

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



**Análisis comparativo de la estabilización de suelos arcillosos entre el polvo  
de piedra de canto rodado y la cal**

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

**AUTOR**

**Cesar Anibal Bravo Corrales**

**ASESOR**

**Carlos Javier Ramirez Muñoz**

<https://orcid.org/0000-0002-9322-688X>

**Chiclayo, 2025**

**Análisis comparativo de la estabilización de suelos arcillosos entre  
el polvo de piedra de canto rodado y la cal**

PRESENTADA POR  
**Cesar Anibal Bravo Corrales**

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

**INGENIERO CIVIL**

APROBADA POR

Luis Quiñones Quiroz  
PRESIDENTE

Angel Alberto Lorren Palomino  
SECRETARIO

Carlos Javier Ramirez Muñoz  
VOCAL

## **Dedicatoria**

Esta Tesis dedicada con todo mi amor y gratitud a mis padres , pilares fundamentales de mi vida , cuya apoyo incondicional y amor me han impulsado siempre a seguir adelante .A mi hermano, por estar siempre brindándome su ayuda que de verdad lo valoro muchísimo , y a mis hermanas, por ser parte esencial de mi vida y compartir conmigo este camino y a mi abuelita que está en el cielo que sé que siempre nos está cuidando .Me siento profundamente honrado y feliz de tenerlos a todos , y este éxito es para ustedes , con todo mi corazón.

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento, a mi asesor, el Ing. Javier Muñoz, por su inigualable compromiso y calidez en su guía e consejos constantes durante el desarrollo de esta tesis, sin duda contar con su apoyo ha sido una de las mejores experiencias de esta etapa académica. Así mismo, extendiendo mi gratitud a mi primo Imer, su disposición y ayuda en brindarme el material fueron esenciales para avanzar y culminar este trabajo. Muchas gracias.

## Análisis Comparativo de la estabilización de suelos arcillosos entre el polvo de piedra de canto rodado y la cal

### INFORME DE ORIGINALIDAD

<b>16%</b>	<b>16%</b>	<b>2%</b>	<b>4%</b>
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

### FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>tesis.usat.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>7%</b>
<b>2</b>	<b>hdl.handle.net</b> Fuente de Internet	<b>4%</b>
<b>3</b>	<b>Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez</b> Trabajo del estudiante	<b>&lt;1%</b>
<b>4</b>	<b>repositorio.undac.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>5</b>	<b>qdoc.tips</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>6</b>	<b>repositorio.ucv.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>7</b>	<b>repositorio.upla.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>8</b>	<b>www.repositorio.unach.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>

## ÍNDICE

<b>Resumen.....</b>	<b>10</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>11</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>12</b>
<b>Revisión de Literatura.....</b>	<b>15</b>
<b>Materiales y métodos.....</b>	<b>36</b>
<b>Resultados y discusión.....</b>	<b>63</b>
<b>Conclusiones .....</b>	<b>92</b>
<b>Recomendaciones.....</b>	<b>93</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>101</b>

## Lista de Tablas

Tabla I Clasificación por grado de expansión.....	21
Tabla II Método de (Holtz y Gibbs).....	22
Tabla III Grados de Expansión .....	22
Tabla IV Clasificación de suelos.....	23
Tabla V Sistema unificado de suelos.....	24
Tabla VI Normas de Calidad [32].....	26
Tabla VII Categoría de subrasante [21].....	26
Tabla VIII Tamaño de las partículas .....	32
<i>Tabla IX Abertura según el tamiz [27].....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla X Resumen de antecedente CBR [10].....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla XI Resumen de antecedente CBR [24] .....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla XII Resumen de antecedente CBR [2] .....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla XIII Resumen de antecedente CBR.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla XIV Cuadro Resumen de CBR.....</i>	<i>40</i>
Tabla XV Número de puntos de investigación [26].....	40
<i>Tabla XVI Cantidad de muestras por calicata.....</i>	<i>44</i>
Tabla XVII Ensayos a realizar .....	45
<i>Tabla XVIII Cantidad de suelo por calicata.....</i>	<i>45</i>
Tabla XIX Indicadores de ensayos.....	47
Tabla XX Recolección de datos.....	47
<i>Tabla XXI Coordenadas .....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla XXII Componentes Químicos .....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla XXIII Contenido de humedad del suelo natural.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla XXIV Granulometría por Tamizado en suelo natural .....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla XXV Peso Especifico del suelo natural .....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla XXVI Límites de Atterberg .....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla XXVII Rangos de Plasticidad [44].....</i>	<i>68</i>

<i>Tabla XXVIII Ensayo de Proctor Modificado en suelo natural</i> .....	69
<i>Tabla XXIX Ensayo de CBR del suelo natural</i> .....	70
<i>Tabla XXX Resumen de ensayos de suelo natural</i> .....	70
<i>Tabla XXXI Límites de Atterberg con Adición C-01</i> .....	71
<i>Tabla XXXII Límites de Atterberg con Adición C-02</i> .....	72
<i>Tabla XXXIII Límites de Atterberg con Adición C-03</i> .....	73
<i>Tabla XXXIV Proctor Modificado con adición C-01</i> .....	74
<i>Tabla XXXV Proctor Modificado con adición C-02</i> .....	75
<i>Tabla XXXVI Proctor Modificado con adición C-03</i> .....	76
<i>Tabla XXXVII Capacidad de soporte (CBR) Polvo de piedra C-01</i> .....	77
<i>Tabla XXXVIII Capacidad de soporte (CBR) Polvo de piedra C-02</i> .....	77
<i>Tabla XXXIX Capacidad de soporte (CBR) Polvo de piedra C-03</i> .....	78
<i>Tabla XL Límites de Atterberg con Adición Cal C-01</i> .....	79
<i>Tabla XLI Límites de Atterberg con Adición Cal C-02</i> .....	79
<i>Tabla XLII Límites de Atterberg con Adición Cal C-03</i> .....	80
<i>Tabla XLIII Proctor Modificado con adición Cal C-01</i> .....	82
<i>Tabla XLIV Proctor Modificado con adición Cal C-02</i> .....	83
<i>Tabla XLV Proctor Modificado con adición Cal C-03</i> .....	83
<i>Tabla XLVI Capacidad de Soporte Cal C-01</i> .....	85
<i>Tabla XLVII Capacidad de Soporte Cal C-02</i> .....	85
<i>Tabla XLVIII Capacidad de Soporte Cal C-03</i> .....	86
<i>Tabla XLIX Análisis de Costos con polvo de piedra</i> .....	87
<i>Tabla L Análisis de Costo Unitario Cal</i> .....	88
<i>Tabla LI Numero de Golpes (Natural)</i> .....	89
<i>Tabla LII Numero de golpes (Polvo de piedra Canto rodado)</i> .....	89
<i>Tabla LIII Numero de Golpes Cal</i> .....	89
<i>Tabla LIV Grado de Compactación</i> .....	90

## Lista de figuras

<b>Fig. 1.</b> Diagrama de la estructura de (a) caolinita, (b) ilita, (c) montmorillonita [15] .....	19
<b>Fig. 2.</b> Clasificación de cambio potencial de volumen [8] .....	20
<b>Fig. 3</b> Influencia de la carga [31] .....	25
<b>Fig. 4</b> Proceso de selección [21] .....	29
<b>Fig. 5</b> Clasificación de desechos [Aceros Arequipa] .....	31
<b>Fig. 6</b> Área de estudio.....	41
<b>Fig. 7</b> C-01 .....	41
<b>Fig. 8</b> C-02 .....	42
<b>Fig. 9</b> C-03 .....	42
<b>Fig. 10.</b> Usos de suelo [44] .....	43
<b>Fig. 11.</b> Esquema de Recolección de datos.....	46
<b>Fig. 12</b> Ubicación de Calicatas .....	49
<b>Fig. 13</b> Calicata 2 .....	50
<b>Fig. 14</b> Calicata 1 .....	50
<b>Fig. 15</b> Calicata 3 .....	50
<b>Fig. 16</b> Análisis Granulométrico por Tamizado .....	54
<b>Fig. 17.</b> Clasificación Granulométrico por Tamizado.....	55
<b>Fig. 18</b> Análisis de suelo por Hidrometría.....	55
<b>Fig. 19</b> Ensayo de Contenido de humedad .....	56
<b>Fig. 20.</b> Muestras al horno .....	56
<b>Fig. 21.</b> Ensayos de Limites de Atterberg .....	56
<b>Fig. 22.</b> Ensayo de Gravedad Especifica .....	57
<b>Fig. 23.</b> Ensayo Proctor Modificado .....	58
<b>Fig. 24.</b> Ensayo de CBR .....	58
<b>Fig. 25</b> CBR CAL y Polvo de Piedra .....	59
<b>Fig. 26.</b> Modelo S2-PICOFOX .....	59

<b>Fig. 27</b> Ensayo DCP 1 .....	60
<b>Fig. 28</b> Ensayo DCP 2 .....	60
<b>Fig. 29</b> Ensayo Cono de arena 1 .....	61
<b>Fig. 30</b> Cono de arena 2.....	61
<b>Fig. 31.</b> Ubicación Geográfica.....	62
<b>Fig. 32.</b> Planta Trituradora.....	62
<b>Fig. 33.</b> Recolección del Polvo de piedra .....	63
<b>Fig. 34</b> Curva granulométrica .....	65
<b>Fig. 35</b> Análisis Granulométrico por Hidrometría .....	66
<b>Fig. 36</b> Limites en estado natural .....	67
<b>Fig. 37</b> Proctor Modificado de suelo natural .....	68
<b>Fig. 38</b> CBR% Muestras Naturales .....	69
<b>Fig. 39</b> Limites de Atterberg con Adición C-01 .....	72
<b>Fig. 40</b> Limites de Atterberg con Adición C-02 .....	72
<b>Fig. 41</b> Limites de Atterberg con Adición C-03 .....	73
<b>Fig. 42</b> Proctor Modificado con Adiciones.....	74
<b>Fig. 43</b> Proctor Modificado de Adiciones C-02.....	75
<b>Fig. 44</b> Proctor Modificado de Adiciones C-03.....	76
<b>Fig. 45</b> Limites de Atterberg con Adición C-01 .....	79
<b>Fig. 46</b> Limites de Atterberg con Adición C-02 .....	80
<b>Fig. 47</b> Limites de Atterberg con Adición C-03 .....	81
<b>Fig. 48</b> Proctor Modificado de Adiciones C-01.....	82
<b>Fig. 49</b> Proctor Modificado de Adiciones C-02.....	83
<b>Fig. 50</b> Proctor Modificado de Adiciones C-03.....	84

## Resumen

En esta investigación tiene como finalidad comparar la efectividad del uso de la cal y el polvo de piedra de canto rodado como estabilizadores de la subrasante para suelos arcillosos. Para ello, se realizaron ensayos de laboratorio evaluando en los porcentajes de 0%,20% ,30% y40% de ambos aditivos.

Además, se buscó determinar si el polvo de piedra muestra rendimientos similares a los de la cal. Se analizaron las propiedades físico-mecánicas del suelo con respecto al polvo de piedra a través de diferentes ensayos. En los resultados obtenidos, los límites de Atterberg mostraron un índice de plasticidad IP de 18.31 ,17.46,15.68 para los diferentes porcentajes de aditivo.

Respecto al Proctor modificado, los valores fueron de 1.77,1.98 y2.02 y el CBR presento valores de 7.2%,8.9% y 11.04%.Por otro lado , al evaluar la cal , los valores de IP en los límites de Atterberg fueron 17.65 , 14.75 y 12.73 , mientras que en el ensayo de Proctor Modificado los valores fueron de 1.88 ,1.90 y 1.94 , con un CBR de 21.6% ,24.82% y 36.3%.Estos resultados indican que tanto el polvo de piedra como la cal ofrecen un rendimiento optimo en la estabilización de la subrasante siendo la cal más efectiva , como lo evidencia los valores del CBR

**Palabras clave:** Suelo arcilloso, Polvo de piedra de canto rodado, cal, subrasante.

### **Abstract**

The present research aims to compare the effectiveness of the use of lime and pebble stone powder as subgrade stabilizers for clayey soils. For this purpose, laboratory tests were carried out evaluating the percentages of 0%, 20%, 30% and 40% of both additives. In addition, it was sought to determine if the stone dust shows similar performances to those of lime.

The physical-mechanical properties of the soil were analyzed with respect to the stone dust through different tests. In the results obtained, the Atterberg limits showed a plasticity index IP of 18.31 ,17.46,15.68 for the different percentages of additive. As for the Modified Proctor test, the values were 1.77,1.98 and 2.02 and the CBR presented values of 7.2%,8.9% and 11.04%. On the other hand, when evaluating the lime, the values of IP in the Atterberg limits were 17.65, 14.75 and 12.73, while in the Modified Proctor test the values were 1.88 ,1.90 and 1.94 , with a CBR of 21.6% ,24.82% and 36.3%.

These results indicate that both stone dust and lime offer optimum performance in subgrade stabilization with lime being more effective, as evidenced by the CBR values.

**Keywords:** Clay soil, boulder stone dust, lime, subgrade.

## Introducción

En el ámbito de la construcción, los suelos arcillosos presentan un desafío considerable por sus cualidades mecánicas y su reacción ante la humedad. Estos suelos representan una amenaza para la estabilizada de varias estructuras, principalmente debido a la presencia del mineral arcilloso conocido como "Montmorillonita", el cual tiene la capacidad de expandirse y contraerse [1]. Esta característica del suelo puede provocar movimientos no deseados que afectan la integridad de las estructuras construidas sobre él, lo que puede resultar en daños significativos. Este tipo de suelo representan un costo significativo para los gobiernos en todo el mundo. En Australia, se descubrieron suelos expansivos en la ciudad de Adelaida, y los daños resultantes afectaron a aproximadamente 600,00 personas. En Canadá, debido a la amplia variedad de climas y estructuras geológicas, existen muchos problemas de cimentación y este tipo de suelo ha afectado gravemente las infraestructuras. En India, el suelo expansivo conocido como "suelo de algodón negro" cubre aproximadamente 200,000 millas cuadradas de tierra y ha afectado seriamente la infraestructura de la región [2]. En el contexto Nacional según la plataforma del estado peruano en el año 2022 se ha destinado 253 millones de soles para el mantenimiento de vías, una cifra de considerable envergadura. Es importante destacar que este gasto podría reducirse si se implementara una gestión eficiente en la estabilización del suelo. Así mismo los pavimentos que han sido construidos sobre subrasantes de suelo de baja resistencia y rigidez esto contribuye significativamente a la degradación ambiental. Esto se debe a que dichos pavimentos requieren ser diseñados con capas más gruesas, lo que a su vez esto con lleva un aumento en los niveles de consumo de recursos naturales, como betún asfáltico, cemento y agregados [3].

Por tal razón reemplazar la totalidad de la masa de suelo resulta inviable cuanto este es débil. Tal acción no solo sería sumamente laboriosa, sino también económicamente ineficiente. Por tales razones es importante realizar una estabilización de suelo que implica la introducción de ciertos materiales, con el único fin de mejorar una o más de sus características [4].

En nuestro País se suele utilizar comúnmente el tratamiento químico, donde el cemento y la cal ha sido el enfoque principal de uso. No obstante, la producción costosa y los potenciales riesgos ambientales asociados con estos productos químicos son preocupantes [5].

El cemento es el responsable de alrededor del 5% y 7% de las emisiones Co2 [6]. Por esta razón y lo anteriormente mencionadas, se recomienda subproductos de fabricación para realizar un reemplazo a estos materiales en la estabilización de suelos arcillosos [7].

Teniendo cuenta que la zona Lambayeque se encuentra en el norte del Perú y destaca por poseer suelos arcillosos son muy sensible a las variaciones en su contenido de humedad; sin embargo, para poder mejorar el rendimiento de estos suelos; será necesario aplicar métodos para estabilizarlos y así hacer frente a los problemas que aparecen en función de su comportamiento, el MTC (2018) enfatiza la necesidad de estabilizar suelos; de ahí la importancia de aplicar métodos aptos para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos.

Para abordar este problema desafío, es fundamental considerar el uso de aditivos que sea eficientes. En este contexto, la cal y el polvo de piedra emergen como opciones destacadas. La cal que mejora las características naturales del suelo siendo usado comúnmente y también el polvo de piedra que, siendo un subproducto de las canteras, destaca también por su capacidad como estabilizante [2]. Además, su uso implica la reutilización de un material que, de otro modo, sería considerado como residuo. Así mismo conforme a la investigación se pretende evaluar en la Cantera denominada Guayabo donde se lleva a cabo la extracción de agregados del río Cumbil y el proceso de trituración de roca. En esta cantera, se extrae aproximadamente  $30\text{m}^3$  de agregados  $3/4$ ,  $40\text{m}^3$  de agregados  $1/2$  y  $15\text{m}^3$  confitillo estas cantidades se extraen en 8 horas de trabajo por día de lunes a sábado. Así mismo durante todo el proceso de la trituración se genera aproximadamente  $2\text{m}^3$  aproximadamente de este polvo de piedra, en total al año se generaría alrededor de  $624\text{m}^3$  de dicho material. Según los operarios y también la visita realizada a la chancadora nos menciona que dicha máquina producto de la trituración genera desechos en forma de polvo que se va acumulando en un área específica, dicho material no tiene un fin de uso y por lo tanto se investigara para que dicho subproducto represente una oportunidad para su aprovechamiento y pueda emplearse en algunas actividades como la estabilización de suelos.

Lo expuesto previamente nos lleva a cuestionar si la incorporación de cal o polvo de piedra es muy distinta, tanto en el rendimiento económico como en la mejora de las propiedades físico-mecánicas del suelo. Es posible que cualquiera de los estabilizantes produzca características diferentes y que de esta forma los resultados. Si se comprueba que el polvo de piedra es eficaz, mejorará las propiedades físico-mecánicas de los suelos arcillosos al mismo tiempo representa viabilidad tanto que involucra lo económico y sostenible con el medio ambiente. Recapitulando lo mencionado anteriormente, se plantea la siguiente pregunta: ¿Puede utilizarse el polvo de piedra canto rodado como estabilizante de un suelo arcilloso en reemplazo de la cal?. Además, se planteó como hipótesis; El polvo de piedra canto rodado es un estabilizante con un rendimiento similar a la de la cal. En ese sentido, se formuló como **objetivo general**; Comparar la efectividad del uso de la cal y el polvo de piedra de canto rodado como estabilizadores a nivel subrasante para suelos arcillosos. De este modo, también se formularon los siguientes **objetivos**

**específicos;** Analizar su estructura mineralógica de la piedra canto rodado que se obtendrá el polvo para la investigación ;Determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso en estado natural mediante un pozo exploratorio; Determinar las propiedades físico-mecánicas del suelo de la subrasante al añadir polvo de piedra canto rodado en diferentes concentraciones, específicamente en 0% ,20% ,30% y 40% en peso del suelo seco; Determinar las propiedades físico-mecánicas del suelo de la subrasante al añadir Cal en diferentes concentraciones, específicamente en 0% ,20% ,30% y 40% en peso del suelo seco; Evaluar la viabilidad económica de la incorporación de polvo de piedra canto rodado y Cal como método alternativo para estabilizar la subrasante; Realizar un tramo de prueba utilizando la proporción con mayor capacidad de soporte CBR.

La justificación de esta investigación se enfoca en 4 formas claves: técnico, social, económica y ambiental, esto enriquecerá ya que se enfatiza nuevos estabilizantes proponiendo nuevas alternativas que de alguna forma ayuda a mostrar nuevos horizontes con respecto a los aditivos empleados.

Según su justificación técnica, la utilización de polvo de piedra de canto rodado se plantea como una alternativa viable sobre todo para mejorar la estabilidad de los suelos arcillosos Al mezclar estos suelos con el polvo de piedra, se busca mejorar propiedades físico-mecánicas, reduciendo los problemas de deformación y a la vez darle un buen al residuo generado por las chancadoras de piedras.

Según su justificación social, dicha investigación va a permitir una reutilización de este residuo generado por las chancadoras, contribuyendo así a reducir las molestias que estos residuos causan en las comunidades cercanas. Al emplear este material en la estabilización, se reduce la dispersión de partículas en el aire. Además, mitiga un impacto negativo en terrenos agrícolas cercanos, donde la acumulación puede afectar la calidad y fertilidad del suelo.

Según su justificación económica, dado que este material es un subproducto de las chancadoras de piedra, su uso resulta rentable, ya que disminuye la necesidad de adquirir materiales adicionales más costosos. Así mismo esto se alinea con los principios de la economía circular del país, promoviendo la reutilización de recursos locales y reduciendo la generación de desechos.

Según su justificación ambiental, al ser un producto residual de la actividad de las chancadoras y que de no ser utilizadas pueden representar problemas en el entorno sobre todo acumulación y disposición inadecuada, lo cual afectaría negativamente al suelo, al aire e incluso al agua. Al emplear este material como estabilizante se contribuye en reducir dichas contaminaciones en el ambiente.

## Revisión de Literatura

### Antecedentes

#### Antecedentes Internacional

Salah Yaseen Mohammed [2] realizó un estudio en el que empleó polvo de cantera como estabilizador del suelo en proporciones del 10%, 20% y 30% en peso. Los resultados mostraron una disminución en el contenido óptimo de agua y un incremento gradual en la densidad seca del suelo. Es relevante mencionar que la resistencia a la compresión disminuyó con la adición del 10%, pero aumentó con la incorporación del 20% y 30%. En general, el autor observó que, al incrementar la cantidad de polvo de cantera, la densidad seca máxima se elevaba significativamente, resultando en un incremento general de la resistencia a la compresión.

Oscar y Eduardo [9] desarrollaron un estudio comparativo de mezcla usando cal, cemento y cenizas volantes en arcillas clasificadas como expansivas. Según los resultados demostraron que la cal, logró una reducción significativa en los índices de plasticidad y una disminución de potencial de expansión entre un 60% y 80%. Aunque el cemento y las cenizas volantes también mostraron beneficios, la cal se destacó como el agente más eficaz.

#### Antecedentes Nacional

Fany Burga [10] examinó el efecto del polvo de piedras chancadas a diferentes porcentajes (2%, 4%, 6% y 10% en peso del suelo seco) y los resultados revelan que estos porcentajes mejoran notablemente las características del suelo, ya que disminuyó la plasticidad y el contenido óptimo de humedad, pero aumentó la densidad seca máxima y el CBR. De los porcentajes aplicados, el 10% es el que mejor resultado ha tenido pues existe una variación creciente del CBR, sugiriendo así que la resistencia y la estabilidad del suelo tratado mejoran enormemente.

Antonio Tacca [23] en su tesis tuvo como objetivo principal mejorar las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso mediante la adición de cal. Aplicando un enfoque cuantitativo y de método experimental, determinaron las proporciones óptimas de 4%, 8% y 12%. Los resultados mostraron que la proporción del 8% era más eficaz, mejorando el CBR. Aunque el 12% de cal mostró también un mayor índice, los datos estadísticos indicaron que no había una diferencia significativa entre los suelos tratados con 8% y 12%.

Sandra Paola [24] en su tesis de adición del polvo de piedra triturada recomienda utilizar entre el 10% y 20% de la adición, ya que este rango ha demostrado proporcionar las mejores mejoras significativas en las propiedades mecánicas del suelo. Estos niveles de adiciones cumplen con los lineamientos del NTP, los cuales destacan la importancia de un mayor CBR para asegurar un comportamiento más rígido y resistente de un suelo. Un suelo con un CBR más

elevado actúa como un soporte más firme y duradero, mejorando su capacidad de carga y estabilidad a largo plazo, lo cual es esencial para la vida útil de la infraestructura vial.

### **Antecedentes Regional**

Brayan Monja [11] en sus tesis desarrollo una investigación incorporando vidrio reciclado, tuvo como objetivo evaluar contenidos de vidrio del 3,6,9 y 14% en peso seco del suelo, en granulometría de 75 y 300  $\mu\text{m}$ . Los resultados mostraron una tendencia positiva en el CBR como en la MDS del suelo se obtuvieron con un 14% de vidrio. No obstante, las mejores propiedades de consistencia se lograron con un 9% de vidrio. Además, Monja destacó que estabilizar suelos con vidrio es resulta más viable que realizarlo con cemento o cal viva.

Alexander Quiroz [12] en el marco de su estudio sobre la estabilización de suelos mediante cloruro de sodio, Alexander evaluó los efectos de agregar cloruro de sodio en 1%, 1.5% y 2% en un suelo areno-arcilloso. Los resultados indicaron que estos porcentajes incrementaban el CBR un 0.35% respecto a la muestra original, señalando una mejora en la resistencia del suelo. De igual forma, su trabajo concluye que la incorporación de cloruro de sodio es una acción de estabilización de suelos efectiva y económica. Quiroz destaca la posibilidad de emplear materiales económicos para mejorar las propiedades mecánicas del suelo.

### **BASES LEGALES**

#### **MANUAL DE CARRETERAS, SECCIÓN SUELOS Y PAVIMENTOS - MTC/14**

Este documento brinda las directrices necesarias para optimizar el diseño de cada capa estructural que forman parte del pavimento. Aquí se detallan los parámetros mínimos requeridos para que el suelo pueda ser utilizado adecuadamente. Así mismo, el capítulo IX se enfoca en los distintos tipos de estabilización de suelos, especificando criterios a seguir para cada tipo de estabilización disponible [21].

#### **MANUAL DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN (EG-2013)**

En su contenido, este manual ofrece una guía detallada sobre las pruebas necesarias para la caracterización de suelos, enfatizando el valor de los ensayos mínimos requeridos para cada tipo de estabilización de suelos [25].

#### **NTP CE .010 PAVIMENTOS URBANOS**

Dicha norma brinda los criterios y especificación técnicas para el diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos en zonas urbanas de Perú. Además, regula la selección de materiales, procesos constructivos, adaptados a las condiciones locales de tráfico y clima [26].

### ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO, MTC E107

Describe el procedimiento para definir la clasificación de tamaños de partículas en un suelo, clasificándolo mediante tamices. Este análisis es crucial para conocer las propiedades mecánicas del suelo. Dichos resultados permiten una correcta clasificación del suelo, optimizando su uso en pavimentos [27].

### DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO, MTC E 108

El procedimiento que se utiliza para calcular el nivel de agua que tiene una muestra del suelo es pesar el suelo antes y después de que se ha secado. Se determina la cantidad de agua que se requiere la muestra comparando el peso inicial y el peso final [27].

### DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS, MTC E 110

Establece el método para medir el límite líquido de un suelo, dicha norma nos brinda pautas para realizar el ensayo mediante la copa de Casagrande, que nos indica ciertos rangos de números de golpes, con la finalidad de obtener humedades que es el punto en que pasa de estado plástico a líquido al aumentar la humedad [27].

### DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (L.P) E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP), MTC E 111

Es el contenido de humedad en el que el suelo cambia de estado semisólido a plástico, y el índice de plasticidad (IP), que es la diferencia de límite plástico y límite líquido [27].

### MÉTODO DE ENSAYO ESTANDAR PARA LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE SÓLIDOS DE SUELO MEDIANTE PICNÓMETRO DE AGUA, MTC E 113

Tal ensayo contiene información acerca de la relación que existe entre el peso de los sólidos del suelo y el peso de un volumen equivalente de agua. También se utiliza para determinar las distintas relaciones de fase: la relación de vacíos y el grado de saturación [27].

### CLASSIFICATION OF SOIL AND SOIL-AGGREGATE MIXTURES FOR HIGHWAY CONSTRUCTION PURPOSES (CLASIFICACIÓN DE SUELO Y MEZCLAS DE SUELO-AGREGADO PARA FINES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS), AASHTO M 145

Proporciona un sistema de clasificación para suelos y mezclas de suelo-agregados. Divide los suelos en siete grupos principales, desde el A-c hasta el A-7 donde los suelos limosos y arcillosos suelen estar comprendidos entre los grupos A-4 y A-7 [28].

#### MÉTODO PARA LA CLASIFICACIÓN DE SUELOS CON PROPÓSITOS DE INGENIERÍA (SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS, SUCS), NTP 339.134

Es manera que nos permite categorizar suelos según sus propiedades físicas. Este sistema clasifica los suelos en dos grandes grupos: granulares (grava, arenas) y finos (limos, arcillas) en función de su tamaño de partículas y plasticidad. Dicho sistema asigna símbolos como GW, GP, GM para gravas y CL, CH para arcillas lo cual permite una descripción rápida de sus propiedades mecánicas [29].

#### COMPACTACION DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO), MTC E 115

La técnica implica compactar el terreno en un molde de compactación con un martillo hasta alcanzar una energía de 2,700 kN.m/m<sup>3</sup> de energía de compactación, siempre usando cinco capas de suelo y 25 golpes en cada capa. Se establece así cual es la relación óptima entre la cantidad de agua que presenta el suelo y la densidad seca máxima [27].

#### MÉTODO DE ENSAYO DE CBR (RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA), MTC E 132

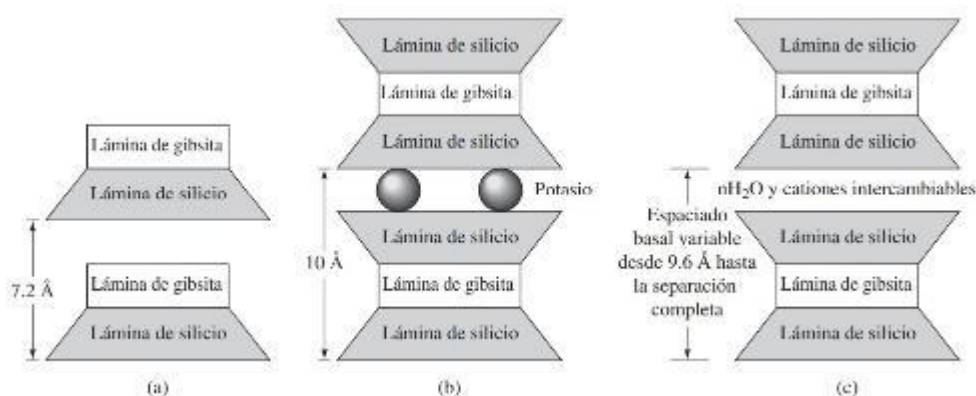
Constituye una prueba que permite evaluar la resistencia de soporte para suelos compactados. El valor que se obtiene sirve como indicador de la calidad que posee el suelo y de la resistencia de soporte, sobre todo si se trata de un uso en las capas de subrasante o de subbase de pavimentos [27].

#### MÉTODO DE ENSAYO PARA ANALISIS QUIMICO DE PIEDRA CALIZA, CAL VIVA Y CAL HIDRATADA, ASTM C25-19

Esta guía proporciona directrices para desarrollar procedimientos para determinar componentes como óxidos de calcio, magnesio, hierro, aluminio y otros elementos claves. Estos métodos incluyen técnicas gravimétricas y volumétricas que sirven para evaluar la calidad de estos materiales en aplicaciones industriales y de construcción [30].

## BASES TEÓRICAS

Están constituidos por los minerales de arcillas que derivan de la meteorización química de feldspatos ferromagnesianos y micas que inducen la plasticidad de los suelos. Hay tres principales minerales de las arcillas: caolinita, ilita y montmorillonita [15].

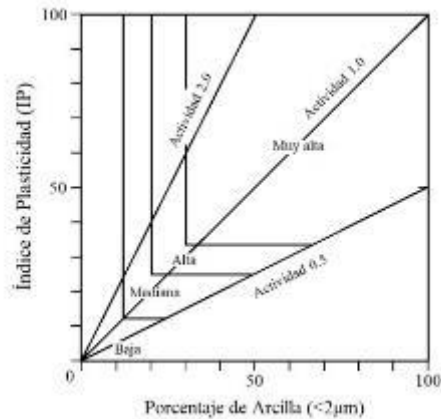


**Fig. 1.** Diagrama de la estructura de (a) caolinita, (b) ilita, (c) montmorillonita [15]

Según Eulalio y Alfonso, las caolinitas están compuestas por una lámina de sílice y otra de alúmina dispuestas de manera continua. La unión de sus retículas es lo suficientemente fuerte para evitar que las moléculas de agua penetren entre ellas, lo que significa que las arcillas caolinitas son bastantes estables cuando están en contacto con agua. Por otro lado, las montmorillonitas están formadas por una lámina de alúmina entre dos de sílice. Sin embargo, la conexión entre sus retículas es débil, lo que permite que las moléculas de agua se introduzcan fácilmente en la estructura, causando un aumento en el volumen de los cristales. Este tipo de arcillas tiende a ser más inestable en presencia de agua. Finalmente, las ilitas tienen una estructura similar a la de las montmorillonitas, pero su composición interna tiende a formar aglomeraciones de materia. Esto disminuye el área que está en contacto con el agua por cada unidad de volumen, resultando en una expansividad menor en comparación con las montmorillonitas [16].

### *Identificación de arcilla expansiva*

En primer lugar, la expansividad posee un potencial de variación, ya que es necesario que exista arcilla con mineralogía y fabricación concretas y que además varíe la humedad [8]. En segundo lugar, en relación a la norma E.0.50 de suelos y cimentaciones, se debe realizar la determinación de un suelo con un bajo estado de saturación y una gran plasticidad (límite líquido  $\geq 50$ ) como consecuencia de la realización del ensayo de determinación de plasticidad del suelo de acuerdo a la NTP 339.29 y el ensayo de la granulometría por sedimentación [27]



**Fig. 2.** Clasificación de cambio potencial de volumen [8]

Así mismo según AAHSTO el sistema de clasificación se basa en los siguientes puntos [28]:

Tamaño de grano:

Grava: Corresponde a las partículas que pasan por el número de 75mm, pero son retenidas por el tamiz numero 10

Arena: Incluye las partículas que pasan por número 10 y son retenidas por el tamiz numero 200

Limo y arcilla: Son las partículas que pasan por el tamiz numero 200

Limoso: Se refiere a las partículas finas del suelo con un índice de plasticidad de 10 o menos.

Arcilloso: Se refiere a las partículas finas del suelo con un índice de plasticidad de 11 o más.

Cantos y guijarros: Las partículas mayores a 75 mm se excluyen de la muestra de suelo utilizada para la clasificación

Conjuntamente, para la identificación de arcillas expansivas se determinan varios criterios básicos. Los criterios más destacados a destacar son el porcentaje de contenido de arcillas, los límites contráctiles (volumétricos y lineales), el índice de plasticidad, el límite líquido y el índice de contracción. En la Tabla siguiente, se presenta el grado de estos valores siguiendo las recomendaciones de diversos autores [8]:

### **Técnicas para la identificación de suelos expansivos**

Según Montejo Fonseca nos menciones tres diferentes métodos de ensayo:

#### **Métodos Indirecto**

La técnica más usada para establecer proporción de minerales arcillosos [expansibles] en una muestra de suelo es la difracción de rayos X, pues es un método ágil y utiliza una cantidad baja de muestra, pero en la mayor parte de los laboratorios la técnica con más difusión para determinar suelos expansivos [8].

*Tabla I Clasificación por grado de expansión*

### Métodos Directo

Ordóñez et al [17] los métodos básicos que se utilizan para la identificación de suelos

Grado de expansión	"Chen (1983)"	"Seed et al. (1962)"	"Daksanamurthy and Raman (1973)"	"USBR (Holtz and Gibbs" 1956)
-Muy alto	LL>60	IP>35	LL>70	CC>28
-Alto	40<LL<60	20<IP≤35	50<LL≤70	20<CC≤31
-Medio	30 ≤LL ≤40	10 ≤IP ≤20	35<LL≤50	13 ≤CC ≤23
-Bajo	LL<30	IP<10	20 ≤LL ≤35	CC <13

expansivos deben realizarse siempre bajo cargas y sobrecargas controladas, éstas deben imitar con la mayor exactitud posible la deformación/los esfuerzos que presentan las condiciones in-situ. Dentro de estos métodos básicos de ensayo directo se puede incluir el ensayo de consolidación-expansión, donde se estudia la variación de volumen del suelo bajo condiciones diferentes, el ensayo de consolidación con distinto contenido de agua, donde se estudia el comportamiento del suelo frente a variaciones del contenido de humedad, y el ensayo doble del consolidómetro, donde se estudia la resistencia del suelo a las cargas y sobrecargas y se puede conocer mejor su comportamiento expansivo.

Así mismo Montejo Fonseca [8] resalta que estos métodos permiten medir cuantitativamente las propiedades de cambios volumétricos en suelos expansivos, específicamente la presión de hinchamiento. Si se necesita medir la deformación (hinchamiento), se somete a una sobrecarga establecida luego se satura y se deja hasta alcanzar el equilibrio.

### Métodos Combinados

Estos métodos implican la integración de técnicas directas e indirectas para obtener una clasificación más precisa en función de la gravedad de los cambios volumétricos [8].

Entre los métodos más comunes tenemos los siguientes:

### El método de Bureau of reclamaTión

Esta técnica establece una relación entre la cantidad de partículas menores de 1 micra, el índice de plasticidad y el límite de contracción. En un consolidómetro se determina el % de cambio volumétrico de las muestras aplicando una sobrecarga de 0.007 kg/cm<sup>2</sup> [8].

*Tabla II Método de (Holtz y Gibbs)*

### **Método Seed , Woodward and Lundgren**

La relación que se establece entre el potencial de hinchamiento del suelo esta relacionado con el tamaño de las

Potencial de Hinchamiento %	Grado de Expansión
0-1.5	Bajo
1.5-5	Medio
5-25	Alto
>25	Muy Alto

partículas arcillosas y la actividad del suelo. El potencial de hinchamiento se determina utilizando un consolidómetro sobre muestras remodeladas y compactadas, que se han ajustado a la humedad óptima y la densidad máxima. Las muestras se ajustaron de acuerdo con el ensayo Proctor [8].

*Tabla III Grados de Expansión*

% partículas <1u	Lp	Lc%	Expansión Probable	Grado de expansión
<15	<18	15	<10	Bajo
13-23	15-28	10	10-20	Medio
20-31	25-41	7-12	20-30	Alto
>28	>35	<11	>30	Muy alto

### **Reducción de Riesgos**

Existen diferentes métodos para minimizar los efectos de los suelos de tipo arcilloso, y se pueden realizar el reemplazo de una capa por un suelo granular, la instalación de tuberías de drenaje, la estabilización o mejora del suelo, la utilización de elementos estructurales flexibles ante las posibles expansiones, la construcción de cimentaciones profundas [18]. Asimismo, incluso además de los métodos convencionales para mezclar in situ o en planta, se han puesto

en práctica otros métodos, como la inyección de cal a través de perforaciones, la inyección de lechadas de cal a presión, la estabilización por cal tipo Deep Plow [8].

### ***Características del suelo***

La identificación de las propiedades del suelo se basa tanto en la cantidad y distribución del tamaño de sus partículas como en la plasticidad de las partículas más finas. El suelo se define por característica como su color, textura, olor, distribución de partículas. El proceso de muestreo y la determinación de los parámetros mecánicos del suelos son esenciales en los estudios de mecánica de suelos, sobre todo en proyectos de construcción de vías , para garantizar el cumplimiento de normativas nacional [35].

### ***Sistema de clasificación de suelos (AASHTO)***

La organización de los grupos de la clasificación de suelos queda distribuida en 7 grupos numerados desde A-1 (cascajo y arena), A-2 (arena fina), A-3 (cascajo y arena con partículas limosas o arcillosas), A-4 y A-5 (suelos limosos), y A-6 y A-7 (suelos arcillosos). Lo que se

Clasificación General	Material Granular						Material limo arcillosos				
Grupos	A-1		A-2				A-3	A-4	A-5	A-6	A-7
Subgrupos	A-1a	A-1b	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7					A-7-5
	50%	50%									
<i>Tabla IV Clasificación de suelos</i>											
#40 #200	max 15% máx	20% max	max	max	max	max	max	mm	mm	mm	mm
Características del material que pasa por el tamiz #40 LL Ip	6% máx	6% max	40% max 10% max	41% min 10% max	40% máx 11% mm	41% mín 11% mm	N.P.	40% máx 10% max	41% mín 10% max	40% máx 11% mIn	41% mín 11% mm
Ig	o	o	o	o	4 máx	4 máx	o	8 máx	12 máx	16 máx	20 máx
Tipo de material	Fragmentos pétreos de gravas y arenas		Gravas y arenas, limosas y arcillosas				Arena fina	Suelos limosos	Suelos arcillosos		

clasifica en base a sus propiedades viene organizado en la siguiente forma: los suelos A-1 y A-3 son calificados de buena a excelente calidad, el A-2 será calificado de buena a moderada calidad, y los suelos A-6 y A-7 serán clasificados de moderada a baja calidad [36].

Tabla V Sistema unificado de suelos

DIVISIÓN MAYOR		SÍMBOLO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO	
<b>SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS</b> Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200	Gravas Mas de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No.4	<b>GW</b>	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD $C_u$ : mayor de 4. COEFICIENTE DE CURVATURA $C_c$ : entre 1 y 3. $C_u = D_{60} / D_{10}$ $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$	
		<b>GP</b>	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		
		* $GM \frac{d}{u}$	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo		
		<b>GC</b>	Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla		
	ARENAS Mas de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4	ARENA CON FINOS POCO o nada de partículas finas ARENA LIMPIA Cantidad apreciable de partículas finas	<b>SW</b>	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	$C_u = D_{60} / D_{10}$ mayor de 6 ; $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$ entre 1 y 3.  No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW
			<b>SP</b>	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	
			* $SM \frac{d}{u}$	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	
			<b>SC</b>	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.	
	<b>SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS</b> Más de la mitad del material pasa por la malla número 200	LIMOS Y ARCILLAS	<b>ML</b>	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.	G – Grava, S – Arena, O – Suelo Orgánico, P – Turba, M – Limo C – Arcilla, W – Bien Graduado, P – Mal Graduado, L – Baja Compresibilidad, H – Alta Compresibilidad  <b>CARTA DE PLASTICIDAD (S.U.C.S.)</b>
			<b>CL</b>	Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.	
		Limite Liquido Menor de 50	<b>OL</b>	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.	
		LIMOS Y ARCILLAS	<b>MH</b>	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos.	
<b>CH</b>			Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.		
Limite Liquido Mayor de 50		<b>OH</b>	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.		
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS		<b>P</b>	Turbas y otros suelos altamente orgánicos.		

DETERMINAR LOS PORCENTAJES DE GRAVA Y ARENA DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA, SE DEPENDIENDO DEL PORCENTAJE DE FINOS (fracción que pasa por la malla No. 200) LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE: Menos del 5% GW, GP, SW, SP, más del 12% GM, GC, SM, SC. Entre 5% y 12%: Casos de frontera que requieren uso de símbolos dobles \*\*

### ***Pavimentos***

Los pavimentos se conciben como un sistema que responde a ciertas leyes físicas, manifestándose en forma de reacciones ante estímulos externos, como las cargas aplicadas. Estas leyes físicas influyen en la interacción de factores como los esfuerzos, las deformaciones, el tiempo y la temperatura [31].



**Fig. 3** Influencia de la carga [31]

El MTC aclara que el pavimento es una estructura formada por varias capas ordenadas y construidas sobre la subrasante de una carretera, diseñada para soportar, repartir las cargas que generan el tránsito vehicular y mejorar la seguridad y comodidad del tránsito. Suelen ser las siguientes capas principales: base, subbase, capa de rodadura [21].

#### **Estructura del pavimento**

La capa de rodadura es una de las partes de un pavimento, en concreto sería la capa superior en la que se produce el tránsito, que puede estar formada por materiales bituminosos, concreto de cemento Portland o bien adoquines. Dicha capa es la parte más importante por la que transitan los vehículos y los peatones [32].

La base, ubicada debajo, tiene la función de sostener y distribuir las cargas vehiculares, es importante porque permite reducir los esfuerzos cortantes que se transmiten hacia las capas inferiores [32].

La subbase es una capa de soporte que sirve como drenaje y control de capilaridad [32].

El material empleado deberá cumplir con lo siguiente:

*Tabla VI Normas de Calidad [32]*

<b>Denominación de la Malla</b>	<b>% Que pasa</b>
<b>1 1/2"</b>	100
<b>3/4"</b>	72 - 100
<b>3/8"</b>	50 - 84
<b>No. 4</b>	37 - 70
<b>No. 20</b>	16 - 45
<b>No. 60</b>	9 - 35
<b>No. 200</b>	5 - 25

### **Subrasante**

La subrasante tiene como objetivo recibir y resistir las cargas que genera el tráfico, que se transmiten a través de las capas superiores del pavimento. Esta capa debe cumplir su función durante el tiempo establecido en el proyecto [21].

Sus principales funciones son:

Distribuir adecuadamente las fuerzas provenientes del tráfico hacia las capas inferiores del terraplén

Impedir que materiales no plásticos del terraplén contaminen las capas del pavimento.

Así mismo, se pueden identificar diferentes categorías de subrasante establecidas tanto por el manual como por la norma NTP CE.010 para pavimentos urbanos.

*Tabla VII Categoría de subrasante [21]*

<b>Categorías de Subrasante</b>	<b>CBR</b>
S0: Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S1: Subrasante Regular	3% ≤ CBR < 6%
S2: Subrasante Regular	6% ≤ CBR < 10%
S3: Subrasante Buena	10% ≤ CBR < 20%
S4: Subrasante Muy Buena	20% ≤ CBR < 30%
S5: Subrasante Excelente	CBR ≥ 30%

En la construcción de caminos, el espesor de la subrasante puede alcanzar los 45 cm, si se trata de proyectos de ejecución de nuevas vías, mientras que, si se trata de proyectos de rehabilitación, el grosor será como mínimo de 20 cm. La resistencia del terreno, acerca del cual debemos tener en cuenta las condiciones de tráfico y características de los materiales de las capas de rodadura; son las convenciones que determinan el tipo de afirmado conveniente del tramo superior de los caminos [36]

### **Propiedades físicas**

#### **Granulometría**

La granulometría implica identificar la cantidad de los distintos elementos que componen un suelo, con el fin de agruparlos y obtener una curva granulométrica. El tamizado es el método más utilizado y sencillo para realizar este ensayo. No obstante, cuando se trabaja con arcillas, debido a la finura de sus partículas este se vuelve más complejo y se recurre al método de sedimentación. Un aspecto que debemos tener en cuenta que para clasificar un suelo como de grano fino (limo o arcilla) es la cantidad que pasa por el N°200; si más del 50% de la muestra lo hace, se considera un suelo de grano fino [37].

#### **Densidad**

La densidad absoluta es la cantidad de masa que ocupa un volumen específico, sin incluir los espacios vacíos. En contraste, la densidad aparente es la masa de un material en una unidad de volumen, pero teniendo en cuenta los vacíos presente en su estructura [37].

#### **Peso volumetrico**

El peso volumétrico de una arcilla es la medida de su peso por unidad de volumen expresado. Un concepto estrechamente relacionado es el peso volumétrico aparente, que se refiere al peso del suelo seco y suelto por unidad de volumen, considerando los vacíos presentes en su estructura. La principal ventaja de disponer de estos valores es la posibilidad de convertir de forma directa y precisa entre peso y volumen [37].

#### **Plasticidad**

La plasticidad es una de las características fundamentales de las arcillas y se define como la capacidad del suelo para deformarse hasta un cierto punto sin sufrir fracturas o fallas [37].

Un suelo con índice de plasticidad cero es no plástico según la clasificación de Atterberg; si su índice de plasticidad es menor que 7, se califica como de baja plasticidad; si está por encima de 7 pero por debajo de 17, como de plasticidad intermedia, y si supera los 17, como de plasticidad alta [37].

Así mismo para determinar la plasticidad de un suelo esta se evalúa a través de los límites de consistencia, se clasifica en 4:

### Limite plástico

Se refiere al contenido de humedad con respecto al peso del suelo seco, que permite pasar de un estado semisólido a uno de plástico [37].

### Limite liquido

Es el porcentaje de humedad en que el suelo cambia de un estado líquido a un estado plástico. Dicha etapa es característica, dado que el suelo tiene una resistencia mínima al esfuerzo de cortadura [37].

### Límite de contracción

Es el porcentaje de contenido de humedad, en el cual una disminución de agua ya no provoca reducción en el volumen del suelo [37].

### Índice de plasticidad

Es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico del suelo [37].

$$IP = LL - LP$$

## Propiedades mecánicas

### Permeabilidad

La permeabilidad se refiere a la habilidad que tiene un suelo para permitir el paso del agua a través de él. En los suelos arcillosos que cumplen la función de subrasantes, esta propiedad de la permeabilidad se relaciona con dos grandes problemas: por un lado, la disipación de la presión de poro, y por otro, el flujo de agua por el suelo. Cuando hay altas presiones de pro pueden producirse desplazamientos en las explanaciones mientras que el flujo de e agua puede provocar la erosión interna o arrastre de partículas, lo que afecta a las capas debajo del pavimento [8].

### Comprensibilidad

Es el grado en el que el suelo se deforma cuando se somete a cargas, y puede modificarse mediante procesos de compactación. Esta propiedad es especialmente notable en suelos arcillosos, que tienden a ser más comprensibles. La humedad juega un papel fundamental en la comprensibilidad del suelo, ya que influye en otras propiedades, como la permeabilidad. Por ellos es crucial compactar el suelo con el nivel de humedad adecuado [8].

### Estabilidad volumetrica

La estabilidad volumétrica en suelos arcillosos depende de los procesos de expansión y contracción que surgen debido a cambios en la humedad. Estas variaciones generan aumentos de presión en las estructuras del pavimento, lo que puede llevar a deformaciones y figuras. Por ello, es esencial identificar y analizar estos suelos expansivos. Una solución aplicada es convertir la arcilla en una estructura granular o rígida para mejorar su estabilidad [8].

## Resistencia

La resistencia mecánica en suelos arcillosos es habilidad de un suelo para aguantar las cargas externas. Para un suelo arcilloso, dicha resistencia mecánica depende principalmente del contenido de humedad de un suelo determinado y del grado de compactación aplicado. Un suelo arcilloso que ha sido compactado con humedad óptima y a la máxima densidad seca será a la vez flexible y resistente. En cambio, un suelo con exceso de humedad, y por lo tanto baja densidad, tendrá un comportamiento más plástico y menor resistencia, debido a la repulsión entre partículas de arcilla que varía según el contenido de agua [8].

## Estabilización de suelos

La estabilización del suelo en la ingeniería es ampliamente útil sobre todo para mejorar la durabilidad y así mismo esto logra mejorar las propiedades del suelo y logra mitigar el comportamiento de cambio de volumen que expresa este tipo de fenómeno [3].

## Criterios para la estabilización de suelos

Según el manual de carreteras nos menciona que, para asegurar la aptitud de los materiales en las capas de subrasante, se requiere que los suelos tengan un  $CBR \geq 6\%$ . Si el valor es menor o se detectan áreas blandas o húmedas, este se deberá realizar un estudio especial para estabilizar [21].

En suelos arcillosos o limosos, que, al momento de humedecerse, esta logra contaminar las capas granular, se debe incluir una capa anticontaminante de 10 cm de espesor

Para definir el tipo de estabilización de suelos adecuada, es fundamental determinar el tipo de suelo presente. Los suelos más comunes en este contexto son los limos, arcillas y arenas con contenido limoso o arcilloso. El MTC nos muestra el diagrama para ejecutar un modelo más óptimo [21].

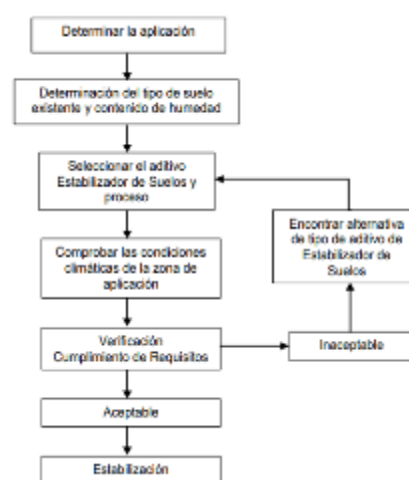


Fig. 4 Proceso de selección [21]

### **Estabilización con Cal**

Al añadir cal en los suelos puede mejorar significativamente sus características plásticas, haciéndolo más fiables y sobre todo aumentado considerablemente el CBR, un efecto que ha demostrado perdurar con el tiempo. Además, ayuda a que los suelos sean menos afectados por el agua es decir que se hinchen menos [8].

Así mismo la adición de cal generalmente hace que el límite plástico de los suelos aumente. Este incremento es más notable cuanto mayor es el contenido de arcilla, siendo más pronunciado en suelos montmorilloníticos[19].

Así mismo la estabilización con cal no es adecuada para todos los tipos de suelos. Se recomienda añadir cal cuando el suelo presenta un índice de plasticidad mayor al 10% y al menos el 25% de sus partículas son capaces de pasar por un tamiz de 74  $\mu\text{m}$  [20].

### **Estabilización con cemento**

La estabilización de suelos con cemento tuvo sus inicios en 1917, cuando Amies introdujo el primer método para mejorar suelos mediante la mezcla de diversas proporciones de cemento Portland. Desde entonces se ha generalizado y popularizado [8].

Según [34] el cemento ha demostrado su efectividad en la estabilización de suelos arenosos y arcillosos. Así mismo el hidróxido de calcio, el uso del cemento tiende a reducir la plasticidad en los suelos arcillosos y, por lo tanto, a mejorar la trabajabilidad del suelo. Los suelos tanto que puede ser granular o arcillosos con poca plasticidad son los más idóneos para estabilizarse usando cemento.

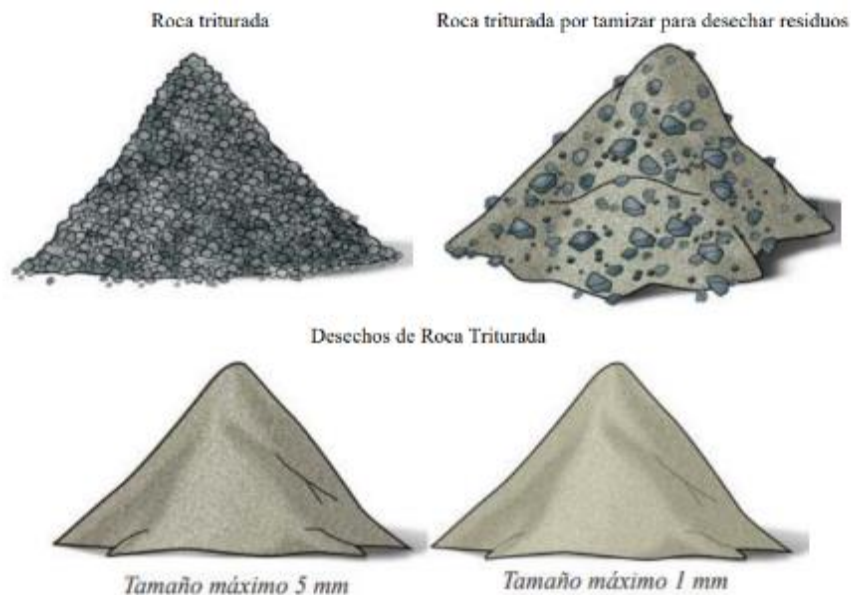
Montejo Fonseca [8] nos menciona que cuando se estabiliza un suelo con cemento, la presencia de materia orgánica puede ser perjudicial porque los ácidos orgánicos presentes tienen una fuerte atracción por los iones de calcio liberados por el cemento. Esto limita su efectividad en suelos con un alto contenido de materia orgánica.

Según [21] los tipos de suelo que se pueden estabilizar con cemento y que dan buenos resultados son los de una clasificación granulométrica, A-1, A-2 y A-3, los cuales contienen finos con plasticidad baja o media  $LL < 40$ ,  $IP < 18$ . Esto se traduce en que al añadir cemento y antes de iniciar la etapa de fraguado se produce una disminución del índice de plasticidad (IP), mientras que el límite líquido o la densidad máxima, por su naturaleza, suelen sufrir pequeños cambios dependiendo del suelo.

### **Polvo de piedra**

El desecho de roca triturada es un material residual generado en el proceso de trituración de piedra. Debido a sus características, se considera inadecuado para su uso en concreto y se clasifica como residuos [38]. Compuestos principalmente de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) entre otros minerales

[39]. Así mismo el polvo de piedra está compuesto por partículas angulares que tiene mayor fuerza de entrelazado que mejora la densidad del suelo cuando se mezcla. Este material se ha identificado que tiene una alta resistencia al corte y es beneficio usarlo como material estabilizador. Por otro lado el polvo de piedra por si solo forma una superficie dura que es resistente al agua ,esta actúa como un agente aglutinante .debido a su capacidad para formar una superficie fuerte y no porosa [40].



**Fig. 5** Clasificación de desechos [Aceros Arequipa]

### Aspectos normativos de los desechos de piedra triturada

#### Normativa Peruana

1. **NTP 400.037 (INACAL, 2021):** Esta norma regula los agregados para concreto, incluidos los finos como el polvo de cantera. Define los límites granulométricos y la limpieza que deben cumplir los agregados. Se establece que el polvo de cantera no debe contener impurezas como arcillas o sales que puedan comprometer la durabilidad del concreto [41].

#### Normativa Internacional:

- ✓ **ASTM D2940:** Esta norma establece los requisitos para el uso de agregados finos , como el polvo de cantera , en la construcción de bases y subbases estabilizadas en carreteras .Para asegurar una adecuada compactación , es especifica que los agregados deben cumplir con ciertos límites granulométricos , con una cantidad de finos que pasa por la malla No.200 que debe ser inferior al 8% .Se menciones otros datos que garantiza la seguridad y la estabilizada adecuada en diferentes condiciones de tráfico y clima variable [42].

### Ensayos de laboratorio

#### DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO, MTC E 108

Es la cantidad de agua que contiene una muestra, expresada en relación con el peso de las partículas sólidas secas. Esta proporción se presenta en porcentaje, y se calcula tomando como base el peso de la muestra húmeda antes y después de un proceso de secado a una temperatura controlada [27].

Equipos requeridos:

Horno eléctrico: Capacidad de mantener una temperatura estable de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$

Balanza digital: Con precisión de  $\pm 0.01$  gramos, para medir con exactitud el peso de las muestras antes y después de someterla al secado.

Materiales:

Recipientes o taras resistentes al calor: De preferencia acero inoxidable o de material adecuado para resistir la exposición prolongada de calor

Cálculos:

El contenido de humedad se calcula usando la siguiente formula:

$$w = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de suelo natural secado al horno}} \times 100$$

Muestra:

El suelo para evaluar debe provenir de una muestra no alterada, la cual será examinada para determinar sus características.

*Tabla VIII Tamaño de las partículas*

Tamaño Maxima de partícula	Malla Estandar	Masa minima recomendada para ensayos de contenido de humedad
2mm o menos	2.00 mm (N°10)	20 g
4.75 mm	4.76 mm (N°4)	100g/50g
9.5 mm	9.5 mm (3/8")	500g/250g
19 mm	19.1 mm (3/4")	1 kg/500g
37.5 mm	38.1 mm (1 1/2")	5kg/2kg
75.0 mm	76.200 mm (3")	50kg/15kg

#### ANÁLISIS GRANULOMETRICO DE SUELOS POR TAMIZADO, MTC E 107

Este procedimiento tiene como objetivo obtener información sobre el tamaño y la distribución de las partículas en el suelo analizado. Para ello, las partículas se clasifican de acuerdo con su diámetro utilizado diferentes tamices que permite clasificarlos la fracción del material que permite su respectiva categorización del suelo [27].

Equipos utilizados:

Horno: Capacidad de mantener una temperatura constante de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$

Balanza digital: Con un margen de error  $\pm 0.01$  gramos

Materiales:

Juego de tamices: Con diferentes tamaños de apertura que permite separar las partículas del suelo.

*Tabla IX Abertura según el tamiz [27]*

<b>TAMICES</b>	<b>ABERTURA</b>
<b>3"</b>	75
<b>2"</b>	50.8
<b>1 1/2"</b>	38.1
<b>1"</b>	25.4
<b>3/4"</b>	19
<b>3/8"</b>	9.5
<b>N°4</b>	4.76
<b>N°10</b>	2
<b>N°20</b>	0.84
<b>N°40</b>	0.425
<b>N°60</b>	0.26
<b>N°140</b>	0.106
<b>N°200</b>	0.075

Cálculos:

$$\%pasa_{N^{\circ}200} = \frac{\text{Peso total} - \text{Peso retenido en el tamiz}}{\text{Peso Total}} \times 100$$

$$\%retenido = \frac{\text{Peso retenido en el tamiz}}{\text{Peso Total}} \times 100$$

$$\%pasa = 100 - \%retenido \text{ acumulado}$$

#### DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO DE LOS SUELOS MTC E110

El límite líquido es la cantidad de agua que se necesita para que una muestra cierre la ranura del aparato de Casagrande después de 25 golpes. Este porcentaje de humedad indica el punto de convergencia entre los estados líquidos y plástico del suelo y se utiliza para clasificar las fracciones finas del suelo [27].

Para el cálculo del límite se realiza de la siguiente manera:

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

Donde:

W=Porcentaje de humedad del suelo (%)

N= Numero de golpes que cierra la ranura

LL=Límite líquido

Equipos

Copa de Casagrande

Horno

Calibrador

Acanalador

Balanza digital  $\pm 0.01$  gr

Materiales

Recipientes

Agua Destilada

Espátula

#### DETERMINACION DEL LIMITE PLÁSTICO DE LOS SUELOS MTC E111

El límite plástico de un suelo es el contenido de humedad mínimo que permite que el suelo moldeable o trabajable. Cuando se toma una muestra de suelo húmedo, esta entra en un estado plástico al amasarla hasta formar un rollo con un diámetro de 3 mm sobre una superficie plana que no absorbe agua. Finalmente, este terminara en el horno por 24 horas, para posteriormente proceder a calcular su humedad [27].

Para el cálculo del límite plástico se realiza la siguiente formula:

$$L.P = \frac{P_w}{P_s} \times 100$$

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

Donde:

Pw=Peso de agua contenida.

Ph=Peso húmedo (gr).

Ps=Peso seco (gr).

LP=Límite plástico en %

Materiales:

Recipientes

Agua destilada

Espátula

Equipos

Tamiz N°40

Superficie de trabajo

Balanza  $\pm 0.01$ gr

Horno para temperatura

## COMPACTACION DE SUELOS EN LABORATORIO MEDIANTE EL USO DE UNA ENERGIA MODIFICADO MTC E115

La prueba de Proctor modificada mide la relación la densidad seca y la humedad durante la compactación del suelo objeto de estudio. Este procedimiento se encuentra ampliamente utilizado y es esencial a la hora de evaluar la compactación de suelos. La técnica implica compactar el suelo en un molde Proctor en 5 capas, utilizando la energía generada por un martillo. Se utiliza material que pasa por la malla N°4 , y cada una de los cinco capas se compacta con 25 golpes [35].

Para el cálculo se realiza lo siguiente:

Formula:

$$p_m = 1000x \frac{(M_t - M_{md})}{V}$$

$$p_d = \frac{p_m}{1 + \frac{W}{100}}$$

Donde:

$M_{md}$  = Masa del molde de compactacion (kg)

$p_m$  = Densidad humedad de la muestra compactada (kg)

$M_t$  = Masa de la muestra humedad y molde(kg)

$V$  = Masa de la muestra humedad y molde(kg)

$p_d$  = Densidad seca de la muestra compactada (Mg/m3)

$W$  = Contenido de agua (%)

## MÉTODO DE ENSAYO CBR MTC E115

El ensayo de CBR mide resistencia del suelo, medida en relación con el 95 % del máximo valor de densidad seca (MDS) y a una penetración de carga de 2,54 mm [33]. Se definirá la subrasante a partir del CBR del suelo [21]. Aquellas subrasantes que son consideradas deficientes o inadecuadas son aquellas que tienen un valor inferior al 6 % del CBR.

### Materiales:

Enrasador de metal

Cucharón

Tamiz No.4

Tanque con agua para sumergir los moldes

Equipos

Molde cilíndrico

Pisón de compactación

Pesas metálicas con un orificio central

Prensa para la penetración

Aparato para medir la expansión

Balanza con una precisión  $\pm 0.01$  g

## **Materiales y métodos**

### **Tipo de estudio**

De acuerdo con el tipo de investigación que se analizara tenemos lo siguiente [43].

### **Según su fin:**

Este estudio se considera de tipo Aplicado, debido a que se apoya en teorías y fundamentos previos, orientándose a resolver un problema específico: mejorar las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos.

### **Según los datos analizados:**

La investigación que se ha presentado es de una naturaleza cuantitativa pues su elaborado planteamiento se basa en afirmaciones que nos llevará a conocer la realidad, mediante la recolección y el análisis de datos que se obtienen a partir de los diferentes ensayos realizados en laboratorio.

### **Según la metodología para demostrar la hipótesis**

La manera de abordar esta investigación es de tipo experimental, dado que nos permite realizar la manipulación de variables independientes y conocer cómo incidirán sobre el comportamiento geotécnico, principalmente sobre las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso. La hipótesis se verá probada como resultado del análisis de los resultados presentados, dando evidencias sobre la mejora del aditivo.

El modelo de investigación es el siguiente:

$$G_c \rightarrow X_1 \rightarrow M_1: \text{Para el grupo de control}$$

$$G_e \rightarrow X_2 \rightarrow M_2: \text{Para el grupo Experimental}$$

Donde:

G<sub>c</sub> y G<sub>e</sub>: Grupos pilotos.

X<sub>1</sub>: Ausencia de estabilizante.

X<sub>2</sub>: Incorporación del polvo de piedra de canto rodado.

M: Medición de las propiedades físico-mecánicas del suelo a investigar.

## ***POBLACION Y MUESTRA Y MUESTREO DE ESTUDIO***

### **POBLACION**

La población objetivo de este estudio incluye los suelos arcillosos presentes en el distrito de José Leonardo Ortiz que son susceptibles al cambio de humedad generando diferentes problemas.

### ***MUESTRA***

La muestra respectiva se realizará de un punto específico en el distrito de José Leonardo Ortiz. Para asegurar la representatividad de los suelos arcillosos, se llevará a cabo pozos exploratorios donde se extraerá muestras de diferentes estratos y se realizarán su respectivo estudio dado. Además, se preparará mezclas con tres distintos porcentajes de concentración, considerando valores de 0, 20%, 30% y 40% en peso del suelo seco. Dichos porcentajes se han determinado a partir de un análisis de antecedentes y selección de los valores óptimos, como se detalla a continuación:

### **Investigación Nacional**

*Tabla X Resumen de antecedente CBR [10]*

<b>Autor</b>	<b>Tipo de aditivo</b>	<b>Porcentajes %</b>			
FANY YUDITH RUIZ BURGA	Polvo de piedra	0	2	4	6
<b>Sis.Ref CBR</b>		5.2	5.3	7.5	8.7

*Tabla XI Resumen de antecedente CBR [24]*

<b>Autor</b>	<b>Tipo de aditivo</b>	<b>Porcentajes %</b>			
Sandra Paola	Polvo de piedra	0	5	10	20
<b>Sis.Ref CBR</b>		4.9	6.91	7.71	9.5

## Investigación Internacional

*Tabla XII Resumen de antecedente CBR [2]*

<b>Autor</b>	<b>Tipo de aditivo</b>	<b>Porcentajes %</b>			
Nabil Al Joulani	Polvo de piedra	0	10	20	30
<b>Sis.Ref CBR</b>		5.2	7	8.2	16

Para ello sea ha calculo promedios generales de CBR de los distintos autores

*Tabla XIII Resumen de antecedente CBR*

0	2 %	4 %	5 %	6 %	10 %	20 %	30 %
5.13	5.3	7.5	6.91	8.7	9.83	8.85	16

Claramente observamos que el 20% disminuye, pero al considerar un valor internacional donde la composición del suelo y entre otros factores influye el resultado puede afectar, aun asi la tendencia es creciente por lo tanto se ha considerado lo siguiente:

### **Porcentaje del 20%**

Motivo de selección:

El 20% de polvo de cantera será nuestro punto de partida, ya que la tendencia muestra un comportamiento creciente en términos de CBR.

Formula:

$$\text{Mejora relativa (20\%)} = \frac{CBR_{20\%} - CBR_{0\%}}{CBR_{0\%}} \times 100$$

$$\text{Mejora relativa (20\%)} = 72.51\% \text{ (mejoro con respecto al 0\%)}$$

### **Porcentaje del 30%**

Motivo de selección:

El 30% de polvo de cantera tiene uno de los valores más altos por lo tanto se tomará como fuente investigativa.

Formula:

$$\text{Mejora relativa (30\%)} = \frac{\text{CBR}_{30\%} - \text{CBR}_{20\%}}{\text{CBR}_{20\%}} \times 100$$

Mejora relativa (30%) = 80.79% (mejoro con respecto al 20%)

### **Porcentaje del 40%**

El 40% de polvo de cantera será objeto de estudio para determinar si efectivamente proporciona un aumento en el CBR, continuando la tendencia de mejora observada en porcentajes anteriores.

#### ***Determinación del tamaño muestral***

Para poder determinar el tamaño de la muestra en un estudio, es esencial tener en cuenta algunos parámetros específicos y también consultar investigaciones previas relacionadas con el tema. Sin embargo, basándonos en las pautas del libro "metodología de la investigación científica para ingenieros", se pueden aplicar ciertos criterios sin necesidad de un análisis previo muy detallado. A continuación, se explican los aspectos que se deben considerar al hacer este cálculo [43].

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

Donde:

n: Tamaño de la muestra.

Z: Valor correspondiente al nivel de confianza deseado. Dato estadístico se asume  $z=1.65$ .

p: Proporción de éxito esperada en la población.

q: Probabilidad de No ocurrencia de la hipótesis.

e=Margen de error o nivel de precisión, se considera **e=15%**

Para llevar a cabo el cálculo del número de muestras, es fundamental establecer los valores de p y q. Estos valores se obtienen de estudios previos relacionados con la utilización del polvo de piedra de canto rodado en la estabilización de suelos arcillosos. Dichas investigaciones muestran que las dosificaciones aplicadas varían desde el 2% hasta el 30%, con una tendencia positiva y creciente en los resultados obtenidos. Basándose en estos antecedentes, se han determinado los valores de  $p=50$  y  $q=50$ .

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

En conjunto, un valor de 30 destinados a la muestra natural y 30 para cada una de las 3 dosificaciones.

*Tabla XIV Cuadro Resumen de CBR*

<b>Autor</b>	<b>Tipo de aditivo</b>	<b>Porcentajes %</b>			
FANY YUDITH	Polvo de piedra	0	2	4	6
RUIZ BURGA					
<b>Sis.Ref CBR</b>		5.2	5.3	7.5	8.7
<b>Autor</b>	<b>Tipo de aditivo</b>	<b>Porcentajes %</b>			
SANDRA PAOLA	Polvo de piedra	0	5	10	20
<b>Sis.Ref CBR</b>		4.9	6.91	7.71	9.5
<b>Autor</b>	<b>Tipo de aditivo</b>	<b>Porcentajes %</b>			
Nabil Al-Joulani	Polvo de piedra	0	10	20	30
<b>Sis.Ref CBR</b>		5.2	7	8.2	16

A partir de la recopilación de datos y utilizando la fórmula para poblaciones infinitas, se ha obtenido un tamaño de muestras total de n=245 muestras.

### **MUESTREO**

Para la determinación del muestreo de la investigación se toma en cuenta descrito del artículo

3.2.2  
según

<b>TIPO DE VIA</b>	<b>NUMERO MINIMO DE PUNTOS DE INVESTIGACION</b>	<b>AREA (M2)</b>
Expresa	1 cada	2000
Arteriales	1 cada	2400
Colectoras	1 cada	3000
Locales	1 cada	3600

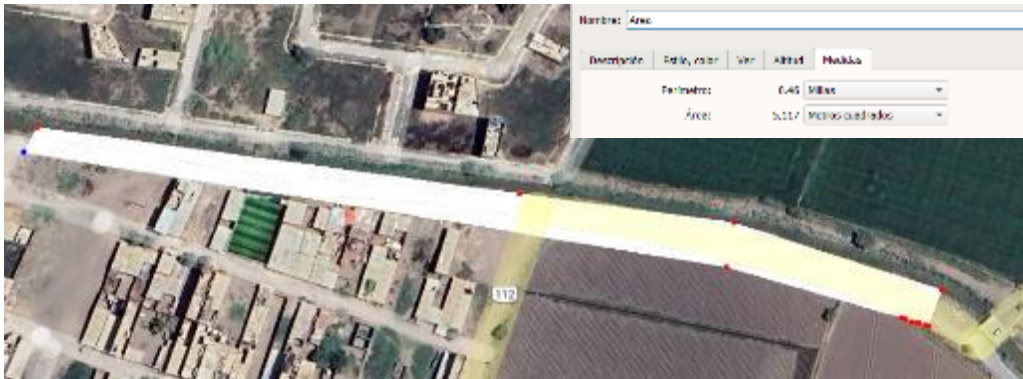
las

directrices de la NTP.CE.0.10 Pavimentos urbanos donde nos indica lo siguiente:

*Tabla XV Número de puntos de investigación [26]*

Teniendo en cuenta que la vía seleccionada, es una calle que no tiene tanta relevancia con respecto al tránsito por lo que se le considera como una calle local por lo que ha sido tomada como objeto de estudio.

Según Google Earth, el área de la vía es de 5117 m<sup>2</sup> aproximadamente que inicia desde la calle los cocos, tal como se puede evidenciar en lo siguiente:



**Fig. 6** Área de estudio

De acuerdo con el tipo de ha calculado, los puntos de mediante la siguiente 1.44. Sin embargo, se ha asegurar una investigación mejor la influencia del suelo a se llevarán a cabo a una extraer el estrato arcilloso final, que servirá como punto de partida para la investigación.



vía y sobre todo el área que sea exploración se determinarán relación:  $5117 \text{ m}^2/3600\text{m}^2=$  decidido realizar 3 calicatas para más completa y comprender estudiar. Los pozos exploratorios profundidad de 1.50 metros para



**Fig. 7 C-01**



**Fig. 8 C-02**

**Fig. 9 C-03**

Así mismo, el número de calicatas puede establecerse utilizando métodos estadísticos. Este enfoque, apoyado en los antecedentes y la información recopilada, nos proporciona una base para determinar de manera más numérica la cantidad de pozos exploratorios necesarios. Según se describe a continuación:

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

Donde:

n: Tamaño de la muestra.

Z: Valor correspondiente al nivel de confianza deseado. Dato estadístico se asume  $z=1.96$ .

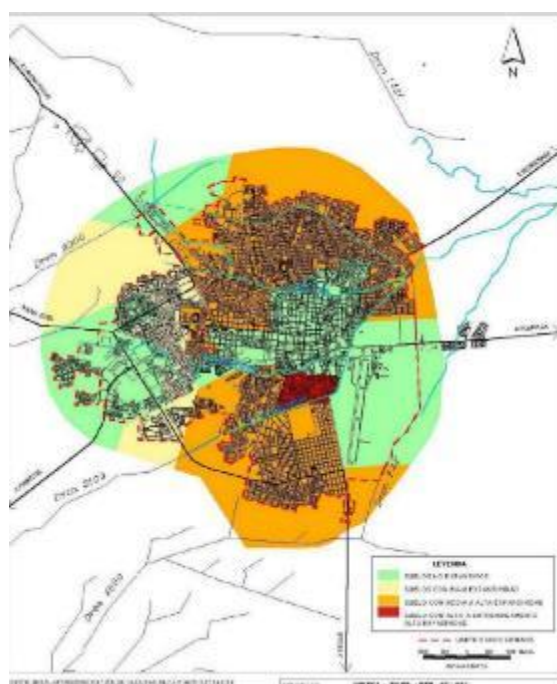
p: Proporción de éxito esperada en la población. (Suelo arcilloso presente en la zona de estudio)

q: Probabilidad de No ocurrencia de la hipótesis. (Suelos que no son arcillosos)

e=Margen de error o nivel de precisión, se considera  $e=5\%$

Para fundamentar el desarrollo y calcular la cantidad de calicatas, es esencial determinar los valores de P y Q, considerando su relación directa con los antecedentes realizados por INDECI. Dicha información permite delimitar geográficamente las zonas según la expansividad de sus

suelos, clasificándolos en suelos NO expansivos, suelos de BAJA expansividad, suelos de MEDIA a ALTA expansividad y suelos de ALTA a EXTRAMADAMENTE ALTA expansividad. Esta información es crucial para una representación adecuada de las condiciones del terreno.



**Fig. 10.** Usos de suelo [44]

Considerando lo anterior , la zona de estudio se encuentra clasificada dentro de suelos con expansividad MEDIA a ALTA .Por ello , se trabajara con los valores  $P=98\%$  y  $Q=0.2\%$  .Con estos parámetros , es posible determinar la cantidad de calicatas necesarias para la investigacion.Ademas , se ha establecido un margen de error permisible del  $5\%$  , siendo el estándar máximo utilizado en estudios similares , y un nivel de confiabilidad del  $95\%$  , comúnmente empleado en múltiples investigaciones , que corresponde a un valor de  $z=1.96$  .Basándonos en estos elementos , podemos describir el siguiente procedimiento para calcular el número de calicatas requeridas.

$$n = \frac{1.96^2 * 0.98 * 0.002}{0.05^2}$$

$$n = 3.011$$

En función a los parámetros obtenidos, se concluye que se hicieron un total de 3 calicatas para llevar a cabo la investigación. Estas calicatas se ejecutarán en conforme a las especificaciones en la norma CE 0.10 de pavimentos urbanos que nos permitirán tener criterios técnicos requeridos para un análisis representativo del terreno.

*Tabla XVI Ensayos Muestra Patrón*

<b>Muestra Patrón Natural</b>	
Contenido de Humedad	1
Granulometría	1
Gravedad Especifica	1
Limite Liquido	1
Limite Plástico	1
Proctor Modificado	3
CBR	10
<b>Total</b>	<b>18</b>

*Tabla XVII Cantidad de muestras por calicata*

	<b>Suelo Natural + Adición</b>		
	20%	30%	40%
<b>Limite Liquido</b>	1	1	1
<b>Limite Plastico</b>	1	1	1
<b>Proctor Modificado</b>	3	3	3
<b>CBR</b>	10	10	10
<b>Total</b>		45	

Los Porcentajes para utilizar son 0% de estado natural y 20% ,30% y 40% con el aditivo que en esta investigación es el polvo de canto rodado

*Tabla XVIII Ensayos a realizar*

Granulometría
Contenido de Humedad
Límites de Atterberg
Proctor Modificado
Capacidad Resistente de Soporte de la Subrasante (CBR)
Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X

*Tabla XIX Cantidad de suelo por calicata*

Ensayos	Cantidad de muestra (gr)			
	0	20%	30%	40%
<b>Contenido de humedad</b>	1000	0	0	0
<b>Granulometría por Tamizado</b>	500	0	0	0
<b>Fluorescencia de Rayos X</b>	500	0	0	0
<b>Limite Liquido</b>	150	180	195	210
<b>Limite Plástico</b>	20	20	20	20
<b>Proctor Modificado</b>	2500	3000	3250	3500
<b>CBR</b>	5000	6000	6500	7000
<b>TOTAL (gr)=</b>		39565		

### ***HIPOTESIS***

El polvo de piedra canto rodado es un estabilizante con un rendimiento similar a la de la cal. En ese sentido, se formuló como objetivo general: Comparar la efectividad del uso de la cal y el polvo de piedra de canto rodado como estabilizadores a nivel subrasante para suelos arcillosos. De este modo, también se formularon los siguientes objetivos:

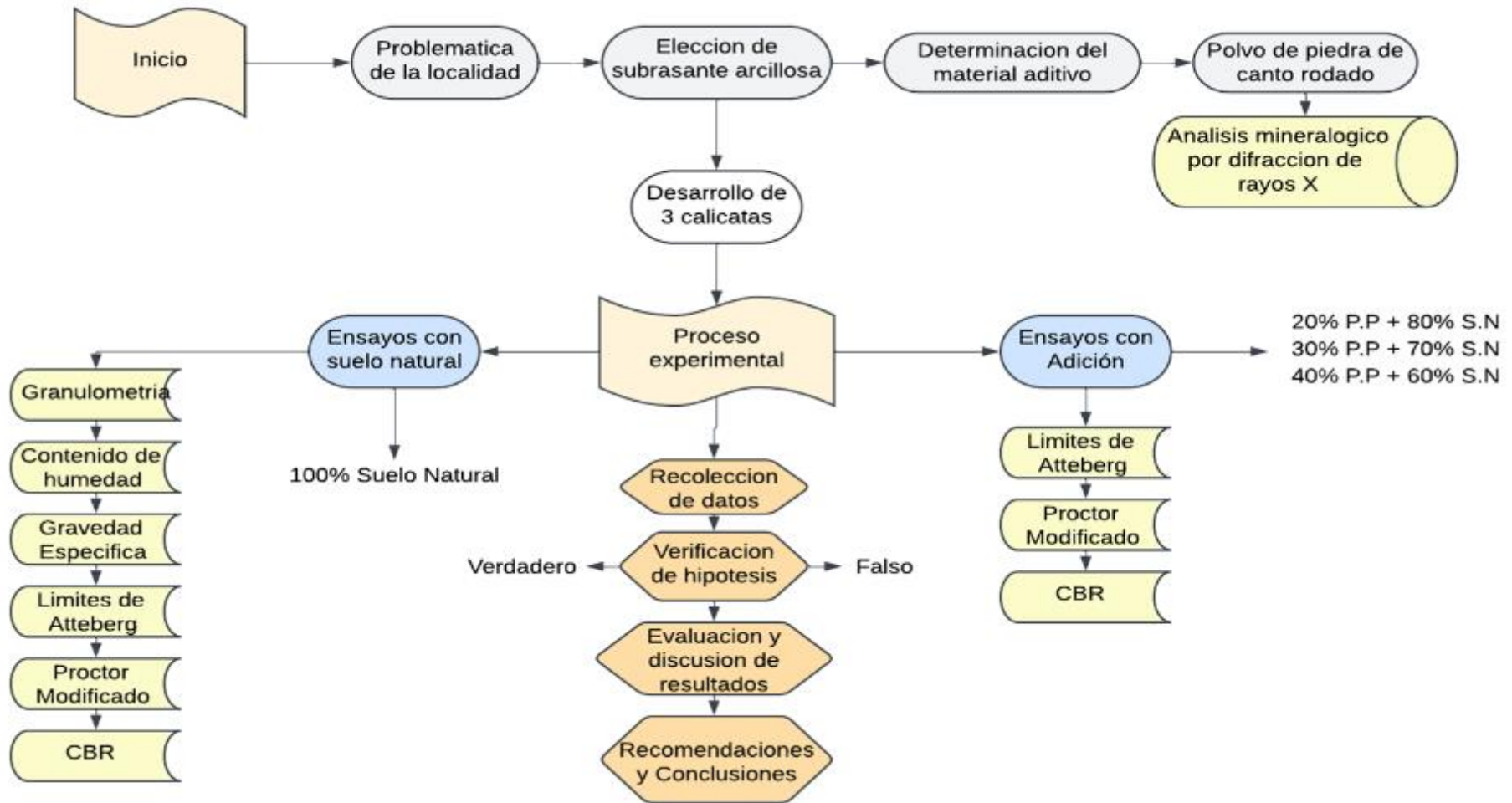


Fig. 11. Corroboración de hipótesis

## OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

### *Variable independiente:*

Incorporación en diferentes porcentajes de 0%, 20% ,30% y 40% del uso del polvo de piedra de canto rodado y cal.

### *Variable dependiente*

Estabilización de suelos

*Tabla XX Indicadores de ensayos*

VARIABLES	INDICADOR	INDICE	INSTRUMENTO DE MEDICION
<u>Independiente</u>			
Proporción de Polvo de piedra	Polvo de piedra de canto rodado	%	Balanza con sensibilidad
Proporción de Cal	Cal	%	Balanza con sensibilidad
Estabilización de suelos			
<u>Dependiente</u>			
	Proctor Modificado	%	Proctor modificado (MTC E115)
	Limites de Atteberg	%	NTP 339.129
	Contenido de humedad	%	NTP 339.127
	Granulometría	%	NTP 339.128
	Ensayo de CBR	%	NTP 339.145

## TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Mediante esta metodología, se busca obtener datos precisos que permitan entender de que manera estos materiales pueden mejorar la subrasante en pavimentos urbanos.

*Tabla XXI Recolección de datos*

TECNICA	INSTRUMENTO	APLICACION	PROPOSITO
Observación experimental	Fichas de registro de datos	Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de suelos arcillosos estabilizados con polvo de piedra de canto rodado	Obtener datos detallados para entender su comportamiento y como afectan las propiedades del suelo
Análisis de documentos	Fichas de registro	Recopilación y análisis de normativos, estudios previos	Contextualizar la investigación dentro del marco normativo y teórico existente

## PROCEDIMIENTO

### Ejecución de calicatas

Para el desarrollo de esta investigación y la identificación de los puntos de exploración, se inició con una revisión bibliográfica acerca de la ciudad y el área de estudio. Con base en la información recopilada, y apoyándonos en el mapa de riesgos proporcionado por INDECI, se seleccionaron la ubicación para la extracción de muestras, priorizando zonas cercanas y aquellas con presencia de suelos arcillosos.

El trabajo de campo involucra la apertura de tres puntos de exploración, identificados como C1, C2 y C3, alcanzando una profundidad de 1.5 metros en cada uno. En cada punto se recolecto una muestra de suelo, dicho material obtenido será fundamental para alcanzar los objetivos establecidos en la investigación. Este proceso asegura la recolección de datos para entender las condiciones del terreno.

*Tabla XXII Coordenadas*

<b>Calicata</b>	<b>Coordenadas</b>	
	Este	Norte
<b>C-01</b>	630840.48	9254250.85
<b>C-02</b>	630981.66	9254222.87
<b>C-03</b>	631122.82	9254197.95

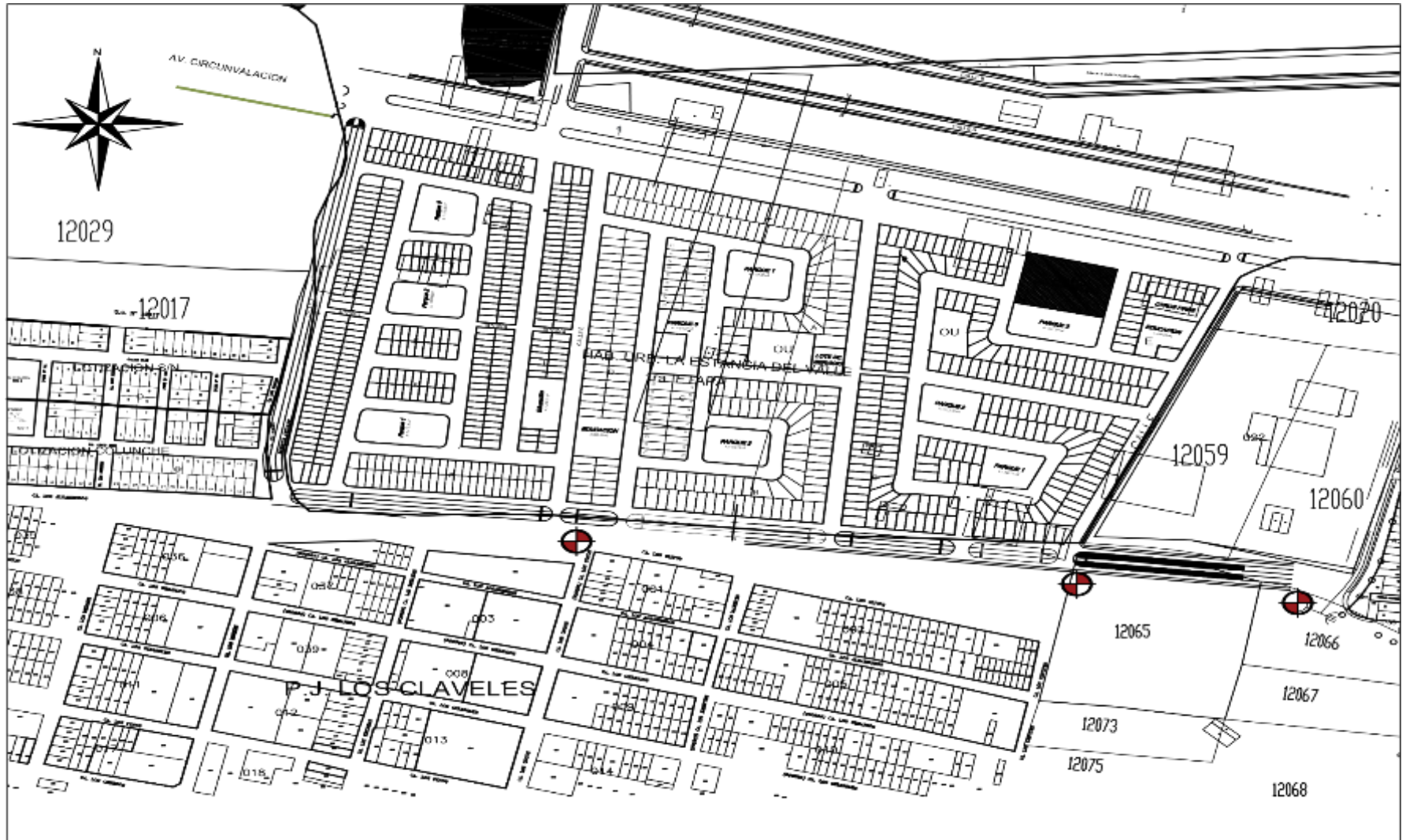


Fig. 12 Ubicación de Calicatas

Durante el proceso de muestro de suelos, se registraron y describieron detalladamente los estratos identificados en las tres calicatas excavadas. Para cada estrato se documentaron sus principales características, incluyendo la profundidad, el espesor, el color, el grado de humedad, entre otros aspectos.

Las muestras recolectadas fueron clasificadas y seleccionadas de acuerdo con lo establecido en la NTP 339.150. Cabe destacar que, en ninguna de las tres calicatas exploradas, se detectó la presencia de nivel freático



**Fig. 14** Calicata 1



**Fig. 13** Calicata 2



**Fig. 15** Calicata 3

A continuación, se realizaron perfiles estratigráficos correspondientes a las tres calicatas, en los cuales se describieron las propiedades y características específicas del suelo en cada una de ellas.







## Ensayos de laboratorio

Las pruebas se realizaron en los laboratorios de la Universidad Santo Toribio de Mogrovejo, cumpliendo con las directrices especificadas en el manual de ensayos de materiales. Estos procedimientos se realizaron considerando en función al suelo en estado natural, posteriormente se le incorporaron dicho aditivo para analizar su comportamiento en el suelo.

Ensayos de Análisis Granulométrico: MTC E 107

Ensayo de Contenido de Humedad: MTC E 108

Ensayo de Límites de Atterberg: MTC E 110

Ensayos de la Gravedad Específica Relativa a los sólidos: MTC E 113

Ensayos de Proctor Modificado: MTC E 115

Ensayos de CBR: MTC E 133

### Desarrollo en laboratorio:

#### *Ensayo de Análisis Granulométrico por tamizado*

El procedimiento del ensayo se realizó utilizando una muestra previamente extraída de cada calicata, la cual fue pesada, lavada y secada. Posteriormente, la muestra fue sometida a un proceso de tamizado empleado una serie de tamices estándar con diferentes tamaños de apertura. Durante el proceso se registró el peso del material que se retenía en cada malla para calcular la distribución granulométrica y evaluar las características del material.



**Fig. 16** Análisis Granulométrico por Tamizado



**Fig. 17.** Clasificación Granulométrica por Tamizado

### **Análisis Granulométrico de suelos por hidrómetro**

Se recolecta una porción del suelo y se deja en el horno hasta eliminar todo rastro de humedad. Posteriormente, se realiza una clasificación granulométrica mediante el tamiz de malla 200 . El material filtrado se sumerge en el agua destilada durante 24 horas previamente habiendo agitado la probeta. Esto nos garantiza la disolución completa y de las partículas en suspensión. Una vez pasado dicho tiempo, se introduce un densímetro calibrado y se registra datos en intervalos de 1 ,2,4,8,15,30,60,120,240,360,720 y1440. Las variaciones en la gravedad especifican del fluido, permiten modelar la curva de distribución de partículas.



**Fig. 18** Análisis de suelo por Hidrometría

### ***Ensayo de Contenido de Humedad***

Para llevar a cabo dicho ensayo, se extrajo una muestra del suelo natural, la cual fue pesada inicialmente para determinar su peso húmedo. Posteriormente, la muestra fue colocada en un horno durante un periodo de 24 horas. Al finalizar el secado, se volvió pesar la muestra para registrar su peso seco.



**Fig. 19** Ensayo de Contenido de humedad



**Fig. 20.** Muestras al horno

### *Ensayos de Limites de Atterberg*

En dicho ensayo para limite liquido se ha realizado para 3 calicatas, se ha utilizado una muestra previamente triturada y tamizada a través de la malla N°40. Se separaron 150g que es lo mínimo según norma MTC E 110, los cuales fueron saturados con agua destilada durante 24 horas. Para determinar, se empleó la cuchara de Casagrande, realizando golpes que varían de 15, 25 y 35, lo cual determinaremos en que rango se cierra la muestra, junto a ello también se extrae y se pesa según el golpe que ha dado que posteriormente se procede al secado para obtener su humedad.

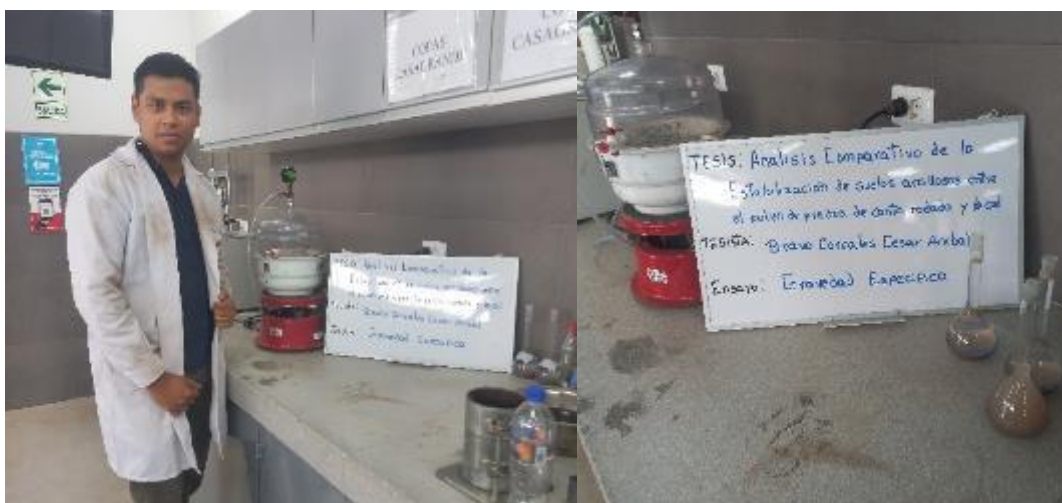
Para determinar el límite plástico, se moldearon cilindros de aproximadamente 3 mm de diámetro a partir de las muestras de cada calicata. Inicialmente, se pesaron las muestras en su estado natural, y luego se colocaron en un horno a una temperatura constante de 110°C durante 24 horas. Una vez finalizado el secado, se procedió a pesar, lo que permite calcular el contenido de humedad y determinado así el índice de plasticidad.



**Fig. 21.** Ensayos de Limites de Atterberg

### ***Ensayo de Gravedad Especifica Relativa a los Solidos***

En este ensayo, se toma una muestra seca y triturada, la cual se tamiza utilizando el tamiz N°10. Se Pesa 50 gramos y posteriormente se dispone en una fiola, donde se le añade agua destilada. Una vez realizado pesamos y dejamos sedimentar por 24 horas. Así mismo para asegurar que se eliminen todos los vacíos se coloca dentro de la máquina de vacío. Finalmente se pesa y con los valores obtenidos se procede a sacar el peso específico del suelo.



**Fig. 22.** Ensayo de Gravedad Especifica

### ***Ensayo de Proctor Modificado***

Para llevar a cabo este ensayo, se inicia tamizando la muestra con la malla n°4 y seleccionando 2.5 kg para trabajar con cuatro diferentes porcentajes de agua. La muestra se satura durante un día completo para mantener una distribución de manera equilibrada de la humedad. Posteriormente, se procede a compactarla en un molde, aplicando el procedimiento en cinco capas, con 25 golpes por cada. Al finalizar, se pesa el molde de junto con la muestra compactada, completando así el proceso de medición.



**Fig. 23.** Ensayo Proctor Modificado

### ***Ensayo de California Bearing Ratio (CBR)***

En este ensayo, se utiliza una muestra tamizada con la malla N°4, para lo cual se requieren 5kg distribuidos en tres puntos. La muestra se satura durante un día, almacenándola en bolsas para mantener la humedad. Posteriormente, se compacta los moldes empleando un pistón, aplicando 65,25 y 12 golpes según corresponda. Una vez compactados, los moldes se sumergen en una poza de agua durante cuatros días, midiendo la expansión por cada 24 horas. Finalmente, se realiza la prueba de penetración para determinar el CBR.



**Fig. 24.** Ensayo de CBR



**Fig. 25** CBR CAL y Polvo de Piedra

### ***Ensayo de Análisis Químico por Fluorescencia de Rayos X para Polvo de Piedra de Canto Rodado***

Se realizó un análisis químico de la propiedad del polvo de piedra de canto rodado. El análisis se realizó mediante la determinación de la composición química de la muestra empleando fluorescencia de rayos X, técnica que permite la identificación y cuantificación de los elementos. Para este análisis se tomó una muestra de 50 mg que fue analizada en un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, marca Bruker, modelo S2-PICOFOX, siguiendo los criterios de la norma ASTM C25, la cual proporciona datos fidedignos sobre los componentes químicos de la muestra.



**Fig. 26.** Modelo S2-PICOFOX

### ***Método de Ensayo Penetrómetro Dinámico de Cono***

Se realizó el ensayo de DCP con la finalidad de confirmar los resultados obtenidos en el laboratorio. Dicho procedimiento se realizó en una parcela de 2\*1\*0.4m , donde se compacto capa por capa. Así mismo este procedimiento del ensayo nos va a permitir comprar los valores del CBR obtenidos en laboratorio con las mediciones realizadas directamente en el campo.



**Fig. 27** Ensayo DCP 1



**Fig. 28** Ensayo DCP 2

### *Densidad de Campo*

Se ha tomado en consideración la densidad de campo para evaluar el desempeño del polvo de piedra de canto rodado y la cal, además evaluar su grado de compactación tanto natural, el polvo de piedra y el aditivo. Es importante conocer como esta compactado el suelo, ya que influye su comportamiento frente a cargas. Esto es esencial conocer para mejorar las propiedades del suelo, lo que esto va a contribuir a la mejor del terreno.



**Fig. 29** Ensayo Cono de arena 1



**Fig. 30** Cono de arena 2

### ***Proceso de Obtención del polvo de piedra de canto Rodado***

Para la obtención del material aditivo, se llevó a cabo una visita de campo a la Cantera Guayabo, ubicada en el distrito de Llama. Durante esta inspección, se identificó la presencia de un volumen significativo del material residual generado por las actividades de la cantera. Como se puede evidenciar este desperdicio normalmente no se tiene conocimiento sus usos.

### ***Información geográfica de la cantera***



**Fig. 31.** Ubicación Geográfica



**Fig. 32.** Planta Trituradora



**Fig. 33.** Recolección del Polvo de piedra

Además, el dueño de la cantera compartió información sobre la producción diaria de materiales. Según sus declaraciones, generan aproximadamente 30m<sup>3</sup>/día, 1/2 " de 40m<sup>3</sup>/día, confitillo 15 m<sup>3</sup>/día y 2m<sup>3</sup>/día del material objeto de estudio.

## **Resultados y discusión**

### ***Resultados***

En este desarrollo se presentarán los datos obtenidos de los ensayos realizados en las muestras de suelo arcillosos, tanto en su estado natural como en aquellas a las que se les incorporaron aditivo. El agente estabilizador fue el polvo de piedra de canto rodado, proveniente de la cantera Guayabo, distrito de Llama, departamento de Cajamarca. Este aditivo se aplicó en los porcentajes previamente explicados. Así mismo se realizaron ensayos para analizar las propiedades físicas del suelo con el objetivo de clasificarlo según las normativas AASHTO Y SUCS. En cuanto a las propiedades mecánicas, se llevaron a cabo pruebas para evaluar las condiciones del suelo y , de ese modo identificar aquellos con las condiciones más adversas y variadas. Los resultados obtenidos y procesados son esenciales para avanzar en el cumplimiento de los objetivos establecidos en esta investigación. Por lo tanto, se iniciará el análisis con base en los objetivos alcanzados.

## **ANALIZAR SU ESTRUCTURA MINERALÓGICA DE LA PIEDRA CANTO RODADO QUE SE OBTENDRÁ EL POLVO PARA LA INVESTIGACIÓN**

### **Análisis químico del polvo de canto rodado proveniente de la cantera guayabo**

#### **Características químicas**

El análisis se realizó en un espectrómetro de fluorescencia total de rayos x marca BRUKER, modelo S2-PICOFOX el tiempo de medida fue de 2000 segundos.

*Tabla XXIII Componentes Químicos*

<b>COMPOSICION QUIMICA</b>	<b>RESULTADOS (%)</b>	<b>METODO UTILIZADO</b>
<b>Calcio</b>	35.39	Espectrometría de fluorescencia de rayos x
<b>Silicio</b>	53.12	
<b>Aluminio</b>	6.9	
<b>Hierro</b>	0.61	
<b>Sodio</b>	1.5	
<b>Magnesio</b>	0.21	
<b>Potasio</b>	1.53	
<b>Perdida por Quemado</b>	8.2	

A partir del análisis, se observa que el calcio representa un valor de 35.39% siendo un valor clave para mejorar la resistencia del suelo a través de reacciones químicas. El silicio (53.12%) y el aluminio (6.9%) también son importantes, ya que contribuyen a la estabilidad del suelo. Los resultados obtenidos son relevantes para la capacidad de soporte del suelo, ya que un mayor contenido indicara indicios de mejorar. Además, factores como la humedad, temperatura, y tipo de compactación también influirán en las propiedades del suelo y su desempeño en pruebas como el CBR.

#### **DETERMINAR LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL SUELO ARCILLOSO EN ESTADO NATURAL MEDIANTE UN POZO EXPLORATORIO.**

##### **CARACTERIZACION DE MUESTRAS DE ESTADO NATURAL**

Así mismo las muestras analizadas fueron recolectadas directamente en campo, específicamente las calicatas C-01, C-02 y C-03, siguiendo las medidas y procedimientos adecuados para el muestreo. Para llevar a cabo determinar las propiedades físico-mecánicas del suelo extraído se llevaron a cabo diversos ensayos y en consecuentes se presentan los resultados obtenidos de dichas pruebas.

##### **CONTENIDO DE HUMEDAD**

Este ensayo fue realizado conforme al manual de ensayos, con el propósito de medir la relación del peso del agua y el de los sólidos presentes en la muestra presentándose en lo siguiente.

Tabla XXIV Contenido de humedad del suelo natural

CALICATA	MUESTRA	Prof.(m)	Humedad (%)
C-01	M-01	1.5	22
C-02	M-01	1.5	22.63
C-03	M-01	1.5	23.9

Por lo tanto, de este modo se logró obtener los resultados de laboratorio de las muestras en su estado natural, obteniéndose un valor de humedad inicial de 22% para C-01, de 22.63% para C-02 y de 23.9% para C-03, por lo que a partir de esos datos se puede establecer que la humedad promedio del suelo arcilloso es del 22.84%.

### GRANULOMETRIA POR TAMIZADO

De acuerdo con la norma MTC E-107, se ensaya la granulometría mediante tamizado de una muestra que ha sido previamente lavada. Para el ensayo, el suelo se encuentra en su estado natural (el procedente de las tres calicatas) con la finalidad de determinar la clasificación de los suelos.

Tabla XXV Granulometría por Tamizado en suelo natural

CALICATA	MUESTRA	Grava (%) 75.00-	Arena (%) 4.75-	Limo/arcilla (%)
		4.75mm	0.075mm	<0.075 mm
C-01	M-01	0	4.6	95.4
C-02	M-01	0	11.5	88.5
C-03	M-01	0	6.6	93.4

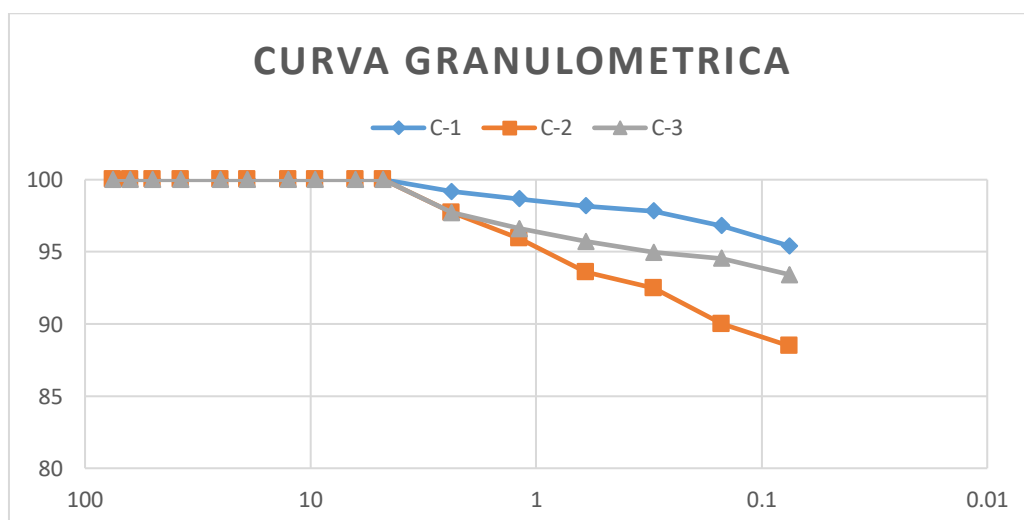
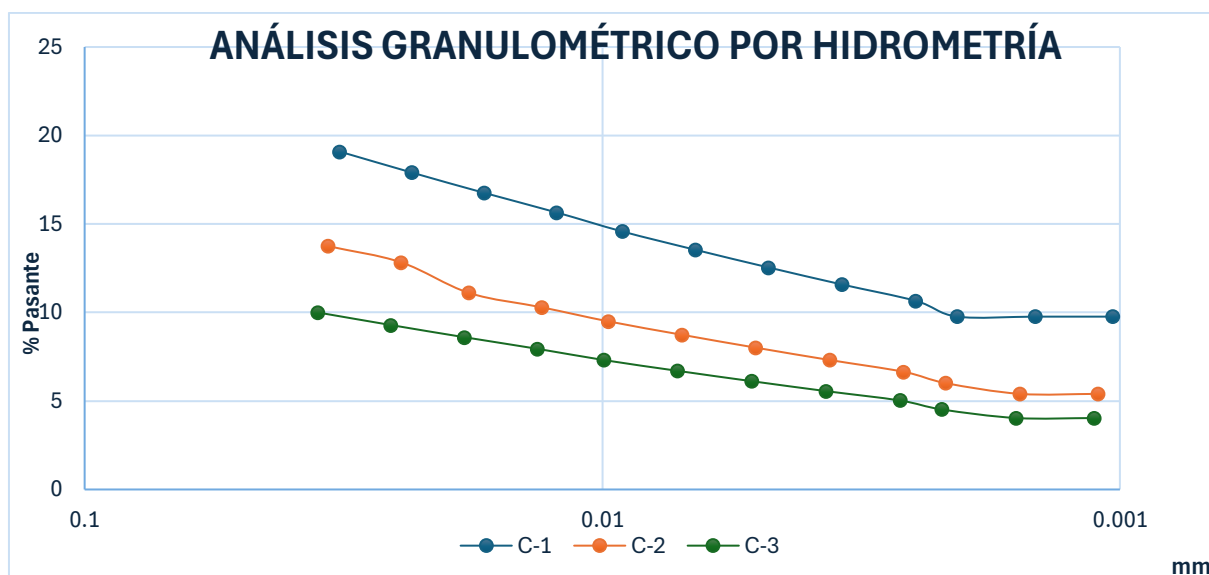


Fig. 34 Curva granulométrica

Según la Fig. 34, se observa que más del 80% de la muestra pasa a través de la malla N°200, lo que indica que está compuesta en su mayoría por finos. Esto sugiere que el suelo está predominantemente formado por limos y arcillas.

### ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR SEDIMENTACION

Se realizó el ensayo de hidrometría siguiendo el procedimiento MTC E 109 en la fracción fina de la muestra, compuesta por las partículas que atraviesan la malla N40 en estado natural. Como se evidencia esta se realizó en tres calicatas para determinar cómo se distribuyen los tamaños de las partículas, lo cual es esencial para comprender las características granulométricas de la muestra y su comportamiento en condiciones naturales.



**Fig. 35** Análisis Granulométrico por Hidrometría

Se presenta en la Fig.35 la distribución de las partículas finas de 3 calicatas realizadas, mostrando un tamaño máximo cercano a los 0.04 mm. Este ensayo tiene como objetivo identificar las partículas finas en suspensión dentro de la muestra. A través de los resultados se puede observar una distribución bastante homogénea y uniforme entre las calicatas.

### GRAVEDAD ESPECIFICA RELATIVA A LOS SOLIDOS

Se determinó para las 3 calicatas, este valor es esencial para calcular las relaciones de fase del suelo, como la relación de vacíos y el grado de saturación, los cuales son indicadores clave para entender la estructura interna del suelo.

*Tabla XXVI* Peso Específico del suelo natural

C-01	C-02	C-03
2.525	2.532	2.584

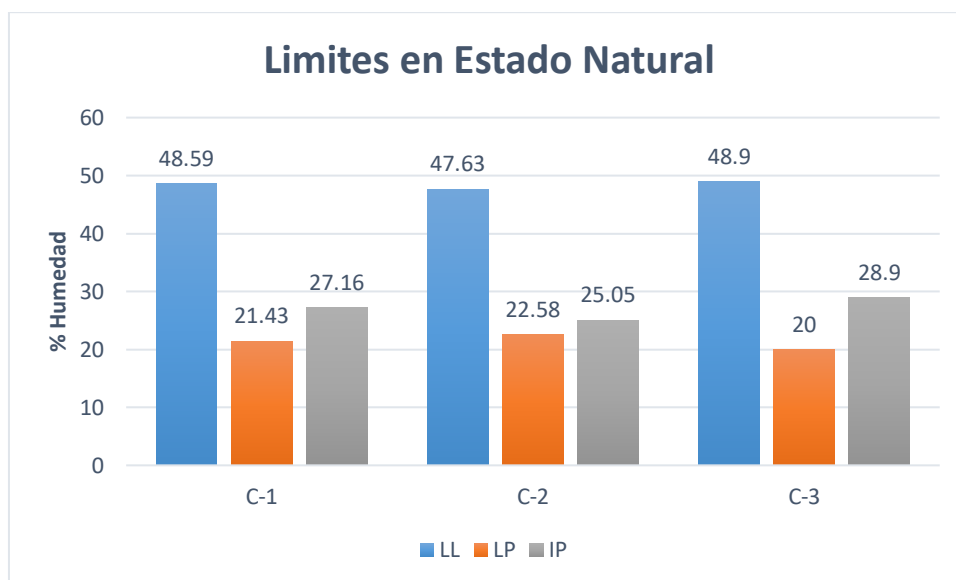
La presente metodología está enfocada en determinar las relaciones de fase de los suelos, como por ejemplo la relación de vacíos y el grado de saturación del suelo con agua. Mediante el uso de esta metodología se obtuvieron un peso específico de 2.525 para la muestra C-01, 2.532 para la muestra C-02 y 2.584 para la muestra C-03, llegando a la conclusión que el peso específico medio para las muestras naturales era de 2.547 g/m<sup>3</sup>.

### LIMITES DE CONSISTENCIA DE MUESTRAS NATURALES

Los límites de consistencia se refieren a los porcentajes de humedad en los que un suelo cambia de un estado a otro de consistencia como de sólido a plástico o de plástico a líquido. Para determinar estos límites, se sigue la normativa establecida por las normas MTC E-110 y MTC E-111.

*Tabla XXVII Límites de Atterberg*

CALICATA	LL	LP	IP
C-1	48.59	21.43	27.16
C-2	47.63	22.58	25.05
C-3	48.9	20	28.9



**Fig. 36** Límites en estado natural

Según la tabla basándonos en su índice de plasticidad se evidencia que está por encima del  $IP > 20$  por lo que se caracteriza de ser un suelo muy arcilloso.

Tabla XXVIII Rangos de Plasticidad [44]

Índice de Plasticidad	Plasticidad	Características
IP > 20	Alta	Suelos muy arcillosos
IP ≤ 20 IP > 4	Media	Suelos arcillosos
IP < 4	Baja	Suelos poco arcillosos plasticidad
IP = 0	No plástico	Suelos exentos de arcilla

### PROCTOR MODIFICADO

Dicho ensayo se llevó a cabo conforme a la norma MTC -115. Este ensayo tiene como objetivo determinar la humedad óptima necesaria para alcanzar la máxima densidad seca de un suelo. Esto es importante ya que nos permite saber que el suelo adquiere una resistencia y estabilidad. Así mismo dicho ensayo obtendremos los valores de la máxima densidad seca (MDS) y el óptimo contenido de humedad (OCH).

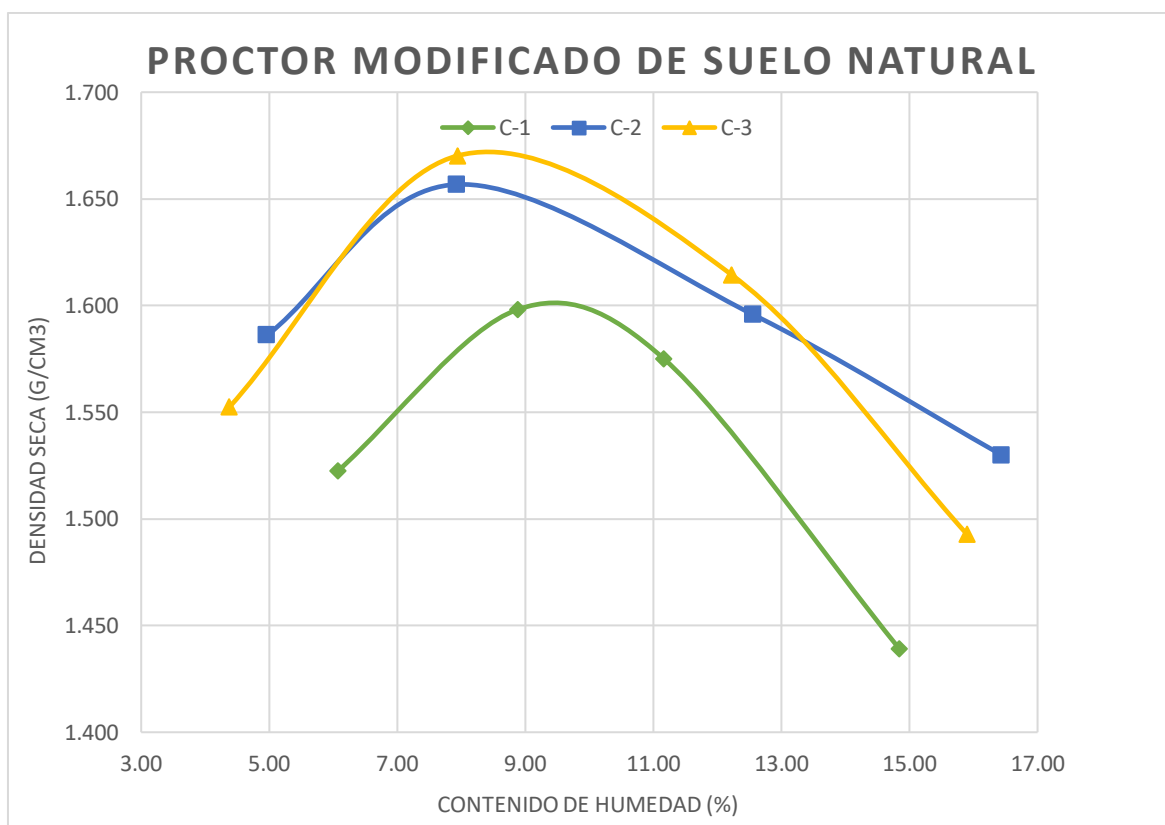


Fig. 37 Proctor Modificado de suelo natural

Tabla XXIX Ensayo de Proctor Modificado en suelo natural

CALICATA	MDS (gr/cm <sup>3</sup> )	OCH (%)
C-1	1.61	8.6
C-2	1.658	8.4
C-3	1.672	8.7

En estado natural, las muestras C-1, C-2 y C-3, presentan valores de Proctor modificado que reflejan la densidad seca máxima (MDS) y un contenido óptimo humedad relativamente bajos, típicos de suelos arcillosos. La densidad seca máxima (MDS) varía entre 1.61g/cm<sup>3</sup> y 1.672g/cm<sup>3</sup>. El contenido óptimo de humedad oscila entre 8.4% y 8.7% indicando que el suelo requiere un rango específico de humedad para alcanzar su máxima y compactación.

#### **CAPACIDAD DE SOPORTE (CBR)**

El CBR en el ensayo se ha realizado en función a las directrices de la norma MTCE-132, recogida en el Manual de Ensayos de Materiales del MTC. A partir de este procedimiento, obtuvimos los valores del CBR y el índice de expansión, después de las 9 muestras de las 3 calicatas fueren sumergidas en agua durante un periodo de 96 horas. En este caso, 96 horas representa el curado de las muestras.

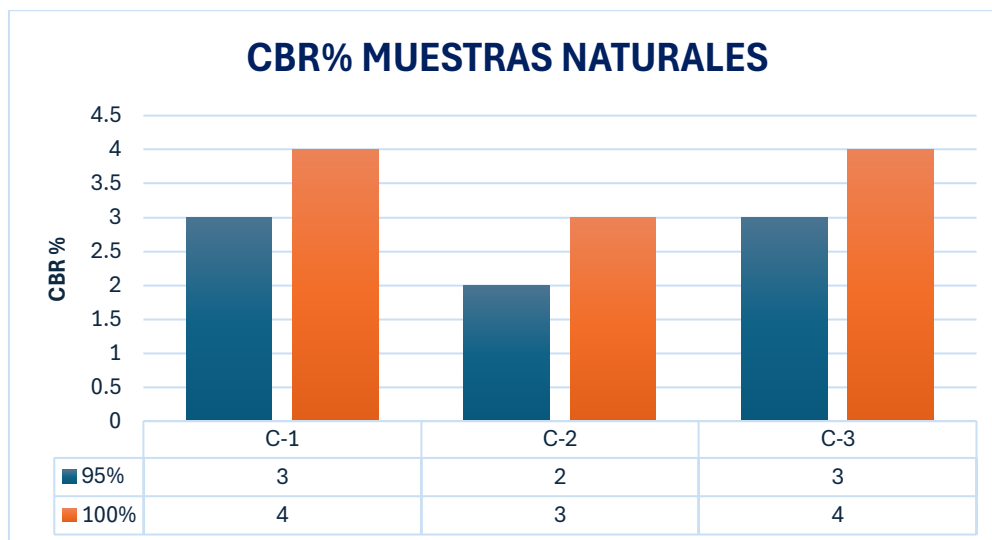


Fig. 38 CBR% Muestras Naturales

*Tabla XXX Ensayo de CBR del suelo natural*

CBR		
CALICATA	95%	100%
<b>C-1</b>	3	4
<b>C-2</b>	2	3
<b>C-3</b>	3	4

Tal y como se puede observar en la Tabla XXX, el suelo arcilloso tiene una baja capacidad de resistir la humedad con un mínimo de 2% y un máximo de 3% al 95% de la máxima densidad seca (MDS). Esta última, de acuerdo con las especificaciones del MTC, es inferior al 6%, razón por la cual no puede ser utilizado como subrasante, por lo que es necesario realizar un proceso de mejoramiento previo a su uso.

#### ***Cuadro Resumen de Suelo Natural***

*Tabla XXXI Resumen de ensayos de suelo natural*

SUELO NATURAL												
Calicata	Muestra	PROF.(m)	Humedad	CLASIFICACIÓN		LÍMITES DE ATTERBERG			PROCTOR MODIFICADO		CBR	
			W (%)	SUCS	AASHTO	L.L.	L.P.	I.P.	MDS (gr/cm <sup>3</sup> )	OCH (%)	0.95%	100%
C-1	100% SN	1.50	22	CL	A-7-6 (16)	48.59	21.43	27.16	1.61	8.6	3	4
C-2	100% SN	1.50	22.63	CL	A-7-6 (15)	47.63	22.58	25.05	1.658	8.4	2	3
C-3	100% SN	1.50	23.9	CL	A-7-6 (17)	48.9	20	28.9	1.672	8.7	3	4

El análisis presentado muestra que las muestras del suelo natural evaluada corresponden a suelos arcillosos con baja capacidad portante, según la clasificación SUC (CL) y AASHTO (A-7-6 y A-7-5), con humedades naturales entre 22% y 23.9%. Los límites de atterberg reflejan una plasticidad moderada a alta, lo que indica susceptibilidad a cambios volumétricos frente a variaciones de humedad. Los ensayos de Proctor Modificado arrojan densidades secas máximas de 1.61 a 1.67g/cm<sup>3</sup> y contenidos óptimos de humedad de 8.2% a 8.7%, mostrando la necesidad de un control estricto en la compactación. El índice CBR, con valores entre 2 y 4, evidencia que

estos suelos no son aptos para su uso directo en capas de subrasante sin procesos de mejora, según los estándares del manual del MTC.

**DETERMINAR LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL SUELO DE LA SUBRASANTE AL AÑADIR POLVO DE PIEDRA CANTO RODADO EN DIFERENTES CONCENTRACIONES, ESPECÍFICAMENTE EN 0% ,20% ,30% Y 40% EN PESO DEL SUELO SECO.**

#### **ENSAYOS DE MUESTRAS EXPERIEMETALES CON ADICION**

Los ensayos se realizaron con la adición de 20,30 y 40% en relación con estado natural del suelo, esta adición nos permitirá observar y evaluar cómo se comporta el material bajo estas condiciones, lo cual será evidenciado en los resultados de los ensayos posteriores.

#### **LIMITES DE CONSISTENCIA**

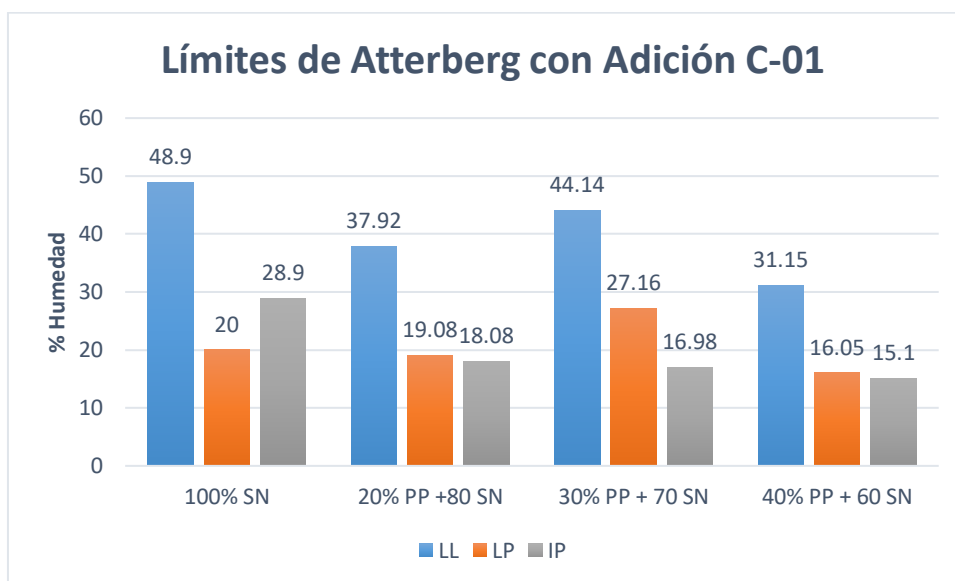
Según las tablas proporcionadas por el ensayo podemos observar que el índice de plasticidad existe una disminución con respecto al suelo natural. Esta reducción es favorable en termino de mejoramiento de suelo, ya que un menor IP indica que el suelo tiene una menor tendencia a deformarse bajo carga o cambio de humedad.

#### **LIMITES DE ATTERBERG C-1**

En la tabla se detallan los valores obtenidos para los límites de consistencia en las muestras C-01 , mientras que la gráfica refleja el comportamiento de estas propiedades a medida que se van realizando las adiciones correspondientes.

*Tabla XXXII Límites de Atterberg con Adición C-01*

	<b>C-01</b>		
<b>DOSIFICACION</b>	LL	LP	IP
<b>100% SN</b>	48.59	21.43	27.16
<b>20% PP +80 SN</b>	37.28	18.97	18.31
<b>30% PP + 70 SN</b>	39.43	21.96	17.46
<b>40% PP + 60 SN</b>	36.25	20.57	15.68



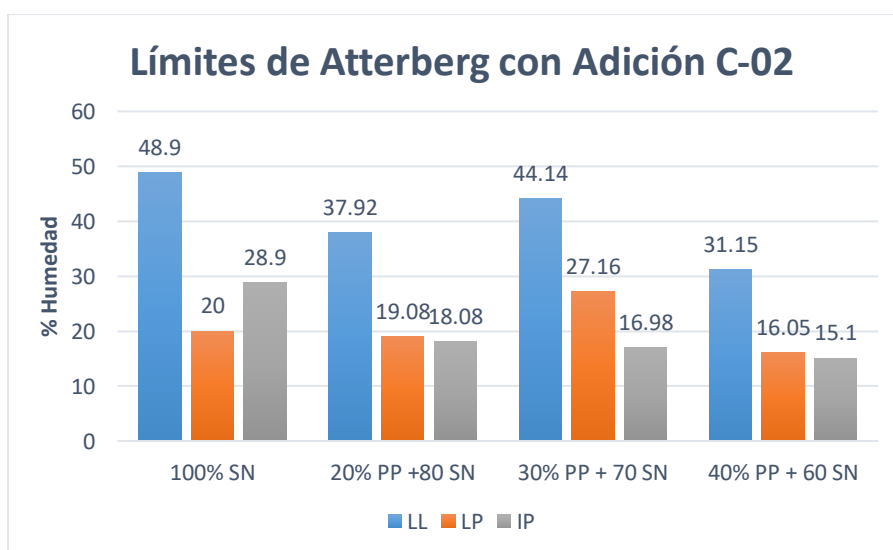
**Fig. 39** Límites de Atterberg con Adición C-01

### **LIMITES DE ATTERBERG C-2**

En la tabla se indican los valores registrados para los límites de consistencia en las muestras C-02, mientras que la gráfica muestra como varían estas propiedades conforme se efectúan las adiciones correspondientes.

*Tabla XXXIII Límites de Atterberg con Adición C-02*

<b>C-02</b>			
<b>DOSIFICACION</b>	LL	LP	IP
<b>100% SN</b>	47.63	22.58	25.05
<b>20% PP + 80 SN</b>	39.11	20.55	18.56
<b>30% PP + 70 SN</b>	40.56	23.72	16.83
<b>40% PP + 60 SN</b>	35.64	20.77	14.86



**Fig. 40** Límites de Atterberg con Adición C-02

### LIMITES DE ATTERBERG C-3

La tabla presenta los valores obtenidos para los límites de consistencia en la muestra C-03, mientras que la gráfica ilustra como cambian estas propiedades a medida que se realizan las adiciones correspondientes

Tabla XXXIV Límites de Atterberg con Adición C-03

C-03			
DOSIFICACION	LL	LP	IP
100% SN	48.9	20	28.9
20% PP +80 SN	37.92	19.08	18.08
30% PP + 70 SN	44.14	27.16	16.98
40% PP + 60 SN	31.15	16.05	15.10

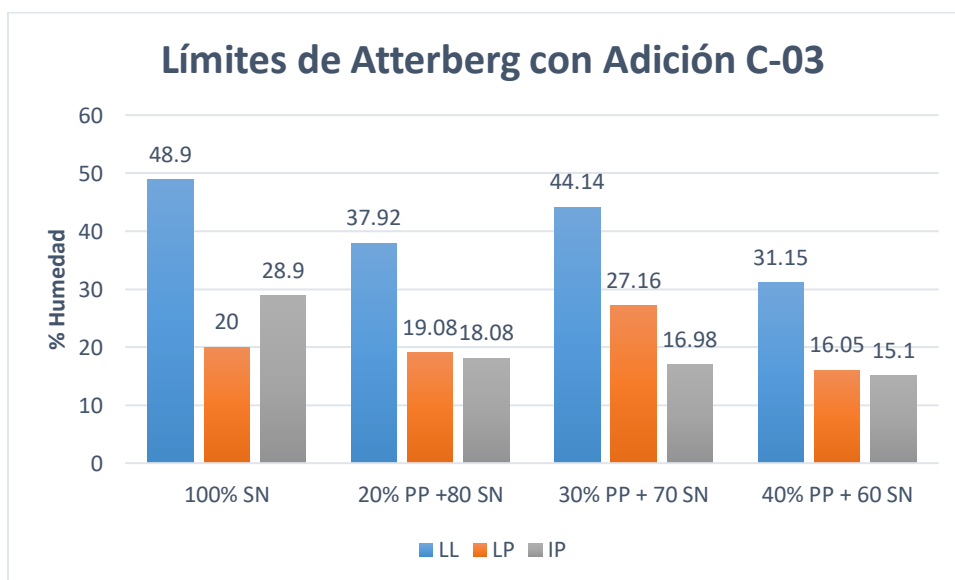


Fig. 41 Límites de Atterberg con Adición C-03

El análisis de las muestras C-01, C-02 y C-03 indica una reducción en los límites líquidos (LL) y plástico (LP) tras la adición del polvo de piedra. Esto sugiere una mejora sobre todo en la trabajabilidad del suelo y una disminución en su plasticidad, evidenciada también por una reducción en el índice plástico (IP). Esta modificación es consistente con la estabilización mecánica, resultando un suelo menos susceptible a deformaciones por cambio de humedad. Por ejemplo, en la gráfica nos muestra que el C-01, LL disminuye de 48.59% a 37.28% y el IP de 27.16 a 18.31% notándose mejoras del suelo y esto es clave porque una menor plasticidad lo hace más resistente a deformaciones.

### **PROCTOR MODIFICADO**

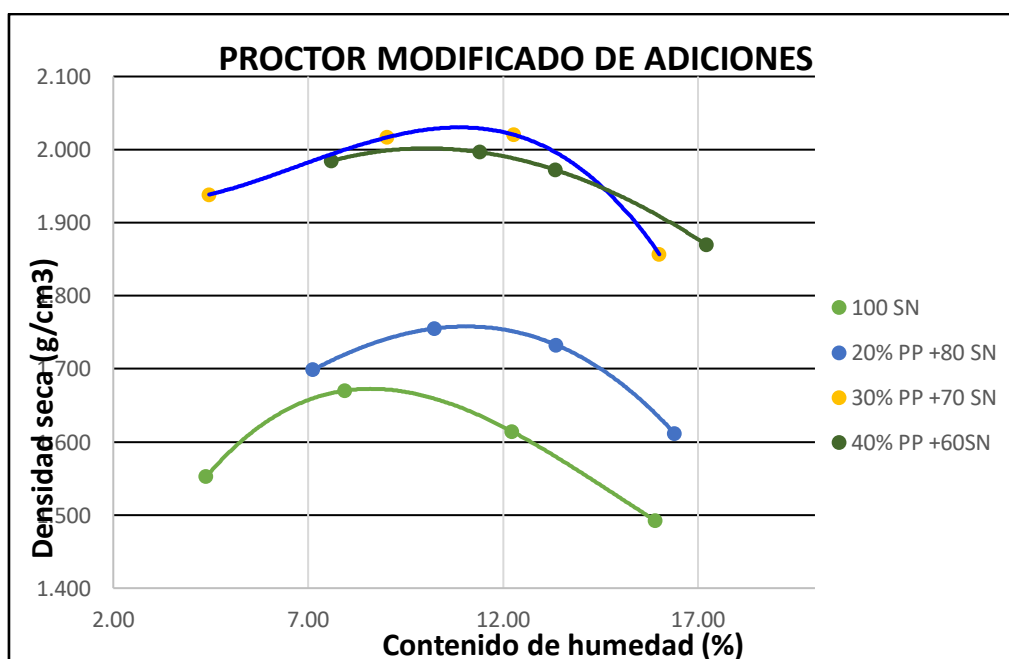
Según los resultados dado se evidencia un aumento en la densidad seca ha incrementado en comparación con el suelo en su estado natural. Así mismo el contenido el óptimo contenido de humedad también presenta un incremento. Estos cambios indican que la adición aplicada al suelo ha tenido un impacto significativo en sus propiedades tal como lo evidencia las siguientes tablas.

#### **PROCTOR MODIFICADO MUESTRA CON ADICION C-01**

La tabla XXXV refleja los resultados del ensayo Proctor efectuada sobre las muestras probadas C-01; de su parte, la gráfica muestra las curvas de compactación, las mismas que evidencian bien las variaciones experimentadas, demostrando los efectos de los diferentes parámetros probados.

*Tabla XXXV Proctor Modificado con adición C-01*

DOSIFICACION	C-01	
	MDS (gr/cm3)	OCH (%)
100% SN	1.61	8.6
20% PP +80 SN	1.77	11.1
30% PP +70 SN	1.985	9.67
40% PP +60SN	2.025	9.59



**Fig. 42** Proctor Modificado con Adiciones

### PROCTOR MODIFICADO MUESTRA CON ADICION C-02

Los resultados del ensayo Proctor de las muestras experimentales C-01 se detallan en la tabla que aparece a continuación. A su vez, la gráfica muestra las curvas de compactación en donde quedan reflejadas las variaciones experimentales.

Tabla XXXVI Proctor Modificado con adición C-02

C-02		
DOSIFICACION	MDS (gr/cm <sup>3</sup> )	OCH (%)
100% SN	1.658	8.4
20% PP +80 SN	1.742	9.34
30% PP +70 SN	2.016	10.05
40% PP +60SN	2.012	9.42

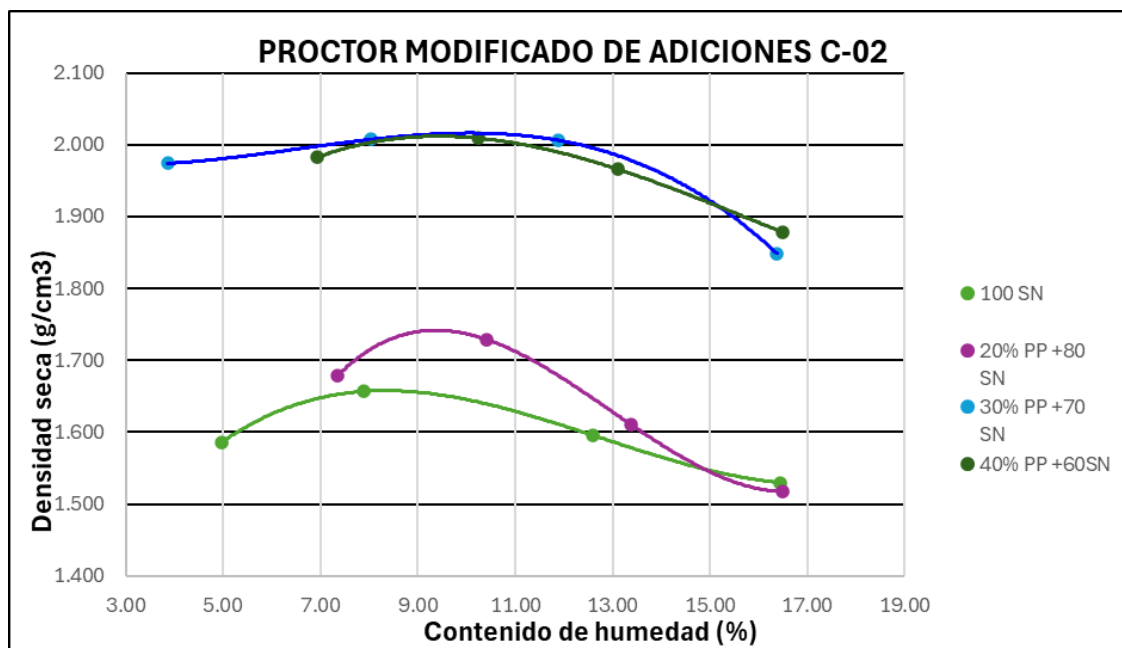


Fig. 43 Proctor Modificado de Adiciones C-02

### PROCTOR MODIFICADO MUESTRA CON ADICION C-03

Tabla XXXVII Proctor Modificado con adición C-03

DOSIFICACION	C-03	
	MDS (gr/cm <sup>3</sup> )	OCH (%)
100% SN	1.672	8.7
20% PP +80 SN	1.758	11.02
30% PP +70 SN	2.030	10.79
40% PP +60SN	2.002	10.11

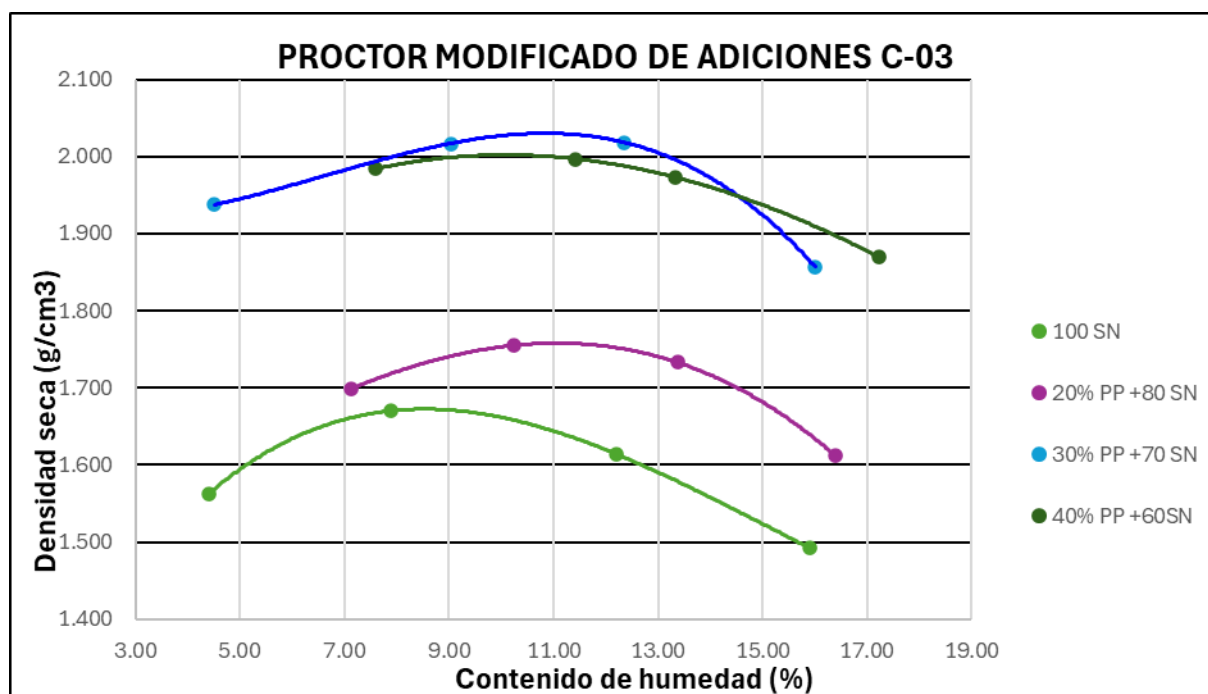


Fig. 44 Proctor Modificado de Adiciones C-03

La adición del material estabilizante ha mejorado las propiedades de compactación en todas las muestras. En C-01, la MDS aumenta de 1.51g/cm<sup>3</sup> a 1.77g/cm<sup>3</sup> (incremento del 9.9%), y el OCH pasa de 8.6% a 11.1% indicando mayor resistencia al compactarse con más agua. En C-02, la MDS sube de 1.658 g/cm<sup>3</sup> a 1.722 g/cm<sup>3</sup> un (3.9%), con un OCH que crece de 8% a 10.8%. De manera similar ocurre en C-03, la MDS mejora de 1.672g/cm<sup>3</sup> a 1.726g/cm<sup>3</sup> un (3.2% de mejora), con un OCH que sube de 8.7% a 10.2%. Estos resultados muestran que el uso del material estabilizante no solo incrementa la densidad del suelo, lo que implica una mayor capacidad portante, sino que también optimiza el óptimo contenido de humedad.

### ***CAPACIDAD DE SOPORTE- C-01***

En la siguiente tabla se consignan los resultados obtenidos del ensayo de capacidad de soporte aplicado a la muestra experimental C-02, evaluadas bajo condiciones de compactación correspondientes al 95% y 100% de la máxima densidad seca. Por otro lado, en las gráficas asociadas se muestran las curvas que relacionan la carga con la penetración, donde se aprecia las variaciones que esta propiedad experimente ante distintos grados de compactación.

*Tabla XXXVIII Capacidad de soporte (CBR) Polvo de piedra C-01*

<b>COMBINACIONES</b>	<b>C-01</b>	
	CBR (%) al 95% M.D. S	CBR (%) al 100% M.D. S
<b>Natural 100%</b>	3	4
<b>20% PP +80 SN</b>	5.16	7.22
<b>30% PP +70 SN</b>	6.98	8.34
<b>40% PP +60SN</b>	8.9	12.14

### ***CAPACIDAD DE SOPORTE- C-02***

En la tabla se presentan los resultados obtenidos del ensayo de capacidad de soporte realizado sobre la muestra experimental C-02, considerando condiciones de compactación correspondientes al 95% y al 100% de la máxima densidad sea. Asimismo, las gráficas asociadas muestran las curvas de carga en función de la penetración, donde se evidencian las variaciones en esta propiedad según el grado de compactación aplicado.

*Tabla XXXIX Capacidad de soporte (CBR) Polvo de piedra C-02*

<b>COMBINACIONES</b>	<b>C-02</b>	
	CBR (%) al 95% M.D. S	CBR (%) al 100% M.D. S
<b>Natural 100%</b>	2	4
<b>20% PP +80 SN</b>	5.98	6.86
<b>30% PP +70 SN</b>	6.56	9.46
<b>40% PP +60SN</b>	9.78	13.14

### ***CAPACIDAD DE SOPORTE- C-03***

La tabla muestra los resultados del ensayo de capacidad de soporte realizado sobre la muestra experimental C-03, considerando niveles de compactación equivalentes al 95% y al 100% de la densidad máxima seca. Además, las gráficas asociadas ilustran las curvas de carga frente a la

penetración, destacando como varía esta propiedad en función del grado de compactación aplicado.

*Tabla XL Capacidad de soporte (CBR) Polvo de piedra C-03*

COMBINACIONES	C-03	
	CBR (%) al 95% M.D. S	CBR (%) al 100% M.D. S
<b>Natural 100%</b>	2	4
<b>20% PP +80 SN</b>	5.92	6.74
<b>30% PP +70 SN</b>	7.14	11.4
<b>40% PP +60SN</b>	10.6	12.34

**DETERMINAR LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL SUELO DE LA SUBRASANTE AL AÑADIR CAL EN DIFERENTES CONCENTRACIONES, ESPECÍFICAMENTE EN 0% ,20% ,30% Y 40% EN PESO DEL SUELO SECO.**

#### **ENSAYOS DE MUESTRAS EXPERIEMETALES CON ADICION CAL**

Los ensayos se realizaron con la adición de 20,30 y 40% en relación con estado natural del suelo, esta adición nos permitirá observar y evaluar cómo se comporta el material bajo estas condiciones, lo cual será evidenciado en los resultados de los ensayos posteriores.

#### **LIMITES DE CONSISTENCIA**

Según las tablas proporcionadas por el ensayo podemos observar que el índice de plasticidad existe una disminución con respecto al suelo natural. Esta reducción es favorable en termino de mejoramiento de suelo, ya que un menor IP indica que el suelo tiene una menor tendencia a deformarse bajo carga o cambio de humedad.

#### **LIMITES DE ATTERBERG C-1**

En la tabla se detallan los valores obtenidos para los límites de consistencia en las muestras C-01, mientras que la gráfica refleja el comportamiento de estas propiedades a medida que se van realizando las adiciones correspondientes.

Tabla XLI Límites de Atterberg con Adición Cal C-01

<b>C-01</b>			
<b>DOSIFICACION</b>	<b>LL</b>	<b>LP</b>	<b>IP</b>
<b>100% SN</b>	48.9	20	28.9
<b>20% CAL +80 SN</b>	32.35	13.45	18.9
<b>30% CAL + 70 SN</b>	38.81	21.85	16.96
<b>40% CAL + 60 SN</b>	34.5	23.35	11.15

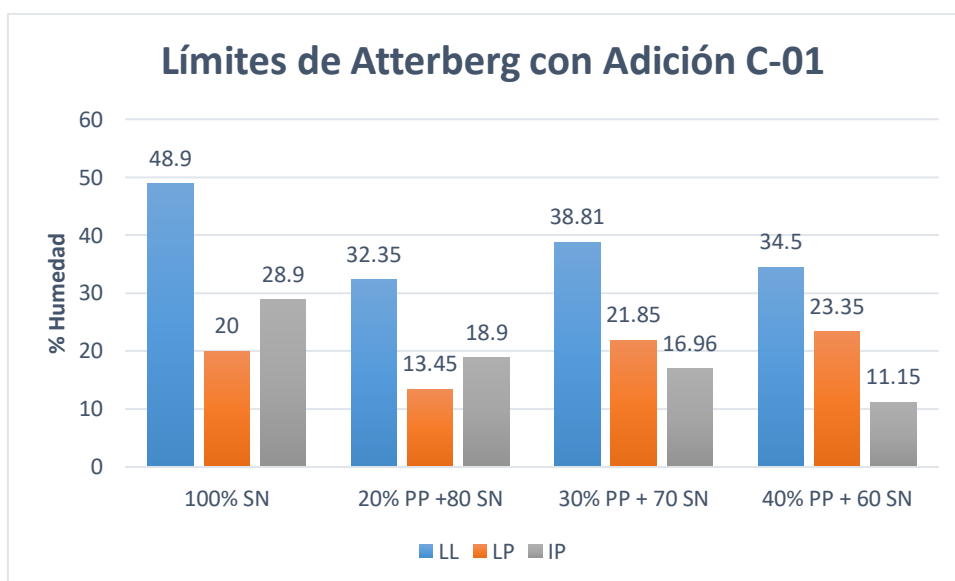


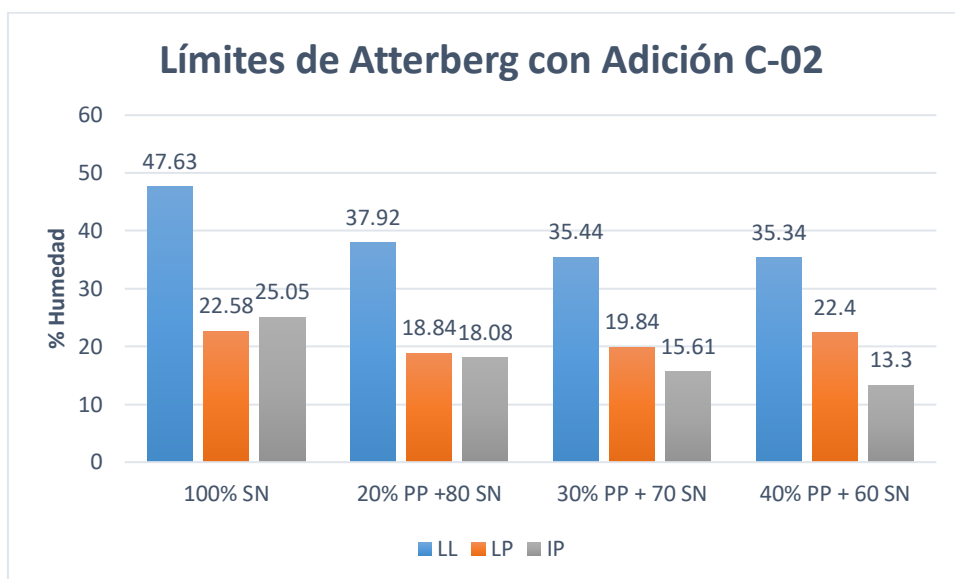
Fig. 45 Límites de Atterberg con Adición C-01

### **LIMITES DE ATTERBERG C-2**

En la tabla se indican los valores registrados para los límites de consistencia en las muestras C-02, mientras que la gráfica muestra como varían estas propiedades conforme se efectúan las adiciones correspondientes.

Tabla XLII Límites de Atterberg con Adición Cal C-02

<b>C-02</b>			
<b>DOSIFICACION</b>	<b>LL</b>	<b>LP</b>	<b>IP</b>
<b>100% SN</b>	47.63	22.58	25.05
<b>20% CAL +80 SN</b>	37.92	18.84	18.08
<b>30% CAL + 70 SN</b>	35.44	19.84	15.61
<b>40% CAL + 60 SN</b>	35.34	22.4	13.3



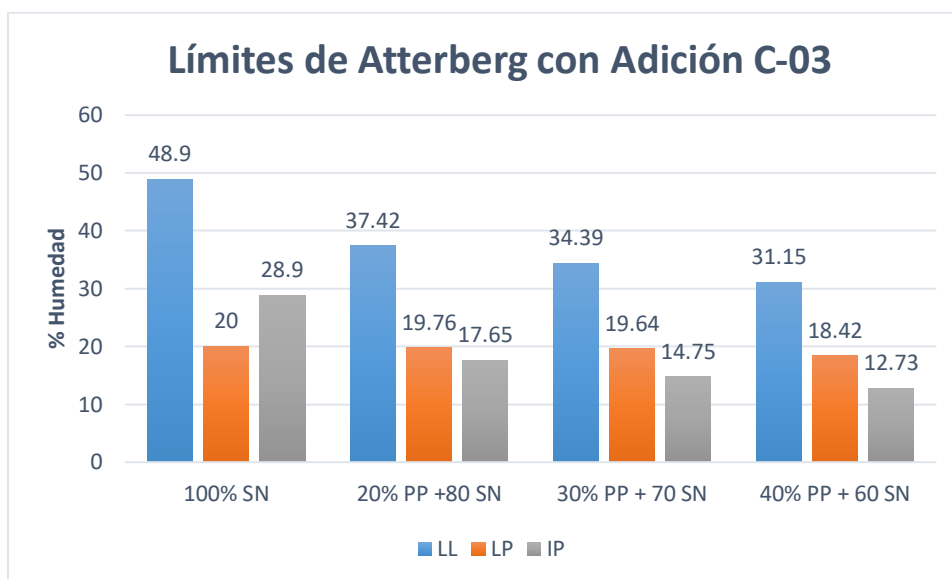
**Fig. 46** Límites de Atterberg con Adición C-02

### **LIMITES DE ATTERBERG C-3**

La tabla presenta los valores obtenidos para los límites de consistencia en la muestra C-03 , mientras que la gráfica ilustra como cambian estas propiedades a medida que se realizan las adiciones correspondientes.

*Tabla XLIII Límites de Atterberg con Adición Cal C-03*

<b>DOSIFICACION</b>	<b>C-03</b>		
	LL	LP	IP
<b>100% SN</b>	48.9	20	28.9
<b>20% CAL + 80 SN</b>	37.42	19.76	17.65
<b>30% CAL + 70 SN</b>	34.39	19.64	14.75
<b>40% CAL + 60 SN</b>	31.15	18.42	12.73



**Fig. 47** Límites de Atterberg con Adición C-03

El análisis de las muestras C-01, C-02 y C-03 indica una reducción en los límites líquidos (LL) y plástico (LP) tras la adición del polvo de piedra. Esto sugiere una mejora sobre todo en la trabajabilidad del suelo y una disminución en su plasticidad, evidenciada también por una reducción en el índice plástico (IP). Esta modificación es consistente con la estabilización mecánica, resultando un suelo menos susceptible a deformaciones por cambio de humedad. Por ejemplo, en la gráfica nos muestra que el C-01, LL disminuye de 48.59% a 37.28% y el IP de 27.16 a 18.31% notándose mejoras del suelo y esto es clave porque una menor plasticidad lo hace más resistente a deformaciones.

### ***PROCTOR MODIFICADO***

Según los resultados dado se evidencia un aumento en la MDS que ha incrementado con respecto al suelo en su estado natural. Así mismo el contenido el óptimo contenido de humedad también presenta un incremento. Estos cambios indican que la adición aplicada al suelo ha tenido un impacto significativo en sus propiedades tal como lo evidencia las siguientes tablas.

### ***PROCTOR MODIFICADO MUESTRA CON ADICION C-01***

En la tabla se consignan las muestras del ensayo Proctor realizado sobre las muestras experimentales C-01. Por su parte, la gráfica presenta las curvas de compactación, donde se puede observar claramente las variaciones experimentadas reflejando los efectos de los diferentes parámetros evaluados durante el proceso.

Tabla XLIV Proctor Modificado con adición Cal C-01

DOSIFICACION	C-01	
	MDS	OCH
	(gr/cm <sup>3</sup> )	(%)
100% SN	1.61	8.6
20% CAL +80 SN	1.8	12.74
30% CAL +70 SN	1.856	12.32
40% CAL +60SN	1.918	13.8

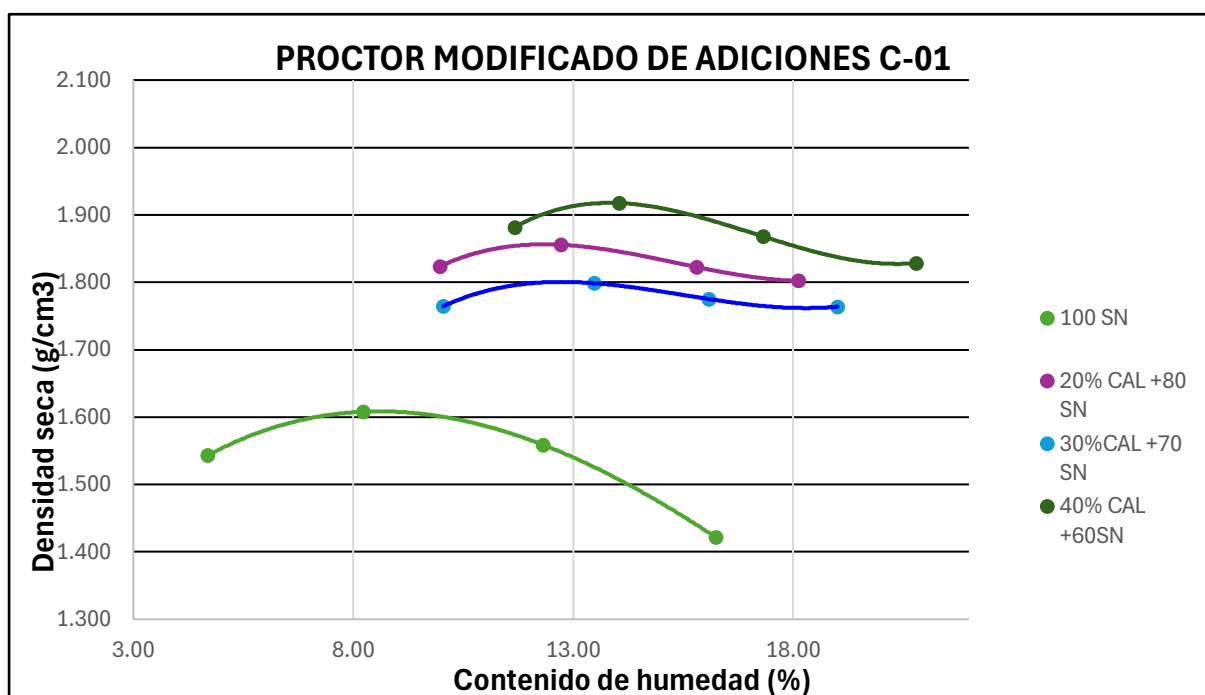


Fig. 48 Proctor Modificado de Adiciones C-01

#### PROCTOR MODIFICADO MUESTRA CON ADICION C-02

La tabla exhibe el resultado del ensayo Proctor que fue llevado a cabo en función de las muestras experimentales C-01. La gráfica, por su parte, exponen las curvas de compactación, donde se pueden observar las variaciones experimentales.

Tabla XLV Proctor Modificado con adición Cal C-02

<b>C-02</b>		
<b>DOSIFICACION</b>	<b>MDS</b>	<b>OCH</b>
	(gr/cm3)	(%)
<b>100% SN</b>	1.658	8.4
<b>20% CAL +80 SN</b>	1.813	14.16
<b>30% CAL +70 SN</b>	1.873	12.42
<b>40% CAL +60SN</b>	1.986	15.35

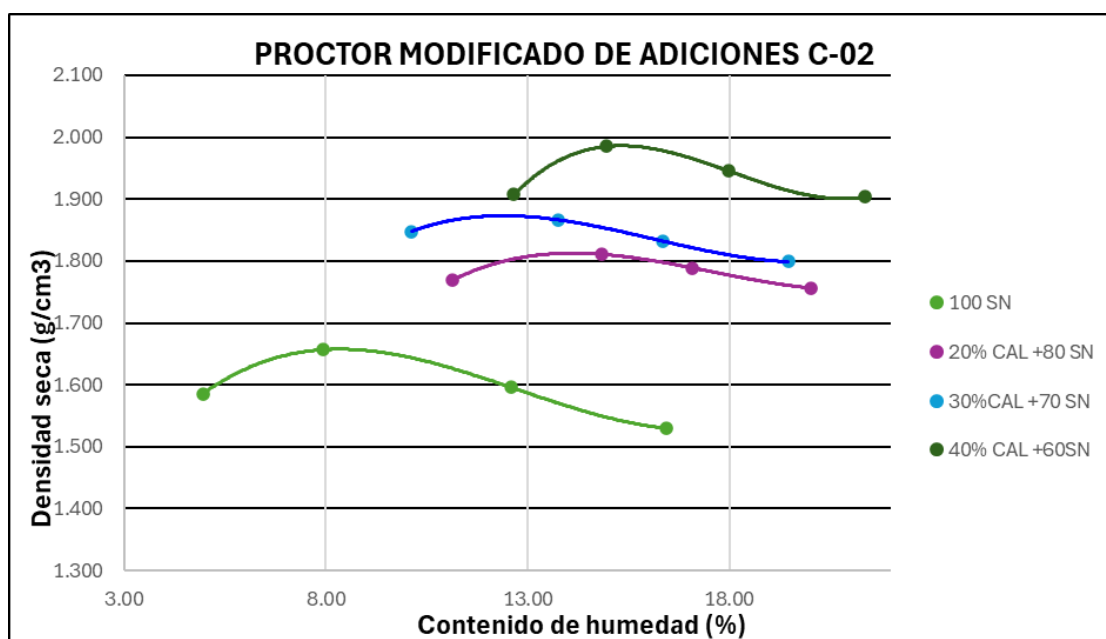
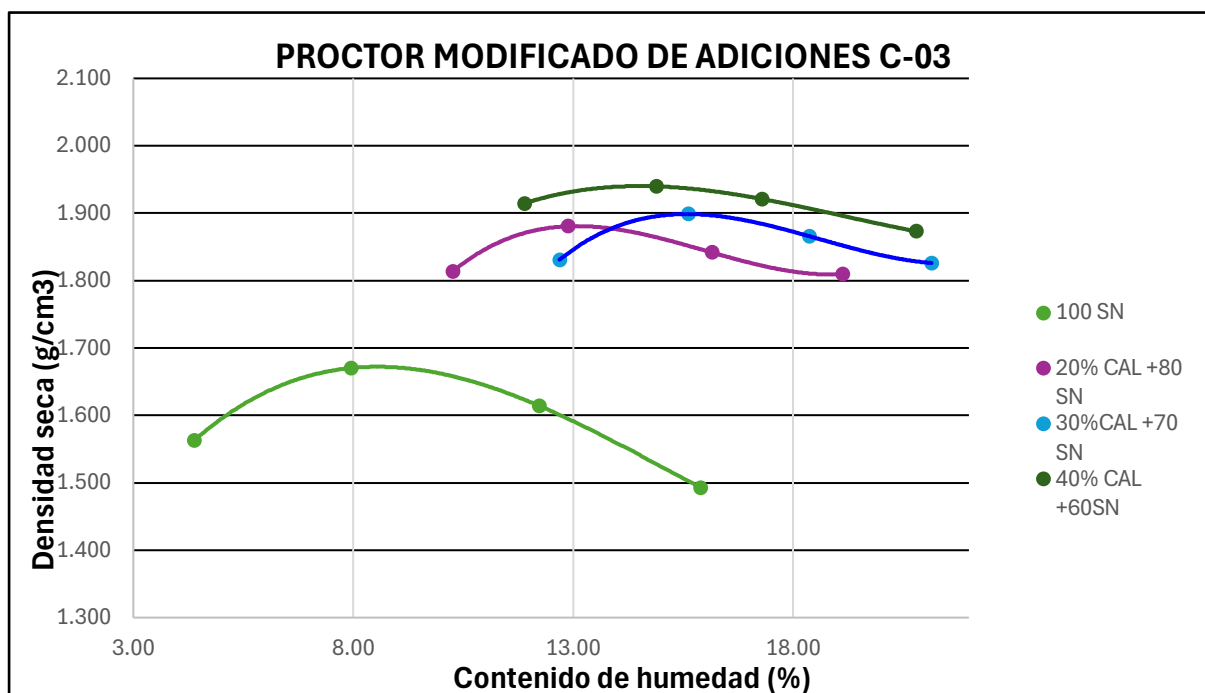


Fig. 49 Proctor Modificado de Adiciones C-02

**PROCTOR MODIFICADO MUESTRA CON ADICION C-03**

Tabla XLVI Proctor Modificado con adición Cal C-03

<b>C-03</b>		
<b>DOSIFICACION</b>	<b>MDS</b>	<b>OCH</b>
	(gr/cm3)	(%)
<b>100% SN</b>	1.672	8.7
<b>20% CAL +80 SN</b>	1.881	13.11
<b>30% CAL +70 SN</b>	1.899	15.57
<b>40% CAL +60SN</b>	1.940	14.55



**Fig. 50** Proctor Modificado de Adiciones C-03

La adición del material estabilizante ha mejorado las propiedades de compactación en todas las muestras. En C-01, la MDS aumenta de  $1.51\text{g/cm}^3$  a  $1.77\text{g/cm}^3$  (incremento del 9.9%), y el OCH pasa de 8.6% a 11.1% indicando mayor resistencia al compactarse con más agua. En C-02, la MDS sube de  $1.658\text{g/cm}^3$  a  $1.722\text{g/cm}^3$  un (3.9%), con un OCH que crece de 8% a 10.8%. De manera similar ocurre en C-03, la MDS mejora de  $1.672\text{g/cm}^3$  a  $1.726\text{g/cm}^3$  un (3.2% de mejora), con un OCH que sube de 8.7% a 10.2%. Estos resultados muestran que el uso del material estabilizante no solo incrementa la densidad del suelo, lo que implica una mayor capacidad portante, sino que también optimiza el óptimo contenido de humedad.

#### ***CAPACIDAD DE SOPORTE- C-01***

En la siguiente tabla se consignan los resultados obtenidos del ensayo de capacidad de soporte aplicado a la muestra experimental C-02, evaluadas bajo condiciones de compactación correspondientes al 95% y 100% de la máxima densidad seca. Por otro lado, en las gráficas asociadas se muestran las curvas que relacionan la carga con la penetración, donde se aprecia las variaciones que esta propiedad experimente ante distintos grados de compactación.

*Tabla XLVII Capacidad de Soporte Cal C-01*

<b>COMBINACIONES</b>	<b>C-01</b>	
	CBR (%) al 95% M.D. S	CBR (%) al 100% M.D. S
<b>Natural 100%</b>	3	4
<b>20% CAL +80 SN</b>	17.21	21.54
<b>30% CAL +70 SN</b>	20.3	22.20
<b>40% CAL +60SN</b>	23.82	32.42

### ***CAPACIDAD DE SOPORTE- C-02***

En la tabla se presentan los resultados obtenidos del ensayo de capacidad de soporte realizado sobre la muestra experimental C-02, considerando condiciones de compactación correspondientes al 95% y al 100% de la máxima densidad sea. Asimismo, las gráficas asociadas muestran las curvas de carga en función de la penetración, donde se evidencian las variaciones en esta propiedad según el grado de compactación aplicado.

*Tabla XLVIII Capacidad de Soporte Cal C-02*

<b>COMBINACIONES</b>	<b>C-02</b>	
	CBR (%) al 95% M.D. S	CBR (%) al 100% M.D. S
<b>Natural 100%</b>	2	4
<b>20% CAL +80 SN</b>	18.28	21.16
<b>30% CAL +70 SN</b>	20.2	24.1
<b>40% CAL +60SN</b>	25.34	31.46

### ***CAPACIDAD DE SOPORTE- C-03***

La tabla muestra los resultados del ensayo del CBR realizado sobre la muestra experimental C-03, considerando niveles de compactación equivalentes al 95% y al 100% de la densidad máxima seca. Además, las gráficas asociadas ilustran las curvas de carga frente a la penetración, destacando como varía esta propiedad en función del grado de compactación aplicado.

Tabla XLIX Capacidad de Soporte Cal C-03

COMBINACIONES	C-03	
	CBR (%) al 95% M.D. S	CBR (%) al 100% M.D. S
Natural 100%	2	4
20% CAL +80 SN	19.18	21.32
30% CAL +70 SN	21.3	25.2
40% CAL +60SN	30.16	35.76

### EVALUAR LA VIABILIDAD ECONÓMICA DE LA INCORPORACIÓN DE POLVO DE PIEDRA CANTO RODADO Y CAL COMO MÉTODO ALTERNATIVO PARA ESTABILIZAR LA SUBRASANTE.

En el marco de esta investigación, se ha realizado un análisis económico que incluye la evaluación de dos tipos de aditivo, que es el polvo de piedra y la cal. Este análisis permitirá determinar la viabilidad económica de cada uno de ellos, proporcionando una base sólida para evaluar su rentabilidad. Lo que se busca es comparar con el fin de identificar cuál de ellos ofrece una mayor rentabilidad.

El estudio se ha asumido para una calzada de un metro con un espesor de 0.2m y con un peso específico de 1700

Determinaremos el peso Húmedo

$$(1*1*0.20) *1700= 340\text{kg}$$

Asi mismo determinaremos el peso seco sabiendo lo siguiente:

$$PW = \frac{\frac{W}{100}(\text{peso suelo humedo})}{(1 + \frac{W}{100})}$$

Teniendo en cuenta que la humedad determinada por los ensayos es :20

$$PW = \frac{\frac{20}{100}(340)}{(1 + \frac{20}{100})}$$

$$PW = 56.6$$

En este caso nuestra adición optima fue de 40 % entonces:

$$(340-56.6) *0.40=110.68 \text{ kg}$$

Una vez realizados los cálculos necesarios, el siguiente paso consiste en elaborar el análisis de Precios Unitarios (APU), teniendo en la cantidad necesaria para 1\*1\*0.2m.

Teniendo en cuenta el Apu, se realizó el cálculo correspondiente al polvo de piedra, considerando que la piedra chancada en este caso tiene un costo de 45 soles por metro cubico. Este cálculo nos permitirá realizar una comparación con respecto al costo de la cal.

Para ello determinaremos el volumen del aditivo que se empleara:

$$\text{Volumen de aditivo: } \frac{\text{Peso de aditivo}}{\text{Peso específico del aditivo}} = \frac{110.68 \text{ kg}}{1600 \text{ kg/m}^3} = 0.069175$$

Si, si el costo por metro cubico de aditivo es 45 soles y el volumen necesario de aditivo es  $0.0487\text{m}^3$ , podemos calcular el costo total

Usando lo siguiente:

Costo Total = Volumen x Costo por metro cubico

Costo Total =  $0.069175\text{m}^3 \times 45 \text{ soles} = 3.113 \text{ soles}$

*Tabla L Análisis de Costos con polvo de piedra*

MEJORAMIENTO DEL SUELO CON ADICION DE POLVO DE PIEDRA							
Und/DÍA	500.0000	EQ.	500.0000	Costo unitario directo por: m <sup>2</sup>		25.56	
Descripción Recurso			Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de Obra</b>							
PEÓN			hh	3.0000	0.0480	27.49	1.32
OFICIAL			hh	1.0000	0.0160	18.12	0.29
OPERARIO			hh	0.2000	0.0032	18.12	0.06
Total mano de obra (S/.)							<b>1.61</b>
<b>Materiales Conve</b>							
POLVO DE PIEDRA			m3	-	0.0692	3.11	0.22
AGUA			m3	-	0.1960	3.00	0.59
Total materiales (S/.)							<b>0.80</b>
<b>Equipos</b>							
HERRAMIENTAS MANUALES			%MO	-	5.0000	1.67	8.35
CAMION CISTERNA 4X2 (AGUA) 2000 GAL.			hm	1.0000	0.0160	250.00	4.00
RODILLO LISO VIBR AUTOP 101-135 HP 10-12 TN.			hm	1.0000	0.0160	225.00	3.60
MOTONIVELADORA DE 125 HP			hm	1.0000	0.0160	450.00	7.20
Total equipos/herramientas (S/.)							<b>23.15</b>

En este caso realizamos con la cal sabiendo que la bolsa es de 20 kg realizamos el siguiente ACU

Tabla LI Análisis de Costo Unitario Cal

MEJORAMIENTO DEL SUELO CON CAL							
Und/DÍA	500.0000	EQ.	500.0000	Costo unitario directo por: m <sup>2</sup>	124.41		
Descripción Recurso			Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de Obra</b>							
PEÓN		hh	3.0000	0.0480	27.49	1.32	
OFICIAL		hh	1.0000	0.0160	18.12	0.29	
OPERARIO		hh	0.2000	0.0032	18.12	0.06	
Total mano de obra (S/.)						<b>1.61</b>	
<b>Materiales Conve</b>							
CAL		bls	-	5.53	17.90	99.06	
AGUA		m3	-	0.1960	3.00	0.59	
Total materiales (S/.)						<b>99.65</b>	
<b>Equipos</b>							
HERRAMIENTAS MANUALES		%MO	-	5.0000	1.67	8.35	
CAMION CISTERNA 4X2 (AGUA) 2000 GAL.		hm	1.0000	0.0160	250.00	4.00	
RODILLO LISO VIBR AUTOP 101-135 HP 10-12 TN.		hm	1.0000	0.0160	225.00	3.60	
MOTONIVELADORA DE 125 HP		hm	1.0000	0.0160	450.00	7.20	
Total equipos/herramientas (S/.)						<b>23.15</b>	

Así mismo, es posible determinar que, en términos económicos, el polvo de piedra tiene un costo de 25.54 soles, mientras que la cal tiene un costo de 124.41 soles. Las diferencias entre ambos materiales son considerablemente notorias, lo cual se debe principalmente a que el polvo de piedra es un subproducto, es decir, un desecho derivado de la actividad de la chancadora. Debido a su naturaleza como residuo, el costo del polvo de piedra es mucho más bajo y menos relevante en comparación con otros materiales.

### **REALIZAR UN TRAMO DE PRUEBA UTILIZANDO LA PROPORCIÓN CON MAYOR CAPACIDAD DE SOPORTE CBR.**

Para comenzar, se ha realizado un tramo de prueba de 2x1x0.40 con el objetivo de validar los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio mediante pruebas de campo. Asimismo, se ha llevado a cabo una verificación para comprobar si se cumple las medidas. A continuación, se presenta los detalles y resultados obtenidos en este proceso.

Tabla LII Numero de Golpes (Natural)

<b>Número de golpes</b>	<b>CBR (%)</b>
<b>0</b>	0
<b>14</b>	6.46
<b>8</b>	3.45
<b>7</b>	2.97
<b>6</b>	2.50

Tabla LIII Numero de golpes (Polvo de piedra Canto rodado)

<b>Número de golpes</b>	<b>CBR (%)</b>
<b>0</b>	0
<b>10</b>	22.15
<b>6</b>	12.50
<b>5</b>	10.19
<b>4</b>	7.94

Tabla LIV Numero de Golpes Cal

<b>Número de golpes</b>	<b>CBR (%)</b>
<b>0</b>	0
<b>15</b>	34.88
<b>13</b>	29.72
<b>12</b>	27.17
<b>10</b>	22.15

Los valores del CBR obtenidos en campo muestran una buena correlación con los resultados obtenidos en laboratorio. En el caso del suelo natural, el CBR promedio en campo es de 2.97%, mientras que en laboratorio se registra un promedio de 3.3%. Cabe mencionar que se omitirá la primera capa debido a que esta recibe una mayor compactación, lo que resulta en un CBR más alto. Por lo tanto, las demás capas fueron consideradas válidas, en este caso el polvo de piedra, muestra un CBR óptimo de 12.50% en campo, mientras que en laboratorio se obtuvo un valor de 11.04%. En cuanto al uso de cal como aditivo, se observó que el CBR en campo fue de

29.72% , mientras que en laboratorio se alcanzó un valor de 36.3% .En resumen , los valores obtenidos en campo se mantienen alineados con los resultados de laboratorio , lo que demuestra la efectividad de estos aditivos en la mejora de las propiedades del suelo.

### **Grado de compactación-Ensayo Densidad de campo**

Tabla LV Grado de Compactación

Densidad de Campo	Máxima densidad seca	Optimo Contenido de humedad %	Grado de compactación
SUELO NATURAL	1.752	8.2	95.1
SUELO NATURAL	1.752	8.2	95.6
SUELO + 40% POLVO DE PIEDRA	2.002	10.11	97.4
SUELO + 40% POLVO DE PIEDRA	2.002	10.11	98.3
SUELO + 40% CAL	1.94	14.55	98
SUELO + 40% CAL	1.94	14.55	97.8

En la tabla presentada, se muestra el grado de compactación del suelo tras la incorporación de un 40% de polvo de piedra y un 40% de cal. Los resultados indican que el material estabilizado cumple con los requisitos de rendimiento, dado que el mínimo es de 95%. Además, los valores obtenidos para la densidad máxima seca son de 2.002 g/cm<sup>3</sup> y 1.94 g/cm<sup>3</sup> , lo que refleja una adecuada mejora en las propiedades físicas del suelo. Por otro lado, el contenido óptimo de humedad registrado fue de 10.11% y 14.55%.

### **DISCUSION**

Según el objetivo específico, analizar su estructura mineralógica de la piedra canto rodado que se obtendrá el polvo para la investigación, los resultados químicos mediante los rayos x , la composición que tiene el polvo de piedra de canto rodado es de calcio con un porcentaje de 35.39%, Silicio 53.12% y aluminio 6.9% y otros porcentajes que son muy pequeños, tanto como la cal y el silicio generan reacciones puzolánicas, que más que todo esto genera compuestos cementantes. Así mismo en función con los minerales obtenido según Álvarez (2019) nos menciona que el polvo de piedra está compuesto , químicamente con SiO<sub>2</sub> ;Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;CaCO<sub>3</sub> y otros minerales siendo minerales óptimos para la estabilización de suelos [39]. Estos compuestos nos respaldan a nuestra investigación pues nos permite que el polvo de piedra tiene la capacidad de mejorar el suelo de incrementar la capacidad portante del suelo que es lo que se busca como investigación de este aditivo, además Salehi (2022) nos indica que tanto como el

carbonato de calcio o el silicio, hacen que la resistencia del suelo tenga la capacidad de ser un buen estabilizante [48].

En función al objetivo de determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso en estado natural mediante un pozo exploratorio, los resultados indican que la calicata 1 tiene un IP de 27.16 , un MDS de 161 y CBR de 3% y la calicata 2 presenta un IP de 25.05 , MDS de 1.658 y un CBR de 2% y por último la calicata 3 tiene un IIP de 28.9, MDS de 1.672 y un CBR de 3% , dichos datos son característicos propios de un suelo arcillosos , que nos indican que es un suelo débil y por lo tanto necesita alguna mejora para su proceso constructivo. En estudios similares [11] recalca que también presenta un suelo arcillo obteniendo valores de IP de 21% y un MDS de 1.756 y por último un CBR de 3% .Este comportamiento presenta valores similares pues ambos son suelos arcillosos y la característica de este suelo es por su resistencia débil .Así mismo en el libro de Montejo Fonseca [8] nos señala que estos suelos presentan una baja capacidad portante , lo que esto dificulta las construcciones y para ello es necesario realizar una estabilización.

Para determinar las propiedades físico-mecánicas del suelo de la subrasante al añadir polvo de piedra canto rodado en diferentes concentraciones, específicamente en 0% ,20% ,30% y 40% en peso del suelo seco, se ha obtenido los siguientes resultados para la calicata mas optima que en función a los porcentajes se tiene un resultado donde el IP tiene un valor de 18.08 ,16.98 y 15.1 , el MDS de 1.758,2.03,2.002 y un CBR al 95% de 5.92 % , 7.14%, 10.6% .Con respecto al natural notamos que con el IP del porcentaje más optimo tiene una reducción de 91% , mientras que el MDS tiene un incremento de 19% y por último el CBR un incremento de 81% .Según Fany Burga [10]en sus datos de ensayos muestra el porcentaje más optimo de 10% donde este le proporciona un IP de 7.1 un MDS de 1.936 g/cm<sup>3</sup> y por ultimo un CBR de 11.5 % . Es importante mencionar que estamos comparando con dicha tesis porque no se ha realizado investigaciones con el polvo de piedra de canto rodado pero si con una de la familias que es el polvo de la caliza .Por lo tanto, se confirma que el polvo de piedra es un material óptimo para ser utilizado como estabilizante pues sus datos muestran efectos positivos imponiéndose por delante del 6% lo cual facilitaría para su uso en construcción y con este estudio se tiene un marco referencial para futuras investigaciones.

Logramos determinar las propiedades físico-mecánicas del suelo de la subrasante al añadir Cal en diferentes concentraciones, específicamente en 0% ,20% ,30% y 40% en peso del suelo seco, donde se han obtenido los resultados siguientes; el IP muestra un valor de 12.73 con un MDS de 1.94 y un CBR de 31.22. De acuerdo con la investigación revisada, [10], se observó que la cal empleada en los porcentajes investigados (4%,8%y 12%) mostro un desempeño donde el IP se obtuvo de 3.12 ,4.29 y 5.3, un MDS de 1.98 gr/cm<sup>3</sup>, 1.92 gr/cm<sup>3</sup>, 1.91 gr/cm<sup>3</sup> y

un CBR de 28.97 %, 38.63%, 43.48%. Esta comparación evidencia que, aunque en nuestro estudio se utilizaron porcentajes de cal significativamente mayores, los incrementos no fueron proporcionales, e incluso los valores obtenidos con porcentajes menores de cal resultaron similares o superiores. Sin duda, este hallazgo enriquece la investigación, ya que demuestra que aumentar la cantidad de cal no siempre va a producir mejoras significativas, funcionando de manera similar a un porcentaje menor.

Para evaluar la viabilidad económica de la incorporación de polvo de piedra canto rodado y Cal como método alternativo para estabilizar la subrasante, hemos evidenciado que la cal en función al mejor porcentaje obtenido tenemos por m<sup>2</sup> un costo de 124.41 soles y nuestro aditivo de polvo de piedra un precio de 25.56 soles. Así mismo comparando con estudios similares [10], nos señala que al 10% de polvo de piedra obtiene un costo por metro cubico de 41.537 y al 5% de cal obtiene un costo de 71 soles. Cabe destacar que el aditivo derivado como un subproducto muestra mejores resultados económicos pues esto no generan costos adicionales, más que todo su extracción y transporte y además es un desecho de una actividad, lo cual este se le da una viabilidad para que pueda ser utilizado como estabilizante.

Para el respecto análisis de un tramo de prueba utilizando la proporción con mayor capacidad de soporte CBR , para esta particular investigación se ha procedido a realizar un tramo de 2\*1\*0.2m donde se utilizó el porcentaje optimo que fue del 40%, para ello se realizó el ensayo de grado de compactación , cabe mencionar que con respecto al suelo natural y el polvo de piedra paso de 95.1 a 98.3% y así mismo con la cal a 97.8%. Conforme al informe técnico de la revista Informes de la Construcción, para un porcentaje de compactación próximo al 95% o superior se busca de manera habitual para certificar estabilidad y capacidad portante [47]. Tal caso sucede en nuestra investigación pues ambos aditivos sobrepasan al 95 % lo cual son un resultado óptimo para ser utilizado como estabilizante.

## **Conclusiones**

Se concluyo del análisis químico que el calcio representa un valor de 35.39% siendo un valor clave para mejorar la resistencia del suelo a través de reacciones químicas. El silicio (53.12%) y el aluminio (6.9%) también son importantes, ya que contribuyen a la estabilidad del suelo.

Se analizaron las propiedades físicas y mecánicas del suelo en estado natural en 0,20%,30% y 40% obteniendo los siguientes datos: para C-01 clasificada A-7-6 (16) con un IP de 27.16 y MDS de 1.61 (gr/cm<sup>3</sup>) con un CBR al 100% de 4% , C-2 clasificado A-7-6(15) con un IP de 25.05 y un MDS de 1.658(gr/cm<sup>3</sup>) con un CBR al 100% de 3% , C-3 clasificado como A-7-6 (17) con un IP de 28.9, MDS 1.672 y un CBR al 100% de 3%. Cabe mencionar que el suelo evaluado corresponde a la clasificación A-7-6(17) suelos altamente arcillosos , con baja

capacidad de soporte con características que los hacen poco adecuados para subrasantes sin estabilización.

El análisis de las propiedades físicas y mecánicas del suelo en 0,20%,30% y 40% de polvo de piedra esto resulto que a medida que aumenta la proporción de polvo de piedra, el IP disminuye tal como se evidencia 18.08, 16.98 y 15.1. Así mismo MDS en los dos ultimo porcentajes presenta valores estables de 1.742, 2.03 y 2.002, mientras que el valor del CBR al 95% mejora significativamente alcanzados valores de 5.92% , 7.14% hasta 10.6%. Esto nos indica que la adición del 40% del polvo de piedra es la más optima, ya que este supera el 10% del CBR, valores que hacen que el suelo sea más resistente y adecuado para soportar cargas.

Se analizaron las propiedades físicas y mecánicas del suelo en 0,20%,30% y 40% de cal que de la calicata con mayores resultados tenemos un IP de 17.65, 14.75, 12.73. Así mismo un incremento de la máxima densidad seca de 1.881,1.899,1.94 y un CBR al 95% de 19.18%, 21.3%,30.16%, lo que refleja un aumento en la capacidad del suelo. Por lo tanto, la adición del 40% representa resultados más notorios para la mejora del suelo.

Se concluyo, mediante el análisis de APUS, que el polvo de piedra presenta un rendimiento superior, generando 33.54 soles por cada 1.00m<sup>2</sup>. Esto se debe a que, al ser un material de desecho, los costos de producción son significativamente reducidos y a la vez contribuye su aprovechamiento a la sostenibilidad.

Se realizo el ensayo de tramo de prueba de 1\*2\*0.4m con el mejor porcentaje que ha mostrado resultados favorables. La adición de estos dos aditivos ha destacado sobre todo el grado de compactación, el polvo de piedra tuvo un grado de compactación promedio de 97.85% y la cal tuvo un promedio de 97.9%, esto nos demuestra un grado alto de compactación, lo cual permite una validez y la efectividad del porcentaje empleado.

## **Recomendaciones**

Se recomienda considerar el uso de otro tipo de piedra como adición, como una alternativa adicional para evaluar y comparar la efectividad de este material en la estabilización de suelos. Además, cada tipo de piedra extraída de distintas fuentes tiene características únicas que pueden ofrecer propiedades específicas, lo que abre la puerta a desarrollar diversas alternativas de estabilizantes adaptadas a diferentes condiciones del suelo. Esta exploración y diversificación en el uso de materiales puede resultar una mejora continua en las técnicas de estabilización, contribuyendo a la sostenibilidad.

Se recomienda utilizar el polvo de piedra como aditivo, pues este ha demostrado resultados muy positivos en cuanto a estabilizar el suelo, pues el CBR se mantiene por encima del 10% lo cual es muy recomendable sobre todo si se busca reducir el grosor de las capas de pavimento.

Se sugiere incrementar el porcentaje de adición en estudios futuros si la tendencia creciente observada se mantiene en niveles superiores. Esto permitirá determinar con mayor precisión el límite de efectividad del material, así como identificar el punto en el que su rendimiento podría estabilizarse o incluso disminuir, lo cual esto nos permitirá establecer rangos de efectividad para futuros trabajos de estabilización con este tipo de aditivo.

## Referencias

- [1] M. Saberian, J. Li, S. T. Anupiya. M. Perera, G. Ren, R. Roychand, y H. Tokhi, «An experimental study on the shear behaviour of recycled concrete aggregate incorporating recycled tyre waste», *Construction and Building Materials*, vol. 264, p. 120266, dic. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120266.
- [2] «Tesis Arabia - Google Drive». Accedido: 6 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en:  
<https://drive.google.com/drive/u/1/folders/1yI5YDMsM4hR1XFCspq-IfRDjMjA14jWS>
- [3] J. Li y R. D. Sanderson, «*In situ* measurement of particle deposition and its removal in microfiltration by ultrasonic time-domain reflectometry», *Desalination*, vol. 146, n.º 1, pp. 169-175, sep. 2002, doi: 10.1016/S0011-9164(02)00521-0.
- [4] «Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review - ScienceDirect». Accedido: 6 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www-sciencedirectcom.usat.lookproxy.com/science/article/pii/S1674775522000658>
- [5] G. Gupta, H. Sood, y P. K. Gupta, «Economic and environmental assessment of industrial wastes stabilized clay and sand soil subgrades using experimental and theoretical approaches», *Construction and Building Materials*, vol. 422, p. 135787, abr. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135787.
- [6] S. Sahoo y S. Prasad Singh, «Strength and durability properties of expansive soil treated with geopolymer and conventional stabilizers», *Construction and Building Materials*, vol. 328, p. 127078, abr. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127078.
- [7] S. Hashim Mohammed, K. A. Saeed, y H. Ibrahim Al Shaikhli, «Evaluation of the strength and microstructural characteristics of stabilized organic clay soil», *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 9, p. 100647, jun. 2024, doi: 10.1016/j.cscee.2024.100647.
- [8] T. I. Miranda, «Ingeniería de pavimentos - Alfonso Montejó Fonseca», Accedido: 6 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria\\_de\\_pavimentos\\_Alfonso\\_Montejó\\_Fonseca](https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria_de_pavimentos_Alfonso_Montejó_Fonseca)
- [9] E. Toloza Bayona y O. A. Gaitán Parada, «Comparativo para estabilización de suelos arcillosos usando mezclas en peso de cal cemento y cenizas volantes», [http://alejandria.ufps.edu.co/descargas/tesis/1111634\\_1111326.pdf](http://alejandria.ufps.edu.co/descargas/tesis/1111634_1111326.pdf), 2019, Accedido: 6 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/4536>
- [10] F. Y. Ruiz Burga, «Evaluación de la incorporación de polvo de piedra chancada en la subrasante deteriorada por deformación, carretera Chota – Shitacucho.», ene. 2023,

- Accedido: 6 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en:  
<http://repositorio.unach.edu.pe/handle/20.500.14142/337>
- [11] B. B. Soberon Monja, «Estabilización de suelos arcillosos usando vidrio reciclado molido para su uso como subrasante mejorada en pavimentos urbanos en la urb. Ciudad del Chofer, Chiclayo 2019», 2022, Accedido: 6 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en:  
<http://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/5368>
- [12] A. Quiroz Alcántara, «Estabilización de suelos con cloruro de sodio, en el camino de bajo volumen de tránsito desde el caserío Los Tubos hasta el caserío Pozo Cuarenta, distrito de Mórrope, provincia de Lambayeque, departamento Lambayeque», feb. 2020, Accedido: 6 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en:  
<http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/8363>
- [13] S. Ahmad, M. Shah Alam Ghazi, M. Syed, y M. A. Al-Osta, «Utilization of fly ash with and without secondary additives for stabilizing expansive soils: A review», *Results in Engineering*, vol. 22, p. 102079, jun. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102079.
- [14] R. Leite, R. Cardoso, C. Cardoso, E. Cavalcante, y O. de Freitas, «Lime stabilization of expansive soil from Sergipe - Brazil», *E3S Web Conf.*, vol. 9, p. 14005, 2016, doi:  
 10.1051/e3sconf/20160914005.
- [15] E. Barragan, «Fundamentos de Ingeniería Geotécnica Braja M Das», Accedido: 6 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en:  
[https://www.academia.edu/37854899/Fundamentos\\_de\\_Ingenieria\\_Geotecnica\\_Braja\\_M\\_Das](https://www.academia.edu/37854899/Fundamentos_de_Ingenieria_Geotecnica_Braja_M_Das)
- [16] A. Contreras, «Mecánica de suelos, Tomo II Eulalio Juárez Badillo y Alfonso Rico Rodríguez FREELIBROS.ORG», Accedido: 6 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en:  
[https://www.academia.edu/29839924/Mec%C3%A1nica\\_de\\_suelos\\_Tomo\\_II\\_Eulalio\\_Ju%C3%A1rez\\_Badillo\\_y\\_Alfonso\\_Rico\\_Rodr%C3%ADguez\\_FREELIBROS\\_ORG](https://www.academia.edu/29839924/Mec%C3%A1nica_de_suelos_Tomo_II_Eulalio_Ju%C3%A1rez_Badillo_y_Alfonso_Rico_Rodr%C3%ADguez_FREELIBROS_ORG)
- [17] «Caracterización del subsuelo y análisis de riesgos geotécnicos asociados a las arcillas expansivas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez». Accedido: 6 de junio de 2024. [En línea].  
 Disponible en:  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S140577432015000300012](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140577432015000300012)
- [18] «MECANICA DE SUELOS - Eulalio Juárez Badillo - Google Libros». Accedido: 6 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en:  
[https://books.google.com.pe/books?id=3OPOaDHQC8wC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=3OPOaDHQC8wC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

- [19] D. Barman y S. K. Dash, «Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review», *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 14, n.º 4, pp. 1319-1342, ago. 2022, doi: 10.1016/j.jrmge.2022.02.011.
- [20] «MANUAL: Lime-Treated Soil Construction Manual Lime... - Google Académico». Accedido: 6 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Lime-treated%20soil%20construction%20manual%20lime%20stabilization%20lime%20modification&publication\\_year=2004&author=National%20Lime%20Association](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Lime-treated%20soil%20construction%20manual%20lime%20stabilization%20lime%20modification&publication_year=2004&author=National%20Lime%20Association)
- [21] «MC-05-14 Seccion Suelos y Pavimentos\_Manual\_de\_Carreteras\_OK.pdf». Accedido: 10 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-05-14%20Seccion%20Suelos%20y%20Pavimentos\\_Manual\\_de\\_Carreteras\\_OK.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-05-14%20Seccion%20Suelos%20y%20Pavimentos_Manual_de_Carreteras_OK.pdf)
- [22] J. Pooni, F. Giustozzi, D. Robert, S. Setunge, y B. O'Donnell, «Durability of enzyme stabilized expansive soil in road pavements subjected to moisture degradation», *Transportation Geotechnics*, vol. 21, p. 100255, dic. 2019, doi: 10.1016/j.trgeo.2019.100255.
- [23] J. A. Tacca Huaracca, «Estabilización de suelo arcilloso con adición de cal para el mejoramiento de la subrasante, Vía de evitamiento, Abancay – Apurímac, 2021», *Repositorio Institucional - UCV*, 2021, Accedido: 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/58189>
- [24] S. P. Pino Sánchez, «Adición del polvo de piedra triturada para estabilizar la subrasante de la avenida Francisco Falman, centro poblado San Francisco – Moquegua 2022», *Repositorio Institucional - UCV*, 2022, Accedido: 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/102349>

[25] «MC-01-13 Especificaciones Tecnicas Generales para Construcción - EG-2013 - (Versión Revisada - JULIO 2013).pdf». Accedido: 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en:

[https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-01-13%20Especificaciones%20Tecnicas%20Generales%20para%20Construcci%C3%B3n%20-%20EG-2013%20-%20\(Versi%C3%B3n%20Revisada%20-%20JULIO%202013\).pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-01-13%20Especificaciones%20Tecnicas%20Generales%20para%20Construcci%C3%B3n%20-%20EG-2013%20-%20(Versi%C3%B3n%20Revisada%20-%20JULIO%202013).pdf)

[26] «Pavimentos\_Urbanos.pdf». Accedido: 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://cdn-web.construccion.org/normas/files/tecnicas/Pavimentos\\_Urbanos.pdf](https://cdn-web.construccion.org/normas/files/tecnicas/Pavimentos_Urbanos.pdf)

[27] «Manual Ensayo de Materiales.pdf». Accedido: 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf)

[28] «Clasificacion AASHTO M 145 | PDF | Arcilla | Plasticidad (Física)», Scribd. Accedido: 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/477223946/Clasificacion-AASHTO-M-145>

[29] Aurix P. System, «Catálogo Normas Técnicas Peruanas - INACAL», INACAL portal. Accedido: 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/catalogo-bibliografico>

[30] «Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, Quicklime, and Hydrated Lime». Accedido: 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/c0025-19.html>

[31] Gabriel R. Blanco, «PAVIMENTOS», Accedido: 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.academia.edu/16797521/PAVIMENTOS>

[33] «manualdedisenodecarreterasnopavimentadasdebajovolumendetransito.pdf». Accedido: 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sutran.gob.pe/wp-content/uploads/2015/08/manualdedisenodecarreterasnopavimentadasdebajovolumendetransito.pdf>

[34] E. R. T. Rodríguez, «Fundamentos de ingeniería de cimentaciones Braja Das 7ma Edición», Accedido: 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.academia.edu/48975119/Fundamentos\\_de\\_ingenieria\\_de\\_cimentaciones\\_Braja\\_Das\\_7ma\\_Edici%C3%B3n](https://www.academia.edu/48975119/Fundamentos_de_ingenieria_de_cimentaciones_Braja_Das_7ma_Edici%C3%B3n)

[35] «Manual de Geología para Ingenieros GONZALO DUQUE ESCOBAR | Milton Jean Pierr Eq - Academia.edu». Accedido: 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.academia.edu/14865581/Manual\\_de\\_Geologia\\_para\\_Ingenieros\\_GONZALO\\_DUQUE\\_ESCOBAR](https://www.academia.edu/14865581/Manual_de_Geologia_para_Ingenieros_GONZALO_DUQUE_ESCOBAR)

[36] «Libro cimentaciones, parte 1 by William Gamboa - Issuu». Accedido: 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://issuu.com/williamgamboa/docs/fundamentos\\_de\\_ingenieria\\_geotecnica\\_-\\_braja\\_m\\_d](https://issuu.com/williamgamboa/docs/fundamentos_de_ingenieria_geotecnica_-_braja_m_d)

[37] J. R. Hernandez, «Crespo Villalaz - MECÁNICA DE SUELOS Y CIMENTACIONES.PDF», Accedido: 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.academia.edu/35912353/Crespo\\_Villalaz\\_MEC%C3%81NICA\\_DE\\_SUELOS\\_Y\\_CIMENTACIONES\\_PDF](https://www.academia.edu/35912353/Crespo_Villalaz_MEC%C3%81NICA_DE_SUELOS_Y_CIMENTACIONES_PDF)

[38] «Piedra Chancada | PDF | Hormigón | Cemento», Scribd. Accedido: 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/94827085/PIEDRA-CHANCADA>

[39] de Piedra, «Characterization of Mortars for Rendering with Stone Powder», vol. 4, 2005.

[40] S. Mishra, S. N. Sachdeva, y R. Manocha, «Subgrade Soil Stabilization Using Stone Dust and Coarse Aggregate: A Cost Effective Approach», *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.*, vol. 5, n.º 3, p. 20, jul. 2019, doi: 10.1007/s40891-019-0171-0.

[41] «NTP 400.037 PDF | PDF | Hormigón | Arcilla», Scribd. Accedido: 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/408926934/25099-NTP-400-037-pdf>

[42] «D2940/D2940M Standard Specification for Graded Aggregate Material for Bases or Subbases for Highways or Airports». Accedido: 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.astm.org/d2940\\_d2940m-20.html](https://www.astm.org/d2940_d2940m-20.html)

[43] M. B. Suárez, «Metodología de Investigación Científica para ingeniería Civil», Accedido: 11 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.academia.edu/33692697/Metodolog%C3%ADa\\_de\\_Investigaci%C3%B3n\\_Cient%C3%ADfica\\_para\\_ingenier%C3%ADa\\_Civil](https://www.academia.edu/33692697/Metodolog%C3%ADa_de_Investigaci%C3%B3n_Cient%C3%ADfica_para_ingenier%C3%ADa_Civil)

[44] J. M. Herrera Peña, «Influencia del polvo de piedra caliza sobre las propiedades mecánicas y permeabilidad de los suelos arenosos», *Repositorio Institucional - USS*, 2024, Accedido: 10 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/13380>

[45] «Efecto del polvo de piedra y la cal sobre la resistencia, compactación y propiedades CBR de suelos finos». Accedido: 10 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en:

[https://www.academia.edu/56201415/Effect\\_of\\_Stone\\_Powder\\_and\\_Lime\\_on\\_Strength\\_Compaction\\_and\\_CBR\\_Properties\\_of\\_Fine\\_Soils?auto=download](https://www.academia.edu/56201415/Effect_of_Stone_Powder_and_Lime_on_Strength_Compaction_and_CBR_Properties_of_Fine_Soils?auto=download)

[46] «Experimental analysis of cement-treated red sandstone coarse-grained soil and its microstructural evolution - ScienceDirect». Accedido: 10 de mayo de 2025. [En línea].

Disponibile

en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522006672?via%3Dihub>

[47] «Revista de informe tecnico - Google Drive». Accedido: 17 de mayo de 2025. [En línea].  
Disponibile en:

[https://drive.google.com/drive/folders/1TXOvaJCDnlScIImgCcXV\\_Ad7Rch5s022?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1TXOvaJCDnlScIImgCcXV_Ad7Rch5s022?usp=drive_link)

[48] M. Salehi, M. Bayat, M. Saadat, y M. Nasri, «Prediction of unconfined compressive strength and California bearing capacity of cement- or lime-pozzolan-stabilised soil admixed with crushed stone waste», *Geomechanics and Geoengineering*, vol. 18, n.º 4, pp. 272-283, jul. 2023, doi: 10.1080/17486025.2022.2040606.

# ANEXOS

## Validación o Negación de Hipótesis

### Suelo Natural

Se ha realizado la prueba T-student, en el programa minitab que se ha utilizado datos de la tabla, que esto nos permitirá aceptar o rechazar H1 o Ho esto lo mediremos de la siguiente manera:

Si el valor p es mayor que 0.05 nose rechaza Ho. Sin embargo, si este valor P es menor que 0.05 se rechaza Ho.

Ho: El suelo de la subrasante no necesitar ser estabilizado, tiene un CBR mayor o igual a 6%.

H1: El suelo de la subrasante tiene que ser estabilizado, tiene un CBR menor a 6%.

*Tabla LVI T-Student Suelo Natural*

Muestra	Valor T	Valor p
C1	-5	0.063
C2	-7	0.045
C3	-7	0.045
C1, C2, C3	-10.3	0.0001

Si Bien la Calicata 2 y 3 presentan un valor p menor a 0.05 y que la calicata 1, muestra un valor p superior a 0.005, al considerar el análisis en conjunto de las tres calicatas, se obtiene un valor p de 0.0001. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, por lo que se concluye que el suelo de la subrasante tiene que ser estabilizado.

### Comparación Polvo de piedra y cal

Se ha realizado la prueba T-student, en el programa minitab que se ha utilizado datos de la tabla, que esto nos permitirá aceptar o rechazar H1 o Ho esto lo mediremos de la siguiente manera:

Si el valor p es mayor que 0.05 nose rechaza Ho. Sin embargo, si este valor P es menor que 0.05 se rechaza Ho.

Ho: El polvo de piedra de canto rodado no tiene un rendimiento similar con respecto a la cal.

H1: El polvo de piedra de canto rodado tiene un rendimiento similar a la cal.

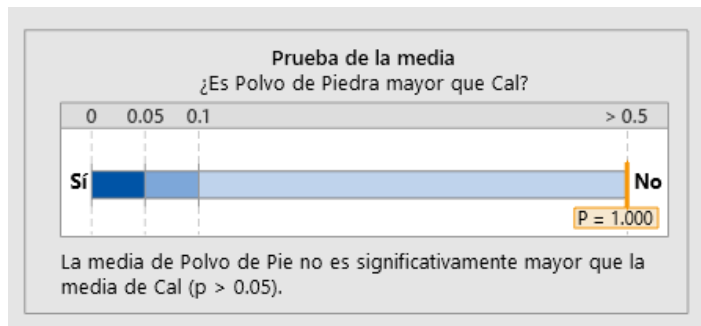


Fig. 51 T-Student Suelo con Adición

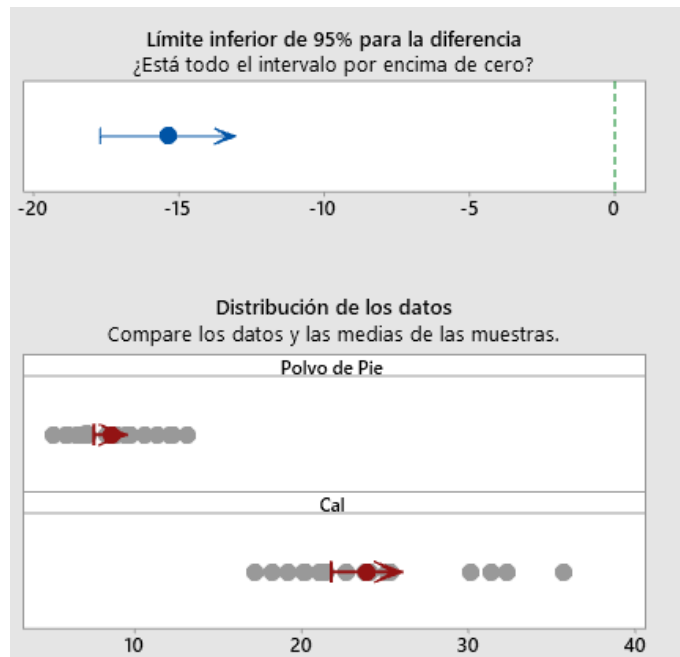



Fig. 52 Distribución de T-Student

Si bien se realizó la comparación entre los dos aditivos entre el polvo de piedra y la cal se ha obtenido el valor P de 1. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, concluyéndose que el polvo de piedra no presenta un rendimiento similar al de la cal.

FICHA DE INVENTARIO-CANTERA GUAYABO		
Denominación de Cantera: Cantera Guayabo		Distrito: Llama
Departamento: Cajamarca		
<b>LOCALIZACION</b>	<b>UBICACIÓN</b>	
CARRETERA: Carrizal Chiclayo-Chota	6°34'58"S 79°14'40"W	
KM O REFERENCIA: 1.4 km de Cumbil Alto		
DISTANCIA AL EJE: a 50m al eje de la vía		
UBICACIÓN MAS CERCANA: Guayabo		
<b>ACCESO</b>	<b>PROPIEDAD</b>	<b>PRODUCCION APROXIMADA</b>
<u>PAVIMENTO</u>	<u>PRIVADA</u> <input checked="" type="checkbox"/>	3/4" 30m3 /día
<u>AFIRMADO</u>	-	1/2" 40m3 /día
<u>TROCHA</u> <input checked="" type="checkbox"/>	<u>PUBLICA</u>	Confitillo 15m3 /día
<u>SENDERO</u>	-	Polvo de piedra 2m3 /día
<u>SIN ACCESO</u>	<u>MTC</u>	
<b>TIPO DE CANTERA</b>	<b>FORMACION ROCOSA</b> <input checked="" type="checkbox"/>	
	(Las características indicadas posteriormente corresponden al mat triturado)	
	<b>DEPOSITO</b>	
	ALUVIAL <input checked="" type="checkbox"/>	PLAYA PERMANEN
	PLUV.ANTIGUO	PLAYA ESTACIONA

# LABORATORIO FÍSICO QUÍMICO AMBIENTAL PERÚ S.A.C

ENSAYOS QUÍMICOS Y SERVICIOS GENERALES

RUC:2060355189

## REPORTE DE MEDICION Y ANALISIS DE MUESTRA POR EL ANALISIS TERMICO DIFERENCIAL

<b>SOLICITANTE</b>	CESAR ANIBAL BRAVO CORRALES
<b>TESIS</b>	ANALISIS COMPARATIVO DE LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS ENTRE EL POLVO DE PIEDRA DE CANTO RODADO Y LA CAL
<b>MUESTRA</b>	POLVO DE PIEDRA DE CANTO RODADO
<b>FECHA</b>	28 DE OCTUBRE DEL 2024
<b>MUESTRA RECIBIDA EN LABORATORIO</b>	

### 1. MUESTRA: Polvo de Piedra de Canto Rodado (500. GR)

Nº DE MUESTRAS	CANTIDAD DE MUESTRA ENSAYADA	PROCEDENCIA
001	400 mg	

### 2. ENSAYOS A APLICAR:

- ANALISIS TERMICO DIFERENCIAL ATD
- ANALISIS TERMOGRAVIMETRICO TGA

### 3. EQUIPO EMPLEADO Y CONDICIONES

- ANALIZADOR TERMICO SIMULTANEO TG\_DTA\_DSC CAP. MAX 1600°C  
SETSYS\_EVOLUTION; CUMPLE CON NORMAS ASTM ISO 11357, ASTM E967, ASTM E968, ASTM E793, ASTM D3295, ASTM D3417, ASTM D3418, DIN 51004, DIN 51007, DIN 53765.
- TASA DE CALENTAMIENTO: 20 °C/MIN
- GAS DE TRABAJO-FLUJO: NITROGENO, 10 ML/MIN
- RANGO DE TRABAJO 25-920°C.
- MASA DE MUESTRA ANALIZADA: 35 MG

JEFE DE LABORATORIO: ING. CARLOS VALQUI MENDOZA  
ANALISTA RESPONSABLE: ING. CARLOS VALQUI MENDOZA

AGUAS – SUELOS – ALIMENTOS – MINERALES – ACEITES - CARBON - CAL

CELULAR: 944 077 288 - 949 959 632

CORREO ELECTRONICO: Fqaperusac@gmail.com

Henry  
Rivadeneira  
Obispo  
Tec. Laboratorio  
USAT

USAT  
LABORATORIO FÍSICO QUÍMICO AMBIENTAL PERÚ S.A.C

Scanned with  
CamScanner

## LABORATORIO FÍSICO QUÍMICO AMBIENTAL PERÚ S.A.C

ENSAYOS QUÍMICOS Y SERVICIOS GENERALES

RUC:20605355189

### 4. RESULTADOS

COMPOSICION QUIMICA	RESULTADOS (%)	METODO UTILIZADO
CALCIO	35.39	Espectrometría de fluorescencia de rayos x
SILICIO	53.12	
ALUMINIO	6.9	
HIERRO	0.61	
SODIO	1.50	
MAGNESIO	0.21	
POTASIO	1.53	
PÉRDIDA POR QUEMADO	8.20	

# FQA PERÚ

### 5. CONCLUSION

- Al realizar la comparación del espectro de la muestra analizada con las energías características de los elementos de la tabla periódica a partir del sodio, se encontraron principalmente Calcio, Silicio con un alto porcentaje. Y en menores porcentajes se encontró; Potasio, Magnesio, Sodio.

Harry  
Rivadeneira  
Oblitas  
Téc. Laboratorio  
USAT



TRUJILLO, 28 DE OCTUBRE DEL 2024



AGUAS – SUELOS – ALIMENTOS – MINERALES – ACEITES - CARBON - CAL

CELULAR: 944 077 288 - 949 959 632

CORREO ELECTRÓNICO: Fqaperusac@gmail.com

## LABORATORIO FÍSICO QUÍMICO AMBIENTAL PERÚ S.A.C

ENSAYOS QUÍMICOS Y SERVICIOS GENERALES

RUC:20605355189

### 4. RESULTADOS

#### e. CURVA TGA Y ATD



### 4. CONCLUSIONES

- Según el análisis Termo gravimétrico se muestra la descomposición térmica a través de la pérdida de masa en función a la temperatura indicado dos regiones donde se hace más intensa la pérdida, la primera en un rango entre 450 y 650°C y la segunda menos intensa entre 550 y 800°C, posteriormente la pérdida es gradual. El material llega a perder un aproximado de 14% de masa, respecto a su masa inicial a la temperatura máxima de ensayo.

TRUJILLO, 28 DE OCTUBRE DE 2024



AGUAS – SUELOS – ALIMENTOS – MINERALES – ACEITES - CARBON - CAL

CELULAR: 944 077 288 - 949 959 632

CORREO ELECTRÓNICO: faaperusac@gmail.com



## INFORME DE ENSAYO N° 2885

(Pág. 01 de 04)

Expediente N° : 2860 - 2025 L.E.M. AMAZING S.A.C  
Solicitante : CESAR ANIBAL BRAVO CORRALES  
Proyecto : "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS ENTRE EL POLVO DE PIEDRA DE CANTO RODADO Y LA CAL."  
Ubicación : Dist. Chidayo, Prov. Chidayo, Reg. Lambayeque.  
Fecha de emisión : Chidayo, 26 de Abril del 2025.

(NORMA) : NIT-109, Método de ensayo estándar para la densidad y peso unitario del suelo in situ mediante el cono de arena.  
REFERENCIA : NBR 648 (N° 330-14-3) ANEX 10-500

N° de Prueba / N° Base	I - Ubicación y/o Descripción de muestra					
	D - 01	D - 02	D - 03	D - 04	D - 05	D - 06
Conc	1	1	1	1	1	1
Placa	A	B	B	B	B	B
II - Datos de Campo y de Laboratorio						
1- Peso de frasco + arena calibrada	g	7024	7034	6773	6912	6921
2- Peso de frasco + arena que cubre	g	2825	2824	3206	4172	3915
3- Peso de la arena en el cono	g	1626	1628	1628	1678	1626
4- Gravedad de la arena	g/cm <sup>3</sup>	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35
5- Volumen del material extraído	cm <sup>3</sup>	1927	1927	1584	1587	1761
6- Peso de material húmedo extraído	g	1507	1495	1414	1398	1526
7- Peso de humedad	g	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
8- Peso de materia seca de 1/4"	g	0	0	0	0	0
9- Peso específico de la grava	g/cm <sup>3</sup>	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41
10- Volumen de la grava	cm <sup>3</sup>	0	0	0	0	0
11- Peso de la muestra	g	1498	1486	1305	1389	1517
12- Volumen de la muestra	cm <sup>3</sup>	1927	1927	1584	1587	1761
13- Densidad natural húmeda	g/cm <sup>3</sup>	1.816	1.800	1.086	1.136	1.063
III - Contenido de Humedad						
14- Humedad (Spady)	%	9.0	8.0	7.0	8.5	6.0
15- Densidad natural seca	g/cm <sup>3</sup>	1.665	1.675	1.049	1.069	1.001
IV - Resultados de Laboratorio (Procur. Modificado)						
16- MÁXIMA DENSIDAD SECA	g/cm <sup>3</sup>	1.752	1.752	2.002	2.002	1.940
17- OPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD	(%)	8.20	8.20	10.11	10.11	11.56
V - Resultados Finales						
18- GRADO DE COMPACTACION	(%)	95.1	95.6	97.4	98.3	98.0

- D - 01 SUELO NATURAL  
D - 02 SUELO NATURAL  
D - 03 SUELO - 40% POLVO DE PIEDRA  
D - 04 SUELO - 40% POLVO DE PIEDRA  
D - 05 SUELO - 40% CAL  
D - 06 SUELO - 40% CAL

## OBSERVACIONES:



Ensayo realizado : Chidayo, 26 de Abril del 2025  
Identificación y Ubicación de pruebas designadas por el solicitante  
- El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio.

José Omar Galdames  
Ingeniero Civil



José Omar Galdames  
Ingeniero Civil  
Reg. OSIPA 18001



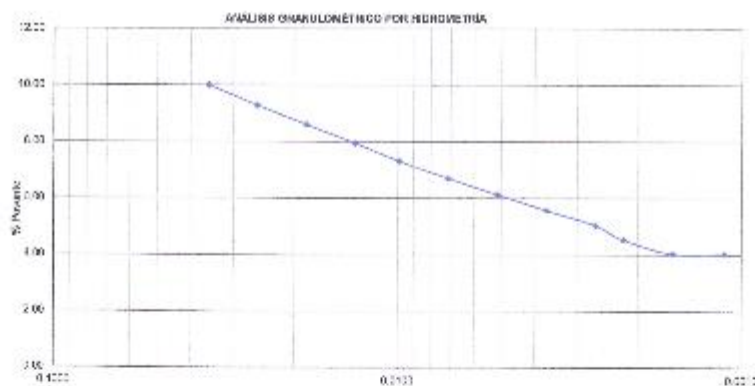
	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE SUELOS Y CONCRETO		
	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR HIDROMETRÍA ASTM D422-68	NORMA NORMA ASTM D422-68 (2007)	

**Lugar:** Cerro Corral, Chile (Antes)  
**Dirección:** Iquique, Chile  
**Proyecto:** Anticipo de ejecución de obras de saneamiento en el polo de piedra de cerro Corral y a su  
**Ubicación:** Dpto. Iquique, Chile. Prov. Guzmán, Reg. Lirioyocote.  
**Fecha de Emisión:** 15-01-2012  
**Nombre:** CC 00170

INDICADOR	UNID.	VALOR	UNIDAD	COMENTARIOS	UNIDAD	VALOR
CONDICIONES DE PRUEBA DE LOCALIZACIÓN						
CONDICIONES DE LOCALIZACIÓN						
TEMPERATURA	°C	20.0	°C	20.0	°C	20.0

FECHA	NORMA	TIEMPO (min)	RM	T °C	DT	RNC	WOT %	R <sup>2</sup> WOT	L (mm)	L/T (mm/min)	K	D (mm)	% QUE PASA
14/04/2012	03:33	1	37.00	25.0	253.1	242.24	581.72	27.10	7.49	0.45	0.012070	0.0224	10.22
14/04/2012	03:33	2	28.00	25.0	234.7	252.24	524.31	25.7	7.70	0.64	0.012070	0.0485	7.20
14/04/2012	03:34	4	35.00	25.0	217.1	254.70	485.30	25.7	8.10	0.22	0.012070	0.0495	3.70
14/04/2012	03:38	5	24.00	25.0	200.1	240.74	440.25	24.7	8.58	1.55	0.012070	0.1122	7.94
14/04/2012	03:54	10	22.50	25.0	183.9	186.33	412.60	22.7	8.76	0.28	0.012070	0.0254	7.31
14/04/2012	04:21	20	22.00	25.0	168.8	156.87	375.30	22.7	9.00	0.32	0.012070	0.0221	6.72
14/04/2012	04:33	30	21.10	25.0	153.4	152.43	347.60	21.7	8.14	0.35	0.012070	0.0252	6.14
14/04/2012	05:30	40	20.00	25.0	139.9	151.26	312.20	21.7	8.74	0.24	0.012070	0.0222	5.52
14/04/2012	07:09	240	19.00	25.0	125.8	122.70	282.88	21.7	10.02	0.08	0.012070	0.0224	5.22
14/04/2012	13:00	360	18.00	25.0	115.0	122.95	252.85	18.1	12.42	0.03	0.012070	0.0222	4.52
14/04/2012	15:54	720	17.00	25.0	100.8	112.88	248.77	17.1	16.74	0.02	0.012070	0.0224	4.24
15/04/2012	03:00	144	17.00	25.0	100.8	122.04	195.77	17.1	12.20	0.01	0.012070	0.0224	4.24

W <sub>500</sub> (%)	1.75
----------------------	------







Henry Rueda  
Obispo  
Téc. Laboratorio  
USAT



USAT  
Laboratorio de Ensayo de Materiales de Suelos y Concreto

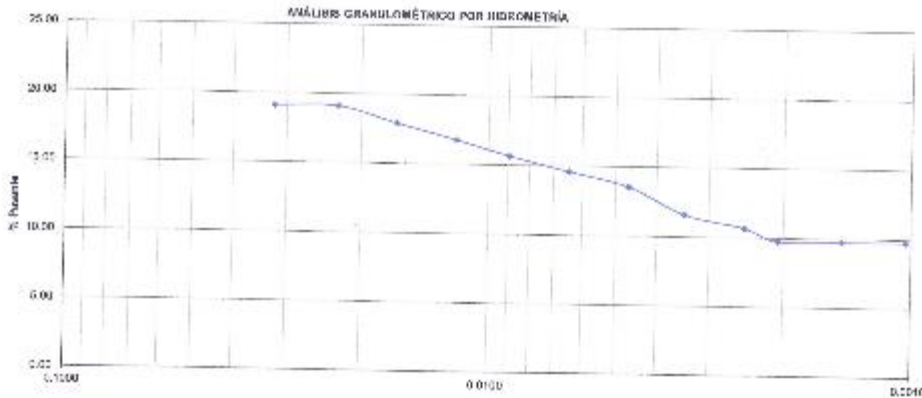


LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE SUELOS Y CONCRETO  
USAT  
TÉCNICO DE LABORATORIO

	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE SUELO Y CONCRETO		
	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR HIDROMETRÍA ASTM D421-88	NORMA NORMA ASTM D422-63 (2007)	

**Tec. A:** César A. (del) Sandoz Combarros  
**Decano:** Ing. Carlos (del) Sandoz Combarros  
**Fecha:** 01/11/2023  
**Ubicación:** Oficina de Laboratorio de Suelos y Concreto, Edificio de Ingeniería, Universidad Católica del Perú, Calle Leguía 826, Lima 17001, Perú.  
**Título de la Prueba:** Análisis Granulométrico por Hidrometría  
**Muestra:** Muestra de Suelo

FECHA	HORA	TIEMPO (min)	RN	T %	CT	RHC	WD (%)	RHC (%)	L (mm)	LA (mm/min)	CORRECCIONES POR FRACCIÓN (%)		% QUE PASA
											Wt. gr.	SS	
10/04/2023	01:14	1	21.00	25.0	373.4	335.35	766.84	29.1	0.14	5.14	0.012370	0.0321	19.08
10/04/2023	01:15	2	21.00	25.0	333.4	398.35	763.05	29.1	0.14	3.27	0.012370	0.0227	19.09
10/04/2023	01:17	4	30.00	25.0	312.2	226.26	599.20	30.1	5.47	1.82	0.012973	0.0189	17.10
10/04/2023	01:21	8	29.00	25.0	291.8	242.80	654.57	28.1	6.72	0.05	0.012973	0.0190	15.73
10/04/2023	01:28	15	35.00	25.0	272.1	252.11	611.22	25.1	7.12	0.47	0.012973	0.0268	15.65
10/04/2023	02:03	30	24.00	25.0	234.7	232.74	562.32	27.7	7.45	0.26	0.012970	0.0225	14.87
10/04/2023	03:13	120	24.00	25.0	208.1	218.14	523.84	26.1	7.78	0.15	0.012970	0.0047	13.24
10/04/2023	06:13	240	23.00	25.0	183.8	183.89	446.44	24.1	6.45	0.27	0.012970	0.0034	11.58
10/04/2023	07:18	360	22.00	25.0	158.8	162.51	351.47	23.1	5.22	0.04	0.012973	0.0025	10.86
10/04/2023	08:24	420	22.00	25.0	168.8	162.51	351.47	22.1	5.03	0.01	0.012973	0.0021	9.77
10/04/2023	03:14	1440	22.00	25.0	160.0	162.51	351.47	22.1	4.08	0.01	0.012970	0.0010	9.77
% FRACCIÓN QUE PASA													



  
**Henry Sandoz Combarros**  
 Oficina de Laboratorio USAT  


  
**USAT**  
 Universidad Católica del Perú  
 TÉCNICO DE LABORATORIO

## INFORME DE ENSAYO

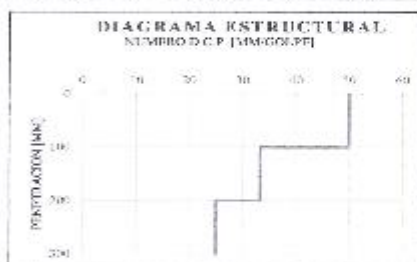
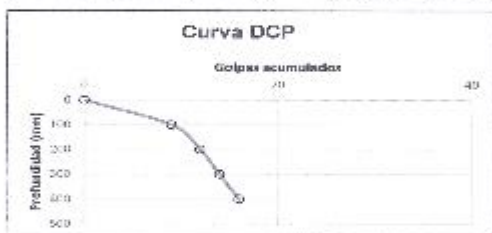
### INFORME DE ENSAYO

Testista : Bravo Corrales Cesar Anibal  
 ATENCIÓN: ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
 TESIS: Análisis Comparativo de la estabilización de suelos arcillosos entre el polvo de piedra de canto rodado y la cal  
 UBICACIÓN: Chiclayo-Lambayequ  
 FECHA RECEPCIÓN: Chiclayo, 21 de Abril del 2025

#### PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO ASTM D 8951

PUNTO:	1	CL	Arcilla Arenosa de baja plasticidad
LOCALIZACIÓN:			
PESO DEL MARTILLO:	8.0 kg	FECHA:	25/04/2025
FACTOR DEL MARTILLO:	1.0		
CLASIFICACIÓN DEL TERRENO:	CL		
ADICIÓN:	Terreno Natural		

Número de golpes acumulada	Número de golpes	% golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración por lectura (mm)	Índice DCP (mm/golpe)	CBR (%)
0	0	0.0	0	0		
6	6	56.3	100	100	11.1	3.94
12	8	75.0	200	100	31.3	1.15
14	2	87.5	300	100	50.0	0.73
18	2	100.0	400	100	50.0	0.73



#### OBSERVACIONES:

PENETRACIÓN REALIZADA SOBRE NIVEL NATURAL DEL TERRENO

#### CORRELACIONES:

1. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2000)

CBR = 292/(PDC)<sup>1.12</sup>





## INFORME DE ENSAYO

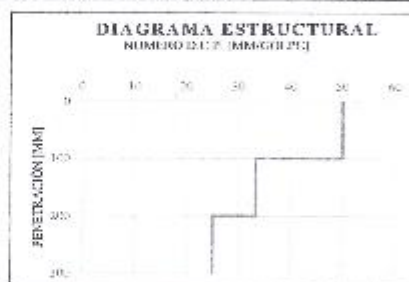
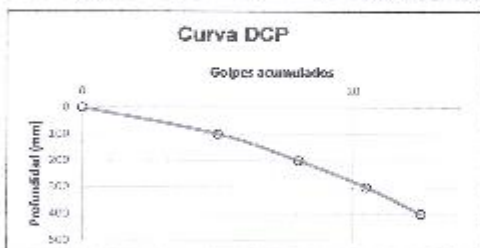
### INFORME DE ENSAYO

Tesista : Bravo Corrales Cesar Anibal  
 ATENCIÓN: : ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
 TESIS: : Analisis Comparativo de la estabilización de suelos arcillosos entre el pravo de piedra de canto rodado y la cal  
 UBICACIÓN: : Chiclayo-Lambayeque  
 FECHA RECEPCIÓN: : Chiclayo, 21 de Abril del 2025

#### PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO ASTM D 8951

PUNTO:	1	CL	Arcilla Arenosa de baja plasticidad
LOCALIZACIÓN:			
PESO DEL MARTILLO:	8.0 kg	FECHA:	21/04/2025
FACTOR DEL MARTILLO:	1.0		
CLASIFICACIÓN DEL TERRENO:	CL		
ADICIÓN:	Terrazo Natural + Adición		

Número de golpes acumulado	Número de golpes	% golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración por lectura (mm)	Índice DCP (mm/golpe)	CBR <sup>10</sup> (%)
0	0	0.0	0			
10	10	40.0	100	100	10.0	22.15
16	6	64.0	200	100	16.7	12.50
21	5	84.0	300	100	30.0	10.19
25	4	100.0	400	100	25.0	7.94



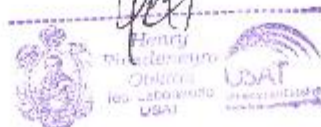
#### OBSERVACIONES:

PENETRACIÓN REALIZADA SOBRE NIVEL NATURAL DEL TERRENO

#### CORRELACIONES:

1. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2000)

$CBR = 252 / (IDC)^{1.721}$





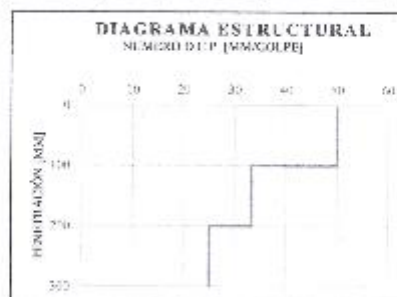
## INFORME DE ENSAYO

Tesista : Bravo Morales Cesar Anibal  
 ATENCIÓN: : ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
 TESIS: : Analisis Comparativo de la estabilización de suelos arcillosos entre el polvo de piedras de canto rodado y la cal  
 UBICACIÓN: : Chiclayo-Lambayeque  
 FECHA RECPCIÓN: : Chiclayo, 21 de Abril del 2025

### PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO ASTM D 6951

PUNTO:	1	CL	Arcilla Arenosa de baja plasticidad
LOCALIZACIÓN:			
PESO DEL MARTILLO:	8,0 kg	FECHA:	21/04/2025
FACTOR DEL MARTILLO:	1,0		
CLASIFICACIÓN DEL TERRENO:	CL		
ADICIÓN:	Terreno Natural + Adición		

Número de golpes acumulado	Número de golpes	% golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración por lectura (mm)	Índice DCP (mm/golpe)	CBR (%)
0	0	0,0	0	0		
15	15	30,0	100	100	6,7	34,88
28	13	56,0	200	100	7,7	29,77
40	12	80,0	300	100	8,3	27,17
50	10	100,0	400	100	10,0	22,25



#### OBSERVACIONES:

PENETRACIÓN REALIZADA SOBRE NIVEL NATURAL DEL TERRENO

#### CORRELACIONES:

1. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2000)

$$CBR = 292 / (DCP)^{1.42}$$



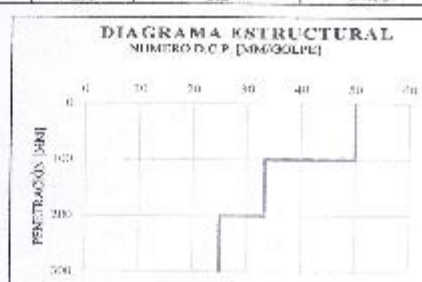
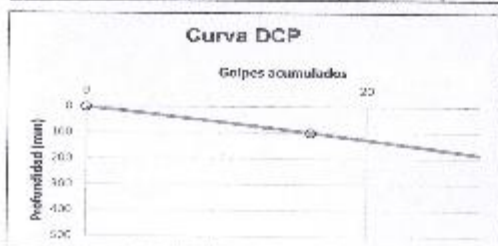
## INFORME DE ENSAYO

Tesisista : Bravo Corrales Cesar Anibal  
 ATENCIÓN: : ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
 TESIS: : Analisis Corporativo de la estabilización de suelos arcillosos entre el polvo de piedra de canto rodado y la cal  
 UBICACIÓN: : Chiclayo-Lambayeque  
 FECHA RECEPCIÓN: : Chiclayo, 21 de Abril del 2025

### PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO ASTM D 6951

PUNTO:	1	CL	Arcilla Arenosa de baja plasticidad
LOCALIZACIÓN			
PESO DEL MARTILLO:	8,0 kg	FLCHA:	21/04/2025
FACTOR DEL MARTILLO:	1,0		
CLASIFICACIÓN DEL TERRENO:	CI		
ADICIÓN	Terrano Natural + Adición		

Número de golpes acumulados	Número de golpes	% golpes	Penetración acumulada (mm)	Penetración por lectura (mm)	Índice DCP (mm/golpe)	CBR <sup>1</sup> (%)
0	0	0,0	0	0		
16	16	30,2	100	100	6,3	37,50
30	14	56,6	200	100	7,1	52,29
42	12	79,2	300	100	8,3	27,17
53	11	100,0	400	100	9,1	24,65



#### OBSERVACIONES:

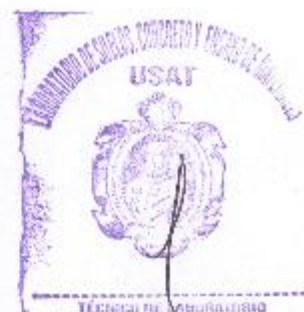
PENETRACIÓN REALIZADA SOBRE NIVEL NATURAL DEL TERRENO

#### CORRELACIONES:

1. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2000)

CBR = 292/(IDC)<sup>1,124</sup>

Henry Roldanegra Obillus  
 Tec. Laboratorio USAT





Ensayo DCP Cal e Polvo de piedra de canto rodado





Ensayo de DCP natural y tramo de prueba con cal





Compactación y mezcla en el tramo de prueba con aditivo



Ensayo Densidad de Campo





Densidad de Campo y Proctor Modificado



Mezcla con Cal para realizar el CBR





Mezcla con Cal





**UNIVERSIDAD CATOLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL**

- LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES, SUELOS Y PAVIENTOS
- CONCRETO Y ASFALTO

INFORME N° LEM USAT 049- 2025-I

FECHA: 19 de Mayo 2025

## VALIDACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

**ESTUDIANTE:** Bravo Corrales Cesar Anibal

**TITULO DE LA TESIS:** Análisis comparativo de la estabilización de suelos arcillosos entre el polvo de piedra de canto rodado y la cal

El que suscribe, responsable del laboratorio de Ingeniería Civil, 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
- Análisis granulométrico de los suelos
- Límites de Atterberg
- Proctor Modificado
- Método de ensayo de CBR (Relación de Soporte de California)
- Gravedad Especifica
- Hidrometria
- Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP)
- Densidad de Campo

  
 Henry Rivadeneyra Oblitas  
 Tec. Laboratorio (USAT)




Se alcanza al interesado para los fines pertinentes.

Observación: Adjunto

Henry Rivadeneyra Oblitas  
 Responsable de Lab Ing. Civil

**LINK DEL DRIVE DE LOS ENSAYOS :**

[https://drive.google.com/drive/folders/1CbWqJA6\\_8rxbsKJDgh\\_dq\\_E8rdxONSX?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1CbWqJA6_8rxbsKJDgh_dq_E8rdxONSX?usp=sharing)