas y lograr reducir costos por cambio de material.

*Ilustración 2  
Estabilización Química Utilizando Cemento*



*Fuente: (Yepes Piqueras, 2014)*

Por lo tanto, con la utilización de estos agentes externos como estabilizantes y con los ensayos previamente mencionados se busca determinar el comportamiento de dicho material, posterior a su estabilización para determinar las nuevas características mecánicas de este material teniendo en cuenta que solo se realizarán ensayos de laboratorio.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar el cambio de las propiedades físico-mecánicas de la estabilización de un suelo-cemento-reactivo, al cual en estado natural se analizará las propiedades y posteriormente el cambio de las mismas una vez incorporados los agentes externos, tomando en cuenta que los cambios que se esperan son en densidad máxima seca, contenido óptimo de humedad y resistencia a la compresión sin confinamiento de muestras de suelo-cemento, incorporando estos agentes se reportarán los cambios y analizarán las mejoras.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Mediante el método modificado de compactación (2700 kN-m/m<sup>3</sup>) de laboratorio para suelos para simular las condiciones de compactación que la subrasante necesita en campo se determinará la densidad máxima y humedad óptima del material en estado natural, así mismo el valor de la Resistencia a la Compresión sin confinamiento de muestras de suelo-cemento del mismo.

- Incorporar TerraSil (1:200) + 4, 5, 6, 7 y 8 % de cemento hidráulico, posteriormente evaluar y analizar las propiedades mecánicas del material ya estabilizado.
- Determinar el porcentaje en el cual varían las propiedades de los materiales en estado natural y estabilizado.
- Determinar la resistencia a la compresión simple de las muestras de suelo cemento.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

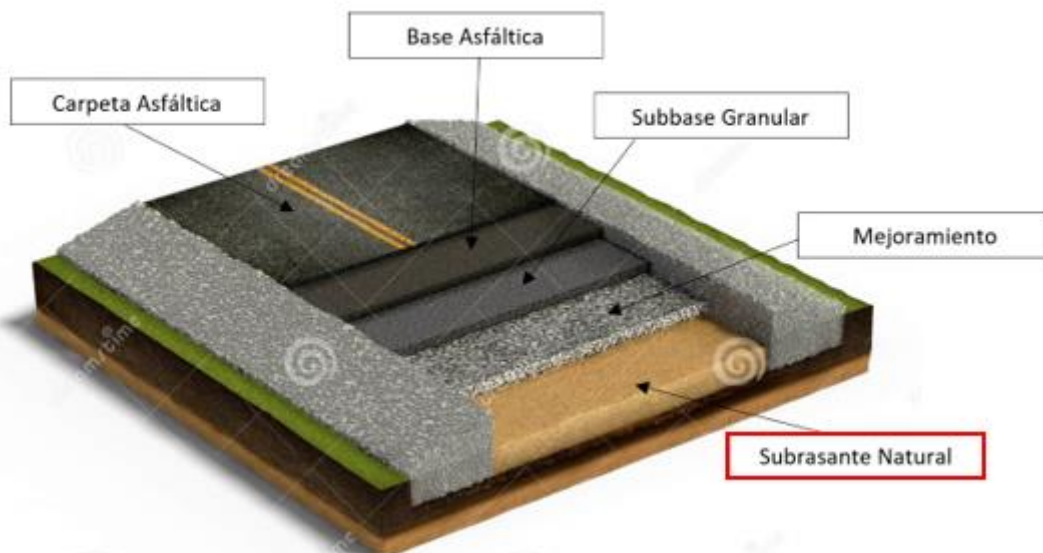
En el ámbito de la ingeniería civil, uno de los objetivos es utilizar materiales de alta calidad en la construcción de proyectos. No obstante, debido a consideraciones prácticas como los costos, los plazos de ejecución y la disponibilidad de materiales de mayor nivel, a veces no es posible alcanzar este estándar ideal. Por esta razón, se emplean técnicas de optimización para mejorar la calidad de los materiales disponibles, asegurando que, a través de estos procesos, se obtengan resultados que cumplan con los requisitos técnicos y normativos establecidos (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Un pavimento se compone de múltiples capas, cada una con distintos espesores y propiedades, que se colocan sucesivamente sobre una base denominada subrasante. En carreteras de alta categoría, se pueden agregar capas adicionales para maximizar el rendimiento de cada componente de la estructura. La subrasante puede ser simplemente el suelo natural, suelo que ha sido estabilizado mediante técnicas mecánicas o químicas, o incluso un suelo mejorado con el uso de geosintéticos (Sndoval Vallejo & Rivera Mena, 2019).

La construcción de carreteras representa una de las principales áreas de especialización dentro del diseño e ingeniería civil a nivel global. En este contexto, la subrasante desempeña un papel fundamental. Esta capa, que se ubica en la base de cualquier tipo de pavimento para carretera (Ilustración 3), ya sea rígido o flexible, actúa

como el soporte estructural primordial. Su función principal es transferir las cargas aplicadas sobre el pavimento hacia el suelo subyacente de manera eficiente. La resistencia y estabilidad de la subrasante son cruciales para el proceso de diseño y construcción del pavimento: a mayor fortaleza de la subrasante, menor será el grosor requerido para las capas superiores, que incluyen el mejoramiento del terreno, la subbase granular, la base asfáltica y la capa de rodadura asfáltica. Esto no solo contribuye a una mayor durabilidad del pavimento, sino que también permite reducir los costos y la frecuencia de mantenimiento a lo largo de la vida útil de la carretera (Saheed & Olatunji Sunday, 2014).

*Ilustración 3*  
*Estructura del Pavimento*



*Fuente: (Egorov, 2024)*

En este contexto, resulta beneficioso emplear materiales que puedan ser optimizados mediante distintos procesos. Las características de la subrasante son determinantes para definir los parámetros y requisitos de las capas superiores del pavimento, ya que tienen un impacto directo en el grosor y el diseño de estas capas. Dado que la capacidad de la estructura del pavimento para soportar cargas depende en gran medida de la resistencia de la subrasante (Ilustración 4), se hace necesario estabilizar o mejorar los suelos. Esto es esencial tanto para la construcción de pavimentos como para otras aplicaciones en ingeniería civil, garantizando así una base

sólida que permita un rendimiento eficiente y duradero de la infraestructura (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Cuando las propiedades del suelo cumplen con los requisitos mínimos establecidos para su uso como subrasante, no se presentan problemas significativos. Sin embargo, en casos donde el suelo no alcanza los criterios mínimos definidos por el MOP (Manual de Obras Públicas), se pueden emplear técnicas de mejora mecánica y/o química. Estos métodos están diseñados para incrementar la resistencia mecánica y la durabilidad del suelo, de manera que cumpla con los estándares exigidos. Cuando las capas estabilizadas presentan un rendimiento adecuado, se obtienen importantes beneficios tanto técnicos como económicos, tales como la reducción del tiempo de construcción y la disminución de las distancias de transporte de los materiales.

*Ilustración 4  
Preparación de capa Subrasante*



*Fuente: (Burbano Iván, 2024)*

Actualmente, existen numerosos métodos y procesos destinados a estabilizar suelos, con el objetivo de mejorar y preservar sus propiedades clave, tales como resistencia, durabilidad, plasticidad, permeabilidad y densidad. Los tratamientos utilizados para incrementar la resistencia de un suelo pueden variar significativamente, tanto dentro de un mismo tipo de tratamiento como entre diferentes tipos. Esto se debe a la amplia diversidad de suelos y a la forma en que cada tipo de suelo responde de manera particular a los distintos métodos de estabilización. Cada tratamiento debe ser cuidadosamente seleccionado y ajustado en función de las características específicas del suelo para lograr los mejores resultados en términos de rendimiento y estabilidad (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

### **1.3.1 MECANISMOS DE ESTABILIZACIONES**

Existen varios medios para lograr mejorar las condiciones de un suelo (Paul Garnica Anguas, 2002):

#### **1.3.1.1 MECÁNICOS (COMPACTACIÓN):**

- Amasado
- Impacto de carga
- Presión estática
- Vibración

#### **1.3.1.2 QUÍMICOS (ESTABILIZACIONES):**

- Cal
- Cemento Portland
- Asfalto, emulsión
- Otros

#### **1.3.1.3 FÍSICOS:**

- Mezcla de suelos
- Confinamiento
- Consolidación

La diferencia entre modificación y estabilización de suelos se basa en la naturaleza y el propósito del tratamiento aplicado. La modificación del suelo generalmente implica la adición de pequeñas cantidades de aditivos para mejorar ciertas propiedades del suelo sin alterar significativamente su estructura básica. Esto puede incluir la reducción de cambios volumétricos, la mejora de la trabajabilidad y, en el caso de suelos arcillosos, la disminución de su plasticidad. Por otro lado, la estabilización requiere la incorporación de cantidades más significativas de aditivos o agentes cementantes. Este proceso busca inducir reacciones químicas que transformen de manera más profunda el comportamiento del suelo, aumentando su resistencia y durabilidad. La estabilización tiene como objetivo alterar de manera significativa las propiedades del suelo, mejorando su capacidad para soportar cargas y prolongando su vida útil en aplicaciones de ingeniería civil (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

La estabilización de suelos se presenta como una solución efectiva para tratar suelos problemáticos, transformándolos en una masa más rígida con partículas unidas

por enlaces fuertes, capaces de soportar mayores cargas. En regiones andinas, como aquellas con suelos de pumita, se enfrentan desafíos específicos debido a problemas de compactación causados por la humedad, el remoldeo y los cambios en las propiedades del suelo. Los suelos volcánicos, con su bajo peso unitario y altas relaciones de vacíos, presentan dificultades adicionales en los procedimientos de compactación.

Es importante destacar que la estabilización no garantiza una mejora uniforme en todas las propiedades del suelo. Por esta razón, es esencial identificar y comprender las propiedades específicas que se desean mejorar para aplicar el tratamiento de manera efectiva y obtener los mejores resultados.

## **1.4 METODOLOGÍA**

### **1.4.1 ETAPA I**

#### **1.4.1.1. PROBLEMÁTICA.**

El objetivo es estabilizar la pumita para mejorar sus propiedades mecánicas y hacer que sea adecuada para su uso como material de subrasante. Para lograr esto, se empleará cemento hidráulico como agente cementante, que ayudará a incrementar la cohesión del material, así como Terrasil como agente impermeabilizante. El Terrasil contribuirá a una mejor cohesión y a una mayor densidad al llenar los espacios vacíos dentro de la pumita. Esta combinación de aditivos no solo mejorará la densidad del material, sino también su resistencia a la compresión sin confinamiento, asegurando un comportamiento más estable y confiable como subrasante en aplicaciones de ingeniería civil.

### **1.4.2 ETAPA II**

#### **1.4.2.1 MUESTREO.**

La pumita, un material volcánico proveniente erupciones volcánicas (lugar de muestreo, Ilustración 5), el cual será caracterizada en el Laboratorio de la empresa INGGEOPAV. Este laboratorio está ubicado en la calle Leónidas Proaño N5-106 y Panamericana Norte en Carcelén Industrial. La caracterización se llevará a cabo para evaluar las propiedades del material y determinar su adecuación para los fines previstos en los proyectos de ingeniería civil.

*Ilustración 5*  
*Toma de muestras de Stock de material*



*Fuente: (Burbano Iván, 2024)*

Para poder determinar las características necesarias y evaluar el desempeño se realizan estos ensayos:

- Granulometría de los suelos
- Límites de Atterberg
- Clasificación del suelo según AASHTO
- Clasificación del suelo según SUCS
- Relación peso unitario – humedad de los suelos

El cemento que se utilizará en el proceso de estabilización es un cemento hidráulico de alta resistencia Tipo HE, proveniente de SELVALEGRE. Este tipo de cemento está diseñado para aplicaciones que requieren alta resistencia inicial y se dosificará en varios porcentajes (4%, 5%, 6%, 7% y 8%).

El TerraSil, suministrado por la empresa BREM Cía. Ltda., es un producto soluble en agua que actúa como reductor de agua e impermeabilizante. Se aplicará utilizando la dosificación recomendada por el fabricante, que es de 1:200. Esta proporción de TerraSil se mantendrá constante en todas las mezclas, mientras que únicamente variará el porcentaje de cemento en las diferentes dosificaciones.

#### **1.4.2.2 ENSAYOS DE LABORATORIO.**

Para esta investigación, se llevará a cabo una caracterización exhaustiva del material (pumita) para determinar las propiedades necesarias que permitan evaluar su

desempeño tanto en su estado natural como después de ser estabilizado con los agentes externos (TerraSil y cemento HE).

Estas propiedades se evaluarán antes y después de la aplicación de los tratamientos con TerraSil y cemento HE para comparar y analizar el impacto de estos aditivos en la mejora del material:

a) Suelo natural:

- Granulometría de los suelos (Ilustración 6)
- Clasificación del suelo según AASHTO
- Relación peso unitario – humedad de los suelos (Proctor Modificado) (Ilustración 6)

*Ilustración 6*

*Ensayo de Análisis Granulométrico de los Áridos, Ensayo de Relación de Peso Unitario-Humedad de los Suelos*



*Fuente: (Burbano Iván, 2024)*

b) Suelo estabilizado con cemento y TerraSil:

La dosificación del TerraSil se mantendrá constante en todas las mezclas, siguiendo la recomendación del fabricante de diluir el producto en una proporción de 1:200 con agua. En cuanto al cemento Tipo HE de Selvalegre, se dosificará en diferentes porcentajes, concretamente al 4%, 5%, 6%, 7% y 8%. Esta variabilidad en la cantidad de cemento permitirá evaluar el efecto de diferentes niveles de aditivo sobre las propiedades del material pumita estabilizado.

- Relación peso unitario – humedad de los suelos (Proctor Modificado) (Ilustración 7)
- Curado de probetas de suelo cemento.

- Resistencia a la compresión de probetas de suelo-cemento (ASTM D 1633) a los 7 y 28 días (Ilustración 7)

Ilustración 7

Ensayo de Relación de Peso Unitario-Humedad de los Suelos, Ensayo de Compresión Simple



Fuente: (Burbano Iván, 2024)

#### 1.4.2.3 CUADRO DE ENSAYOS DE LABORATORIO.

En la Tabla 1 se presentan los ensayos a realizar en esta investigación:

Tabla 1

Resumen de Ensayos para la Investigación

Tipo de ensayo	Norma	Ensayo		Total
		Suelo Natural	Suelo cemento + Terrasil	
Propiedades Físicas				
Análisis granulométrico	ASTM D422	4	-	4
Clasificación de suelos SUCS	ASTM D 2487-11	4	-	4
Clasificación de suelos AASHTO	ASTM D 3282-15	4	-	4
Propiedades Mecánicas				
Proctor modificado	ASTM D 1557	4	20	24
Resistencia a la compresión	ASTM D 1633	4	20	24
<b>Total</b>		<b>20</b>	<b>40</b>	<b>60</b>

Fuente: (Burbano Iván, 2024)

### 1.4.3 ETAPA III

#### 1.4.3.1 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS.

Se procesan y analizan los resultados obtenidos en los ensayos:

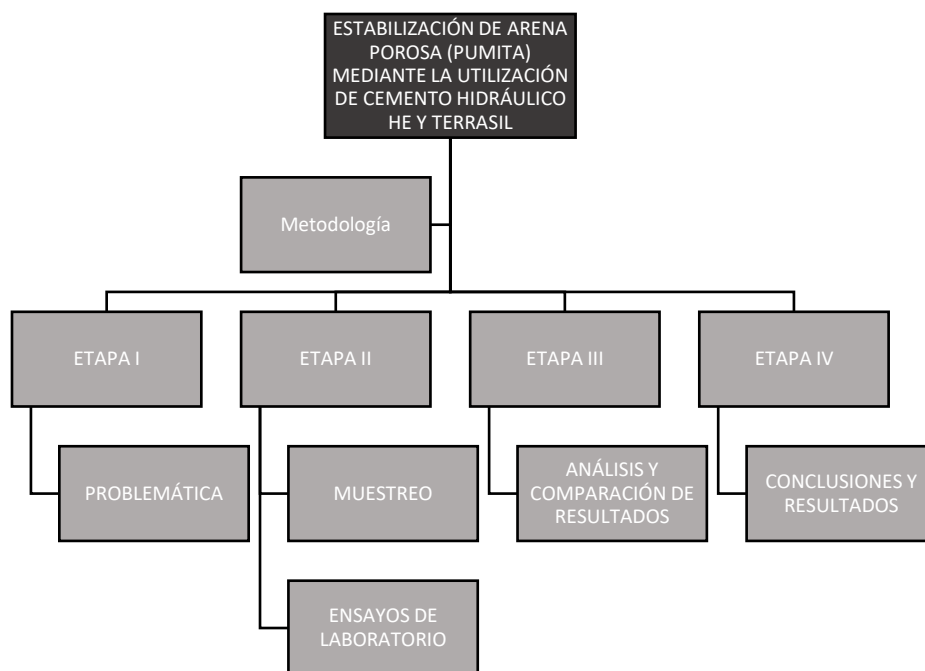
- Suelo Natural
- Suelo estabilizado con TerraSil + cemento Tipo HE (4, 5, 6, 7 y 8%)

### 1.4.4 ETAPA IV

#### 1.4.4.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE LOS RESULTADOS.

Comparación de los resultados obtenidos en la investigación, incluyendo conclusiones y recomendaciones sobre los datos obtenidos de los ensayos realizados.

Ilustración 8  
Organigrama de la Metodología de la Investigación



Fuente: (Burbano Iván, 2024)

## CAPÍTULO II (ANÁLISIS DE LOS MATERIALES)

### 2.1 PUMITA

#### 2.1.1 ORIGEN Y COMPOSICIÓN

La pumita es un vidrio natural poroso formado a partir de la actividad volcánica, caracterizado por sus concentraciones relativamente altas de sílice, aluminio y hierro. Entre sus propiedades más destacadas se encuentran su baja densidad, excelente capacidad de aislamiento térmico y acústico, utilidad en sistemas de acondicionamiento de aire, y su habilidad para retener yeso de manera efectiva (NuhoLlu, y otros, 2014).

El término "piedra pumita" proviene del latín "pumex," que significa espuma. La piedra pumita es un agregado ligero con una estructura esponjosa natural, creada durante el rápido enfriamiento y solidificación de lava fundida. Generalmente tiene una composición riolítica y su estructura porosa se forma al atrapar millones de pequeñas burbujas de aire o cavidades durante el enfriamiento, cuando los gases en la lava fundida quedan atrapados. Estas cavidades son generalmente paralelas, alargadas y, en ocasiones, interconectadas (Rashad, 2019). El color de la piedra pumita puede variar entre blanco y gris, o incluso presentar tonalidades desde blanco hasta dorado, marrón o negro, dependiendo de su composición química (Ilustración 9).

*Ilustración 9*  
*Tipos de Piedra Pumita*



*Fuente: (Rashad, 2019)*

### 2.1.1.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA PUMITA.

El mineral de piedra pumita consta principalmente de los siguientes compuestos químicos:

Tabla 2  
Composición Química de la Pumita

Composición química	Notación	Porcentaje
Óxido de silicio	$SiO_2$	60 – 75 %
Óxido de aluminio	$Al_2O_3$	13 – 17 %
Alcalinos	$K_2O + Na_2O$	7 – 8 %
Óxido de hierro	$Fe_2O_3$	1 – 3 %
Óxido de calcio	$CaO$	1 – 2 %
Óxido de magnesio	$MgO$	1 %
Dióxido de titanio	$TiO_2$	0,5 %

Fuente: (Rashad, 2019)

La pumita presenta una gravedad específica que varía dependiendo del tipo de material: entre 2.04 y 2.85 para el polvo, entre 1.18 y 2.52 para el agregado fino, y entre 0.82 y 2.17 para el agregado grueso. Su dureza en la escala de Mohs se encuentra en un rango de 5.5 a 6. El valor de pH, de acuerdo con la norma ISO 10390, es aproximadamente 7, indicando que es un material neutro. La porosidad de las partículas de pumita puede alcanzar hasta el 85%, lo que significa que solo el 15% del volumen total está compuesto por material sólido, mientras que el 85% restante es aire (Grasser & Minke, 1990).

En 2022, la producción mundial de piedra pumita y materiales relacionados se estimó en 15 millones de toneladas, una cifra que se mantuvo prácticamente igual a la de 2021. Turquía, seguida de cerca por Uganda, lideró la producción global de piedra pumita y pumicita. La piedra pumita es ampliamente utilizada en la construcción debido a sus propiedades cementosas, ligereza y resistencia. Tanto la piedra pumita como la pumicita son altamente efectivas en diversas aplicaciones constructivas, aprovechando sus características únicas para mejorar la calidad y el rendimiento de los materiales de construcción (U.S. Geological Survey, 2023).

Tabla 3  
Producción Mundial de Pumita

País que explota	Producción minera	
	2021	2022
Estados Unidos	504	510
Algeria	900	900
Camerún	110	110
Chile	670	670
Ecuador	800	800
Etiopía	510	510
Francia	280	300
Grecia	960	960
Guadalupe	200	200
Guatemala	570	570
Islandia	100	100
Jordan	900	900
Arabia Saudita	550	550
España	240	240
Siria	200	200
Tanzania	160	160
Turquía	5400	5400
Uganda	1130	1100
Otros	710	820
<b>Total</b>	<b>14894</b>	<b>15000</b>

Fuente: (U.S. Geological Survey, 2023);

La piedra pumita se encuentra en diversos países alrededor del mundo, incluyendo Grecia, Ecuador, Chile, Etiopía, Uganda, Guatemala, Arabia Saudita, EE.UU., Camerún, Argelia, Tanzania, Francia, Siria, España, Guadalupe, entre otros (tabla 3). Este material es reconocido por sus propiedades excepcionales, tales como baja densidad, excelente resistencia al fuego, y eficaz aislamiento térmico y acústico. Además, presenta una resistencia a la compresión razonable y una estructura porosa con baja permeabilidad y no combustibilidad, lo que la convierte en una opción ideal para su uso como agregado ligero (Rashad, 2019).

La pumita molida también posee actividad puzolánica, lo que la hace adecuada para reemplazar al cemento en diversas aplicaciones. Los romanos ya empleaban este material hace más de 2000 años, refiriéndose a él como *pulvis puteolanus*. Este término, que se usa históricamente para describir material volcánico o piedra pumita, sigue siendo relevante hoy en día (Rashad, 2019).

*Ilustración 10*  
*Yacimientos de Pumita*



*Fuente: (Burbano Iván, 2024)*

La piedra pumita es una roca volcánica vitrificada caracterizada por su estructura altamente porosa y su color generalmente muy claro. Su densidad aparente, que se refiere a la densidad del material en estado suelto, varía entre 0.3 y 0.8 g/cm<sup>3</sup>, lo que la convierte en un material extremadamente ligero. Su textura se asemeja a una mezcla de grava y arena, con gránulos individuales que son livianos y porosos. Debido a su baja densidad, estos gránulos pueden flotar en el agua o hundirse lentamente.

Las partículas de piedra pumita pueden presentar formas redondas o angulares, dependiendo de su yacimiento (Ilustración 10) y su diámetro puede llegar hasta 65 mm. Esta estructura porosa y su capacidad para flotar o hundirse lentamente en el agua son características distintivas que hacen que la pumita sea especialmente útil en aplicaciones que requieren un material ligero y con propiedades de aislamiento (Grasser & Minke, 1990).

## **2.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LA PUMITA**

La pumita ofrece varias características beneficiosas que la hacen un material valioso en la construcción. Sin embargo, también presenta algunas propiedades negativas que deben considerarse:

- Baja Resistencia al Impacto
- Alta Absorción de Agua
- Poca Cohesión.
- Variabilidad en la Calidad

Considerar estas propiedades negativas y gestionar adecuadamente sus efectos es crucial para maximizar los beneficios de la pumita en proyectos de construcción (Grasser & Minke, 1990):

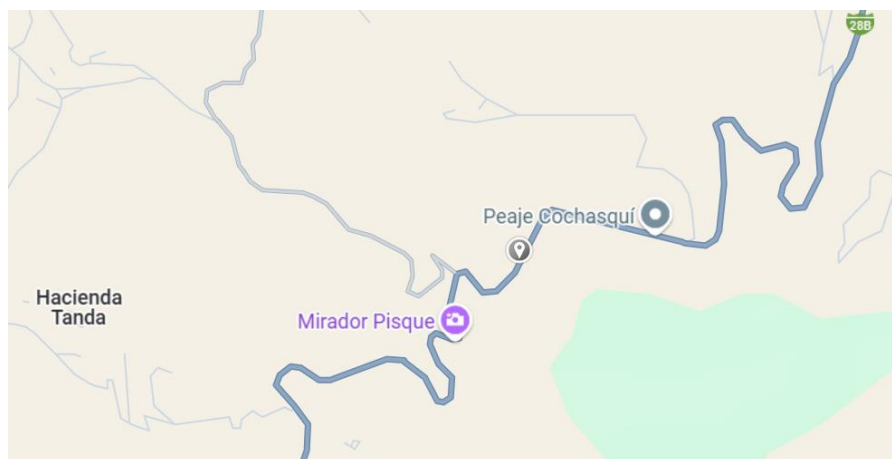
- Muy ligera
- Económica
- Refractaria
- Resistente a plagas
- Fácil de trabajar
- Absorbente de sonido
- Aislante térmico

Se ha demostrado que reemplazar entre el 10% y el 30% del cemento con polvo de piedra pumita en la mezcla de concretos autocompactantes puede reducir el potencial de calentamiento global en proporciones significativas, alcanzando reducciones del 18.6% y 27.8%, respectivamente. En el ámbito de la construcción, el polvo de piedra pumita se puede integrar en el material aglutinante debido a su capacidad puzolánica, que le permite reaccionar con la cal en presencia de agua para formar compuestos cementosos adicionales. Esta integración no solo mejora las propiedades del concreto, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental. Numerosos estudios disponibles en la literatura técnica exploran y confirman estos beneficios, proporcionando evidencia sobre la eficacia del polvo de pumita en la reducción del impacto ambiental de los concretos (Rashad, 2019)

## 2.2 MUESTREO DE LOS AGREGADOS

La obtención de pumita, muestreo en el yacimiento del km 29 vía Ibarra (Panamericana Norte) (Ilustración 11).

Ilustración 11  
Ubicación del yacimiento



Fuente: (Google, 2024)

El material será sometido a una serie de ensayos de laboratorio para caracterizar sus propiedades físico-mecánicas y evaluar su desempeño como material para subrasante en condiciones óptimas realizados en el laboratorio de INGGEOPAV.

Para determinar las características necesarias y evaluar el desempeño del material, se realizarán los siguientes ensayos:

- Ensayo de Granulometría Para determinar la distribución de tamaños de partículas y evaluar la adecuación del material para las especificaciones de subrasante.
- Ensayo de Compactación: Para determinar la capacidad del material para ser compactado y alcanzar la densidad óptima bajo condiciones específicas.
- Resistencia a la Compresión: Para evaluar la capacidad del material para soportar cargas aplicadas, esencial para su desempeño como subrasante.
- Prueba de Plasticidad e Índice de Plasticidad: Para evaluar la trabajabilidad y el comportamiento del material bajo diferentes condiciones de humedad.

Estos ensayos permitirán obtener una comprensión detallada de las propiedades del material y asegurar que cumpla con los requisitos necesarios para su aplicación como subrasante en proyectos de construcción.

## **2.3 DESCRIPCIÓN Y EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS**

Es crucial conocer las propiedades físicas del suelo en su estado natural antes de añadir el agente cementante y el reductor de agua.

Para lograr esto, se utilizarán las instalaciones del laboratorio de suelos de INGGEOPAV, con la debida validación de resultados obtenidos mediante el consentimiento informado (ANEXO 7.8). En este laboratorio se realizarán los ensayos necesarios siguiendo las normas ASTM vigentes.

Estos ensayos permitirán determinar las características del suelo, asegurando que se ajuste a las especificaciones requeridas. Además, se verificará que los materiales cumplan con las normativas establecidas por el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOP), según la normativa MOP-001 – F 2002, que regula la construcción de puentes y caminos. Este procedimiento garantizará que el material tratado sea adecuado para su uso en proyectos de construcción, asegurando la calidad y conformidad.

### **2.3.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS (ASTM C136 – 19)**

El análisis granulométrico de los agregados es un procedimiento estandarizado que se utiliza para determinar la distribución de tamaños de partículas en una muestra de agregado destinada a un uso específico (NTE INEN 696, 2011). Este ensayo es fundamental para evaluar la conformidad y la calidad del material, así como para verificar que cumple con los requisitos técnicos establecidos.

Los resultados del análisis granulométrico proporcionan información crucial sobre la distribución de partículas, lo cual es esencial para asegurar que el agregado tenga las características adecuadas para su aplicación. Además, estos resultados permiten:

- Evaluar la Conformidad del Material: Asegurando que el tamaño y la distribución de las partículas cumplan con las especificaciones del proyecto.

- Controlar la Calidad del Agregado: Facilitando el control de calidad del material para asegurar su idoneidad en la mezcla de concreto o asfalto.

Por lo tanto, el análisis granulométrico (Ilustración 12) no solo garantiza que el material cumpla con los requisitos técnicos, sino que también proporciona datos valiosos para optimizar el desempeño del concreto o del asfalto en aplicaciones prácticas (ASTM C136-19, 2019).

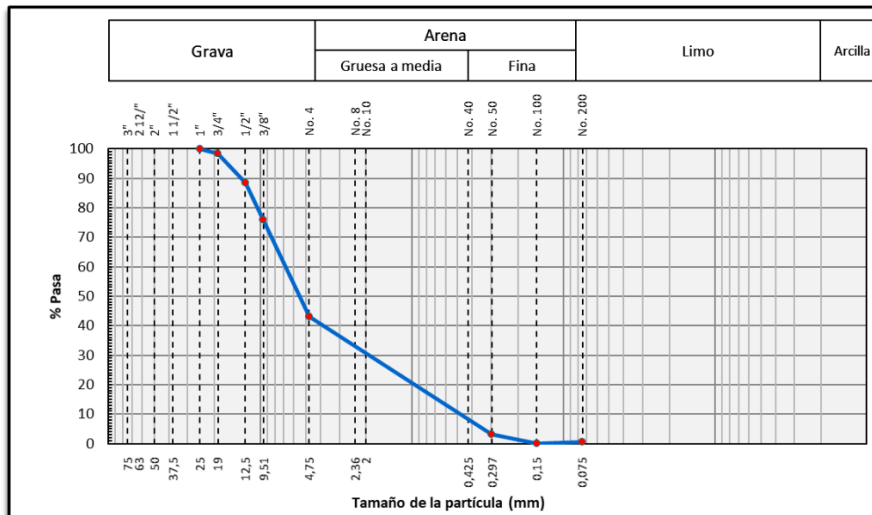
*Ilustración 12*  
*Ensayo de Análisis Granulométrico de los Áridos*



*Fuente: (Burbano Iván, 2024)*

En cualquier masa de suelo, los tamaños de los granos pueden variar significativamente. Para clasificar un suelo de manera adecuada, es esencial conocer su distribución granulométrica con sus respectivos porcentajes representada por una curva granulométrica (Ilustración 13). Para suelos de grano grueso, esta distribución se determina comúnmente mediante un análisis granulométrico con mallas. En cambio, para suelos de grano fino, se utiliza el análisis con hidrómetro para obtener la distribución granulométrica. El análisis con mallas se realiza tomando una muestra medida de suelo seco y bien pulverizado, la cual se pasa a través de un conjunto de mallas con aberturas de tamaño progresivamente menor, dispuesto sobre una charola en la parte inferior. Se mide la cantidad de suelo retenido en cada malla y se calcula el porcentaje acumulado de suelo que pasa a través de cada una. Este porcentaje se conoce generalmente como porcentaje de finos (Das, Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, 2012).

*Ilustración 13*  
*Curva de Distribución de Tamaño de Partícula*



Fuente: (Burbano Iván, 2024)

Este análisis es fundamental en la ingeniería civil y se realiza de acuerdo con estándares específicos, como ASTM (American Society for Testing and Materials) o normativas locales (Norma Técnica Ecuatoriana, NTE INEN 696:2011), para garantizar la precisión y la consistencia en los resultados.

### 2.3.4 CLASIFICACIÓN DEL SUELOS

Los sistemas de clasificación de suelos organizan los suelos en grupos y subgrupos basados en propiedades ingenieriles comunes, como la distribución granulométrica, el límite líquido y el límite plástico. Estos sistemas permiten categorizar los suelos de manera que se pueda prever su comportamiento en aplicaciones de ingeniería civil. Los dos principales sistemas de clasificación actualmente en uso son:

- Sistema de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO):** Este sistema se emplea principalmente para clasificar los suelos en función de su idoneidad para ser utilizados en las capas de pavimento de carreteras. La clasificación AASHTO se basa en características como la granulometría y la plasticidad del suelo, y es particularmente útil para determinar la capacidad de soporte de carga y la durabilidad de las capas de pavimento.
- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Unified Soil Classification System, USCS):** Este sistema, que también es adoptado por la ASTM (American Society for Testing and Materials), clasifica los suelos en función de sus propiedades físicas, como la textura y el comportamiento frente a pruebas de límites líquidos y plásticos. El USCS es ampliamente utilizado para una variedad

de aplicaciones en ingeniería civil, incluyendo la clasificación de suelos para cimentaciones, excavaciones y otras obras de construcción.

Ambos sistemas proporcionan un marco estandarizado para la clasificación de suelos, lo que facilita la comunicación entre profesionales y asegura la aplicación de criterios uniformes en la ingeniería de suelos y el diseño de infraestructura (Das, Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, 2012).

#### **2.3.4.1 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE LA AASHTO (ASTM 3282 – 24)**

El Sistema de Clasificación de Suelos de la AASHTO fue desarrollado por el Comité de Clasificación de Materiales para Subrasantes y Carreteras Granulares del Highway Research Board en 1945. El sistema actual de clasificación AASHTO, que se muestra en la Tabla 4, divide los suelos en siete grupos principales: A-1 a A-7. Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, en los cuales el 35% o menos de las partículas pasan a través del tamiz número 200. Los suelos que presentan más del 35% de partículas pasando a través del tamiz número 200 se clasifican en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 (Das, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica , 2013).

Esta práctica describe un método para clasificar suelos minerales y organominerales en grupos, basado en la determinación en laboratorio de la distribución del tamaño de partículas, el límite líquido y el índice de plasticidad. Es útil cuando se necesita una clasificación ingenieril precisa, particularmente para la construcción de carreteras. La evaluación de los suelos dentro de cada grupo se lleva a cabo utilizando un índice de grupo, que se calcula mediante una fórmula empírica (ASTM D3282-24, 2024).

Tabla 4  
Sistema de Clasificación de Suelo AASHTO

**SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS AASHTO**

Clasificación	Materiales granulares (35% o menos pasa por el tamiz Nº 200)						Materiales limoso arcilloso (más del 35% pasa el tamiz Nº 200)				
	A-1		A-3	A-2-4				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Grupo:	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Porcentaje que pasa: Nº 10 (2mm) Nº 40 (0,425mm) Nº 200 (0,075mm)	50 máx 30 máx 15 máx	- 50 máx 25 máx	- 51 mín 10 máx	- - 35 máx				- - 36 mín			
Características de la fracción que pasa por el tamiz Nº 40 Límite líquido Índice de plasticidad	-		-	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín 11 mín	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín (2) 11 mín
Constituyentes principales	Fracmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Características como subgrado	Excelente a bueno						Pobre a malo				

(1): No plástico

(2): El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor al LL menos 30

El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL menos 30

Índice de grupo :

$$IG = (F - 35) \cdot [0,2 + 0,005 \cdot (LL - 40)] + 0,01 \cdot (F - 15) \cdot (IP - 10)$$

Siendo :

F : % que pasa el tamiz ASTM nº 200.  
LL : límite líquido.  
IP : índice de plasticidad.

El índice de grupo para los suelos de los subgrupos A - 2 - 6 y A - 2 - 7 se calcula usando sólo :  $IG = 0,01 \cdot (F - 15) \cdot (IP - 10)$

Fuente: (González Boada, 2006)

### 2.3.4.2 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE LA SUCS (ASTM D2487 – 19)

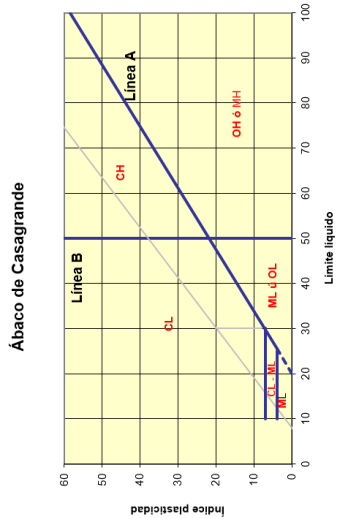
Este sistema se encarga de clasificar los suelos para aplicaciones ingenieriles, basándose en la determinación del tamaño de partículas, el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad (ASTM D2487, 2017).

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Unified Soil Classification System) (Tabla 5) fue propuesto originalmente por A. Casagrande en 1942, y posteriormente revisado y adoptado por el United States Bureau of Reclamation y el US Army Corps of Engineers. Actualmente, este sistema se emplea ampliamente en trabajos geotécnicos. En el sistema unificado, se utilizan símbolos específicos para la identificación de suelos (Das, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica , 2013):

Tabla 5  
Sistema de Clasificación de Suelo SUCS

Símbolo	G	S	M	C	O	Pt	H	L	W	P
Descripción	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Limos, arcillas orgánicos	Turbas y suelos altamente orgánicos	Alta plasticidad	Baja plasticidad	Bien graduado	Mal graduado

**SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS UNIFICADO "U.S.C.S."**

DIVISIONES PRINCIPALES		Símbolos del grupo	NOMBRES TÍPICOS	IDENTIFICACIÓN DE LABORATORIO
<b>SUELOS DE GRANO GRUESO</b> Más de la mitad del material retenido en el tamiz número 200	<b>GRAVAS</b> Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4,76 mm)	<b>Gravas limpias</b> (sin o con pocos finos)	<b>GW</b> Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica. Según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz número 200). Los suelos de grano grueso se clasifican como sigue: <5%->GW, GP, SW, SP. >12%->GM, GC, SM, SC. 5 al 12%->casos limite que requieren usar doble símbolo.
		<b>Gravas con finos</b> (apreciable cantidad de finos)	<b>GP</b> Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	
		<b>Gravas con finos</b> (apreciable cantidad de finos)	<b>GM</b> Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.	
			<b>GC</b> Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.	
	<b>ARENAS</b> Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz número 4 (4,76 mm)	<b>Arenas limpias</b> (pocos o sin finos)	<b>SW</b> Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.	
		<b>Arenas con finos</b> (apreciable cantidad de finos)	<b>SP</b> Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.	
			<b>SM</b> Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	
		<b>SC</b> Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.		
<b>SUELOS DE GRANO FINO</b> Más de la mitad del material pasa por el tamiz número 200	<b>Limos y arcillas:</b> Limite liquido menor de 50	<b>ML</b> Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosa, o limos arcillosos con ligera plasticidad.		
		<b>CL</b> Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.		
		<b>OL</b> Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.		
	<b>Limos y arcillas:</b> Limite liquido mayor de 50	<b>MH</b> Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.		
		<b>CH</b> Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.		
		<b>OH</b> Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.		
		<b>PT</b> Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.		
<b>Suelos muy orgánicos</b>		<b>PT</b>	Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.	

Fuente: (González Boada, 2006)

### **2.3.5 RELACIONES PESO UNITARIO – HUMEDAD DE LOS SUELOS**

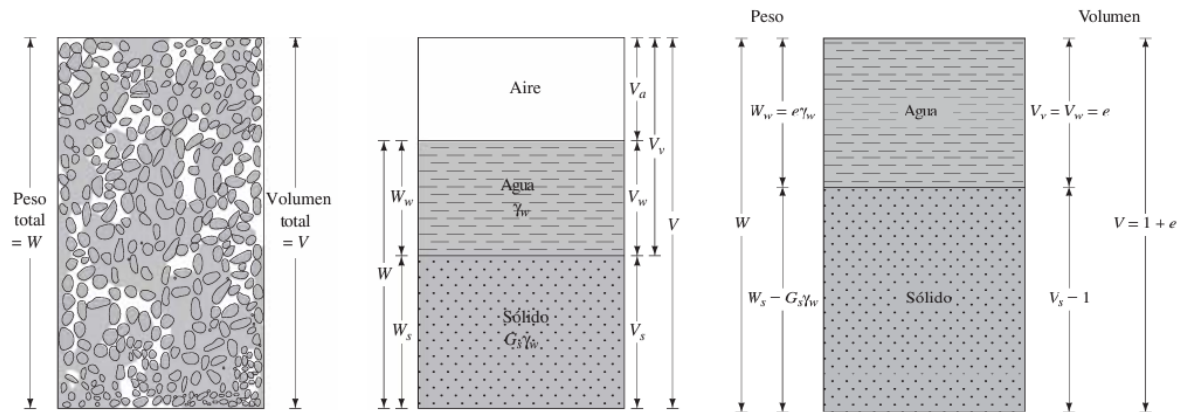
La compactación es un proceso mecánico que reduce los espacios de aire en el suelo para aumentar su densidad. Es uno de los métodos más antiguos empleados para estabilizar suelos y mejorar sus propiedades ingenieriles (Shalal, 2012). Los suelos compactados, como los utilizados en terraplenes para infraestructura de transporte, experimentan oscilaciones cíclicas continuas en las cargas hidráulicas debido a las interacciones entre el suelo y la atmósfera. La intensidad de estas interacciones está relacionada con factores como la precipitación, la humedad relativa y la temperatura superficial, que varían según las condiciones meteorológicas predominantes. Además, las propiedades del suelo, como su permeabilidad, plasticidad, tamaño de las partículas, agrietamiento por desecación y la presencia de vegetación, también influyen en estas interacciones (Walker, Heitor , & Clarke, 2023).

En la ingeniería civil, la compactación de suelos es un proceso esencial para asegurar la resistencia y durabilidad de las estructuras. Los métodos más comunes utilizados en el laboratorio para preparar muestras de suelo incluyen:

- Compactación por Impacto
- Compactación por Amasado
- Compactación por Presión Estática
- Compactación por Vibración

Cada uno de estos métodos de compactación se selecciona y aplica en función de las características específicas del suelo y los requisitos del proyecto, como se aprecia en la ilustración 14, un suelo tiene 3 fases, aire agua y suelo, mediante el proceso de compactación se busca eliminar los espacios llenos de aire para maximizar la densidad del mismo. Los rodillos vibradores compactadores son comúnmente utilizados en el campo debido a su eficacia para compactar grandes volúmenes de suelo, adaptándose a diversas condiciones y tipos de terreno. La elección del método adecuado es crucial para garantizar que el suelo alcance la densidad y resistencia necesarias para soportar las cargas esperadas y asegurar la estabilidad y durabilidad de las estructuras construidas sobre él (Shalal, 2012).

Ilustración 14  
Relaciones Volumétricas



Fuente: (Das, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica , 2013)

En el ámbito de la ingeniería civil, los rellenos se suelen colocar en condiciones cercanas al contenido de humedad óptimo para asegurar una compactación efectiva. Durante la construcción, el suelo compactado generalmente se encuentra en una condición no saturada, lo que significa que no está completamente saturado de agua. En esta situación, la succión matricial, un fenómeno que surge de la interacción entre las fases del suelo, agua y aire, juega un papel crucial en determinar el comportamiento mecánico e hidráulico del suelo compactado (Fredlund & Rahardjo, 1993). La eficacia de la compactación del suelo, es decir, la capacidad para aumentar la densidad bajo energías de compactación específicas, está estrechamente vinculada a la granulometría del suelo. La distribución del tamaño de las partículas y la forma en que se agrupan afectan cómo el suelo responde al proceso de compactación. Por ello, es esencial ajustar los métodos de compactación a las características particulares de cada tipo de suelo. Para garantizar un ajuste preciso, se realizan pruebas preliminares en el campo. Estas pruebas consisten en compactar muestras de suelo en porciones controladas para simular las condiciones de compactación en un entorno más manejable.

Las energías de compactación se ajustan mediante la variación de parámetros clave, como el grosor de las capas de suelo, el número de pasadas de los equipos de compactación y las características del equipo utilizado, como el tipo y peso de los rodillos. Estos ajustes permiten optimizar el proceso de compactación para cada tipo de suelo, asegurando que se logre una densidad adecuada y se obtengan las propiedades deseadas para el desempeño del suelo en estructuras como terraplenes y otras aplicaciones de construcción (Chiario, Gazzellone , & Modoni , 2012, ).

Las investigaciones de laboratorio juegan un papel crucial en la evaluación de cómo diferentes métodos de compactación afectan al suelo. Estas investigaciones proporcionan métodos estandarizados para analizar y entender cómo varían las respuestas de compactación según los procedimientos aplicados, como amasado, vibración o compactación estática, así como los parámetros de tratamiento, incluyendo el contenido de agua y las energías de entrada utilizadas durante el proceso.

Mediante estos estudios, se puede obtener una comprensión detallada de cómo cada método y parámetro influye en las propiedades del suelo compactado. Por ejemplo, el amasado puede ser eficaz para suelos cohesivos, mientras que la vibración es más adecuada para suelos granulares. La compactación estática, por su parte, puede ser utilizada en suelos que requieren un alto grado de densificación sin vibraciones.

Dado que cada tipo de suelo responde de manera diferente a estos métodos, las investigaciones en laboratorio también se centran en desarrollar correlaciones simples que permiten predecir de manera rápida y precisa los efectos de la compactación en diversos tipos de suelos granulares. Estas correlaciones son de gran interés porque facilitan la selección de los procedimientos de compactación adecuados para cada tipo de suelo sin necesidad de realizar extensas pruebas en campo. Así, se optimiza y controla el proceso de compactación (Ilustración 15), se asegura la calidad de la construcción y se mejora la eficiencia en la ejecución de proyectos de ingeniería civil (Chiaro, Gazzellone , & Modoni , 2012, ).

*Ilustración 15*  
*Control de Compactación*



*Fuente: (Burbano Iván, 2024)*

En el ámbito de la ingeniería civil, es crucial cumplir con los requisitos de compactación especificados para asegurar la estabilidad y durabilidad de las estructuras construidas

sobre suelos naturales. A continuación, se presenta la tabla que resume los requisitos de porcentaje de compactación que deben cumplir los suelos naturales, de acuerdo con las especificaciones del Ministerio de Obras Públicas (MOP), tal como se detalla en el Capítulo 300 "Movimiento de Tierras", sección 305-2 "Compactación", artículo 305-2.04 "Grado de Compactación", en la Tabla 305-2.1

Tabla 6  
Grado de Compactación Mínima

Compactación relativa (%)	Superficies o capas
90 %	Terreno natural en zonas de relleno
95 %	Terreno natural en zonas de corte
95 %	Terraplenes o rellenos
95 %	Subrasantes formadas por suelo seleccionado

Fuente: (MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y COMUNICACIÓN, 2002)

Estos requisitos son fundamentales para asegurar que el suelo natural o tratado tenga las propiedades necesarias para soportar cargas y resistir condiciones ambientales y operativas durante la vida útil de la infraestructura.

### 2.3.5.1 PRINCIPIO DE COMPACTACIÓN

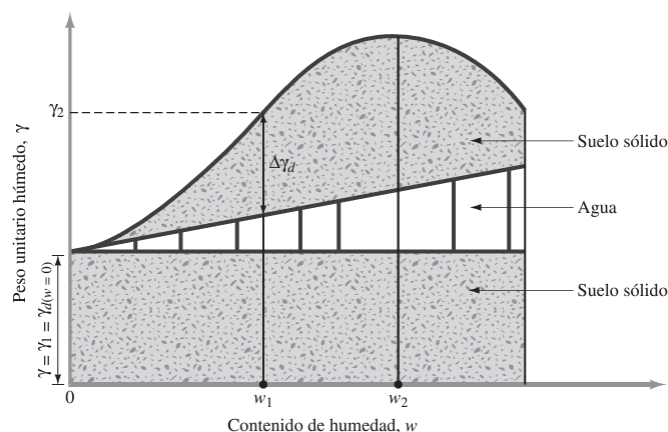
En 1933, el ingeniero Ralph R. Proctor realizó una contribución fundamental a la ingeniería de suelos al demostrar la relación clave entre la densidad alcanzada y el contenido de agua para una energía de compactación específica. Este hallazgo condujo al desarrollo del plano de compactación (también conocido como la curva de compactación o la curva de Proctor), que representa gráficamente el peso unitario seco del suelo en función de su contenido de agua.

El plano de compactación se utiliza para ilustrar cómo varía la densidad seca del suelo en relación con el contenido de agua durante el proceso de compactación. Este gráfico muestra una curva que define el rango óptimo de humedad para lograr la máxima densidad seca del suelo bajo una energía de compactación determinada. El punto más alto de esta curva se conoce como la humedad óptima y la densidad máxima seca correspondiente (Pinyol Puigmartí, Gens, & Alonso, 2013).

En términos generales, la compactación es un proceso que busca consolidar el suelo al reducir el contenido de aire en su estructura. Este proceso se logra mediante la aplicación de energía mecánica, que puede variar dependiendo del método y equipo

utilizados. El grado de compactación de un suelo se evalúa midiendo su peso unitario seco, un indicador clave de la densidad alcanzada durante la compactación. Durante el proceso de compactación, la adición de agua juega un papel crucial. El agua actúa como un agente de lubricación, facilitando el movimiento de las partículas del suelo. Esto permite que las partículas se deslicen y se reorganicen de manera más eficiente, logrando una disposición más densa y compacta. A medida que se incrementa el contenido de humedad, el peso unitario seco del suelo tiende a aumentar, ya que el agua ayuda a reducir la fricción entre las partículas del suelo, permitiendo una mejor compactación. La ilustración 16 muestra cómo el peso unitario seco del suelo aumenta con el contenido de humedad hasta alcanzar un punto óptimo, conocido como humedad óptima. Más allá de este punto, un exceso de agua puede reducir la eficacia de la compactación al llenar los vacíos entre las partículas, lo que puede llevar a una disminución en la densidad seca alcanzada. (Das, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica , 2013).

Ilustración 16  
Principios de la Compactación



Fuente: (Das, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica , 2013)

Cuando el contenido de humedad  $w = 0$ , la unidad del peso húmedo ( $\gamma$ ) es igual a la unidad del peso seco ( $\gamma_d$ )

$$\gamma = \gamma_d(w=0) = \gamma_1$$

Mientras que si el contenido de humedad aumenta gradualmente y el mismo esfuerzo compactador se utiliza para la compactación el peso de los sólidos en una unidad de volumen aumenta gradualmente. Cuando  $w = w_1$

$$\gamma = \gamma_2$$

El peso unitario seco para este contenido de humedad ( $w = w_1$ ) se da por:

$$\gamma_{d(w=w_1)} = \gamma_{d(w=0)} + \Delta\gamma_d$$

Más allá de cierto contenido de humedad  $w = w_2$ , cualquier incremento adicional en la humedad tiende a disminuir el peso unitario seco. Esto ocurre porque el agua llena los espacios que previamente ocupaban las partículas sólidas. El contenido de humedad en el que se alcanza el peso unitario seco máximo se conoce generalmente como contenido de humedad óptimo. La prueba de laboratorio comúnmente utilizada para determinar el peso unitario seco máximo de compactación y el contenido óptimo de humedad se llama prueba Proctor de compactación. (Das, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica , 2013).

*Ilustración 17*  
*Compactación Subrasante*



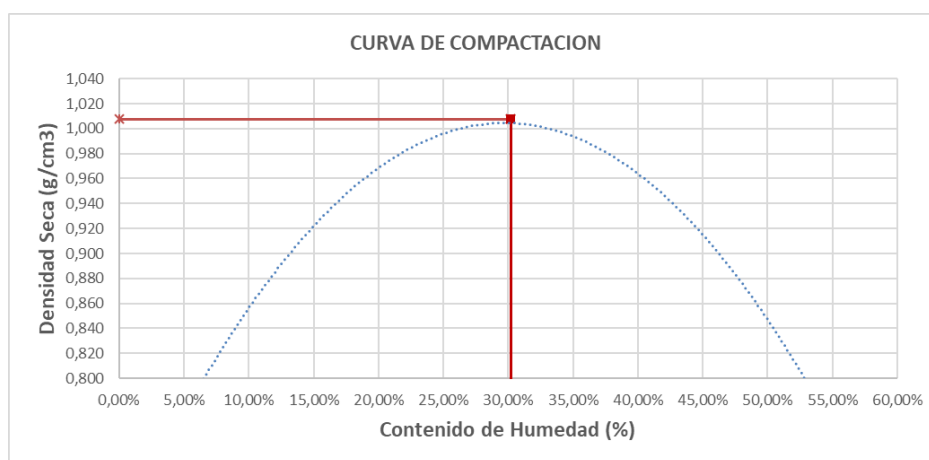
*Fuente: (Burbano Iván, 2024)*

Las características de compactación del suelo determinadas en laboratorio son esenciales para establecer criterios precisos para la compactación en el campo (Ilustración 17). Estos criterios se basan en la comparación entre los datos obtenidos en el laboratorio y las condiciones reales del terreno, y suelen definir un rango de tolerancia para la densidad seca y el contenido de humedad en el sitio de construcción, en relación con la curva de compactación estándar obtenida en el laboratorio. Los dos parámetros clave para esta evaluación son la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo (Ilustración 18).

Algunos criterios de evaluación en el campo que afectan o determinan el comportamiento del suelo como la máxima densidad seca que el suelo puede alcanzar bajo un nivel específico de compactación en laboratorio. En el campo, se deben lograr densidades cercanas a este valor para asegurar una compactación adecuada, tomando en cuenta un factor importante como el nivel de humedad en el que el suelo alcanza su máxima densidad seca durante la compactación. En el campo, el contenido de humedad

debe estar cerca de este valor para optimizar la compactación. Para así lograr alcanzar las propiedades ingenieriles deseadas en los rellenos compactados, como la resistencia a la compresión, al cortante, a la tracción, así como la permeabilidad y rigidez, es necesario aplicar una energía de compactación específica al suelo. No obstante, en el campo, la energía de compactación aplicada puede variar debido a factores como el tiempo de hidratación y el grosor de la capa, lo que puede afectar significativamente el comportamiento del suelo en términos de tensión y deformación (Bolton Seed & Chan, 1959).

Ilustración 18  
Curva de Compactación, Densidad Máxima y Humedad Óptima



Fuente: (Burbano Iván, 2024)

El método de compactación utilizado fue el método A (Tabla 7), el cual se describe a continuación, donde se indica el volumen y peso del molde, la energía aplicada, número de capas y material que se utiliza para la compactación:

Tabla 7  
Especificaciones para la Prueba Proctor Estándar (Basadas en la designación ASTM D-1557)

Elemento	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	101.6 mm	101.6 mm	152.4 mm
Volumen del molde	943.3 cm <sup>3</sup>	943.3 cm <sup>3</sup>	2124 cm <sup>3</sup>
Peso del Martillo	44.5 N	44.5 N	44.5 N
Altura de caída del martillo	457.2 mm	457.2 mm	457.2 mm
Número de golpes de martillo	25	25	56
Número de capas de compactación	5	5	5
Energía de compactación	2696 KN-m/m <sup>3</sup>	2696 KN-m/m <sup>3</sup>	2696 KN-m/m <sup>3</sup>
Suelo utilizado	Porción que pasa el tamiz	Porción que pasa el tamiz	Porción que pasa el tamiz de 19

N° 4. Puede ser utilizada si el 20% o menos del peso de material es retenido en el tamiz N°4	9.5 mm. Puede utilizarse si el suelo retenido en el tamiz N°4 es más de 20% o menos del peso retenido en el tamiz de 9.5 mm	mm. Puede utilizarse si más del 20% del material retenido en el tamiz de 9.5 mm y menos de 30 % del peso es retenido en el tamiz de 19 mm
--	---	---

Fuente: (Das, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica , 2013)

### **2.3.6 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIN CONFINAMIENTO DE MUESTRAS DE SUELO-CEMENTO (ASTM 1633-17)**

La característica más comúnmente empleada del suelo-cemento es su consistencia. Esta propiedad sirve como un indicador clave del grado de reacción de la mezcla de suelo, cemento y agua, así como del tiempo de fraguado y la velocidad de endurecimiento. En suelos granulares que suelen comportarse de manera predecible, la consistencia se utiliza como un criterio simple para establecer la cantidad mínima de cemento requerida para la construcción de suelo-cemento (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

Ilustración 19  
Briqueta de Suelo-Cemento para Ensayo de Compresión Simple



Fuente: (Burbano Iván, 2024)

La incorporación de cemento en cualquier tipo de suelo, excepto los orgánicos, mejora la resistencia del suelo debido a la acción cementante, que resulta principalmente de la hidratación y de posibles modificaciones en los minerales presentes en el suelo. El impacto de añadir cemento a un suelo específico se evalúa en el laboratorio mediante

ensayos de compresión. La Tabla 8 presenta los valores típicos de resistencia a la compresión simple (Ilustración 19) para las muestras de suelo-cemento a los siete y veintiocho días, sirviendo como una referencia clave para los ingenieros civiles al diseñar y evaluar proyectos que empleen suelos estabilizados con cemento (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

### **2.3.6.1 MÉTODOS DE MOLDEO PARA ENSAYOS A COMPRESIÓN SUELO CEMENTO**

#### **2.3.6.1.1 Método A**

Este procedimiento de evaluación utiliza un espécimen de prueba preparado en un molde que se ajusta a los requisitos establecidos por los Métodos de Prueba D698. El molde Proctor, empleado en este método (Ilustración 20), tiene las siguientes dimensiones:

- Diámetro: 4.0 pulgadas (101.6 mm)
- Altura: 4.6 pulgadas (116.8 mm)

Esto resulta en una relación altura-diámetro de 1.15. Esta configuración es esencial para realizar las pruebas de compactación del suelo.

Este método es adecuado para materiales que tienen un 30 % o menos de su masa retenida en un tamiz de 19.0 mm (3/4 in.), lo que lo hace aplicable principalmente a suelos con características específicas de granulometría.

#### **Método de Prueba A vs. Método B**

- Método A: Se utiliza para obtener una medida relativa de la resistencia del suelo-cemento. Aunque no proporciona una determinación exacta de la resistencia a la compresión, es útil para comparar la resistencia entre diferentes muestras de suelo-cemento bajo condiciones similares. Debido a la menor relación altura-diámetro (1.15) de los cilindros en el Método A, los valores de resistencia a la compresión obtenidos suelen ser mayores que los que se obtendrían con el Método B.
- Método B: Generalmente, este método emplea cilindros con una mayor relación altura-diámetro, lo que puede resultar en valores de resistencia a la compresión más bajos en comparación con el Método A.

En resumen, la elección del método de prueba y la interpretación de los resultados dependen de la naturaleza del suelo y del objetivo específico de la prueba. El Método A, con su relación altura-diámetro más baja, puede ofrecer una indicación general de la resistencia que es útil para comparaciones preliminares, mientras que el Método B proporciona datos más precisos para una evaluación detallada de la resistencia a la compresión (ASTM D1633-17 , 2017).

*Ilustración 20*  
*Briqueta de Suelo-Cemento (Método A)*



*Fuente: (Burbano Iván, 2024)*

### **2.3.6.1.2 Método B**

Este procedimiento utiliza un espécimen de prueba preparado en un molde cilíndrico con una relación altura-diámetro de 2.0, siguiendo los lineamientos de la Práctica D1632. El molde tiene las siguientes dimensiones:

- Diámetro: 2.8 pulgadas (71.1 mm)
- Altura: 9.0 pulgadas (229 mm)

#### **Características y Aplicación**

Este método de prueba es particularmente adecuado para materiales que pasan a través de un tamiz de 4.75 mm (No. 4). La relación altura-diámetro de 2.0 ofrece ventajas significativas para la evaluación de la resistencia a la compresión, ya que permite una medición más precisa. Esta precisión se logra porque:

- Minimiza las condiciones de estrés complejas: La mayor relación altura-diámetro ayuda a reducir los efectos de estrés no uniformes que podrían surgir al cortar

las muestras, un problema que puede ser más pronunciado en métodos con una menor relación altura-diámetro, como el Método A.

- Proporciona una medición más fiable: La configuración del cilindro con una relación de 2.0 es más representativa de la resistencia a la compresión real del material, permitiendo una evaluación más exacta de su capacidad para soportar cargas.

En resumen, el uso de este molde cilíndrico con una relación altura-diámetro de 2.0 según la Práctica D1632 asegura una medición más precisa de la resistencia a la compresión, lo cual es crucial para obtener datos fiables sobre el comportamiento del material en condiciones de carga (ASTM D1633-17 , 2017).

*Tabla 8  
Límites para la Resistencia del Suelo-Cemento a Compresión*

<b>Límites para la resistencia de suelo-cemento a la compresión</b>		
<b>Tipo de suelo</b>	<b>Resistencia a la compresión kg/cm<sup>3</sup></b>	
	<b>7 días</b>	<b>28 días</b>
Suelos arenosos y cascajos		
Clasificación unificada: GW, GC, SW, SC, SP, SM, GP	21.0 – 42.0	28.0 – 70.0
Suelos limosos	17.5 – 35.0	21.0 – 63.0
Clasificación unificada: ML, CL		
Suelos arcillosos	14.0 – 28.0	17.5 – 42.0
Clasificación unificada: MH, CH		

*Fuente: (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)*

## **2.4 TERRASIL**

Terrasil es un compuesto basado en organosilano que forma una capa hidrofóbica en la superficie de las partículas del suelo. Este recubrimiento convierte las partículas del suelo en materiales resistentes al agua, lo que mejora la capacidad de compactación y el interbloqueo de las partículas durante la operación de maquinaria y el tráfico. Terrasil es eficaz en el tratamiento de una variedad de materiales como arcillas, arenas limosas y gravas. Su tecnología de nanotecnología crea una capa de solo unos nanómetros de grosor que repele el agua (Ilustración 21) en distintos tipos de suelos, agregados y otros materiales inorgánicos utilizados en la construcción de carreteras. Al aplicarse sobre el

suelo y unirse al sustrato, Terrasil se destaca por su capacidad para repeler el agua, ofreciendo una resistencia notable a la humedad. (Akolade & Alli, 2018).

*Ilustración 21*  
*Impermeabilización del Suelo con Terrasil*



*Fuente: (Zydex)*

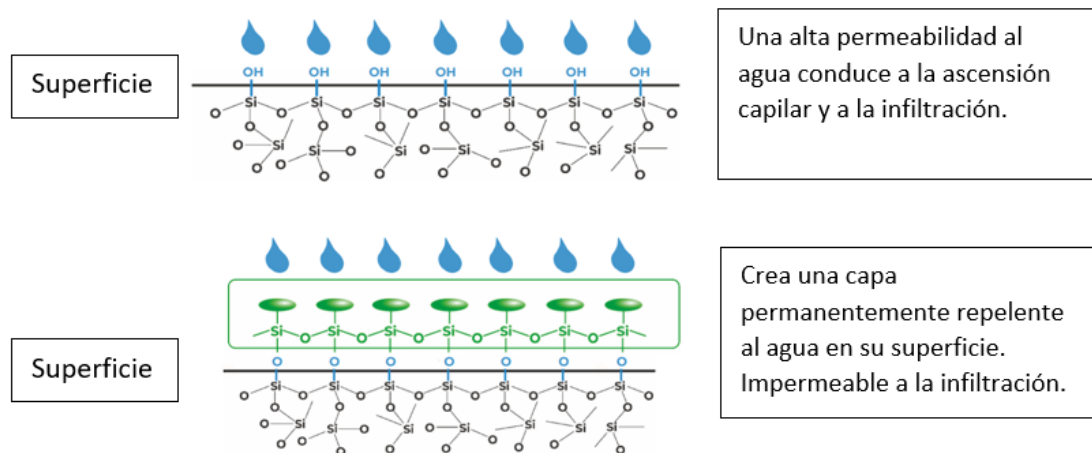
La nanotecnología, conceptualizada por Richard Feynman en su discurso "Hay mucho espacio en la parte inferior" en 1959, ha revolucionado numerosos campos, incluida la ingeniería geotécnica. Desde entonces, los avances en este campo han permitido la incorporación de nanomateriales para mejorar las propiedades del suelo, incluso en concentraciones mínimas (Taha, 2009).

Con los avances tecnológicos, están surgiendo nuevos materiales para la estabilización del suelo, incluyendo nanoquímicos como Terrasil. Este aditivo, basado en nanotecnología y 100% organosilano, es soluble en agua, estable a los rayos UV y al calor, y se utiliza para impermeabilizar el suelo subyacente, sus propiedades se definen en la tabla 9. Terrasil reacciona con los grupos silanol afines al agua presentes en arena, limo, arcilla y agregados, transformándolos en enlaces de alquil siloxano altamente estables y repelentes al agua, formando una membrana transpirable in situ (Bamitale Dorcas & Abiodun Uduebor, 2019)

Fabricado por Zydex Industries en Gujarat (India), Terrasil contiene una mezcla de compuestos de hidroxil-alquil-alcoxi-alquil-sililo (65-70%), alcohol bencílico (25-27%) y glicol etileno (3-5%). Este modificador de suelo reactivo, basado en nanotecnología y completamente organosilano, no solo es soluble en agua y resistente a la luz y al calor, sino que también es eficaz para impermeabilizar la subrasante del suelo. Su reacción con los grupos silanoles en la arena, suelo y agregados convierte estos grupos en

enlaces de siloxano alquil repelentes al agua, formando una capa que permite la respiración del suelo mientras impide la entrada de agua. La consolidación de Terrasil comienza dentro de las 3 horas posteriores a su aplicación y se completa en 72 horas (Ilustración 22). Este compuesto se adhiere de manera permanente a cada partícula del suelo y no se separa ni se filtra en las aguas subterráneas (Mishra & Vasu, 2017).

Ilustración 22  
Acción Impermeabilizante del Terrasil



Fuente: (Zydex)

#### 2.4.1 BENEFICIOS DEL TERRASIL (Zydex):

- El suelo tratado se vuelve hidrófobo de forma permanente.
- Expulsa el agua interna en forma de vapor.
- Reduce el índice de plasticidad de los suelos.
- Incrementa los valores de CBR.
- Reduce el hinchamiento en los suelos expansivos.
- Mejora su densidad y compactación.
- Reduce el consumo de agua en la compactación del material.

## 2.4.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL TERRASIL

Tabla 9  
Especificaciones Técnicas del Terrasil

Propiedades	Descripción
Apariencia	Amarillo
Contenido de sólidos	68±2%
Viscosidad a 25 °C	20-100cps
Gravedad específica	1.01
Solubilidad	Forma una solución transparente como el agua
Punto de inflamación	Inflamable >90 °C
Terrasil:agua	1:200 ml
Dosificación	2% a 10% de 2% al peso

Fuente: (Bamitale Dorcas & Abiodun Uduebor, 2019)

## 2.5 CEMENTO

### 2.5.1 CONGLOMERANTES

Se denomina conglomerante a cualquier material que tiene la capacidad de adherirse a otros y proporcionar cohesión al conjunto mediante transformaciones químicas que ocurren en su masa, creando una nueva estructura. Entre estos materiales se encuentra el cemento Portland. Este tipo de cemento es un conglomerante hidráulico, lo que significa que, al ser mezclado con agua, endurece tanto al aire como bajo el agua. (SANJUÁN BARBUDO & CHINCHÓN YEPES, 2004).

Los conglomerantes se dividen en dos categorías:

- Conglomerantes aéreos: Estos materiales, al mezclarse con agua, fraguan y se endurecen en el aire, pero no son resistentes al agua. Los conglomerantes no hidráulicos, como la cal, necesitan agentes externos para su proceso de endurecimiento.
- Conglomerantes hidráulicos: Estos materiales, después de ser mezclados con agua, fraguan y se endurecen tanto en el aire como bajo el agua. Los productos resultantes mantienen su estabilidad en ambos ambientes y pueden seguir endureciéndose con el tiempo.

## 2.5.2 CEMENTO PORTLAND

De acuerdo con la norma ecuatoriana, (NTE INEN 151, 2010) el cemento Portland es un tipo de cemento hidráulico que se fabrica al moler el clinker, que es una mezcla de minerales, principalmente silicatos de calcio que se han cristalizado (Ilustración 23). Este cemento puede contener también otros elementos como agua, sulfato de calcio, una pequeña cantidad de piedra caliza (hasta un 5%), y aditivos que se añaden durante el proceso de producción.

Ilustración 23  
Cemento Portland



Fuente: (Germans Boada SA, 2024)

El cemento Portland no es un compuesto químico único, si no una mezcla de varios compuestos. Cuatro de estos compuestos constituyen el 90% o más del peso total del cemento Portland: silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico (Tabla 10). Además de estos componentes principales, otros compuestos también juegan un papel crucial en el proceso de hidratación. Aunque todos los tipos de cemento Portland contienen estos cuatro compuestos principales, sus proporciones varían entre los diferentes tipos (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Tabla 10  
Composición Química del Cemento

Composición química del cemento	
Notación	Compuestos reactivos
<i>C</i> ( <i>CaO</i> , óxido de calcio)	<i>C<sub>3</sub>S</i> (Silicato tricálcico)
<i>A</i> ( <i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> , alúmina)	<i>C<sub>2</sub>S</i> (Silicato dicálcico)
<i>S</i> ( <i>SiO<sub>2</sub></i> , sílice)	<i>C<sub>3</sub>A</i> (Aluminato tricálcico)

$H$  ( $H_2O$ , agua)

$CSH_2$  (Yeso)

$C_4AF$  (Aluminio ferrito tetracálcico)

Fuente: (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

Al examinar el clinker, el material que se muele para producir cemento Portland, bajo el microscopio, se pueden identificar y cuantificar la mayoría de sus compuestos individuales. Sin embargo, los granos más pequeños no son visibles. El diámetro promedio de las partículas en un cemento típico es de alrededor de 15 micrómetros. Si todas las partículas fueran de este tamaño promedio, habría aproximadamente 300 billones de partículas por kilogramo de cemento Portland. No obstante, debido a la variabilidad en el tamaño de las partículas, en realidad hay alrededor de 16,000 billones de partículas por kilogramo (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Los cementos Portland son cementos hidráulicos que están compuestos principalmente por sílice, alúmina, hierro y calcio (Ilustración 24), estos compuestos reaccionan al contacto con el agua. La hidratación comienza cuando el cemento se mezcla con agua, formando una capa fibrosa en la superficie de cada partícula. Esta capa se expande gradualmente, uniéndose con la capa de otras partículas de cemento o adheriéndose a las sustancias circundantes. El crecimiento de estas fibras provoca la rigidización, el endurecimiento y el aumento progresivo de la resistencia del material (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Ilustración 24  
Polvo Fino del Cemento Portland



Fuente: (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

El cemento Portland moderno se fabrica al calentar mezclas de calizas y arcillas preparadas artificialmente a una temperatura de alrededor de 1.500 °C (Ilustración 25). El producto resultante, conocido como clinker, se muele con la adición de un regulador

de fraguado, que suele ser piedra de yeso natural. Según la literatura técnica, la composición química promedio del cemento Portland varía, conteniendo aproximadamente entre 61 y 67% de óxido de calcio (CaO), entre 19 y 23% de óxido de silíceo (SiO<sub>2</sub>), entre 2.5 y 6% de óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), entre 0 y 6% de óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), y entre 1.5 y 4.5% de otros compuestos químicos menores. Aunque los cuatro primeros componentes son los principales, no se encuentran en forma libre, sino que están combinados en la forma de silicatos, aluminatos y ferritoaluminatos previamente mencionados (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

*Ilustración 25*  
*Horno Rotatorio para Manufactura del Clinker*



*Fuente: (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)*

### **2.5.3 TIPOS DE CEMENTO PORTLAND:**

- **Tipo I:** Utilizado cuando no se necesitan propiedades especiales específicas.
- **Tipo IA:** Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo I.
- **Tipo II:** Para uso general, moderada resistencia a los sulfatos o calor de hidratación moderada.
- **Tipo IIA:** Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo II donde se desea incorporación de aire.
- **Tipo III:** Cemento que se utiliza cuando se desea alta resistencia inicial.
- **Tipo IIIA:** Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo III donde se desea incorporación de aire.
- **Tipo IV:** Cemento que se utiliza cuando se desea bajo calor de hidratación.
- **Tipo V:** Cemento que se utiliza cuando se desea alta resistencia a los sulfatos. (NTE INEN 152, 2010)

## 2.5.4 PRODUCCIÓN

El cemento Portland se elabora pulverizando clínker, el cual está compuesto principalmente por silicatos de calcio hidráulicos, además de aluminatos y ferroaluminatos de calcio. Estos componentes se muelen junto con el clínker para obtener el producto final. Los materiales utilizados en la fabricación del cemento Portland deben contener cantidades adecuadas de compuestos de calcio, sílice, alúmina y hierro (Tabla 11). Durante el proceso de producción (Ilustración 26), se realizan análisis químicos frecuentes de todos los materiales para asegurar una calidad alta y uniforme del cemento (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Tabla 11

Fuentes para Materia Prima Usada en la Fabricación de Cemento Portland

<b>Fuentes de las materias primas utilizadas en la fabricación del cemento Portland</b>				
<b>Cal, CaO</b>	<b>Hierro <math>Fe_2O_3</math></b>	<b>Sílice <math>SiO_2</math></b>	<b>Aluminio <math>Al_2O_3</math></b>	<b>Yeso o Sulfato <math>CaSO_4H_2O</math></b>
Desechos industriales	Polvo de humo de horno de fundición	Silicato de calcio	Mineral de aluminio*	Anhidrita
Aragonita*	Arcilla*	Roca calcárea	Bauxita	Sulfato de calcio
Calcita*	Mineral de hierro*	Arcilla*	Roca calcárea	Yeso*
Polvo del horno de cemento	Costras de laminado*	Ceniza volante	Arcilla*	
Roca calcárea	Lavaduras de mineral	Greda	Escoria de cobre	
Creta	Cenizas de pirita	Caliza	Ceniza volante*	
Arcilla	Esquisto	Loes	Greda	
Greda		Marga*	Granodiorita	
Caliza		Lavaduras de mineral	Caliza	
Mármol		Cuarcita	Loes	
Marga*		Ceniza de arroz	Lavaduras de mineral	
Coquilla		Arena*	Esquisto*	

Esquisto

Arenisca

Escoria

Escoria

Esquisto\*

Estaurolita

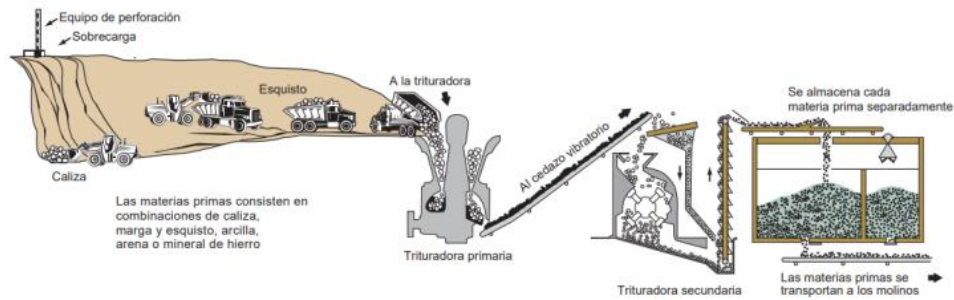
Escoria

Basalto

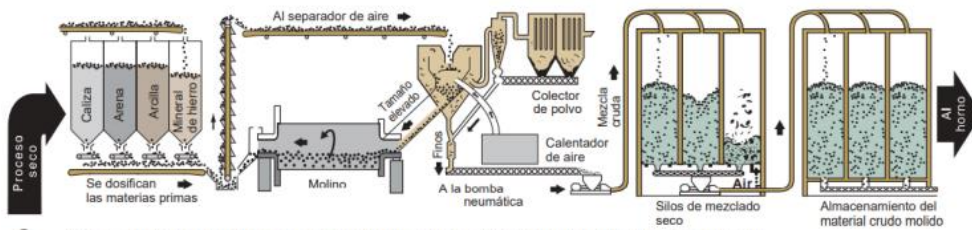
Nota: Muchos subproductos industriales tienen potencial como materia prima para la producción del cemento portland \*las fuentes más comunes

Fuente: *(Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)*

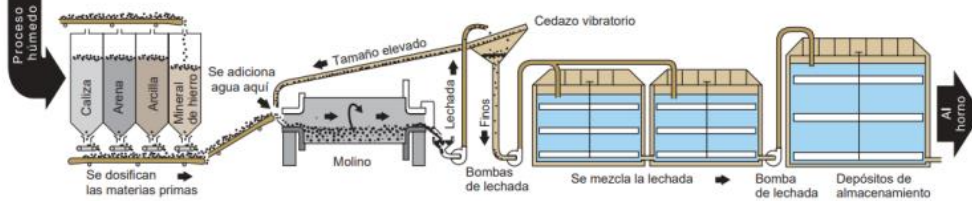
**Ilustración 26**  
**Etapas en la Producción Tradicional del Cemento Portland**



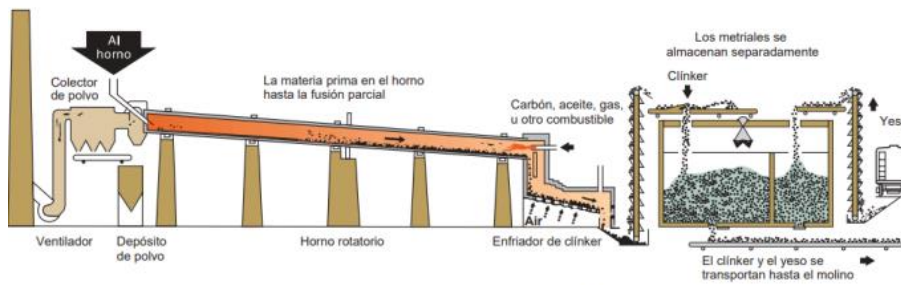
1. La roca se reduce primero hasta un tamaño de 125 mm (5 pulg.) y después a un tamaño de 20 mm (3/4 pulg.) para entonces almacenarla.



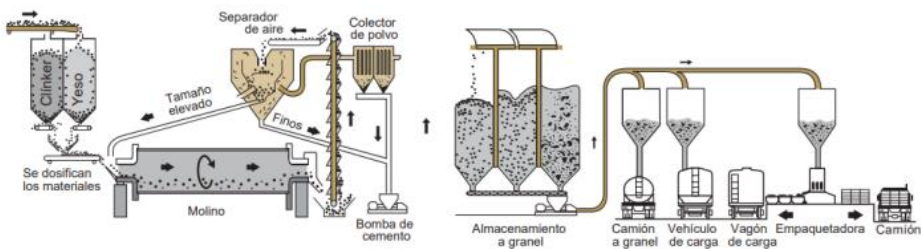
2. Las materias primas se muelen hasta que se vuelven en polvo y se las mezcla.



2. Las materias primas se muelen, se mezclan con el agua para formar una lechada (pasta) y se mezclan.



3. La calcinación transforma químicamente las materias primas en el clínker de cemento.



4. Se muele el clínker junto con el yeso para convertirlos en cemento portland y se lo despacha.

Fuente: (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

### 2.5.4.1 CLINKER DEL CEMENTO PORTLAND:

El cemento Portland se produce mediante la sinterización de una mezcla homogénea de materias primas como caliza, arcilla, arena, compuestos de hierro y otros ingredientes en proporciones específicas (denominadas crudo, pasta o harina), que contienen elementos comúnmente expresados en forma de óxidos como CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, y cantidades menores de otros materiales. Esta mezcla se calienta a las temperaturas de sinterización, formando nuevos compuestos. El clinker se desarrolla gradualmente a lo largo de este proceso. La composición química del clinker se detalla en la Tabla 12. El clinker utilizado en el cemento Portland debe estar compuesto por al menos dos tercios de silicatos de calcio [3CaO·SiO<sub>2</sub>] y [2CaO·SiO<sub>2</sub>], mientras que el resto está formado por fases que contienen aluminio, hierro y otros compuestos. La relación en masa entre CaO y SiO<sub>2</sub> no debe ser inferior a 2.0, y el contenido de óxido de magnesio (MgO) no debe superar el 5.0% en masa (SANJUÁN BARBUDO & CHINCHÓN YEPES, 2004).

Tabla 12  
Composición Química del Clinker

Composición química del Clinker (% en masa)				
Fase	Fórmula	Abreviatura	Rango	Valor medio
Silicato tricálcico	3CaO SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	46 – 79	61
Silicato bicálcico	2CaO SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	5 – 30	15
Ferritoaluminato tetracálcico	4CaO (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	C <sub>4</sub> (A, F)	4 – 16	8
Aluminio tricálcico	3Ca Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	C <sub>3</sub> A	6 – 18	12
Cal libre	CaO	C	0, 1 – 4	1
Óxido de magnesio libre	MgO	M	0,7 – 1,5	1.5

Fuente: (SANJUÁN BARBUDO & CHINCHÓN YEPES, 2004)

Los componentes adicionales minoritarios en el cemento son materiales minerales naturales o subproductos del proceso de fabricación del clinker o del propio cemento. Estos componentes se seleccionan, homogenizan, secan y muelen adecuadamente según su estado de producción o suministro, y su proporción no debe exceder el 5 % en peso. Estos aditivos no deben aumentar significativamente la demanda de agua del

cemento, ni disminuir la resistencia del concreto o mortero en ningún caso, ni reducir la protección contra la corrosión de las armaduras. Generalmente, estos aditivos mejoran propiedades físicas del cemento, como la trabajabilidad y la retención de agua. La información sobre estos componentes adicionales será proporcionada por el fabricante si el usuario lo solicita (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

### 1.3. Sulfato de calcio

Durante la fabricación del cemento, se añade sulfato de calcio para regular el proceso de fraguado. Este sulfato de calcio puede presentarse en forma de yeso (sulfato de calcio dihidratado,  $CaSO_2 \cdot 2H_2O$ ), hemihidrato ( $CaSO_2 \cdot 1/2H_2O$ ), o anhidrita (sulfato de calcio anhidro,  $CaSO_4$ ), o cualquier mezcla de ellos. El yeso y la anhidrita se encuentran en la naturaleza. Además, el sulfato de calcio también puede obtenerse como subproducto de ciertos procesos industriales. Los sulfatos actúan también como activadores del desarrollo de la resistencia. Por razones de estabilidad de volumen, el contenido total de sulfatos de los cementos (expresado como  $SO_3$ ) debe ser menor de 3,5 ó 4,0% en peso. El yeso se deshidrata parcialmente en el molino a temperaturas superiores a 80°C dando lugar a hemihidrato ( $CaSO_4 \cdot 0,5 H_2O$ ) (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

### 1.4. Aditivos

Estos son componentes no mencionados anteriormente, que se incorporan para mejorar el proceso de fabricación o las propiedades del cemento. Estos aditivos no deben afectar negativamente las propiedades del cemento, de los morteros o concretos elaborados con él, ni provocar la corrosión de las armaduras o metales incrustados. La proporción total de aditivos en el cemento no debe superar el 1% en masa (excluyendo los pigmentos); además, la cantidad de aditivos orgánicos no debe exceder el 0,2% en masa del cemento, medida sobre el residuo seco (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

## **2.5.4.2 TIPOS DE CEMENTO HIDRÁULICO**

Todos los cementos hidráulicos, ya sean Portland o mezclados, son aquellos que se endurecen y reaccionan químicamente al entrar en contacto con el agua, manteniendo su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua. En la década de los noventa, se desarrollaron diversas especificaciones para los distintos tipos de desempeño de los cementos hidráulicos, incluyendo la norma ASTM C 1157 "Performance Specification

for Hydraulic Cements" (Especificación de Desempeño para Cementos Hidráulicos). Esta norma establece los requisitos generales que deben cumplir los cementos hidráulicos, abarcando cemento Portland, cemento Portland modificado y cemento hidráulico mezclado. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

La Norma ASTM C 1157, indica los seis tipos de cementos hidráulicos:

- Tipo GU: Cemento de uso general adecuado para todas las aplicaciones.
- Tipo HE: Cemento de alta resistencia a edades tempranas.
- Tipo MS: Cemento donde sean importante las precauciones contra el ataque moderado de los sulfatos.
- Tipo HS: Cemento donde está expuesto al contacto con los sulfatos.
- Tipo MH: Cemento donde se necesite tener calor de hidratación moderado y se debe controlar el aumento de temperatura.
- Tipo LH: Cemento donde la tasa y la cantidad del calor generado por la hidratación deba ser minimizado, baja tasa de resistencia.

#### **2.5.5 CARACTERISTICAS DEL CEMENTO TIPO HE**

El Cemento Tipo HE es un cemento hidráulico de alta resistencia, diseñado para aplicaciones que demandan alta resistencia inicial, usualmente menos de una semana, similar al cemento Tipo I, con excepción de que sus partículas se muelen más finamente, utilizado cuando se desea poner la estructura en servicio rápidamente.

## CAPÍTULO III (ESTABILIZACIÓN DE SUELOS)

### 3.1 GENERALIDADES

La estabilización del suelo es un proceso diseñado para mejorar las características geotécnicas del suelo natural a través de métodos mecánicos o químicos mediante el uso de aditivos (Ilustración 27). Actualmente, se prefiere utilizar aditivos, especialmente residuos industriales, para mejorar las propiedades del suelo, ya que esto permite una mejor utilización de estos residuos a bajo costo. Además de aumentar la resistencia y durabilidad del suelo, la estabilización también ayuda a prevenir la erosión en ambientes controlados. Este proceso puede llevarse a cabo mediante técnicas térmicas, eléctricas, mecánicas o químicas, siendo las dos primeras poco comunes. Los métodos mecánicos y químicos son los más utilizados debido a su fácil manejo en entornos de construcción (Bamitale Dorcas & Abiodun Uduebor, 2019).

La estabilización del suelo modifica sus propiedades ingenieriles con el fin de reducir su permeabilidad y compresibilidad, y de aumentar su resistencia al corte y capacidad de carga. Su objetivo principal es mejorar la resistencia del suelo y reducir el costo mediante el uso de materiales disponibles. La estabilización se realiza para aumentar la resistencia y durabilidad del suelo o para prevenir la erosión y la formación de polvo. El fin es crear un material o sistema de suelo que pueda soportar las condiciones de uso diseñadas durante la vida útil del proyecto (Altaf, 2021).

La Asociación Nacional del Cemento indica que todos los tipos de suelos pueden ser estabilizados con cemento, aunque los materiales granulares bien graduados, que tienen una matriz de agregado flotante, suelen obtener los mejores resultados. Según la Administración Federal de Carreteras, el cemento debe usarse para estabilizar suelos con menos del 35% que pasa por el tamiz No. 200 y un índice de plasticidad (PI) menor de 20. Esto sugiere que los suelos tipo A-2 y A-3 se estabilizan mejor con cemento, mientras que los suelos tipo A-5, A-6 y A-7 se estabilizan más eficazmente con cal (Epps, Dunlap, Gallaway, & Currin, 1971).

#### **Tipo de Cemento:**

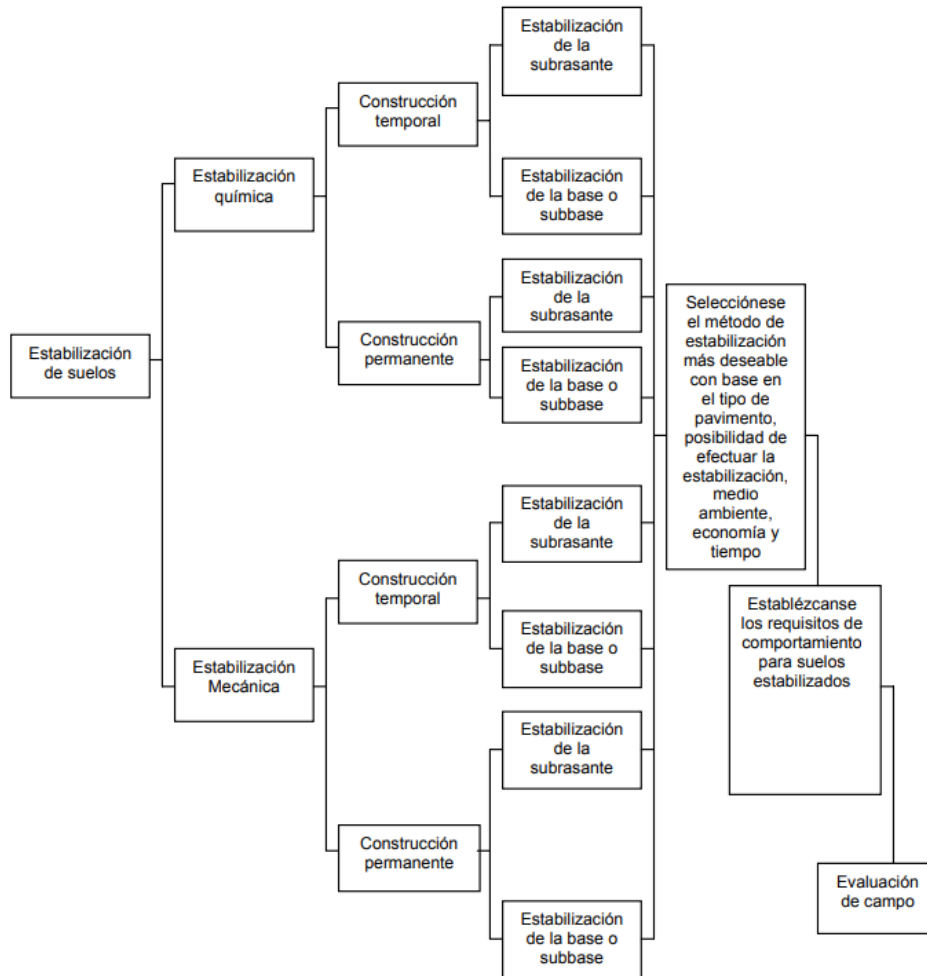
La influencia del tipo de cemento en las propiedades de las mezclas de suelo-cemento ha sido estudiada por varios investigadores. En general, los Tipos I, II, III y V producen

diferencias menores en el comportamiento de la mayoría de los suelos (Epps, Dunlap, Gallaway, & Currin, 1971).

La estabilización con cemento Portland puede aplicarse a gravas, arenas, limos y suelos de baja plasticidad. El cemento es uno de los materiales más utilizados para estabilizar suelos en la construcción de carreteras. La primera construcción controlada con suelo-cemento en Estados Unidos se realizó cerca de Johnsonville, Carolina del Sur, en 1935. El cemento ayuda a reducir el límite líquido y aumentar el índice plástico y la manejabilidad de los suelos arcillosos. La cantidad óptima de cemento necesaria para una estabilización efectiva varía según el tipo de suelo, como se detalla en la Tabla 13 de Mitchell y Freitag (1959) (Paul Garnica Anguas, 2002):

Similar a la cal, el cemento incrementa la resistencia de los suelos, aunque esta resistencia disminuye con el tiempo de curado. Los suelos granulares y arcillosos de baja plasticidad son los más adecuados para la estabilización con cemento. Las arcillas cálcicas se estabilizan más fácilmente con cemento, mientras que las arcillas sódicas reaccionan mejor con cal. Por ello, es importante seleccionar el material estabilizador adecuado. En el campo, la cantidad correcta de cemento se mezcla con el suelo, ya sea en el sitio o en una planta mezcladora, y luego se transporta al lugar de construcción. El suelo se compacta al peso unitario deseado con una cantidad específica de agua. La alta resistencia a la compresión en suelos estabilizados con cemento da lugar a valores elevados de rigidez o módulos de resiliencia en las capas de pavimento resultantes (Paul Garnica Anguas, 2002).

Ilustración 27  
Sistema de Estabilización de Suelos de la Fuerza Aérea



Fuente: (Dunlap, 1975)

La estabilización del suelo se vuelve esencial debido a la inestabilidad que estos presentan, lo cual afecta la seguridad vial y el tiempo de desplazamiento en carretera. Además, se debe resaltar que la estabilización del suelo no se limita solo al uso de cemento, sino que también se pueden emplear otros materiales como cenizas, que tienen el potencial de mejorar las propiedades naturales del suelo. La mecánica de suelos se centra en la resistencia y el comportamiento del suelo bajo diferentes tipos de carga, explorando varios métodos de estabilización como los mecánicos, químicos, térmicos y electroquímicos. En este contexto, se propone la estabilización mecánica a través de la compactación y otras técnicas de mejora para aumentar la capacidad de carga y la estabilidad volumétrica del suelo. La estabilidad del suelo está influenciada por la distribución de partículas, que afecta propiedades como la consistencia y la porosidad. Para lograr una adecuada cohesión entre las partículas, es fundamental contar con un porcentaje adecuado de partículas finas (López González , 2023).

### 3.1.1 MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN

#### 3.1.1.1 MECÁNICA:

La estabilización mecánica implica la compactación del suelo mediante métodos estáticos o dinámicos con el fin de aumentar su densidad y resistencia mecánica, reducir su porosidad y permeabilidad, y así mejorar su capacidad de carga (Ilustración 28). Este proceso también puede incluir la mezcla de suelos con diferentes gradaciones para alcanzar las especificaciones requeridas. Los principales objetivos de este procedimiento ingenieril son (Das, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica , 2013):

- a) Aumentar su capacidad portante,
- b) Disminuir el asentamiento de las estructuras,
- c) Controlar cambios volumétricos indeseables,
- d) Reducir la permeabilidad al agua,
- e) Aumentar la estabilidad de los taludes.

*Ilustración 28*  
*Compactación*



*Fuente: (Burbano Iván, 2024)*

#### 3.1.1.2 QUÍMICA:

La estabilización química implica la adición de materiales o productos químicos al suelo para modificar sus propiedades, ya sea a través de reacciones fisicoquímicas o creando una matriz que une las partículas del suelo (Bahar, 2004). Algunos autores como Bahar (2004) sugieren que la combinación de métodos de estabilización mecánica, como la compactación y vibración, incluyendo además técnicas de compactación química puede

mejorar significativamente la resistencia y durabilidad del suelo (Ilustración 29). Otra técnica es la estabilización biológica, que utiliza enzimas biológicas para incrementar la cohesión y compactación del suelo. Este proceso se basa en un intercambio catiónico en la estructura del suelo, que acelera el proceso de cementación (Rivera, Aguirre-Guerrero, Mejía de Gutiérrez, & Orobio, 2020).

*Ilustración 29*  
*Estabilización de Suelos con Emulsión Asfáltica*



*Fuente: (Burbano Iván, 2024)*

El cemento Portland es el aglutinante más empleado a nivel global debido a su capacidad para estabilizar una amplia gama de suelos, siendo particularmente efectivo en suelos arenosos y en suelos arcillosos con índices de plasticidad medianos a bajos (Pandey & Rabbani, 2017). El material resultante de la mezcla de suelo con diferentes proporciones de cemento Portland se denomina suelo-cemento. Este material se utiliza en diversas aplicaciones de infraestructura civil, como bases o subbases para la construcción de carreteras, terraplenes, diques y estabilización de cimentaciones, entre otros usos (Rivera, Aguirre-Guerrero, Mejía de Gutiérrez, & Orobio, 2020).

### **3.1.2 ESTIMACIÓN DE CEMENTO PARA ESTABILIZACIÓN**

La investigación llevada a cabo por la Asociación Nacional del Cemento Portland, basada en más de 2,000 muestras de suelos, proporciona datos sobre las cantidades de cemento necesarias para distintos tipos de suelos. Los requerimientos de cemento para suelos subterráneos están detallados en la Tabla 13. También se especifican las

necesidades para suelos en diversos horizontes según esta asociación (Epps, Dunlap, Gallaway, & Currin, 1971).

En general, se ha determinado que se necesita más cemento para suelos como limos y arcillas, mientras que la cantidad necesaria para suelos granulares y arenosos es menor. Sin embargo, los suelos mal graduados requieren una mayor cantidad de cemento debido a su falta de arcillas o limos. En términos generales, un suelo bien graduado con grava y arena, y con una cantidad de material fino de baja plasticidad, necesita aproximadamente un 5% de cemento en peso. Para arenas mal graduadas sin plasticidad, este porcentaje aumenta al 9%. En cuanto a otros suelos arenosos, se requiere un 7% de cemento. La tabla a continuación ofrece rangos estimados de dosificación de cemento según la clasificación de suelos de la AASHTO, aunque estos valores pueden ajustarse o verificarse en función de los resultados obtenidos (Association, Soil-Cement Construction Handbook, 1995).

Tabla 13

Contenido de Cemento para Estabilización de Suelos según Clasificación AASHTO

Cemento requerido para varios tipos de suelos					
Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS	Rango usual de cemento		Contenido estimado de cemento	Contenido de cemento*
		Volumen (%)	Peso (%)		
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM	5 - 7	3 - 5	5	3 - 5 - 7
A-1-b	GM, GP, SM, SP	7 - 9	5 - 8	6	4 - 6 - 8
A-2	GM, GC, SM, SC	7 - 10	5 - 9	7	5 - 7 - 9
A-3	SP	8 - 12	7 - 11	9	7 - 9 - 11
A-4	CL, ML	8 - 12	7 - 12	10	8 - 10 - 12
A-5	ML, MH, OH	8 - 12	8 - 13	10	8 - 10 - 12
A-6	CL, CH	8 - 14	9 - 15	12	10 - 12 - 14
A-7	OH, MH, CH	8 - 14	10 - 16	13	11 - 13 - 15

\*Contenido estimado de cemento para pruebas en suelos húmedos, secos, congelados

Fuente: (Epps, Dunlap, Gallaway, & Currin, 1971)

Los mecanismos por los cuales el suelo es estabilizado por el cemento son la hidratación, el intercambio catiónico, floculación y aglomeración, carbonatación y reacciones puzolánicas:

- **Hidratación:** El cemento es una sustancia compleja que incluye una variedad de compuestos. Entre los más destacados se encuentran el C3S, C2S, C3A y C4AF, que desempeñan roles cruciales. El hidróxido de calcio eleva el pH del agua, creando así un entorno propicio para el proceso de estabilización (Pandey & Rabbani, 2017).
- **Intercambio Catiónico:** El segundo mecanismo clave en la estabilización de suelos cohesivos implica que un catión del cemento reemplaza o intercambia posiciones con otro catión en la estructura cristalina del mineral de arcilla. Este intercambio suele llevar a una disminución en la carga superficial neta de las partículas de arcilla, reduciendo así su atracción por las moléculas de agua libre (Pandey & Rabbani, 2017).
- **Carbonatación:** La cal producida durante la hidratación del cemento reacciona con el dióxido de carbono en el aire, formando carbonato de calcio. Este proceso contribuye a aumentar la resistencia de los materiales que han sido estabilizados con cemento (Pandey & Rabbani, 2017).

En la estabilización de suelos, el uso de suelo-cemento compactado, es uno de los métodos más habituales. Esta mezcla contiene entre un 4% y un 25% de cemento Portland Ordinario (OPC) en relación al peso del suelo seco y se compacta para aumentar su resistencia. Los suelos que obtienen los mejores resultados con el OPC son los materiales granulares bien gradados con suficiente contenido de material fino, creando una especie de agregado flotante en la mezcla (Dunlap, 1975)

Diversos estudios han demostrado que el suelo-cemento, una mezcla densamente compactada de suelo, cemento y agua, se utiliza extensamente como base económica para pavimentos de carreteras, aeropuertos, protección de taludes en terraplenes, márgenes de arroyos, impermeabilización, estructuras de control de pendientes, embalses y revestimientos de canales. El cemento añadido al suelo une las partículas, mejorando así las características de compactación, compresibilidad y propiedades ingenieriles. El cemento puede utilizarse para estabilizar cualquier tipo de suelo, siempre que el contenido orgánico no supere el 2% (Qadir, 2018).

La estabilización con cemento resulta particularmente efectiva para suelos granulares, ya que requiere menos cantidad de cemento, así como para materiales arcillosos con bajo índice de plasticidad, que pueden cambiar su comportamiento de un estado normalmente consolidado a uno sobreconsolidado. Es crucial que la mezcla de suelo-

cemento esté bien compactada y tenga un contenido de humedad óptimo para maximizar la capacidad de hidratación del cemento (Qadir, 2018).

Factores que se debe tener en cuenta para la estabilización de suelos:

- a. Naturaleza del suelo
- b. Proporción de cemento en la mezcla
- c. Contenido de humedad en la compactación
- d. Densidad obtenida en la compactación
- e. Curado de la mezcla compactada

Las características básicas que se deben conocer de un suelo son:

- Límites de Atterberg
- Granulometría
- Relación peso unitario – Humedad de los suelos

Dependiendo de las propiedades que presenten los materiales, y las necesidades que debe cumplir dicho suelo, se determina el tipo de estabilización de suelos, este proceso se lo realiza para generar cambios en su estructura, es decir, aumentar la capacidad de carga y la resistencia de los suelos.

### **3.1.3 PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS DE SUELOS TRATADAS CON CEMENTO**

Las propiedades más comunes de los suelos estabilizados son:

- Estabilidad volumétrica
- Resistencia
- Permeabilidad
- Compresibilidad
- Durabilidad

Se pueden emplear uno o varios métodos de estabilización para mejorar diferentes propiedades del suelo. Sin embargo, es posible que algunos de estos métodos produzcan efectos contradictorios, de modo que mejorar una propiedad del suelo no implique necesariamente el deterioro de otra. Por lo tanto, la estabilización debe considerarse como una medida preventiva en lugar de una corrección para condiciones

desfavorables que puedan afectar negativamente el desempeño del suelo (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

### 3.1.3.1 ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA

La estabilidad volumétrica se refiere a las variaciones en el volumen de suelos expansivos, causadas por cambios en la humedad debido a fluctuaciones estacionales o actividades de construcción, estos efectos de cambios volumétricos pueden provocar fallas en la estructura del pavimento (Ilustración 30). La estabilización de suelos se presenta como una opción para tratar o mitigar los problemas asociados con suelos que son propensos a cambios volumétricos en respuesta al agua. Por lo tanto, al estabilizar suelos expansivos, como las arcillas, se busca convertirlos en una masa más rígida, con partículas unidas por enlaces fuertes que puedan soportar las cargas y las presiones internas derivadas de la expansión (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018).

*Ilustración 30*  
*Falla en Carpeta Asfáltica Producida por Suelos Expansivos*



*Fuente: (Ontergis, 2024)*

### 3.1.3.2 RESISTENCIA

La resistencia de los suelos está determinada por su origen. La compactación es un método de estabilización mecánica que tiene como objetivo aumentar la resistencia de los suelos (Ilustración 31). Sin embargo, aplicar una carga de compactación mayor no necesariamente conduce a mayores valores de resistencia. A continuación, se presentan algunos métodos de estabilización para mejorar la resistencia de los suelos (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018):

- Compactación
- Vibroflotación
- Precarga
- Drenaje
- Estabilización mecánica
- Estabilización química

*Ilustración 31*  
*Compactación de Suelo Estabilizado*



*Fuente: (Burbano Iván, 2024)*

### **3.1.3.3 PERMEABILIDAD**

Debido a los espacios vacíos, o poros, entre los granos del suelo, el agua puede fluir a través de ellos. Este conocimiento es crucial para calcular el grado de filtración bajo estructuras (Das, Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, 2012)

La permeabilidad se refiere a la capacidad de un medio para transmitir agua u otras sustancias; un medio es considerado permeable cuando permite el paso significativo de fluidos, mientras que es impermeable si el paso de fluido es mínimo. El suelo se clasifica como permeable si tiene poros que permiten la absorción de agua. Estos poros están interconectados, facilitando el flujo de agua. Por el contrario, si el suelo tiene pocos espacios vacíos, será considerado impermeable. La permeabilidad está influenciada por el tamaño de los poros, así como por la textura y estructura del suelo, lo que afecta la cantidad de agua que se infiltra y su movimiento a través del suelo, se define en la Tabla 14 los valores de K para los distintos tipos de suelo (Ravines, 2010).

Tabla 14  
Valores de k (permeabilidad)

**TABLA I: Valores de k en cm/seg**

	100	10	1	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>
Drenaje	Bueno						Pobre			Prácticamente impermeable		
Tipo de suelo	Grava limpia	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava			Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada			Suelos "impermeables", es decir, arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición			Suelos "impermeables", modificados por la vegetación o la descomposición. <sup>d</sup>	
Determinación directa de k	Ensayo directo del suelo "in situ" por ensayos de bombeo. Se requiere mucha experiencia, pero bien realizados son bastante exactos.						Permeámetro de carga hidráulica constante. No se requiere mayor experiencia.					
Determinación indirecta de k	Permeámetro de carga hidráulica decreciente. No se requiere mayor experiencia y se obtienen buenos resultados.			Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados dudosos. Se requiere mucha experiencia.			Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados de regular a bueno. Se requiere mucha experiencia.			Cálculos basados en los ensayos de consolidación. Resultados buenos. Se necesita mucha experiencia.		
	Por cálculo, partiendo de la curva granulométrica. Sólo aplicable en el caso de arenas y gravas limpias sin cohesión.											

Fuente: (Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006)

### 3.1.3.4 COMPRESIBILIDAD

La compresibilidad es una característica predominante en limos y arcillas, mientras que en suelos granulares como gravas y arenas, es mínima. Esta propiedad se manifiesta cuando se aplica una carga sobre el suelo, afectando aspectos como la permeabilidad y la resistencia al esfuerzo cortante, e incluso puede contribuir a deslizamientos. En los suelos de textura gruesa, como las gravas y arenas, la compresibilidad es baja debido a que sus partículas están en contacto cercano. En contraste, la compresibilidad en suelos finos se debe a la reducción de su volumen a medida que se elimina humedad y aire. La compresibilidad aumenta con la cantidad de materia orgánica y es directamente proporcional al índice de plasticidad: a mayor índice plástico, mayor es la compresibilidad del suelo (Garnica Anguas & Barrera Bucio, 2002).

### 3.1.3.5 DURABILIDAD

Esta propiedad está vinculada con la resistencia del suelo al intemperismo, la erosión o la abrasión causada por el tránsito, y suele estar asociada a los suelos que se encuentran cerca de la superficie de rodadura (Ilustración 32). Tanto los suelos naturales como los estabilizados pueden verse afectados por estos problemas. Una de las formas de mejorar esta resistencia es mediante la adición de productos químicos, cuyo tipo dependerá del suelo específico en cuestión (Montejo Fonseca, Montejo Piratova, & Montejo Piratova, 2018)

*Ilustración 32*  
*Baja Durabilidad de una Subrasante Natural*



*Fuente: (Burbano Iván, 2024)*

## CAPÍTULO IV (ANÁLISIS DE RESULTADOS)

### 4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio realizados en las muestras de suelo natural, así como en las mezclas de suelo estabilizadas con cemento Portland tipo HE en sus dosificaciones (4, 5, 6, 7 y 8 %) y TerraSil (1:200). Adicionalmente, se presentan cuadros comparativos de los ensayos donde se aprecia la variación con las distintas dosificaciones.

#### 4.2.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS

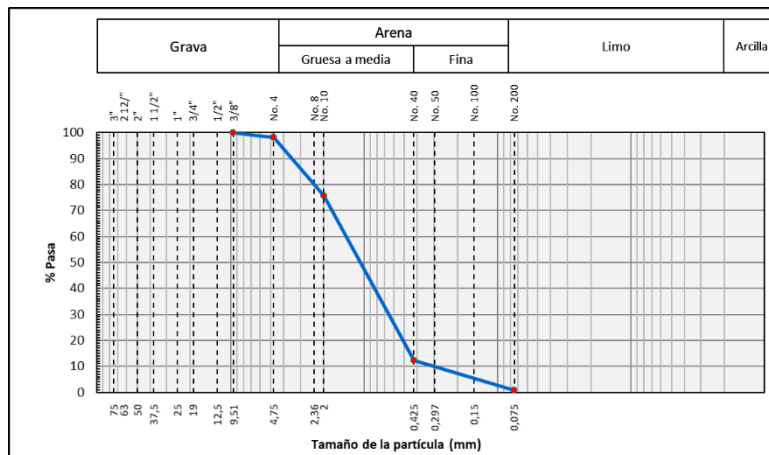
La distribución granulométrica que se obtuvo del material en la Tabla 15 de resumen se observa que este material casi no posee material fino (material pasante del tamiz N°200) menor al 5%. Los ensayos realizados de las granulometrías tienen la misma tendencia, debido a que son de un mismo stock de material (Ilustración 33)

Tabla 15  
Resumen de análisis granulométrico pumita

Análisis Granulométrico (% pasante)				
Ensayo	% pasa #4	% pasa #10	% pasa #40	% pasa #200
1	98	76	12	1
2	99	79	14	2
3	98	77	13	2
4	98	78	14	2

Fuente (Iván Burbano, 2024)

Ilustración 33  
Curva de análisis granulométrico pumita



Fuente: (Burbano Iván, 2024)

## 4.2.2 CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN SUCS Y AASHTO

Para la clasificación de la pumita, se resume los resultados en la Tabla 16, donde se clasificó al suelo con el sistema SUCS (Tabla 5) y ASSHTO (Tabla 6) de las muestras del yacimiento del km 29 vía Ibarra (Panamericana Norte), según las tablas de clasificación correspondientes, los materiales se clasifican:

**SUCS:** Arena Mal Graduada SP

**AASHTO:** A-1-b Fragmentos de grava y arena.

Este suelo no posee plasticidad por lo tanto los Límites son cero al igual que el índice de plasticidad.

Tabla 16  
Clasificación de la pumita, ASSHTO - SUCS

Ensayo	Límites de Atterberg			Granulometría				Sistema de clasificación	
	L - L	L - P	I - P	% #4	% #10	% #40	% #200	SUCS	AASHTO
1	0	0	0	98	76	12	1	SP	A-1-b
3	0	0	0	98	79	14	2	SP	A-1-b
3	0	0	0	98	77	13	2	SP	A-1-b
4	0	0	0	98	78	14	2	SP	A-1-b

Fuente: (Burbano Iván, 2024)

## 4.2.3 RELACIONES PESO UNITARIO – HUMEDAD DE LOS SUELOS

### 4.2.3.1 SUELO EN ESTADO NATURAL

Los resultados obtenidos de la compactación del suelo utilizando el método A de Proctor modificado, donde el porcentaje de material que retiene el tamiz N°4 es menor al 25% en estado natural son los siguientes, se presenta en la Tabla 17 de resumen con la densidad máxima y la humedad óptima, donde podemos denotar que el valor de la densidad del material en estado natural es de 900 gr/cm<sup>3</sup> y no supera los 909 gr/cm<sup>3</sup> y que la humedad óptima es de aproximadamente 38%.

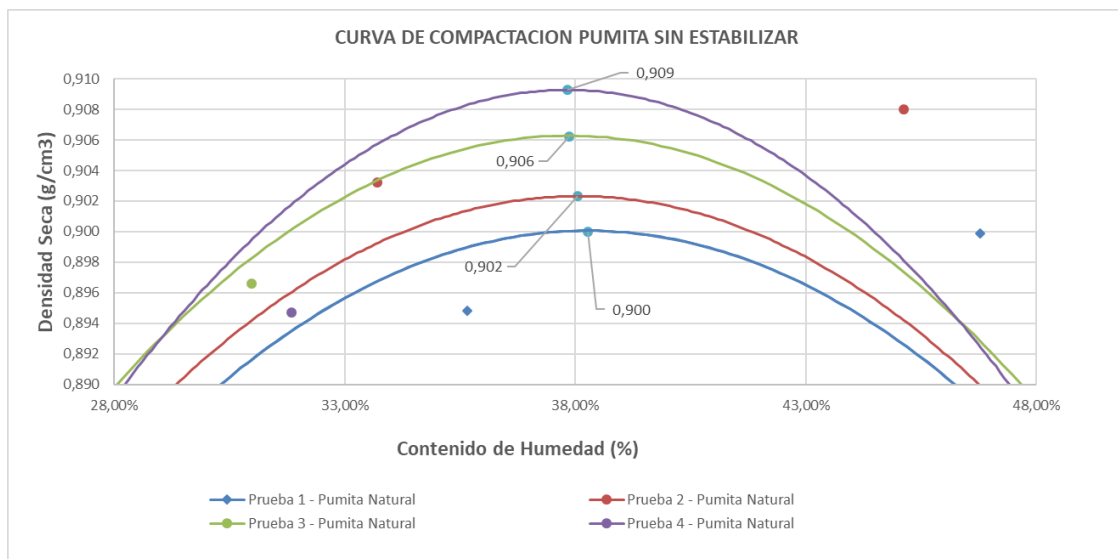
Tabla 17  
Resumen de Densidad Máxima y Humedad Óptima, sin Agentes Externos

Pumita sin agentes externos		
Ensayo	Proctor	
	Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	Humedad óptima (%)
1	0.900	38.3
2	0.902	38.1
3	0.906	37.9
4	0.909	37.8

Fuente: (Burbano Iván, 2024)

En la ilustración 34 se observa de mejor manera la tendencia de la densidad máxima y de la humedad óptima en los ensayos realizados de la pumita sin estabilizar.

Ilustración 34  
Curva de Densidades Máximas y Humedades Óptimas, sin Estabilizar



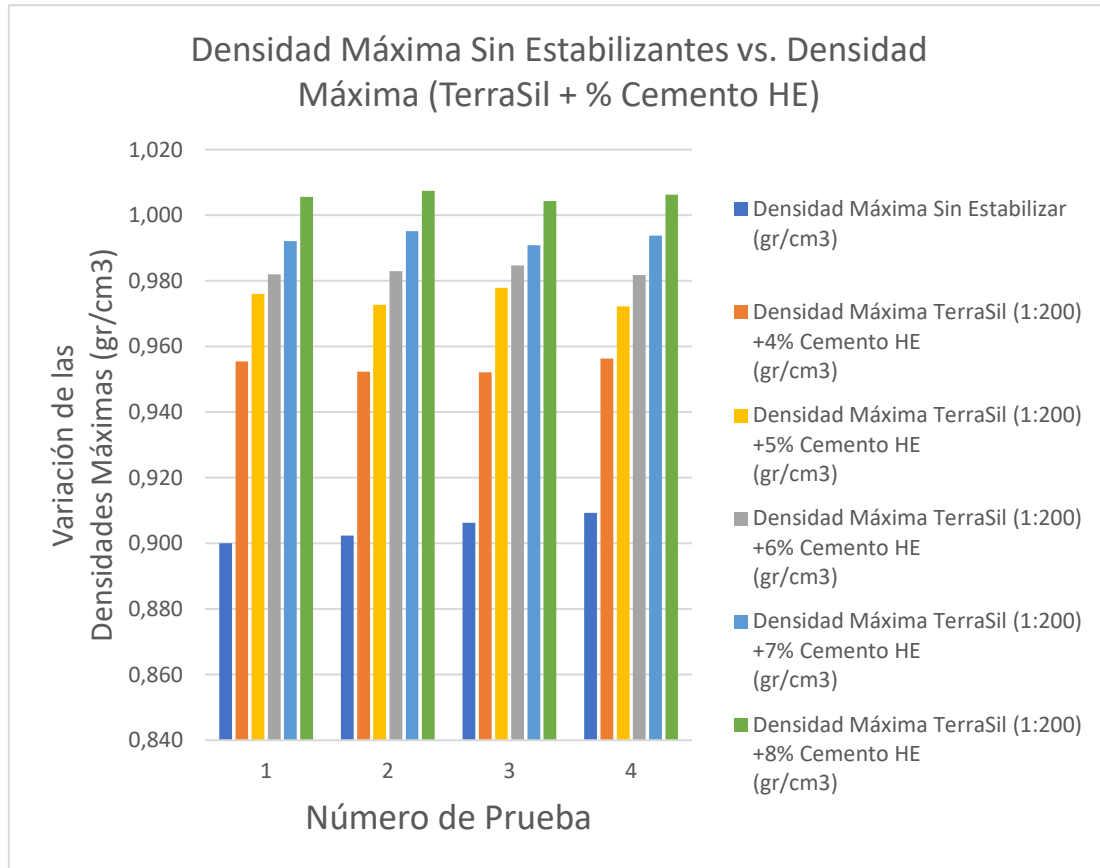
Fuente: (Burbano Iván, 2024)

#### 4.2.3.2 SUELO ESTABILIZADO

En los ensayos de compactación del suelo estabilizado se obtuvo valores directamente proporcionales en cuanto a valores de la densidad y el incremento del porcentaje de cemento, es decir que a medida que se aumenta el porcentaje de cemento, la densidad máxima aumenta. Este crecimiento es notable, ya que, con la incorporación de cemento, se alcanzaron densidades hasta de 1000 gr/cm<sup>3</sup> con el 8% de cemento. Además, cabe recalcar que debido a la inclusión del Terrasil y sumado al cemento la reducción de agua

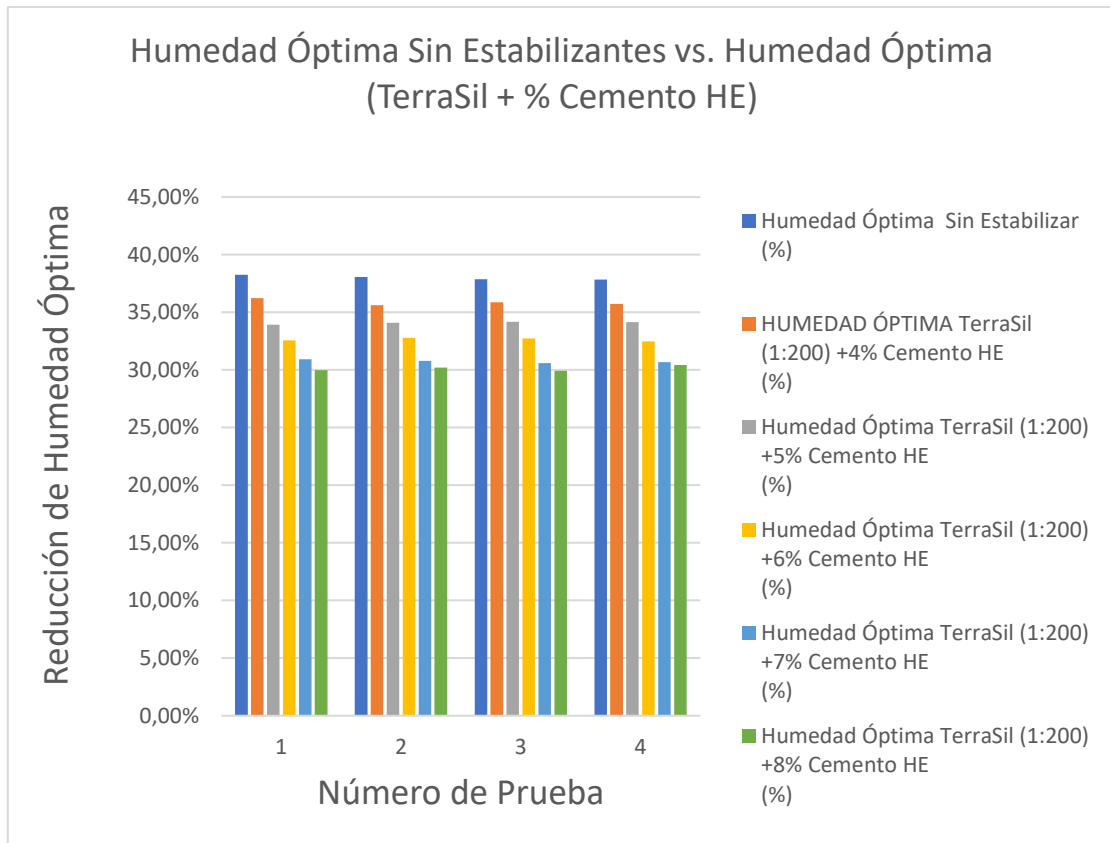
es considerable, ya que se logró reducir un 8% de la humedad óptima del suelo sin estabilizar.

Ilustración 35  
Resumen de Densidades Máximas



Fuente: (Burbano Iván, 2024)

Ilustración 36  
Resumen de Humedades Óptimas



Fuente: (Burbano Iván, 2024)

### Comparación

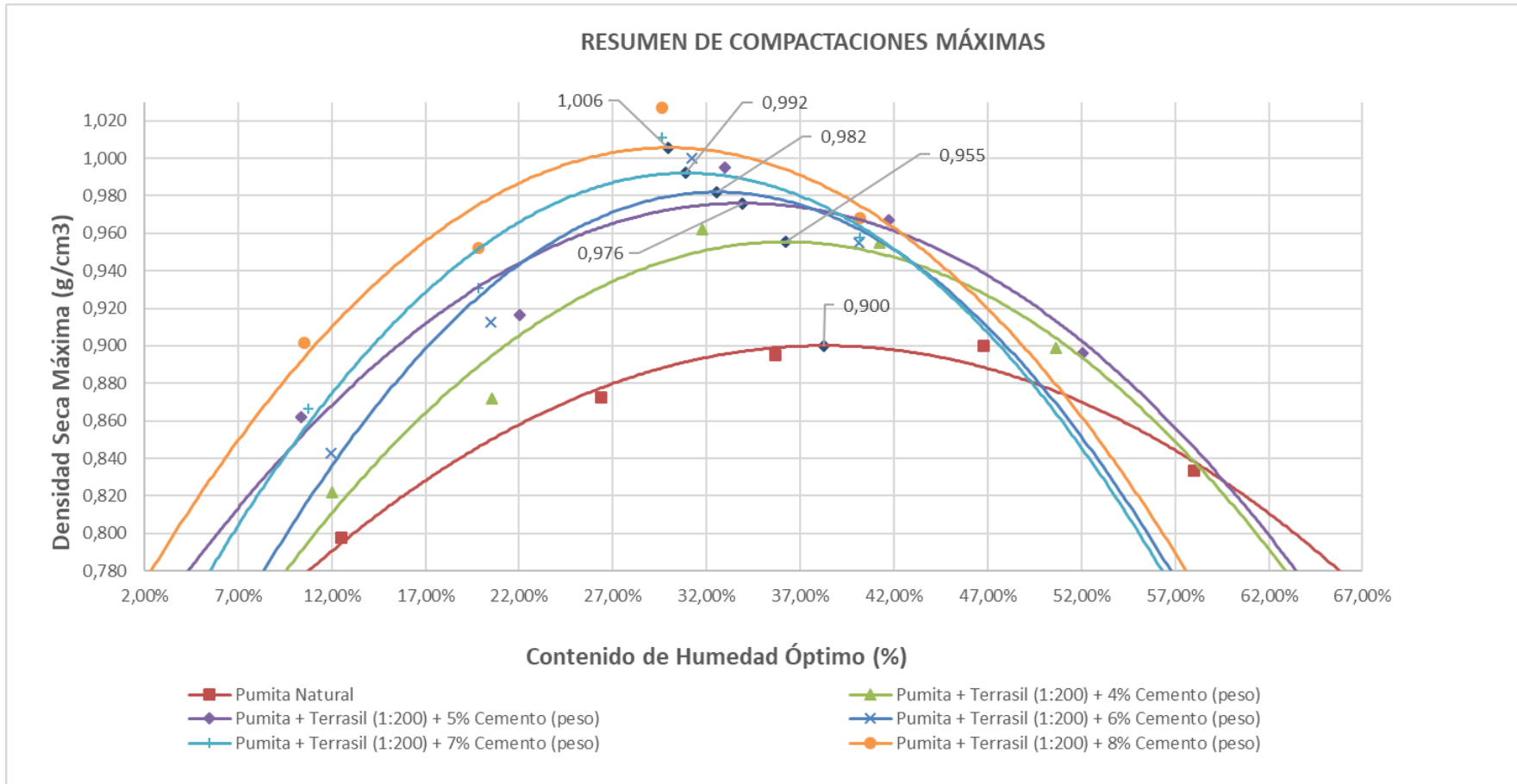
A continuación, se presenta un cuadro comparativo donde aprecia la mejora en cuanto a las propiedades del suelo estabilizado, indicando el aumento de la densidad y la reducción del contenido de humedad, debido a la evaporación por la hidratación del cemento y también por efecto del TerraSil.

Tabla 18  
Resumen de Ensayos de Compactación Proctor

Ensayos de Compactación Proctor												
Ensayo	Sin estabilizar		Terrasil (1:200) + 4% cemento HE		Terrasil (1:200) + 5% cemento HE		Terrasil (1:200) + 6% cemento HE		Terrasil (1:200) + 7% cemento HE		Terrasil (1:200) + 8% cemento HE	
	Densidad máxima (gr/cm3)	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (gr/cm3)	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (gr/cm3)	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (gr/cm3)	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (gr/cm3)	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (gr/cm3)	Humedad óptima (%)
1	0.900	38.27	0.955	36.22	0.976	33.92	0.982	32.56	0.992	30.91	1.006	29.97
2	0.902	38.05	0.952	35.63	0.973	34.10	0.983	32.78	0.995	30.77	1.007	30.19
3	0.906	37.86	0.952	35.87	0.978	34.17	0.985	32.73	0.991	30.60	1.004	29.92
4	0.909	37.83	0.956	35.72	0.972	34.14	0.982	32.47	0.994	30.66	1.006	30.42

Fuente: (Burbano Iván, 2024)

Ilustración 37  
Resumen de Compactaciones Máximas y Humedades Óptimas



Fuente: (Burbano Iván, 2024)

#### 4.2.4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE

Se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de las probetas del suelo en estado natural y estabilizado (Terrasil + dosificaciones de cemento), probetas que fueron moldeadas de acuerdo a la densidad máxima y humedad óptima obtenidas en los ensayos de Proctor modificado (tipo A). Donde se realizaron cuatro probetas cilíndricas para cada dosificación de cemento, tomando en cuenta que la dosificación del Terrasil, al ser determinada por el fabricante se mantuvo constante. De estas cuatro probetas se destinaron dos para ensayarlas a compresión a siete días y las otras dos a los 28 días de curado.

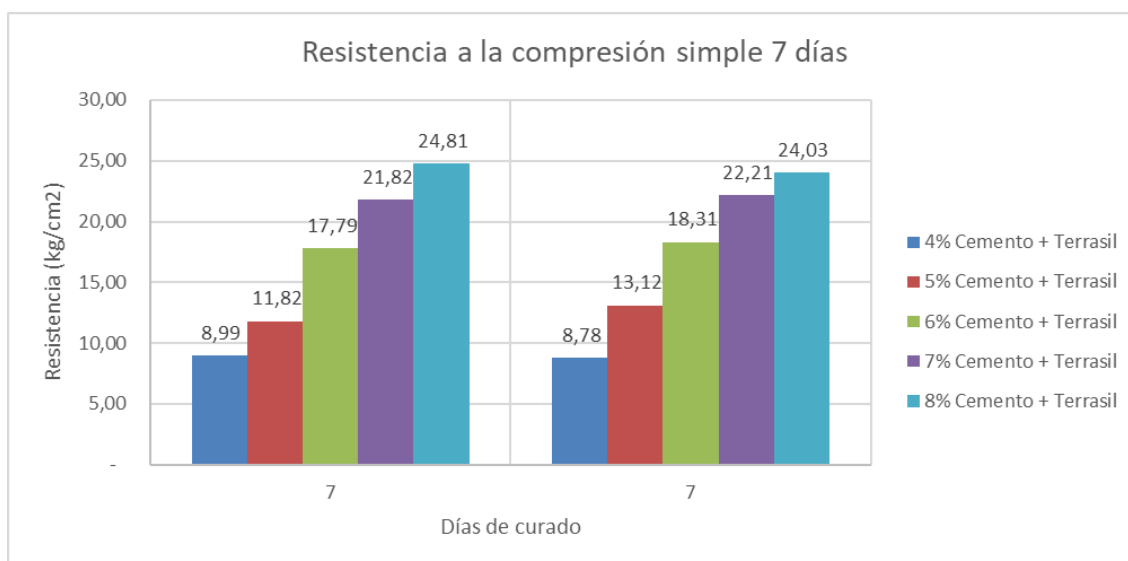
Tabla 19  
Resistencia a la compresión de probetas de suelo-cemento

Curado (días)	Terrasil + 4% cemento HE (kg/cm <sup>2</sup> )	Terrasil + 5% cemento HE (kg/cm <sup>2</sup> )	Terrasil + 6% cemento HE (kg/cm <sup>2</sup> )	Terrasil + 7% cemento HE (kg/cm <sup>2</sup> )	Terrasil + 8% cemento HE (kg/cm <sup>2</sup> )
7	8.99	11.82	17.79	21.82	24.81
28	8.78	13.12	18.31	22.21	24.03
7	13.73	15.49	23.90	25.83	31.83
28	12.85	16.04	23.34	27.34	31.82

Fuente: (Burbano Iván, 2024)

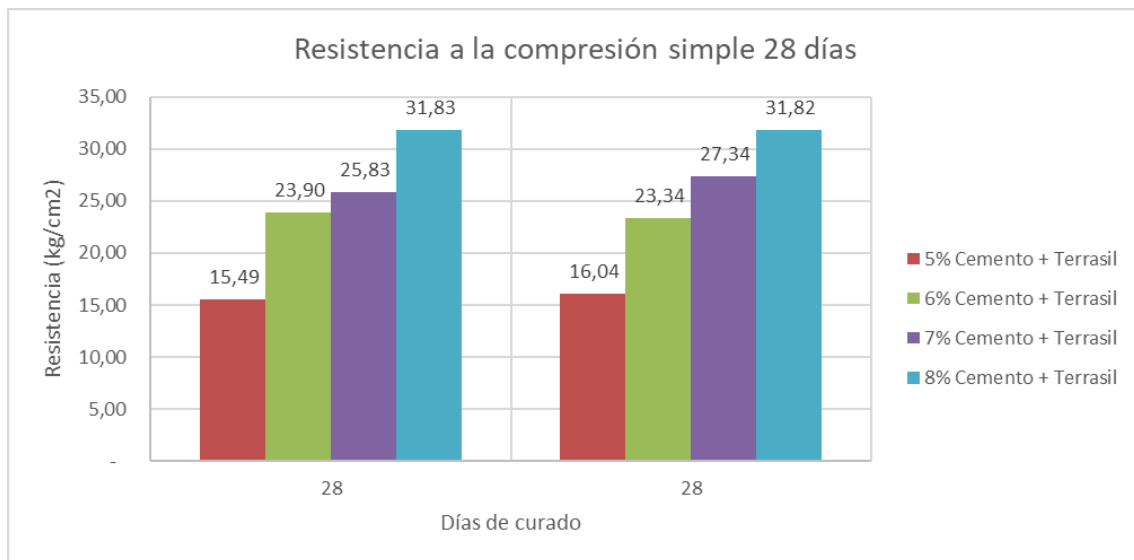
Se presenta un cuadro comparativo donde se aprecia el incremento proporcional de la resistencia a la compresión de las probetas de suelo-cemento + Terrasil.

Ilustración 38  
Resistencia a la compresión 7 días



Fuente: (Burbano Iván, 2024)

Ilustración 39  
Resistencia a la compresión a 28 días



Fuente: (Burbano Iván, 2024)

El curado del hormigón es un proceso esencial para asegurar que el cemento alcance sus propiedades óptimas de resistencia y durabilidad. Es por este motivo que, a mayor tiempo de curado, la resistencia a la compresión simple incrementa en todas las dosificaciones.

Nota: el proceso de curado de las briquetas que fueron ensayadas a compresión simple fue mediante inmersión por siete y veinte y ocho días previo a su ensayo.

## CAPÍTULO V (CONCLUSIONES)

Al encontrarnos en una zona andina, es normal encontrarse con estos materiales, característicos de lugares con una actividad volcánica considerable, por lo tanto, la idea de cambiar el material de subrasante, durante la ejecución de un proyecto no es rentable, es por eso que estabilizarla o mejorarla es una opción que puede facilitar la ejecución de la obra. Debido a las características físicas del suelo, que se obtuvieron por los ensayos realizados de análisis granulométrico, se lo clasifica como SP una arena mal graduada en el Sistema unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), mientras que en el sistema de clasificación de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) se lo clasifica como un A-1-b (fragmentos de grava y arena).

Debido a que la pumita es un material poroso, el contenido de humedad óptimo del mismo para la compactación es elevado, esto se debe a que el material es más absorbente, y también porque no contiene material fino que pueda absorber el agua.

La pumita en estado natural posee una densidad muy baja debido a la porosidad, al incrementar el cemento se obtienen valores que demuestran como mejora el comportamiento de la pumita en cuanto a sus propiedades mecánicas, no solo en el incremento de la densidad, si no, en la resistencia a la compresión. Ya que los agentes cementantes ayudan al material poroso a darle un poco de cohesión, para soportar cargas.

En el ensayo de Relación peso unitario – humedad de los suelos se determina mediante los resultados obtenidos que, el incremento de la densidad es directamente proporcional al incremento de cemento tipo HE, obteniendo un incremento de 10% entre la densidad natural y la densidad máxima obtenida con la incorporación del 8% de cemento. Por otro lado, a medida que se incrementa la cantidad de cemento para la estabilización del suelo, la humedad óptima disminuye. Por lo cual, la incorporación de cemento y Terrasil son un beneficio para mejorar las propiedades del suelo, ya que en estado natural este tipo de suelo posee humedades altas lo cual dificulta la compactación del mismo.

El TerraSil funciona como un estabilizador químico que permite reducir la capilaridad y la permeabilidad, brindándolo de manera constante, es decir que al suelo estabilizado y compactado lo vuelve hidrofóbico, mejorando la compactación.

Para el suelo estabilizado y compactado con el contenido de humedad óptimo y curados durante 28 días, la resistencia a la compresión no confinada aumentó con el aumento

del contenido de cemento. La Tabla 19 indica estos incrementos en cuanto a la resistencia no confinada. Estos resultados coinciden con los hallazgos previos sobre mezclas de suelo-cemento.

La ilustración 38 - 39 indica que a medida que aumenta el contenido de cemento, la diferencia en la resistencia a la compresión no confinada entre los especímenes preparados incrementa.

Las propiedades del suelo varían considerablemente, en algunos casos, incluso en un solo lugar; el éxito de la estabilización del suelo depende de las pruebas del suelo. Se emplean varios métodos para estabilizar el suelo, y el método debe ser verificado antes de aplicarlo en el campo.

Las carreteras construidas sobre este tipo de suelo pueden fallar. Al agregar cemento, cenizas volantes, etc., se puede estabilizar el suelo, pero con la creciente atención en las aplicaciones de nanotecnología que aporta el Terrasil en ingeniería geotécnica, la estabilización del suelo se ha convertido en un enfoque común para mejorar los suelos y cumplir con las especificaciones de diferentes proyectos.

## REFERENCIAS VI

- Akolade, S., & Alli, O. (2018). *Improvement in Bearing Capacity of Clayey and Sandy Soil Using Geotextile and Terrasil*. Ibadan, Nigeria: International Journal of Science and Research (IJSR).
- Altaf, H. (2021). *Soil Stabilization Using Human Hair and Terrasil For its Potential Use in Sub grade*. Kashmir, India: International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET).
- Angelone, S., Garibay, M. T., & Cauhapé, M. (2006). *Permeabilidad de Suelos. Permeabilidad de Suelos*.
- Association, P. C. (1992). *Soil-Cement Laboratory Handbook*. Skokie, Illinois: Portland Cement Association.
- Association, P. C. (1995). *Soil-Cement Construction Handbook*. Odl Orchard Road, Skokie, Illinois: PCA.
- ASTM C136-19. (2019). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*.
- ASTM D1633-17 . (2017). *Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders*.
- ASTM D2487. (2017). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*.
- ASTM D3282-24. (2024). *Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*.
- Bahar, R. (2004). *Performance of compacted cement-stabilised soil*. Argelia: ELSEVIER.
- Bamitale Dorcas, O.-A., & Abiodun Uduebor, M. (2019). *Effect of Compactive Effort on Compaction Characteristics of Lateritic Soil Stabilized With Terrasil*. Akure, Nigeria: Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies.
- Bolton Seed, H., & Chan, C. (1959). *Structure and Strength Characteristics of Compacted Clays*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division.
- Chiaro, G., Gazzellone , A., & Modoni , G. (2012, ). *Laboratory investigation on the compactability of clean sands*. Wollongong, Australia: Faculty of Engineering and Informatio.
- Das, B. M. (2012). *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones*. Cengage Learning.
- Das, B. M. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* . Cruz Manca, Santa Fe: Cengage Learning.
- Dunlap, W. A. (1975). *United States Air Force Soil Stabilization Index Sistem - A Validation*. Texas: NTIS .
- Egorov, A. (2024). *Dreamstime*. Obtenido de Dreamstime:  
<https://es.dreamstime.com/illustration-d-de-asphalt-road-paving-en-el-corte-transversal-tierra-image110486542>

- Epps, Dunlap, Gallaway, & Currin. (1971). *Highway Research Record 351*. Washington, D.C., EE. UU.: Highway Research Board/Transportation Research Board.
- Fredlund, D., & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Singapore: John Wiley & Sons.
- Garnica Anguas, P., & Barrera Bucio, M. (2002). *INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE SUELOS NO SATURADOS*. Sanfandilla: IMT.
- Germans Boada SA. (25 de 8 de 2024). *RUBI BLOG*. Obtenido de RUBI BLOG: <https://www.rubi.com/es/blog/cemento-portland-que-es/>
- González Boada, J. (19 de Mayo de 2006). *González Boada*. Obtenido de jgb-granulometria: <https://www.jordigonzalezboada.com/geotecnia/descargas.html>
- Google. (13 de Agosto de 2024). *GOOGLE MAPS*. Obtenido de <https://www.google.com.ec/maps/@-0.7058893,-78.5838791,16.12z?hl=es&entry=ttu>
- Grasser, K., & Minke, G. (1990). *Building with Pumice*. Braunschweig; Wiesbaden: Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien - GATE.
- Guiza Galeano, R., Brayan Armando, B., & García Marín, F. (2019). *Estudio exploratorio de arcilla expandida y piedra pómez como agregados en la producción de concretos ligeros*. Bogotá, Colombia: Ingeniería y Desarrollo.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Illinois, EE. UU: Portland Cement Association.
- López González, P. (2023). Evaluación del Mejoramiento de Suelos Arcillosos Empleando Cemento Base Pumicita en la Localidad de dos Arroyos, Juchique de Ferrer. *Ciencia Latina Internacional*, 13.
- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y COMUNICACIÓN. (2002). *ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS Y PUENTES*. Quito, Ecuador.
- Mishra, C., & Vasu, P. (2017). *Scientificallly Surveying the Usage of Terrasil Chemical for Soil Stabilization*. Anand, India: International Journal of Research in Advent Technology.
- Montejo Fonseca, A., Montejó Piratova, A., & Montejó Piratova, A. (2018). *Estabilización de Suelos*. Bogota: Ediciones de la U.
- NTE INEN 151. (2010). *CEMENTO HIDRÁULICO. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS*. Quito, Ecuador.
- NTE INEN 152. (2010). *CEMENTO PORTLAND REQUISITOS*. Quito, Ecuador.
- NTE INEN 696. (2011). *ÁRIDOS. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ÁRIDOS FINO Y GRUESO*. QUITO, ECUADOR.
- NuhoLlu, Ç., Tapan, M., Okutan, M., AydJn, S., YalçJn, Z., Orhan, E., . . . Orak, S. (2014). *Resistivity, ESR, and Radiation Shielding Properties of the Volcanic Rock Materials*. Istanbul, Turkey: Hindawi Publishing Corporation.

- Ontergis. (20 de 08 de 2024). *OnterGIS-Blog*. Obtenido de OnterGIS-Blog: <https://ontergisblog.wordpress.com/2016/08/22/los-suelos-expansivos-repercusiones-en-estructuras/>
- Pandey, A., & Rabbani, A. (2017). *STABILISATION OF PAVEMENT SUBGRADE SOIL USING LIME AND CEMENT: REVIEW*. Raipur, India: IRJET.
- Paul Garnica Anguas, J. A. (2002). *Mecánica de materiales para pavimetos*. Querétaron México.
- Pinyol Puigmartí, N., Gens, A., & Alonso, E. (2013). *Compacted soil behaviour: initial state, structure and constitutive modelling*. Barcelona, España: ICE Publishing.
- Qadir, J. O. (2018). *Strength Behaviour of Cement Stabilised Dredged Soil*. Springer International Publishing AG.
- Rashad, A. (2019). *An Overview of Pumice Stone as a Cementitious Material – the Best Manual for Civil Engineer*. Cairo, Egypt: Springer.
- Ravines, M. A. (2010). *Pruebas con un producto enzimático como agente estabilizador de suelos para carreteras*. Piura.
- Rivera, J., Aguirre-Guerrero, A., Mejía de Gutiérrez, R., & Orobio, A. (2020). *Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión)*. Colombia: doi.
- Saheed , A., & Olatunji Sunday, O. (2014). *Application of Geogrids on the Geotechnical Properties of Subgrade Materials under Soaked Condition*. Ogbomosh, Nigeria: IISTE.
- SANJUÁN BARBUDO, M. Á., & CHINCHÓN YEPES, S. (2004). *INTRODUCCIÓN A LA FABRICACIÓN Y NORMALIZACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND*. Alicante, España: Unión de Editoriales Universidad de Alicante.
- Shalal, A. (2012). *Effect of Compaction on Strength of Soil-Pozzlana Mixture*. Journal of Engineering and Sustainable Development (JEASD).
- Singh, S. (2017). *Microstructural Analysis of Clay after Treatment with Terrasil – A Nano Chemical* . International Journal of Scientific & Engineering Research.
- Sndoval Vallejo, E. A., & Rivera Mena, W. A. (2019). Correlación del CBR con la resistencia a la compresión confinada. *Ciencia e Ingeniería Neogranadiana*, 17.
- Taha, M. R. (2009). *Geotechnical Properties of Soil-Ball Milled Soil Mixtures*. Malasia: ResearchGate.
- U.S. Geological Survey. (2023). *MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2023*. Reston, Virginia: U.S. Government Publishing Office.
- Walker, C., Heitor , A., & Clarke, B. (2023). *Impact of drying-wetting cycles on the small strain behaviour of compacted clay*. Leeds, Inglaterra: ELSEVIER.
- Yepes Piqueras, V. (23 de Enero de 2014). *Universidad Politécnica de Valencia*. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2014/01/23/la-estabilizacion-de-suelos/>
- Zydex. (s.f.). *Terrasil*. Gujarat. INDIA.

## ANEXOS VII

### 7.1 Ensayo de Análisis Granulométrico de los agregados (Pumita Natural)



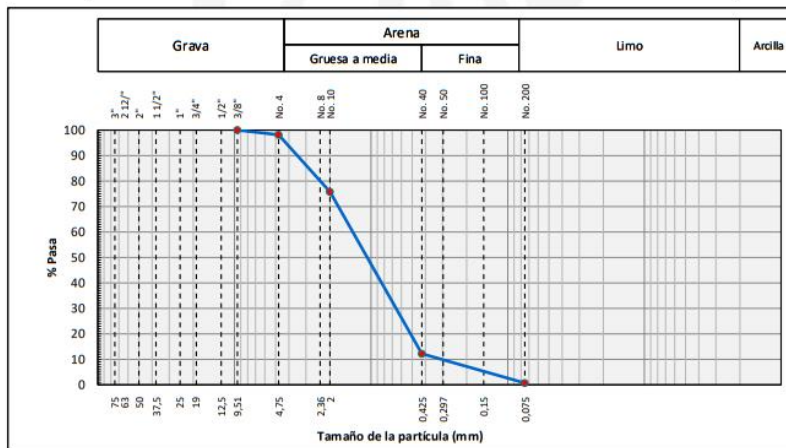
#### ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ARIDOS, FINO Y GRUESO

OBRA: Tesis Iván Burbano  
 LOCALIZACION: -  
 MUESTRA: Pumita Natural  
 DESCRIPCION: Prueba 1 - Pumita Natural  
 NORMA: INEN 696/697

FECHA: 15/1/2024  
 SOLICITADO POR: -  
 FISCALIZACION: -  
 CONTRATISTA: -  
 HOJA: 1 de 1

Análisis Granulométrico

TAMIZ		PESO RETENIDO PARCIAL	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO	% QUE PASA	% ESPECIFICADO
(pulg)	(mm)					
3"	75	-	-	-	-	-
2 1/2"	63	-	-	-	-	-
2"	50	-	-	-	-	-
1 1/2"	37,5	-	-	-	-	-
1"	25,0	-	-	-	-	-
3/4"	19,0	-	-	-	-	-
1/2"	12,5	-	-	-	-	-
3/8"	9,5	-	-	-	100	-
N°4	4,75	3,7	3,7	1,85	98,15	-
PASA N°4						
N°8	2,36	-	-	-	-	-
N°10	2,00	44,8	48,5	24,25	75,75	-
N°16	1,18	-	-	-	-	-
N°30	0,600	-	-	-	-	-
N°40	0,425	127,1	175,6	87,80	12,20	-
N°50	0,297	-	-	-	-	-
N°100	0,150	-	-	-	-	-
N°200	0,075	23,0	198,6	99,30	0,70	-
< N°200						
TOTAL FINOS		200,00				
TOTAL		200,00				





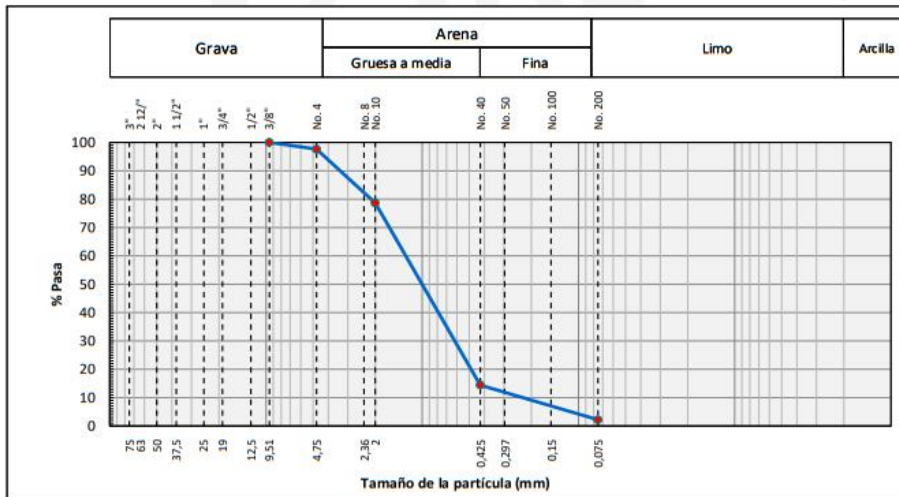
**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ARIDOS, FINO Y GRUESO**

OBRA: Tesis Iván Burbano  
LOCALIZACIÓN: -  
MUESTRA: Pumita Natural  
DESCRIPCIÓN: Prueba 2 - Pumita Natural  
NORMA: INEN 696/697

FECHA: 15/1/2024  
SOLICITADO POR: -  
FISCALIZACIÓN: -  
CONTRATISTA: -  
HOJA: 1 de 1

**Análisis Granulométrico**

TAMIZ		PESO RETENIDO PARCIAL	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO	% QUE PASA	% ESPECIFICADO
(pulg)	(mm)					
3"	75	-	-	-	-	-
2 1/2"	63	-	-	-	-	-
2"	50	-	-	-	-	-
1 1/2"	37,5	-	-	-	-	-
1"	25,0	-	-	-	-	-
3/4"	19,0	-	-	-	-	-
1/2"	12,5	-	-	-	-	-
3/8"	9,5	-	-	-	100	-
N°4	4,75	3,8	3,8	2,38	97,63	-
PASA N°4						
N°8	2,36	-	-	-	-	-
N°10	2,00	30,4	34,2	21,38	78,63	-
N°16	1,18	-	-	-	-	-
N°30	0,600	-	-	-	-	-
N°40	0,425	102,7	136,9	85,56	14,44	-
N°50	0,297	-	-	-	-	-
N°100	0,150	-	-	-	-	-
N°200	0,075	19,6	156,5	97,81	2,19	-
< N°200						
TOTAL FINOS		160,00				
TOTAL		160,00				



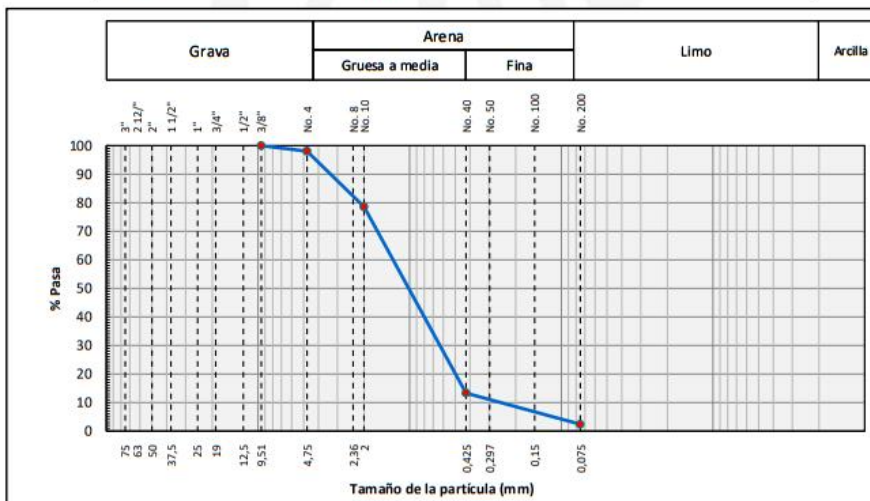
**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ARIDOS, FINO Y GRUESO**

OBRA: Tesis Iván Burbano  
LOCALIZACIÓN: -  
MUESTRA: Pumita Natural  
DESCRIPCIÓN: Prueba 3 - Pumita Natural  
NORMA: INEN 696/697

FECHA: 16/1/2024  
SOLICITADO POR: -  
FISCALIZACIÓN: -  
CONTRATISTA: -  
HOJA: 1 de 1

**Análisis Granulométrico**

TAMIZ		PESO RETENIDO PARCIAL	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO	% QUE PASA	% ESPECIFICADO
(pulg)	(mm)					
3"	75	-	-	-	-	-
2 1/2"	63	-	-	-	-	-
2"	50	-	-	-	-	-
1 1/2"	37,5	-	-	-	-	-
1"	25,0	-	-	-	-	-
3/4"	19,0	-	-	-	-	-
1/2"	12,5	-	-	-	-	-
3/8"	9,5	-	-	-	-	100
N°4	4,75	4,1	4,1	1,95	98,05	-
PASA N°4		-	-	-	-	-
N°8	2,36	-	-	-	-	-
N°10	2,00	40,9	45,0	21,43	78,57	-
N°16	1,18	-	-	-	-	-
N°30	0,600	-	-	-	-	-
N°40	0,425	137,0	182,0	86,67	13,33	-
N°50	0,297	-	-	-	-	-
N°100	0,150	-	-	-	-	-
N°200	0,075	23,0	205,0	97,62	2,38	-
< N°200		-	-	-	-	-
TOTAL FINOS		210,00				
TOTAL		210,00				



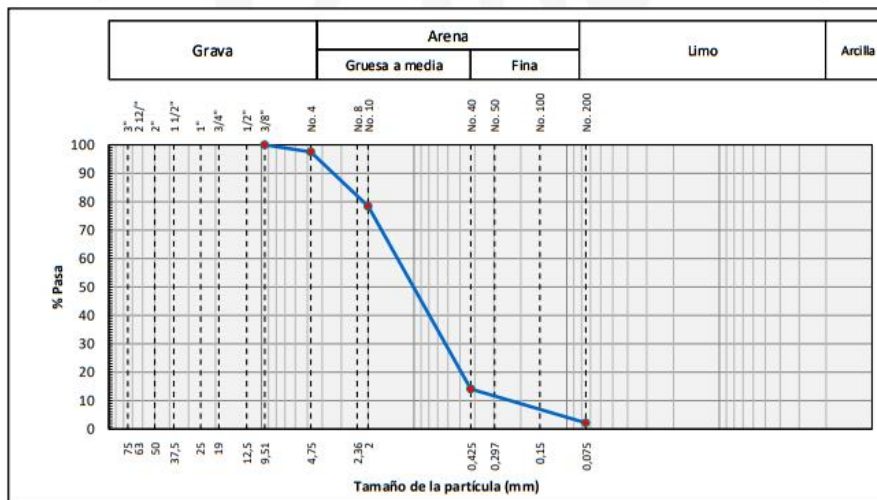
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ARIDOS, FINO Y GRUESO

OBRA: Tesis Iván Burbano  
LOCALIZACIÓN: -  
MUESTRA: Pumita Natural  
DESCRIPCIÓN: Prueba 4 - Pumita Natural  
NORMA: INEN 696/697

FECHA: 16/1/2024  
SOLICITADO POR: -  
FISCALIZACIÓN: -  
CONTRATISTA: -  
HOJA: 1 de 1

Análisis Granulométrico

TAMIZ		PESO RETENIDO PARCIAL	PESO RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO	% QUE PASA	% ESPECIFICADO
(pulg)	(mm)					
3"	75	-	-	-	-	-
2 1/2"	63	-	-	-	-	-
2"	50	-	-	-	-	-
1 1/2"	37,5	-	-	-	-	-
1"	25,0	-	-	-	-	-
3/4"	19,0	-	-	-	-	-
1/2"	12,5	-	-	-	-	-
3/8"	9,5	-	-	-	100	-
N°4	4,75	4,9	4,9	2,47	97,53	-
PASA N°4						
N°8	2,36	-	-	-	-	-
N°10	2,00	37,9	42,8	21,62	78,38	-
N°16	1,18	-	-	-	-	-
N°30	0,600	-	-	-	-	-
N°40	0,425	127,3	170,1	85,91	14,09	-
N°50	0,297	-	-	-	-	-
N°100	0,150	-	-	-	-	-
N°200	0,075	23,6	193,7	97,83	2,17	-
< N°200						
TOTAL FINOS		198,00				
TOTAL		198,00				



## 7.2 Ensayo de Relación Peso Unitario – Humedad de los Suelos (Pumita Natural)



### RELACIONES PESO UNITARIO - HUMEDAD DE LOS SUELOS

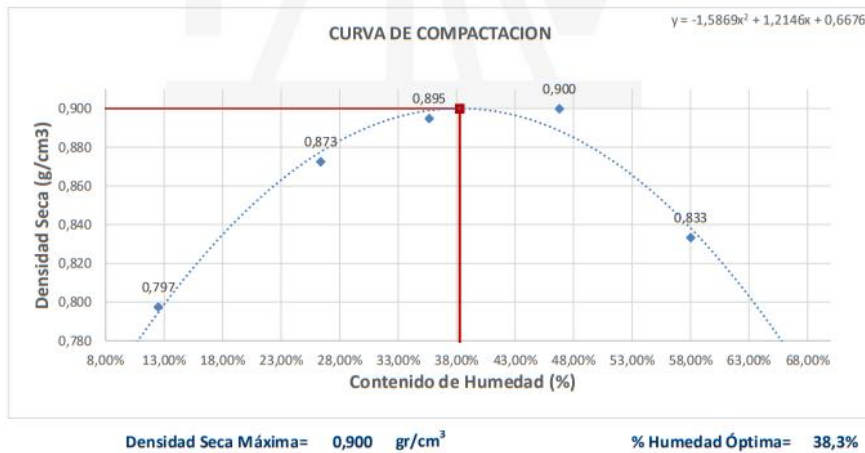
OBRA: Tesis Iván Bubrbano  
 LOCALIZACION: -  
 MUESTRA: Pumita Natural  
 DESCRIPCION: Prueba 1 - Pumita Natural  
 NORMA: AASHTO T 180

CONTRATISTA: -  
 FISCALIZA: -  
 LABORATORIO: -  
 FECHA DE MUESTREO: 23/1/2024  
 FECHA DE ENSAYO: 25/1/2024

METODO: A  
 No. CAPAS: 5  
 PESO MARTILLO: 10 lbs.  
 DIMENSIONES: Diámetro= 102,79 mm Alto= 116,01 mm

N° GOLPES POR CAPA: 25  
 ALTURA DE CAIDA: 18"  
 PESO DEL MOLDE: 3736,4 g  
 VOL. DEL MOLDE: 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4600		4798		4905		5008		5004	
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g	
Peso Suelo húmedo (gr)	863,6		1061,6		1168,6		1271,6		1267,6	
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	0,897		1,103		1,214		1,321		1,317	
Cápsula No.	Y	140	F5	B1	56	14	125	37	58	57
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	56,136	55,316	49,925	50,695	53,315	55,800	62,418	55,905	72,180	67,221
Peso cap. + suelo seco (gr)	51,932	51,091	43,175	43,754	44,045	45,759	48,128	43,582	52,100	48,793
Peso de Cápsula	18,515	17,065	17,425	17,612	17,789	17,871	17,451	17,354	17,451	17,065
Contenido de Humedad %	12,58%	12,42%	26,21%	26,55%	35,31%	36,00%	46,58%	46,98%	57,95%	58,08%
Humedad promedio %	12,50%		26,38%		35,66%		46,78%		58,02%	
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,797		0,873		0,895		0,900		0,833	



0989577865-0969402222

(593-2) 2025540

Leónidas Proaño N5-106 y Panamericana Norte



inggeopav@hotmail.com

www.inggeopav.com

@suelosinggeopav

RELACIONES PESO UNITARIO -  
HUMEDAD DE LOS SUELOS

OBRA: Tesis Iván Bubrbano  
LOCALIZACION: -  
MUESTRA: Pumita Natural  
DESCRIPCION: Prueba 2 - Pumita Natural  
NORMA: AASHTO T 180

CONTRATISTA: -  
FISCALIZA: -  
LABORATORIO: -  
FECHA DE MUESTREO: 23/1/2024  
FECHA DE ENSAYO: 25/1/2024

METODO: A  
No. CAPAS: 5  
PESO MARTILLO: 10 lbs.  
DIMENSIONES: Diámetro= 102,79 mm Alto= 116,01 mm

N° GOLPES POR CAPA: 25  
ALTURA DE CAIDA : 18"  
PESO DEL MOLDE: 3736,4 g  
VOL. DEL MOLDE: 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4613		4724		4899		5005		5000	
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g	
Peso Suelo húmedo (gr)	876,6		987,6		1162,6		1268,6		1263,6	
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	0,911		1,026		1,208		1,318		1,313	
Cápsula No.	58	57	33	29	53	26	54	60	58	57
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	52,832	53,349	53,094	53,645	55,470	56,657	60,034	64,868	72,180	67,221
Peso cap. + suelo seco (gr)	48,813	49,330	46,598	47,088	45,943	46,907	46,786	50,100	52,100	48,793
Peso de Cápsula	17,233	17,059	17,425	17,612	17,789	17,871	17,451	17,354	17,451	17,065
Contenido de Humedad %	12,73%	12,45%	22,27%	22,25%	33,84%	33,58%	45,16%	45,10%	57,95%	58,08%
Humedad promedio %	12,59%		22,26%		33,71%		45,13%		58,02%	
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,809		0,839		0,903		0,908		0,831	



**RELACIONES PESO UNITARIO -  
HUMEDAD DE LOS SUELOS**

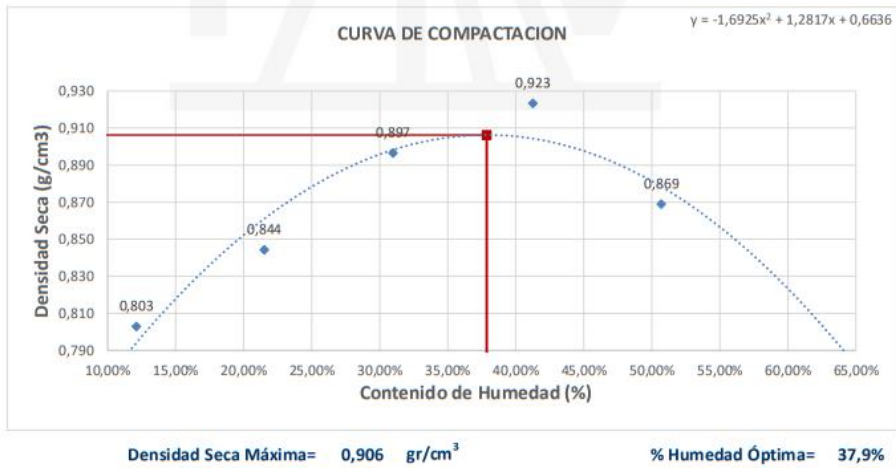
**OBRA:** Tesis Iván Bubrbano  
**LOCALIZACION:** -  
**MUESTRA:** Pumita Natural  
**DESCRIPCION:** Prueba 3 - Pumita Natural  
**NORMA:** AASHTO T 180

**CONTRATISTA:** -  
**FISCALIZA:** -  
**LABORATORIO:** -  
**FECHA DE MUESTREO:** 23/1/2024  
**FECHA DE ENSAYO:** 25/1/2024

**METODO:** A  
**No. CAPAS:** 5  
**PESO MARTILLO:** 10 lbs.  
**DIMENSIONES:** Diametro= 102,79 mm    Alto= 116,01 mm

**N° GOLPES POR CAPA:** 25  
**ALTURA DE CAIDA:** 18"  
**PESO DEL MOLDE:** 3736,4 g  
**VOL. DEL MOLDE:** 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4603		4724		4867		4992		4997	
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g	
Peso Suelo húmedo (gr)	866,6		987,6 g		1130,6		1255,6		1260,6	
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	0,900		1,026		1,174		1,304		1,309	
Cápsula No.	57	37	56	58	v	29	ai	12	B1	Y
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	57,500	59,762	60,234	58,506	61,100	63,991	67,424	66,148	68,521	67,487
Peso cap. + suelo seco (gr)	53,124	55,167	52,621	51,205	50,827	53,024	52,827	51,937	51,284	50,834
Peso de Cápsula	17,059	17,157	17,268	17,241	17,683	17,615	17,407	17,529	17,624	17,639
Contenido de Humedad %	12,13%	12,09%	21,53%	21,50%	31,00%	30,97%	41,21%	41,30%	51,21%	50,17%
Humedad promedio %	12,11%		21,52%		30,98%		41,26%		50,69%	
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,803		0,844		0,897		0,923		0,869	





**RELACIONES PESO UNITARIO -  
HUMEDAD DE LOS SUELOS**

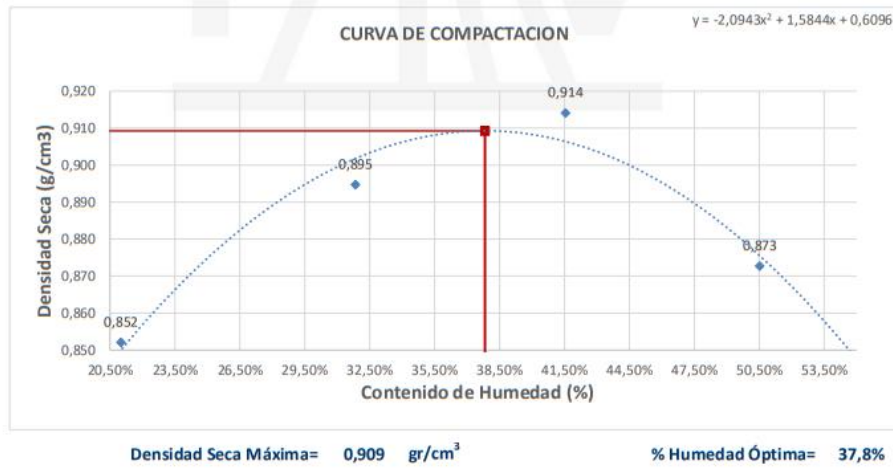
**OBRA:** Tesis Iván Bubrbaro  
**LOCALIZACION:** -  
**MUESTRA:** Pumita Natural  
**DESCRIPCION:** Prueba 4 - Pumita Natural  
**NORMA:** AASHTO T 180

**CONTRATISTA:** -  
**FISCALIZA:** -  
**LABORATORIO:** -  
**FECHA DE MUESTREO:** 23/1/2024  
**FECHA DE ENSAYO:** 25/1/2024

**METODO:** A  
**No. CAPAS:** 5  
**PESO MARTILLO:** 10 lbs.  
**DIMENSIONES:** Diámetro= 102,79 mm    Alto= 116,01 mm

**N° GOLPES POR CAPA:** 25  
**ALTURA DE CAIDA:** 18"  
**PESO DEL MOLDE:** 3736,4 g  
**VOL. DEL MOLDE:** 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4729		4872		4982		5001			
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g			
Peso Suelo húmedo (gr)	992,6		1135,6		1245,6		1264,6			
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	1,031		1,180		1,294		1,314			
Cápsula No.	35	48	32	21	01	41	25	16		
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	58,521	59,347	62,034	55,806	63,241	69,471	64,579	63,801		
Peso cap. + suelo seco (gr)	51,258	52,092	51,345	46,387	49,831	54,295	48,722	48,294		
Peso de Cápsula	17,059	17,157	17,268	17,241	17,683	17,615	17,407	17,529		
Contenido de Humedad %	21,24%	20,77%	31,37%	32,32%	41,71%	41,37%	50,64%	50,40%		
Humedad promedio %	21,00%		31,84%		41,54%		50,52%			
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,852		0,895		0,914		0,873			



## 7.2 Ensayo de Relación Peso Unitario – Humedad de los Suelos (Pumita + TerraSil (1:200) + 4% Cemento)



### RELACIONES PESO UNITARIO - HUMEDAD DE LOS SUELOS

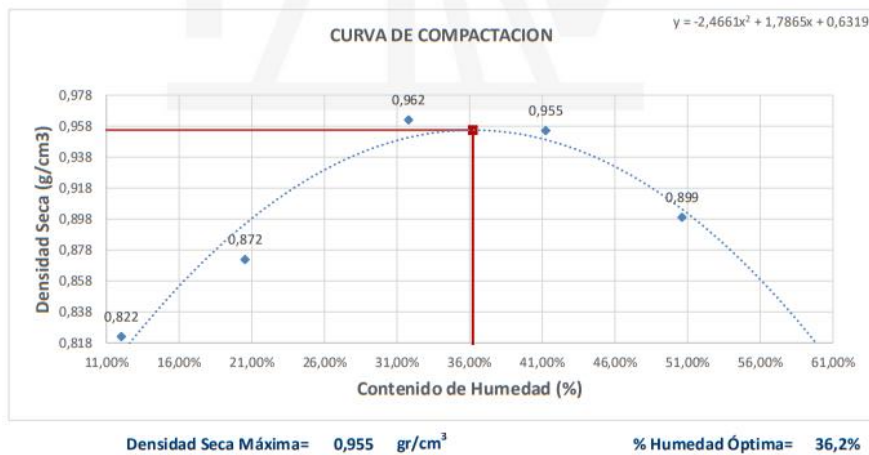
OBRA: Tesis Iván Bubrbano  
 LOCALIZACION: -  
 MUESTRA: Pumita + TerraSil (1:200) + 4% Cemento (peso)  
 DESCRIPCION: Prueba 1 - Pumita + TerraSil (1:200) + 4% Cemento (peso)  
 NORMA: AASHTO T 180

CONTRATISTA: -  
 FISCALIZA: -  
 LABORATORIO: -  
 FECHA DE MUESTREO: 23/1/2024  
 FECHA DE ENSAYO: 12/7/2024

METODO: A  
 No. CAPAS: 5  
 PESO MARTILLO: 10 lbs.  
 DIMENSIONES: Diámetro= 102,79 mm Alto= 116,01 mm

N° GOLPES POR CAPA: 25  
 ALTURA DE CAIDA: 18"  
 PESO DEL MOLDE: 3736,4 g  
 VOL. DEL MOLDE: 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4623		4748		4957		5035		5040	
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g	
Peso Suelo húmedo (gr)	886,6		1011,6		1220,6		1298,6		1303,6	
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	0,921		1,051		1,268		1,349		1,354	
Cápsula No.	26	125	56	37	B1	F5	54	53	58	Y
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	46,772	45,918	41,668	43,684	47,313	39,930	49,637	51,587	65,395	70,756
Peso cap. + suelo seco (gr)	43,649	42,893	37,371	38,966	39,235	33,722	40,098	41,658	49,191	53,220
Peso de Cápsula	17,871	17,590	15,268	17,157	14,090	13,990	17,439	17,065	17,233	18,517
Contenido de Humedad %	12,11%	11,96%	19,44%	21,63%	32,13%	31,46%	42,10%	40,37%	50,70%	50,53%
Humedad promedio %	12,04%		20,54%		31,79%		41,24%		50,62%	
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,822		0,872		0,962		0,955		0,899	



0989577865-0969402222

(593-2) 2025540

Leónidas Proaño N5-106 y Panamericana Norte



inggeopav@hotmail.com

www.inggeopav.com

@suelosinggeopav

**RELACIONES PESO UNITARIO -  
HUMEDAD DE LOS SUELOS**

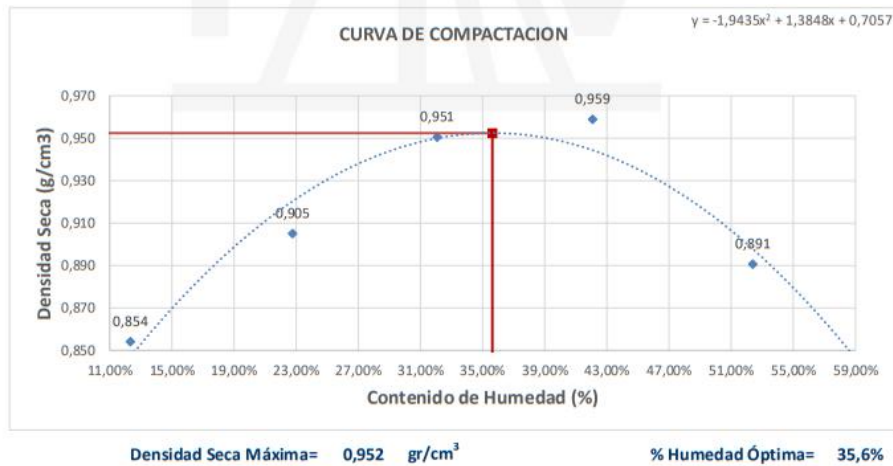
**OBRA:** Tesis Iván Bubbano  
**LOCALIZACION:** -  
**MUESTRA:** Pumita + TerraSil (1:200) + 4% Cemento (peso)  
**DESCRIPCION:** Prueba 2 - Pumita + TerraSil (1:200) + 4% Cemento (peso)  
**NORMA:** AASHTO T 180

**CONTRATISTA:** -  
**FISCALIZA:** -  
**LAVORATORIO:** -  
**FECHA DE MUESTREO:** 23/1/2024  
**FECHA DE ENSAYO:** 12/7/2024

**METODO:** A  
**No. CAPAS:** 5  
**PESO MARTILLO:** 10 lbs.  
**DIMENSIONES:** Diámetro= 102,79 mm      Alto= 116,01 mm

**N° GOLPES POR CAPA:** 25  
**ALTURA DE CAIDA :** 18"  
**PESO DEL MOLDE:** 3736,4 g  
**VOL. DEL MOLDE:** 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4660		4806		4945		5048		5043	
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g	
Peso Suelo húmedo (gr)	923,6		1069,6		1208,6		1311,6		1306,6	
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	0,959		1,111		1,255		1,362		1,357	
Cápsula No.	57	58	53	Y	14	54	F5	B1	60	M-3
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	41,026	42,162	41,805	45,173	39,659	44,615	52,290	52,391	47,651	51,683
Peso cap. + suelo seco (gr)	38,400	39,464	37,411	40,125	34,204	38,003	40,973	41,021	37,467	38,500
Peso de Cápsula	17,421	17,233	17,589	18,517	17,159	17,439	13,990	14,090	17,540	13,940
Contenido de Humedad %	12,52%	12,14%	22,17%	23,36%	32,00%	32,15%	41,94%	42,22%	51,11%	53,68%
Humedad promedio %	12,33%		22,76%		32,08%		42,08%		52,39%	
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,854		0,905		0,951		0,959		0,891	



**RELACIONES PESO UNITARIO -  
HUMEDAD DE LOS SUELOS**

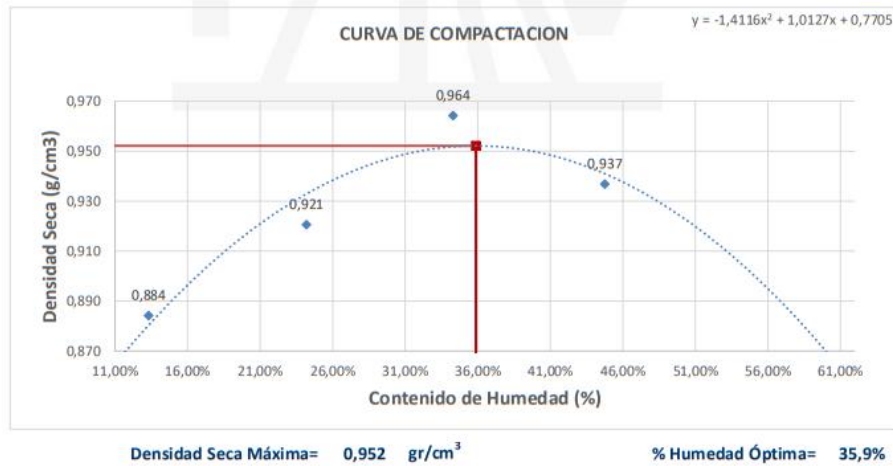
**OBRA:** Tesis Iván Bubrbano  
**LOCALIZACION:** -  
**MUESTRA:** Pumita + TerraSil (1:200) + 4% Cemento (peso)  
**DESCRIPCION:** Prueba 3 - Pumita + TerraSil (1:200) + 4% Cemento (peso)  
**NORMA:** AASHTO T 180

**CONTRATISTA:** -  
**FISCALIZA:** -  
**LABORATORIO:** -  
**FECHA DE MUESTREO:** 23/1/2024  
**FECHA DE ENSAYO:** 12/7/2024

**METODO:** A  
**No. CAPAS:** 5  
**PESO MARTILLO:** 10 lbs.  
**DIMENSIONES:** Diametro= 102,79 mm    Alto= 116,01 mm

**N° GOLPES POR CAPA:** 25  
**ALTURA DE CAIDA:** 18"  
**PESO DEL MOLDE:** 3736,4 g  
**VOL. DEL MOLDE:** 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4701		4837		4983		5042			
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g			
Peso Suelo húmedo (gr)	964,6		1100,6		1246,6		1305,6			
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	1,002		1,143		1,295		1,356			
Cápsula No.	33	125	37	60	56	29	140	26		
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	44,263	44,959	40,283	41,241	43,304	45,460	61,270	62,940		
Peso cap. + suelo seco (gr)	41,096	41,754	35,815	36,551	36,621	38,387	48,010	48,821		
Peso de Cápsula	17,424	17,590	17,157	17,354	17,268	17,617	18,515	17,141		
Contenido de Humedad %	13,38%	13,26%	23,95%	24,43%	34,53%	34,05%	44,96%	44,57%		
Humedad promedio %	13,32%		24,19%		34,29%		44,76%			
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,884		0,921		0,964		0,937			




 RELACIONES PESO UNITARIO -  
HUMEDAD DE LOS SUELOS

OBRA: Tesis Iván Burbano

CONTRATISTA: -

LOCALIZACION: -

FISCALIZA: -

MUESTRA: Pumita + TerraSil (1:200) + 4% Cemento (peso)

LABORATORIO: -

DESCRIPCION: Prueba 4 - Pumita + TerraSil (1:200) + 4% Cemento (peso)

FECHA DE MUESTREO: 23/1/2024

NORMA: AASHTO T 180

FECHA DE ENSAYO: 12/7/2024

METODO: A

N° GOLPES POR CAPA: 25

No. CAPAS: 5

ALTURA DE CAIDA: 18"

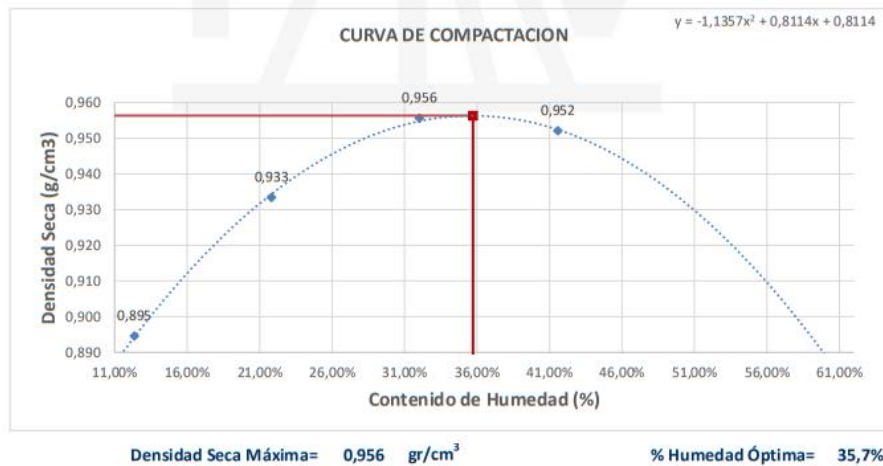
PESO MARTILLO: 10 lbs.

PESO DEL MOLDE: 3736,4 g

DIMENSIONES: Diámetro= 102,79 mm Alto= 116,01 mm

 VOL. DEL MOLDE: 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4704		4831		4951		5034			
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g			
Peso Suelo húmedo (gr)	967,6		1094,6		1214,6		1297,6			
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	1,005		1,137		1,262		1,348			
Cápsula No.	57	F5	B1	M3	26	Y	14	140		
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	45,613	49,587	48,335	49,553	51,267	53,498	58,246	60,792		
Peso cap. + suelo seco (gr)	42,598	45,973	42,731	43,809	43,001	44,813	46,421	48,112		
Peso de Cápsula	17,424	17,590	17,157	17,354	17,268	17,617	18,515	17,012		
Contenido de Humedad %	11,98%	12,73%	21,91%	21,71%	32,12%	31,93%	42,37%	40,77%		
Humedad promedio %	12,35%		21,81%		32,03%		41,57%			
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,895		0,933		0,956		0,952			



### 7.3 Ensayo de Relación Peso Unitario – Humedad de los Suelos (Pumita + TerraSil (1:200) + 5% Cemento)



#### RELACIONES PESO UNITARIO - HUMEDAD DE LOS SUELOS

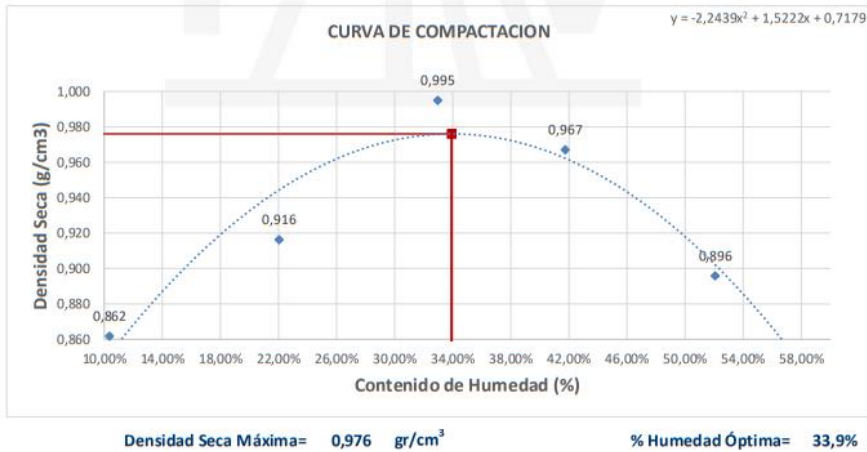
OBRA: Tesis Iván Bubrbano  
 LOCALIZACION: -  
 MUESTRA: Pumita + TerraSil (1:200) + 5% Cemento (peso)  
 DESCRIPCION: Prueba 1 - Pumita + TerraSil (1:200) + 5% Cemento (peso)  
 NORMA: AASHTO T 180

CONTRATISTA: -  
 FISCALIZA: -  
 LABORATORIO: -  
 FECHA DE MUESTREO: 23/1/2024  
 FECHA DE ENSAYO: 13/7/2024

METODO: A  
 No. CAPAS: 5  
 PESO MARTILLO: 10 lbs.  
 DIMENSIONES: Diámetro= 102,79 mm Alto= 116,01 mm

N° GOLPES POR CAPA: 25  
 ALTURA DE CAIDA: 18"  
 PESO DEL MOLDE: 3736,4 g  
 VOL. DEL MOLDE: 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4652		4813		5010		5056		5048	
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g	
Peso Suelo húmedo (gr)	915,6		1076,6		1273,6		1319,6		1311,6	
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	0,951		1,118		1,323		1,371		1,362	
Cápsula No.	56	26	37	125	140	33	57	14		
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	45,072	48,003	43,583	46,412	44,457	45,833	52,596	46,788	52,347	55,492
Peso cap. + suelo seco (gr)	42,448	45,186	38,821	41,194	37,924	38,789	42,130	38,061	40,422	42,452
Peso de Cápsula	17,268	17,871	17,157	17,590	18,102	17,425	17,059	17,159	17,324	17,628
Contenido de Humedad %	10,42%	10,31%	21,98%	22,11%	32,96%	32,97%	41,75%	41,75%	51,63%	52,53%
Humedad promedio %	10,37%		22,04%		32,96%		41,75%		52,08%	
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,862		0,916		0,995		0,967		0,896	



RELACIONES PESO UNITARIO -  
HUMEDAD DE LOS SUELOS

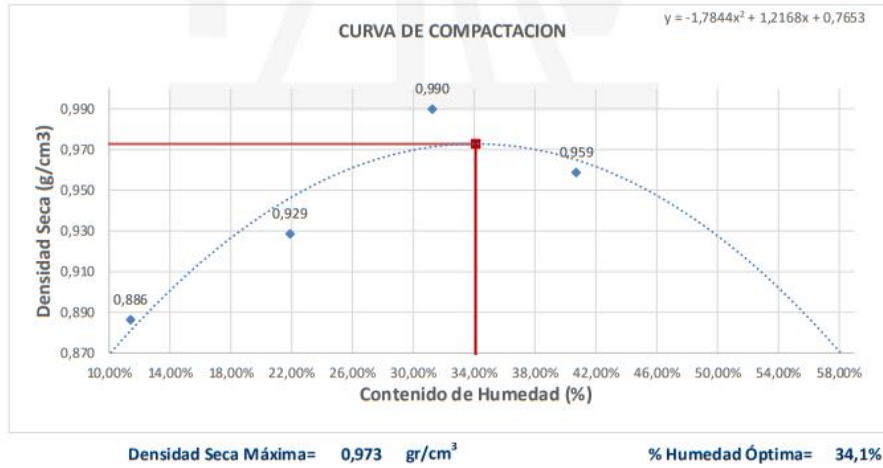
OBRA: Tesis Iván Bubrbano  
 LOCALIZACION: -  
 MUESTRA: Pumita + TerraSil (1:200) + 5% Cemento (peso)  
 DESCRIPCION: Prueba 2 - Pumita + TerraSil (1:200) + 5% Cemento (peso)  
 NORMA: AASHTO T 180

CONTRATISTA: -  
 FISCALIZA: -  
 LABORATORIO: -  
 FECHA DE MUESTREO: 23/1/2024  
 FECHA DE ENSAYO: 13/7/2024

METODO: A  
 No. CAPAS: 5  
 PESO MARTILLO: 10 lbs.  
 DIMENSIONES: Diámetro= 102,79 mm Alto= 116,01 mm

N° GOLPES POR CAPA: 25  
 ALTURA DE CAIDA: 18"  
 PESO DEL MOLDE: 3736,4 g  
 VOL. DEL MOLDE: 962,68 cm3

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4687		4826		4987		5035			
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g			
Peso Suelo húmedo (gr)	950,6		1089,6		1250,6		1298,6			
Dens. Hum. (gr/cm3)	0,987		1,132		1,299		1,349			
Cápsula No.	B1	F5	57	Y	14	26	140	60		
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	54,661	49,836	56,564	61,394	51,529	57,250	65,914	55,812		
Peso cap. + suelo seco (gr)	50,527	46,128	49,436	53,728	43,336	47,889	52,265	44,541		
Peso de Cápsula	14,033	13,883	17,065	18,517	17,159	17,871	18,102	17,354		
Contenido de Humedad %	11,33%	11,50%	22,02%	21,77%	31,30%	31,18%	39,95%	41,46%		
Humedad promedio %	11,41%		21,90%		31,24%		40,70%			
Densidad Seca (gr/cm3)	0,886		0,929		0,990		0,959			



RELACIONES PESO UNITARIO -  
HUMEDAD DE LOS SUELOS

OBRA: Tesis Iván Bubrbaro  
LOCALIZACION: -

MUESTRA: Pumita + TerraSil (1:200) + 5% Cemento (peso)  
DESCRIPCION: Prueba 3 - Pumita + TerraSil (1:200) + 5% Cemento (peso)  
NORMA: AASHTO T 180

CONTRATISTA: -  
FISCALIZA: -  
LABORATORIO: -

FECHA DE MUESTREO: 23/1/2024  
FECHA DE ENSAYO: 13/7/2024

METODO: A  
No. CAPAS: 5  
PESO MARTILLO: 10 lbs.  
DIMENSIONES: Diámetro= 102,79 mm Alto= 116,01 mm

N° GOLPES POR CAPA: 25  
ALTURA DE CAIDA: 18"  
PESO DEL MOLDE: 3736,4 g  
VOL. DEL MOLDE: 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4681		4835		4992		5048		
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		
Peso Suelo húmedo (gr)	944,6		1098,6 g		1255,6		1311,6		
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	0,981		1,141		1,304		1,362		
Cápsula No.	45	37	AB	01	13	24	60	Y	
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	54,758	53,168	56,861	55,925	58,467	53,167	65,284	61,943	
Peso cap. + suelo seco (gr)	50,679	49,234	49,561	48,934	48,537	44,693	49,924	48,907	
Peso de Cápsula	17,233	17,789	17,425	17,612	17,059	17,871	14,033	17,354	
Contenido de Humedad %	12,20%	12,51%	22,72%	22,32%	31,55%	31,59%	42,80%	41,31%	
Humedad promedio %	12,35%		22,52%		31,57%		42,06%		
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,873		0,931		0,991		0,959		



RELACIONES PESO UNITARIO -  
HUMEDAD DE LOS SUELOS

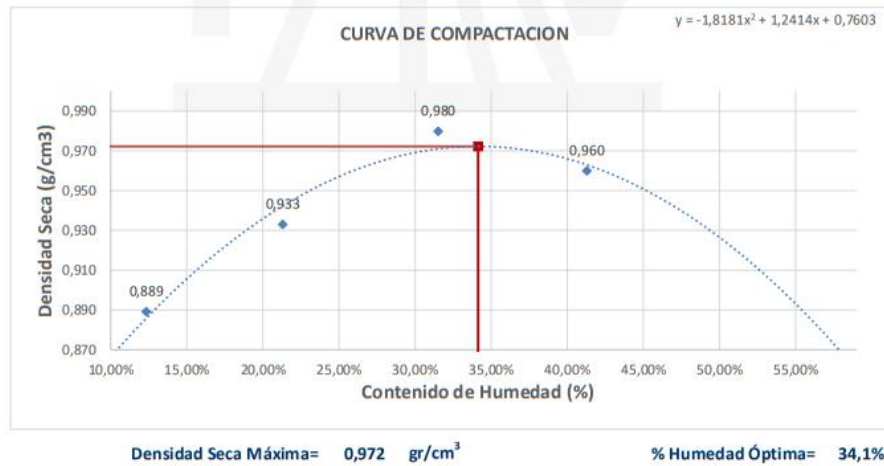
OBRA: Tesis Iván Bubrbano  
LOCALIZACION: -  
MUESTRA: Pumita + TerraSil (1:200) + 5% Cemento (peso)  
DESCRIPCION: Prueba 4 - Pumita + TerraSil (1:200) + 5% Cemento (peso)  
NORMA: AASHTO T 180

CONTRATISTA: -  
FISCALIZA: -  
LABORATORIO: -  
FECHA DE MUESTREO: 23/1/2024  
FECHA DE ENSAYO: 13/7/2024

METODO: A  
No. CAPAS: 5  
PESO MARTILLO: 10 lbs.  
DIMENSIONES: Diámetro= 102,79 mm Alto= 116,01 mm

N° GOLPES POR CAPA: 25  
ALTURA DE CAIDA: 18"  
PESO DEL MOLDE: 3736,4 g  
VOL. DEL MOLDE: 962,68 cm3

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4698		4826		4977		5042			
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g			
Peso Suelo húmedo (gr)	961,6		1089,6 g		1240,6		1305,6			
Dens. Hum. (gr/cm3)	0,999		1,132		1,289		1,356			
Cápsula No.	58	53	33	29	57	26	B1	60		
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	53,575	55,418	50,866	50,592	52,844	56,317	67,527	63,194		
Peso cap. + suelo seco (gr)	49,589	51,281	44,880	44,910	44,260	47,111	51,872	49,821		
Peso de Cápsula	17,233	17,789	17,425	17,612	17,059	17,871	14,033	17,354		
Contenido de Humedad %	12,32%	12,35%	21,80%	20,81%	31,56%	31,48%	41,37%	41,19%		
Humedad promedio %	12,34%		21,31%		31,52%		41,28%			
Densidad Seca (gr/cm3)	0,889		0,933		0,980		0,960			



## 7.4 Ensayo de Relación Peso Unitario – Humedad de los Suelos (Pumita + TerraSil (1:200) + 6% Cemento)



### RELACIONES PESO UNITARIO - HUMEDAD DE LOS SUELOS

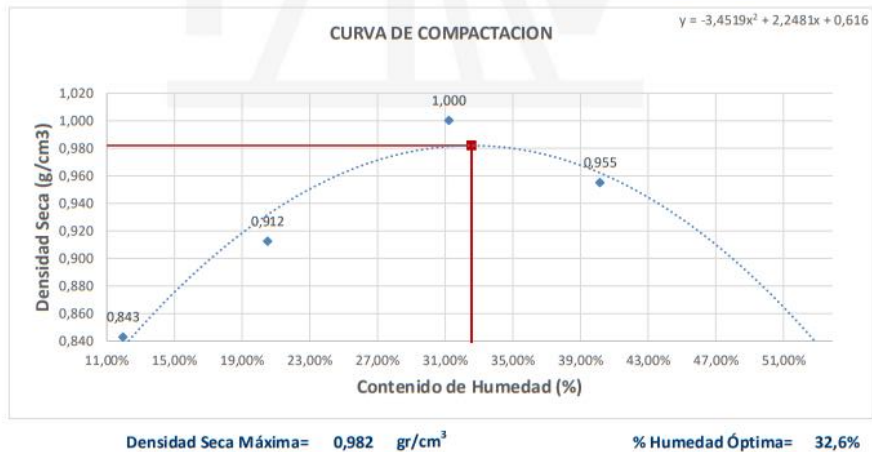
OBRA: Tesis Iván Bubrbanó  
 LOCALIZACION: -  
 MUESTRA: Pumita + TerraSil (1:200) + 6% Cemento (peso)  
 DESCRIPCION: Prueba 1 - Pumita + TerraSil (1:200) + 6% Cemento (peso)  
 NORMA: AASHTO T 180

CONTRATISTA: -  
 FISCALIZA: -  
 LABORATORIO: -  
 FECHA DE MUESTREO: 23/1/2024  
 FECHA DE ENSAYO: 14/7/2024

METODO: A  
 No. CAPAS: 5  
 PESO MARTILLO: 10 lbs.  
 DIMENSIONES: Diámetro= 102,79 mm Alto= 116,01 mm

N° GOLPES POR CAPA: 25  
 ALTURA DE CAIDA: 18"  
 PESO DEL MOLDE: 3736,4 g  
 VOL. DEL MOLDE: 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4645		4795		5000		5025			
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g			
Peso Suelo húmedo (gr)	908,6		1058,6		1263,6		1288,6			
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	0,944		1,100		1,313		1,339			
Cápsula No.	53	56	y	58	60	26	F5	B1		
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	40,921	45,812	46,496	46,028	45,641	48,234	61,860	59,385		
Peso cap. + suelo seco (gr)	38,529	42,665	41,713	41,149	38,960	40,956	48,093	46,414		
Peso de Cápsula	17,789	17,268	18,515	17,233	17,354	17,871	13,883	14,033		
Contenido de Humedad %	11,53%	12,39%	20,62%	20,40%	30,92%	31,53%	40,24%	40,06%		
Humedad promedio %	11,96%		20,51%		31,22%		40,15%			
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,843		0,912		1,000		0,955			



0989577865-0969402222

(593-2) 2025540

Leónidas Proaño N5-106 y Panamericana Norte



inggeopav@hotmail.com

www.inggeopav.com

@suelosinggeopav



**RELACIONES PESO UNITARIO -  
HUMEDAD DE LOS SUELOS**

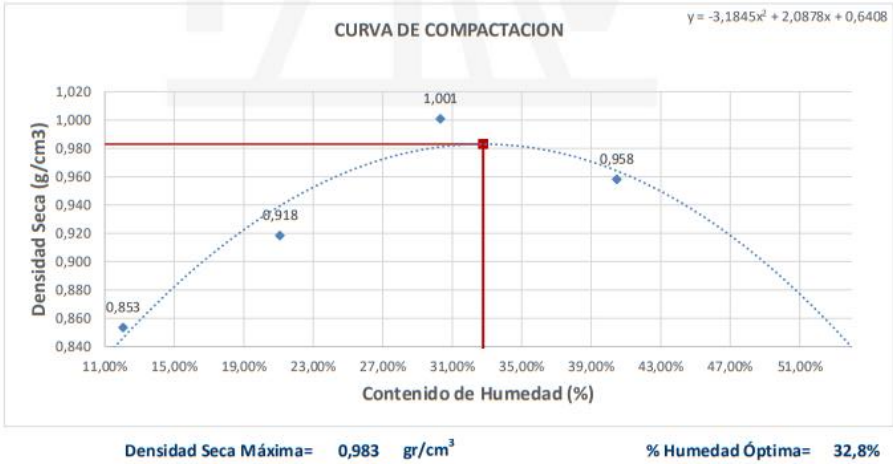
**OBRA:** Tesis Iván Bubrbaro  
**LOCALIZACION:** -  
**MUESTRA:** Pumita + TerraSil (1:200) + 6% Cemento (peso)  
**DESCRIPCION:** Prueba 2 - Pumita + TerraSil (1:200) + 6% Cemento (peso)  
**NORMA:** AASHTO T 180

**CONTRATISTA:** -  
**FISCALIZA:** -  
**LABORATORIO:** -  
**FECHA DE MUESTREO:** 23/1/2024  
**FECHA DE ENSAYO:** 14/7/2024

**METODO:** A  
**No. CAPAS:** 5  
**PESO MARTILLO:** 10 lbs.  
**DIMENSIONES:** Diámetro= 102,79 mm    Alto= 116,01 mm

**N° GOLPES POR CAPA:** 25  
**ALTURA DE CAIDA:** 18"  
**PESO DEL MOLDE:** 3736,4 g  
**VOL. DEL MOLDE:** 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4657		4807		4992		5032			
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g			
Peso Suelo húmedo (gr)	920,6		1070,6		1255,6		1295,6			
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	0,956		1,112		1,304		1,346			
Cápsula No.	53	56	y	58	60	26	F5	B1		
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	49,210	48,235	49,485	48,027	46,548	49,372	58,372	57,607		
Peso cap. + suelo seco (gr)	45,813	44,920	44,105	42,652	39,691	42,113	45,502	45,102		
Peso de Cápsula	17,789	17,268	18,515	17,233	17,354	17,871	13,883	14,033		
Contenido de Humedad %	12,12%	11,99%	21,02%	21,15%	30,70%	29,94%	40,70%	40,25%		
Humedad promedio %	12,06%		21,08%		30,32%		40,48%			
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,853		0,918		1,001		0,958			



RELACIONES PESO UNITARIO - HUMEDAD DE LOS SUELOS

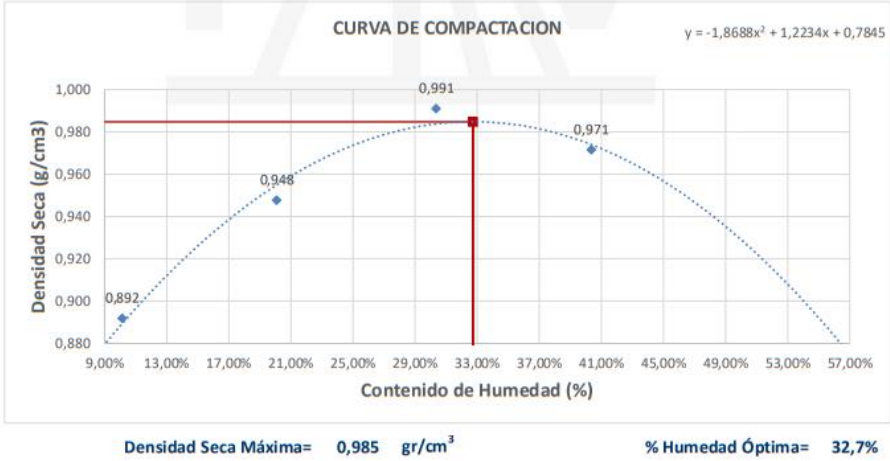
OBRA: Tesis Iván Bubrbano  
 LOCALIZACION: -  
 MUESTRA: Pumita + TerraSil (1:200) + 6% Cemento (peso)  
 DESCRIPCION: Prueba 3 - Pumita + TerraSil (1:200) + 6% Cemento (peso)  
 NORMA: AASHTO T 180

CONTRATISTA: -  
 FISCALIZA: -  
 LABORATORIO: -  
 FECHA DE MUESTREO: 23/1/2024  
 FECHA DE ENSAYO: 14/7/2024

METODO: A  
 No. CAPAS: 5  
 PESO MARTILLO: 10 lbs.  
 DIMENSIONES: Diámetro= 102,79 mm Alto= 116,01 mm

N° GOLPES POR CAPA: 25  
 ALTURA DE CAIDA : 18"  
 PESO DEL MOLDE: 3736,4 g  
 VOL. DEL MOLDE: 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4682		4832		4980		5049			
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g			
Peso Suelo húmedo (gr)	945,6		1095,6		1243,6		1312,6			
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	0,982		1,138		1,292		1,363			
Cápsula No.	33	125	y	58	60	26	F5	B1		
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	48,673	47,256	48,948	47,208	48,657	47,348	57,832	56,073		
Peso cap. + suelo seco (gr)	45,801	44,524	43,834	42,215	41,348	40,501	45,210	43,973		
Peso de Cápsula	17,789	17,268	18,515	17,233	17,354	17,871	13,883	14,033		
Contenido de Humedad %	10,25%	10,02%	20,20%	19,99%	30,46%	30,26%	40,29%	40,41%		
Humedad promedio %	10,14%		20,09%		30,36%		40,35%			
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,892		0,948		0,991		0,971			



RELACIONES PESO UNITARIO -  
HUMEDAD DE LOS SUELOS

OBRA: Tesis Iván Bubrbano

CONTRATISTA: -

LOCALIZACION: -

FISCALIZA: -

MUESTRA: Pumita + TerraSil (1:200) + 6% Cemento (peso)

LABORATORIO: -

DESCRIPCION: Prueba 4 - Pumita + TerraSil (1:200) + 6% Cemento (peso)

FECHA DE MUESTREO: 23/1/2024

NORMA: AASHTO T 180

FECHA DE ENSAYO: 14/7/2024

METODO: A

N° GOLPES POR CAPA: 25

No. CAPAS: 5

ALTURA DE CAIDA : 18"

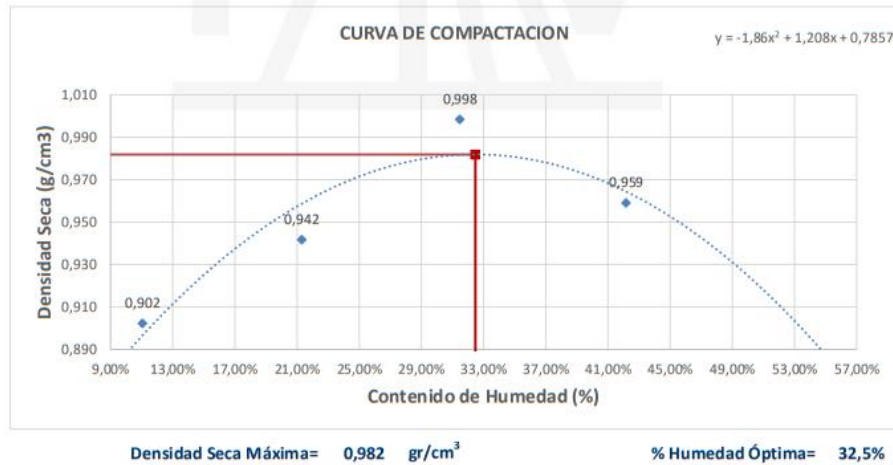
PESO MARTILLO: 10 lbs.

PESO DEL MOLDE: 3736,4 g

DIMENSIONES: Diámetro= 102,79 mm Alto= 116,01 mm

VOL. DEL MOLDE: 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4701		4836		5000		5049			
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g			
Peso Suelo húmedo (gr)	964,6		1099,6		1263,6		1312,6			
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	1,002		1,142		1,313		1,363			
Cápsula No.	33	125	y	58	60	26	F5	B1		
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	46,935	48,618	50,375	52,691	49,372	48,309	52,390	51,037		
Peso cap. + suelo seco (gr)	44,061	45,467	44,837	46,401	41,698	41,030	40,970	40,059		
Peso de Cápsula	17,789	17,268	18,515	17,233	17,354	17,871	13,883	14,033		
Contenido de Humedad %	10,94%	11,17%	21,04%	21,56%	31,52%	31,43%	42,16%	42,18%		
Humedad promedio %	11,06%		21,30%		31,48%		42,17%			
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,902		0,942		0,998		0,959			



## 7.5 Ensayo de Relación Peso Unitario – Humedad de los Suelos (Pumita + TerraSil (1:200) + 7% Cemento)



### RELACIONES PESO UNITARIO - HUMEDAD DE LOS SUELOS

OBRA: Tesis Iván Bubrano

CONTRATISTA: -

LOCALIZACION: -

FISCALIZA: -

MUESTRA: Pumita + TerraSil (1:200) + 7% Cemento (peso)

LABORATORIO: -

DESCRIPCION: Prueba 1 Pumita + TerraSil (1:200) + 7% Cemento (peso)

FECHA DE MUESTREO: 23/1/2024

NORMA: AASHTO T 180

FECHA DE ENSAYO: 15/7/2024

METODO: A

N° GOLPES POR CAPA: 25

No. CAPAS: 5

ALTURA DE CAIDA: 18"

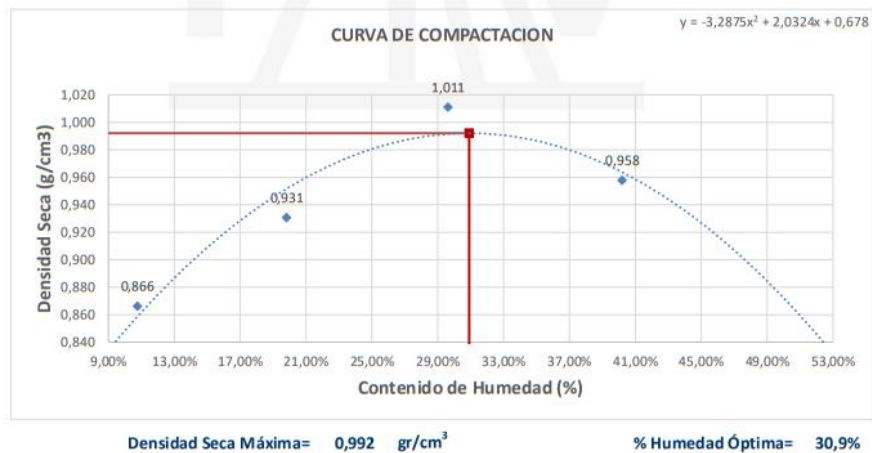
PESO MARTILLO: 10 lbs.

PESO DEL MOLDE: 3736,4 g

DIMENSIONES: Diámetro= 102,79 mm Alto= 116,01 mm

VOL. DEL MOLDE: 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4660		4810		4998		5029			
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g			
Peso Suelo húmedo (gr)	923,6		1073,6		1261,6		1292,6			
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	0,959		1,115		1,311		1,343			
Cápsula No.	125	37	60	Y	A2	58	M-3	X-Y		
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	43,700	41,500	44,700	43,100	43,300	39,700	46,400	51,700		
Peso cap. + suelo seco (gr)	41,200	39,100	40,100	39,100	36,700	34,500	37,000	41,025		
Peso de Cápsula	17,590	17,157	17,354	18,515	14,050	17,233	13,940	14,091		
Contenido de Humedad %	10,59%	10,94%	20,22%	19,43%	29,14%	30,12%	40,76%	39,63%		
Humedad promedio %	10,76%		19,83%		29,63%		40,20%			
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,866		0,931		1,011		0,958			



0989577865-0969402222

(593-2) 2025540

Leónidas Proaño N5-106 y Panamericana Norte



inggeopav@hotmail.com

www.inggeopav.com

@suelosinggeopav



**RELACIONES PESO UNITARIO -  
HUMEDAD DE LOS SUELOS**

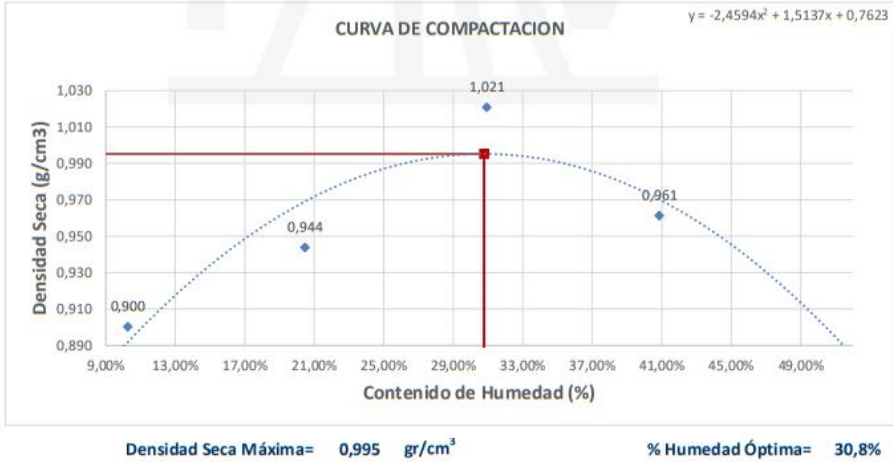
OBRA: Tesis Iván Bubrbano  
 LOCALIZACION: -  
 MUESTRA: Pumita + TerraSil (1:200) + 7% Cemento (peso)  
 DESCRIPCION: Prueba 2 - Pumita + TerraSil (1:200) + 7% Cemento (peso)  
 NORMA: AASHTO T 180

CONTRATISTA: -  
 FISCALIZA: -  
 LABORATORIO: -  
 FECHA DE MUESTREO: 23/1/2024  
 FECHA DE ENSAYO: 15/7/2024

METODO: A  
 No. CAPAS: 5  
 PESO MARTILLO: 10 lbs.  
 DIMENSIONES: Diámetro= 102,79 mm Alto= 116,01 mm

N° GOLPES POR CAPA: 25  
 ALTURA DE CAIDA : 18"  
 PESO DEL MOLDE: 3736,4 g  
 VOL. DEL MOLDE: 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4692		4831		5023		5040			
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g			
Peso Suelo húmedo (gr)	955,6		1094,6		1286,6		1303,6			
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	0,993		1,137		1,336		1,354			
Cápsula No.	58	14	10	125	53	54	F5	B		
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	45,682	45,214	47,049	43,100	47,367	53,523	47,358	50,493		
Peso cap. + suelo seco (gr)	43,013	42,657	42,010	38,918	39,467	44,983	37,682	39,913		
Peso de Cápsula	17,590	17,157	17,354	18,515	14,050	17,233	13,940	14,091		
Contenido de Humedad %	10,50%	10,03%	20,44%	20,50%	31,08%	30,77%	40,75%	40,97%		
Humedad promedio %	10,26%		20,47%		30,93%		40,86%			
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,900		0,944		1,021		0,961			



**RELACIONES PESO UNITARIO -  
HUMEDAD DE LOS SUELOS**

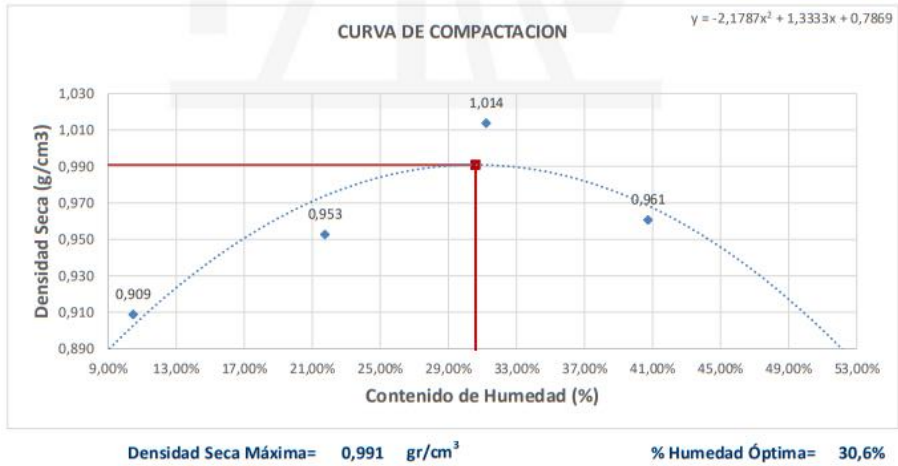
OBRA: Tesis Iván Bubrbano  
 LOCALIZACION: -  
 MUESTRA: Pumita + TerraSil (1:200) + 7% Cemento (peso)  
 DESCRIPCION: Prueba 3 - Pumita + TerraSil (1:200) + 7% Cemento (peso)  
 NORMA: AASHTO T 180

CONTRATISTA: -  
 FISCALIZA: -  
 LABORATORIO: -  
 FECHA DE MUESTREO: 23/1/2024  
 FECHA DE ENSAYO: 15/7/2024

METODO: A  
 No. CAPAS: 5  
 PESO MARTILLO: 10 lbs.  
 DIMENSIONES: Diámetro= 102,79 mm Alto= 116,01 mm

Nº GOLPES POR CAPA: 25  
 ALTURA DE CAIDA : 18"  
 PESO DEL MOLDE: 3736,4 g  
 VOL. DEL MOLDE: 962,68 cm3

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo húmedo (gr)	4703		4853		5017		5038			
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g			
Peso Suelo húmedo (gr)	966,6		1116,6		1280,6		1301,6			
Dens. Hum. (gr/cm3)	1,004		1,160		1,330		1,352			
Cápsula No.	58	14	10	125	53	54	F5	B		
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	48,382	47,283	46,617	45,238	48,388	49,610	52,682	50,943		
Peso cap. + suelo seco (gr)	45,501	44,385	41,438	40,421	40,289	41,839	41,528	40,217		
Peso de Cápsula	17,590	17,157	17,354	18,515	14,050	17,233	13,940	14,091		
Contenido de Humedad %	10,32%	10,64%	21,50%	21,99%	30,87%	31,58%	40,43%	41,05%		
Humedad promedio %	10,48%		21,75%		31,22%		40,74%			
Densidad Seca (gr/cm3)	0,909		0,953		1,014		0,961			



RELACIONES PESO UNITARIO -  
HUMEDAD DE LOS SUELOS

OBRA: Tesis Iván Bubrbano  
LOCALIZACION: -

MUESTRA: Pumita + TerraSil (1:200) + 7% Cemento (peso)  
DESCRIPCION: Prueba 4 - Pumita + TerraSil (1:200) + 7% Cemento (peso)  
NORMA: AASHTO T 180

CONTRATISTA: -

FISCALIZA: -

LABORATORIO: -

FECHA DE MUESTREO: 23/1/2024

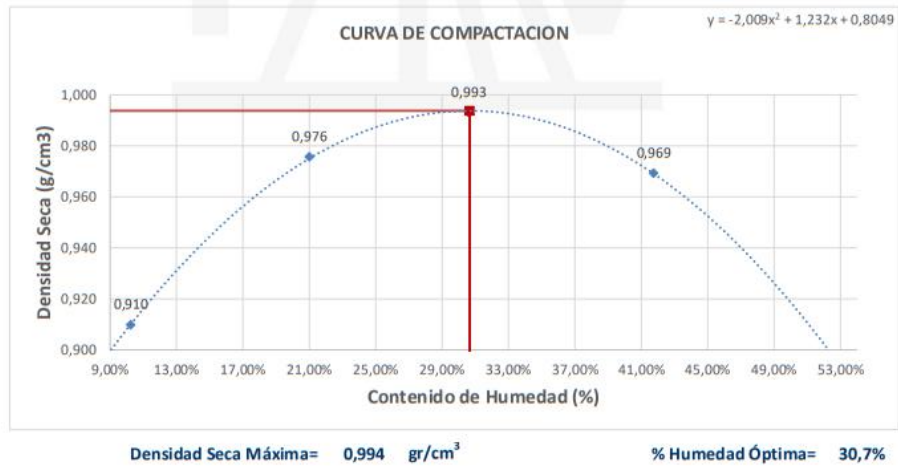
FECHA DE ENSAYO: 15/7/2024

METODO: A  
No. CAPAS: 5  
PESO MARTILLO: 10 lbs.

DIMENSIONES: Diámetro= 102,79 mm Alto= 116,01 mm

N° GOLPES POR CAPA: 25  
ALTURA DE CAIDA : 18"  
PESO DEL MOLDE: 3736,4 g  
VOL. DEL MOLDE: 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4702		4873		4985		5059			
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g			
Peso Suelo húmedo (gr)	965,6		1136,6		1248,6		1322,6			
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	1,003		1,181		1,297		1,374			
Cápsula No.	58	14	10	125	53	54	F5	B		
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	46,824	45,692	49,076	51,031	46,321	45,171	45,643	46,327		
Peso cap. + suelo seco (gr)	44,057	43,089	43,529	45,428	38,671	38,701	36,286	36,856		
Peso de Cápsula	17,590	17,157	17,354	18,515	14,050	17,233	13,940	14,091		
Contenido de Humedad %	10,45%	10,04%	21,19%	20,82%	31,07%	30,14%	41,87%	41,60%		
Humedad promedio %	10,25%		21,01%		30,60%		41,74%			
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,910		0,976		0,993		0,969			



## 7.6 Ensayo de Relación Peso Unitario – Humedad de los Suelos (Pumita + TerraSil (1:200) + 8% Cemento)



### RELACIONES PESO UNITARIO - HUMEDAD DE LOS SUELOS

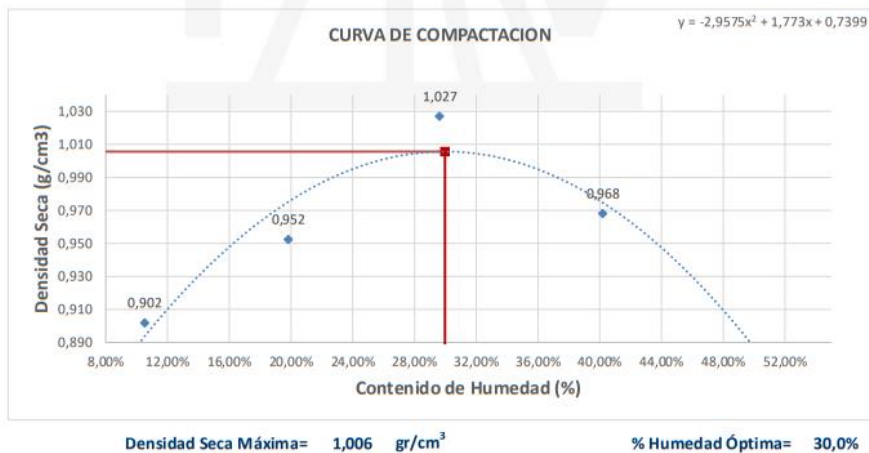
OBRA: Tesis Iván Bubrbanó  
 LOCALIZACION: -  
 MUESTRA: Pumita + TerraSil (1:200) + 8% Cemento (peso)  
 DESCRIPCION: Prueba 1 - Pumita + TerraSil (1:200) + 8% Cemento (peso)  
 NORMA: AASHTO T 180

CONTRATISTA: -  
 FISCALIZA: -  
 LABORATORIO: -  
 FECHA DE MUESTREO: 23/1/2024  
 FECHA DE ENSAYO: 16/7/2024

METODO: A  
 No. CAPAS: 5  
 PESO MARTILLO: 10 lbs.  
 DIMENSIONES: Diámetro= 102,79 mm Alto= 116,01 mm

N° GOLPES POR CAPA: 25  
 ALTURA DE CAIDA: 18"  
 PESO DEL MOLDE: 3736,4 g  
 VOL. DEL MOLDE: 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4696		4835		5018		5043			
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g			
Peso Suelo húmedo (gr)	959,6		1098,6		1281,6		1306,6			
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	0,997		1,141		1,331		1,357			
Cápsula No.	57	140	B	F5	125	Y	14	33		
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	46,274	43,723	44,700	43,100	43,300	39,700	46,400	51,700		
Peso cap. + suelo seco (gr)	43,465	41,305	40,100	39,100	36,700	34,500	37,000	41,025		
Peso de Cápsula	17,059	18,102	17,354	18,515	14,050	17,233	13,940	14,091		
Contenido de Humedad %	10,64%	10,42%	20,22%	19,43%	29,14%	30,12%	40,76%	39,63%		
Humedad promedio %	10,53%		19,83%		29,63%		40,20%			
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,902		0,952		1,027		0,968			



**RELACIONES PESO UNITARIO -  
HUMEDAD DE LOS SUELOS**

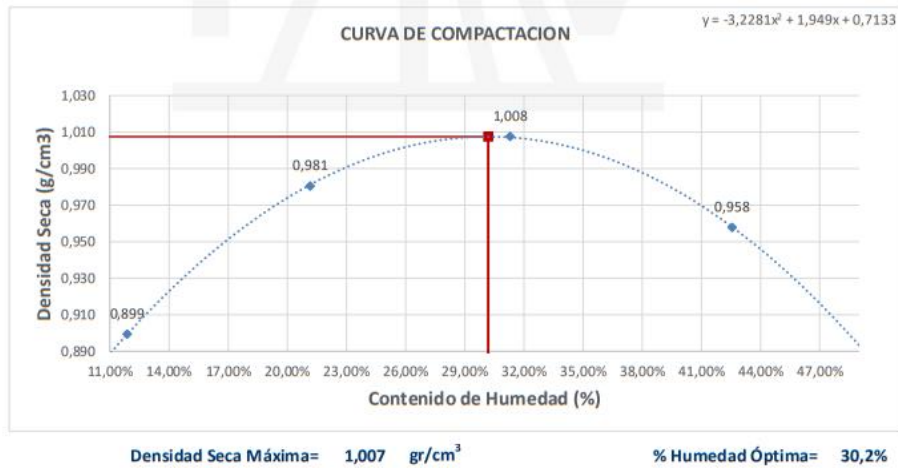
OBRA: Tesis Iván Bubrbaro  
 LOCALIZACION: -  
 MUESTRA: Pumita + TerraSil (1:200) + 8% Cemento (peso)  
 DESCRIPCION: Prueba 2 - Pumita + TerraSil (1:200) + 8% Cemento (peso)  
 NORMA: AASHTO T 180

CONTRATISTA: -  
 FISCALIZA: -  
 LABORATORIO: -  
 FECHA DE MUESTREO: 23/1/2024  
 FECHA DE ENSAYO: 16/7/2024

METODO: A  
 No. CAPAS: 5  
 PESO MARTILLO: 10 lbs.  
 DIMENSIONES: Diámetro= 102,79 mm      Alto= 116,01 mm

N° GOLPES POR CAPA: 25  
 ALTURA DE CAIDA: 18"  
 PESO DEL MOLDE: 3736,4 g  
 VOL. DEL MOLDE: 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4705		4880		5010		5051			
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g			
Peso Suelo húmedo (gr)	968,6		1143,6		1273,6		1314,6			
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	1,006		1,188		1,323		1,366			
Cápsula No.	57	140	F5	B-1	M3	26	Y	14		
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	54,310	54,603	49,616	51,905	56,137	57,589	75,431	64,826		
Peso cap. + suelo seco (gr)	50,309	50,775	43,570	45,102	46,040	48,034	58,472	50,562		
Peso de Cápsula	17,059	18,084	13,883	14,090	13,940	17,359	18,515	17,141		
Contenido de Humedad %	12,03%	11,71%	20,37%	21,94%	31,45%	31,15%	42,44%	42,68%		
Humedad promedio %	11,87%		21,15%		31,30%		42,56%			
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,899		0,981		1,008		0,958			



**RELACIONES PESO UNITARIO -  
HUMEDAD DE LOS SUELOS**

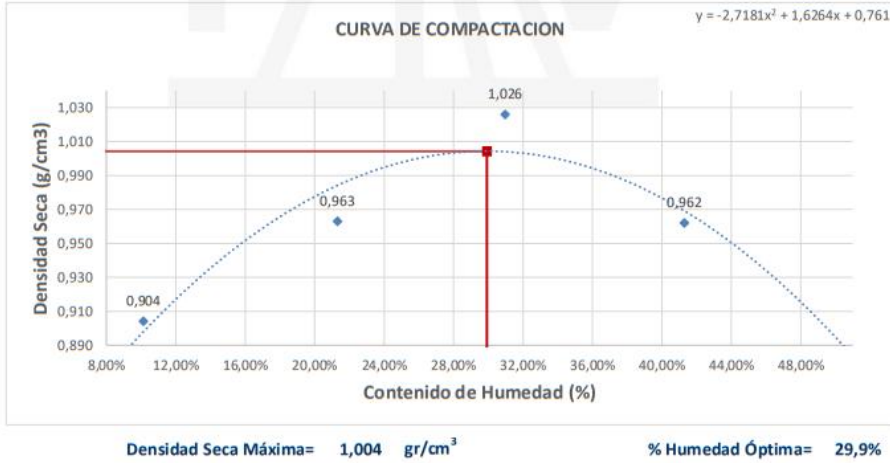
**OBRA:** Tesis Iván Bubrbano  
**LOCALIZACION:** -  
**MUESTRA:** Pumita + TerraSil (1:200) + 8% Cemento (peso)  
**DESCRIPCION:** Prueba 3 - Pumita + TerraSil (1:200) + 8% Cemento (peso)  
**NORMA:** AASHTO T 180

**CONTRATISTA:** -  
**FISCALIZA:** -  
**LABORATORIO:** -  
**FECHA DE MUESTREO:** 23/1/2024  
**FECHA DE ENSAYO:** 16/7/2024

**METODO:** A  
**No. CAPAS:** 5  
**PESO MARTILLO:** 10 lbs.  
**DIMENSIONES:** Diámetro= 102,79 mm    Alto= 116,01 mm

**N° GOLPES POR CAPA:** 25  
**ALTURA DE CAIDA:** 18"  
**PESO DEL MOLDE:** 3736,4 g  
**VOL. DEL MOLDE:** 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4695		4861		5030		5045			
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g			
Peso Suelo húmedo (gr)	958,6		1124,6		1293,6		1308,6			
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	0,996		1,168		1,344		1,359			
Cápsula No.	57	140	F5	B-1	M3	26	Y	14		
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	50,671	50,682	45,720	48,268	48,097	50,681	55,308	53,049		
Peso cap. + suelo seco (gr)	47,582	47,682	40,124	42,268	40,015	42,809	44,571	42,538		
Peso de Cápsula	17,059	18,084	13,883	14,090	13,940	17,359	18,515	17,141		
Contenido de Humedad %	10,12%	10,14%	21,33%	21,29%	31,00%	30,93%	41,21%	41,39%		
Humedad promedio %	10,13%		21,31%		30,96%		41,30%			
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,904		0,963		1,026		0,962			



**RELACIONES PESO UNITARIO -  
HUMEDAD DE LOS SUELOS**

**OBRA:** Tesis Iván Bubrbanó  
**LOCALIZACION:** -  
**MUESTRA:** Pumita + TerraSil (1:200) + 8% Cemento (peso)  
**DESCRIPCION:** Prueba 4 - Pumita + TerraSil (1:200) + 8% Cemento (peso)  
**NORMA:** AASHTO T 180

**CONTRATISTA:** -  
**FISCALIZA:** -  
**LABORATORIO:** -  
**FECHA DE MUESTREO:** 23/1/2024  
**FECHA DE ENSAYO:** 16/7/2024

**METODO:** A  
**No. CAPAS:** 5  
**PESO MARTILLO:** 10 lbs.  
**DIMENSIONES:** Diámetro= 102,79 mm    Alto= 116,01 mm

**N° GOLPES POR CAPA:** 25  
**ALTURA DE CAIDA :** 18"  
**PESO DEL MOLDE:** 3736,4 g  
**VOL. DEL MOLDE:** 962,68 cm<sup>3</sup>

No. DE PRUEBA	1		2		3		4		5	
P. Molde + Suelo Húmedo (gr)	4728		4887		5007		5073			
Peso Molde (gr)	3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g		3736,4 g			
Peso Suelo húmedo (gr)	991,6		1150,6		1270,6		1336,6			
Dens. Hum. (gr/cm <sup>3</sup> )	1,030		1,195		1,320		1,388			
Cápsula No.	57	140	F5	B-1	M3	26	Y	14		
Peso cap. + suelo húmedo (gr)	50,033	50,149	48,687	46,924	53,268	54,835	61,672	59,673		
Peso cap. + suelo seco (gr)	47,011	47,125	42,724	41,282	43,928	45,893	49,268	47,421		
Peso de Cápsula	17,059	18,084	13,883	14,090	13,940	17,359	18,515	17,141		
Contenido de Humedad %	10,09%	10,41%	20,68%	20,75%	31,15%	31,34%	40,33%	40,46%		
Humedad promedio %	10,25%		20,71%		31,24%		40,40%			
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0,934		0,990		1,006		0,989			



## 7.7 Ensayo de Resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos



### DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CEMENTO HIDRÁULICO

PROYECTO: Tesis Iván Burbano

LOCALIZACIÓN: PROVINCIA DE PICHINCHA

NORMA: INEN 1 573

CONTRATISTA: -

FISCALIZA: -

LABORATORIO: Central

No Probeta	Obra-Elemento	Fecha de Fabricación	Fecha de Rotura	Edad (días)	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Peso (kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	%	Tipo de falla
1	Suelo + 4% cemento + Terrasil	23-jul.-24	30-jul.-24	7	116	102	8171,28	0,00095	1,187	1.252	7,20	0,9	8,99	-	-
2			30-jul.-24	7	114	101	8011,85	0,00091	1,928	2.111	6,90	0,9	8,78	-	-
3			20-ago.-24	28	115	102	8171,28	0,00094	1,260	1.341	11,00	1,3	13,73	-	-
4			20-ago.-24	28	115	103	8332,29	0,00096	1,217	1.270	10,50	1,3	12,85	-	-
6	Suelo + 5% cemento + Terrasil	23-jul.-24	30-jul.-24	7	115	100	7853,98	0,00090	1,255	1.389	9,10	1,2	11,82	-	-
7			30-jul.-24	7	116	100	7853,98	0,00091	1,259	1.382	10,10	1,3	13,12	-	-
8			20-ago.-24	28	115	104	8494,87	0,00098	1,233	1.262	12,90	1,5	15,49	-	-
9			20-ago.-24	28	115	103	8332,29	0,00096	1,223	1.276	13,10	1,6	16,04	-	-
11	Suelo + 6% cemento + Terrasil	23-jul.-24	30-jul.-24	7	115	100	7853,98	0,00090	1,242	1.375	13,70	1,7	17,79	-	-
12			30-jul.-24	7	116	100	7853,98	0,00091	1,241	1.362	14,10	1,8	18,31	-	-
13			20-ago.-24	28	115	100	7853,98	0,00090	1,248	1.382	18,40	2,3	23,90	-	-
14			20-ago.-24	28	115	102	8171,28	0,00094	1,221	1.299	18,70	2,3	23,34	-	-
16	Suelo + 7% cemento + Terrasil	23-jul.-24	30-jul.-24	7	115	100	7853,98	0,00090	1,297	1.436	16,80	2,1	21,82	-	-
17			30-jul.-24	7	115	100	7853,98	0,00090	1,198	1.326	17,10	2,2	22,21	-	-
18			20-ago.-24	28	116	103	8332,29	0,00097	1,282	1.326	21,10	2,5	25,83	-	-
19			20-ago.-24	28	116	102	8171,28	0,00095	1,255	1.324	21,90	2,7	27,34	-	-
21	Suelo + 8% cemento + Terrasil	23-jul.-24	30-jul.-24	7	116	100	7853,98	0,00091	1,240	1.361	19,10	2,4	24,81	-	-
22			30-jul.-24	7	115	100	7853,98	0,00090	1,254	1.388	18,50	2,4	24,03	-	-
23			20-ago.-24	28	115	101	8011,85	0,00092	1,268	1.376	25,00	3,1	31,83	-	-
24			20-ago.-24	28	115	100	7853,98	0,00090	1,284	1.422	24,50	3,1	31,82	-	-

0989577865-0969402222

(593-2) 2025540

Leónidas Proaño N5-106 y Panamericana Norte



inggeopav@hotmail.com

www.inggeopav.com

@suelosinggeopav

## 7.8 Validación y recolección de datos



Quito, 10 de diciembre de 2024

Yo, Silvia Patricia García Delgado, portadora de la cédula de ciudadanía N° 1312302100, en calidad de responsable de INGGEOPAV (empresa de ingeniería, geotecnia y pavimentos), hago constar que he validado la recolección de datos de la investigación del trabajo de Titulación **“ESTABILIZACIÓN DE ARENA POROSA (PUMITA) MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO Y TERRASIL”** realizado por parte del Ing. Jorge Iván Burbano Del Castillo, con cédula de ciudadanía N° 1721406419.

Atentamente,



SILVIA PATRICIA  
GARCIA DELGADO

Ing. Silvia García Delgado  
**INGGEOPAV**  
INGENIERÍA CIVIL, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS  
RUC: 1312302100001  
[inggeopav@gmail.com](mailto:inggeopav@gmail.com)