

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



**Estudio experimental de la nanosílice para el mejoramiento de subrasante  
en suelos arcillosos**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**AUTOR**

**Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos**

**ASESOR**

**Juan Merino Roncero**

**<https://orcid.org/0000-0002-5753-7664>**

**Chiclayo, 2025**

**Estudio experimental de la nanosílice para el mejoramiento de  
subrasante en suelos arcillosos**

PRESENTADA POR

**Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos**

A la Facultad de Ingeniería de la  
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo  
para optar el título de

**INGENIERO CIVIL**

APROBADA POR

Segundo Guillermo Carranza Cieza

PRESIDENTE

Angel Alberto Lorren Palomino

SECRETARIO

Juan Merino Roncero

VOCAL

## **Dedicatoria**

Esta investigación va dedicado a mi hijo Thiago Matteo por ser el motor fundamental de poder esforzarme día a día.

A las dos mujeres de mi vida: Silvia Llanos Parraguez y María Catalina Parraguez de Llanos que gracias a sus sabios consejos y apoyo incondicional siempre me motivaron a creer en mí y nunca darme por vencida. Las amo.

A mis padres Juan Pedro y Silvia Soledad que desde pequeña fueron mis guías y ejemplo a seguir, formando de mí una mujer de valores y virtudes.

A mis hermanos Iker y Krystal por su presencia, respaldo y cariño.

## **Agradecimientos**

A Dios por orientarme en mi vida y mi carrera universitaria, por ser fortaleza en los momentos más difíciles y por brindarme una vida llena de aprendizajes y experiencias.

A mis padres, por sacrificar su tiempo y esfuerzo con tal de verme realizada como profesional.

A mi abuela por su amor, sus sabios consejos y aliento constante de terminar mi carrera.

A la excelente plana docente, por guiarnos tanto en formación académica como personal a lo largo de la carrera.

## TESIS

### INFORME DE ORIGINALIDAD

<b>25%</b> INDICE DE SIMILITUD	<b>25%</b> FUENTES DE INTERNET	<b>2%</b> PUBLICACIONES	<b>5%</b> TRABAJOS DEL ESTUDIANTE
-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------	--------------------------------------

### FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>tesis.usat.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>14%</b>
<b>2</b>	<b>hdl.handle.net</b> Fuente de Internet	<b>8%</b>
<b>3</b>	<b>vdocumento.com</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>4</b>	<b>repositorio.unc.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>5</b>	<b>Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez</b> Trabajo del estudiante	<b>&lt;1%</b>
<b>6</b>	<b>tesis.pucp.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>7</b>	<b>Submitted to Universidad Cesar Vallejo</b> Trabajo del estudiante	<b>&lt;1%</b>
<b>8</b>	<b>Submitted to Aliat Universidades</b> Trabajo del estudiante	<b>&lt;1%</b>
<b>9</b>	<b>Submitted to Universidad Andina del Cusco</b> Trabajo del estudiante	<b>&lt;1%</b>
<b>10</b>	<b>Submitted to Universidad Continental</b> Trabajo del estudiante	<b>&lt;1%</b>

## Índice

<b>Resumen .....</b>	<b>15</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>16</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>17</b>
<b>Revisión de literatura.....</b>	<b>19</b>
<b>Antecedentes .....</b>	<b>19</b>
<b>Bases teórico - científicas.....</b>	<b>23</b>
Suelos .....	23
Mejoramiento de suelos.....	23
Manual de carreteras: suelos, geología, geotecnia y pavimentos. Sección suelos y pavimentos .....	23
Criterios normativos .....	23
Tipos de estabilización .....	24
Subrasante .....	25
Suelo Arcilloso: .....	25
Gaia Nanosílíce: .....	26
Ensayos de Laboratorio .....	27
<b>Materiales y métodos.....</b>	<b>31</b>
<b>Tipo de Investigación.....</b>	<b>31</b>
Nivel de Investigación .....	31
Enfoque de Investigación .....	31
<b>Diseño de Investigación.....</b>	<b>31</b>
Hipótesis .....	31
Objeto de estudio .....	31
Operacionalización de variables .....	32
<b>Población, muestra y muestreo .....</b>	<b>32</b>
Población .....	32
Muestra .....	32
Muestreo .....	36
Criterios de selección .....	36

Procedimientos .....	37
Suelo arcilloso .....	37
<b>Consideraciones éticas:</b> .....	<b>53</b>
<b>Resultados y Discusión.....</b>	<b>54</b>
Resultados.....	54
Discusión:.....	75
<b>Conclusiones: .....</b>	<b>83</b>
<b>Recomendaciones.....</b>	<b>85</b>
<b>Referencias bibliográficas: .....</b>	<b>86</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXOS: .....</b>	<b>89</b>

## Lista de Imagen

Imagen 1: Correlación entre clasificación de suelos AASHTO y SUCS .....	29
Imagen 2: Coeficiente de confiabilidad Z.....	34
Imagen 3: Zona de estudio en el distrito de Pimentel. ....	38
Imagen 4: Zona de extracción de la C-01.....	39
Imagen 5: Zona de extracción de la C-02.....	39
Imagen 6: Zona de extracción de la C-03.....	40
Imagen 7: Zona de extracción de la C-04.....	40
Imagen 8: Zona de extracción de la C-05.....	41
Imagen 9: Secado de muestra de cada calicata.....	41
Imagen 10: Material de nanosílice con el que se realizó los ensayos. ....	42
Imagen 11: Ingreso del material al laboratorio de la USAT .....	42
Imagen 12: Muestra el peso de la calicata 04 antes y después de ser sacada del horno.....	44
Imagen 13: Materiales que se utilizó para el ensayo de granulometría.....	45
Imagen 14: Ensayo de hidrometría de las cinco calicatas naturales.....	45
Imagen 15: Colocación en la cuchara de casa grande y extensión de las muestras. ....	46
Imagen 16: Pesado de mis muestras de Atterberg.....	46
Imagen 17: Muestras pesada y colocadas al horno del ensayo de Atterberg. ....	47
Imagen 18: Ensayo de expansión por consolidación.....	47
Imagen 19: Peso y colocación de agua destilada para el ensayo.....	48
Imagen 20: Saturación y compactación de material para Proctor Modificado. ....	49
Imagen 21: Enrasado y pesado de molde. ....	49
Imagen 22: Aplicación de sobre cargas e hidratación de molde. ....	50
Imagen 23: Curva Granulométrica por tamizado de la Calicata 1. ....	56
Imagen 24: Curva Granulométrica por tamizado de la Calicata 3. ....	57
Imagen 25: Curva Granulométrica por tamizado de la Calicata 4 .....	58

Imagen 26:Curva Granulométrica por tamizado de la Calicata 5. ....	59
Imagen 27: Curva Granulométrica por hidrómetro de la Calicata 1. ....	60
Imagen 28:Curva Granulométrica por hidrómetro de la Calicata 2 .....	61
Imagen 29:Curva Granulométrica por hidrómetro de la Calicata 3. ....	62
Imagen 30: Curva Granulométrica por hidrómetro de la Calicata 4. ....	63
Imagen 31:Curva Granulométrica por hidrómetro de la Calicata 5 .....	64

## Lista de Tablas

Tabla 1: Ficha técnica de GAIA nanosílice - Ulmen .....	26
Tabla 2: Clasificación de suelos según el índice de plasticidad.....	28
Tabla 3: Operacionalización de variable dependiente e independiente de la investigación.....	32
Tabla 4: Número de muestras para límites de Atterberg en muestras naturales .....	33
Tabla 5: Cantidad de muestras para límites de Atterberg en muestras natural y con adiciones. .....	33
Tabla 6: Cantidad de ensayos de Proctor para muestra patrón y adiciones.....	33
Tabla 7: Cantidad de ensayos CBR para muestra patrón y adiciones.....	35
Tabla 8: Cantidad de ensayos de Expansión para muestra patrón y adiciones. ....	35
Tabla 9: Cantidad de ensayos de Corte directo con adición al 1% de nanosílice .....	35
Tabla 10: Código de las cinco muestras de calicatas .....	41
Tabla 11: Contenido de humedad de las cinco calicatas.....	54
Tabla 12: Resumen del ensayo de granulometría.....	55
Tabla 13: Distribución granulométrica para calicata 01.....	56
Tabla 14: Distribución granulométrica para calicata 02.....	56
Tabla 15: Distribución granulométrica para calicata 03.....	57
Tabla 16: Distribución granulométrica para calicata 04.....	58
Tabla 17: Distribución granulométrica para calicata 05.....	58
Tabla 18: Análisis granulométrico por hidrómetro de la Calicata 1. ....	59
Tabla 19: Análisis granulométrico por hidrómetro de la Calicata 2 .....	60
Tabla 20: Análisis granulométrico por hidrómetro de la Calicata 3. ....	61
Tabla 21: Análisis granulométrico por hidrómetro de la Calicata 4 .....	62
Tabla 22: Análisis granulométrico por hidrómetro de la Calicata 5. ....	63
Tabla 23: Límites de Atterberg de la Calicata 1 .....	64
Tabla 24: Límites de Atterberg de la Calicata 2.....	64

Tabla 25: Límites de Atterberg de la calicata 3.....	65
Tabla 26: Límites de Atterberg de la Calicata 4.....	65
Tabla 27: Límites de Atterberg de la Calicata 5.....	65
Tabla 28: Cinco calicatas según clasificación de suelo.....	65
Tabla 29: Gravedad Específica de muestras naturales. ....	66
Tabla 30: Relación densidad-humedad del Ensayo Proctor de las calicatas sin adición.....	66
Tabla 31: Resultados de ensayo de CBR para la C-01.....	67
Tabla 32: Resultados de ensayo de CBR para la C-02.....	67
Tabla 33: Resultados de ensayo de CBR para la C-03.....	67
Tabla 34: Resultados de ensayo de CBR para la C-04.....	67
Tabla 35: Resultados de ensayo de CBR para la C-05.....	67
Tabla 36: Promedio de las 10 repeticiones para muestra natural y adiciones de la C-01. ....	68
Tabla 37: Resumen de CBR en C-01 de muestra al 0% y con adiciones de nanosílice.....	68
Tabla 38: Promedio de las 10 repeticiones para muestra natural y adiciones de la C-02. ....	69
Tabla 39: Resumen de CBR en C-02 de muestra al 0% y con adiciones de nanosílice.....	69
Tabla 40: Promedio de las 10 repeticiones para muestra natural y adiciones de la C-03. ....	70
Tabla 41: Resumen de CBR en C-04 de muestra al 0% y con adiciones de nanosílice.....	70
Tabla 42: Límite de Atterberg de muestras adicionadas para la C1 con adiciones de 0%, 1%, 2%, 3% y 4% de Nanosílice. ....	71
Tabla 43: Límite de Atterberg de muestras adicionadas para la C2 con adiciones de 0%, 1%, 2%, 3% y 4% de Nanosílice. ....	71
Tabla 44: Límite de Atterberg de muestras adicionadas para la C4 con adiciones de 0%, 1%, 2%, 3% y 4% de Nanosílice. ....	72
Tabla 45: Expansión obtenido por el hinchamiento de CBR de la C1 tanto en suelo sin y con adición. ....	72
Tabla 46: Expansión obtenido por el hinchamiento de CBR de la C2 tanto en suelo sin y con adición. ....	73
Tabla 47: Expansión obtenido por el hinchamiento de CBR de la C4 tanto en suelo sin y con adición. ....	73
Tabla 48: Resumen de la expansión mediante el edómetro. ....	73

Tabla 49: Expansión mediante ensayo Lambe en la C-01. ....	74
Tabla 50: Expansión mediante ensayo Lambe en la C-02. ....	74
Tabla 51: Expansión mediante ensayo Lambe en la C-04. ....	74
Tabla 52: Costo para estabilización con cal al 4%. ....	75
Tabla 53: Costo para estabilización con cemento al 6%. ....	76
Tabla 54: Costo para estabilización con nanosílice al 1%. ....	76
Tabla 55: Presupuesto entre un material convencional y la nanosílice. ....	81

## Lista de Ilustraciones

Ilustración 1:Ficha técnica de la GAIA Nanosílice – de la empresa Ulmen.....	89
Ilustración 2: Validación de ensayos de laboratorio.....	90
Ilustración 3: Extracción de la muestra de C-01 .....	91
Ilustración 4:Extracción de la muestra de C-02. ....	91
Ilustración 5:Extracción de la muestra de C-03 .....	92
Ilustración 6:Extracción de la muestra de C-04 .....	92
Ilustración 7:Extracción de la muestra de C-05 .....	93
Ilustración 8: Muestras de los ensayos de límites con nanosílice. ....	93
Ilustración 9: Ensayo de Hidrometría.....	94
Ilustración 10: Enrasado del Proctor. ....	94
Ilustración 11: Curado del CBR. ....	95
Ilustración 12: Ensayo granulométrico de C-01.....	96
Ilustración 13: Limite de Atterberg C1 muestra natural.....	97
Ilustración 14:Limite de Atterberg C1 al 1% de nanosílice. ....	98
Ilustración 15:Limite de Atterberg C1 al 2% nanosílice .....	99
Ilustración 16:Limite de Atterberg C1 al 3% nanosílice .....	100
Ilustración 17:Limite de Atterberg C1 al 4% nanosílice .....	101
Ilustración 18:Limite de Atterberg C2 al natural. ....	102
Ilustración 19:Limite de Atterberg C2 al 1% nanosílice .....	103
Ilustración 20:Limite de Atterberg C2 al 2% nanosílice .....	104
Ilustración 21:Limite de Atterberg C2 al 3% nanosílice .....	105
Ilustración 22:Limite de Atterberg C2 al 4% nanosílice .....	106
Ilustración 23:Limite de Atterberg C3 al natural .....	107
Ilustración 24:Limite de Atterberg C4 a la muestra natural .....	108
Ilustración 25:Limite de Atterberg C4 al 1% nanosílice .....	109
Ilustración 26:Limite de Atterberg C4 al 2% nanosílice .....	110

Ilustración 27:Limite de Atterberg C4 al 3% nanosílice .....	111
Ilustración 28:Limite de Atterberg C4 al 4% nanosílice .....	112
Ilustración 29:Limite de Atterberg C5 en muestra natural.....	113
Ilustración 30:Ensayo de expansión C1 al 1% nanosílice .....	114
Ilustración 31:Curva de expansión de C1 al 1%. .....	115
Ilustración 32:Ensayo de expansión de C1 al 2% nanosílice .....	116
Ilustración 33:Curva de expansión de C1 al 2%. .....	117
Ilustración 34:Ensayo de expansión de C1 al 3% nanosílice .....	118
Ilustración 35:Curva de expansión de C1 al 3% nanosílice .....	119
Ilustración 36:Ensayo de expansión de C1 al 4% nanosílice .....	120
Ilustración 37:Curva de expansión de C1 al 4% nanosílice .....	121
Ilustración 38:Ensayo de expansión de C2 al 1% nanosílice .....	122
Ilustración 39: Curva de expansión de C2 al 1% nanosílice .....	123
Ilustración 40:Ensayo de expansión de C2 al 2% nanosílice .....	124
Ilustración 41:Curva de expansión de C2 al 2% nanosílice .....	125
Ilustración 42:Curva de expansión de C2 al 3% nanosílice .....	126
Ilustración 43:Ensayo de expansión de C2 al 4% nanosílice .....	127
Ilustración 44:Curva de expansión de C2 al 4% nanosílice .....	128
Ilustración 45:Ensayo de expansión de C4 a la muestra natural .....	129
Ilustración 46:Ensayo de expansión de C4 al 1% nanosílice .....	130
Ilustración 47:Curva de expansión de C4 al 1% nanosílice .....	131
Ilustración 48:Ensayo de expansión de C4 al 2% nanosílice .....	132
Ilustración 49:Curva de expansión de C4 al 2% nanosílice .....	133

## Lista por gráfico

Gráfico 1: Valores obtenidos del ensayo de contenido de humedad en suelo natural C-1, C-2, C-3, C-4 y C-5.....	55
Gráfico 2: Curva Granulométrica por tamizado de la Calicata 2.....	57
Gráfico 3: Resumen de la GS de muestras C1,C2, C3, C4 y C5.....	66
Gráfico 4: CBR al 95% de C-01de la muestra patrón y muestra con adiciones de nanosílice.	69
Gráfico 5: CBR al 95% de C-02 de la muestra patrón y muestra con adiciones de nanosílice. .....	70
Gráfico 6:CBR al 95% de C-04 de la muestra patrón y muestra con adiciones de nanosílice.	71
Gráfico 7: CBR al 95% en C1, C2 y C4 con dosificaciones al 0%, 1%, 2%, 3% y 4%.....	77
Gráfico 8: Índice de plasticidad en C1, C2 y C4 con dosificaciones al 0%, 1%, 2%, 3% y 4%. .....	78
Gráfico 9: Ensayo de expansión mediante el edómetro para la C1, C2 y C4 con dosificaciones al 0%, 1%, 2%, 3% y 4%. .....	79
Gráfico 10:Gráfico 8: Corte directo en C1, C2 y C4 con dosificaciones al 0%, 1%, 2%, 3% y 4%.....	80
Gráfico 11:Comparación del presupuesto económico de cal, cemento y nanosílice. ....	81

## Resumen

Este trabajo de investigación evalúa los cambios de las características físico-mecánicas al añadir la nanosílice en suelos arcillosos de baja plasticidad para subrasante en pavimentos urbanos. Para este estudio los porcentajes de aditivo que se establecieron es de 1%, 2%, 3% y 4% en función del peso del suelo, cumpliendo con las exigencias normativas.

Según las repeticiones de ensayos de laboratorio tenemos que el porcentaje del 1% de nanosílice aumenta entre 216.33 a 330.55% su resistencia con respecto al suelo natural, dando como dato favorable de 30 resultados por muestra. También se hicieron ensayos de límites de plasticidad, se determinó que al momento de incrementar los porcentajes de nanosílice la plasticidad sube con respecto al suelo natural. Además, se evaluó la expansión de la nanosílice por tres métodos: ensayo de Consolidación, ensayo Lambe y la expansión de CBR.

Por último, para el estudio costo-beneficio se dedujo que el uso de nanosílice al 1% es menor su costo en comparación con el uso de Cal Viva al 4% y Cemento Portland al 6%.

**Palabras clave:** nanosílice; suelos; estabilización; subrasante.

### **Abstract**

This research evaluates the changes in the physical-mechanical characteristics when nanosilica is added to clayey soils of low plasticity for subgrade in urban pavements. For this study, the additive percentages established were 1%, 2%, 3% and 4% according to the weight of the soil, complying with the regulatory requirements.

According to the repetitions of laboratory tests we have that the percentage of 1% of nanosilica increases between 216.33 to 330.55% its resistance with respect to the natural soil, giving as favorable data 30 results per sample. Plasticity limit tests were also carried out, and it was determined that when increasing the percentage of nanosilica the plasticity increases with respect to the natural soil. In addition, the expansion of nanosilica was evaluated by three methods: Consolidation test, Lambe test and CBR expansion.

Finally, for the cost-benefit analysis it is concluded that the use of 1% nanosilica is lower from the economic point of view compared to the use of 4% quicklime and 6% Portland cement.

Translated with DeepL.com (free version)

**Keywords:** nanosilica; soils; stabilization; subgrade.

## Introducción

El sistema nacional vial presenta pésimas condiciones en el estado de las carreteras en el país, especialmente la Red de caminos vecinales el cual se debe tomar correctivas con el fin de mejorar la forma de vida de las personas, generando vínculos a través de la actividad económica [1].

Según el Ministerio de Transporte y Comunicaciones son varios los departamentos que más frecuentan estos problemas viales en el territorio peruano a causa de los suelos que presentan elevada inestabilidad, debido a la gran diversidad de suelos como son los suelos arenosos y arcillosos en la costa y los suelos accidentados en la parte sierra y selva [2].

El daño generado por un suelo expansivo a una estructura vial resulta ser mucho más severo que los daños que puede generar un desastre natural, según lo determina la National Science Foundation [3].

La tesis investigativa está basada en suelos arcillosos cuyo problema principal es la humedad, ya que estos suelos al tener contacto con algún fluido varía considerablemente sus propiedades mecánicas y físicas debido a que disminuye su capacidad portante, muestran problemas de expansión y contracción cuando se mojan y secan respectivamente, siendo la primordial consecuencia el deterioro de las estructuras cimentadas sobre ellas, condiciones por la cual este tipo de suelo no puede ser utilizado en construcción de carreteras debido a que no cumple con los estándares mínimos de la normativa peruana actualizada, por lo que es inevitable recurrir a procesos de estabilización de suelos. Además, se analiza las características de las arcillas en condiciones saturadas, ya que se presentan en forma plástica, maleable y hasta deformable, lo cual en temporadas de lluvia las carreteras se vuelvan intransitables; por lo que impide el acceso vehicular a los lugares más lejanos de la ciudad y dificulta la comunicación con la población.

Es por esta razón que los estabilizantes químicos y físicos en la construcción cumplen un rol importante cuya función es mejorar las propiedades físicas y mecánicas del suelo sobre los que se ejecutarán edificaciones que ayudarán con el desarrollo del Perú. En la industria existen distintos estabilizadores, por lo cual estudiaremos como es la aplicación de la nano sílice. En los últimos diez años los avances de la ciencia han ido evolucionando mediante el uso de la nanotecnología aplicado a diferentes usos facilitando así grandes cambios en la construcción.

La nanosílice es un material nanotecnológico que se encuentra aún en estudio cuyos beneficios son: permite reducir el cemento ya que produce partículas de CSH que mantiene cohesionado a todas ellas mejorando sus propiedades físicas y mecánicas, además la nano sílice es considerada con el nombre de "GAIA" en comparación la antigua diosa griega de la tierra cuidaba de sus hijos, este producto protege nuestro medio ambiente, la salud de las personas y al hormigón [4].

La justificación para realizar esta investigación se encuentra respaldada por los siguientes aspectos: en el aspecto teórico, nos menciona que este proyecto investigativo generará nuevos conocimientos nanotecnológicos y asimismo propone una nueva alternativa para poder estabilizar a los suelos arcillosos a nivel de subrasante mediante el uso de las nanosílice, de tal manera que su uso sea eficiente en costo – tiempo con respecto al mejoramiento convencional.

En el aspecto social, permite mejorar la calidad de vida de la población al proporcionar nuevos nanomateriales en la estabilización de suelos y estos sean adecuados para sus construcciones tradicionales.

En el aspecto económico, la estabilización de suelos con nanosílice, es un material con un precio accesible que compensa la realización de mantenimiento en una subrasante convencional.

En el aspecto medioambiental la nanosílice es un producto eco ambiental que cumple con la normativa ambiental ISO-14001, y también al ser un producto que tiene menor actividad operacional y flujo de material, tendrá una reducción de costo. Por lo que, la elección de nanosílice para la estabilización de suelos es una medida ambientalmente responsable; alineándose con la conservación del entorno y la promoción de prácticas de construcción más sostenibles y amables con el medio ambiente.

Frente a lo explicado anteriormente surge la siguiente interrogante ¿Qué dosificación influye de manera óptima la aplicación de la nano sílice para la estabilización de la subrasante en suelos arcillosos? Para responder a la formulación del problema se tiene como **objetivo principal**; Determinar la dosificación óptima de la nanosílice en diferentes porcentajes en la estabilización de suelos arcillosos a nivel de subrasante, asimismo como **objetivos específicos**; Calcular la variación según la capacidad del portante del suelo arcilloso natural con el nanosílice a nivel de subrasante; Evaluar el índice de plasticidad del suelo arcilloso natural con el de nanosílice; Evaluar el índice de expansión del suelo arcilloso natural con el de nanosílice; Comparar el costo del uso de nanosílice con otro material convencional para la estabilización de suelos arcillosos a nivel de subrasante.

## Revisión de literatura

### Antecedentes

Según [5] Este artículo estudia el efecto de los nanomateriales con diferentes porcentajes desde el 0,5%, 1,

0%, 1,5% hasta el 2,0% sobre las propiedades del suelo expansivo. La densidad de la nanosílice es de 2.17 – 2.66 gr/cm<sup>3</sup>. Los ensayos realizados para determinar las características del suelo son: prueba de límite líquido, prueba de compresión libre, prueba de compactación, prueba de corte directo, e índice de oleaje. Los resultados con respecto al límite líquido del suelo natural son de 44.92, mientras que el suelo de nanosílice es de 32.07. La cohesión para el suelo sin adición es 0.2 mientras que el suelo de nanosílice es 0.5, la reducción de la cohesión fue del 150% porque es 1,5 veces más que el normal. Para el ensayo de compresión resultó ser 7.626 N/mm. mientras que el suelo con adición es de 13 N/mm<sup>2</sup>. El porcentaje en la reducción de la resistencia al corte fue del 70.46%. El valor para el hinchamiento del suelo es del 18.1%. mientras que el suelo de nanosílice es 12.5. El porcentaje de reducción de la resistencia al corte fue del 44.8%. En conclusión, el nanosuelo reemplazado es más estable que el suelo estudiado.

Según [6]. El desarrollo de este artículo científico está basado en la investigación de la nanosílice con respecto a las propiedades sobre los límites de Atterberg y características de compactación en un suelo arcilloso, utilizando porcentajes de 1%, 3%, 5% y 7% de adición en peso de suelo. En esta investigación tuvo un total de 75 muestras de pruebas. La nanosílice utilizada es de la marca Astrra Chemicals con una densidad templada de 47 g/L. El resultado fue un incremento en las propiedades del suelo como contenido óptimo de humedad (OMC), límite plástico, límite líquido y disminución en la densidad seca máxima (MDD), con un incremento en el % de Nano sílice. Se encontró que el límite de suelo de Casagrande aumentó de 57,18% para suelos sin tratar a 76,05% hasta 7% de nanosílice y el MDD del suelo se redujo en un 19,54% al mezclar con nanosílice hasta un 7%.

Según [7] usa tres tipos de suelos: arcilla, arena, arena arcillosa. Ellos proponen utilizar la nanosílice al 0%, 0.3% y 0.5% como aditivo, y como agente estabilizador al cemento Portland normal a un 0%, 5% y 10%, estos se mezclaron en base al peso del suelo seco, además la nanosílice se dispersó en agua durante 5 min con un mezclador de alta velocidad (120 rpm).

Los límites líquido y plástico de la arcilla pura aumentan en un 9% (49%/58%) y un 4% (31%/35%), respectivamente, al agregar un 10% de cemento, sin embargo, en suelos arenosos arcillosos no hubo cambio notable en el índice de plasticidad. El mayor índice de plasticidad (7%) se obtuvo en CS5CEM0.3NS. El aumento del contenido de NS redujo significativamente el índice de plasticidad de CS10CEM-NS, y el índice de plasticidad de CS10CEM0.7NS fue del 4%. Con la adición de cemento a la arcilla y arena arcillosa, el contenido óptimo de agua aumentó ligeramente, mientras que el peso unitario seco disminuyó. La adición de cemento a la arena tuvo un efecto más pronunciado, y los contenidos óptimos de agua disminuyeron y los pesos unitarios máximos aumentaron. Los resultados de la prueba de corte directo, las tensiones de corte medidas bajo tensiones normales de 54,5 kPa, 109 kPa y 218 kPa en el suelo arcilloso sin tratar y en el suelo arcilloso tratado con 0,5% de NS la cohesión aumenta en un 55%. Se utilizó Thermo Scientific Apreo SEM para la evaluación microestructural de las muestras, cuyo resultado la C10CEM0.7NS es más densa en comparación con la de C5CEM0.5NS.

Según [8] se realizaron los ensayos se realizaron las pruebas de límites de Atterberg, compactación estándar, permeabilidad y no consolidado sin drenaje (UU) en un suelo de grano fino mezclado con 1, 2, 3 y 4% en peso de NS. La densidad para utilizar en la nanosílice es de 2.4 gr/cm<sup>3</sup>. Además, se logró una resistencia máxima adicional de 60 a 68 % mediante la realización de pruebas UU triaxiales en la muestra tratada con 2 % de NS bajo una presión de confinamiento. También, la cohesión y el ángulo de fricción interna de la muestra tratada con NS aumentaron en comparación con la muestra no tratada con NS. Las imágenes SEM de muestras estabilizadas con NS representan los enlaces físicos y químicos entre las partículas del suelo y el NS. Agregar NS al suelo de grano fino aumenta los valores de PL y LL pero disminuye los valores de PI. Se concluye que al añadir la NS aumenta el contenido de humedad óptimo y disminuye la densidad seca máxima. El coeficiente de permeabilidad del suelo de grano fino disminuye significativamente al estabilizarlo con NS. Por último, las resistencias triaxiales de las muestras estabilizadas con 1, 2 y 3% de NS aumentan aproximadamente 1,2, 1,65 y 1,25 veces en comparación con la muestra natural.

Según [9], usa tres porcentajes de cal, cemento y humo de sílice (5, 7, 9%) para estabilizar el suelo expansivo. La investigación consiste en utilizar una prueba de consolidación para registrar la libre hinchamiento y presión de hinchamiento para los suelos tratados y no tratados. Para mantener la mejora de la capacidad portante se utiliza la técnica del grouting.

Se concluye que el suelo estabilizado con diferentes porcentajes de cal, cemento y humo de sílice presenta una disminución tanto en el hinchamiento libre como en la presión de hinchamiento de 65% y 76%, respectivamente, en comparación con el suelo natural. El suelo con humo de sílice aumenta el valor de la capacidad de carga de las zapatas que descansan sobre el suelo con adición entre un 64% y un 82% respectivamente para el suelo tratado con 5% y 9% de humo de sílice, respectivamente, en comparación con el suelo normal.

Según [10]. El artículo científico se realizan los siguientes ensayos de la nanosílice en los parámetros de compactación, límites de Atterberg, conductividad hidráulica, consolidación, relación de rodamiento de California y módulo de elasticidad. El incremento de nanosílice al 0.4% de adición aumenta 2.4 veces más a su estado natural y luego empieza a decrecer, aun así, los valores siguen siendo mayor que el estado natural. Al añadir 1 a 2% de nanosílice aumenta la cohesión, pero decrece significativamente el ángulo de fricción interna, además en el índice de plasticidad la adición del 1 al 4% del aditivo reduce de 0.42 a 0.64 veces de la muestra natural. Con respecto a su contenido humedad aumenta y su MDD disminuye al incorporar del 2 al 7% de la adición. En el ensayo de resistencia a la compresión libre aumenta al añadir del 0.7 a 5% de nanosílice conforme aumenta el porcentaje aumenta su resistencia de 1.38 a 6.65 veces que la muestra tratada, sin embargo, superior al 5% la resistencia disminuye.

El artículo científico [11] realizó el estudio de dos tipos de aditivos: la nanosílice y la microsílice. Los autores mediante ensayos comparan los efectos de cada uno de los 2 aditivos sobre el cambio en los parámetros geotécnicos de la arcilla. Los porcentajes de cada uno de los dos aditivos están limitados al 6% y las muestras han sido analizadas con un curado de 28 días. Los ensayos realizados son límites de Atterberg, las condiciones de compactación de las muestras, la resistencia al corte no drenado. Los resultados demostraron que el nanosílice alcanzó un efecto óptimo en dosis inferiores al 2% sobre la resistencia a la compresión libre y el módulo de elasticidad del suelo. Al aumentar la dosis de adición, la resistencia de las muestras se acerca más a la obtenida para muestras estabilizadas con microsílice, en cambio, en muestras que contienen nanosílice, el aumento de la resistencia en porcentajes inferiores al 1% de la adición tuvo una tasa mayor, mientras que la microsílice siguió una tendencia estable. Al agregar aditivos la DMS disminuyó hasta un 5% y mostró un OMC más alto. Además, al incorporar más del 2% de nanosílice se observó un aumento en el límite líquido y en el índice de plasticidad del suelo, mientras que la microsílice decrece sus valores.

La difracción de rayos X (XRD) mostró que los aditivos no produjeron ninguna reacción química significativa en el suelo. Además, el examen de microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (FESEM) demostró que ambos materiales desempeñaron un papel importante en la reducción de la porosidad y la creación de integridad de las partículas. Sin embargo, la diferencia de ambos fue particularmente influyente en términos de absorción de agua por la muestra.

Según [12] usan el tipo de suelo arcilloso con plasticidad intermedia. Ellos realizan el estudio usando la nanosílice al 0%, 0.25%, 0.5%, 0.75% y 1.0% con respecto al peso del suelo. La nanosílice es obtenida de la empresa ubicada en Delhi en forma de polvo blanco con una densidad de 2,4 g/cm<sup>2</sup>. Las características del suelo natural tienen una gravedad específica 2.69, con un índice de plasticidad de 18.88, con 1.79% de contenido de humedad y una densidad máxima seca de 1.79 y una resistencia al corte y al CBR de 59.33 y 3.86 respectivamente. De los 4 porcentajes que se analizó se concluye que para las tres primeras dosis de nanosílice las características del suelo y el CBR aumenta, y para la última muestra una disminución gradual. El porcentaje óptimo de nanosílice es al 0.75% ya que los resultados a la resistencia al corte libre y CBR aumenta al 69% y 49.22% de suelo natural.

El artículo científico [13] investigó los efectos de la nanosílice sobre arcilla estabilizada con cal, Límites de Atterberg, ensayos de compactación y resistencia a la compresión libre en muestras que contienen 0, 1, 3 y 5% en peso de nanosílice, así como 0, 2 y 4% en peso de cal. Las muestras se realizaron con un tiempo de curado de 7 y 28 días de edad. Una ligera adición de nanosílice a la arcilla mezclada con cal da como resultado una mejora significativa en las propiedades plásticas, la compactación, la resistencia y el hinchamiento del suelo modificado. La alta suavidad de las partículas de nanosílice, la adición de nanosílice en porcentajes elevados puede aumentar la plasticidad del suelo. Sin embargo, las propiedades de plasticidad del suelo han mejorado considerablemente en muestras en las que se utilizan nanosílice y cal, de modo que en muestras que contienen 4% y 5% de nanosílice-cal respectivamente, el valor del índice de plasticidad del suelo disminuye hasta 6. por lo tanto, se pierde la plasticidad del suelo y el suelo se vuelve más trabajable. Por supuesto, los resultados indican que no se observan cambios significativos del 3 al 5% de la adición de nanosílice. La adición de nanosílice sola causó un ligero aumento en el contenido óptimo de humedad del suelo y un ligero disminución del peso específico de las muestras.

## **Bases teórico - científicas**

### **Suelos**

#### **Definición**

Se denomina “suelo” al elemento natural con mayor abundancia, también es un recurso biótico de carácter importante para que ser el humano, fauna y flora puedan desarrollarse. Según la norma E.020 conceptualiza al “suelo” como agregado natural que tiene como componentes a diversos minerales que no se encuentran consolidados [14]

#### **Propiedades del suelo**

Es importante conocer la estabilidad y durabilidad vial, para la selección de suelos adecuados y para ello se debe evaluar sus propiedades son fundamentales para la construcción de carreteras seguras y eficientes [15]

#### **Mejoramiento de suelos**

Este procedimiento que se puede lograr a través de procedimientos de carácter químico, físico o mecánico. Se realizan en suelos que a partir de estudios geotécnicos son denominados malos o pocos óptimos para llevar a cabo procedimientos ingenieriles, con el fin de perfeccionar algunas propiedades como resistencia, durabilidad y permeabilidad.

#### **Manual de carreteras: suelos, geología, geotecnia y pavimentos. Sección suelos y pavimentos**

Nos permite desarrollar la parte de suelos, pavimentos, y caminos. La finalidad es ayudar al ingeniero con las pautas y criterios técnicos que hagan más fácil el diseño de los estratos principales para obtener una buena estabilidad estructural vial y lograr un correcto desempeño en términos de eficiencia y economía. [15]

#### **Criterios normativos**

El del MTC 2014 propone 6 principios geotécnicos para saber si es necesario estabilizar o no un suelo de subrasante, éstos son:

- Según el manual de carreteras recomienda estabilizar los suelos de subrasante que sea inferior al 6% de CBR.

- Para subrasante arcillosa o limosa que presente algún daño en las capas granulares del suelo se mezclen con sus partículas finas, deberá realizarse una capa de material anticontaminante de espesor mínimo de 10 cm o un geotextil.
- La superficie de la subrasante debe estar arriba del nivel freático como mínimo: 0.60 m para una subrasante extraordinaria o excelente (CBR mayor al 20%); 0.80 m para una subrasante buena y regular (CBR debe ser mayor al 6% y menor al 20%), y para CBR menores al 6% debe de estar entre 1.00 m a 1.20 m.
- En suelos que se encuentren a 4000 msnm, se evaluará la susceptibilidad a congelamiento, el cual interviene la profundidad del nivel freático.
- Se determina el tipo de suelo, para así reconocer si requieren o no una estabilización.
- Para elegir el método de estabilización se tiene que seguir los siguientes criterios: saber el uso y tipo de suelo a estabilizar, tipo, experiencia, disponibilidad y costo del aditivo estabilizador.

### **Tipos de estabilización**

El MTC, a través de su manual, establece tres tipos:

- La estabilización mecánica: Esta estabilización mejora el material de subrasante sin cambiar la estructura y composición básica de la misma, ya que permite aumentar la resistencia al corte del suelo, disminuye la compresibilidad, permeabilidad y potencial de expansión-contracción. [15].
- La estabilización mediante la combinación de suelos implica la utilización de materiales adicionales provenientes de una fuente externa con el fin de mejorar las características del terreno.

Conforme a la sección 207 del Manual de Carreteras, se establecen los requisitos y estándares técnicos generales que deben ser cumplidos durante el proceso de construcción. El suelo adicional debe ser aplicado en las ubicaciones determinadas en el expediente del proyecto, en una cantidad apropiada para asegurar que la mezcla resultante cumpla con los estándares requeridos respecto a la incorporación del suelo existente.

- La estabilización mediante la sustitución de suelos se emplea cuando el objetivo es mejorar la subrasante mediante la adición de material. Este proceso puede llevarse a cabo construyendo la capa de manera inmediata sobre la superficie del suelo existente o excavando previamente y reemplazando el suelo natural con el material adicional.

## Subrasante

### Definición

Es la superficie terminada de la calzada a nivel de movimiento de tierras, sobre la estructura del pavimento o afirmado. Según con el RNE, la conceptualiza como “porción superior del terreno natural en corte o porción superior de relleno compactado”. El MTMC: la define como la superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras, sobre la cual se coloca la estructura del pavimento.

Cuando el material de la subrasante tiene tendencia a hincharse o congelarse, pueden surgir problemas con el pavimento debido al aumento de la aspereza de la superficie y disminución en la calidad del servicio vial. Por ello, la resistencia toma un rol importante en la determinación del grosor de las capas superiores del pavimento. En situaciones donde los datos del índice CBR son bajos, es necesario abordar la estabilización de los suelos subyacentes. Si los suelos por debajo del nivel superior de la subrasante tienen un CBR inferior al 6%, se dice que la subrasante es deficiente. [16]

### Suelo Arcilloso:

Estos tipos de suelos se definen como suelos fuertes, porque tienen permeabilidad baja al agua y muy alto a retener nutrientes. Asimismo, muestra un amplio número de poros pequeños y estos no solo tienen arcillas en su totalidad, pero estos tipos de suelos tienen limo y arena. Lo cual así se menciona un suelo arcilloso el porcentaje de suelo estima obligatoriamente que exceder la malla N°200.

### Características:

**Plasticidad:** Propiedad característica de los suelos arcillosos. Gracias a esta propiedad logra cambiar su consistencia (resistencia al corte) en función a la humedad.

**Hinchamiento:** es el aumento de volumen del material de suelo causado por la absorción de agua. Este fenómeno es característico de arcillas.

**Superficie específica:** Es la relación entre la superficie de una partícula de suelo y su masa.

**Tixotropía:** fenómeno por el que las arcillas pierden sus propiedades mecánicas al ser amasados, llegando a comportarse como líquidos; sin embargo, recuperan dichas propiedades al dejárseles en reposo.

## Gaia Nanosílice:

### Definición

Es un nano aditivo en estado líquido- viscoso, constituido en base a sílice con partículas de tamaño nanométrico. Gran reductor de agua, de alta actividad. Cumple con la exigencia normativa ASTM C-494 de Tipos A y F.

### Propiedades:

- Gran poder plastificante y reductor de agua.
- Incremento del desarrollo de alta resistencia inicial y final.
- Permeabilidad nula o casi nula por lo que aumenta la durabilidad del hormigón.
- Evita la segregación y la excesiva exudación.

<b>PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DE GAIA NANOSILICE</b>	
Aspecto Físico	Líquido turbio ligeramente viscoso.
Color	Café claro.
pH, 20°C	5,00 ± 1
Densidad, 20°C	1.030 ± 0.02 gr/ml.
Viscosidad, 20°C	13 ± 2 sec. (C. Ford No. 4)
Contenido en cloruros	< 0,01 %
Almacenamiento	Puede almacenarse durante 6 meses en su envase original cerrado, a temperaturas entre 5° y 35°.
Presentación	Bidón Plástico de 200 kg. Contenedor pallet de 1.000 kg.
<b>En caso de congelamiento del GAIA Nanosílice puede ser utilizado si se descongela lentamente a temperatura de 20°C y se agita de forma intensa.</b>	

*Tabla 1: Ficha técnica de GAIA nanosílice – Ulmen*

## Ensayos de Laboratorio

### Ensayos físicos

#### Análisis granulométrico MTC E 107 -ASTM D422

Este ensayo presenta partículas de diversos tamaños, y en función a estas se le puede dar una clasificación que depende de ciertos aspectos como: la proporción de partículas de grava, proporción de partículas de arena, proporción de partículas de finos [17]. El tamaño de los componentes nos permite diferenciar los suelos finos de los gruesos y para saber la distribución de las partículas del estrato es necesario graficar la curva granulométrica, ya que en ella se determina que bien o mal graduado se encuentra el suelo, o si su distribución es continua es discontinua. [17]

#### Fórmulas:

Para el % que pasa en malla 200:

$$\% Pasa = \frac{WT - WR \text{ tamiz } N^{\circ}200}{WT} \times 100$$

Para el porcentaje retenido:

$$\% Retenido = \frac{WR}{WT} \times 100$$

El % de partículas que pasa, según cada abertura:

$$\% Pasa = 100 - \% RA$$

#### Donde:

WT: Peso total

WR: Peso retenido

RA: Retenido acumulado

#### Límite de Atteberg (MTC EM 111-ASTM D4318)

Permiten conocer la característica de la plasticidad de un estrato en relación con su contenido de humedad.

Límite líquido (LL), cuando el suelo pasa del estado semilíquido a un estado de plasticidad, en este paso del proceso se puede moldurar. Para hallar el límite líquido de la muestra de suelo se utiliza la siguiente fórmula:

$$LL = W \left( \frac{N}{25} \right)^{0.121}$$

**Donde:**

LL = Límite líquido.

N = N° de golpes

W = % humedad del suelo

- Límite plástico (LP), cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado semisólido y se rompe.

$$L.P. = \frac{P_W}{P_S} \times 100$$

$$L.P. = \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

Límite de contracción (retracción), cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado sólido y deja de contraerse al perder humedad.

El índice de plasticidad es la diferencia entre el límite líquido y límite plástico de un suelo.

Mediante el IP se clasificará el suelo y se caracterizará que tanto o poca plasticidad tiene.

En decir, cuanto mayor sea el valor del índice de plasticidad, más amplio será el rango de humedad en el que el suelo conserva su capacidad de deformarse plásticamente [32].

INDICE DE PLASTICIDAD	PLASTICIDAD	CARACTERISTICA
IP > 20	Alta	Suelos muy arcillosos
IP ≤ 20; IP > 7	Media	Suelos arcillosos.
IP < 7	Baja	Suelos pocos arcillosos
IP = 0	No plástico (NP)	Suelos exentos de arcilla

*Tabla 2: Clasificación de suelos según el índice de plasticidad*

**Contenido de humedad (MTC 108-ASTM D2216):**

La humedad se encuentra en gran porcentaje en zonas donde el nivel freático no tiende a descender. Este ensayo permite comparar la humedad natural con la humedad óptima que se obtiene del ensayo de Proctor modificado.

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

## Clasificación de suelos

La clasificación más empleada son la clasificación AASHTO y SUCS. Esta clasificación autoriza pronosticar el comportamiento cercano de los suelos, ya que determina las zonas uniformes a partir de la perspectiva geotécnica.

CLASIFICACION AASHTO	CLASIFICACION SUCS
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM
A-1-b	GM, GP, SM, SP
A-2	GM, GC, SM, SC
A-3	SP
A-4	CL, ML
A-5	ML, MH, CH
A-6	CL, CH
A-7	OH, MH, CH

*Imagen 1: Correlación entre clasificación de suelos AASHTO y SUCS*

### Análisis granulométrico por medio del hidrómetro MTC E 109 – ASTM D 422

Este ensayo tiene como objetivo evaluar la distribución de tamaños de partículas en una muestra de suelo, en sus propiedades físicas, como la capacidad de drenaje, compactación y permeabilidad. Estos datos son esenciales para el diseño y la construcción de estructuras y carreteras. El método se basa en la sedimentación de un material suspendido en un líquido y también evalúa cómo varía su densidad con el tiempo.

Primero, se toma una cantidad de suelo seco que se coloca en un recipiente al que se añade un agente dispersante (hexametáfosfato de sodio), permitiendo que esta mezcla repose durante al menos 12 horas. Luego, la mezcla se transfiere a un recipiente ubicado en un agitador mecánico, donde se agita durante 60 segundos. Se vierte la muestra en un cilindro graduado para la sedimentación, añadiendo agua destilada hasta alcanzar una medida específica. La muestra se cubre y se agita durante 60 segundos. Después, se inicia un cronómetro y se sumerge lentamente el hidrómetro en la suspensión, tomando lecturas a intervalos regulares. Luego se retira el hidrómetro y se sumerge en un cilindro con agua limpia.

Durante el ensayo, se registra la temperatura utilizando un termómetro. Una vez recopilados los datos, se realizan los cálculos, correcciones y se generan gráficos correspondientes. Los resultados se expresan mediante una curva granulométrica que incluye la fracción de suelo evaluada mediante el método de tamizado, proporcionando el porcentaje de limo y arcilla.

## Ensayos mecánicos

### Corte directo (NTP 339 171)

Con este ensayo, se calcula la cohesión y el ángulo de fricción a partir de los datos recopilados en el gráfico de esfuerzo normal versus esfuerzo tangencial, considerando la consolidación inicial y final del suelo. Los datos generados se representan gráficamente en un diagrama de esfuerzo tangencial versus deformación del suelo, lo que permite visualizar la envolvente de falla del suelo a partir del gráfico de esfuerzo normal versus esfuerzo tangencial.

Este ensayo consta de una caja que aloja el ensayo, la cual incorpora piedras porosas en los extremos para facilitar el drenaje del suelo. Además, se emplean deformímetros para registrar los asentamientos y las deformaciones horizontales, junto con una celda de carga que mide y registra las fuerzas de corte aplicadas durante el ensayo. [17]

### Proctor modificado (MTC 115):

Es un ensayo de relevancia para este tipo de estudios, pues a través de este se puede dar a conocer el valor de mayor densidad cuando la muestra está en un estado seco, los estados de humedad en los que se encuentra y de la energía. Para cada relación de agua en la muestra, la densidad húmeda del suelo ( $Y_h$ ) se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$Y_h = \frac{W}{V_m} \qquad Y_S = \frac{Y_h}{1 + \frac{W(\%)}{100}}$$

### EL CBR (MTC E 132)

Es un ensayo conocido y muy importante que se utiliza en el estudio de mecánica de suelo de un proyecto, especialmente en la rama de pavimentación en carreteras. Para realizar este ensayo se debe conocer el tipo de suelo.

## **Materiales y métodos**

### **Tipo de Investigación**

La investigación es de naturaleza EXPERIMENTAL, donde se define a este tipo de investigación como un proceso científico que tiene como objetivo establecer y verificar relaciones empíricas entre variables y confirmar la validez de hipótesis, leyes o modelos mediante experimentos[39]. En decir, evaluar cómo varían las propiedades físicas y mecánicas para subrasantes de suelos arcillosos (variable dependiente) al variar el porcentaje de nanosílice (variable independiente), se analizará los resultados obtenidos que aportarán información importante para respaldar o descartar la hipótesis propuesta.

### **Nivel de Investigación**

El tipo de investigación es correlacional, ya que presenta los resultados de los ensayos de laboratorio en relación con las propiedades del suelo y su relación causal con la dosificación de la nanosílice.

### **Enfoque de Investigación**

La tesis investigativa tiene un enfoque cuantitativo, debido a que se busca cuantificar resultados a una muestra mayor mediante métodos estadísticos y usando magnitudes numéricas [39].

### **Diseño de Investigación**

#### **Hipótesis**

La adición de la nanosílice mejorará significativamente la estabilización de suelos a nivel de subrasante.

#### **Objeto de estudio**

Suelos arcillosos a nivel de subrasante.

## Operacionalización de variables

Se identificó la variable dependiente y la variable independiente, siendo estas de tipo cuantitativo.

VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADOR	RANGOS	MEDICIÓN	INSTRUMENTO
<b><u>Variable Independiente</u></b> Uso de nanosílice.	Dosificación	Volumen	1%, 2%, 3%, 4%	m3	Ensayo de laboratorio
VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADOR	MEDICIÓN	INSTRUMENTO	
<b><u>Variable Dependiente</u></b> Mejoramiento de la subrasante en suelos arcillosos	Propiedades mecánicas	Densidad máxima seca	%	Ensayo de Proctor Modificado ASTM D-1557, MTC-E115	
		Capacidad portante de la subrasante	%	Ensayo de CBR, ASTM D-1883, MTC E 132	
<b><u>Variable Interviniente</u></b> Caracterización de la nanosílice en la subrasante	Propiedades físicas	Granulometría	%	Ensayo de granulometría por tamizado NTP 339.128:1999 ASTM D-422, MTC E 107	
		Clasificación de suelos	nominal	SSUCS, ASTM D-2487 / AASHTO M-145	
		Peso específico	N/m3	Ensayo de densidad y peso específico	
	Plasticidad	Limite plástico	%	Límite de Atteberg (Ensayo de Casagrande), ASTM D-4318, MTC E111	

Tabla 3: Operacionalización de variable dependiente e independiente de la investigación

### Población, muestra y muestreo

#### Población

La población está constituida por el suelo arcilloso de Ubic. Rur. Vasallo – Sector Yortuque – Escute – Valle Chancay, C.P./ U.C 092387. Distrito Pimentel, Provincia Chiclayo, Región Lambayeque, durante el periodo 2023.

#### Muestra

El estudio se realizará en la carretera en el de Ubic. Rur. Vasallo – Sector Yortuque – Escute – Valle Chancay, C.P./ U.C 092387. Distrito Pimentel.

En el presente proyecto de investigación se tendrá en cuenta las diferentes cantidades muestrales tanto de un suelo natural (S) como el suelo experimental, suelo con nanosílice se representará con las denominaciones, S+0.5N, S+1N, S+2N, S+3N, S+4N. La cantidad muestral de los ensayos se muestran en la siguiente tabla.

Ensayo	Descripción	Calicata		
		C-01	C-02	C-04
Ensayo de Atterberg	Limite Liquido	1	1	1
	Limite plástico	1	1	1
	Índice de Plasticidad	1	1	1
<b>Subtotal</b>		3	3	3
<b>Total</b>		<b>9</b>		

Tabla 4: Número de muestras para límites de Atterberg en muestras naturales

Ensayo	Descripción	Calicata		
		C-01	C-02	C-04
Ensayo de Atterberg	S	3	3	3
	S+1% nanosílice	3	3	3
	S+2% nanosílice	3	3	3
	S+3% nanosílice	3	3	3
	S+4% nanosílice	3	3	3
<b>Subtotal</b>		15	15	15
<b>Total</b>		<b>45</b>		

Tabla 5: Cantidad de muestras para límites de Atterberg en muestras natural y con adiciones.

Ensayo	Descripción	Calicata		
		C-01	C-02	C-04
Ensayo de Proctor modificado	S	3	3	3
	S+1% nanosílice	3	3	3
	S+2% nanosílice	3	3	3
	S+3% nanosílice	3	3	3
	S+4% nanosílice	3	3	3
<b>Sub total</b>		15	15	15
<b>Total</b>		<b>45</b>		

Tabla 6: Cantidad de ensayos de Proctor para muestra patrón y adiciones.

Para determinar la cantidad de ensayos de CBR se emplea la fórmula de muestra infinita lo cual se detallará a continuación:

$$n = \frac{Z^2 \times p \times q}{e^2}$$

Donde:

n= Tamaño de muestra buscado

N= Tamaño de la Población o Universo

Z= Parámetro estadístico que depende el Nivel de Confianza (NC)

e= Error de estimación máximo aceptado

p= Probabilidad de que ocurra el evento estudiado (éxito)

q= (1-p) = Probabilidad de que no ocurra el evento estudiado

Nivel de confianza	Coficiente de confiabilidad (Z)
99 %	2.58
98	2.33
97	2.17
96	2.05
95	1.96
90	1.65
80	1.28
50	0.67

*Imagen 2: Coeficiente de confiabilidad Z*

El cálculo de la muestra infinita se basó en un nivel de confianza del 90%, un margen de error del 15% y la probabilidad de que la hipótesis sea verdadera y ocurra del 50%, lo que resultó en un tamaño de muestra de 30. Esto implica que se llevarán a cabo 30 ensayos de CBR para cada una de las dosificaciones.

$$n = \frac{1.65^2 \times 50\% \times 50\%}{15\%^2} = 30$$

En conjunto, esto totaliza 150 ensayos de CBR, con 30 destinados a la muestra natural y 30 para cada una de las cuatro dosificaciones.

Ensayo	Descripción	Calicata		
		C-01	C-02	C-04
Ensayo de CBR	S	10	10	10
	S+1% nanosílice	10	10	10
	S+2% nanosílice	10	10	10
	S+3% nanosílice	10	10	10
	S+4% nanosílice	10	10	10
<b>Subtotal</b>		50	50	50
<b>Total</b>		<b>150</b>		

*Tabla 7: Cantidad de ensayos CBR para muestra patrón y adiciones.*

Para determinar la cantidad de ensayos de Expansión se tuvo en cuenta lo siguiente:

Ensayo	Descripción	Calicata		
		C-01	C-02	C-03
Ensayo de Expansión	S	1	1	1
	S+1% nanosílice	1	1	1
	S+2% nanosílice	1	1	1
	S+3% nanosílice	1	1	1
	S+4% nanosílice	1	1	1
<b>Sub total</b>		5	5	5
<b>Total</b>		<b>15</b>		

*Tabla 8: Cantidad de ensayos de Expansión para muestra patrón y adiciones.*

Como ensayo extra se realizó el ensayo de corte directo al 1%:

ENSAYO	DESCRIPCIÓN	CALICATA		
		C-01	C-02	C-03
Ensayo de Corte directo	S+1% nanosílice	1	1	1
<b>TOTAL</b>		<b>3</b>		

*Tabla 9: Cantidad de ensayos de Corte directo con adición al 1% de nanosílice*

## **Muestreo**

En este estudio se emplea un método de muestreo probabilístico.

## **Criterios de selección**

Los criterios de selección como la distribución de las calicatas en el área de estudio y la selección del estrato de muestra serán determinados bajo el criterio del investigador.

En la presente investigación se hace uso de la nanosílice como agentes estabilizantes del suelo arcilloso de la vía sin asfaltar del Ubic. Rur. Vasallo – Sector Yortuque – Escute – Valle Chancay, C.P./ U.C 092387. De acuerdo con la ficha técnica, nos indica que la dosificación de la nanosílice es del 1% al 3% con respecto al peso del cemento, otro criterio basado es en la estabilización de suelo – cemento en donde nos indica que el porcentaje de cemento debe variar entre un 1% a 4% pero como la nanosílice uno de sus componentes principales es la sílice lo que hace que tenga relación con el cemento por eso, mi criterio se basó en esa estabilización, que en términos de nanosílice sería realizar una estabilización suelo – nanosílice, es decir aplicar dosificación de la nanosílice al peso seco del suelo. Por ello se ha propuesto a utilizar porcentajes de 1%, 2%, 3% y 4% para evaluar su efecto estabilizador de la nanosílice así determinar cuál es el contenido más eficiente para mejorar el suelo. La nanosílice es un aditivo líquido que no solo contiene muchos beneficios uno de ellos es que reduce el índice de plasticidad de los suelos y aumentar su resistencia en términos de CBR, sino que además es un producto eco - ambiental que cumple con la normativa ambiental ISO-14001

## **Procedimientos**

Primero se explica los materiales y el procedimiento sobre el que se basará esta tesis investigativa. Los materiales que se utiliza en esta investigación son: Nanosílice y suelo arcilloso del Ubic. Rur. Vasallo – Sector Yortuque – Escute – Valle Chancay, C.P./ U.C 092387, distrito de Pimentel, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque. Para extraer el suelo arcilloso se hizo trabajo de campo, donde se inició con la identificación del área de estudio y se determinó en base al criterio del tesista.

Luego se excavó, realizando cinco (05) calicatas, la cantidad de material que se extrajo se dedujo del número de ensayos que se pretendía realizar siendo 25kg por saco aproximadamente. El material de la nanosílice fue financiado por la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo.

Después de tener los materiales principales para la investigación, se procedió a llevarlos al laboratorio para dar inicio al programa experimental. Dicho programa comenzó con la evaluación de las propiedades del suelo arcilloso en su estado natural, a través de una serie de ensayos de laboratorio. Por último, se llevaron a cabo los mismos ensayos con adición de nanosílice en porcentajes de 1%, 2%, 3% y 4% en peso seco del suelo.

## **Materiales en estado natural**

### **Suelo arcilloso**

El suelo para estabilizar es un suelo arcilloso procedente de la vía sin asfaltar del Ubic. Rur. Vasallo – Sector Yortuque – Escute – Valle Chancay, C.P./ U.C 092387, distrito de Pimentel, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque.

Las muestras extraídas estuvieron constituidas por un material de textura suave, de baja plasticidad y de un color marrón oscuro. Para su extracción de las calicatas se siguió las recomendaciones del manual de carreteras del ministerio de transportes que nos indica que la profundidad máxima de excavación para pavimentos que se realiza es de 1.50 metros de profundidad, para lo cual se retiró los 0.10 m superiores para evitar material orgánico.

En la imagen N° 01 se aprecia la ubicación de las calicatas realizadas en la vía sin asfaltar en la Ubic. Rur. Vasallo – Sector Yortuque – Escute – Valle Chancay, C.P./ U.C 092387.



*Imagen 3: Zona de estudio en el distrito de Pimentel.*

A continuación, se muestran las imágenes N° 02, 03, 04, 05, 06 donde se aprecia el lugar exacto en el que se realizó las calicatas. En el proceso de elaboración de calicatas se pudo visualizar su textura, color, presencia de grava y presencia de nivel freático. Se determinó que su textura fue color marrón claro de consistencia media de blanda a rígida y no se encontró nivel freático hasta la fecha de excavación pudiendo cambiar según el transcurso de los tiempos. El muestreo y excavación fue realizado el 23 de abril del 2023 y se seleccionó las muestras en sacos de polipropileno y se llevó a laboratorio.

La excavación de las calicatas se realizó de manera manual con pico, palana. La excavación de las calicatas se realizó en un tramo de carretera en proyecto.



*Imagen 4: Zona de extracción de la C-01*



*Imagen 5: Zona de extracción de la C-02.*



*Imagen 6: Zona de extracción de la C-03.*



*Imagen 7: Zona de extracción de la C-04.*



*Imagen 8: Zona de extracción de la C-05.*

Las muestras extraídas de las cinco (05) calicatas se separaron según la forma como se extrajeron en campo con la finalidad de tener un orden en la evaluación de muestra en laboratorio. Luego se procedió a secar la muestra según la imagen y el siguiente orden:

<b>Descripción</b>	<b>Codificación</b>
Calicata N° 01	C -01
Calicata N° 02	C -02
Calicata N° 03	C -03
Calicata N° 04	C -04
Calicata N° 05	C -05

*Tabla 10: Código de las cinco muestras de calicatas*



*Imagen 9: Secado de muestra de cada calicata.*

## Nanosílíce

La nanosílíce fue financiada por la USAT, de la marca ULMEN.



*Imagen 10: Material de nanosílíce con el que se realizó los ensayos.*

Después de secar la muestra se procedió a envasar de nuevo en los sacos y posteriormente se trasladó al laboratorio de mecánica de suelos de la facultad de ingeniería civil. Estando en laboratorio se procedió a descargar los sacos para luego realizar los ensayos correspondientes. (Ver imagen N°11).



*Imagen 11: Ingreso del material al laboratorio de la USAT*

## Ensayos de laboratorio

Los ensayos de suelos fueron ejecutados en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la USAT. Estos ensayos se llevaron a cabo siguiendo las directrices establecidas en el manual de ensayo de materiales para carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones:

### 1. Ensayos de Laboratorio

#### 1.1 Ensayos físicos:

- a. Contenido de humedad del suelo (MTC E 108 – ASTM D 2216)
- b. Análisis granulométrico de suelos por tamizado (MTC E 107 – ASTM D 722)
- c. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro (MTC E 109 – ASTM D 422)
- d. Ensayo de Límites de Atterberg MTC E 110
  - Limite Líquido ASTM D-4318
  - Limite Plástico ASTM D-4318
- e. Clasificación de suelos SUCS ASTM D-2487
- f. Clasificación de suelos AASHTO ASTM D-4328
- g. Ensayo de Gravedad Especifica de los Sólidos MTC E 113

#### 1.2 Ensayos mecánicos

##### 1.2.1 Ensayos específicos:

- Ensayo de Proctor modificado (ASTM D 1557 – NTP 339.141)
- Ensayo de CBR (MTC E 132 – ASTM D 1883)

##### 1.2.2 Ensayos complementarios:

- Ensayo de Corte directo (NTP 339 171)

Para el suelo natural se realiza todos los ensayos mencionados, para seleccionar las calicatas más desfavorables a su resistencia a la penetración del CBR. Para el desarrollo de las muestras con la adición de nanosílice se seleccionó 3 calicatas las cuales son: C1, C2 y C4, y se realizó los ensayos de Límites de Atterberg, ensayo por expansión, Proctor y CBR.

A innovación se procede a explicar los ensayos que se realizaron en el laboratorio.

## Ensayos de Laboratorio

### Ensayos físicos

#### Contenido de humedad del suelo (MTC E 108 – ASTM D 2216)

Primero se pesa 1500 gr por cada calicata con su respectiva tara y se toma apunte, luego de pesar las cinco muestras se pasan a colocar las 5 taras al horno y se deja secar por 24 horas para posteriormente tomar apuntes a la muestra seca.



*Imagen 12: Muestra el peso de la calicata 04 antes y después de ser sacada del horno.*

#### Análisis granulométrico de suelos por tamizado (MTC E 107 – ASTM D 722)

Se procede a pesar 500g de la muestra que pasa la malla N°4, para luego ser lavada en un recipiente y dejar saturada con agua durante 24 horas. Después de ser eliminada el agua de la muestra, ésta es introducida en el horno hasta el día siguiente. Luego se pesa y por la diferencia a los 500g se obtiene el porcentaje que pasó la malla número 200. El material que pasó la malla N° 4 y se retuvo en la malla N°200, es vaciado para que pase lo correspondiente por las mallas N°10, 20, 30, 40, 50, 100 y 200, pesando los retenidos.



*Imagen 13: Materiales que se utilizó para el ensayo de granulometría*

### **Análisis granulométrico de suelos por hidrómetro (MTC E 107 – ASTM D 722)**

Se tiene una muestra representativa del suelo y se somete al proceso de secado en horno. Seguido, se lleva a cabo la etapa de saturación, que implica la inmersión de la muestra en agua destilada durante 24 horas, logrando que las partículas finas se dispersen completamente en el agua, asegurando una representación precisa de la distribución de tamaños de partículas. Para este ensayo se seleccionó una muestra pasada por la malla N° 10, con esta muestra se pesó 50gr de material fino y se pesó 10 gr de hexametáfosfato de sodio. Los 10gr del reactivo se mezcló con agua destilada y se disolvió los 50gr de la muestra se echó en las jarras graduadas y se agitó por 5 min, después de agitarlo por 5min se comenzó a medir con el hidrómetro por intervalo de tiempo el descenso de las arcillas. Pasada las 24 horas se vio el descenso último. Además de aplica la ley de Stop.



*Imagen 14: Ensayo de hidrometría de las cinco calicatas naturales.*

### Ensayo de Límites de Atterberg: MTC E 110

Para realizar el índice de plasticidad se pasa por la malla 40 para luego pesar 150 g aproximado después se saturó de un día para otro y se tapó con una bolsa plástica con el fin de que la humedad se concentre. Pasado las 24 horas de saturación se procedió a abatir la muestra con la Copa de la Casagrande y a utilizar lo bastones para determinar el índice de plasticidad.



*Imagen 15: Colocación en la cuchara de casa grande y extensión de las muestras.*



*Imagen 16: Pesado de mis muestras de Atterberg.*



*Imagen 17: Muestras pesada y colocadas al horno del ensayo de Atterberg.*

### **Ensayo de Expansión:**

El ensayo de expansión se realizó en el equipo llamado edómetro. Para ello se tuvo que secar y triturar la muestra, luego se pasó por la malla N°10, se pesó cuatro muestras de 300gr por cada calicata. Luego se saturó en porcentajes al peso y se tapó con una bolsa plástica con el fin de que la humedad se concentre. Pasado las 24 horas de saturación se procedió a compactar a la densidad de los Proctor en los anillos edométricos. Se sacó el volumen y la altura de los anillos, se colocó en la caja de expansión y se comenzó a medir el esponjamiento.



*Imagen 18: Ensayo de expansión por consolidación.*

### Ensayo de Gravedad Especifica MTC E 113

Se tuvo que pasar por la malla N°10 y se pesó 25 gr de muestra, se calibro la fiola pesando la fiola sola y la fiola más el agua. Se echo la muestra en la fiola se hizo la gravedad especifica por el método ebullición y se dejó hervir por una hora hasta que se saque el oxígeno. Se deja decantar por 24 horas para que las partículas se dejen sentar en su totalidad se enraso la muestra y se pesó.



*Imagen 19: Peso y colocación de agua destilada para el ensayo.*

### Ensayos mecánicos

#### Ensayo de Proctor modificado (MTC E 115 – ASTM D 1557 – NTP 339.141:1999)

Se tuvo que secar y triturar la muestra. Se paso por la malla N°4, y se pesa cuatro muestras de 3kg por cada calicata. Luego se saturó en porcentajes al peso y procedió a masar la muestra y ponerlo en bolsa para que pueda agarrar la humedad suficiente. pasada dos horas se comenzó a compactar. Se compacto con 25 golpes en 5 capas, se enrasó y se pesó. El mismo procedimiento se repitió por 4 veces.



*Imagen 20: Saturación y compactación de material para Proctor Modificado.*

### **Ensayo de CBR (MTC E 132 – ASTM D 1883)**

Se tuvo que secar y triturar la muestra. Se paso por la malla N°4, y se pesa cuatro muestras de 5kg por cada calicata. Luego se saturó en porcentajes al peso y procedió a masar la muestra y ponerlo en bolsa para que pueda agarrar la humedad suficiente. pasada 24 horas se comenzó a compactar. Se compacto en 3 moldes: el primer molde con 55 golpes, el segundo molde con 25 golpes y el tercer molde con 12 golpes, se enrasó y se pesó. El mismo procedimiento se repitió por 3 veces.



*Imagen 21: Enrasado y pesado de molde.*



*Imagen 22: Aplicación de sobre cargas e hidratación de molde.*

### **Ensayos mecánicos complementarios**

#### **Ensayo de Corte directo (NTP 339 171)**

Para el ensayo de corte directo, para lo cual se colocó el espécimen proveniente de la muestra inalterada en la caja de cizalladura con los bloques porosos en cada extremo expuesto, luego se fijó adecuadamente.

Se conectó el instrumento de medición de desplazamiento horizontal, ajustándolo, con el fin de medir los desplazamientos ocasionados por cizalladura. Luego se aplicó la carga normal y se fijó el instrumento de medición de deformación vertical, debe obtenerse las lecturas iniciales o colocar en cero los instrumentos de medición.

#### **Cálculos para adición de Nanosílice**

#### **Dosificaciones de NS para la determinación de los límites de Atterberg**

Se tiene como factores iniciales el peso de la muestra de 200 gr y 100 ml de agua requerido para cada calicata:

- Para la C-01, C-02 y C-04 con dosificación 1% de Nanosílice

$$NS = 100 \times 1\%$$

$$NS = 1ml$$

- Para la C-01, C-02 y C-04 con dosificación 2% de Nanosílice

$$NS = 100 \times 2\%$$

$$NS = 2ml$$

- Para la C-01, C-02 y C-04 con dosificación 3% de NRL

$$NRL = 100 \times 3\%$$

$$NS = 3ml$$

- Para la C-01, C-02 y C-04 con dosificación 4% de NRL

$$NRL = 100 \times 4\%$$

$$NS = 4ml$$

### **Cantidad de agua y porcentaje de nanosílice para el Ensayo de CBR**

Se tiene como factores iniciales el peso de la muestra de 5000 gr y la cantidad de agua expresada en porcentaje requerido para cada calicata:

- Para la dosificación 1% de Nanosílice

- o La C-01:

$$NS = 1\% \times 5000$$

$$NS = 50 \text{ ml}$$

$$agua = 9\% \times 5000$$

$$agua = 450 \text{ ml}$$

- o La C-02:

$$NS = 1\% \times 5000$$

$$NS = 50 \text{ ml}$$

$$agua = 11\% \times 5000$$

$$agua = 550 \text{ ml}$$

- o La C-04:

$$NS = 1\% \times 5000$$

$$NS = 50 \text{ ml}$$

$$agua = 12\% \times 5000$$

$$agua = 600 \text{ ml}$$

- Para la dosificación 2% de Nanosílice

- o La C-01:

$$NS = 2\% \times 5000$$

$$NS = 100 \text{ ml}$$

$$agua = 11\% \times 5000$$

$$agua = 550 \text{ ml}$$

- La C-02:

$$NS = 2\% \times 5000 \qquad \text{agua} = 11\% \times 5000$$

$$NS = 100 \text{ ml} \qquad \text{agua} = 550 \text{ ml}$$

- La C-04:

$$NS = 2\% \times 5000 \qquad \text{agua} = 12\% \times 5000$$

$$NS = 100 \text{ ml} \qquad \text{agua} = 600 \text{ ml}$$

- Para la dosificación 3% de Nanosílice

- La C-01:

$$NS = 3\% \times 5000 \qquad \text{agua} = 11\% \times 5000$$

$$NS = 150 \text{ ml} \qquad \text{agua} = 550 \text{ ml}$$

- La C-02:

$$NS = 3\% \times 5000 \qquad \text{agua} = 10\% \times 5000$$

$$NS = 150 \text{ ml} \qquad \text{agua} = 500 \text{ ml}$$

- La C-04:

$$NS = 3\% \times 5000 \qquad \text{agua} = 10\% \times 5000$$

$$NS = 150 \text{ ml} \qquad \text{agua} = 500 \text{ ml}$$

- Para la dosificación 4% de Nanosílice

- La C-01:

$$NS = 4\% \times 5000 \qquad \text{agua} = 10\% \times 5000$$

$$NS = 200 \text{ ml} \qquad \text{agua} = 500 \text{ ml}$$

- La C-02:

$$NS = 4\% \times 5000 \qquad \text{agua} = 10\% \times 5000$$

$$NS = 200 \text{ ml} \qquad \text{agua} = 500 \text{ ml}$$

- La C-04:

$$NS = 4\% \times 5000 \qquad \text{agua} = 10\% \times 5000$$

$$NS = 200 \text{ ml} \qquad \text{agua} = 500 \text{ ml}$$

**Consideraciones éticas:**

- Los pobladores de la Urb. Fueron informados del presente estudio ya que la zona estudiada se realizó en un tramo de carretera en proyecto, con el fin de obtener el permiso para realizar las calicatas para el estudio de suelos.
- La investigación del estudio es de carácter auténtico ya que es un tema nuevo de tesis en el Perú con respecto a la nanosílice debido a que este nanomaterial ha sido enfocado al ámbito de concreto más no en la rama de Estabilización de Suelos, por eso la investigación: “Estudio práctico de la nano sílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos” es una investigación verdadera y no ha sido ni viene siendo realizada por ninguna persona o institución; sin embargo a nivel internacional son pocos los artículos que se han realizado los ensayos de suelos, basando como antecedentes para la tesis.
- Los datos registrados tanto en laboratorio como en los resultados obtenidos de los ensayos son verdaderos y confiables, es decir, son verdaderos por la evidencia a través de las fotos que serán colocada en el ítem de anexos y confiables porque se siguió con las recomendaciones del manual de ensayo de materiales del Ministerio de Transportes.

## Resultados y Discusión

### Resultados

En este capítulo se procesan y analizan los resultados de los ensayos de laboratorio realizados sobre las muestras de suelo arcilloso en estado virgen, y con la adición de nanosílice en las dosis mencionadas. Los ensayos de contenido de humedad, granulometría por tamizado, granulometría por sedimentación, límites de Atterberg, ensayos de expansión se llevaron a cabo para caracterizar el suelo y posterior a ello poder clasificarlo según la normativa SUCS y AASHTO, mientras que los ensayos de Proctor modificado, CBR, expansión y corte directo se realizaron para evaluar el efecto estabilizador de la nanosílice sobre los parámetros de resistencia del suelo. Cabe señalar que, de acuerdo con lo mencionado en el capítulo de Métodos y materiales, las muestras de suelo escogidas para ser evaluadas con las adiciones de nanosílice fueron las pertenecientes a la calicata N° 01, N° 02 y N° 04, puesto que, como se explicó, se pretendía escoger las muestras de suelos más diferentes y que sus condiciones sean desfavorables con respecto a su resistencia con el fin de determinar la dosificación óptima de nanosílice mejora la resistencia de la subrasante.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio:

### *Determinar las propiedades físico-mecánicas del suelo arenoso correspondiente a la muestra patrón*

#### 1. Ensayos Físicos

##### a. Contenido de humedad (MTC E 108 – NTP 339,127:1998)

Los datos procesados muestran que en estado virgen al suelo de la zona en estudio contenía aproximadamente una humedad del 15.20 %, 15.50% y 16.10%, 16.00 % y 20.30 %, para las calicatas N° 01, 02, 03, 04 y 05.

CONTENIDO DE HUMEDAD				
C1	C2	C3	C4	C5
15.2	15.5	16.1	16.0	20.3

*Tabla 11: Contenido de humedad de las cinco calicatas.*

Los resultados muestran que las muestras sin adición contenían aproximadamente una humedad del 15.2%, 15.5% y 16.1%, 16.0 % y 20.30 %, para las calicatas C-01, C-02, C-03, C-04 y C-05 respectivamente.

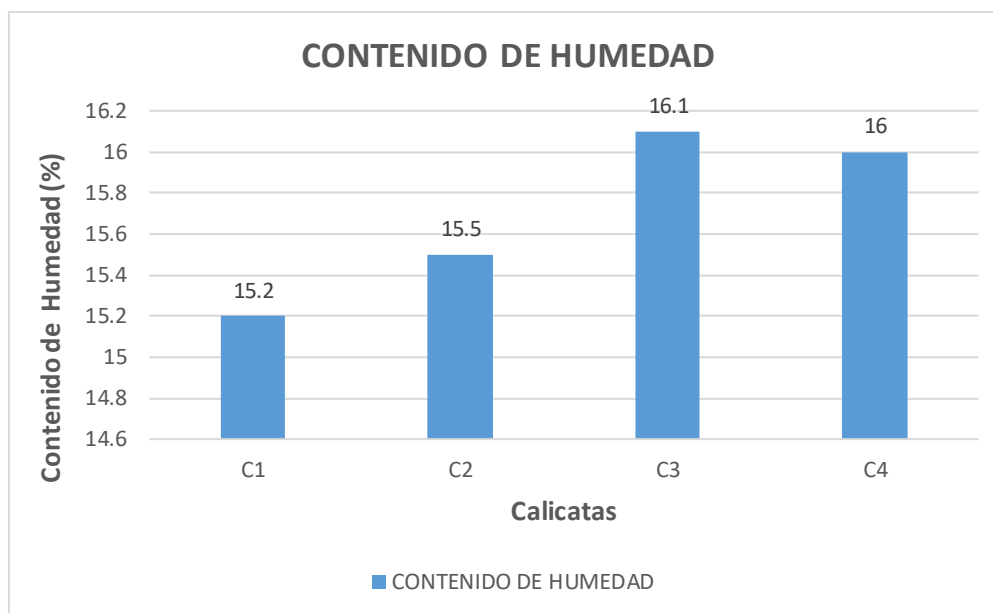


Gráfico 1: Valores obtenidos del ensayo de contenido de humedad en suelo natural C-1, C-2, C-3, C-4 y C-5

#### b. Análisis granulométrico de suelos por tamizado (MTC E 107 – ASTM D 722)

En base a los procedimientos de ensayo de la norma MTC E 107 se realizó el ensayo de granulometría por tamizado del suelo en estado natural de las cinco calicatas.

ENSAYO DE GRANULOMETRIA			
CALICATA	% GRAVA	% ARENA	% LIMO Y ARCILLA
C1	0.0%	4.3%	95.7%
C2	0.0%	4.0%	95.9%
C3	0.0%	4.6%	95.4%
C4	0.0%	22.9%	77.1%
C5	0.0%	4.3%	95.7%

Tabla 12: Resumen del ensayo de granulometría.

**Calicata N°01:**

<b>Distribución granulométrica</b>			
% Grava	G.G. %	0.0	0.0
	G. F %	0.0	
% Arena	A.G %	0.5	4.3
	A.M %	0.9	
	A.F %	2.9	
% Arcilla y Limo		95.7	95.7
<b>Total</b>			<b>100.0</b>

Tabla 13: Distribución granulométrica para calicata 01

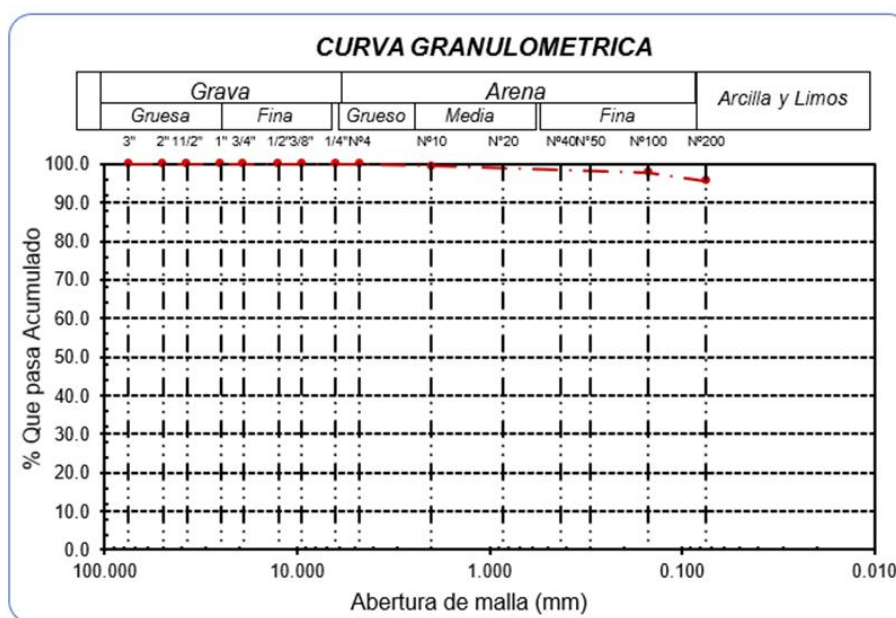


Imagen 23: Curva Granulométrica por tamizado de la Calicata 1.

**Calicata N°02:**

<b>Distribución granulométrica</b>			
% Grava	G.G. %	0.0	0.1
	G. F %	0.1	
% Arena	A.G %	1.1	4.0
	A.M %	1.5	
	A.F %	1.4	
% Arcilla y Limo		95.9	95.9
<b>Total</b>			<b>100.0</b>

Tabla 14: Distribución granulométrica para calicata 02

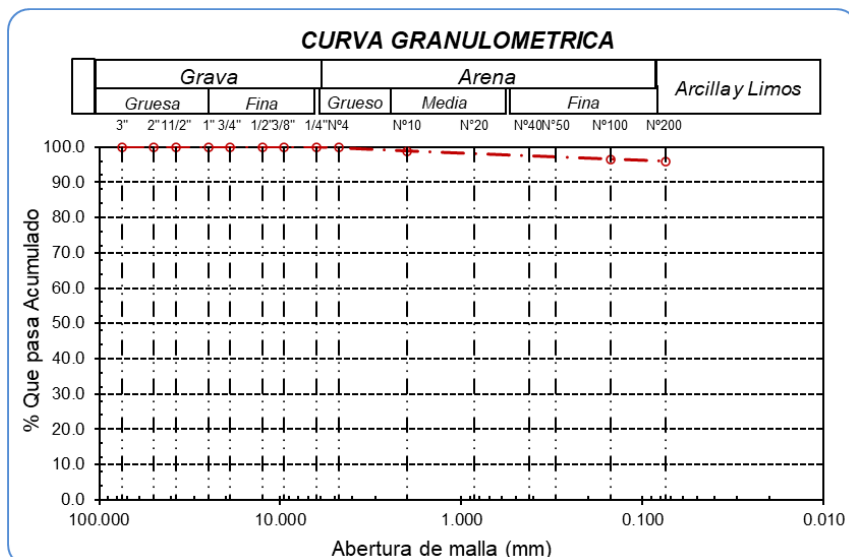


Gráfico 2: Curva Granulométrica por tamizado de la Calicata 2

### Calicata N°03:

<b>Distribución granulométrica</b>			
% Grava	G.G. %	0.0	
	G. F %	0.0	0.0
% Arena	A.G %	0.2	
	A.M %	0.9	
	A.F %	3.5	4.6
% Arcilla y Limo		95.4	95.4
<b>Total</b>			100.0

Tabla 15: Distribución granulométrica para calicata 03

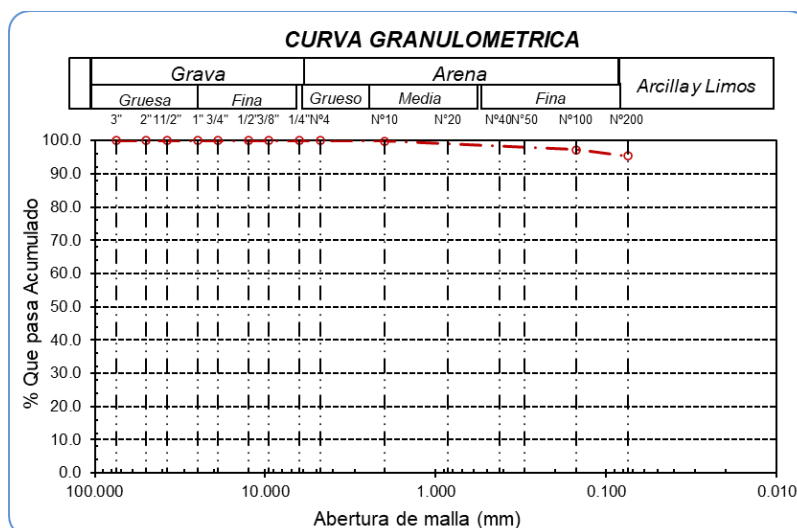
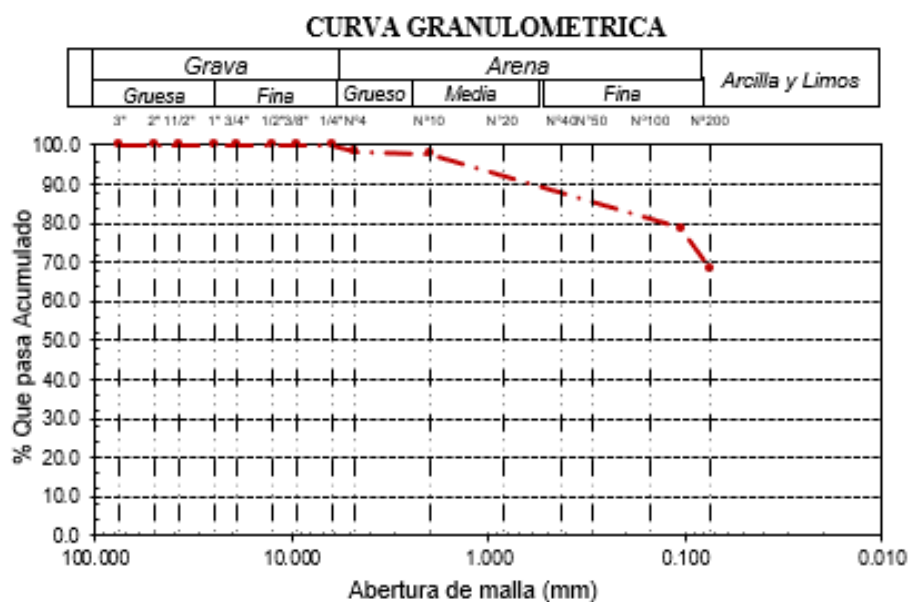


Imagen 24: Curva Granulométrica por tamizado de la Calicata 3.

**Calicata N°04:**

<b>Distribución granulométrica</b>			
% Grava	G.G. %	0.0	
	G. F %	0.0	0.0
	A.G %	5.7	
% Arena	A.M %	9.8	
	A.F %	7.4	22.9
% Arcilla y L <sub>imo</sub>		77.1	77.1
<b>Total</b>			100.0

*Tabla 16: Distribución granulométrica para calicata 04.*



*Imagen 25: Curva Granulométrica por tamizado de la Calicata 4*

**Calicata N°05:**

<b>Distribución granulométrica</b>			
% Grava	G.G. %	0.0	
	G. F %	0.0	0.0
	A.G %	1.4	
% Arena	A.M %	1.1	
	A.F %	1.8	4.3
% Arcilla y L <sub>imo</sub>		95.7	95.7
<b>Total</b>			100.0

*Tabla 17: Distribución granulométrica para calicata 05*

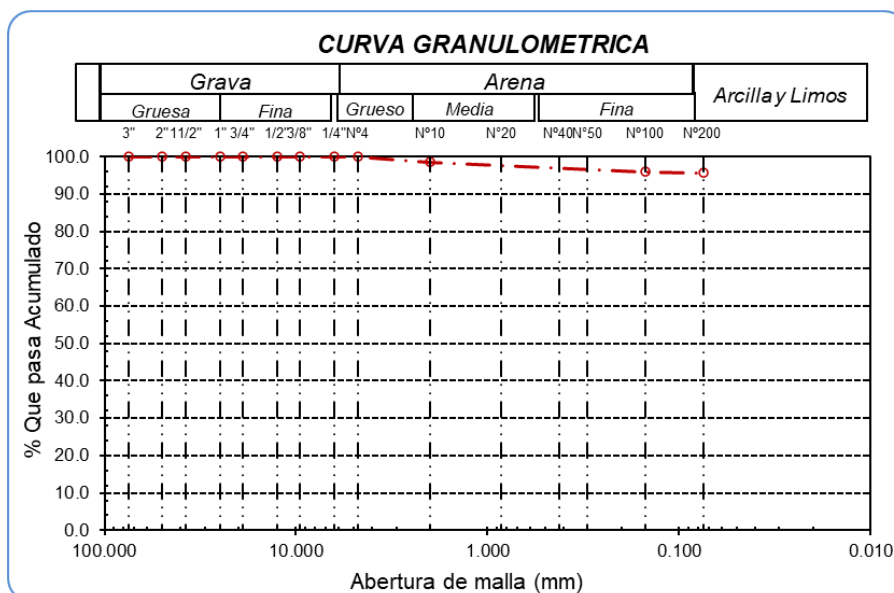


Imagen 26: Curva Granulométrica por tamizado de la Calicata 5.

**c. Análisis granulométrico de suelos por medio del hidrómetro (MTC E 109 – ASTM D 422)**

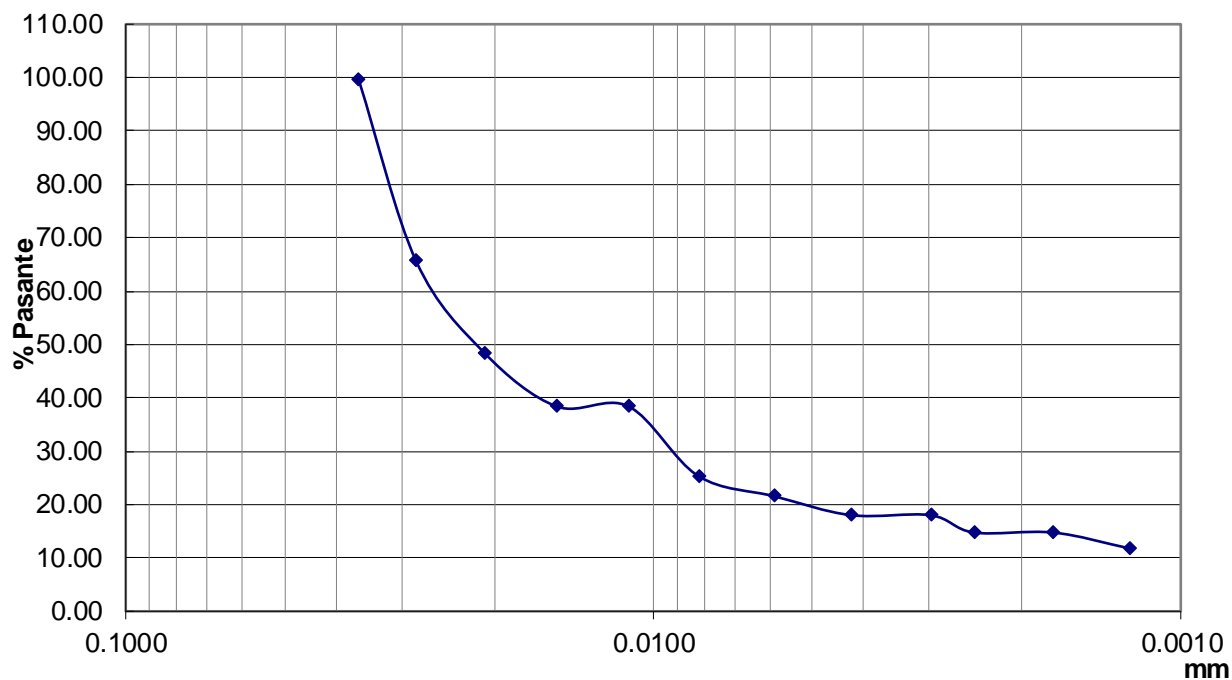
A continuación, se muestra el formato para los cálculos obtenidos en este ensayo de acuerdo con el tiempo y al % que pasa vs el diámetro (mm). El resultado de los análisis de hidrometría de las muestras naturales es:

**Calicata N°01:**

D (mm)	% QUE PASA
0.0362	99.58
0.0281	65.57
0.0209	48.44
0.0152	38.38
0.0111	38.38
0.0082	25.34
0.0059	21.54
0.0042	18.01
0.0030	18.01
0.0025	14.75
0.0017	14.75
0.0012	11.77

Tabla 18: Análisis granulométrico por hidrómetro de la Calicata 1.

### ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR HIDROMETRÍA C-01

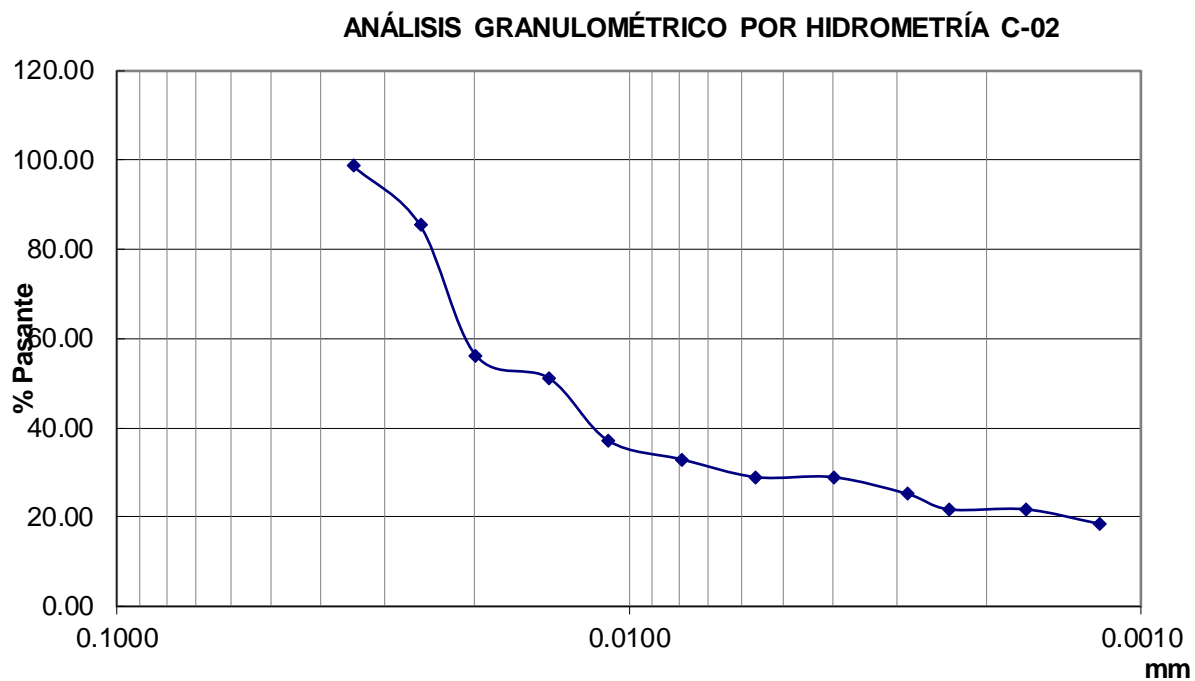


*Imagen 27: Curva Granulométrica por hidrómetro de la Calicata 1.*

### Calicata N°02:

D (mm)	% QUE PASA
0.0346	98.75
0.0256	85.44
0.0199	56.26
0.0143	51.13
0.0110	37.13
0.0079	32.93
0.0056	28.97
0.0040	28.97
0.0029	25.24
0.0024	21.74
0.0017	21.74
0.0012	18.48

*Tabla 19: Análisis granulométrico por hidrómetro de la Calicata 2*

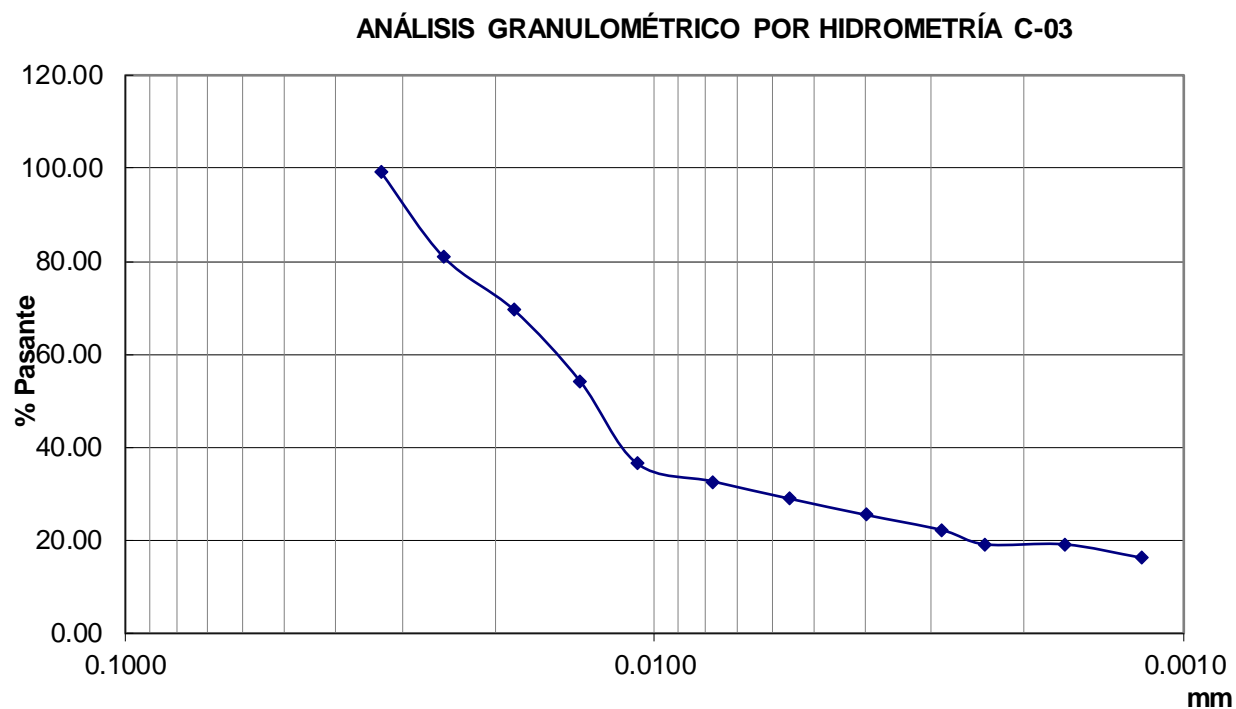


*Imagen 28: Curva Granulométrica por hidrómetro de la Calicata 2*

**Calicata N°03:**

D (mm)	% QUE PASA
0.0330	99.37
0.0250	80.89
0.0185	69.59
0.0138	54.20
0.0108	36.55
0.0078	32.65
0.0056	28.96
0.0040	25.48
0.0029	22.20
0.0024	19.12
0.0017	19.12
0.0012	16.25

*Tabla 20: Análisis granulométrico por hidrómetro de la Calicata 3.*

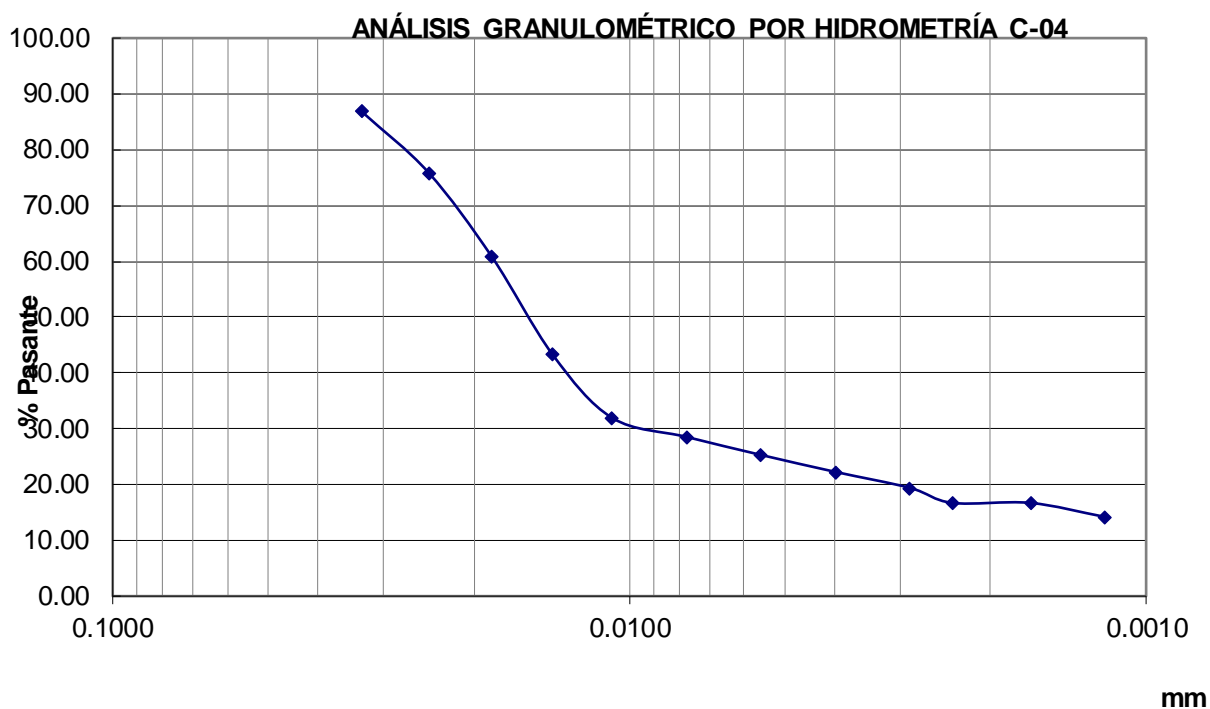


*Imagen 29: Curva Granulométrica por hidrómetro de la Calicata 3.*

**Calicata N°04:**

D (mm)	% QUE PASA
0.0330	86.84
0.0245	75.89
0.0185	60.82
0.0141	43.24
0.0108	31.94
0.0078	28.54
0.0056	25.31
0.0040	22.26
0.0029	19.40
0.0024	16.71
0.0017	16.71
0.0012	14.20

*Tabla 21: Análisis granulométrico por hidrómetro de la Calicata 4*

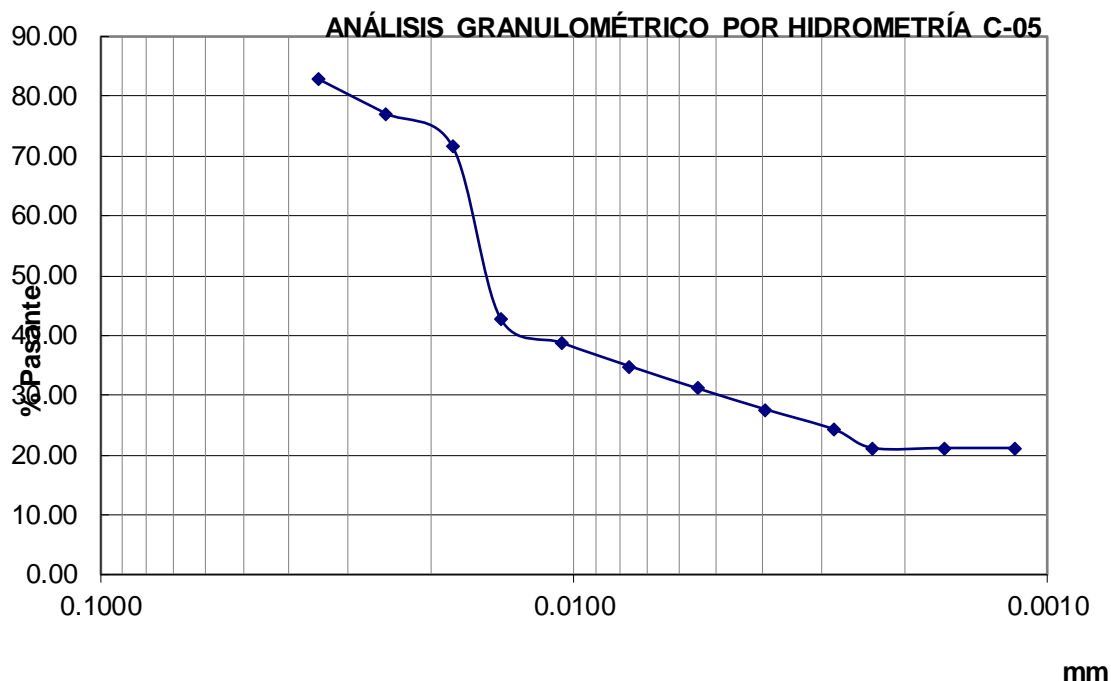


*Imagen 30: Curva Granulométrica por hidrómetro de la Calicata 4.*

**Calicata N°05:**

D (mm)	% QUE PASA
0.0346	82.84
0.0250	77.16
0.0181	71.68
0.0143	42.89
0.0106	38.78
0.0076	34.87
0.0055	31.15
0.0039	27.63
0.0028	24.30
0.0023	21.17
0.0017	21.17
0.0012	21.17

*Tabla 22: Análisis granulométrico por hidrómetro de la Calicata 5.*



*Imagen 31: Curva Granulométrica por hidrómetro de la Calicata 5*

#### **d. Ensayo de Límites de Atterberg MTC E 110**

Para determinar el límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP) del suelo natural y sus combinaciones con nanosílice, se hizo uso siguiendo las indicaciones de la normativa MTC E 110 para los procedimientos de ensayo del Límite líquido y la MTC E 111 para el Límite plástico e índice de plasticidad.

<b>CONSISTENCIA FISICA DE LA MUESTRAC-01</b>	
Límite Líquido	35.10
Límite Plástico	23.53
Índice de Plasticidad	11.57

*Tabla 23: Límites de Atterberg de la Calicata 1*

<b>CONSISTENCIA FISICA DE LA MUESTRA C-02</b>	
Límite Líquido	34.30
Límite Plástico	17.20
Índice de Plasticidad	17.10

*Tabla 24: Límites de Atterberg de la Calicata 2*

CONSISTENCIA FISICA DE LA MUESTRA C-03	
Límite Líquido	29.12
Límite Plástico	21.34
Índice de Plasticidad	7.78

Tabla 25: Límites de Atterberg de la calicata 3.

CONSISTENCIA FISICA DE LA MUESTRA C-04	
Límite Líquido	30.49
Límite Plástico	18.82
Índice de Plasticidad	11.68

Tabla 26: Límites de Atterberg de la Calicata 4

CONSISTENCIA FISICA DE LA MUESTRA C-05	
Límite Líquido	37.06
Límite Plástico	22.17
Índice de Plasticidad	14.89

Tabla 27: Límites de Atterberg de la Calicata 5.

**e. Clasificación de suelos SUCS (ASTM D-2487) y AASHTO (ASTM D-4328)**

En los resultados obtenidos de los Ensayos anteriores, se procedió a la clasificación del suelo en estudio, para ello se hizo uso de las metodologías SUCS y AASHTO.

CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD	CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)	CLASIFICACIÓN (AASHTO)	POTENCIAL DE EXPANSIÓN
C - 01	M-01	0.05m – 1.50m	CL	A-6 (10)	BAJO
C - 02	M-01	0.05m - 1.55m	CL	A-7-6(14)	BAJO
C - 03	M-01	0.05m – 1.45m	CL	A-6(10)	BAJO
C - 04	M-01	0.05m - 1.50m	CL	A-6 (11)	BAJO
C - 05	M-01	0.05m-1.50m	CL	A-6 (10)	BAJO

Tabla 28: Cinco calicatas según clasificación de suelo.

### f. Ensayo de Gravedad Específica de los Sólidos MTC E 113

En la Tabla N° 06 se muestran los resultados de Gravedad Específica de los Sólidos (MTC E 113) de las calicatas 01, 02, 03, 04 y 05.

	C-01	C-02	C-03	C-04	C-05
Gs	2.408	2.351	2.37	2.308	2.332

Tabla 29: Gravedad Específica de muestras naturales.

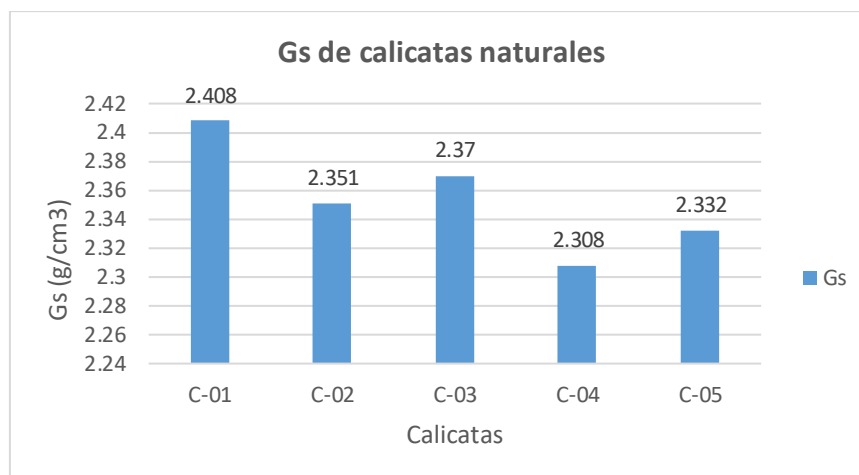


Gráfico 3: Resumen de la GS de muestras C1, C2, C3, C4 y C5.

## 2. Ensayos Mecánicos

- Ensayo de Proctor modificado (ASTM D 1557 – NTP 339.141)

Este ensayo consiste en la compactación del suelo en 05 capas, haciendo uso de 25 golpes por cada una, y para ello se debe hacer uso del molde de 4 pulgadas de diámetro. En la tabla N°30 se observa los valores de máxima densidad seca (MDS) y óptimo contenido de humedad (OCH) del suelo de la calicata N° 01, 02, 03, 04 y 05 en estado natural.

CALICATA	DENSIDAD MÁXIMA SECA	CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD
	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)
C-01	1.847	14.6
C-02	1.872	13.18
C-03	1.902	14.1
C-04	1.915	13.53
C-05	1.959	14.3

Tabla 30: Relación densidad-humedad del Ensayo Proctor de las calicatas sin adición.

- Ensayo de CBR (MTC E 132 – ASTM D 1883)

En la Tabla N°31, N°32, N°33, N°34 y N°35 se muestra los resultados del ensayo de CBR (NTP 339.145) a partir de las cinco muestras naturales al 95% y 100% de Máxima Densidad Seca y a una penetración de carga de 25KN.

<b>CALICATA N°01</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Densidad máxima seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>		<b>Índice de CBR</b>
	<b>95%</b>	<b>100%</b>	
C-01	1.755	1.847	3.6

*Tabla 31: Resultados de ensayo de CBR para la C-01.*

<b>CALICATA N°02</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Densidad máxima seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>		<b>Índice de CBR</b>
	<b>95%</b>	<b>100%</b>	
C-02	1.805	1.902	4.7

*Tabla 32: Resultados de ensayo de CBR para la C-02.*

<b>CALICATA N°03</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Densidad máxima seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>		<b>Índice de CBR</b>
	<b>95%</b>	<b>100%</b>	
C-03	1.785	1.872	4.9

*Tabla 33: Resultados de ensayo de CBR para la C-03.*

<b>CALICATA N°04</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Densidad máxima seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>		<b>Índice de CBR</b>
	<b>95%</b>	<b>100%</b>	
C-04	1.821	1.915	4.8

*Tabla 34: Resultados de ensayo de CBR para la C-04.*

<b>CALICATA N°05</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Densidad máxima seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>		<b>Índice de CBR</b>
	<b>95%</b>	<b>100%</b>	
C-05	1.861	1.959	5.8

*Tabla 35: Resultados de ensayo de CBR para la C-05.*

*Calcular la variación según la capacidad del portante del suelo arcilloso natural con el nanosílice a nivel de subrasante*

a. Ensayo de CBR (MTC E 132 – ASTM D 1883)

Los resultados de las 3 calicatas naturales que se realiza en el ensayo de CBR son:

Para la Calicata C-1 tanto natural como adición al 1%, 2%, 3% y 4% de nanosílice:

CALICATA	CBR AL 95%				
	0%	1%	2%	3%	4%
C-01.1	4.000	20.000	8.00	5.00	4.00
C-01.2	3.000	24.000	7.00	6.00	6.00
C-01.3	3.000	9.000	6.00	5.00	7.00
C-01.4	3.000	10.000	10.00	6.00	7.00
C-01.5	3.000	10.000	7.00	6.00	7.00
C-01.6	4.000	10.000	8.00	9.00	4.00
C-01.7	4.000	10.000	8.00	7.00	6.00
C-01.8	4.000	9.000	8.00	6.00	5.00
C-01.9	4.000	8.000	10.00	8.00	5.00
C-01.10	4.000	9.000	7.00	8.00	5.00
<b>PROMEDIO</b>	3.60	11.90	7.90	6.60	5.60

*Tabla 36: Promedio de las 10 repeticiones para muestra natural y adiciones de la C-01.*

CALICATA -01	0%	1%	2%	3%	4%
<b>MDS al 95%</b>	1.847	1.94	2.147	2.160	2.168
<b>OCH (%)</b>	14.60	13.40	15.22	13.88	15.70
<b>CBR al 95% de M.D.S</b>	3.60	11.90	7.90	6.60	5.60
<b>Desviación estándar</b>	0.52	5.45	1.29	1.35	1.17

*Tabla 37: Resumen de CBR en C-01 de muestra al 0% y con adiciones de nanosílice.*

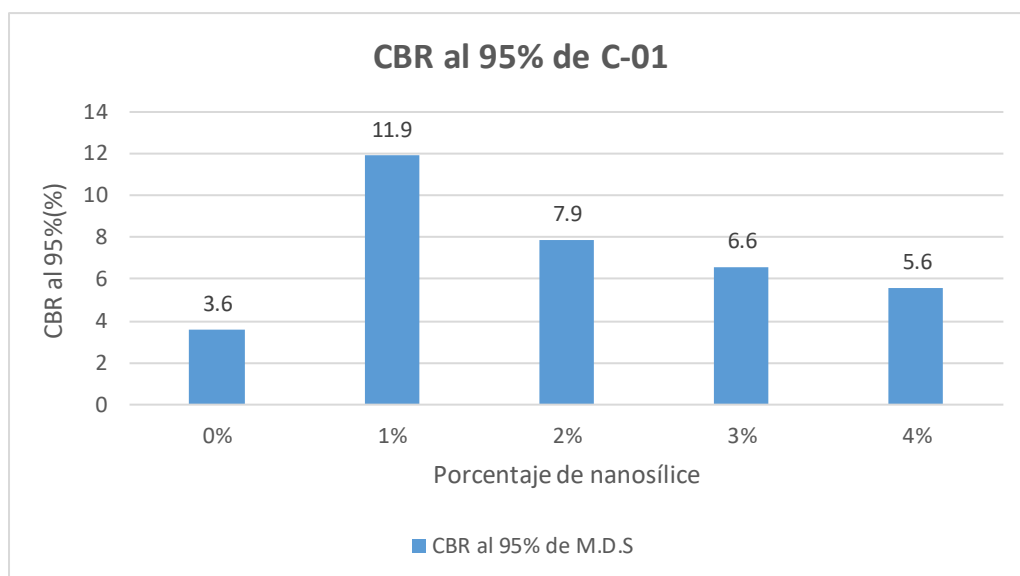


Gráfico 4: CBR al 95% de C-01 de la muestra patrón y muestra con adiciones de nanosílice.

Para la Calicata C-2 tanto natural como adición al 1%, 2%, 3% y 4% de nanosílice.

CALICATA N°02	CBR AL 95%				
	0%	1%	2%	3%	4%
C-02-01	5.000	12.000	4.00	4.00	4.00
C-02-02	5.000	16.000	6.00	4.00	4.00
C-02-03	6.000	9.000	6.00	4.00	4.00
C-02-04	5.000	10.000	5.00	6.00	5.00
C-02-05	5.000	10.000	6.00	6.00	6.00
C-02-06	5.000	11.000	4.00	5.00	6.00
C-02-07	5.000	10.000	6.00	4.00	4.00
C-02-08	5.000	10.000	8.00	4.00	5.00
C-02-09	4.000	8.000	8.00	5.00	5.00
C-02-10	4.000	10.000	5.00	6.00	3.00
<b>PROMEDIO</b>	<b>4.90</b>	<b>10.60</b>	<b>5.80</b>	<b>4.80</b>	<b>4.60</b>

Tabla 38: Promedio de las 10 repeticiones para muestra natural y adiciones de la C-02.

CALICATA -02	0%	1%	2%	3%	4%
<b>MDS al 95%</b>	1.872	1.873	1.954	1.893	1.890
<b>OCH (%)</b>	13.18	15.20	13.61	14.14	13.50
<b>CBR al 95% de M.D.S</b>	4.90	10.60	5.80	4.80	4.60
<b>Desviación estándar</b>	0.57	2.17	1.40	0.92	0.97

Tabla 39: Resumen de CBR en C-02 de muestra al 0% y con adiciones de nanosílice.

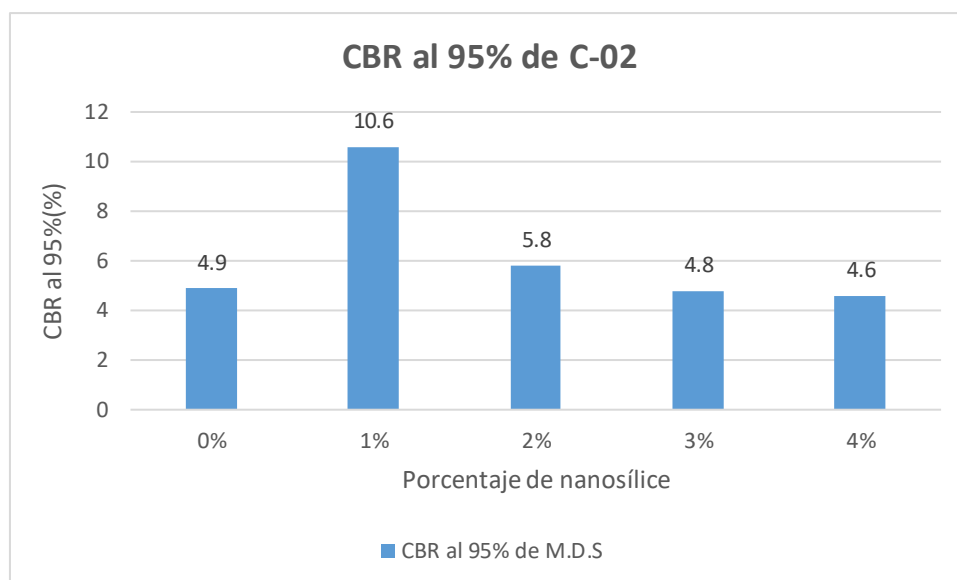


Gráfico 5: CBR al 95% de C-02 de la muestra patrón y muestra con adiciones de nanosilíce.

Para la Calicata C-4 tanto natural como adición al 1%, 2%, 3% y 4% de nanosilíce.

CALICATA N°04	CBR AL 95%				
	0%	1%	2%	3%	4%
C-04-01	5.000	8.000	6.00	6.00	7.00
C-04-02	5.000	12.000	9.00	7.00	6.00
C-04-03	4.000	14.000	6.00	11.00	3.00
C-04-04	7.000	15.000	8.00	9.00	5.00
C-04-05	5.000	17.000	6.00	5.00	5.00
C-04-06	4.000	12.000	6.00	4.00	4.00
C-04-07	4.000	10.000	8.00	4.00	6.00
C-04-08	4.000	10.000	8.00	6.00	6.00
C-04-09	6.000	10.000	8.00	7.00	5.00
C-04-10	4.000	8.000	6.00	5.00	3.00
<b>PROMEDIO</b>	<b>4.80</b>	<b>11.60</b>	<b>7.10</b>	<b>6.40</b>	<b>5.00</b>

Tabla 40: Promedio de las 10 repeticiones para muestra natural y adiciones de la C-03.

CALICATA - 04	0%	1%	2%	3%	4%
MDS al 95%	1.915	1.820	1.867	1.882	1.869
OCH (%)	13.53	18.60	18.30	12.00	13.40
<b>CBR al 95% de M.D.S</b>	<b>4.80</b>	<b>11.60</b>	<b>7.10</b>	<b>6.40</b>	<b>5.00</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>1.03</b>	<b>2.99</b>	<b>1.20</b>	<b>2.22</b>	<b>1.33</b>

Tabla 41: Resumen de CBR en C-04 de muestra al 0% y con adiciones de nanosilíce.

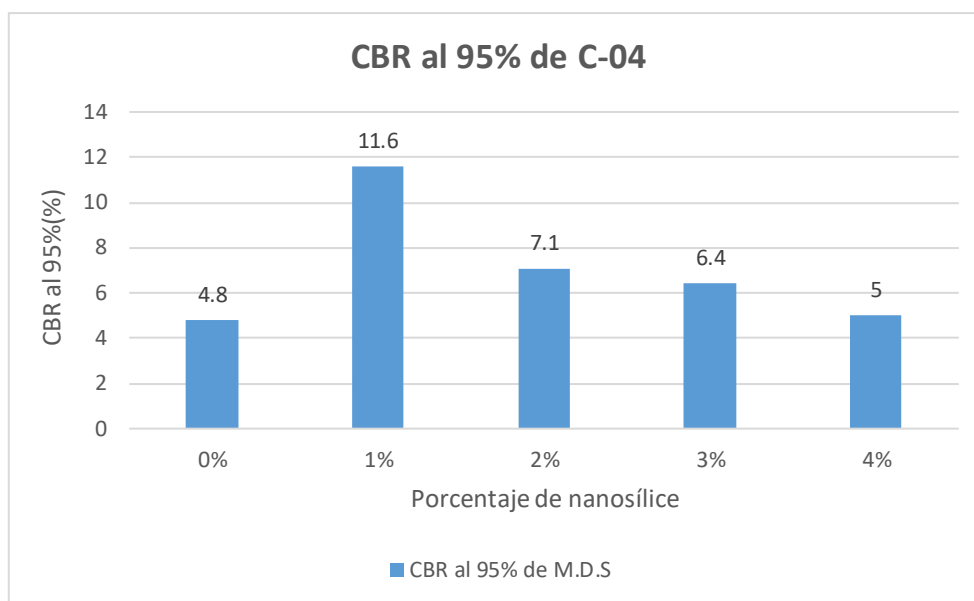


Gráfico 6: CBR al 95% de C-04 de la muestra patrón y muestra con adiciones de nanosílice.

*Evaluar el índice de plasticidad del suelo arcilloso natural con el de nanosílice.*

#### b. Ensayo de Límites de Atterberg MTC E 110

Resultados de ensayo de Límites de Atterberg.

CALICATA N°01					
Límites de Atterberg	0% Nanosílice	1% Nanosílice	2% Nanosílice	3% Nanosílice	4% Nanosílice
Límite Líquido (LL %)	35.1	32.06	34.33	37.98	34.01
Límite Plástico (LP%)	23.53	18.75	20.00	21.38	15.87
Índice de Plasticidad (IP %)	11.57	13.31	14.33	15.87	18.15

Tabla 42: Límite de Atterberg de muestras adicionadas para la C1 con adiciones de 0%, 1%, 2%, 3% y 4% de Nanosílice.

CALICATA N°02					
Límites de Atterberg	0% Nanosílice	1% Nanosílice	2% Nanosílice	3% Nanosílice	4% Nanosílice
Límite Líquido (LL %)	33.2	33.99	31.44	32.54	34.30
Límite Plástico (LP%)	19.05	18.58	15.64	15.57	17.20
Índice de Plasticidad (IP %)	14.15	15.42	15.79	16.97	17.10

Tabla 43: Límite de Atterberg de muestras adicionadas para la C2 con adiciones de 0%, 1%, 2%, 3% y 4% de Nanosílice.

<b>CALICATA N°04</b>					
	0% Nanosílice	1% Nanosílice	2% Nanosílice	3% Nanosílice	4% Nanosílice
Límites de Atterberg					
Límite Líquido (LL %)	30.49	33.99	31.44	32.54	34.30
Límite Plástico (LP%)	18.82	18.58	15.64	15.57	17.20
Índice de Plasticidad (IP %)	11.68	15.42	15.79	16.97	17.10

*Tabla 44: Límite de Atterberg de muestras adicionadas para la C4 con adiciones de 0%, 1%, 2%, 3% y 4% de Nanosílice.*

***Evaluar el índice de expansión del suelo arcilloso natural con el de nanosílice.***

La expansión se realizó mediante tres ensayos: se tomó la expansión por CBR, expansión en el ensayo del edómetro y el ensayo de Lambe.

**c. Ensayo de Expansión mediante CBR**

Bajo el hinchamiento del ensayo de CBR se determinó la expansión de los suelos naturales con las muestras con adición al 1%, 2%, 3% y 4% por cada calicata.

<b>ENSAYOS DE EXPANSION DE LA CALICATA N°01</b>											
<b>C1 - 1%</b>			<b>C1 - 2%</b>			<b>C1 - 3%</b>			<b>C1 - 4%</b>		
<b>56 golpes</b>	<b>25 golpes</b>	<b>12 golpes</b>	<b>56 golpes</b>	<b>25 golpes</b>	<b>12 golpes</b>	<b>56 golpes</b>	<b>25 golpes</b>	<b>12 golpes</b>	<b>56 golpes</b>	<b>25 golpes</b>	<b>12 golpes</b>
0.57	0.71	0.82	1.90	1.92	1.99	2.00	2.28	2.41	2.41	2.52	2.72
2.42	2.45	3.48	2.27	2.35	2.51	2.13	2.3	2.63	2.3	2.68	2.85
2.4	2.46	3.51	2.16	2.38	2.51	2.11	2.3	2.68	2.25	2.46	2.63
2.31	2.41	3.56	2.24	2.35	2.47	2.46	2.63	2.79	2.24	2.52	2.68
2.48	2.5	3.49	2.17	2.34	2.41	2.15	2.35	2.52	2.35	2.67	2.79
2.4	2.47	3.51	2.2	2.36	2.49	2.08	2.19	2.46	2.3	2.63	2.85
2.39	2.47	3.52	2.05	2.34	2.57	2.16	2.32	2.47	2.13	2.24	2.68
2.66	2.78	3.02	2.1	2.27	2.39	1.99	2.15	2.38	2.15	2.26	2.71
2.28	2.36	3.11	2.2	2.47	2.58	1.95	2.08	2.29	2.3	2.52	2.68
2.21	2.62	3.89	2.33	2.51	2.62	2.08	2.52	2.79	2.46	2.63	2.78
<b>2.21</b>	<b>2.32</b>	<b>3.19</b>	<b>2.16</b>	<b>2.33</b>	<b>2.45</b>	<b>2.11</b>	<b>2.31</b>	<b>2.54</b>	<b>2.29</b>	<b>2.51</b>	<b>2.74</b>

*Tabla 45: Expansión obtenido por el hinchamiento de CBR de la C1 tanto en suelo sin y con adición.*

ENSAYOS DE EXPANSION DE LA CALICATA N°02											
C2 - 1%			C2 - 2%			C2 - 3%			C2 - 4%		
56 golpes	25 golpes	12 golpes	56 golpes	25 golpes	12 golpes	56 golpes	25 golpes	12 golpes	56 golpes	25 golpes	12 golpes
1.93	2.05	2.16	2.16	2.24	2.35	1.92	2.05	2.59	1.37	1.42	1.7
1.97	2.08	2.3	2.27	2.35	2.51	1.22	1.64	1.89	1.86	1.97	2.18
1.64	1.7	1.81	2.16	2.3	2.51	1.48	1.7	1.97	1.97	2.13	2.24
1.7	1.86	1.89	2.24	2.35	2.46	1.48	1.7	1.97	2.03	2.17	2.46
1.86	1.93	2.13	2.17	2.24	2.4	1.75	1.92	2.08	1.95	2.15	2.19
1.75	2.08	2.13	2.2	2.36	2.49	1.86	1.9	2.24	1.86	2.08	2.3
1.86	2.08	2.13	2.05	2.23	2.57	1.75	2.03	2.63	1.97	2.13	2.3
1.97	2.03	2.13	2.1	2.26	2.39	1.86	1.97	2.46	1.86	2.03	2.19
1.75	1.92	2.05	2.22	2.36	2.58	1.64	1.86	2.68	2.03	2.13	2.46
1.59	1.75	1.92	2.33	2.51	2.62	1.48	1.7	1.97	1.86	2.19	2.52
<b>1.80</b>	<b>1.95</b>	<b>2.07</b>	<b>2.19</b>	<b>2.32</b>	<b>2.49</b>	<b>1.64</b>	<b>1.85</b>	<b>2.25</b>	<b>1.88</b>	<b>2.04</b>	<b>2.25</b>

Tabla 46: Expansión debido al hinchamiento de CBR de la C2 tanto en suelo sin y con adición.

ENSAYOS DE EXPANSION DE LA CALICATA N°04											
C4 - 1%			C4 - 2%			C4 - 3%			C4 - 4%		
56 golpes	25 golpes	12 golpes	56 golpes	25 golpes	12 golpes	56 golpes	25 golpes	12 golpes	56 golpes	25 golpes	12 golpes
1.49	1.60	1.63	0.41	1.04	1.29	0.57	0.6	0.64	0.97	1.15	1.4
0.82	1.15	1.6	0.39	0.49	0.62	0.71	0.93	1.07	1.26	1.35	1.42
0.66	0.77	0.88	0.47	0.47	0.6	0.71	0.99	1.2	1.26	1.35	1.42
0.77	0.93	1.15	0.48	0.82	1.02	0.88	1.15	1.31	1.2	1.37	1.53
0.82	0.99	1.2	2.17	2.27	2.35	1.86	1.9	2.24	1.42	1.59	1.7
1.93	2.09	2.31	2.16	2.3	2.51	1.86	1.9	2.24	2.3	2.63	2.8
0.88	1.05	1.15	2.24	2.35	2.46	1.75	2.03	2.63	2.13	2.24	2.68
1.89	2.11	2.41	2.1	2.25	2.39	1.97	2.13	2.3	2.15	2.25	2.7
1.97	2.13	2.33	2.22	2.47	2.58	1.92	2.13	2.3	2.03	2.13	2.46
1.75	1.92	2.08	2.33	2.51	2.62	2.08	2.52	2.79	1.86	2.19	2.52
<b>1.30</b>	<b>1.47</b>	<b>1.67</b>	<b>1.50</b>	<b>1.70</b>	<b>1.84</b>	<b>1.43</b>	<b>1.63</b>	<b>1.87</b>	<b>1.66</b>	<b>1.83</b>	<b>2.06</b>

Tabla 47: Expansión debido al hinchamiento de CBR de la C4 tanto en suelo sin y con adición.

#### d. Ensayo de expansión mediante el Edómetro

Además, se determinó la expansión a través del ensayo de consolidación tanto en suelos sin adición como en los adicionados.

ENSAYO DE EXPANSION			
TIPO DE MUESTRA	C- 01	C- 02	C- 04
	(%)	(%)	(%)
SN	33.153	46.52	38.8
1%N	94.67	76.55	48.3
2%N	77.65	30	41.2
3%N	62.86	52.14	16.67
4%N	69.4	63.9	26.1

Tabla 48: Resumen de la expansión mediante el edómetro.

### e. Ensayo de expansión mediante Lambe

Se realizó el esfuerzo que genera la última expansión mediante el ensayo de Lambe. Las lecturas tomadas en este ensayo son realizadas en un periodo de tres días ya que en 24 horas la nanosílice no expandía mucho y al dejar más tiempo la expansión aumentaba.

Para poder sacar el esfuerzo de la última expansión se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$IE = \frac{\text{Fuerza (N)}}{\text{Área sección (mm)}}}$$

<b>CALICATAS</b>	<b>C-01</b>			
<b>PORCENTAJES</b>	<b>1%</b>	<b>2%</b>	<b>3%</b>	<b>4%</b>
ULTIMA LECTURA	2.1	2.4	1.10	1.25
FUERZA KN	20.28	21.36	16.64	17.19
AREA	3782.7603	3782.7603	3782.7603	3782.7603
INDICE DE ESFUERZO	0.0053599	0.0056480	0.0043996	0.0045436

*Tabla 49: Expansión mediante ensayo Lambe en la C-01.*

<b>CALICATAS</b>	<b>C-02</b>			
<b>PORCENTAJES</b>	<b>1%</b>	<b>2%</b>	<b>3%</b>	<b>4%</b>
ULTIMA LECTURA	2.22	2.5	1.46	1.5
FUERZA KN	20.71	21.73	17.95	18.10
AREA	3782.7603	3782.7603	3782.7603	3782.7603
INDICE DE ESFUERZO	0.0054751	0.0057440	0.0047453	0.0047837

*Tabla 50: Expansión mediante ensayo Lambe en la C-02.*

<b>CALICATAS</b>	<b>C-04</b>			
<b>PORCENTAJES</b>	<b>1%</b>	<b>2%</b>	<b>3%</b>	<b>4%</b>
ULTIMA LECTURA	1.5	1.7	0.85	1.1
FUERZA KN	18.10	18.82	15.73	16.64
AREA	3782.7603	3782.7603	3782.7603	3782.7603
INDICE DE ESFUERZO	0.0047837	0.0049758	0.0041595	0.0043996

*Tabla 51: Expansión mediante ensayo Lambe en la C-04.*

***Comparar el costo del uso de nanosilice con otro material convencional para la estabilización de suelos arcillosos a nivel de subrasante.***

Esta tesis investigativa que trae consigo el uso de la nanosilice tiene la finalidad de determinar el valor de esta materia como agente estabilizador. Este material se obtuvo de la empresa Ulmen, ésta nos brindó la ficha técnica del material nanotecnológico como la venta de su precio. Los porcentajes se basaron con respecto a la resistencia de su capacidad portante de la nanosilice ya que aumenta entre 216.33 a 330.55% su resistencia con respecto al suelo natural. Para ello se tuvo en cuenta que investigaciones pasadas cuyas resistencias se aproximen o sean iguales a la resistencia obtenida, y según el autor (Fuentes Jhordi,2020) al 2% de cal obtuvo una resistencia mayor del 320% respecto a la muestra natural, al igual que el autor (Wong Fredy,2019) con 2% de cal tiene como resultado de una resistencia de capacidad portante mayor al 350% con respecto a la muestra virgen. Según el autor (Huamán Erick.2022) al 1% de cemento obtuvo una resistencia mayor del 270% respecto a la muestra natural.

PORCENTAJES DE AGENTE ESTABILIZANTE	
% CAL	2%
% CEMENTO	1%
% NANOSILICE	1%

*Tabla 52:* Dosificaciones tomadas de acuerdo con la resistencia que se obtuvo al usar nanosilice.

A continuación, se muestran los presupuestos calculados para los agentes estabilizantes de Cal Viva 2%, Cemento Portland 1% y Nanosilice al porcentaje más óptimo que es al 1%.

ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS						
Costo unitario por m3 (Estabilización de suelo + 2% de cal)				TOTAL S/.		33.10
DESCRIPCIÓN	Und	Cuadrilla	Cantidad	Precio		
				Unitario	Parcial	Total
<b>MANO DE OBRA</b>						5.98
Operario	hh	1	0.070	27.49	1.92	
Oficial	hh	1	0.070	21.62	1.51	
Peón	hh	1	0.130	19.57	2.54	
<b>MATERIALES</b>						25.34
Agua	m3		0.05	2.35	2.35	
cal 2%	m2		1.080	21.29	22.9932	
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>						1.77
Herramientas manuales	%MO		3.00%	0.68	0.02	
Camión cisterna (1500 glns)	hm	1	0.010	157.02	1.57	
Rodillo liso vibr. autop. 7-9 Ton	hm	1	0.010	152.40	1.52	
Motoniveladora 130 - 135 HP	hm	1	0.010	175.16	1.75	

*Tabla 53:* Costo para estabilización con cal al 2%.

ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS						
Costo unitario por m3 (Estab. de suelo + 1% de cemento)				TOTAL S/.		37.11
DESCRIPCIÓN	Und	Cuadrilla	Cantidad	Precio		
				Unitario	Parcial	Total
<b>MANO DE OBRA</b>						5.98
Operario	hh	1	0.070	27.49	1.92	
Oficial	hh	1	0.070	21.62	1.51	
Peón	hh	1	0.130	19.57	2.54	
<b>MATERIALES</b>						29.355
Agua	m3				2.35	
Cemento Portland 1%	m2		1.03	28.50	29.355	
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>						1.77
Herramientas manuales	%MO		3.00%	0.68	0.02	
Camión cisterna (1500 glns)	hm	1	0.010	157.02	1.57	
Rodillo liso vibr. autop. 7-9 Ton	hm	1	0.010	152.40	1.52	
Motoniveladora 130 - 135 HP	hm	1	0.010	175.16	1.75	

Tabla 54: Costo para estabilización con cemento al 1%.

ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS						
Costo unitario por m3 (Estab. de suelo + 1% de nanosílice)				TOTAL S/.		10.10
DESCRIPCIÓN	Und	Cuadrilla	Cantidad	Precio		
				Unitario	Parcial	Total
<b>MANO DE OBRA</b>						5.98
Operario	hh	1	0.070	27.49	1.92	
Oficial	hh	1	0.070	21.62	1.51	
Peón	hh	1	0.130	19.57	2.54	
<b>MATERIALES</b>						2.35
Agua	m3		0.05	2.35	2.35	7.49
nanosílice 1%	m2		1.070	7.00	7.49	
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTAS</b>						1.77
Herramientas manuales	%MO		3.00%	0.68	0.02	
Camión cisterna (1500 glns)	hm	1	0.010	157.02	1.57	
Rodillo liso vibr. autop. 7-9 Ton	hm	1	0.010	152.40	1.52	
Motoniveladora 130 - 135 HP	hm	1	0.010	175.16	1.75	

Tabla 55: Costo para estabilización con nanosílice al 1%.

## Discusión:

**Objetivo 01: Calcular la variación según la capacidad del portante del suelo arcilloso natural con el nanosílice a nivel de subrasante.**

Según el objetivo específico, calcular la variación de la capacidad portante del suelo arcilloso natural con el nanosílice a nivel de subrasante, los resultados obtenidos en el gráfico N°07 se evidencia que al 1% de nanosílice se logra tener una mayor resistencia de CBR entre el 216.33 a 330.55% de su resistencia inicial, obteniendo como dato favorable de 30 resultados por muestra de C1, C2 y C4; luego se muestra una disminución repentina cuando el porcentaje es superior al 2%, sin embargo los valores obtenidos siempre son mayores al estado natural. Estos datos al ser comparados por los autores (Verma y Maheshwari, 2017) investigaron que la relación de carga de California (CBR) mejora con el incremento del contenido de nanosílice al 0.75%, ya que se obtuvo un valor de 49,22% mayor que el valor obtenido para suelo virgen. Con estos resultados se afirma que la variación de la capacidad portante del suelo arcilloso natural con nanosílice alrededor del 1% contribuye de manera favorable a la resistencia del suelo a nivel de subrasante, además según (Pashabavandpouri y Jahangiri, 2015) un alto porcentaje de nanopartículas de sílice tiene un impacto en el proceso de cementación y fortalecimiento del suelo a largo plazo.

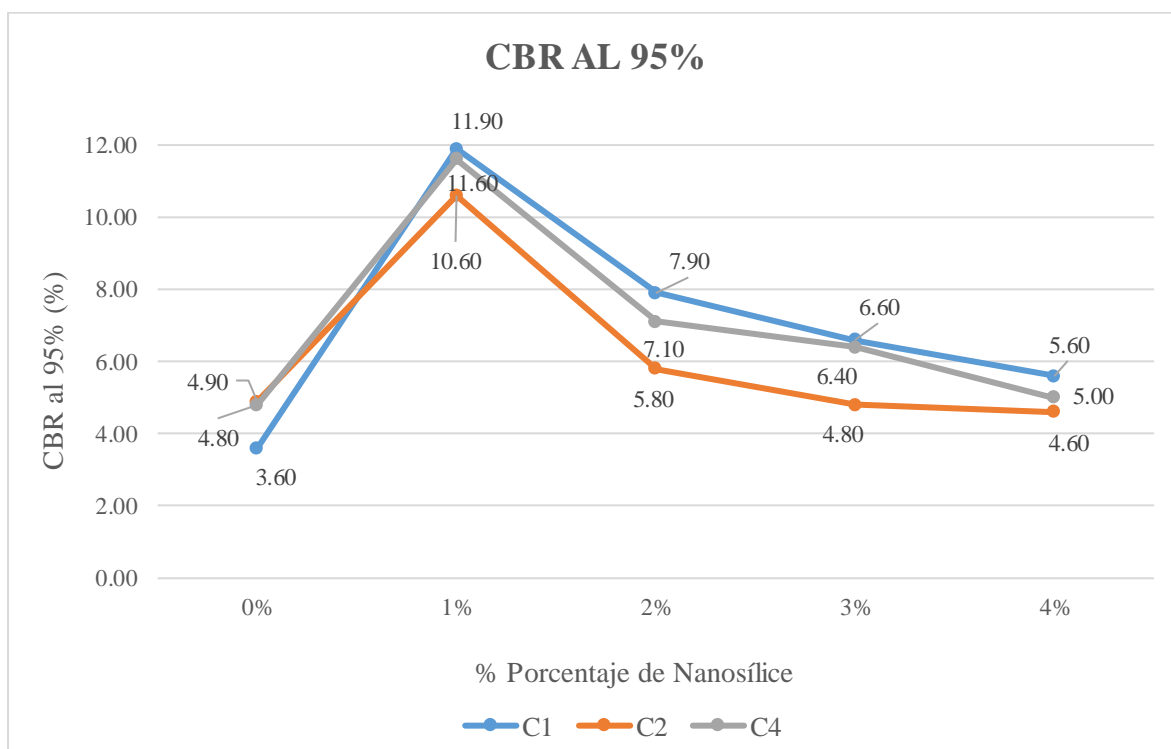


Gráfico 7: CBR al 95% en C1, C2 y C4 con dosificaciones al 0%, 1%, 2%, 3% y 4%.

**Objetivo 02: Calcular la variación según el índice de plasticidad del suelo arcilloso natural con el nanosílice a nivel de subrasante.**

Conforme al objetivo evaluar el índice de plasticidad del suelo arcilloso natural con el nanosílice, los resultados mostrados en el gráfico N°08, se demuestran que el índice de plasticidad aumenta al incrementar los cuatro porcentajes de nanosílice en las tres calicatas (C-01, C-02 y C-04) con respecto a su estado natural, sin embargo, el límite plástico muestra una disminución gradual en las tres calicatas. Al comparar los resultados con (Hadi y Omid, 2019) de los ensayos de límites de Atterberg con respecto al índice de plasticidad aumentan conforme se incrementa el porcentaje de nanosílice, con estos resultados se confirma que según Bahmani et al. (2016) el aumento del índice de plasticidad hasta una determinada adición de NS se debe a la aglomeración de nanopartículas. Además, según Ebrahim Nohani, Ezatolah Alimakan (2015) afirma que las nanopartículas de arcilla pueden afectar las características plásticas del suelo mediante los 3 métodos: el primero por nanoporosidad intraparticular, se da cuando el agua ingresa a los poros a través de la absorción o hidratación durante el proceso de formación de minerales, segundo por cargas superficiales y gran superficie específica que están ligadas a cationes hidratados que aumentan el espesor de estas capas, lo que resulta en una mayor absorción de humedad del suelo; y por último por microestructura masiva, debido a que las nanopartículas no se dispersen ni desaparezcan durante la preparación de la pasta de suelo para medir los límites de Atterberg en una masa más fuerte que tiene poros intergranulares llenos de agua. También los autores (Ghazi, Baziar y Mirkazemi, 2011) confirma que los resultados de su investigación mostraron que el nanoaditivo aumenta los valores del límite líquido y del índice de plasticidad.

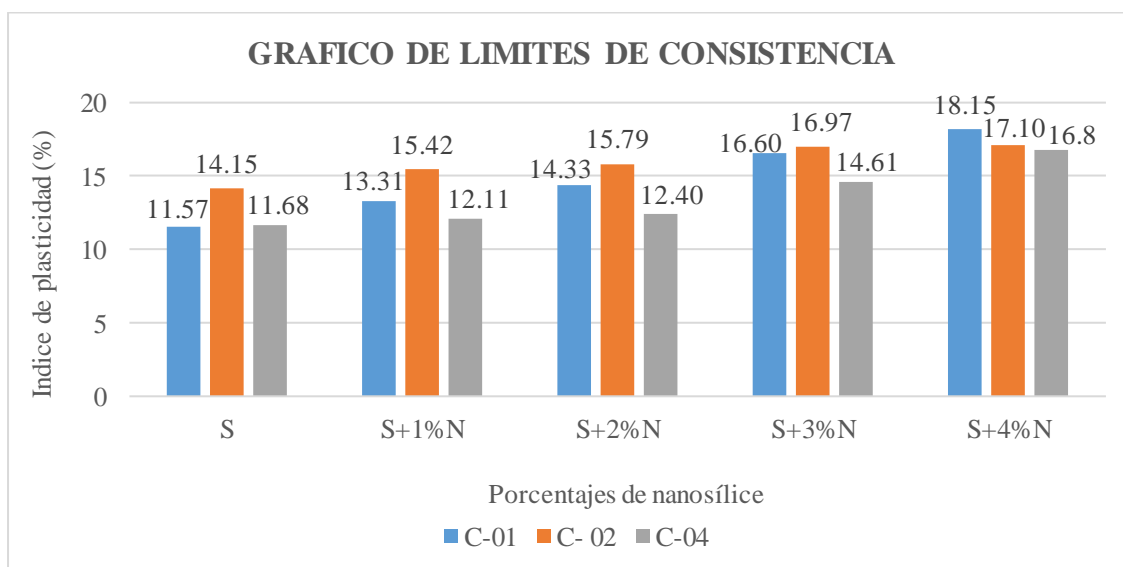
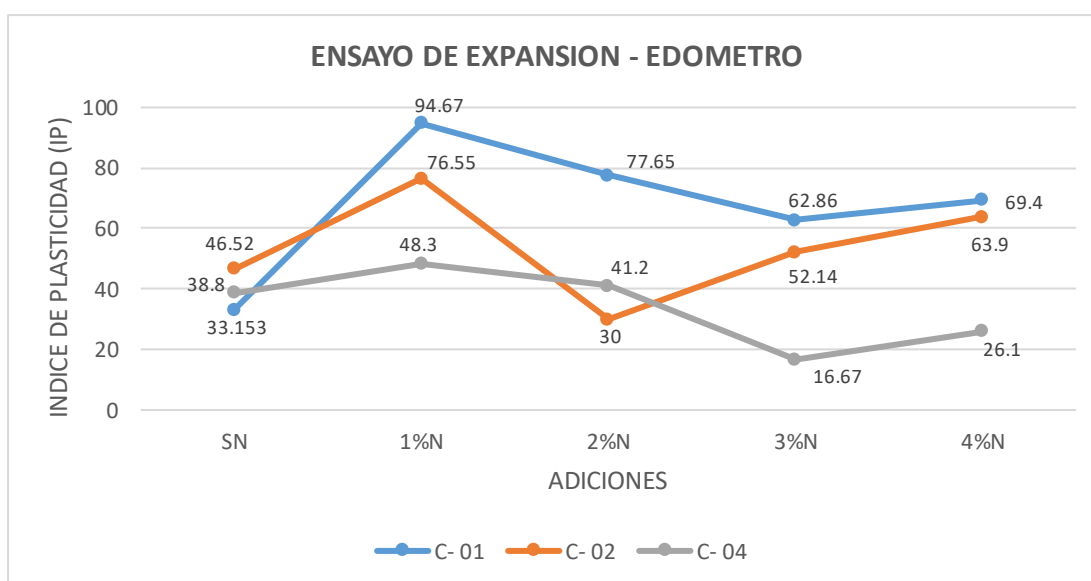


Gráfico 8: Índice de plasticidad en C1, C2 y C4 con dosificaciones al 0%, 1%, 2%, 3% y 4%.

**Objetivo 03: Evaluar el índice de expansión del suelo arcilloso natural con el de nanosílice.**

Según el objetivo evaluar el índice de expansión del suelo arcilloso natural con el de nanosílice, los resultados obtenidos en el gráfico N°09 muestra que el ensayo se realizó por 03 métodos: el primero bajo el hinchamiento del ensayo de CBR que al incrementar el porcentaje de adición de nanosílice en las tres calicatas estudiadas aumenta su expansión con respecto a su estado natural, sin embargo, al 1% la expansión es menor que la de los otros porcentajes con adición; el segundo método fue a través del ensayo de consolidación (edómetro) donde se muestra que al 1% aumenta la expansión con respecto a su estado natural, luego el porcentaje va disminuyendo. La expansión más baja se da cuando el porcentaje de nanosílice es del 3%; y el tercer método se realizó el esfuerzo que genera la última expansión mediante el ensayo de Lambe, se muestra que al añadir 2% de nanosílice en las calicatas estudiadas suben de manera significativa el índice de esfuerzo, sin embargo, a mayor porcentaje de adición el índice de esfuerzo disminuye. Al comparar los resultados se refuta con el autor (R. Vinodh Kumar<sup>1</sup>, Ahfaz Husain Khan, 2023), su investigación mostró que el suelo tratado con humo de sílice se obtuvo una reducción tanto en el hinchamiento libre como en la presión de hinchamiento de alrededor del 65 y 76%, respectivamente, en comparación con el suelo no tratado, sin embargo los autores (Pashabavandpouri y Jahangiri, 2015) afirman que la adición de nanosílice y cal hace que el hinchamiento de las muestras alcance una tasa constante en un periodo de tiempo más corto, sino que también un alto porcentaje de nanosílice aumente el hinchamiento debido a la suavidad de las partículas y a una mayor absorción de agua.

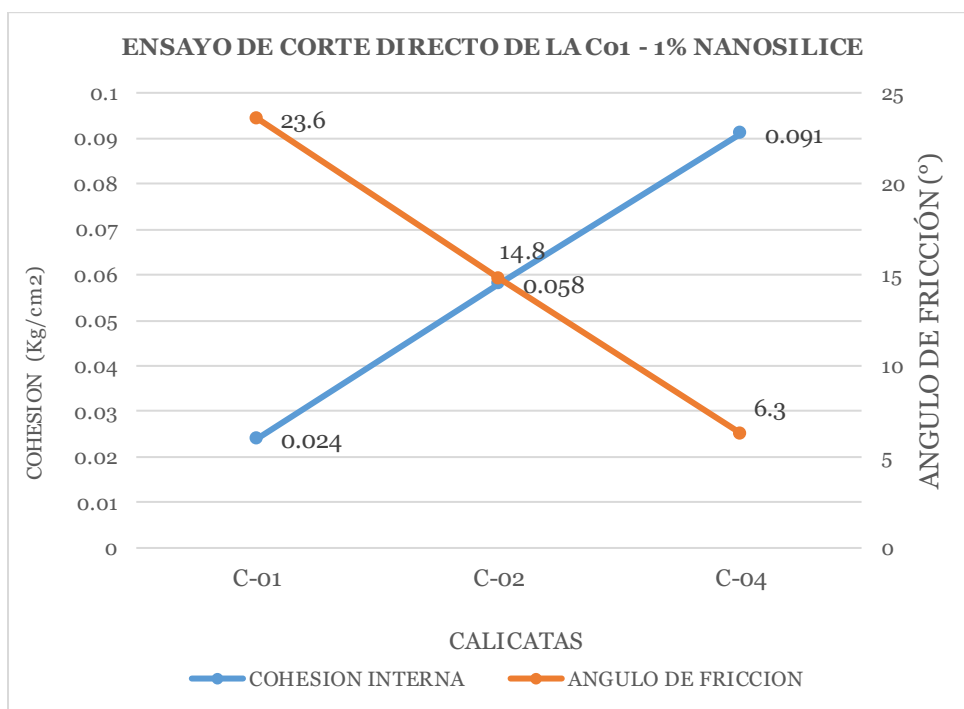


*Gráfico 9: Ensayo de expansión mediante el edómetro para la C1, C2 y C4 con dosificaciones al 0%, 1%, 2%, 3% y 4%.*

### ***Ensayo de Corte directo***

En los resultados del ensayo de corte directo al 1% su cohesión va aumentando a diferencia del ángulo de fricción que disminuye esto se debe a las partículas pequeñas con menos fricción y a la acumulación de una cantidad excesiva de nanosílice.

Según los autores (Barbhuiya y Hasan, 2020) investigaron que al añadir nanosílice a la muestra aumenta cohesión, debido a la relación con el efecto de llenado de los poros del aditivo y el gel viscoso formado entre las partículas del suelo con la adición, mientras el valor del ángulo de fricción interna decrece.



*Gráfico 10: Gráfico 8: Corte directo en C1, C2 y C4 con dosificaciones al 0%, 1%, 2%, 3% y 4%.*

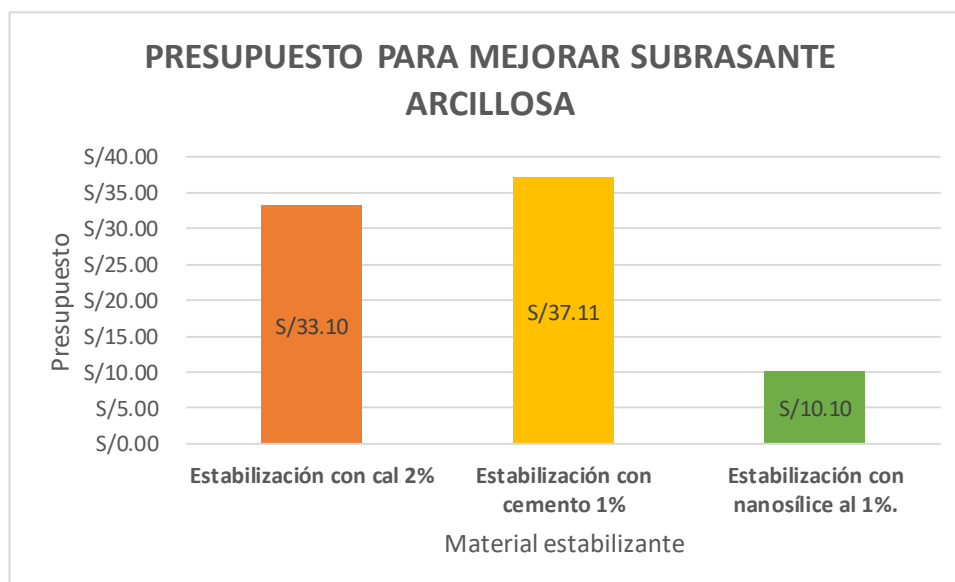
***Comparar el costo del uso de nanosílice con otro material convencional para la estabilización de suelos arcillosos a nivel de subrasante.***

Se realizó una tabla comparativa del presupuesto obtenido a través de costos unitarios para cada uno de los materiales elegidos en el estudio económico de la tesis investigativa.

Técnicamente los estabilizantes mejoran las características físicas y mecánicas convirtiendo en un buen suelo. En la Tabla N°55, y el Gráfico N°11 podemos comparar que el presupuesto con nanosílice es menor el costo de ejecución de una vía que con material convencional, teniendo en cuenta que el cemento y la cal han sido considerado su precio al por mayor. La estabilización de subrasante con nanosílice reduce un costo entre S/23.00 a S/27.00 por cada m<sup>3</sup> con respecto a un material convencional.

PRESUPUESTO PARA MEJORAR SUBRASANTE ARCILLOSA	
MATERIAL ESTABILIZANTE	TOTAL
Estabilización con cal 2%	S/ 33.10
Estabilización con cemento 1%	S/ 37.11
Estabilización con nanosílice al 1%.	S/ 10.10

*Tabla 56: Presupuesto entre un material convencional y la nanosílice.*



*Gráfico 11: Comparación del presupuesto económico de cal, cemento y nanosílice.*

El Objetivo General de esta investigación es **determinar la dosificación óptima de la nanosílice en diferentes porcentajes en la estabilización de suelos arcillosos a nivel de subrasante**, por ello se tiene la siguiente discusión:

Con respecto a la variación de la capacidad portante del suelo arcilloso natural con el nanosílice, los resultados obtenidos en la C1 de 3.6% su resistencia aumenta a 11.60%, en C2 de 4.9% aumentó a 10.60% y en la C4 de 4.8 aumenta a 11.6%, se evidencia que al 1% de nanosílice se logra tener una mayor resistencia de CBR entre el 216.33 a 330.55% de su resistencia inicial, obteniendo como dato favorable de 30 resultados por muestra de C1, C2 y C4. Además, comparando con mis antecedentes dos autores confirman que la resistencia cuando es menor al 1% de dosificación es la óptima.

Al 1% de adición en la C1 de 11.57 aumenta a 13.31, C2 de 14.15 aumenta a 15.42 y C4 de 11.68 aumenta a 12.11. El criterio para usar al 1% se basa en que su índice de plasticidad aumenta al incrementar los cuatro porcentajes de nanosílice en las tres calicatas (C-01, C-02 y C-04) con respecto a su estado natural lo que permite que el suelo se asiente (deforme) por ello se escogió el porcentaje más bajo que es al 1%.

Con respecto al índice de expansión mediante el ensayo del Edómetro al 1% se llega a expandir más con respecto a su estado natural, sin embargo, al 3% mediante los tres métodos la expansión disminuye. La expansión va a depender mucho del tiempo de curado ya que a mayor tiempo aumenta su expansión posiblemente debido a la formación de los cristales de la sílice dentro de su estructura, lo que genera un aumento de volumen y de expansión.

Además, con respecto al corte directo la inclusión de nanosílice al 1% mejora la cohesión que se produce debido a la cementación, los enlaces químicos y la atracción electrostática entre las partículas del suelo, mientras el ángulo de fricción disminuye debido a la disposición, el tamaño y la angularidad de los granos.

Por último, con respecto a costo como al 1% tiene mayor resistencia el presupuesto es favorable ya que reduce un costo entre S/ 152,089.34 a S/ 172,681.26 con respecto a un material convencional como la cal y el cemento.

## Conclusiones:

- En esta investigación se realizó los ensayos con el suelo de las calicatas más desfavorables las cuales son: Calicata N°01, Calicata N°02 y Calicata N°04, siendo estas de suelo de tipo CL (arcilla de baja plasticidad) según clasificación SUCS con un índice de 11.57%, 14.15% y 11.68% respectivamente; y una capacidad portante de 3.60%, 4.90% y 4.80% respectivamente.
- La incorporación del 1 a 4% de nanosílice aumenta el índice de plasticidad conforme aumenta el porcentaje de adición, es decir incrementa el valor de 1.03 a 1.56 veces de la muestra natural. Teniendo como resultados en la C1 al 0%, 1%, 2%, 3% y 4% un índice de plasticidad de 11.57%, 13.31%, 14.33%, 16.6% y 18.15% respectivamente, mientras en la C2 al 0%, 1%, 2%, 3% y 4% un índice de plasticidad de 14.15%, 15.42%, 15.79%, 16.97% y 17.10% respectivamente y para la C4 al 0%, 1%, 2%, 3% y 4% se obtuvo un índice de plasticidad de 11.68%, 12.11%, 12.40%, 14.61% y 16.8% respectivamente.
- La relación de soporte de California del suelo mejora de manera significativa debido a la adición de nanosílice al 1% ya que aumenta entre 216.33 a 330.55% su resistencia con respecto al suelo natural, dando como dato favorable de 30 resultados por muestra. Los resultados obtenidos de este ensayo en la C1 al 0%, 1%, 2%, 3% y 4% tienen una resistencia de 3.60%, 11.90%, 7.90%, 6.60% y 5.60% respectivamente, mientras en la C2 al 0%, 1%, 2%, 3% y 4% se obtuvo un CBR de 4.90%, 10.60%, 5.80%, 4.80% y 4.60% respectivamente y para la C4 al 0%, 1%, 2%, 3% y 4% su resistencia es de 4.80%, 11.60%, 7.10%, 6.40% y 5.00% respectivamente. Se concluye que la dosificación al 1% tiene mayor resistencia, en cambio cuando la dosis es superior al 2% va decreciendo; sin embargo, los datos obtenidos con adición siempre son mayores al estado natural.
- Con respecto al índice de expansión mediante el hinchamiento del ensayo de CBR que al incrementar el porcentaje de adición de nanosílice en las tres calicatas estudiadas aumenta su expansión con respecto a su estado natural, sin embargo, al 1% la expansión es menor que la de los otros porcentajes con adición; el segundo método fue a través del ensayo de consolidación (edómetro) donde se muestra que al 1% aumenta la expansión con respecto a su estado natural, luego el porcentaje va disminuyendo.

La expansión más baja se da cuando el porcentaje de nanosílice es del 3%; y el tercer método se realizó el esfuerzo que genera la última expansión mediante el ensayo de Lambe, se muestra que al añadir 2% de nanosílice en las calicatas estudiadas suben de manera significativa el índice de esfuerzo, sin embargo, a mayor porcentaje de adición el índice de esfuerzo disminuye. Se concluye que la expansión va a depender mucho del tiempo de curado ya que a mayor tiempo aumenta su expansión posiblemente debido a la formación de los cristales de la sílice dentro de su estructura.

- La cohesión aumenta, a diferencia del ángulo de fricción interna que disminuye. Se observa una mejora significativa del ángulo de fricción y la cohesión debido a la adición de 1% de nanosílice.
  
- Para la evaluación económica, al emplear nanosílice al 1% como material estabilizante sale un presupuesto de S/10.10; mientras al estabilizar con cal al 2% se obtiene un costo de S/33.10 y para la estabilizar la subrasante con cemento al 1% su presupuesto es de S/37.11. Se concluye que con la estabilización de subrasante con nanosílice se reduce un costo entre S/23.00 a S/27 por cada m<sup>3</sup>, con respecto a un material convencional.

## Recomendaciones

En el futuro se recomienda realizar los siguientes trabajos de investigación:

- Ensayar las propiedades físico - mecánicas en arcillas de alta plasticidad es decir en arcillas expansivas.
- Analizar la capacidad portante en adiciones menores al 2% de nanosílice, debido a que la resistencia optima en esta investigación es de 1% . Recomiendo ensayar dosificaciones al 0.6%, 0.8%, 1.0% 1.2 y 1.4% con un tiempo de curado a los 7, 14 y 28 días, porque al momento que se estuvo realizando los ensayos se observó que mientras más días era el tiempo de curado aumentaba su resistencia.
- Se recomienda que al realizar el ensayo de expansión tomen en cuenta el tiempo de curado ya que se pudo observar que a menor tiempo de curado en algunos porcentajes no había expansión o era mínima; sin embargo, a mayor a mayor tiempo se pudo apreciar una mayor expansión, esto se debe a la formación de los cristales de la sílice dentro de su estructura, lo que genera un aumento de volumen y de expansión.
- Evaluar el comportamiento de la nanosílice de una mezcla de arcilla con nanosílice para edificaciones.

## Referencias bibliográficas:


### Bibliografía

- [1] P. Nacional, ««Memoria Institucional»,» 2021..
- [2] M. d. T. y. Comunicaciones, «Estadística - Infraestructura de Transporte - Infraestructura Vial,» Lima, 21 de diciembre de 2022.
- [3] J. V. L. Daronco, L. Festugato, G. D. Miguel y H. C. S. Filho, ««Discussion of “Mechanical Strength Improvement of Cement-Stabilized Soil Using Natural Rubber Latex for Pavement Base Applications”,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 34, n° 1, 2022.
- [4] Ulmen, *Gaia Nanosílice*.
- [5] R. V. Kumar y A. H. Khan, «Experimental study of stabilization of soil using nanosilica,» *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research*, 2024 .
- [6] S. S. Tarun Sharma, «Influence of nanosilica on properties of soil.,» *Journal Materials Today Proceedings*, 2023.
- [7] G. Aksua y T. Eskisar., «The geomechanical properties of soils treated with nanosilica particles.,» *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 15, pp. 954-969, January 2022.
- [8] A. Kalhor, M. Ghazaví y M. Roustaei, «Impacts of Nano-silica on Physical Properties and Shear Strength of Clayey Soil.,» *Arabian Journal for Science and Engineering*, January 2022.
- [9] A. S. Al-Gharbawi, A. M. Najjem y M. Y. Fattah, «Expansive Soil Stabilization with Lime, Cement, and Silica Fume.,» *Journal Applied Sciences*, pp. 1-15, December 2022.
- [10] G. H. Barbhuiya y S. D. Hasan., «Effect of nano-silica on physio-mechanical properties and microstructure of soil: A comprehensive review.,» *Journal Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 217-221., 2021.
- [11] H. Ahmadi y O. Shafiee, «Experimental comparative study on the performance of nano-SiO<sub>2</sub> and microsilica in stabilization of clay,» *The European Physical Journal Plus*, vol. 134, 2019.

- [12] D. K. Verma<sup>1</sup> y D. R. U. Maheshwari, «Efecto de la nanosílice sobre las propiedades geotécnicas del suelo arcilloso.» *Revista Internacional de Ciencia e Investigación (IJSR)*., 2017.
- [13] M. A. Pashabavandpouri y S. Jahangiri, «Efecto de la nanosílice sobre las propiedades de hinchamiento, compactación y resistencia de las arcillas.» *Revista de Medio Ambiente Aplicado*, 2015.
- [14] R. N. d. Edificaciones, NORMA E.020 CARGAS, Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción – SENCICO ed., Lima, 2020.
- [15] M. d. T. y. Comunicaciones, «Manual de Carreteras Suelos geología, geotecnia y pavimentos- Sección de Suelos y Pavimentos,», Lima, 2013.
- [16] M. A. O. Rivera, Suelos. Caracterización e importancia, 1 ed., Lima, 2022.
- [17] M. d. T. y. Comunicaciones, Manual de Ensayo de Materiales, 2016, p. 1269.
- [18] U. Kumar y D. K. Verma, «Efecto de la nanosílice sobre las propiedades geotécnicas del suelo arcilloso.» *Revista Internacional de Ciencia e Investigación (IJSR)*., Diciembre 2017.
- [19] E. J. Badillo y A. R. Rodríguez, «Mecánica de Suelos: Fundamento de Mecánica de Suelos,», L. N. editores, Ed., 2005.
- [20] M. d. C. y. Saneamiento, Norma, CE.020: Suelos y Taludes., Lima: Sencico, 2010.
- [21] D. Jaramillo, «INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DEL SUELO», 2002..
- [22] D. B. M, Fundamentos de ingeniería geotécnica, 4 ed., vol. 4, 2013.
- [23] R. «. T. C. 0. P. URBANOS», « [www.construccion.org/icg@icgmail.org](http://www.construccion.org/icg@icgmail.org),» [En línea].
- [24] M. B. Suárez, ««Metodología de la Investigación Científica para ingenieros»,» 2016.
- [25] U. d. L. P. d. G. Canaria, ««Clasificación del suelo».».
- [26] M. A. Pashabavandpouri y S. Jahangiri, «Efecto de la nanosílice sobre las propiedades de hinchamiento, compactación y resistencia de las arcillas.» *Revista de Medio Ambiente Aplicado y Ciencias Biológicas* , 2015.
- [27] R. M. Mohammadi y M. Niazian, «Investigación del efecto de la nanoarcilla en la geotecnia. propiedades de la arcilla,» *Revista internacional de investigación científica y técnica avanzada*, vol. 3, nº 3, 2013.
- [28] E. Nohani y E. Alimakan, «El efecto de las nanopartículas sobre las propiedades geotécnicas de la arcilla,» *Revista Internacional de Ciencias de la Vida*, Junio 2015.

- [29] S. H. Bahmani, N. Farzadnia, A. Asadi y B. B. Huat, «El efecto del tamaño y el contenido de reemplazo de nanosílice en el desarrollo de resistencia del suelo residual tratado con cemento»,» vol. 118, pp. 294-306, 2016.
- [30] S. H. Bahmani, B. B. Huat, A. Asadi y N. Farzadnia, «Estabilización de suelos residuales mediante nanopartículas de SiO<sub>2</sub> y cemento.,» *Materiales de construcción y construcción* , vol. 64, 2014.
- [31] G. N, J. A, J. M, R. N y S. E. Ghasemi, «Propiedades físicas y geotécnicas de suelos arcillosos tratados con cemento utilizando nanopartículas de sílice: un estudio experimental,» *Revista física europea plus*, vol. 131, nº 5, 20165.

## ANEXOS:



## GAIA Nanosílice

Adicionante de cemento para concretos  
De altas prestaciones

Fecha de Emisión: Mar 10, 05  
Revisión: 14  
Fecha de Revisión: Oct 7, 19  
Página: 1 de 1

Industrias Ulmen S.A. Aditivos para concreto

**Descripción**

GAIA Nanosílice es un primer Adicionante base nanosílice generado durante 2004 por la sinergia Scitech Cognoscible/Ulmen

Pertenece a la línea GAIA NANOSÍLICE, donde las reacciones químicas en el hormigón convierten las nanopartículas de sílice en nanopartículas de cemento

**Aspectos Técnicos**

GAIA Nanosilice elimina el total de la sílice en polvo en cualquiera de sus alternativas, y también los superplastificantes, reduciendo al mínimo los reductores plastificantes.

Con GAIA Nanosílice se obtiene concretos de alto rendimiento: 70 MPa a R28

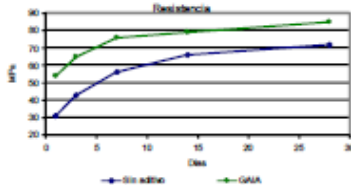
Ideal para concretos tipo "Fast Track", a usar dentro de las 24 horas posteriores al vaciado, con adecuadas dosificaciones, que permiten obtener hormigones impermeables según norma DIN 1048 o Nch 2262

**Propiedades**

Consecuencia de la menor actividad operacional, menor flujo de material con la consiguiente reducción de inventario, y ----- es líquido, amigable con el medio ambiente y la salud de los trabajadores.

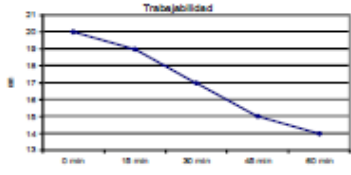
**Duración**

6 meses almacenado en lugar fresco y protegido del sol, recomendado por nuestro Sistema de Control de Calidad, certificado bajo ISO 9001



**Resistencia**

Días	Sin aditivo (MPa)	GAIA (MPa)
0	30	30
5	45	70
10	55	75
15	65	78
20	68	80
25	70	82
30	72	85



**Trabajabilidad**

Días	Trabajabilidad (B)
0 min	20
15 min	19
30 min	18
45 min	16
60 min	14

**Dosis**

Recomendamos dosis de acuerdo a los concretos a elaborar. Lo ideal es contactar el servicio técnico ULMEN para optimizar su uso.

**Presentación**

En cilindro plástico de 220 kg  
En dispenser retornable de 1100 kg

**Propiedades físicas**

Apariencia : Líquido  
Color : Café Claro  
Densidad : 1,03 ± 0,02 g/mL

**Clasificación**

GAIA Nanosilice se clasifica como aditivo tipo F según ASTM C494

Cooperativa las Vertientes, Calle 4, Mz C-1 Sub Lt 2-F Villa El Salvador – Lima  
Teléfonos (01) 719-4126 / 719-4127

[www.cognoscibletechnologies.com](http://www.cognoscibletechnologies.com)    [www.ulmen.cl](http://www.ulmen.cl)    [atencionalcliente@ulmen.cl](mailto:atencionalcliente@ulmen.cl)

Ilustración 1: Ficha técnica de la GAIA Nanosílice – de la empresa Ulmen.

UNIVERSIDAD CATOLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES, SUELOS Y PAVIENTOS



INFORME N° LEM USAT 028-2024-I

FECHA: 24 de mayo 2024

## VALIDACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

**ESTUDIANTE:** Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos

**TITULO DE LA TESIS:** "Estudio práctico de la nano sílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"

El que suscribe, responsable del laboratorio de Ingeniería Civil Ambiental, verifica y da conformidad que los siguientes ensayos de laboratorio realizados por el indicado estudiante se han efectuado en las instalaciones de la USAT, asimismo valida los ensayos realizados fuera de nuestras instalaciones siempre que no se puedan realizar en esta universidad:

- Contenido de humedad
- Granulometría de suelos por tamizado.
- Granulometría de suelos por medio del hidrómetro
- Límites de Atterberg
- Peso volumétrico
- Gravedad específica
- Proctor modificado
- CBR
- Hinchamiento de consolidación
- Ensayo de expansión por Lambe
- Corte directo



TECNICO DE LABORATORIO

*Henry Rivadeneyra Oblitas*  
 Henry Rivadeneyra Oblitas  
 T.c. Laboratorio USAT  
 Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo

Se alcanza al interesado para los fines pertinentes.

Observación: Adjunto

Henry Rivadeneyra Oblitas  
 Responsable de Lab Ing. Civil Ambiental

*Ilustración 2: Validación de ensayos de laboratorio.*



*Ilustración 3: Extracción de la muestra de C-01*



*Ilustración 4: Extracción de la muestra de C-02.*



*Ilustración 5: Extracción de la muestra de C-03*



*Ilustración 6: Extracción de la muestra de C-04*



*Ilustración 7: Extracción de la muestra de C-05*



*Ilustración 8: Muestras de los ensayos de límites con nanosílice.*



*Ilustración 9: Ensayo de Hidrometría.*



*Ilustración 10: Enrasado del Proctor.*



*Ilustración 11: Curado del CBR.*

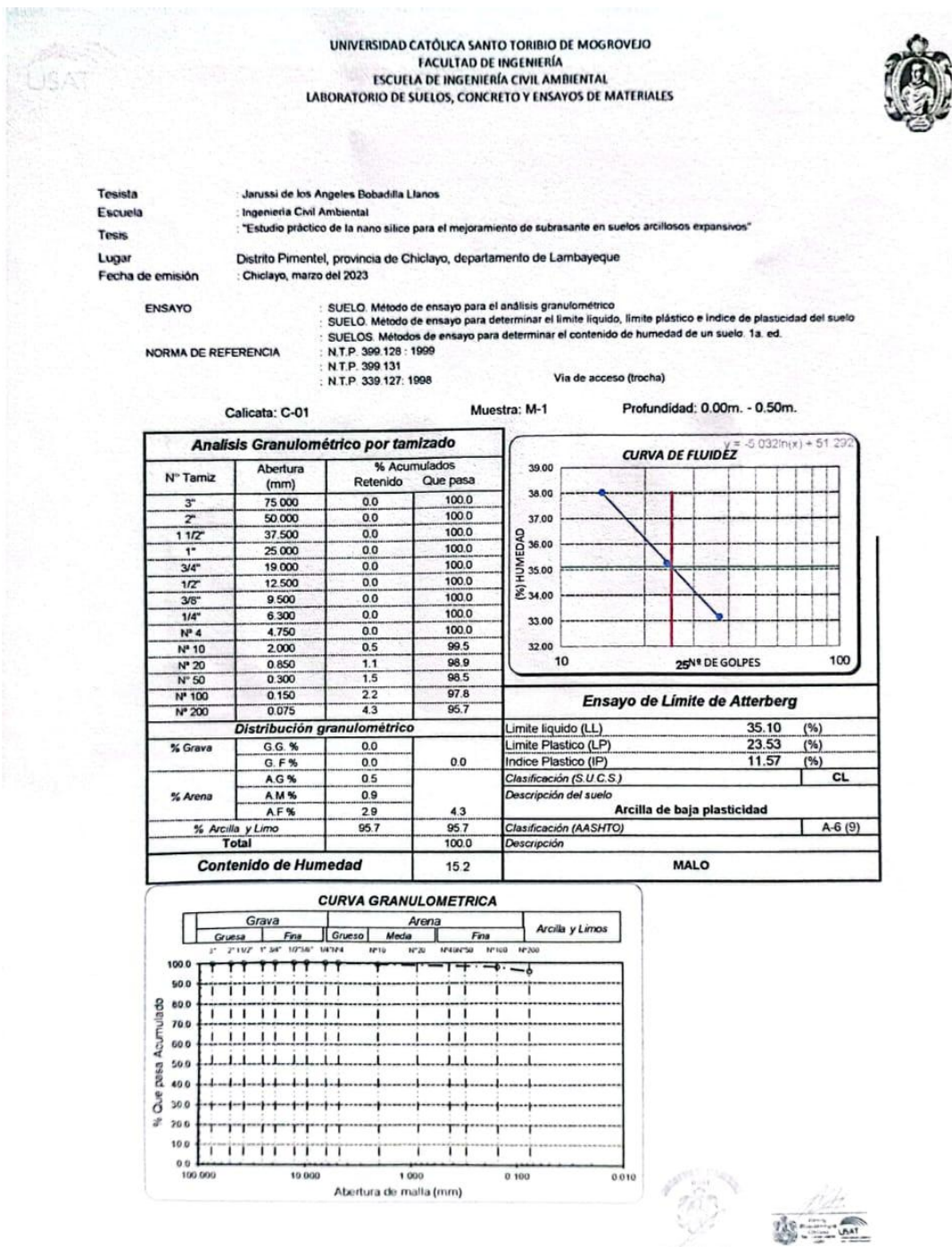


Ilustración 12: Ensayo granulométrico de C-01



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



Solicitante : INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL  
 TESISTA : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 TESIS : Estudio práctico de la nano sílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos  
 Ubicación : Distrito Pimentel, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque  
 ENSAYO : SUELO. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo  
 NORMA DE REFERENCIA : N.T.P. 399.131

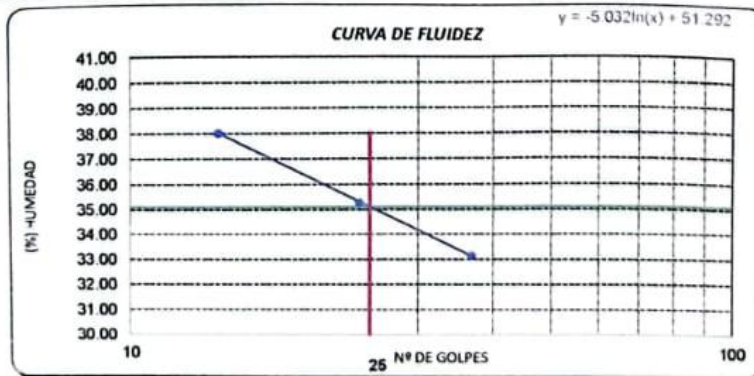
Calicata: C-01

Muestra: M-1

Profundidad: 0.00m. - 0.50m.

Datos de ensayo.	Límite líquido			Límite Plástico
	L-11	L-12	L-18	
N° de tarro				T-7
N° de golpes	37	24	14	
Tarro + suelo húmedo	32.67	40	44.47	29.42
Tarro + suelo seco	29	34.3	38.5	28.1
Agua	3.67	5.7	5.97	1.32
Peso del tarro	17.93	18.13	22.8	22.49
Peso del suelo seco	11.07	16.17	15.7	5.61
Porcentaje de humedad	33.15	35.25	38.03	23.53

CONSISTENCIA FISICA DE LA MUESTRA	
Límite Líquido	35.10
Límite Plástico	23.53
Índice de Plasticidad	11.57



Observaciones:



Ilustración 13: Limite de Atterberg CI muestra natural.



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



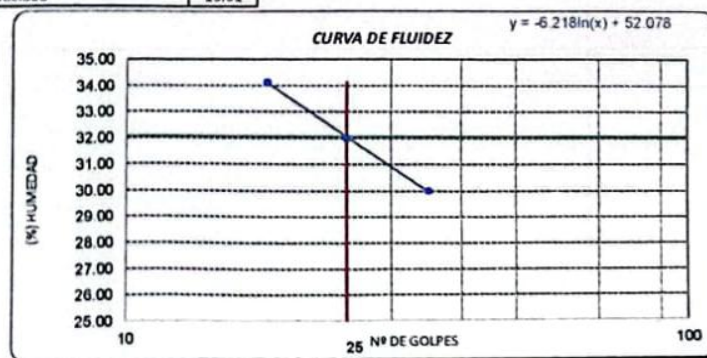
Solicitante : Ingeniería Civil Ambiental  
TESISTA : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
TESIS : " Estudio práctico de la nanosílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque

ENSAYO : SUELO. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo  
NORMA DE REFERENCIA : N.T.P. 399.131

Calicata: C-1 Muestra: M-1 1% NANOSÍLICE Profundidad: 0.00m. - 0.50m.

Datos de ensayo.	Límite líquido			Límite Plástico	
	P-13	R-07	F-02	L-10	
N° de tarro					
N° de golpes	35	25	18		
Tarro + suelo húmedo	30.6	42.6	34	16.9	16.9
Tarro + suelo seco	27.6	38.6	30.82	15.7	15.7
Agua	3	4	3.18	1.2	1.2
Peso del tarro	17.6	26.1	21.5	9.30	9.30
Peso del suelo seco	10	12.5	9.32	6.4	6.4
Porcentaje de humedad	30.00	32.00	34.12	18.75	18.75

CONSISTENCIA FÍSICA DE LA MUESTRA	
Límite Líquido	32.06
Límite Plástico	18.75
Índice de Plasticidad	13.31



Observaciones:



Ilustración 14: Límite de Atterberg CI al 1% de nanosílice.



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



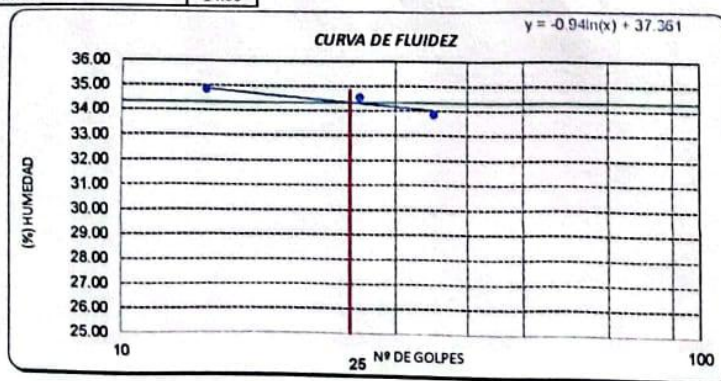
Solicitante : Ingeniería Civil Ambiental  
 TESISTA : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 TESIS : " Estudio práctico de la nanosílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque

ENSAYO : SUELO. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo  
 NORMA DE REFERENCIA : N.T.P. 399.131

Calicata: C1 Muestra: M-1 2% NANOSÍLICE Profundidad: 0.00m. - 0.50m.

Datos de ensayo.	Límite líquido			Límite Plástico	
	P-13	R-07	F-02	L-10	
N° de tarro					
N° de golpes	35	26	14		
Tarro + suelo húmedo	26.88	29.27	31.16	11.46	11.46
Tarro + suelo seco	23.12	24.84	25.91	10.77	10.77
Agua	3.76	4.43	5.25	0.69	0.69
Peso del tarro	12.01	12.02	10.84	7.32	7.32
Peso del suelo seco	11.11	12.82	15.07	3.45	3.45
Porcentaje de humedad	33.84	34.56	34.84	20.00	20.00

CONSISTENCIA FÍSICA DE LA MUESTRA	
Límite Líquido	34.33
Límite Plástico	20.00
Índice de Plasticidad	14.33



Observaciones:



Ilustración 15: Límite de Atterberg C1 al 2% nanosílice



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



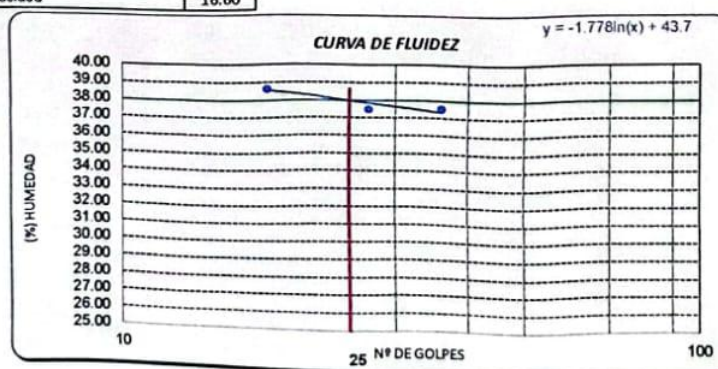
Solicitante : Ingeniería Civil Ambiental  
TESISTA : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
TESIS : " Estudio práctico de la nanosílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque

ENSAYO : SUELO. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo  
NORMA DE REFERENCIA : N.T.P. 399.131

Calicata: C1 Muestra: M-1 3%NANOSILICE Profundidad: 0.00m. - 0.50m.

Datos de ensayo.	Límite líquido			Límite Plástico	
	P-13	R-07	F-02	L-10	
N° de tarro					
N° de golpes	36	27	18		
Tarro + suelo húmedo	32.8	42.86	40.67	31.62	31.62
Tarro + suelo seco	28.75	38.23	35.69	30.66	30.66
Agua	4.05	4.63	4.98	0.96	0.96
Peso del tarro	17.96	25.88	22.8	26.17	26.17
Peso del suelo seco	10.79	12.35	12.89	4.49	4.49
Porcentaje de humedad	37.53	37.49	38.63	21.38	21.38

CONSISTENCIA FISICA DE LA MUESTRA	
Límite Líquido	37.98
Límite Plástico	21.38
Índice de Plasticidad	16.60



Observaciones:



Ilustración 16: Límite de Atterberg C1 al 3% nanosílice



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



Solicitante : Ingeniería Civil Ambiental  
TESISTA : Jarussí de los Angeles Bobadilla Llanos  
TESIS : " Estudio práctico de la nanosílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque

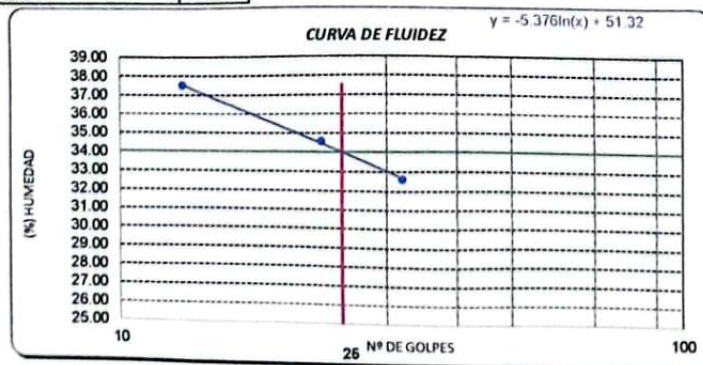
ENSAYO : SUELO. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo

NORMA DE REFERENCIA : N.T.P. 399.131

Calicata: C 1 Muestra: M-1 4%NANOSILICE Profundidad: 0.00m. - 0.50m.

Datos de ensayo.	Límite líquido			Límite Plástico	
	P-13	R-07	F-02	L-10	
N° de tarro	32	23	13		
N° de golpes					
Tarro + suelo húmedo	42.97	43.41	47.12	12.09	12.09
Tarro + suelo seco	39.05	38.7	41.55	11.43	11.43
Agua	3.92	4.71	5.57	0.66	0.66
Peso del tarro	27.03	25.08	26.7	7.27	7.27
Peso del suelo seco	12.02	13.62	14.85	4.16	4.16
Porcentaje de humedad	32.61	34.58	37.51	15.87	15.87


CONSISTENCIA FISICA DE LA MUESTRA	
Límite Líquido	34.01
Límite Plástico	15.87
Índice de Plasticidad	18.15




Observaciones:



Ilustración 17: Límite de Atterberg C1 al 4% nanosílice



**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL**  
**LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES**



Solicitante: INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL  
 TESISISTA: Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 TESIS: "Estudio práctico de la nano sílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación: Distrito Pimentel, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque

ENSAYO: SUELO. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo  
 NORMA DE REFERENCIA: N.T.P. 399.131

Calicata: C-02 Muestra: M-1 Profundidad: 0.00m. - 0.50m.  
 0

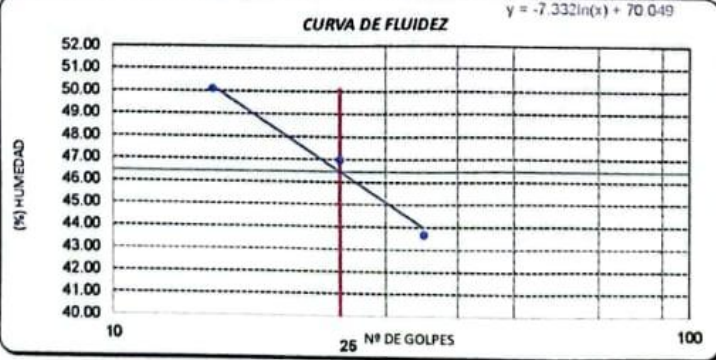
Datos de ensayo.	Límite líquido			Límite Plástico		
	L-11	L-12	L-18	T-7		
N° de tarro						
N° de golpes	35	25	15	<del>X</del>	<del>X</del>	
Tarro + suelo húmedo	28.7	35.27	34.43	23.59		
Tarro + suelo seco	25.39	30.86	28.84	22.65		
Agua	3.31	4.41	5.59	0.94		
Peso del tarro	17.81	21.47	17.68	19.01		
Peso del suelo seco	7.58	9.39	11.16	3.64		
Porcentaje de humedad	43.67	46.96	50.09	25.82		

CONSISTENCIA FISICA DE LA MUESTRA	
Límite Líquido	46.45
Límite Plástico	25.82
Índice de Plasticidad	20.62

**CURVA DE FLUIDEZ**  $y = -7.332 \ln(x) + 70.049$



Observaciones:

Ilustración 18: Limite de Atterberg C2 al natural.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL**  
**LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES**



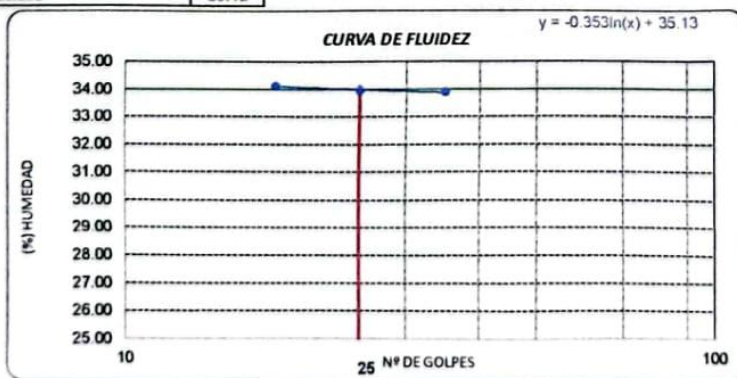
Solicitante : Ingeniería Civil Ambiental  
 TESIS : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 TESIS : " Estudio práctico de la nanosílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque

ENSAYO : SUELO. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo  
 NORMA DE REFERENCIA : N.T.P. 399.131

Calicata: t2 Muestra: M-1 1% NANOSÍLICE Profundidad: 0.00m. - 0.50m.

Datos de ensayo.	Límite líquido			Límite Plástico	
	P-13	R-07	F-02	L-10	
N° de tarro					
N° de golpes	35	25	18		
Tarro + suelo húmedo	31.9	40.5	34	15.3	15.3
Tarro + suelo seco	28.28	36.85	30.82	14.36	14.36
Agua	3.62	3.65	3.18	0.94	0.94
Peso del tarro	17.6	26.1	21.5	9.30	9.30
Peso del suelo seco	10.68	10.75	9.32	5.06	5.06
Porcentaje de humedad	33.90	33.95	34.12	18.58	18.58

CONSISTENCIA FÍSICA DE LA MUESTRA	
Límite Líquido	33.99
Límite Plástico	18.58
Índice de Plasticidad	15.42



Observaciones:



Ilustración 19: Límite de Atterberg C2 al 1% nanosílice



UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL SACRAMENTO DE MOBESEVALE  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENLARGOS DE MATERIALES



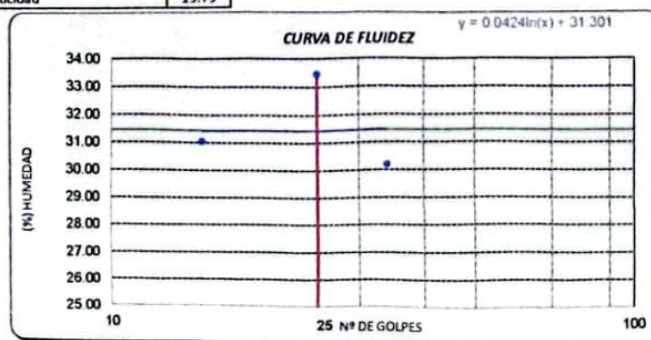
Solicitante : Ingeniería Civil Ambiental  
 TESIS : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 TESIS : " Estudio práctico de la nanosilíce para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque

ENSAYO : SUELO. Método de ensayo para determinar el limite liquido, limite plástico e índice de plasticidad del suelo  
 NORMA DE REFERENCIA : N.T.P. 399.131

Calicata: C2 Muestra: M-1 2% NANOSILICE Profundidad: 0.00m. - 0.50m.

Datos de ensayo.	Limite liquido			Limite Plástico	
	P-13	R-07	F-02	L-10	L-100
N° de tarro					
N° de golpes	34	25	15		
Tarro + suelo húmedo	23.39	18.53	21.36	12.7	12.7
Tarro + suelo seco	19.64	15.72	17.98	11.96	11.96
Agua	3.75	2.81	3.38	0.74	0.74
Peso del tarro	7.22	7.32	7.09	7.23	7.23
Peso del suelo seco	12.42	8.4	10.89	4.73	4.73
Porcentaje de humedad	30.19	33.45	31.04	15.64	15.64

CONSISTENCIA FISICA DE LA MUESTRA	
Limite Liquido	31.44
Limite Plástico	15.64
Índice de Plasticidad	15.79



Observaciones:



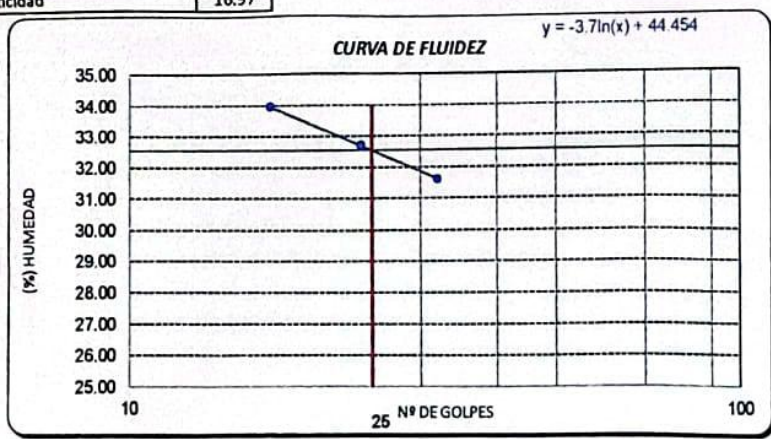
Ilustración 20: Limite de Atterberg C2 al 2% nanosilíce

**TESISTA** : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
**TESIS** : " Estudio práctico de la nanosílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
**Ubicación** : UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
**USAT** : Distrito de Chiclayo, Lambayeque  
**ENSAYO** : ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
**LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES**  
**SUELO** : Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo  
**NORMA DE REFERENCIA** : N.T.P. 399.131

**Calicata:** 12      **Muestra:** M-1      **3% NANOSÍLICE**      **Profundidad:** 0.00m. - 0.50m.

Datos de ensayo.	Límite líquido			Límite Plástico	
	P-13	R-07	F-02	L-10	
Nº de tarro					
Nº de golpes	32	24	17		
Tarro + suelo húmedo	43.93	45.06	32.47	21.6	21.6
Tarro + suelo seco	40.13	40.58	28.7	20.96	20.96
Agua	3.8	4.48	3.77	0.64	0.64
Peso del tarro	28.11	26.89	17.6	16.85	16.85
Peso del suelo seco	12.02	13.69	11.1	4.11	4.11
Porcentaje de humedad	31.61	32.72	33.96	15.57	15.57

CONSISTENCIA FISICA DE LA MUESTRA	
Límite Líquido	32.54
Límite Plástico	15.57
Índice de Plasticidad	16.97



Observaciones:



Ilustración 21: Limite de Atterberg C2 al 3% nanosílice



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



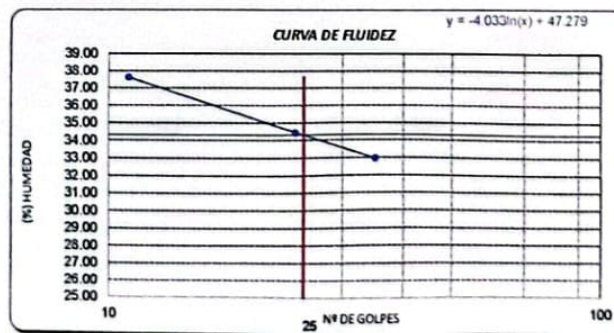
Solicitante : Ingeniería Civil Ambiental  
 TESISISTA : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 TESIS : " Estudio práctico de la nanosílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque

ENSAYO : SUELO. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo  
 NORMA DE REFERENCIA : N.T.P. 399.131

Calicata: 12 Muestra: M-1 4% NANOSÍLICE Profundidad: 0.00m. - 0.50m.

Datos de ensayo.	Límite líquido			Límite Plástico	
Nº de tarro	P-13	R-07	F-02	L-10	
Nº de golpes	35	24	11		
Tarro + suelo húmedo	28.57	31.52	43.59	12.4	12.4
Tarro + suelo seco	24.17	26.53	38.61	11.65	11.65
Agua	4.4	4.99	4.98	0.75	0.75
Peso del tarro	10.82	12.04	25.37	7.29	7.29
Peso del suelo seco	13.35	14.49	13.24	4.36	4.36
Porcentaje de humedad	32.96	34.44	37.61	17.20	17.20

CONSISTENCIA FÍSICA DE LA MUESTRA	
Límite Líquido	34.30
Límite Plástico	17.20
Índice de Plasticidad	17.10



Observaciones:



Ilustración 22: Límite de Atterberg C2 al 4% nanosílice



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESQUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



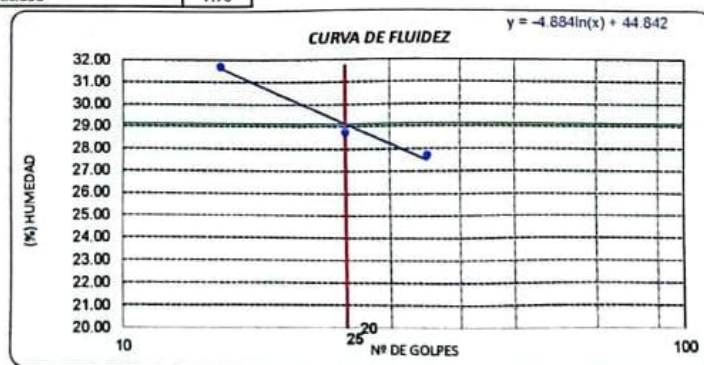
Solicitante : INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL  
 TESIS : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 TESIS : "Estudio práctico de la nano sílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito Pimentel, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque

ENSAYO : SUELO. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo  
 NORMA DE REFERENCIA : N.T.P. 399.131

Calicata: C-03 Muestra: M-1 Profundidad: 0.00m. - 0.50m.  
 0

Datos de ensayo.	Límite líquido			Límite Plástico	
	L-11	L-12	L-18	T-7	
N° de tarro	L-11	L-12	L-18	T-7	
N° de golpes	35	25	15		
Tarro + suelo húmedo	41.54	42.32	42.04	38.15	
Tarro + suelo seco	38.06	38.67	38.18	36.02	
Agua	3.48	3.65	3.86	2.13	
Peso del tarro	25.5	25.97	26	26.04	
Peso del suelo seco	12.56	12.7	12.18	9.98	
Porcentaje de humedad	27.71	28.74	31.69	21.34	

CONSISTENCIA FISICA DE LA MUESTRA	
Límite Líquido	29.12
Límite Plástico	21.34
Índice de Plasticidad	7.78



Observaciones:



Ilustración 23: Límite de Atterberg C3 al natural



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



Solicitante : Ingeniería Civil Ambiental  
 TESIS : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 TESIS : " Estudio práctico de la nanosílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque

ENSAYO : SUELO. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo  
 NORMA DE REFERENCIA : N.T.P. 399.131

Calicata: C-04 Muestra: M-1  
 0

Profundidad: 0.00m. - 0.50m.

Datos de ensayo.	Límite líquido			Límite Plástico	
	P-13	R-07	F-02	L-10	
N° de tarro					
N° de golpes	37	24	14		
Tarro + suelo húmedo	32.67	40	44.47	29.42	29.42
Tarro + suelo seco	29	34.3	38.5	28.1	28.1
Agua	3.67	5.7	5.97	1.32	1.32
Peso del tarro	17.93	18.13	22.8	22.49	22.49
Peso del suelo seco	11.07	16.17	15.7	5.61	5.61
Porcentaje de humedad	33.15	35.25	38.03	23.53	23.53

CONSISTENCIA FISICA DE LA MUESTRA	
Límite Líquido	35.10
Límite Plástico	23.53
Índice de Plasticidad	11.57



Observaciones:



Ilustración 24: Límite de Atterberg C4 a la muestra natural



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



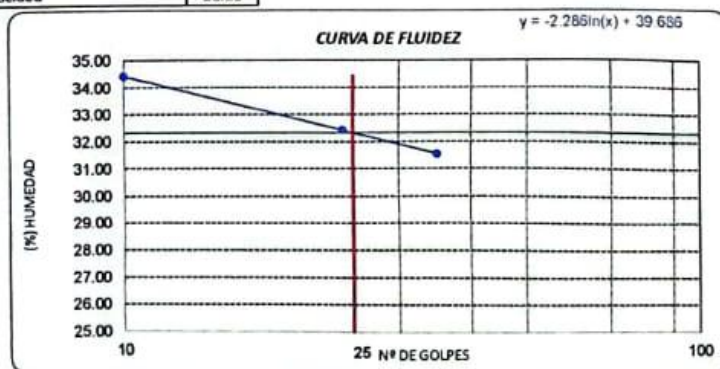
Solicitante Ingeniería Civil Ambiental  
TESISTA : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
TESIS : " Estudio práctico de la nanosílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque

ENSAYO : SUELO. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo  
NORMA DE REFERENCIA : N.T.P. 399.131

Calicata: C-04 Muestra: M-1 1% NANOSÍLICE Profundidad: 0.00m. - 0.50m.  
0

Datos de ensayo.	Límite líquido			Límite Plástico	
	P-13	R-07	F-02	L-10	
N° de tarro					
N° de golpes	35	24	10		
Tarro + suelo húmedo	50	39.8	42	25	25
Tarro + suelo seco	44.22	34.51	35.88	23.52	23.52
Agua	5.78	5.29	6.12	1.48	1.48
Peso del tarro	25.9	18.2	18.1	16.20	16.20
Peso del suelo seco	18.32	16.31	17.78	7.32	7.32
Porcentaje de humedad	31.55	32.43	34.42	20.22	20.22

CONSISTENCIA FÍSICA DE LA MUESTRA	
Límite Líquido	32.33
Límite Plástico	20.22
Índice de Plasticidad	12.11



Observaciones:



Ilustración 25: Límite de Atterberg C4 al 1% nanosílice



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



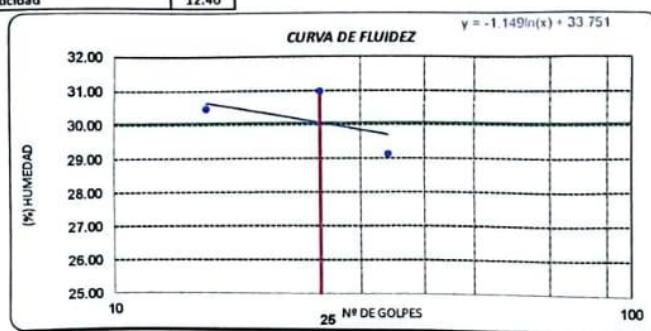
Solicitante Ingeniería Civil Ambiental  
 TESISISTA : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 TESIS : " Estudio práctico de la nanosílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque

ENSAYO : SUELO. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo  
 NORMA DE REFERENCIA : N.T.P. 399.131

Calicata: C-04 Muestra: M-1 2% NANOSÍLICE Profundidad: 0.00m. - 0.50m.  
 0

Datos de ensayo.	Límite líquido			Límite Plástico	
	P-13	R-07	F-02	L-10	
N° de tarro					
N° de golpes	34	25	15		
Tarro + suelo húmedo	31.8	31.3	36.7	13.7	13.7
Tarro + suelo seco	28.62	28.32	32.31	12.74	12.74
Agua	3.18	2.98	4.39	0.96	0.96
Peso del tarro	17.7	18.7	17.9	7.30	7.30
Peso del suelo seco	10.92	9.62	14.41	5.44	5.44
Porcentaje de humedad	29.12	30.98	30.46	17.65	17.65

CONSISTENCIA FÍSICA DE LA MUESTRA	
Límite Líquido	30.05
Límite Plástico	17.65
Índice de Plasticidad	12.40



Observaciones:



Ilustración 26: Límite de Atterberg C4 al 2% nanosílice



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



Solicitante Ingeniería Civil Ambiental  
 TESIS : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 TESIS : " Estudio práctico de la nanosílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque

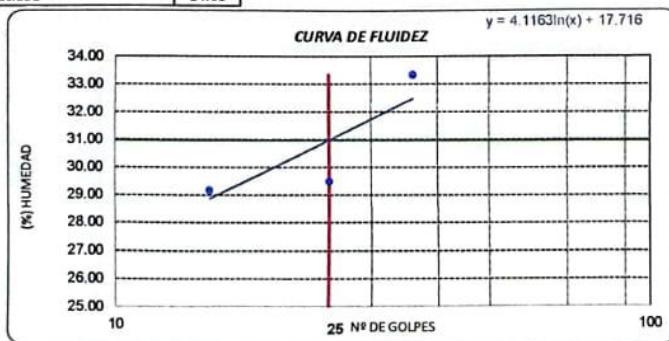
ENSAYO : SUELO. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo

NORMA DE REFERENCIA : N.T.P. 399.131

Calicata: C-04 Muestra: M-1 3% NANOSÍLICE Profundidad: 0.00m. - 0.50m.  
 0

Datos de ensayo.	Límite líquido			Límite Plástico	
	P-13	R-07	F-02	L-10	L-10
N° de tarro	36	25	15		
N° de golpes	34.2	42.2	31.7	11	11
Tarro + suelo húmedo	32.6	37.76	29.69	10.48	10.48
Tarro + suelo seco	1.6	4.44	2.01	0.52	0.52
Peso del tarro	27.8	22.7	22.8	7.30	7.30
Peso del suelo seco	4.8	15.06	6.89	3.18	3.18
Porcentaje de humedad	33.33	29.48	29.17	16.35	16.35

CONSISTENCIA FÍSICA DE LA MUESTRA	
Límite Líquido	30.97
Límite Plástico	16.35
Índice de Plasticidad	14.61



Observaciones:



Ilustración 27: Limite de Atterberg C4 al 3% nanosílice



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



**Solicitante** : Ingeniería Civil Ambiental  
**TESISTA** : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
**TESIS** : " Estudio práctico de la nanosílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
**Ubicación** : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque

**ENSAYO** : SUELO. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo

**NORMA DE REFERENCIA** : N.T.P. 399.131

Calicata: C-04 Muestra: M-1 4% NANOSÍLICE Profundidad: 0.00m. - 0.50m.

Datos de ensayo.	Límite líquido			Límite Plástico	
	P-13	R-07	F-02	L-10	L-10
Nº de tarro					
Nº de golpes	36	25	15		
Tarro + suelo húmedo	19.8	26.8	26.7	11	11
Tarro + suelo seco	16.78	21.9	21.71	10.48	10.48
Agua	3.02	4.9	4.99	0.52	0.52
Peso del tarro	7.7	7.4	7.1	7.40	7.40
Peso del suelo seco	9.08	14.5	14.61	3.08	3.08
Porcentaje de humedad	33.26	33.79	34.15	16.88	16.88

CONSISTENCIA FÍSICA DE LA MUESTRA	
Límite Líquido	33.68
Límite Plástico	16.88
Índice de Plasticidad	16.80



Observaciones:



Ilustración 28: Limite de Atterberg C4 al 4% nanosílice



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



Solicitante: INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL  
 TESIS: "Estudio práctico de la nano sílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación: Distrito Pimentel, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque

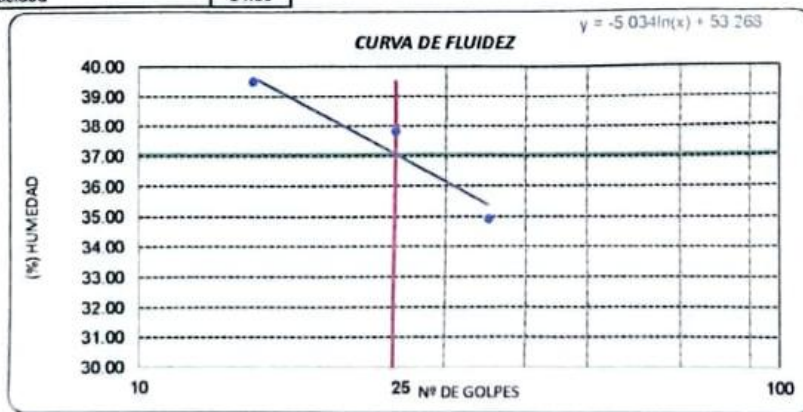
ENSAYO: SUELO. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e Índice de plasticidad del suelo

NORMA DE REFERENCIA: N.T.P. 399.131

Calicata: C-05 Muestra: M-1 Profundidad: 0.00m. - 0.50m.  
 0

Datos de ensayo.	Límite líquido			Límite Plástico	
	L-11	L-12	L-18	T-7	
N° de tarro					
N° de golpes	35	25	15		
Tarro + suelo húmedo	42.47	32.87	39.67	33.58	
Tarro + suelo seco	38.71	28.8	34.92	32.17	
Agua	3.76	4.07	4.75	1.41	
Peso del tarro	27.94	18.04	22.89	25.81	
Peso del suelo seco	10.77	10.76	12.03	6.36	
Porcentaje de humedad	34.91	37.83	39.48	22.17	

CONSISTENCIA FISICA DE LA MUESTRA	
Límite Líquido	37.06
Límite Plástico	22.17
Índice de Plasticidad	14.89



Observaciones:



Ilustración 29: Limite de Atterberg C5 en muestra natural.

## ENSAYO DE EXPANSION



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
 Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nano sílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
 Fecha de emisión : Chiclayo Octubre del 2023

ENSAYO : Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos.  
 REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4546

Calicata : C-1

Muestra : 1% de Nanosílice

Profundidad : -0.60 a -3.00 mts.

ANTES DEL ENSAYO					DESPUES DEL ENSAYO				
Nº ANILLO	:	7	Nº ANILLO	:	4				
PESO ANILLO	:	65.78	PESO ANILLO	:	65.60				
DIAMETRO ANILLO	:	65.6	DIAMETRO ANILLO	:	65.6				
DIAMETRO MUESTRA	:	65.6	DIAMETRO MUESTRA	:	65.6				
ALTURA ANILLO	:	20.6	ALTURA ANILLO	:	21.4				
ALTURA EXTRAIDA	:	17.90	ALTURA EXTRAIDA	:	19.6				
ALTURA MUESTRA	:	2.70	ALTURA MUESTRA	:	1.80				
PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:	237.8	PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:	237.8				
PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:	189.5	PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:	189.50				
CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:	39.04	CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:	38.98				
FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM	FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM
25/05/23	11:20	0.000	0.000	0.0	26/05/23	07:38	0.020	0.741	1188
1'	11:21	0.020	0.741	1	27/05/2023	09:09	0.075	2.778	2719
	11:22	0.030	1.111	2	28/05/2023	07:30	0.145	5.370	4060
	11:23	0.050	1.852	3					
	11:24	0.060	2.222	4					
	11:25	0.090	3.333	5					
2'	11:27	0.130	4.815	7					
	11:29	0.140	5.185	9					
	11:31	0.190	7.037	11					
	11:33	0.210	7.778	13					
4'	11:35	0.240	8.889	15					
	11:39	0.230	8.519	19					
	11:43	0.260	9.630	23					
	11:47	0.350	12.963	27					
8'	11:51	0.400	14.815	31					
	11:55	0.450	16.667	35					
	12:03	0.510	18.889	43					
	12:11	0.620	22.963	51					
	12:19	0.690	25.556	59					
15'	12:27	0.750	27.778	67					
	12:35	0.900	33.333	75					
	12:50	1.100	40.741	90					
	13:05	1.350	50.000	105					
	13:20	1.520	56.296	120					
30'	13:35	1.680	62.222	135					
	13:50	1.830	67.778	150					
	14:20	1.950	72.222	165					
	14:50	2.100	77.778	180					
	15:20								
	15:50								
	16:20								



Ilustración 30: Ensayo de expansión C1 al 1% nanosílice



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES

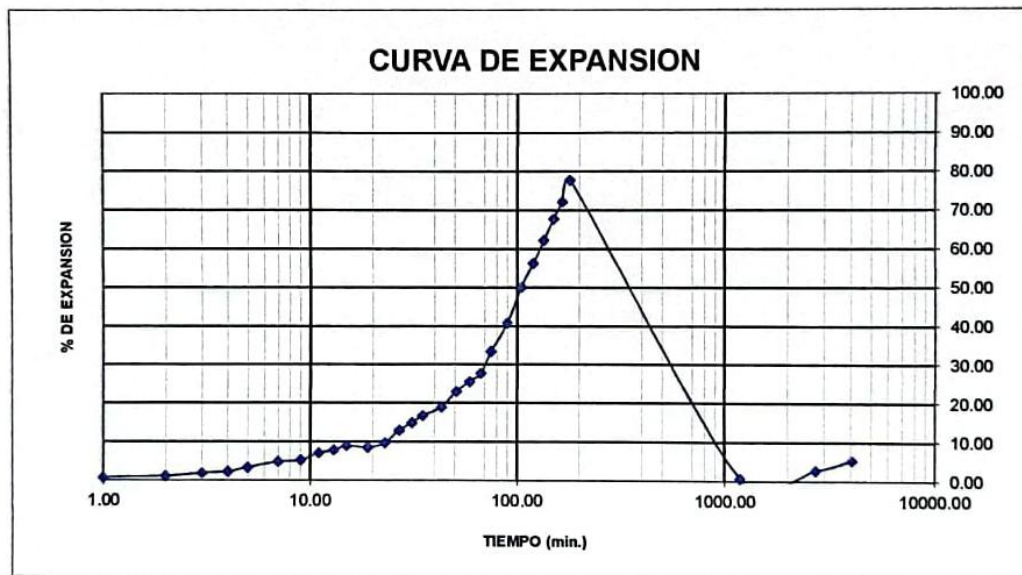


Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
 Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nano sílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"

Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
 Fecha de emisión : Chiclayo Octubre del 2023

ENSAYO : Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos.  
 REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4546

Calicata : C-2  
 Muestra : 1% de Nanocilice  
 Profundidad : -0.90 a -2.00 mts.



**OBSERVACIONES :**

- Muestreo e identificación realizado por el solicitante
- El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del Laboratorio.



*Ilustración 31: Curva de expansión de CI al 1%.*



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
 Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nano sílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
 Fecha de emisión : Chiclayo Octubre del 2023

ENSAYO, : Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos  
 REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4546

Calicata : C-1  
 Muestra : 2% de Nanosilice  
 Profundidad : -0.60 a -3.00 mts.

ANTES DEL ENSAYO					DESPUES DEL ENSAYO				
Nº ANILLO	:	7	Nº ANILLO	:	4				
PESO ANILLO	:	65.60	PESO ANILLO	:	65.60				
DIAMETRO ANILLO	:	65.6	DIAMETRO ANILLO	:	65.6				
DIAMETRO MUESTRA	:	65.6	DIAMETRO MUESTRA	:	65.6				
ALTURA ANILLO	:	20.6	ALTURA ANILLO	:	20.6				
ALTURA EXTRAIDA	:	17.60	ALTURA EXTRAIDA	:	19.5				
ALTURA MUESTRA	:	3.00	ALTURA MUESTRA	:	1.10				
PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:	194.33	PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:	194.33				
PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:	189.14	PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:	189.14				
CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:	4.20	CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:	4.20				
FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM	FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM
25/05/23	11:20	0.000	0.000	0.0	26/05/23	07:38	0.020	0.667	1188
1'	11:21	0.090	3.000	1	27/05/2023	09:09	0.075	2.500	2719
	11:22	0.120	4.000	2	28/05/2023	07:30	0.145	4.833	4060
	11:23	0.140	4.667	3					
	11:24	0.210	7.000	4					
	11:25	0.090	3.000	5					
2'	11:27	0.130	4.333	7					
	11:29	0.140	4.667	9					
	11:31	0.210	7.000	11					
	11:33	0.220	7.333	13					
4'	11:35	0.280	9.333	15					
	11:39	0.310	10.333	19					
	11:43	0.360	12.000	23					
	11:47	0.420	14.000	27					
8'	11:51	0.550	18.333	31					
	11:55	0.680	22.667	35					
	12:03	0.780	26.000	43					
	12:11	0.850	28.333	51					
15'	12:19	0.940	31.333	59					
	12:27	1.050	35.000	67					
	12:35	1.280	42.667	75					
	12:50	1.350	45.000	90					
30'	13:05	1.550	51.667	105					
	13:20	1.680	56.000	120					
	13:35	1.850	61.667	135					
	13:50	2.050	68.333	150					
	14:20	2.240	74.667	165					
	14:50	2.500	83.333	180					
	15:20								
	15:50								
	16:20								



Ilustración 32: Ensayo de expansión de C1 al 2% nanosilice

**INFORME DE ENSAYO N° 1745**

(Pág. 02 de 02)

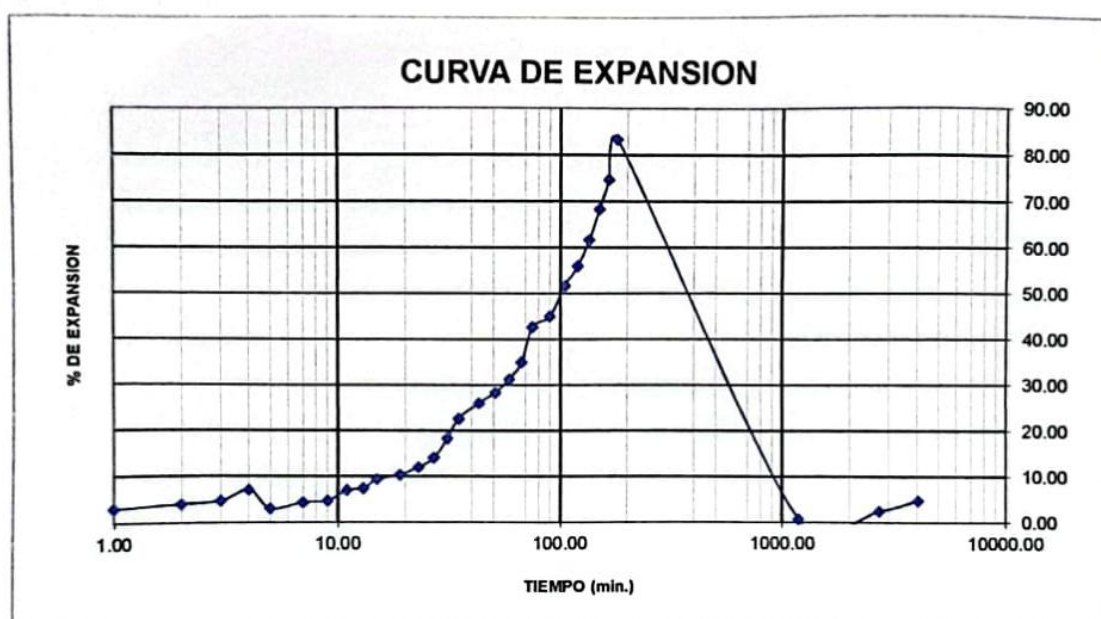
Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
 Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nano sílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
 Fecha de emisión : Chiclayo Octubre del 2023

ENSAYO : Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos  
 REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4548

Calicata : C-4

Muestra : 2% de Nanocilice

Profundidad : -0.90 a -2.00 mts.

**OBSERVACIONES :**

- Muestreo e identificación realizado por el solicitante
- El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del Laboratorio



*Ilustración 33: Curva de expansión de C1 al 2%.*



**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL**  
**LABORATORIO DE SUELOS CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES**



Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
 Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nano sílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
 Fecha de emisión : Chiclayo Octubre del 2023

ENSAYO : Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos  
 REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4546

Calicata : C-1  
 Muestra : 3% de Nanosilice  
 Profundidad : -0.60 a -3.00 mts.

ANTES DEL ENSAYO					DESPUES DEL ENSAYO				
Nº ANILLO	:		7		Nº ANILLO	:		4	
PESO ANILLO	:		121.61		PESO ANILLO	:		121.61	
DIAMETRO ANILLO	:		59.6		DIAMETRO ANILLO	:		59.6	
DIAMETRO MUESTRA	:		59.6		DIAMETRO MUESTRA	:		59.6	
ALTURA ANILLO	:		20.6		ALTURA ANILLO	:		20.6	
ALTURA EXTRAIDA	:		18.85		ALTURA EXTRAIDA	:		19.65	
ALTURA MUESTRA	:		1.75		ALTURA MUESTRA	:		0.95	
PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:		211.27		PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:		211.27	
PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:		198.32		PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:		198.32	
CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:		16.88		CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:		16.88	
FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM	FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM
25/05/23	11:20	0.000	0.000	0.0	26/05/23	07:38	0.020	1.143	1188
1'	11:21	0.090	5.143	1	27/05/2023	09:09	0.075	4.286	2719
	11:22	0.120	6.857	2	28/05/2023	07:30	0.145	8.286	4060
	11:23	0.140	8.000	3					
	11:24	0.210	12.000	4					
	11:25	0.090	5.143	5					
2'	11:27	0.130	7.429	7					
	11:29	0.140	8.000	9					
	11:31	0.210	12.000	11					
	11:33	0.220	12.571	13					
4'	11:35	0.240	13.714	15					
	11:39	0.280	16.000	19					
	11:43	0.300	17.143	23					
	11:47	0.350	20.000	27					
8'	11:51	0.500	28.571	31					
	11:55	0.560	32.000	35					
	12:03	0.750	42.857	43					
	12:11	0.780	44.571	51					
	12:19	0.800	45.714	59					
15'	12:27	0.810	46.286	67					
	12:35	0.860	49.143	75					
	12:50	0.910	52.000	90					
	13:05	0.920	52.571	105					
	13:20	0.940	53.714	120					
30'	13:35	0.980	56.000	135					
	13:50	1.000	57.143	150					
	14:20	1.050	60.000	165					
	14:50	1.100	62.857	180					
	15:20								
15:50									
16:20									



Ilustración 34: Ensayo de expansión de C1 al 3% nanosílice



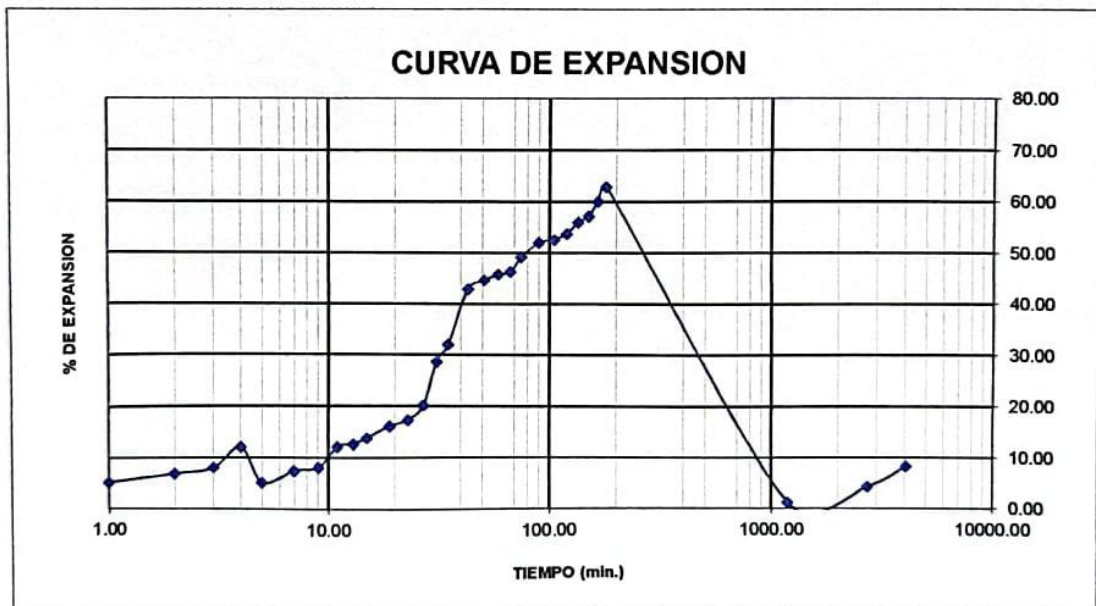
UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
 Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nano sílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
 Fecha de emisión : Chiclayo Octubre del 2023

ENSAYO<sub>1</sub> : Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos  
 REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4546

Calicata : C-1  
 Muestra : 3% de Nanosilice  
 Profundidad : -0.90 a -2.00 mts.



**OBSERVACIONES :**

- Muestreo e identificación realizado por el solicitante
- El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del Laboratorio



*Ilustración 35: Curva de expansión de C1 al 3% nanosilice*



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
 Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nanosílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
 Fecha de emisión : Chiclayo Octubre del 2023

ENSAYO: Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos  
 REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4546

Calicata : C-1

Muestra : 4% de Nanosilice

Profundidad : -0.60 a -3.00 mts.

ANTES DEL ENSAYO					DESPUES DEL ENSAYO				
Nº ANILLO	:	7	Nº ANILLO	:	4				
PESO ANILLO	:	65.78	PESO ANILLO	:	65.78				
DIAMETRO ANILLO	:	65.78	DIAMETRO ANILLO	:	65.78				
DIAMETRO MUESTRA	:	59.6	DIAMETRO MUESTRA	:	59.6				
ALTURA ANILLO	:	20.5	ALTURA ANILLO	:	20.6				
ALTURA EXTRAIDA	:	18.70	ALTURA EXTRAIDA	:	18.8				
ALTURA MUESTRA	:	1.80	ALTURA MUESTRA	:	1.70				
PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:	214.4	PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:	214.4				
PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:	191.96	PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:	191.96				
CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:	17.78	CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:	17.78				
FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM	FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM
25/05/23	11:20	0.000	0.000	0.0	26/05/23	07:38	0.020	1.111	1188
1'	11:21	0.060	3.333	1	27/05/2023	09:09	0.075	4.167	2719
	11:22	0.065	3.611	2	28/05/2023	07:30	0.145	8.056	4060
	11:23	0.070	3.889	3					
	11:24	0.072	4.000	4					
	11:25	0.075	4.167	5					
2'	11:27	0.080	4.444	7					
	11:29	0.086	4.778	9					
	11:31	0.090	5.000	11					
	11:33	0.095	5.278	13					
4'	11:35	0.100	5.556	15					
	11:39	0.110	6.111	19					
	11:43	0.120	6.667	23					
	11:47	0.140	7.778	27					
8'	11:51	0.150	8.333	31					
	11:55	0.250	13.889	35					
	12:03	0.360	20.000	43					
	12:11	0.450	25.000	51					
	12:19	0.500	27.778	59					
15'	12:27	0.600	33.333	67					
	12:35	0.750	41.667	75					
	12:50	0.800	44.444	90					
	13:05	0.860	47.778	105					
	13:20	0.950	52.778	120					
30'	13:35	0.980	54.444	135					
	13:50	1.000	55.556	150					
	14:20	1.100	61.111	165					
	14:50	1.250	69.444	180					
	15:20								
15:50									
16:20									



Ilustración 36: Ensayo de expansión de C1 al 4% nanosílice



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES

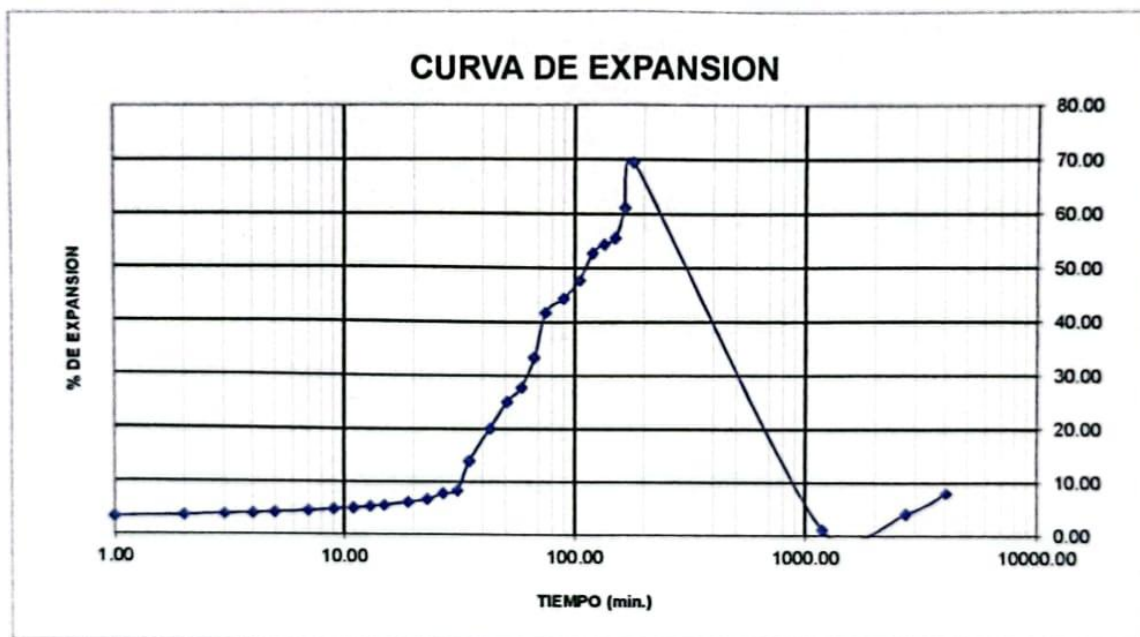


(Pág. 02 de 02)

Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
 Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nanosilice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
 Fecha de emisión : Chiclayo Octubre del 2023

ENSAYO: Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos  
 REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4546

Calicata : C-1  
 Muestra : 4% de Nanosilice  
 Profundidad : -0.90 a -2.00 mts.



OBSERVACIONES :

- Muestreo e identificación realizado por el solicitante
- El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del Laboratorio



Ilustración 37: Curva de expansión de C1 al 4% nanosilice



**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO**  
**FAULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL**  
**LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES**



Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
 Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nano sílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
 Fecha de emisión : Chiclayo Noviembre del 2023

ENSAYO, Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos  
 REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4546  
 Calicata : C-2  
 Muestra : 1% de Nanosílice  
 Profundidad : -0.60 a -3.00 mts.

ANTES DEL ENSAYO					DESPUES DEL ENSAYO				
Nº ANILLO	:			7	Nº ANILLO	:			4
PESO ANILLO	:			65.78	PESO ANILLO	:			65.78
DIAMETRO ANILLO	:			65.6	DIAMETRO ANILLO	:			65.6
DIAMETRO MUESTRA	:			65.6	DIAMETRO MUESTRA	:			65.6
ALTURA ANILLO	:			20.4	ALTURA ANILLO	:			20.4
ALTURA EXTRAIDA	:			17.50	ALTURA EXTRAIDA	:			17.5
ALTURA MUESTRA	:			2.90	ALTURA MUESTRA	:			2.90
PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:			189.37	PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:			189.37
PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:			181.67	PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:			181.67
CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:			6.64	CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:			6.64
FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM	FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM
25/05/23	11:20	0.000	0.000	0.0	26/05/23	07:38	0.020	0.690	1188
1'	11:21	0.010	0.345	1	27/05/2023	09:09	0.075	2.586	2719
	11:22	0.020	0.690	2	28/05/2023	07:30	0.145	5.000	4060
	11:23	0.030	1.034	3					
	11:24	0.035	1.207	4					
	11:25	0.042	1.448	5					
2'	11:27	0.060	2.069	7					
	11:29	0.065	2.241	9					
	11:31	0.070	2.414	11					
	11:33	0.080	2.759	13					
4'	11:35	0.085	2.931	15					
	11:39	0.086	2.966	19					
	11:43	0.090	3.103	23					
	11:47	0.095	3.276	27					
8'	11:51	0.100	3.448	31					
	11:55	0.110	3.793	35					
	12:03	0.120	4.138	43					
	12:11	0.125	4.310	51					
	12:19	0.130	4.483	59					
15'	12:27	0.140	4.828	67					
	12:35	0.152	5.241	75					
	12:50	0.160	5.517	90					
	13:05	0.165	5.690	105					
30'	13:20	0.170	5.862	120					
	13:35	0.650	22.414	135					
	13:50	1.000	34.483	150					
	14:20	1.800	62.069	165					
	14:50	2.220	76.552	180					
	15:20								
	15:50								
	16:20								



*Ilustración 38: Ensayo de expansión de C2 al 1% nanosílice*



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



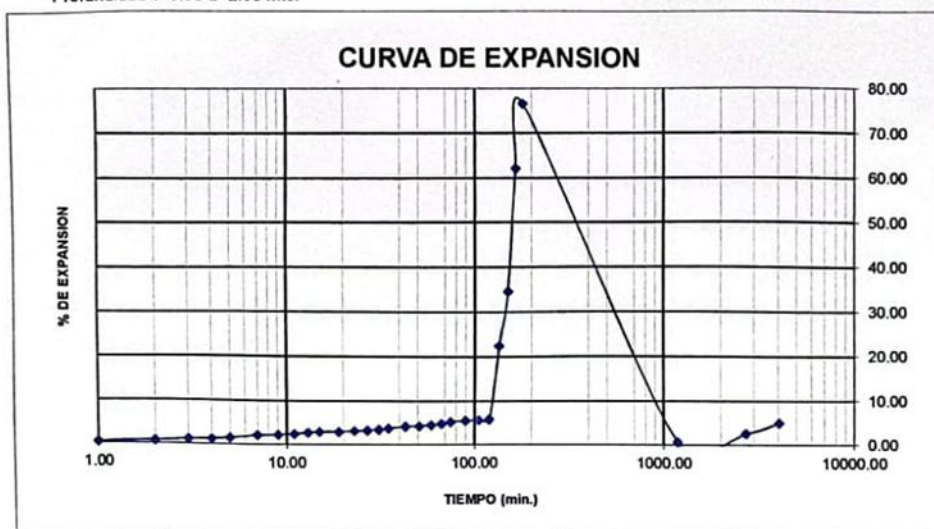
Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
 Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nano sílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"

Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
 Fecha de emisión : Chiclayo Noviembre del 2023

ENSAYO, Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos

REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4546

Calicata : C-2  
 Muestra : 1% de Nanosilice  
 Profundidad : -0.90 a -2.00 mts.



**OBSERVACIONES :**

- Muestreo e identificación realizado por el solicitante
- El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del Laboratorio



*Ilustración 39: Curva de expansión de C2 al 1% nanosílice*



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nanosílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
Fecha de emisión : Chiclayo Noviembre del 2023

ENSAYO, Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos

REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4548

Calicata : C-2

Muestra : 2% de Nanosílice

Profundidad : -0.60 a -3.00 mts.

ANTES DEL ENSAYO					DESPUES DEL ENSAYO				
Nº ANILLO	:			7	Nº ANILLO	:			4
PESO ANILLO	:			65.63	PESO ANILLO	:			65.63
DIAMETRO ANILLO	:			65.6	DIAMETRO ANILLO	:			65.6
DIAMETRO MUESTRA	:			65.6	DIAMETRO MUESTRA	:			65.6
ALTURA ANILLO	:			20.4	ALTURA ANILLO	:			20.4
ALTURA EXTRAIDA	:			17.40	ALTURA EXTRAIDA	:			18.9
ALTURA MUESTRA	:			3.00	ALTURA MUESTRA	:			1.50
PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:			195.3	PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:			195.3
PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:			189.71	PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:			189.71
CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:			4.51	CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:			4.51
FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM	FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM
25/05/23	11:20	0.000	0.000	0.0	26/05/23	07:38	0.020	0.667	1188
1'	11:21	0.010	0.333	1	27/05/2023	09:09	0.075	2.500	2719
	11:22	0.020	0.667	2	28/05/2023	07:30	0.145	4.833	4060
	11:23	0.030	1.000	3					
	11:24	0.035	1.167	4					
	11:25	0.042	1.400	5					
2'	11:27	0.060	2.000	7					
	11:29	0.065	2.167	9					
	11:31	0.070	2.333	11					
	11:33	0.080	2.667	13					
4'	11:35	0.085	2.833	15					
	11:39	0.086	2.867	19					
	11:43	0.090	3.000	23					
	11:47	0.095	3.167	27					
8'	11:51	0.120	4.000	31					
	11:55	0.130	4.333	35					
	12:03	0.150	5.000	43					
	12:11	0.230	7.667	51					
15'	12:19	0.280	9.333	59					
	12:27	0.300	10.000	67					
	12:35	0.320	10.667	75					
	12:50	0.340	11.333	90					
	13:05	0.650	21.667	105					
30'	13:20	0.800	26.667	120					
	13:35	0.650	21.667	135					
	13:50	1.200	40.000	150					
	14:20	2.100	70.000	165					
	14:50	2.500	83.333	180					
	15:20								
	15:50								
	16:20								



Ilustración 40: Ensayo de expansión de C2 al 2% nanosílice



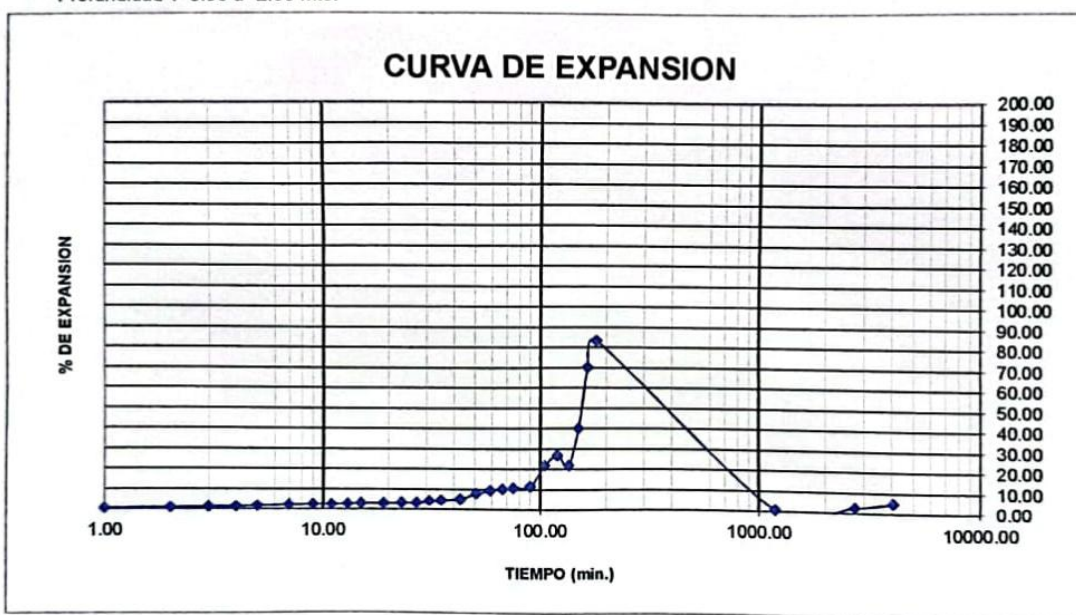
UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



Tesista : Jarussl de los Angeles Bobadilla Llanos  
 Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
 Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nanosilíce para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
 Fecha de emisión : Chiclayo Noviembre del 2023

ENSAYO, Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos  
 REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4546

Calicata : C-2  
 Muestra : 2% de Nanosilíce  
 Profundidad : -0.90 a -2.00 mts.



OBSERVACIONES :

- Muestreo e identificación realizado por el solicitante
- El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del Laboratorio



Ilustración 41: Curva de expansión de C2 al 2% nanosilíce



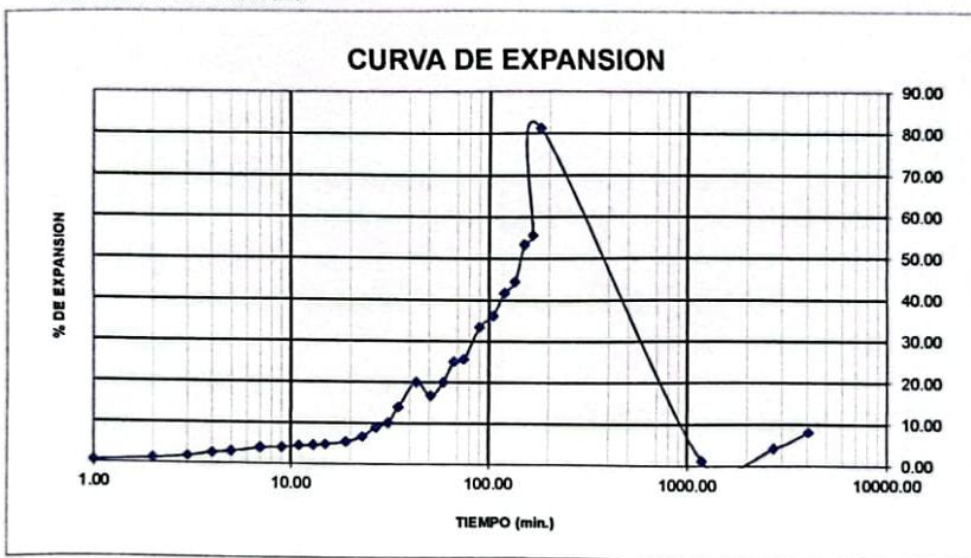
UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



(Pág. 02 de 02)

Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
 Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nanosílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
 Fecha de emisión : Chiclayo Noviembre del 2023

ENSAYO: Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos  
 REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4540  
 Calicata : C-2  
 Muestra : 3% de Nanosílice  
 Profundidad : -0.90 a -2.00 mts.



OBSERVACIONES :  
 - Muestreo e identificación realizado por el solicitante  
 - El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del Laboratorio



Henry  
 Rhodriguez  
 Chiclayo  
 Tel. Laboratorio  
 USAT

Ilustración 42: Curva de expansión de C2 al 3% nanosílice



**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO**  
**FAULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUOLA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL**  
**LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES**



Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
 Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nanosilíce para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
 Fecha de emisión : Chiclayo 31 de Noviembre del 2023

ENSAYO : Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos  
 REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4546

Calicata : C-2

Muestra : 4% de Nanosilíce

Profundidad : -0.60 a -3.00 mts.

ANTES DEL ENSAYO					DESPUES DEL ENSAYO				
Nº ANILLO	:	7	Nº ANILLO	:	4				
PESO ANILLO	:	65.60	PESO ANILLO	:	65.60				
DIAMETRO ANILLO	:	65.6	DIAMETRO ANILLO	:	65.6				
DIAMETRO MUESTRA	:	65.6	DIAMETRO MUESTRA	:	65.6				
ALTURA ANILLO	:	21.4	ALTURA ANILLO	:	21.4				
ALTURA EXTRAIDA	:	19.50	ALTURA EXTRAIDA	:	19.6				
ALTURA MUESTRA	:	1.90	ALTURA MUESTRA	:	1.80				
PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:	197	PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:	197				
PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:	188.6	PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:	188.60				
CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:	6.83	CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:	6.83				

FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM	FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM
25/05/23	11:20	0.000	0.000	0.0	26/05/23	07:38	0.020	1.053	1188
1'	11:21	0.020	1.053	1	27/05/2023	09:09	0.075	3.947	2719
	11:22	0.030	1.579	2	28/05/2023	07:30	0.145	7.632	4060
	11:23	0.045	2.368	3					
	11:24	0.050	2.632	4					
	11:25	0.075	3.947	5					
2'	11:27	0.080	4.211	7					
	11:29	0.085	4.474	9					
	11:31	0.090	4.737	11					
	11:33	0.095	5.000	13					
4'	11:35	0.100	5.263	15					
	11:39	0.110	5.789	19					
	11:43	0.130	6.842	23					
	11:47	0.150	7.895	27					
8'	11:51	0.160	8.421	31					
	11:55	0.170	8.947	35					
	12:03	0.180	9.474	43					
	12:11	0.210	11.053	51					
15'	12:19	0.220	11.579	59					
	12:27	0.230	12.105	67					
	12:35	0.240	12.632	75					
	12:50	0.270	14.211	90					
30'	13:05	0.280	14.737	105					
	13:20	0.310	16.316	120					
	13:35	0.340	17.895	135					
	13:50	0.650	34.211	150					
30'	14:20	0.900	47.368	165					
	14:50	1.500	78.947	180					
	15:20								
	15:50								
16:20									



*Ilustración 43: Ensayo de expansión de C2 al 4% nanosilíce*



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES

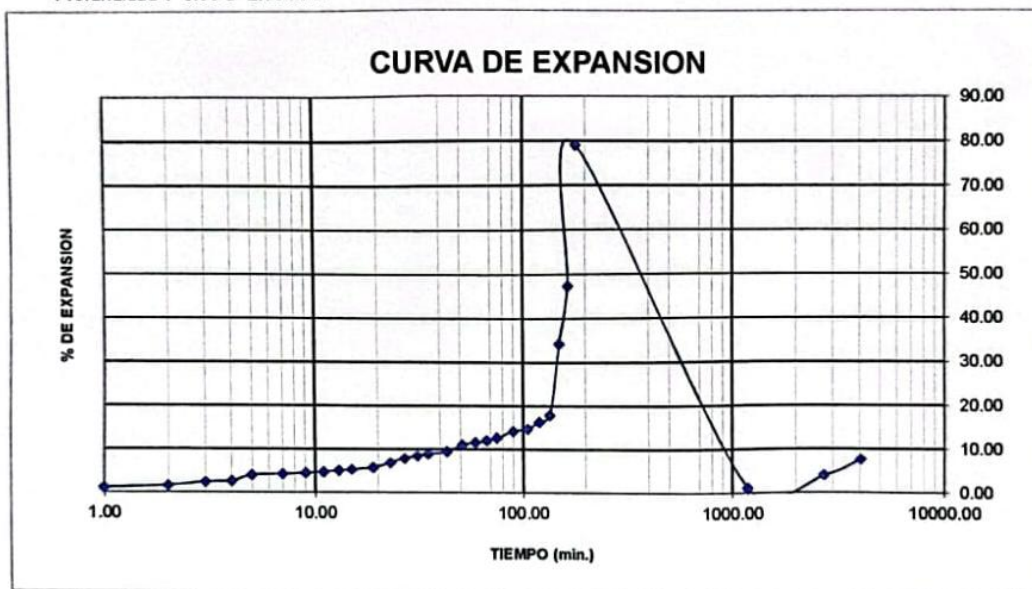


(Pág. 02 de 02)

Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
 Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nanoslice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"

Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
 Fecha de emisión : Chiclayo 31 de Noviembre del 2023

ENSAYO<sub>1</sub> : Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos  
 REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4548  
 Calicata : C-2  
 Muestra : 4% de Nanoslice  
 Profundidad : -0.90 a -2.00 mts.



OBSERVACIONES :

- Muestreo e identificación realizado por el solicitante
- El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del Laboratorio



Ilustración 44: Curva de expansión de C2 al 4% nanoslice



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
Proyecto/Tesis : "Estudio práctico de la nanosilíce para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
Fecha de emisión : Chiclayo 31 de Mayo del 2023  
ENSAYO<sub>1</sub> : Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos  
REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4546  
Calicata : C-4  
Muestra : M-1  
Profundidad : -0.60 a -3.00 mts.

ANTES DEL ENSAYO					DESPUES DEL ENSAYO				
Nº ANILLO	:	7			Nº ANILLO	:	4		
PESO ANILLO	:	44.32			PESO ANILLO	:	44.32		
DIAMETRO ANILLO	:	58.4			DIAMETRO ANILLO	:	58.4		
DIAMETRO MUESTRA	:	58.4			DIAMETRO MUESTRA	:	58.4		
ALTURA ANILLO	:	22.2			ALTURA ANILLO	:	22.2		
ALTURA EXTRAIDA	:	15.00			ALTURA EXTRAIDA	:	15		
ALTURA MUESTRA	:	7.20			ALTURA MUESTRA	:	1.19		
PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:	81.21			PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:	93.91		
PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:	76.96			PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:	76.96		
CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:	13.02			CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:	51.93		
FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM	FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM
31/05/23	11:20	0.000	0.000	0.0	01/06/23	08:38	3.200	44.444	1248
1'	11:21	0.040	0.556	1	2/06/2023	08:09	3.350	46.528	2659
	11:22	0.072	1.000	2	3/06/2023	08:30	3.800	52.778	4120
	11:23	0.091	1.264	3					
	11:24	0.105	1.458	4					
	11:25	0.119	1.653	5					
2'	11:27	0.135	1.875	7					
	11:29	0.193	2.681	9					
	11:31	0.224	3.111	11					
4'	11:33	0.278	3.861	13					
	11:35	0.325	4.514	15					
	11:39	0.492	6.833	19					
	11:43	0.561	7.792	23					
8'	11:47	0.632	8.778	27					
	11:51	0.725	10.069	31					
	11:55	0.915	12.708	35					
15'	12:03	1.252	17.389	43					
	12:11	1.415	19.653	51					
	12:19	1.604	22.278	59					
	12:27	1.735	24.097	67					
30'	12:35	1.812	25.167	75					
	12:50	1.958	27.194	90					
	13:05	2.034	28.250	105					
	13:20	2.105	29.236	120					
	13:35	2.169	30.125	135					
30'	13:50	2.287	31.764	150					
	14:20	2.325	32.292	165					
	14:50	2.387	33.153	180					
	15:20								
	15:50								
	16:20								

*Ilustración 45: Ensayo de expansión de C4 a la muestra natural*



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



(Pág. 01 de 02)

Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
 Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nanosilice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
 Fecha de emisión : Chiclayo Diciembre del 2023

ENSAYO : Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos

REFERENCIA : NTP 339.170 2001 ASTM D - 4546

Calicata : C-4

Muestra : 1% de Nanosilice

Profundidad : -0.60 a -3.00 mts.

ANTES DEL ENSAYO					DESPUES DEL ENSAYO				
Nº ANILLO	:		7		Nº ANILLO	:		4	
PESO ANILLO	:		65.60		PESO ANILLO	:		65.60	
DIAMETRO ANILLO	:		62.5		DIAMETRO ANILLO	:		62.5	
DIAMETRO MUESTRA	:		62.5		DIAMETRO MUESTRA	:		62.5	
ALTURA ANILLO	:		20.0		ALTURA ANILLO	:		20.0	
ALTURA EXTRAIDA	:		17.80		ALTURA EXTRAIDA	:		19	
ALTURA MUESTRA	:		2.20		ALTURA MUESTRA	:		2.00	
PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:		192.39		PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:		192.39	
PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:		176		PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:		176.00	
CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:		14.85		CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:		14.85	
FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM	FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM
25/05/23	11:20	0.000	0.000	0.0	26/05/23	07:38	0.020	0.909	1188
1'	11:21	0.020	0.909	1	27/05/2023	09:09	0.075	3.409	2719
	11:22	0.035	1.591	2	28/05/2023	07:30	0.145	6.591	4060
	11:23	0.070	3.182	3					
	11:24	0.075	3.409	4					
	11:25	0.080	3.636	5					
2'	11:27	0.085	3.864	7					
	11:29	0.090	4.091	9					
	11:31	0.095	4.318	11					
	11:33	0.100	4.545	13					
4'	11:35	0.105	4.773	15					
	11:39	0.115	5.227	19					
	11:43	0.125	5.682	23					
	11:47	0.136	6.182	27					
	11:51	0.250	11.364	31					
8'	11:55	0.326	14.818	35					
	12:03	0.420	19.091	43					
	12:11	0.560	25.455	51					
	12:19	0.685	31.136	59					
	12:27	0.950	43.182	67					
15'	12:35	0.975	44.318	75					
	12:50	1.000	45.455	90					
	13:05	1.050	47.727	105					
	13:20	1.136	51.636	120					
	13:35	1.196	54.364	135					
30'	13:50	1.240	56.364	150					
	14:20	1.360	61.818	165					
	14:50	1.500	68.182	180					
	15:20								
	15:50								
	16:20								



*Ilustración 46: Ensayo de expansión de C4 al 1% nanosilice*



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



(Pág. 02 de 02)

Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nanosílíce para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"

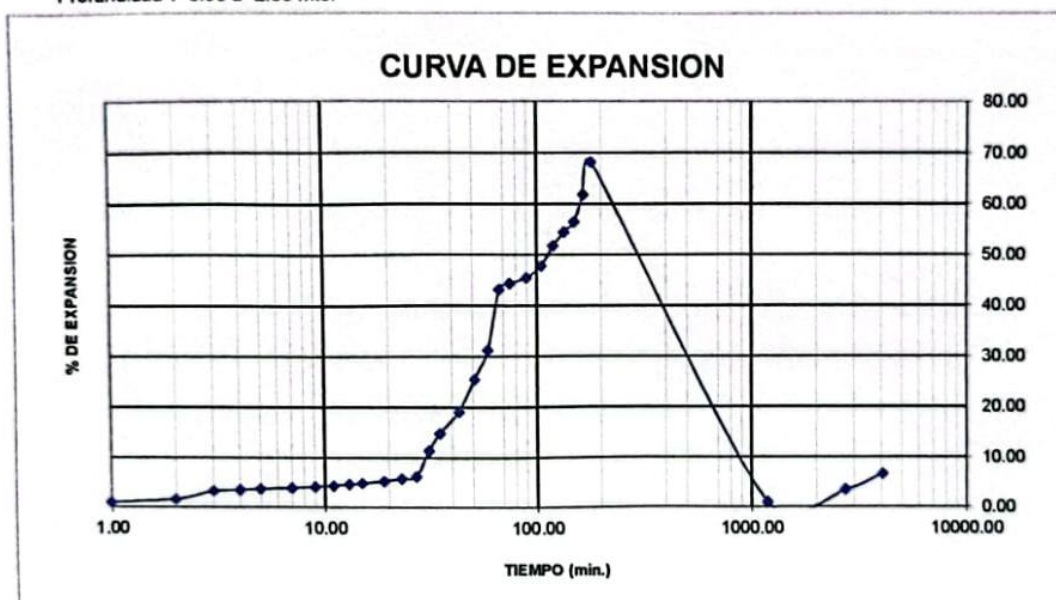
Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
Fecha de emisión : Chiclayo Diciembre del 2023

ENSAYO : Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos  
REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4546

Calicata : C-4

Muestra : 1% de nanosílíce

Profundidad : -0.90 a -2.00 mts.



**OBSERVACIONES :**

- Muestreo e identificación realizado por el solicitante
- El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del Laboratorio



*Ilustración 47: Curva de expansión de C4 al 1% nanosílíce*



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



(Pág. 01 de 02)

Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nanosilice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
Fecha de emisión : Chiclayo Diciembre del 2023

ENSAYO, Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos  
REFERENCIA : NTP 339 170 2001 ASTM D - 4548

Calicata : C-4

Muestra : 2% de Nanosilice

Profundidad : -0.60 a -3.00 mts.

ANTES DEL ENSAYO					DESPUES DEL ENSAYO				
Nº ANILLO	:	7	Nº ANILLO	:	4				
PESO ANILLO	:	121.61	PESO ANILLO	:	121.61				
DIAMETRO ANILLO	:	50.9	DIAMETRO ANILLO	:	50.9				
DIAMETRO MUESTRA	:	50.9	DIAMETRO MUESTRA	:	50.9				
ALTURA ANILLO	:	21.7	ALTURA ANILLO	:	21.7				
ALTURA EXTRAIDA	:	19.50	ALTURA EXTRAIDA	:	17.5				
ALTURA MUESTRA	:	2.20	ALTURA MUESTRA	:	4.20				
PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:	214.39	PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:	214.39				
PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:	195.63	PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:	195.63				
CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:	25.34	CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:	25.34				
FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM	FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM
25/05/23	11:20	0.000	0.000	0.0	26/05/23	07:38	0.020	0.909	1188
1'	11:21	0.031	1.409	1	27/05/2023	09:09	0.075	3.409	2719
	11:22	0.050	2.273	2	28/05/2023	07:30	0.145	6.591	4060
	11:23	0.090	4.091	3					
	11:24	0.160	7.273	4					
	11:25	0.180	8.182	5					
2'	11:27	0.200	9.091	7					
	11:29	0.250	11.364	9					
	11:31	0.310	14.091	11					
	11:33	0.320	14.545	13					
4'	11:35	0.350	15.909	15					
	11:39	0.340	15.455	19					
	11:43	0.350	15.909	23					
	11:47	0.360	16.364	27					
8'	11:51	0.370	16.818	31					
	11:55	0.380	17.273	35					
	12:03	0.390	17.727	43					
	12:11	0.395	17.955	51					
	12:19	0.398	18.091	59					
15'	12:27	0.400	18.182	67					
	12:35	0.410	18.636	75					
	12:50	0.420	19.091	90					
	13:05	0.430	19.545	105					
30'	13:20	0.450	20.455	120					
	13:35	0.500	22.727	135					
	13:50	0.560	25.455	150					
	14:20	1.600	72.727	165					
30'	14:50	1.700	77.273	180					
	15:20								
	15:50								
	16:20								



Ilustración 48: Ensayo de expansión de C4 al 2% nanosilice



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES

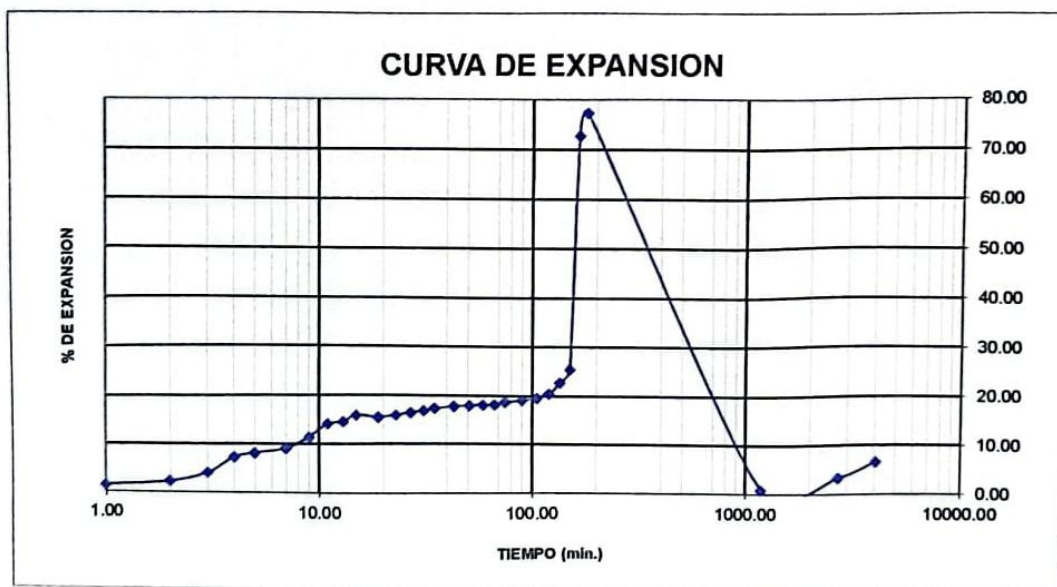


Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
 Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nanosílice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"

Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
 Fecha de emisión : Chiclayo Diciembre del 2023

ENSAYO, Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos  
 REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4548

Calicata : C-4  
 Muestra : 2% de nanosílice  
 Profundidad : -0.90 a -2.00 mts.



**OBSERVACIONES :**

- Muestreo e identificación realizado por el solicitante
- El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del Laboratorio



*Ilustración 49: Curva de expansión de C4 al 2% nanosílice*



UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nanosilice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
Fecha de emisión : Chiclayo Diciembre del 2023

ENSAYO : Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos  
REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4546

Calicata : C-4  
Muestra : 3% de Nanosilice  
Profundidad : -0.60 a -3.00 mts.

ANTES DEL ENSAYO					DESPUES DEL ENSAYO				
Nº ANILLO	:		7		Nº ANILLO	:		4	
PESO ANILLO	:		65.60		PESO ANILLO	:		121.61	
DIAMETRO ANILLO	:		63		DIAMETRO ANILLO	:		50.9	
DIAMETRO MUESTRA	:		63		DIAMETRO MUESTRA	:		50.9	
ALTURA ANILLO	:		20.0		ALTURA ANILLO	:		21.7	
ALTURA EXTRAIDA	:		18.80		ALTURA EXTRAIDA	:		17.5	
ALTURA MUESTRA	:		1.20		ALTURA MUESTRA	:		4.20	
PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:		194.26		PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:		209.83	
PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:		190.8		PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:		192.00	
CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:		2.76		CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:		25.33	
FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM	FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM
25/05/23	11:20	0.000	0.000	0.0	26/05/23	07:38	0.020	1.667	1188
1'	11:21	0.030	2.500	1	27/05/2023	09:09	0.075	6.250	2719
	11:22	0.035	2.917	2	28/05/2023	07:30	0.145	12.083	4060
	11:23	0.036	3.000	3					
	11:24	0.040	3.333	4					
	11:25	0.045	3.750	5					
2'	11:27	0.053	4.417	7					
	11:29	0.058	4.833	9					
	11:31	0.060	5.000	11					
	11:33	0.095	7.917	13					
4'	11:35	0.100	8.333	15					
	11:39	0.120	10.000	19					
	11:43	0.158	13.167	23					
	11:47	0.250	20.833	27					
8'	11:51	0.300	25.000	31					
	11:55	0.310	25.833	35					
	12:03	0.320	26.667	43					
	12:11	0.360	30.000	51					
	12:19	0.390	32.500	59					
15'	12:27	0.410	34.167	67					
	12:35	0.420	35.000	75					
	12:50	0.430	35.833	90					
	13:05	0.450	37.500	105					
	13:20	0.520	43.333	120					
30'	13:35	0.580	48.333	135					
	13:50	0.650	54.167	150					
	14:20	0.780	65.000	165					
	14:50	0.850	70.833	180					
	15:20								
15:50									
16:20									





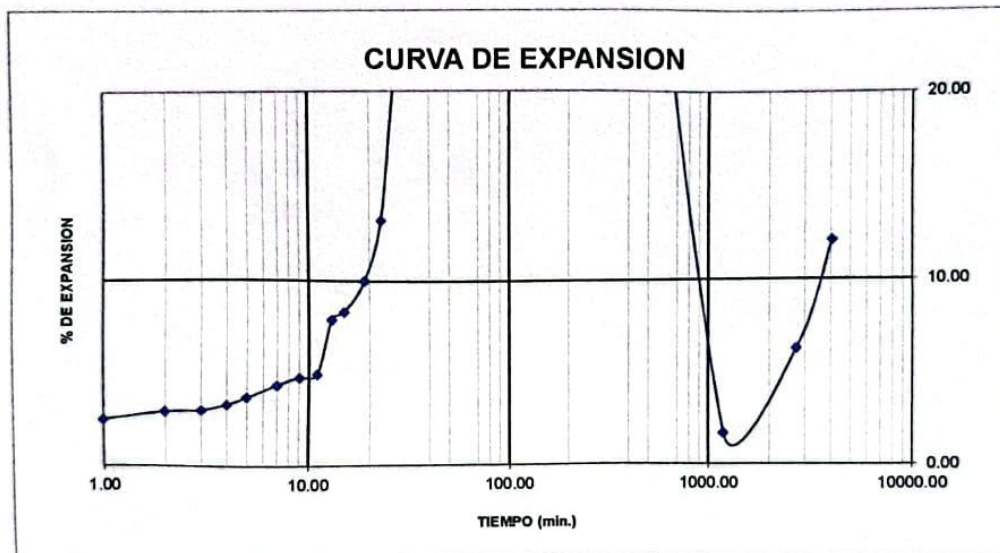
UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOCROVEJO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nanoslice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
Fecha de emisión : Chiclayo Diciembre del 2023

ENSAYO: : Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos  
REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4540

Calicata : C-4  
Muestra : 3% de nanoslice  
Profundidad : -0.90 a -2.00 mts.



**OBSERVACIONES :**

- Muestreo e identificación realizado por el solicitante
- El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del Laboratorio





UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
 Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nanosilice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
 Fecha de emisión : Chiclayo Diciembre del 2023

ENSAYO, Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos  
 REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4546

Calicata : C-4  
 Muestra : 2% de Nanosilice  
 Profundidad : -0.60 a -3.00 mts.

ANTES DEL ENSAYO					DESPUES DEL ENSAYO				
Nº ANILLO	:	7	Nº ANILLO	:	4				
PESO ANILLO	:	121.61	PESO ANILLO	:	121.61				
DIAMETRO ANILLO	:	65.6	DIAMETRO ANILLO	:	50.9				
DIAMETRO MUESTRA	:	65.6	DIAMETRO MUESTRA	:	50.9				
ALTURA ANILLO	:	21.6	ALTURA ANILLO	:	21.7				
ALTURA EXTRAIDA	:	18.70	ALTURA EXTRAIDA	:	17.5				
ALTURA MUESTRA	:	2.90	ALTURA MUESTRA	:	4.20				
PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:	214.83	PESO MUESTRA NAT. + PESO ANILLO	:	209.83				
PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:	214.29	PESO MUESTRA SECA + PESO ANILLO	:	192.00				
CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:	0.58	CONTENIDO DE HUMEDAD, %	:	25.33				

FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM	FECHA	HORA	LECTURA	% EXP.	T. ACUM
25/05/23	11:20	0.000	0.000	0.0	26/05/23	07:38	0.020	0.690	1188
1'	11:21	0.010	0.345	1	27/05/2023	09:09	0.075	2.586	2719
	11:22	0.020	0.690	2	28/05/2023	07:30	0.145	5.000	4060
	11:23	0.030	1.034	3					
	11:24	0.035	1.207	4					
	11:25	0.042	1.448	5					
2'	11:27	0.060	2.069	7					
	11:29	0.065	2.241	9					
	11:31	0.070	2.414	11					
	11:33	0.075	2.586	13					
4'	11:35	0.080	2.759	15					
	11:39	0.084	2.897	19					
	11:43	0.085	2.931	23					
	11:47	0.090	3.103	27					
8'	11:51	0.100	3.448	31					
	11:55	0.120	4.138	35					
	12:03	0.130	4.483	43					
	12:11	0.145	5.000	51					
15'	12:19	0.150	5.172	59					
	12:27	0.200	6.897	67					
	12:35	0.240	8.276	75					
	12:50	0.280	9.655	90					
30'	13:05	0.300	10.345	105					
	13:20	0.320	11.034	120					
	13:35	0.750	25.862	135					
	13:50	0.960	33.103	150					
	14:20	1.000	34.483	165					
	14:50	1.100	37.931	180					
	15:20								
	15:50								
	16:20								





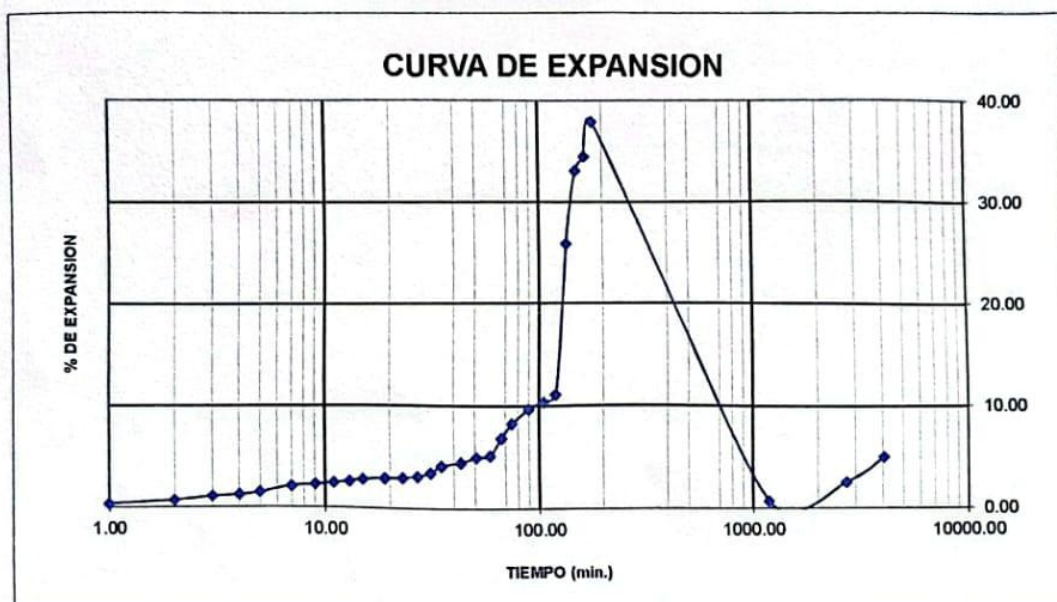
UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL  
 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y ENSAYOS DE MATERIALES



Tesista : Jarussi de los Angeles Bobadilla Llanos  
 Escuela : Ingeniería Civil Ambiental  
 Proyecto/Tesis : " Estudio práctico de la nanosilice para el mejoramiento de subrasante en suelos arcillosos"  
 Ubicación : Distrito de Chiclayo, Lambayeque, Lambayeque  
 Fecha de emisión : Chiclayo Diciembre del 2023

ENSAYO, Métodos de ensayo normalizados para la determinación del hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos  
 REFERENCIA : NTP 339.170.2001 ASTM D - 4548

Calicata : C-4  
 Muestra : 4% de nanosilice  
 Profundidad : -0.90 a -2.00 mts.



**OBSERVACIONES :**

- Muestreo e identificación realizado por el solicitante
- El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del Laboratorio

