

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**Escuela Profesional de Ingeniería Civil**



**TESIS**

“Análisis comparativo de la influencia de adición de cal y cemento en la capacidad portante del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral – Abancay – Apurímac – 2022”

Presentado por:

**Bach. WILLIAM CHIPANA TELLO**

Para optar el título profesional de:

**INGENIERO CIVIL**

**Abancay – Apurímac – Perú**

**2023**

## **Tesis**

“Análisis comparativo de la influencia de adición de cal y cemento en la capacidad portante del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral – Abancay – Apurímac – 2022”

## **Línea de investigación**

Gestión de la infraestructura para el desarrollo sostenible

## **Asesor**

Ph.D, Abbon Alex Vásquez Ramírez



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA INFLUENCIA DE ADICIÓN DE CAL Y  
CEMENTO EN LA CAPACIDAD PORTANTE DEL SUELO DE CIMENTACIÓN  
DE LAS VIVIENDAS AUTOCONSTRUIDAS DEL SECTOR DE MOYOCORRAL  
– ABANCAY – APURÍMAC – 2022”**

Presentado por el Bach. **WILLIAM CHIPANA TELLO**, para optar el título profesional de: **INGENIERO CIVIL**.

Sustentado y aprobado el 27 de junio del 2023 ante el jurado:

**Presidente** : Ing. Holguer Cayo Baca  
**Primer miembro** : Ing. Cristhian Huamán Martínez  
**Segundo miembro** : Ing. Fanny Silva Noriega  
**Asesor** : Ph. D, Ing. Abbon Alex Vásquez Ramírez

# Análisis comparativo de la influencia de adición de cal y cemento en la capacidad portante del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral – Abancay – Apurímac – 202

## INFORME DE ORIGINALIDAD

14%

INDICE DE SIMILITUD

15%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1 [hdl.handle.net](https://hdl.handle.net) Fuente de Internet 4%

2 [repositorio.utea.edu.pe](https://repositorio.utea.edu.pe) Fuente de Internet 3%

3 [repositorio.ucv.edu.pe](https://repositorio.ucv.edu.pe) Fuente de Internet 1%

4 Submitted to Universidad Tecnologica de los Andes Trabajo del estudiante 1%

5 [idoc.pub](https://idoc.pub) Fuente de Internet 1%

6 [repositorio.uss.edu.pe](https://repositorio.uss.edu.pe) Fuente de Internet <1%

7 [repositorio.udh.edu.pe](https://repositorio.udh.edu.pe) Fuente de Internet <1%

Submitted to Monash University

## DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mis padres:  
Alipio Chipana Yupanqui y Doris Tello  
Ceron, que siempre serán mi  
inspiración, mi modelo a seguir y sobre  
todo el motor de mi vida.

A mis hermanos Edson y Ali por  
brindarme su apoyo incondicional en  
todo momento, por su amor y tiempo  
dedicado, que hicieron de mí una  
buena persona.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por brindarme salud y darme una hermosa familia. A mis padres que me formaron con tanta humildad y bondad.

A los docentes de la escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de los Andes, por su sabiduría y tiempo dedicado a la educación superior.

A mi asesor Ph.D, Abbon Alex Vásquez Ramírez, por su paciencia y su compromiso en la investigación, así como a la Prof. Martha Chipana Yupanqui, persona primordial para el cumplimiento del presente estudio.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

PORTADA .....	i
POS PORTADA.....	ii
PÁGINA DE JURADOS .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xi
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	xiii
ACRÓNIMOS.....	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN .....	xvii
CAPÍTULO I PLAN DE INVESTIGACIÓN .....	1
1.1. Descripción de la Realidad Problemática .....	1
1.2. Identificación y Formulación del Problema .....	6
1.2.1. Problema General .....	6
1.2.2. Problemas Específicos .....	7
1.3. Justificación de la Investigación.....	7
1.4. Objetivos de la Investigación .....	8
1.4.1. Objetivo General .....	8
1.4.2. Objetivos Específicos .....	8
1.5. Delimitaciones de la Investigación.....	9
1.5.1. Espacial.....	9
1.5.2. Temporal.....	9

1.5.3.	Social .....	9
1.5.4.	Conceptual .....	9
1.6.	Viabilidad de la Investigación .....	10
1.7.	Limitaciones de la Investigación .....	10
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....		12
2.1.	Antecedentes de Investigación.....	12
2.1.1.	A Nivel Internacional.....	12
2.1.2.	A Nivel Nacional .....	16
2.1.3.	A Nivel Regional y Local.....	20
2.2.	Bases Teóricas.....	21
2.2.1.	Cimentaciones Superficiales .....	21
2.2.2.	Adición de Cal para la Estabilización de Suelos Expansivos .....	42
2.2.3.	Adición de Cemento para la Estabilización de Suelos Expansivos .....	43
2.3.	Marco Conceptual .....	44
CAPÍTULO III METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN .....		48
3.1.	Hipótesis .....	48
3.1.1.	Hipótesis General.....	48
3.1.2.	Hipótesis Específicas .....	48
3.2.	Método .....	49
3.2.1.	Método de la Investigación .....	49
3.3.	Tipo de Investigación.....	50
3.4.	Nivel o Alcance de Investigación .....	50
3.5.	Diseño de Investigación .....	51
3.6.	Operacionalización de Variables .....	51
3.7.	Población, Muestra y Muestreo .....	54
3.7.1.	Población .....	54
3.7.2.	Muestra .....	55
3.8.	Técnicas e Instrumentos .....	58
3.8.1.	Técnica para la Recolección de Datos. ....	58



3.8.2.	Instrumentos de Recolección de Datos. ....	58
3.9.	Consideraciones Éticas .....	60
3.10.	Procesamiento Estadístico.....	61
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		62
4.1.	Resultados .....	62
4.1.1.	Respuesta al Objetivo General.....	62
4.1.2.	Respuesta al Objetivo Específico 1 .....	73
4.1.3.	Respuesta al Objetivo Específico 2 .....	87
4.2.	Discusión de Resultados .....	91
4.3.	Prueba de Hipótesis .....	95
4.3.1.	Hipótesis General.....	96
4.3.2.	Hipótesis Específica 01 .....	98
4.3.3.	Hipótesis Específica 02 .....	100
CONCLUSIONES .....		104
RECOMENDACIONES .....		107
BIBLIOGRAFÍA .....		110
ANEXOS.....		114

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Número de puntos de exploración .....	23
<b>Tabla 2</b> Tamaños de cribas U.S. standard.....	25
<b>Tabla 3</b> Simbología del sistema unificado.....	29
<b>Tabla 4</b> Factores de capacidad de carga para la ecuación de Meyerhof (1976) ..	39
<b>Tabla 5</b> Operacionalización de variables .....	52
<b>Tabla 6</b> Cuadro de áreas de uso de suelos y vías .....	55
<b>Tabla 7</b> Coordenadas UTM 84 de los puntos de muestreo .....	56
<b>Tabla 8</b> Cantidad de muestra para la caracterización del suelo natural .....	57
<b>Tabla 9</b> Cantidad de muestra para la caracterización del suelo mejorado .....	57
<b>Tabla 10</b> Procedimiento, técnicas e instrumentos para la recolección de datos de cada indicador.....	59
<b>Tabla 11</b> Capacidad portante del suelo del sector de Moyocorral (NTP E.050) ..	63
<b>Tabla 12</b> Capacidad portante del suelo para una cimentación cuadrada de 1.50m x 1.50m .....	64
<b>Tabla 13</b> Capacidad portante del suelo para una cimentación corrida de ancho de 0.40m.....	65
<b>Tabla 14</b> Capacidad portante del suelo natural y con adición de cal y cemento (ecuación NTP E.050).....	69
<b>Tabla 15</b> Capacidad portante del suelo natural y con adición de cal y cemento (ecuación de Terzaghi) .....	69
<b>Tabla 16</b> Capacidad portante del suelo natural y con adición de cal y cemento (ecuación general de la capacidad de carga) .....	70
<b>Tabla 17</b> Contenido de humedad del suelo natural.....	77
<b>Tabla 18</b> Composición granulométrica del suelo natural .....	78
<b>Tabla 19</b> Límites de consistencia del suelo natural.....	79
<b>Tabla 20</b> Densidad húmeda y seca del suelo natural.....	81
<b>Tabla 21</b> Clasificación del suelo según SUCS y AASHTO de las muestras extraídas de las calicatas .....	82
<b>Tabla 22</b> Límites de consistencia del suelo con adición de cal en porcentajes del 6%, 12% y 18%.....	83
<b>Tabla 23</b> Límites de consistencia del suelo con adición de cemento en porcentajes del 6%, 12% y 18%.....	84

<b>Tabla 24</b> Propiedades de resistencia al esfuerzo cortante del suelo natural .....	88
<b>Tabla 25</b> Propiedades de resistencia al esfuerzo cortante del suelo con adición de cal .....	89
<b>Tabla 26</b> Propiedades de resistencia al esfuerzo cortante del suelo con adición de cemento .....	90
<b>Tabla 27</b> Medidas de tendencia central y dispersión de la hipótesis general .....	96
<b>Tabla 28</b> Resultados de la hipótesis general (variable:capacidad portante del suelo) .....	97
<b>Tabla 29</b> Medidas de tendencia central y dispersión de la Hipótesis específica 01 .....	98
<b>Tabla 30</b> Resultados de la hipótesis específica 1 .....	99
<b>Tabla 31</b> Medidas de tendencia central y dispersión de la Hipótesis específica 2 (variable:cohesión del suelo).....	100
<b>Tabla 32</b> Resultados de la hipótesis específica 02 (variable:cohesión del suelo) .....	101
<b>Tabla 33</b> Medidas de tendencia central y dispersión de la Hipótesis específica 2 (variable:ángulo de fricción interna del suelo) .....	102
<b>Tabla 34</b> Resultados de la hipótesis específica 02 (variable:ángulo de fricción interna del suelo) .....	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Mapa de capacidad portante .....	3
<b>Figura 2</b>	Grietas diagonales en muros de las viviendas del sector de moyocorral 4	
<b>Figura 3</b>	Grietas en falso piso.....	5
<b>Figura 4</b>	Tipos de cimentaciones.....	22
<b>Figura 5</b>	Profundidad de cimentación “p” .....	24
<b>Figura 6</b>	Granulometría de un suelo de grano grueso .....	26
<b>Figura 7</b>	Definición de los Límites de Consistencia .....	27
<b>Figura 8</b>	Factores a considerar en la clasificación de suelos (SUCS) .....	28
<b>Figura 9</b>	Carta de plasticidad de Casagrande.....	29
<b>Figura 10</b>	Medición de la densidad en campo a través del cono de arena.....	31
<b>Figura 11</b>	Detalles del ensayo o prueba de la caja de corte directo.....	33
<b>Figura 12</b>	Diagrama de resultados de la prueba para calcular el ángulo de fricción interna.....	34
<b>Figura 13</b>	Fallas por capacidad de carga en cimentaciones superficiales.....	36
<b>Figura 14</b>	Procedimiento de la investigación .....	53
<b>Figura 15</b>	Ubicación georreferencial de la población .....	54
<b>Figura 16</b>	Ubicación de las calicatas en la zona de estudio.....	56
<b>Figura 17</b>	Variación de la capacidad portante a diferentes profundidades (cimentación cuadrada).....	67
<b>Figura 18</b>	Variación de la capacidad portante a diferentes profundidades (cimentación corrida).....	68
<b>Figura 19</b>	Comparación de la capacidad portante del suelo natural y con adición de cal y cemento (según NTP E.050).....	71
<b>Figura 20</b>	Comparación de la capacidad portante del suelo natural y con adición de cal y cemento (Ecuación de Terzaghi) .....	72
<b>Figura 21</b>	Comparación de la capacidad portante del suelo natural y con adición de cal y cemento (Ecuación general de capacidad de carga).....	73
<b>Figura 22</b>	Determinación de la estratigrafía y densidad del suelo natural .....	75
<b>Figura 23</b>	Vista tridimensional de la estratigrafía del suelo .....	75
<b>Figura 24</b>	Perfil estratigráfico en cada punto de prospección .....	76
<b>Figura 25</b>	Análisis de datos del contenido de humedad del suelo natural.....	77
<b>Figura 26</b>	Análisis de datos de la composición granulométrica del suelo natural	78

<b>Figura 27</b> Análisis de datos de los límites de consistencia del suelo natural .....	79
<b>Figura 28</b> Carta de plasticidad de Casagrande para la clasificación del suelo natural.....	80
<b>Figura 29</b> Análisis de datos de la densidad natural del suelo .....	81
<b>Figura 30</b> Análisis de datos de límites de consistencia del suelo con adición de cal.....	84
<b>Figura 31</b> Análisis de datos de límites de consistencia del suelo con adición de cemento .....	85
<b>Figura 32</b> Comparación del límite líquido del suelo natural y con adición de cal y cemento .....	86
<b>Figura 33</b> Comparación del índice plástico del suelo natural y con adición de cal y cemento .....	87
<b>Figura 34</b> Diagrama de barras con datos de cohesión del suelo natural .....	88
<b>Figura 35</b> Diagrama de barras con datos del ángulo de fricción interna del suelo natural.....	89
<b>Figura 36</b> Comparación de la cohesión del suelo natural y con adición de cal y cemento .....	90
<b>Figura 37</b> Comparación del ángulo de fricción interna del suelo natural y con adición de cal y cemento.....	91
<b>Figura 38</b> Comparación de precios de construcción de una zapata con y sin suelo mejorado.....	95
<b>Figura 39</b> Gráfica descriptiva de la media y mediana de la hipótesis general (variable: capacidad portante del suelo).....	96
<b>Figura 40</b> Gráfica descriptiva de la media y mediana de la hipótesis específica 01 .....	98
<b>Figura 41</b> Gráfica descriptiva de la media y mediana de la hipótesis específica 2 (variable: cohesión del suelo).....	100
<b>Figura 42</b> Gráfica descriptiva de la media y mediana de la hipótesis específica 2 (cohesión del suelo) .....	102

## ÍNDICE DE ECUACIONES

EC- 1 : Profundidad de exploración para edificación sin sótano .....	24
EC- 2 : Profundidad de exploración para edificación con sótano .....	24
EC- 3 : Índice plástico .....	27
EC- 4 :Densidad húmeda del suelo .....	32
EC- 5 : Densidad seca del suelo .....	32
EC- 6 : Esfuerzo normal (vertical) .....	33
EC- 7 : Esfuerzo cortante (horizontal) .....	33
EC- 8 : Ecuación de Coulomb sobre esfuerzo cortante .....	34
EC- 9 : Capacidad portante en cimiento cuadrado, caso: falla general por corte..	36
EC- 10 : Capacidad portante en cimiento corrido, caso: falla general por corte ...	36
EC- 11 : Capacidad portante en cimiento corrido, caso: falla local por corte .....	37
EC- 12 : Capacidad portante en cimentación cuadrada, caso: falla local por corte .....	37
EC- 13 : Ecuación general de la capacidad de carga .....	38
EC- 14 : Factor de carga $N_q$ .....	38
EC- 15 : Factor de carga $N_c$ .....	39
EC- 16 : Factor de carga $N_y$ .....	39
EC- 17 : Factor de forma $F_{cs}$ (DeBeer,1970) .....	40
EC- 18 : Factor de forma $F_{qs}$ (DeBeer,1970) .....	40
EC- 19 : Factor de forma $F_{ys}$ (DeBeer,1970) .....	40
EC- 20 : Factores de profundidad, caso I, para $\phi = 0$ (Hansen, 1970) .....	40
EC- 21 : Factores de profundidad, caso I, para $\phi > 0$ (Hansen, 1970).....	40
EC- 22 : Factores de profundidad, caso II, para $\phi = 0$ (Hansen, 1970) .....	40
EC- 23 : Factores de profundidad, caso II, para $\phi > 0$ (Hansen, 1970).....	41
EC- 24 : Factores de inclinación (Hanna y Meyerhof, 1981).....	41
EC- 25: Capacidad portante (NTP E0.50) .....	41
EC- 26: Factores de carga (NTP E.050).....	41
EC- 27: Factores de forma (NTP E.050) .....	42
EC- 28: Factores de inclinación (NTP E.050) .....	42

## **ACRÓNIMOS**

AASHTO. *American Association of State Highway and Transportation Officials*

CAP. *Colegio de Arquitectos del Perú*

INEI. *Instituto Nacional de Estadística e Informática*

SUCS. *Sistema Unificado de Clasificación de Suelos*

## RESUMEN

Esta investigación se enfoca en encontrar la mejor opción para mejorar la capacidad portante del suelo de cimentación de las viviendas del sector de Moyocorral, de la ciudad de Abancay. En específico, se determina un análisis comparativo de la influencia entre dos aditivos químicos muy conocidos, la cal y el cemento, en la capacidad portante del suelo y sus propiedades geotécnicas. Para ello, se estableció las propiedades geotécnicas del suelo natural, y se realizaron pruebas con adiciones de cal y cemento, por separado, en proporciones del 6%, 12% y 18% respecto al peso del suelo sin humedad. Se observó un aumento significativo en la cohesión y ángulo de fricción, y la capacidad portante se incrementó en más del doble con la adición de cada aditivo. Los resultados del estudio indican que la mejor proporción para mejorar la capacidad portante es una adición del 18% de aditivo químico, tanto para la cal como para el cemento. Sin embargo, se percibió que la adición de cemento incrementó la capacidad portante en mayor medida que la adición de cal. A pesar de ello, en términos técnicos y económicos, se recomienda una adición del 12% de cemento, debido a que es más beneficioso con relación al costo-beneficio y la optimización de recursos.

**Palabras clave:** Suelo de cimentación, capacidad portante, cal, Moyocorral.



## ABSTRACT

This research focuses on finding the best option to improve the bearing capacity of the foundation soil of houses in the “Moyocorral” sector of the city of “Abancay”. In particular, a comparative analysis of the influence of two well-known chemical stabilisers, lime and cement, on the bearing capacity of the soil and its geotechnical properties is carried out. For this purpose, the geotechnical properties of the natural soil were determined, and tests were carried out with additions of lime and cement, separately, in proportions of 6%, 12% and 18% of the dry weight of the soil. A significant increase in cohesion and friction angle was observed, and bearing capacity more than doubled with the addition of each stabiliser. The research results indicate that the best ratio for improving bearing capacity is an 18% addition of chemical stabiliser for both lime and cement. However, it was observed that the addition of cement increased the bearing capacity to a greater extent than the addition of lime. Nevertheless, in technical and economical terms, an addition of 12% cement is recommended, because it is more beneficial in terms of cost-benefit and value for money.

**Keywords:** Foundation soil, bearing capacity, Lime, “Moyocorral”

## INTRODUCCIÓN

En zonas rurales y periurbanas en países como el Perú, se construyen viviendas que enfrentan a una serie de desafíos relacionados con la fiabilidad de los materiales de construcción y la capacitación técnica de los constructores. En particular, la calidad del suelo es un factor crítico que puede afectar elocuentemente la capacidad portante de las viviendas autoconstruidas en estas zonas. Por ello, con el objetivo de mejorar la capacidad portante del suelo de cimentación, se han empleado diferentes técnicas como la adición de cal y cemento.

Por lo tanto, esta tesis se enfoca en efectuar un análisis comparativo de la influencia de la adición de cal y cemento en la capacidad portante del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral – Abancay - Apurímac. Para ello se realiza un estudio experimental en el que se analiza la resistencia al corte y las características geotécnicas del suelo de cimentación tratado con diferentes porcentajes de cal y cemento. Además, se comparan los resultados con los obtenidos del suelo sin tratamiento.

Se proyecta que los resultados de este estudio impulsen a una comprensión más profunda de la adición de cal y cemento para fines de durabilidad de cimientos en las viviendas autoconstruidas en áreas rurales y periurbanas del Perú. Asimismo, se busca identificar la técnica más efectiva y rentable para mejorar la calidad del suelo de cimentación. Finalmente, se espera que los hallazgos de este estudio sean de utilidad para los constructores, ingenieros y arquitectos que diseñan y supervisan la construcción de viviendas.

# **CAPÍTULO I**

## **PLAN DE INVESTIGACIÓN**

### **1.1. Descripción de la Realidad Problemática**

Desde hace varias décadas, el desarrollo de la población trajo consigo la evolución de la construcción de estructuras tales como edificios, puentes y presas, por consiguiente, esto ejerció presión en la necesidad de solucionar problemas que involucren al suelo, tal es el caso que cuando las propiedades geotécnicas del suelo son desfavorables y sobre este se apoyan construcciones, ocurren fallas en la estructura que podrían poner en peligro la vida de los habitantes, como es el caso de la línea costera de Santos - Brasil, donde “se cimientan, directamente sobre suelo blando, edificios de apartamentos de 15 pisos. Asentamientos de hasta 30 cm son frecuentes. Se aprecian grietas en tales edificios, pero la mayoría de ellos permanecen habitados” (Lambe & Whitman, 1998, p. 16). Uno de los casos más reconocidos a nivel mundial por las malas condiciones del terreno ocurre en la ciudad de México, exactamente en el Palacio de Bellas Artes, que continúa en funcionamiento, este se ha sumergido 3.60 metros en comparación de construcciones circundantes, los visitantes, que antes tenían que ascender las

escaleras ahora deben descenderlas, debido a los asentamientos abruptos que ocurren (Lambe & Whitman, 1998, p. 16).

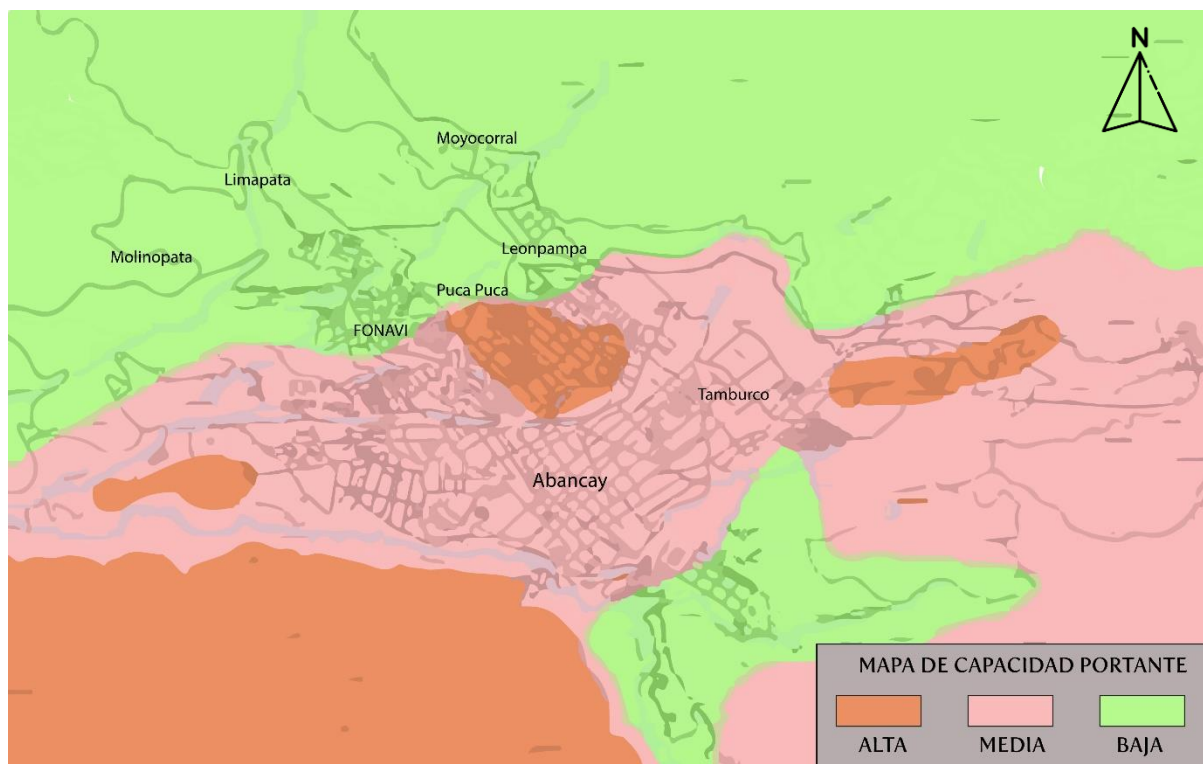
En el ámbito nacional, hoy en día el crecimiento demográfico va de forma acelerada, en consecuencia, la necesidad de adquirir una vivienda aumenta la probabilidad de construir edificaciones en zonas periféricas de la ciudad, a esto se suma la construcción informal, tal se dice que “en el Perú se construyen decenas de miles de viviendas informales al año, adicionalmente, existen riesgos asociados a cimientos defectuosos sobre terrenos blandos” (idencity, 2018). La intervención en la cimentación deteriorada suele ser complicada y realmente costosa, “reparar una vivienda informal puede elevar ese costo hasta el 100%” (CAP,2018, como se citó en idencity, 2018), por esta razón, el tratamiento al suelo de cimentación debe aplicarse anticipadamente para reducir riesgos a futuro. Entonces, para que una vivienda garantice seguridad es importante el conocimiento y la preparación del tipo de suelo en el que se elevará la estructura, principalmente en zonas con gran riesgo sísmico como lo es nuestro país.

La ciudad de Abancay no es ajeno a esta realidad, el plan de desarrollo urbano (2012) sostiene que el sector noroeste de la ciudad presenta un suelo de baja capacidad portante, calificado como tipo flexible (S3) ,también considerado como un suelo blando de reducida capacidad de carga. En ese contexto, el sector de Moyocorral se sitúa en esta zona y también se menciona que en esta área “se encuentran viviendas en pésimas condiciones tanto de uso de material, en conservación y la tipología de la construcción de la vivienda, los que se expondrán a daños ante un movimiento sísmico leve o severo” (Municipalidad provincial de Abancay, Apurímac, 2012). Cabe mencionar, que esto podría tener un efecto importante en las cimentaciones de las viviendas.

La Figura 1, nos indica las zonas de baja, media y alta capacidad portante, apreciándose las laderas del norte como Moyocorral, Molinopata, Limapata, FONAVI y Puca Puca, presentan un suelo de baja capacidad portante.

### Figura 1

*Mapa de capacidad portante*



Nota: Tomado de *Informe de mapa de peligros de la ciudad de Abancay, Apurímac, 2007*.

Tras una visita a la zona de estudio y habiendo realizado una inspección ocular a las viviendas unifamiliares, se observó que la mayoría de las viviendas están compuestas por muros de adobe de dos pisos, donde se pudo percibir que el elemento estructural principal de las viviendas, es decir, los muros de adobe, presentan grietas verticales, de ello se deduce que las grietas verticales son producto de asentamientos localizados que generan tracción en el muro, lo cual ocasionará la apertura del mismo donde la carga es más intensa (Sánchez Moreno,

2019). Además, se pudo observar grietas diagonales en los muros (Figura 2) la cual se deduce que son ocasionados por asentamientos continuos, estos generan grietas continuas con tendencia horizontal y/o parabólica, dividiendo las secciones del muro afectadas de aquellas que no lo están (Sánchez Moreno, 2019).

## Figura 2

*Grietas diagonales en muros de las viviendas del sector de moyocorral*



Nota: Grieta diagonal de gran espesor en una de las viviendas del sector de Moyocorral, debido a un asentamiento diferencial del suelo.

Por otro lado, al inspeccionar la escuela del sector de Moyocorral se pudo observar fracturas en varios puntos y direcciones del piso (Figura 3), fisuras en diferentes paredes de los ambientes, separación en las uniones de los amarres de los muros, agrietamientos en las paredes y asentamientos y/o desplazamientos en los muros. Por ello, defensa civil testifica que las fisuras presentes en el piso de las aulas, veredas e instalaciones en general hace presumir que está existiendo

asentamiento del terreno en el que está construido dicho centro educativo, lo cual atribuye a un suelo inestable, húmedo y peligroso como consecuencia del tipo de suelo y las constantes lluvias.

### **Figura 3**

*Grietas en falso piso*



Nota: Grietas en el falso piso debido a las condiciones del suelo.

Es claro que en la ciudad de Abancay existe un problema de reptación que afecta parte del sector de Moyocorral baja, y los sectores de FONAVI y San Luis, sin embargo, el informe del Mapa de Peligros de la ciudad de Abancay menciona que desde 1980 hasta la fecha no se registraron deslizamientos abruptos en estas zonas como en el principio, podría ser parte de este cambio de actividad el retroceso de los glaciares que alimentan a las aguas subterráneas, es decir, los acuíferos subterráneos que surcaban el subsuelo de estas zonas están desapareciendo. En consecuencia, el problema que viene afectando a la zona de

estudio podría decirse que no es por la reptación del suelo sino más bien por el tipo de suelo.

Por otro lado, en aspectos monetarios, la baja capacidad portante y las características que presenta el suelo de Moyocorral podría ser un problema para los propietarios de estas viviendas que son de bajos recursos, debido a que las condiciones del suelo demandará a construir cimentaciones con mayor dimensión, con riesgos a patologías en elementos estructurales y no estructurales como se observa en las figuras, esto llegará a producir mayor inversión económica en la construcción y resarcimientos costosos de muros y pisos de viviendas, el cual está fuera del alcance de las posibilidades de los propietarios.

“Mejorar la capacidad portante del suelo, ha sido, es y seguirá siendo una latente preocupación de investigación” (Peralta Sánchez, 2021, p. 18) . En consecuencia, en la actualidad existen numerosos aditivos disponibles, cada uno con diferentes tipos, usos y costos, incluyendo la cal y el cemento. Sin embargo, la elección entre ellos se convierte en un desafío para los constructores, ya que genera incertidumbre respecto a cuál de estos materiales puede ofrecer un mejor desempeño al estabilizar un suelo y diseñar cimentaciones en suelos mejorados.

## **1.2. Identificación y Formulación del Problema**

### **1.2.1. Problema General**

¿Cuál es la influencia de la adición de cal comparado con la adición de cemento en la capacidad portante del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022?



### **1.2.2. Problemas Específicos**

❖ ¿Cuál es la influencia de la adición de cal comparado con la adición de cemento en las propiedades geotécnicas del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022?

❖ ¿Cuál es la influencia de la adición de cal comparado con la adición de cemento en las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022?

### **1.3. Justificación de la Investigación**

Las referencias obtenidas y descritas previamente indican las deficiencias de las construcciones debido a las condiciones del suelo y la baja capacidad portante del sector de Moyocorral, lo cual amerita a la construcción de cimentaciones de mayores dimensiones, además, se sabe que la zona es poblada por personas de bajos recursos, por ende, da a suponer que el costo de construcción que requiere este tipo de suelo signifique un precio mayor a lo que están dispuestos a invertir en una vivienda.

Por ese motivo, la investigación planteada aportará conocimientos de la descripción geotécnica del suelo de cimentación del sector de Moyocorral, igualmente se dará a conocer la capacidad portante de este. En ese sentido, la investigación también trata de encontrar la mejor opción entre cemento o cal, e indicar la proporción adecuada con el cual se mejore el suelo, para que futuras investigaciones y proyectos de construcción puedan aplicarlos de mejor manera y sin mucha incertidumbre. Por otro lado, mediante la investigación se estimarán

cifras que podría costar el aplicar estos aditivos con el fin de generar una relación de costo – beneficio, del cual los moradores de las viviendas de bajos recursos, primeramente, garantizaran una construcción segura, y segundo, podrían ahorrar dinero evitando geometrías amplias de elementos estructurales, como también reparaciones costosas.

#### **1.4. Objetivos de la Investigación**

##### **1.4.1. Objetivo General**

Analizar la influencia de la adición de cal comparado con la adición de cemento en la capacidad portante del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022.

##### **1.4.2. Objetivos Específicos**

➤ Determinar la influencia de la adición de cal comparado con la adición de cemento en las propiedades geotécnicas del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022.

➤ Determinar la influencia de la adición de cal comparado con la adición de cemento en las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022.

## **1.5. Delimitaciones de la Investigación**

### **1.5.1. Espacial**

El proyecto de investigación se centra en el sector urbano de Moyocorral, ubicado en la provincia de Abancay, en la región de Apurímac. Específicamente, se centra en evaluar el suelo de cimentación de las viviendas que componen este sector. Para lograr esto, se lleva a cabo la excavación en puntos estratégicos accesibles para maquinaria pesada.

Más adelante, en la sección de población, se puede distinguir a mayor detalle las coordenadas de los puntos de prospección y la zona georreferenciada.

### **1.5.2. Temporal**

El presente se desarrolló en el año 2022, para ser precisos, la prospección del suelo, las pruebas de campo y laboratorio se dieron en el mes de octubre, consecuentemente, el análisis y redacción de los resultados se dio en noviembre y diciembre de ese mismo año.

### **1.5.3. Social**

El proyecto de investigación no posee una delimitación social, debido a que el estudio se realiza al suelo de cimentación, mas no a personas.

### **1.5.4. Conceptual**

Las bases conceptuales del estudio se sostienen principalmente en la ingeniería geotécnica, puntualmente en la mecánica de suelos para el diseño de cimientos de edificaciones.

## **1.6. Viabilidad de la Investigación**

La investigación se considera viable ya que el acceso a la zona de estudio es posible debido a la cercanía de la ciudad, además, esta cuenta con una carretera para la circulación de todo tipo de movilidad necesarios para el traslado de equipos de ensayos de mecánica de suelos. A nivel personal se cuenta con los conocimientos, herramientas y el tiempo necesario que requiere la investigación. También, en la localidad existen laboratorios de mecánica de suelos equipados completamente y con personal capacitado, lo cual garantiza el correcto desarrollo de los ensayos de laboratorio. Por otro lado, los pobladores están dispuestos a proporcionar información y también permiten la recolección de muestras de suelos cercanos a sus viviendas. Asimismo, en términos económicos, se cuenta con los recursos para poder solventar gastos de materiales y traslado de equipos, para los ensayos ejecutados por personal especializado y para los gastos de copias e impresiones. Respecto a los materiales, se posee equipos informáticos como laptop y computadora que plasman la información recogida. También, se tiene una amplia gama de software para redactar y procesar los datos recolectados en campo, para complementar este aspecto, se cuenta con libretas, libros para el análisis teórico, útiles de escritorio y demás.

## **1.7. Limitaciones de la Investigación**

A nivel local no se cuenta con antecedentes de investigaciones que tengan el propósito de mejorar la capacidad portante del suelo con fines de cimentación, mucho menos haber realizado una comparación entre la influencia de dos estabilizadores químicos, debido a ello en los antecedentes locales se describen investigaciones que mejoran el suelo para fines de carreteras.

Respecto a la teoría de la capacidad portante, se ha limitado a usar 3 ecuaciones distintas para determinar este valor, y se tomó en cuenta el resultado más conservador para no hacer extensa la investigación, ya que el propósito es mejorar las condiciones del suelo.

En el ámbito económico el costo de la excavación de las calicatas y los ensayos de campo y laboratorio es oneroso, por lo cual se ha limitado a realizar excavaciones hasta una profundidad de 4 metros y ejecutar las pruebas o ensayos de corte directo, distribución granulométrica, humedad natural, plasticidad del suelo, densidad natural, estratigrafía y compactación del suelo. En síntesis, el estudio se ha realizado a nivel de laboratorio.

En este estudio, se emplean diferentes proporciones de adición de cal y cemento al suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral. Se han seleccionado proporciones de adición del 6%, 12% y 18%, en línea con las recomendaciones de diversos autores y normativas que han demostrado ser efectivas para mejorar la capacidad portante del suelo para fines de cimentación de edificaciones.

Por último, existen distintos tipos de cal, para la investigación se ha limitado a usar la cal hidratada o también llamado hidróxido de calcio, en el Anexo 1 se describe la ficha técnica de este material. En el caso del cemento, al igual que la cal, existen muchos tipos, para el estudio se ha limitado de hacer uso del cemento portland tipo I: de uso general, en el Anexo 2 se muestra la ficha técnica.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de Investigación**

##### ***2.1.1. A Nivel Internacional***

Jurado y Clavijo (2016) en su investigación realizado en la Primera Línea del Metro de Quito (PLMQ) – Ecuador. Trazó como objetivo principal mejorar las propiedades geotécnicas básicas del suelo a través de la incorporación de un cemento resistente a la humedad y al salitre denominado cemento hidráulico de moderado calor de hidratación (tipo MH), en donde su metodología se dividió en cuatro etapas, primero en la recolección de datos, consecutivamente, el muestreo y ensayos de laboratorio, después, la determinación y comparación de resultados, para finalizar redactó tanto sus conclusiones como sus recomendaciones. Esta investigación analizó un suelo ubicado a una profundidad de 3.50 m al que aplicó dosificaciones de 6%, 9%, 12% y 15% de cemento tipo MH en relación con el peso sin humedad del suelo en condiciones de sequedad. De acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) se categorizó al suelo como limo arenoso arcilloso con poca plasticidad (MH-CL y ML), y acorde al American

Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) se clasificó como material limo – arcilloso A-4 (Índice de grupo:1-3). Los resultados de laboratorio al incorporar cemento tipo MH al suelo, demostraron que el índice plástico disminuyó en un 67.2% con relación al suelo nativo, el valor de la cohesión de la muestra con adición del 15% de cemento tipo MH, incrementó un 780% en relación de la cohesión del suelo sin alterar. El suelo mejorado con adición del 12% del aditivo incrementó su ángulo de fricción interna en un 269% respecto del valor inicial y al incorporar el 15% de cemento tipo MH disminuye este valor. Los investigadores concluyen que la proporción óptima de cemento tipo MH es del 9%, esto debido a los resultados positivos que se obtuvo al ensayar el suelo, mejorando así las propiedades geotécnicas del suelo estudiado.

Toirac (2015), quien redactó el artículo de investigación titulado “*El suelo – cemento como material de construcción*” (artículo científico) elaborado en Santo Domingo – República Dominicana, relaciona al material suelo-cemento en la construcción de viviendas de sectores de bajos recursos en República Dominicana. Detalla de manera explicativa acerca de los diferentes usos del material suelo-cemento, para precisar, en pisos, de lo cual detalló que el cemento además de optimar las características geotécnicas del suelo también tiene una baja resistencia a la abrasión, por tanto, él recomienda compactarlo y cubrirla con una capa delgada de mortero de arena o también polvorear cemento aplicándole una flota. En conclusión, el suelo-cemento puede garantizar construcciones tanto económicas como resistentes tras un previo estudio.

López (2017), en su trabajo de investigación elaborado en Quito – Ecuador, propuso como objetivo primordial, mejorar propiedades geotécnicas básicas del suelo ubicado en el sector de Pomasqui. Además, planteó encontrar la cantidad

ideal de incorporación de cemento, como también realizar un análisis de las ventajas y desventajas respecto al costo del uso del cemento como estabilizador comparado con el uso de lastre. El investigador adicionó cemento en porcentajes del 3%, 6%, 9% y 12%. El muestreo se realizó mediante ensayos de penetración estándar (SPT), excavaciones no cubiertas y observación de taludes en las calles. En ese contexto, tras la ejecución de los ensayos correspondientes, se alcanzó a concluir que la cantidad porcentual de adición ideal de cemento es del 3%. Respecto al mejoramiento, la cohesión acrecentó de 0.0kg/cm<sup>2</sup> a 2.5kg/cm<sup>2</sup>, el ángulo de fricción aumentó de 25° a 45°, el módulo de elasticidad acrecentó de 100kg/cm<sup>2</sup> a 700kg/cm<sup>2</sup> y la Relación de Soporte de California (CBR) de la muestra de suelo sin alterar fue nulo y con la adición del 3% de cemento, este incrementó hasta un 130%. El uso de cemento para el tratamiento de suelos es más económico en un 40% respecto al uso de tierra prestada o mejoramiento con lastre; llevando estos resultados de laboratorio a campo, se concluye que el 3% de cemento equivale a un envase de cemento de 42.5 kg por unidad de volumen en metros, para el caso de la compactación, se recomienda usar un 0.5 % más de la humedad óptima hallada, es decir, utilizar un poco más de agua para obtener la densidad máxima en campo.

Núñez (2015) , en su investigación realizado en Quito – Ecuador, tuvo como propósito fundamental incrementar la capacidad de carga en los suelos de fundación mediante una capa de suelo granular compactado. Usó ensayos de penetración estándar (SPT) y corte triaxial en laboratorios de la ciudad de Quito – Ecuador, donde aplicó un método experimental basado en la recolección de muestras físicas e información histórica acerca del suelo en estudio, consecuentemente ejecutó un ensayo directamente en el lugar de estudio y otro en



laboratorio con el fin de establecer tanto las características físicas como mecánicas, todo esto para realizar un análisis comparativo. Según los ensayos, el suelo nativo del área de investigación está formado por un 69% de material cohesivo y un 31 % de material granular, de la misma forma presenta un límite líquido de 56.70%, definiéndose así, como un suelo limoso de alta compresibilidad con presencia de arena (MH). A través de la prueba de penetración estándar, se determinó el valor de la cohesión siendo este de 0.13 kg/cm<sup>2</sup>, el ángulo de fricción de 13.64° que fue obtenido a través del ensayo triaxial. Del mismo modo tras aplicar la ecuación propuesta por Skempton acerca de la capacidad de carga, se determinó el valor de carga última con un factor de seguridad igual a 3, dando como resultado 0.36kg/cm<sup>2</sup>, considerándose así un valor estrictamente bajo. Cuando se colocó una capa de suelo granular compactado de espesor de 0.15m, el valor de la capacidad portante fue de 0.70 kg/cm<sup>2</sup>, incrementando en un 94.55% respecto al suelo natural. Posteriormente al aumentar el espesor de capa granular en 0.30 m y 0.45 m, el valor de la carga última fue de 1.07 kg/cm<sup>2</sup> y 1.52 kg/cm<sup>2</sup>, así incrementado en un 198.50% y 325.55% en proporción al valor del suelo natural.

Finalmente, Serrano et al. (2020) redactaron una revista en la ciudad de Córdoba – Argentina, e incursionaron en la compactación dinámica para la mejora del suelo de la Planta de Tratamiento de Líquido Cloacales Bajo Grande, con el fin de aplicar un proceso de perfeccionamiento del suelo poco difundido en su nación. El artículo describe el procedimiento de la caracterización de suelos bajo ensayos estandarizados y a partir de estos resultados se aplica el mejoramiento mediante la aplicación de cargas dinámicas para su compactación. La compactación se dio con la caída de una masa de 10 toneladas desde una altura de 15 m sobre el terreno con la ayuda de una grúa, en puntos distanciados a cada 2.8 m respectivamente.

Los resultados al aplicar este tipo de estabilización fueron positivos, permitiendo el incremento en un 70% la densidad relativa del suelo, disminuyendo las deformaciones verticales en un 10%, disminuyendo la deformación angular a la mitad de su valor inicial, he incrementado de forma considerable la capacidad portante a una profundidad de 6m con relación al nivel del terreno original. Los autores concluyeron que el suelo mejorado permitió ejecutar las cimentaciones mediante plateas de concreto armado, resultando este más técnico-económico que la alternativa de construir una cimentación profunda mediante pilotes.

### **2.1.2. A Nivel Nacional**

Peralta (2021) en su proyecto de investigación elaborado en la Universidad Autónoma de Chota, desarrolló como finalidad primordial acrecentar la capacidad portante del suelo incorporando distintas proporciones de ladrillo triturado, lechada de cal y cemento diluido. El tesista realizó la excavación de 7 puntos para su respectiva prospección y recolección de muestras. Las proporciones de dosificación que utilizó fueron del 5%, 10% y 15%, para lo cual manejó 9 especímenes por cada punto de dosificación a fin de ejecutar la prueba de corte directo. Como primera fase el investigador analizó el suelo natural, identificando sus características geotécnicas básicas, dando la identificación del tipo de suelo siendo este limo altamente plástico (MH) y arcilla de alta plasticidad (CH), y la capacidad portante en un rango de 0.72 kg/cm<sup>2</sup> y 0.80 kg/cm<sup>2</sup>, como segunda fase procedió a incorporar distintas dosis de los aditivos antes mencionados, que posteriormente tras realizar los ensayos, se determinó las propiedades de resistencia al corte como el ángulo de fricción interna, peso específico, máxima densidad seca, de lo cual se resalta la optimización de la capacidad portante que se incrementa a valores de 0.82 kg/cm<sup>2</sup>, 0.85 kg/cm<sup>2</sup> y 0.90 kg/cm<sup>2</sup> con los residuos de ladrillo, cal y cemento al 15 % de

dosificación. Finalmente, el investigador concluye que la mejor dosis fue la incorporación de cemento diluido, que acrecienta el valor de la capacidad portante en un 15% del valor sin alterar.

Polinario (2021) en su trabajo de investigación realizado en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, trazó como objetivo principal determinar el comportamiento del suelo con la adición de ceniza volcánica en proporciones del 5% , 7%, 9%, 11% y 13%, en el que el suelo es categorizado como grava arcillosa con limo (GC-GM) bajo el sistema SUCS. Por lo tanto, el investigador realizó pruebas de laboratorio de distribución granulométrica, contenido de humedad natural, límites de Atterberg, Proctor modificado, corte directo y el cómputo de la capacidad portante. Para el procedimiento de este trabajo se desarrolló la prospección de 02 calicatas en un entorno descubierto, determinando en el sitio la estratigrafía del suelo en estudio y aprovechando obtener especímenes de suelo representativas para las pruebas de laboratorio. Al adicionar la ceniza volcánica en dosificaciones del 5%, 7%, 9%, 11%, y 13% al suelo natural y dada las pruebas de mecánica de suelos, se obtuvieron los valores de ángulo de fricción de 32.20°, 28.80°, 33.50°, 30.90°, 33.70° y 32.60° respectivamente, concluyendo así que el valor incrementa y disminuye en algunos puntos respecto al valor patrón. Por otro lado, en razón al parámetro de cohesión del suelo se dio los resultados de 0.04 kg/cm<sup>2</sup>, 0.27 kg/cm<sup>2</sup>, 0.37 kg/cm<sup>2</sup>, 0.50 kg/cm<sup>2</sup>, 0.37 kg/cm<sup>2</sup> y 0.40 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente. Para finalizar, el tesista calculó la capacidad portante mediante la fórmula de Terzaghi, dando como resultado de la muestra patrón de 6.69 kg/cm<sup>2</sup> y al adicionar ceniza volcánica en los mismos porcentajes, se obtuvo resultados de 7.53 kg/cm<sup>2</sup>, 15.7 kg/cm<sup>2</sup>, 13.73 kg/cm<sup>2</sup>, 16.09 kg/cm<sup>2</sup> y 14.66 kg/cm<sup>2</sup>, siendo la adición del 11% la más favorable debido a que incrementó en un 141% respecto a

la muestra sin alterar. El investigador finaliza concluyendo que la adición óptima de ceniza volcánica es del 11%, y además la ceniza volcánica incrementa considerablemente la resistencia en los suelos, dado que es un material aglutinante que posee características similares a las del cemento portland.

Díaz (2021) en su investigación realizado en la Universidad Nacional Hermilio Valdizán, cuyo objetivo principal fue de conceptualizar metodológicamente la aplicación de mezcla de suelo y cemento en estado fluido para el tratamiento de terrenos desfavorables para la cimentación de edificaciones. La investigación tuvo como propósito generar debate sobre el manejo del relleno de suelo – cemento para estabilizar suelos perjudiciales frente al relleno compactado tradicional, la norma peruana, establece el mejoramiento de suelos mediante rellenos compactados, pero, en la práctica este método suele ser complejo y caro, por ello el investigador realiza una comparación frente al relleno se suelo – cemento que tiene características como la auto nivelación, auto compactación, densidad y resistencia controlada que admite la mejora del terreno. Se concluye que, el terreno con la mezcla de suelo y cemento en estado fluido presenta mejor respuesta al asentamiento que el relleno con material de préstamo, además esta técnica es muy poco difundida en la sociedad de la construcción lo cual, siendo lo contrario podría beneficiar a la sociedad de manera significativa.

Niño (2018) en su tesis elaborado en la región de Ica – Perú. Trazó como objetivo primordial determinar la mejora de suelos para propósitos de cimentación al incorporar cal. El investigador utilizó un diseño cuasi experimental. Como primera fase realizó la medición y recolección de muestras, como segunda fase incorporó cal en porcentajes de 1%, 3%, 5% y 7% con relación al peso del suelo deshidratado, para luego proceder a ejecutar las pruebas correspondientes. Ante esto, se fijó que

el terreno presenta un suelo arenoso compuesto por arcillas y también conformado por relleno con material orgánico. Los límites de Atterberg, tales como el límite de liquidez e índice de plasticidad del suelo natural son de 27.34%, 21.00% y 6.90% respectivamente, posteriormente al incorporar 3% de cal al suelo en estudio, proporcionó los valores de límite de liquidez, límite e índice plásticos de 26.30%, 32.80% y 0.21% respectivamente. Para finalizar, el investigador concluye que al adicionar cal al suelo mejora la capacidad de carga en un 25%.

Leon (2018) en su investigación desarrollada en la Universidad César Vallejo, priorizó determinar la optimización de suelos con la incorporación de un suelo mejorado para reducir las dimensiones de la cimentación y el costo de las viviendas del área de investigación de la provincia de Chincha, región de Ica. El tesista utilizó una metodología experimental - aplicada. De la investigación, se llegó a deducir que el material de cantera en sus propiedades cumplió con la norma establecida, clasificándose para esta como un suelo arenoso pobremente graduado (SP), concluyendo que el suelo proporciona las características adecuadas para ser usado para fines de cimentación. Los límites de consistencia del suelo de préstamo son los adecuados para que el terreno de cimentación sea determinante en la resistencia de cargas, puesto que las pruebas de laboratorio de Compactación y corte directo lo respaldan. Además, el tesista concluye, que el tratamiento del suelo de las cimentaciones es posible con la adición de cemento mezclado con agua en proporciones exactas, logrando un suelo más compacto, impermeable frente al agua y sobre todo una resistencia alta, todo esto lo demostró a través de ensayos de compactación, de corte directo y de otros complementarios para evaluar sus propiedades físicas.

### **2.1.3. A Nivel Regional y Local**

En el ámbito Local no se encuentran investigaciones que propongan alterar las propiedades geotécnicas del suelo para propósitos de cimentación de edificaciones, pero sí precisan la mejora de las propiedades físicas como la plasticidad del suelo y recomiendan el desarrollo de más investigaciones acerca del tema.

López y Ortiz (2018) en su investigación elaborado en la Universidad Tecnológica de los Andes (tesis de pregrado) realizaron perforaciones al suelo a profundidades de 70cm, con la finalidad de estabilizar el suelo arcilloso de las calles con la adición de cal, donde analizaron especímenes de suelo in situ. Ante ello, desarrollaron ensayos de laboratorio propios para determinar las propiedades geotécnicas del suelo, como resultado obtuvieron del suelo sin estabilizar una humedad natural del 9.44 %, la clasificación SUCS fue arena limo arcilloso con grava, y la relación de soporte de California (CBR) fue de 16.75 %. Del suelo estabilizado con cal se obtuvo un incremento de un 145% en el CBR. En conclusión, para obtener buenos resultados para la estabilización del suelo el porcentaje óptimo de cal es del 8% con relación al peso del suelo sin humedad. Para finalizar, los autores recomiendan utilizar el porcentaje de agua ideal para alcanzar un máximo compactado del suelo, para ello sugieren realizar la prueba de compactación, además, recomiendan realizar pruebas de pH para determinar la cal necesaria, como también el tipo de cal ideal para el tipo de suelo.

Tacca (2021) , en su tesis elaborado en la Universidad César Vallejo tuvo la finalidad de lograr la estabilización del suelo expansivo con la adición de cal para optimizar las propiedades mecánicas, en la vía de evitamiento de la ciudad de

Abancay, realizó un enfoque cuantitativo de tipo experimental, donde sus resultados al incorporar porcentajes de 4%, 8% y 12% de cal al suelo en estudio, obtuvo un incremento notable de las propiedades mecánicas, principalmente en el CBR (95 %), que fue de 28.5 %, en comparación del suelo natural, de cual se obtuvo un 9.0%. Este concluye que los parámetros físicos no fueron alterados totalmente, pero sí los parámetros mecánicos, que aumentaron notablemente con la adición de cal. Para finalizar, recomienda realizar la toma de muestra en estaciones no lluviosas, debido a la dificultad que causa una muestra húmeda a la hora de realizar los ensayos, además, recomienda hacer estudios en puntos de prospección más distantes entre ellos con el objetivo de conocer a mayor detalle el comportamiento de la subrasante y garantizar el diseño óptimo para una infraestructura vial.

## **2.2. Bases Teóricas**

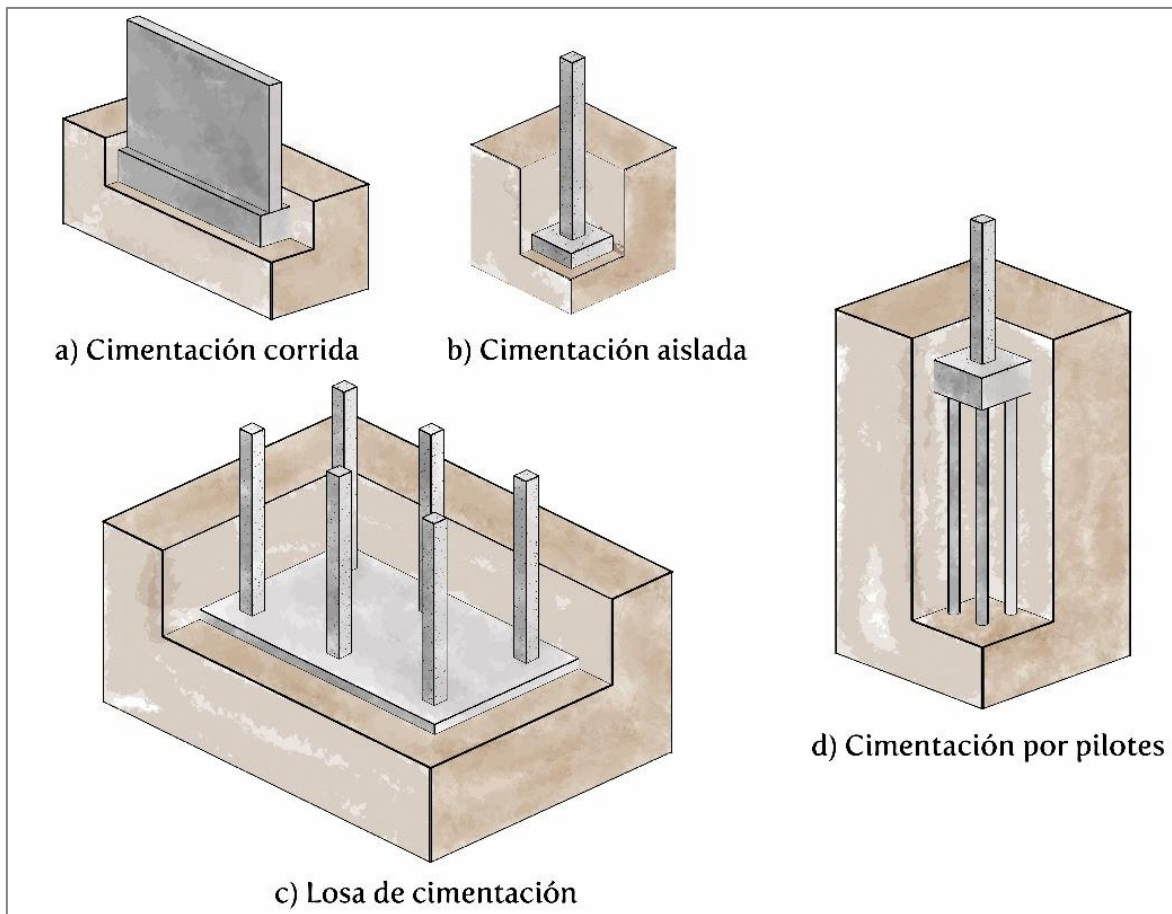
### **2.2.1. Cimentaciones Superficiales**

La cimentación es el componente que concentra los esfuerzos producidos por una edificación y los transmite al suelo, produciendo esfuerzos de forma que logren ser tolerados y no superen la capacidad portante del suelo. Las cimentaciones se categorizan en dos niveles: cimentaciones profundas y cimentaciones superficiales. Las cimentaciones profundas son soportadas por estratos más hondos de lo habitual, en cambio, las cimentaciones superficiales descansan en profundidades menores, de acuerdo con el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) las cimentaciones superficiales son aquellas en las cuales la relación entre profundidad y ancho ( $D_f / B$ ) es igual o menor a 5, donde  $D_f$  representa la profundidad de la cimentación y  $B$  corresponde al ancho o diámetro de la misma. En ese entorno, la Figura 4 nos detalla gráficamente los diferentes

tipos de cimentaciones que existen, es importante resaltar que no son los únicos, también existen diversas variedades de cimentaciones que su tipología depende de la edificación y las condiciones del suelo.

#### Figura 4

##### *Tipos de cimentaciones*



Nota: “a”, “b” y “c” son cimentaciones superficiales, “d” es una cimentación profunda.

**Exploración del suelo y muestreo.** El estudio del suelo se da con la intención de conocer sus propiedades en campo, como también la presencia de agua en el subsuelo del sitio a través de puntos excavados a cierta profundidad.



**Número de puntos de exploración.** Según la Norma Técnica Peruana E.050 Suelos y Cimentaciones (NTP E050, 2018) la cantidad de puntos de muestreo para llevar a cabo un análisis geotécnico se establece en función del tipo de infraestructura y del tamaño del área que ocupa. En la Tabla 1 se denota la cantidad de puntos de muestreo a partir de la importancia de la edificación.

**Tabla 1**

*Número de puntos de exploración*

<b>Número de puntos de exploración</b>	
<b>Tipo de edificación u obra</b>	<b>Número de puntos de exploración (n)</b>
I	Uno por cada 225 m <sup>2</sup> de área techada del primer piso.
II	Unos por cada 450 m <sup>2</sup> de área techada del primer piso.
III	Uno por cada 900 m <sup>2</sup> de área techada del primer piso.
IV	Uno por cada 100m de instalaciones sanitarias de agua y alcantarillado en obras urbanas.
Habilitación urbana para viviendas unifamiliares de hasta 3 pisos	3 por cada hectárea de terreno por habilitar

*Nota.* “n” siempre será mayor a 3. Tomado de la NTP E.050 Suelos y Cimentaciones (2018).

**Profundidad mínima en cada punto de exploración.** Lo mínimo requerido para la profundidad de prospección en cada sitio de exploración para el estudio geotécnico dependerá de la finalidad del estudio y de las características del subsuelo, para ser precisos se debe conocer si la edificación presentará sótano y saber las dimensiones de su cimentación, por consiguiente, según la NTP E.050

(2018b, p. 32) se procede con el cálculo para determinar la profundidad “p” con las siguientes fórmulas:

*EC- 1 : Profundidad de exploración para edificación sin sótano*

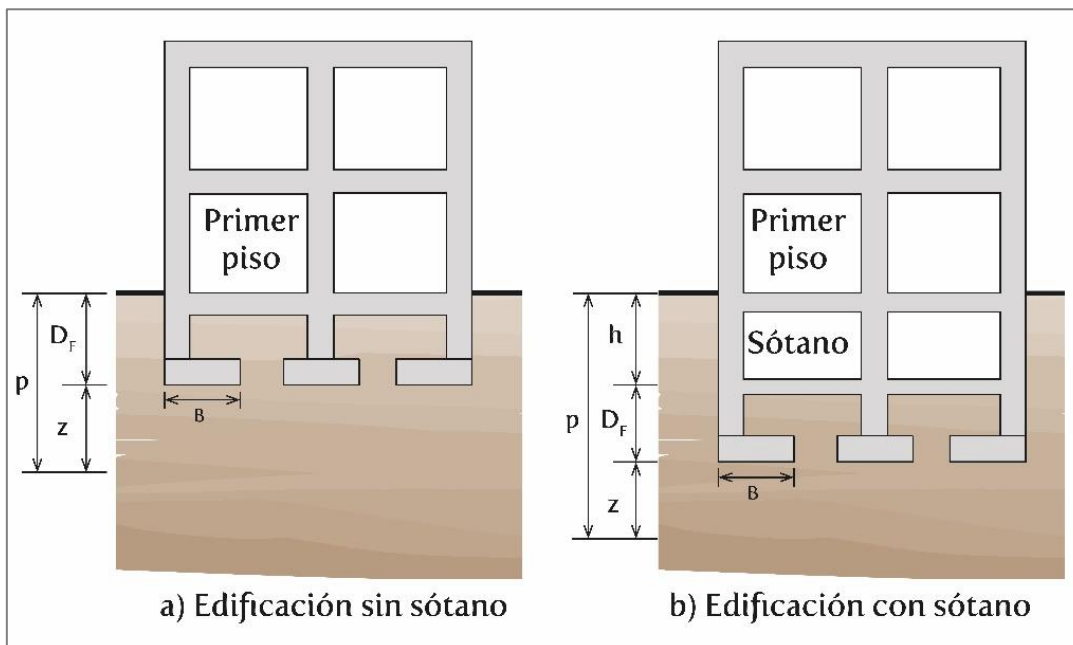
$$p = D_f + z \quad \dots\dots\dots(1)$$

*EC- 2 : Profundidad de exploración para edificación con sótano*

$$p = h + D_f + z \quad \dots\dots\dots(2)$$

**Figura 5**

*Profundidad de cimentación “p”*



*Nota:* “z” es 1.5 veces el ancho de la zapata “B”, “p” nunca es menor a 3 metros en edificaciones sin sótano y no menor a 6 metros en edificaciones con sótano.

Adaptado de la NTP E.050 (2018)

**Determinación de las propiedades geotécnicas del suelo.** Las características geotécnicas tal como la granulometría, límites de consistencia y compactación, son determinados con ensayos de laboratorio y se describe en las siguientes secciones.

**Análisis granulométrico.** Las diferentes partículas que componen cada muestra de suelo siempre varían en sus dimensiones, por ello, se realiza ensayos que determinan la distribución granulométrica para realizar su clasificación. Usualmente para obtener la dimensión de los granos gruesos se ejecuta la prueba de granulometría por medio del tamizado, este ensayo se desarrolla escogiendo una muestra representativa del suelo deshidratado, sin contenido de fino y tamizándolo a través de las mallas ordenadas de acuerdo al tamaño de su abertura, de forma descendente (Tabla 2), de donde se precisa el “porcentaje que pasa” y se representa como la Figura 6.

**Tabla 2**

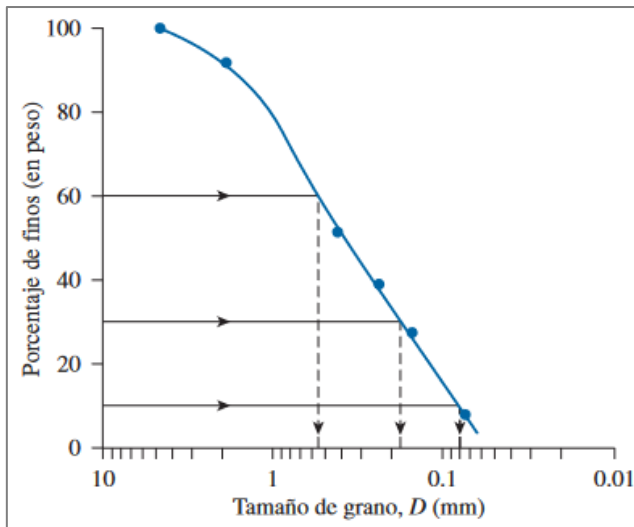
*Tamaños de cribas U.S. standard*

<b>Malla no</b>	<b>Abertura (mm)</b>
<b>4</b>	4.750
<b>6</b>	3.350
<b>8</b>	2.360
<b>10</b>	2.000
<b>16</b>	1.180
<b>20</b>	0.850
<b>30</b>	0.600
<b>40</b>	0.425
<b>50</b>	0.300
<b>60</b>	0.250
<b>80</b>	0.180
<b>100</b>	0.150
<b>140</b>	0.106
<b>170</b>	0.088
<b>200</b>	0.075
<b>270</b>	0.053

Nota: Tomado de “*Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*”, M Das (2011).

**Figura 6**

*Granulometría de un suelo de grano grueso*



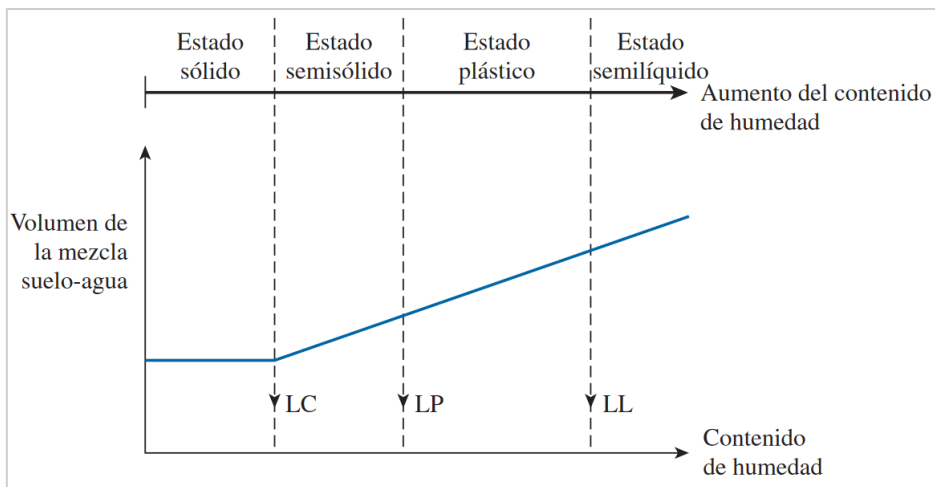
Nota: La figura representa la granulometría de un espécimen de suelo realizado por el procedimiento del tamizado. Tomado de “*Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*”, M Das (2011).

Los porcentajes de retención en las cribas determinan la cantidad de grava, arena y arcilla que conforman el suelo. Estos parámetros se usan para categorizar el suelo a través de los procesos sistematizados SUCS y AASHTO.

**Límites de consistencia.** Un suelo cohesivo al contener agua entre sus partículas de manera excesiva se comporta de manera fluida, sin embargo, si el suelo es deshidratado progresivamente, este adoptará su comportamiento como un cuerpo sólido, semisólido o plástico, dependiendo a su porcentaje de hidratación. El porcentaje de hidratación del suelo con el que se convierte de una condición líquida a plástica se denomina límite líquido (LL). De la misma forma, el porcentaje de hidratación para que el suelo cambie de una condición plástica a una condición sólida se denomina límite plástico (LP), la Figura 7 denota esta definición.

## Figura 7

### Definición de los Límites de Consistencia



Nota: Tomado de “Fundamentos de ingeniería de cimentaciones”, M Das (2011).

Con el aparato denominado Copa de Casagrande se establece el límite de liquidez, que es el ensayo D-4318 de la norma ASTM [Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils]. Se calcula como la cantidad de agua necesaria para que el surco se cierre 12.7 mm (1/2 pulgada) después de 25 golpes.

El límite plástico (prueba D-4318 de la ASTM) es la cantidad de agua medido porcentualmente con el cual una representación del suelo en forma tubular, de diámetro de 3.18mm se agrieta. Esto refiere a la humedad mínima necesaria para que el material adquiera cierta plasticidad y pueda ser moldeado sin romperse.

El resultado de la resta de los valores del LL y LP se designa como Índice Plástico (IP) y se muestra en la EC-3.

EC- 3 : Índice plástico

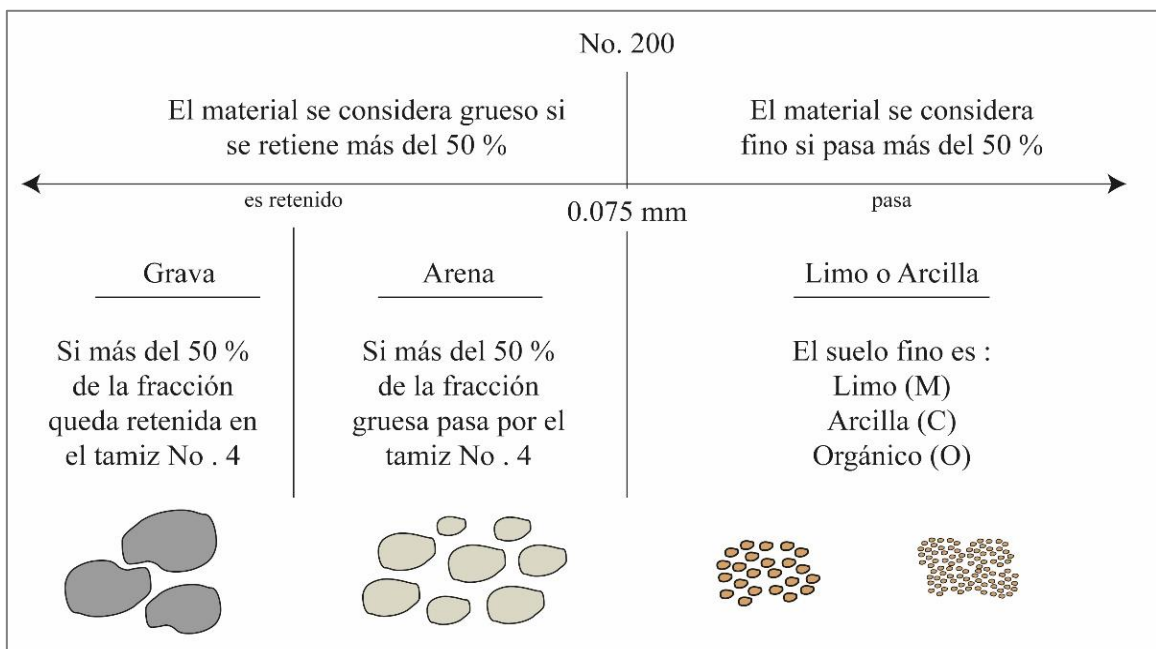
$$IP = LL - LP \quad \dots\dots\dots(3)$$

**Sistema de clasificación de suelos.** La clasificación de suelos mediante los sistemas más utilizados fracciona al suelo en varios tipos según sus propiedades físicas tales como su granulometría y plasticidad. Hoy en día los procesos sistemáticos de clasificación de suelos son los métodos AASHTO y SUCS, este último sirve para caracterizar suelos para fines de edificaciones.

El método SUCS fracciona al suelo en dos grupos, el primer grupo compuesto por suelos de granos gruesos, donde sus partículas retenidas en la malla No 200 exceden más de la mitad, cabe mencionar que este suelo se fracciona en arenas y gravas. El segundo grupo está compuesto por suelos de granos finos, donde más de la mitad de sus partículas pasan la malla No 200, en la Figura 8 se detalla a grandes rasgos los factores.

**Figura 8**

*Factores a considerar en la clasificación de suelos (SUCS)*



Nota: Adaptado del “Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil” (Bowles, 1990).

La simbología que usa el sistema unificado se distingue en la Tabla 3:

**Tabla 3**

*Simbología del sistema unificado*

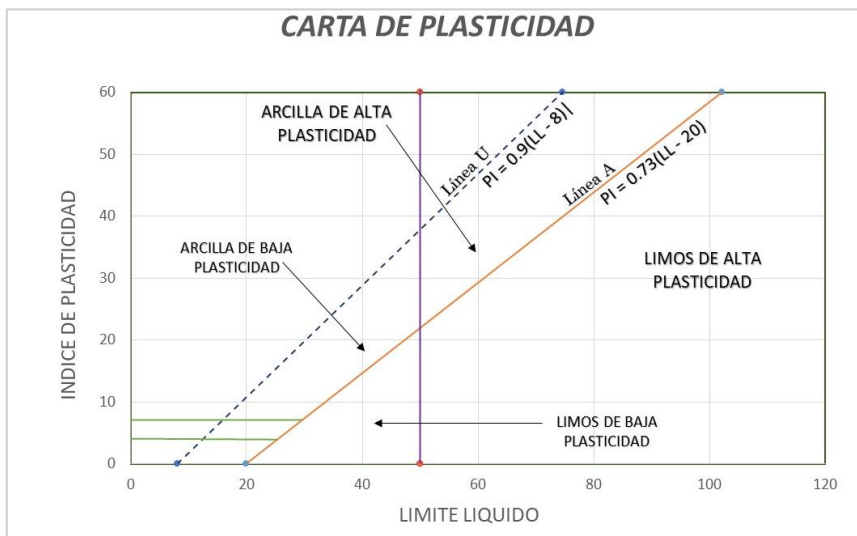
Símbolo	G	S	M	C	O	Pt	H	L	W	P
Descripción	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Limo orgánico y arcilla	Turba y suelos altamente orgánicos	Alta plasticidad	Baja plasticidad	Bien graduado	Mal graduado

Nota: Tomado de *Fundamentos de Ingeniería de cimentaciones*, M Das (2011).

Cuando las partículas finas sobrepasan el 12% del material total, indica que en el suelo se encuentra gran porcentaje de limo o arcilla. Para determinar si se trata de limo o arcilla, es necesario conocer los parámetros de liquidez y plasticidad del suelo. Con los criterios propuestos por Casagrande en su carta de plasticidad (Figura 9) es factible obtener la cantidad de limo y arcilla de un suelo.

**Figura 9**

*Carta de plasticidad de Casagrande*



Nota: Adaptado del *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*, (Bowles, 1990).

**Densidad del suelo en el campo.** Una vez determinado el sitio para realizar la prospección del suelo, es importante verificar la densidad de este. Conocer esta propiedad del suelo en estado natural es importante para calcular su capacidad portante.

Esta verificación se realiza de manera correcta mediante la prueba de cono de arena o la prueba de balón de densidad, los dos métodos se realizan bajo los mismos criterios, el cual es determinar el peso del suelo proveniente de un agujero excavado de pequeñas dimensiones, posterior a ello se determina el volumen del agujero excavado para finalmente obtener la relación peso sobre volumen del suelo natural denominado densidad.

El volumen del hueco se obtiene mediante el uso del cono de arena o el balón para densidad, en este caso hablaremos más del cono de arena, que es el más común. Este método determina el volumen de una manera indirecta mediante la arena de Ottawa, que es el material contenido entre el tamiz No 20 y el tamiz No 30. Lo recomendado es que los granos de este material sean de un mismo tamaño.

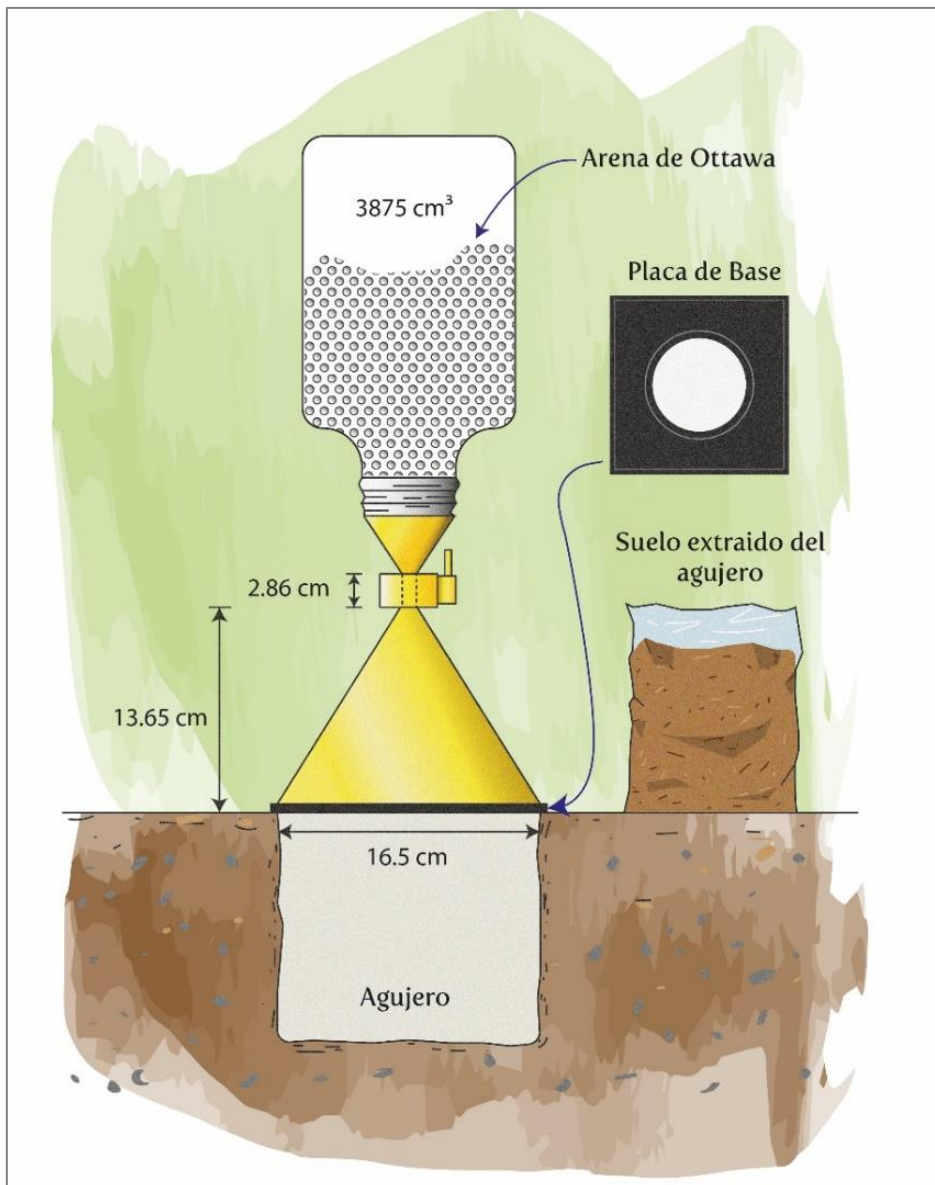
Para efectuar este ensayo (Figura 10), es primordial saber los siguientes datos: densidad de la arena calibrada (arena de Ottawa), el peso del contenedor con el cono y la arena calibrada al cual llamaremos peso inicial, seguidamente proceder al terreno y excavar un agujero de volumen cilíndrico del diámetro de la placa base, el suelo removido del hueco excavado debe ser recogido cuidadosamente en una bolsa hermética para mantener su humedad natural y pesarlo en una balanza calibrada. A continuación, situar el aparato del cono de arena de forma que el cono encaje con la placa base y abrir la llave de paso para que la arena caiga y llene el agujero. En el momento en que deje de caer la arena,



se debe cerrar la válvula, recoger el aparato y proceder a pesarlo, el resultado será nombrado peso final. Es claro que se debe recoger la arena del hueco, evitando la infiltración de partículas de mayor tamaño.

### Figura 10

*Medición de la densidad en campo a través del cono de arena*



Nota: Adaptado del "Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil", (Bowles, 1990).

Con los datos recolectados en campo y el porcentaje de agua del suelo ( $w$ ) se procede a hacer los cálculos en gabinete que establecen los valores de densidad húmeda ( $\gamma_{HUM}$ ) y densidad seca ( $\gamma_{SECA}$ ) a través de las presentes ecuaciones.

*EC- 4 :Densidad húmeda del suelo*

$$\gamma_{HUM} = \frac{\text{Peso del suelo húmedo}}{\text{Volumen del hueco}} \dots\dots\dots(4)$$

*EC- 5 : Densidad seca del suelo*

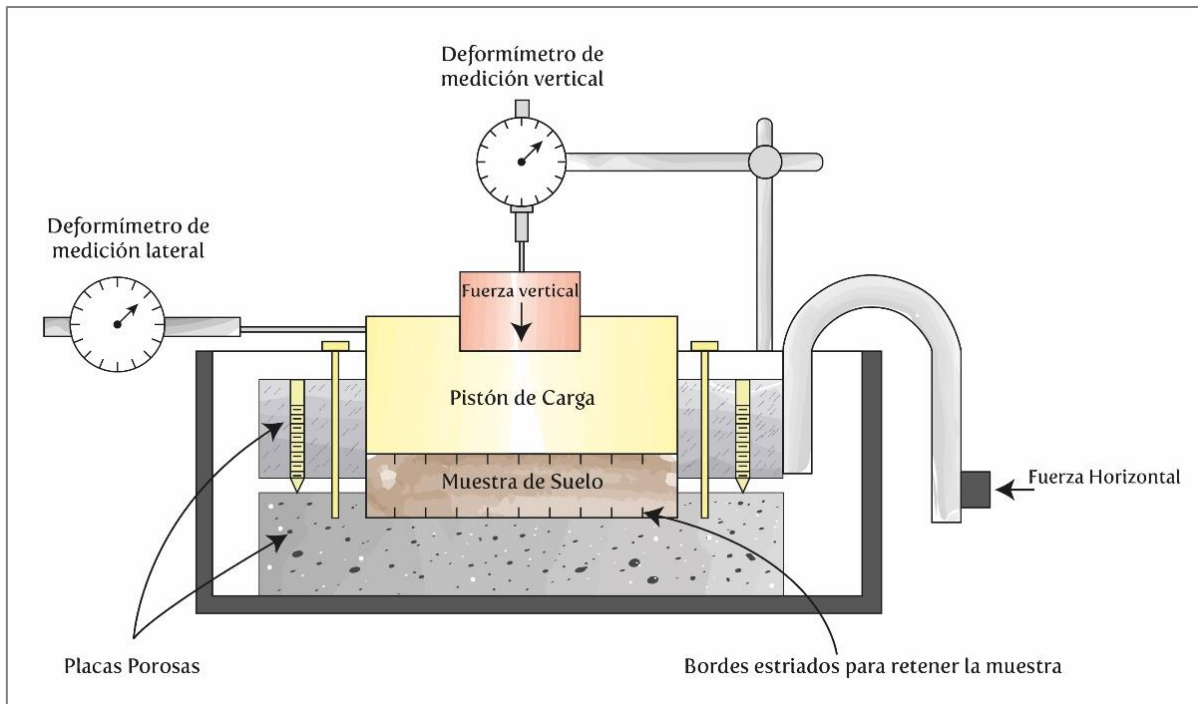
$$\gamma_{SECA} = \frac{\gamma_{HUM}}{1 + w} \dots\dots\dots(5)$$

**Determinación de las Propiedades de Resistencia al Esfuerzo Cortante del Suelo.** La capacidad portante de un suelo se ve significativamente influenciada por su resistencia al corte, la cual desempeña un papel crucial. Esta resistencia varía en función de la tipología del suelo, su profundidad, la presencia de alteraciones estructurales, así como de la saturación capilar, el contenido de humedad y la filtración (Huanca Borda, 1996, p. 82). Estos parámetros se determinan mediante pruebas de laboratorio tanto como el ensayo triaxial o el ensayo de corte directo.

**Resistencia al corte (Prueba de corte Directo).** Esta prueba se utiliza para idealizar las condiciones de un suelo frente a un plano en el que actúan dos cargas, una carga normal o también llamado esfuerzo vertical  $P_v$  y una fuerza horizontal o denominado esfuerzo cortante  $P_h$ ; estos esfuerzos lo simula el aparato de corte directo. En la Figura 11 se denota ilustrativamente la composición del aparato de corte directo.

**Figura 11**

*Detalles del ensayo o prueba de la caja de corte directo*



Nota: Adaptado del “Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil”, (Bowles (1990).

Estos esfuerzos se denominan como:

*EC- 6 : Esfuerzo normal (vertical)*

$$\sigma_n = \frac{P_v}{A} \quad \dots\dots\dots(6)$$

*EC- 7 : Esfuerzo cortante (horizontal)*

$$\tau = \frac{P_h}{A} \quad \dots\dots\dots(7)$$

La variable “A” representa el valor nominal de área del espécimen de suelo o de la caja de corte directo y habitualmente no se modifica para poder determinar el deslizamiento lateral de la muestra  $P_h$ . Los valores calculados satisfacen la ecuación de Coulomb (EC-8).

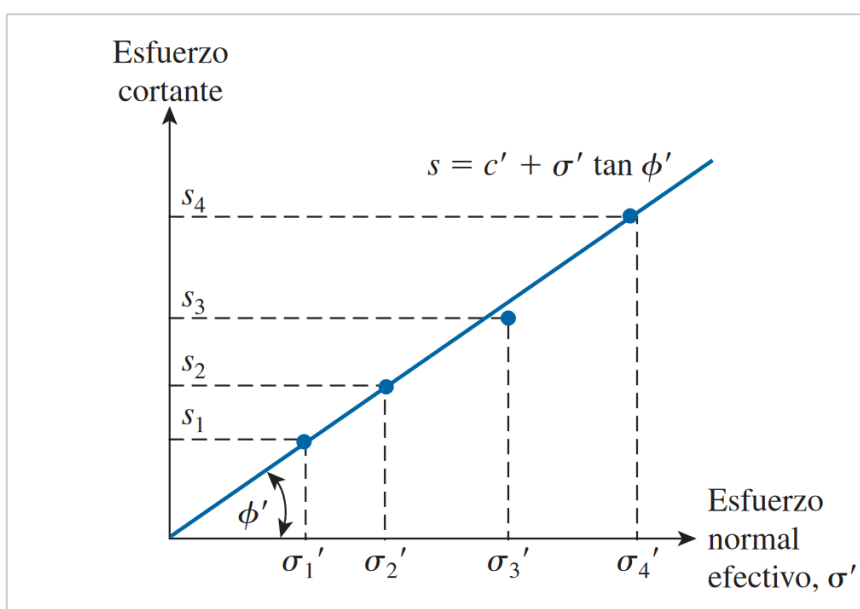
EC- 8 : Ecuación de Coulomb sobre esfuerzo cortante

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad \dots\dots\dots(8)$$

En la ecuación EC- 8 existen dos valores desconocidos ( $c$  y  $\phi$ ), para obtener la solución se requiere el valor del esfuerzo normal y el esfuerzo horizontal como mínimo. El ángulo de fricción interna de los granos gruesos puede ser establecido trazando un gráfico de  $\tau$  contra  $\sigma_n$  , así como se observa en la Figura 12.

**Figura 12**

*Diagrama de resultados de la prueba para calcular el ángulo de fricción interna*



Nota: Tomado de “Fundamentos de ingeniería de cimentaciones”, M Das (2011).

**Determinación de la capacidad de carga de un suelo.** Este parámetro está sujeto a la morfología y la profundidad de desplante de la cimentación, ya sea cimentación superficial o profunda. En este caso, se describirá la capacidad portante específica para cimentaciones superficiales.

**Capacidad de carga en cimentaciones superficiales.** La carga ejercida por el peso de una construcción en el suelo que causa una falla por resistencia al

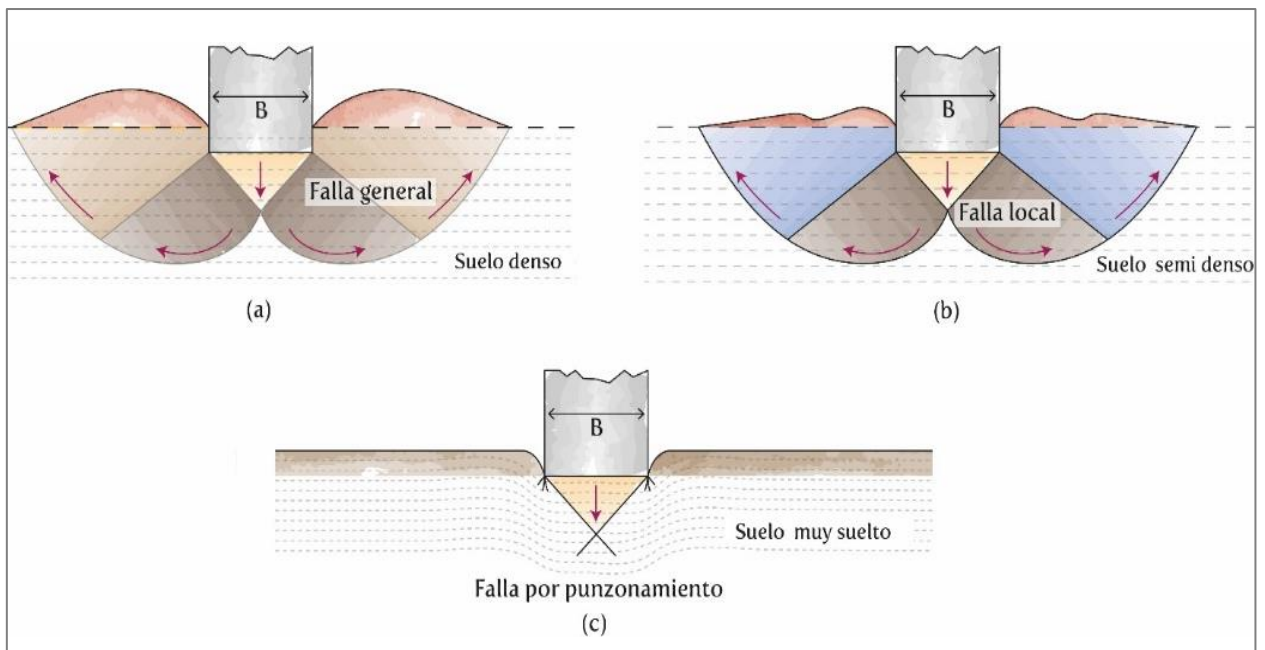
esfuerzo cortante se denomina capacidad de carga última. A este valor se le aplica un factor divisor que varía de 1 a 3, lo que resulta en la capacidad portante del suelo y se cuantifica como la carga por unidad de área de la cimentación.

Las cimentaciones superficiales deben garantizar la seguridad contra una falla por corte del terreno en el que descansa y no exceder los asentamientos permisibles según sea las consideraciones o normativas de cada país, sobre todo, evitar los asentamientos diferenciales que son los más peligrosos para cualquier estructura, o por lo menos, cumplir con los asentamientos permisibles para evadir cualquier peligro.

Los mecanismos de falla en cimentaciones superficiales se producen cuando la carga aplicada al suelo sobrepasa su capacidad última, produciendo un deslizamiento debajo del cimiento que se extiende a la superficie. Este se divide en 3 casos que dependen de la densidad compacta o suelta del suelo. Suponiendo que a la cimentación se le aplica gradualmente un esfuerzo normal hasta el punto que rebase la capacidad última del terreno, en el caso de que la cimentación descansa en un suelo altamente densificado como arena o arcilla compacta ocurrirá una falla general por corte produciendo una reacción violenta en la parte superior del suelo (Figura 13.a), si el cimiento se apoya en un suelo medianamente compacto ocurrirá el caso de una falla local por corte produciendo un levantamiento ligero en la parte superior del terreno (Figura 13.b) , finalmente, cuando la cimentación esté asentada en un suelo muy suelto se producirá un desplazamiento lineal debajo de la cimentación sin afectar la parte superior del terreno, a este caso se le renombra falla de corte por punzonamiento (Figura 13.c).

**Figura 13**

*Fallas por capacidad de carga en cimentaciones superficiales*



Nota: Adaptado de “Fundamentos de ingeniería de cimentaciones”, M Das (2011).

En el año 1943 el ingeniero Karl Terzaghi gran influyente de la geotecnia y pionero de la ingeniería de cimentaciones, presentó una teoría global para obtener la capacidad de soporte última para cimentaciones superficiales. Cabe mencionar que esta teoría fue la primera en evaluar el límite de capacidad de soporte del suelo.

**Capacidad de carga según Terzaghi.** Efectuando el análisis de equilibrio, Terzaghi sugirió las siguientes fórmulas con el propósito de obtener este valor para el caso de una falla general por corte:

*EC- 9 : Capacidad portante en cimiento cuadrado, caso: falla general por corte*

$$q_u = 1.3 cN_c + qN_q + 0.4\gamma BN_\gamma \quad \dots\dots\dots(9)$$

*EC- 10 : Capacidad portante en cimiento corrido, caso: falla general por corte*

$$q_u = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma \quad \dots\dots\dots(10)$$

Donde:

$c$  = cohesión del suelo

$\gamma$  = peso unitario del suelo

$q$  = esfuerzo efectivo al fondo de cimentación

$N_c, N_q, N_\gamma$  = factores de capacidad de carga adimensionales en función del ángulo de fricción del suelo  $\phi$

Para cimentaciones que están soportados por suelos arcillosos o arenosos de compactación media y ostentan el caso de falla local por corte, Terzaghi propuso los enunciados descritos a continuación:

*EC- 11 : Capacidad portante en cimiento corrido, caso: falla local por corte*

$$q_u = \frac{2}{3} c' N'_c + q N'_q + \frac{1}{2} \gamma B N'_\gamma \quad \dots\dots\dots(11)$$

*EC- 12 : Capacidad portante en cimentación cuadrada, caso: falla local por corte*

$$q_u = 0.867 c' N'_c + q N'_q + 0.4 \gamma B N'_\gamma \quad \dots\dots\dots(12)$$

Donde:

$c$  = cohesión del suelo

$\gamma$  = peso unitario del suelo

$q$  = esfuerzo efectivo al fondo de cimentación

$N'_c, N'_q, N'_\gamma$  = factores de capacidad de carga modificadas reemplazando  $\phi$  por  $\phi' = \tan^{-1}(\frac{2}{3} \tan \phi)$

Las fórmulas están en función de B que es el ancho de la zapata, además de ello, para determinar la capacidad portante final se le divide por un valor llamado factor de seguridad que oscila de 1 a 3 y depende de la importancia de la edificación.

“Las ecuaciones de capacidad de carga de Terzaghi se modificaron para tomar en cuenta los efectos de la forma de la cimentación (B/L), profundidad de empotramiento ( $D_f$ ), e inclinación de la carga” (M Das, 2011, p. 159).

**Ecuación general de la capacidad de carga.** En base a investigaciones de laboratorio y campo dado por autores como Vesic, Meyerhof y Hansen se concluye a una fórmula general que toma en cuenta factores que están en función de la forma y profundidad de la cimentación, y la inclinación de la carga (EC- 13):

*EC- 13 : Ecuación general de la capacidad de carga*

$$q_u = c N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} \quad \dots\dots\dots(13)$$

Donde:

$c$  = cohesión del suelo

$\gamma$  = peso unitario del suelo

$q$  = esfuerzo efectivo al fondo de cimentación

$N_c, N_q, N_\gamma$  = factores de capacidad de carga

$F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$  = factores de forma

$F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$  = factores de profundidad

$F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$  = factores de inclinación

Los factores descritos anteriormente son empíricos basados en antecedentes experimentales, y se detallan seguidamente.

Factores de capacidad de carga

*EC- 14 : Factor de carga  $N_q$*

$$N_q = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) e^{\pi \tan \phi'} \quad \dots\dots\dots(14)$$



EC- 15 : Factor de carga  $N_c$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi' \quad \dots\dots\dots(15)$$

EC- 16 : Factor de carga  $N_\gamma$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi' \quad \dots\dots\dots(16)$$

**Tabla 4**

*Factores de capacidad de carga para la ecuación de Meyerhof (1976)*

$\phi'$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$\phi'$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$
0	5.14	1	0	26	22.25	11.85	12.54
1	5.38	1.09	0.07	27	23.94	13.2	14.47
2	5.63	1.2	0.15	28	25.8	14.72	16.72
3	5.9	1.31	0.24	29	27.86	16.44	19.34
4	6.19	1.43	0.34	30	30.14	18.4	22.4
5	6.49	1.57	0.45	31	32.67	20.63	25.99
6	6.81	1.72	0.57	32	35.49	23.18	30.22
7	7.16	1.88	0.71	33	38.64	26.09	35.19
8	7.53	2.06	0.86	34	42.16	29.44	41.06
9	7.92	2.25	1.03	35	46.12	33.3	48.03
10	8.35	2.47	1.22	36	50.59	37.75	56.31
11	8.8	2.71	1.44	37	55.63	42.92	66.19
12	9.28	2.97	1.69	38	61.35	48.93	78.03
13	9.81	3.26	1.97	39	67.87	55.96	92.25
14	10.37	3.59	2.29	40	75.31	64.2	109.41
15	10.98	3.94	2.65	41	83.86	73.9	130.22
16	11.63	4.34	3.06	42	93.71	85.38	155.55
17	12.34	4.77	3.53	43	105.11	99.02	186.54
18	13.1	5.26	4.07	44	118.37	115.31	224.64
19	13.93	5.8	4.68	45	133.88	134.88	271.76
20	14.83	6.4	5.39	46	152.1	158.51	330.35
21	15.82	7.07	6.2	47	173.64	187.21	403.67
22	16.88	7.82	7.13	48	199.26	222.31	496.01
23	18.05	8.66	8.2	49	229.93	265.51	613.16
24	19.32	9.6	9.44	50	266.89	319.07	762.89
25	20.72	10.66	10.88				

Nota: Tomado de “Fundamentos de ingeniería de cimentaciones” (M Das, 2011, p. 144).

## Factores de forma

EC- 17 : Factor de forma  $F_{cs}$  (DeBeer, 1970)

$$F_{cs} = 1 + \left(\frac{B}{L}\right) \left(\frac{N_q}{N_c}\right) \dots\dots\dots(17)$$

EC- 18 : Factor de forma  $F_{qs}$  (DeBeer, 1970)

$$F_{qs} = 1 + \left(\frac{B}{L}\right) \tan \phi \dots\dots\dots(18)$$

EC- 19 : Factor de forma  $F_{\gamma s}$  (DeBeer, 1970)

$$F_{\gamma s} = 1 + 0.4 \left(\frac{B}{L}\right) \dots\dots\dots(19)$$

## Factores de profundidad

si;  $\frac{D_f}{B} \leq 1$  ... (Caso I)

EC- 20 : Factores de profundidad, caso I, para  $\phi = 0$  (Hansen, 1970)

$$F_{cd} = 1 + 0.4 \left(\frac{D_f}{B}\right) \dots\dots\dots(20)$$

$$F_{qd} = 1$$

$$F_{\gamma d} = 1$$

EC- 21 : Factores de profundidad, caso I, para  $\phi > 0$  (Hansen, 1970)

$$F_{cd} = F_{qd} - \frac{1 - F_{qd}}{N_c \tan \phi'} \dots\dots\dots(21)$$

$$F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi' (1 - \text{sen } \phi')^2 \left(\frac{D_f}{B}\right)$$

$$F_{\gamma d} = 1$$

si;  $\frac{D_f}{B} > 1$  ... (Caso II)

EC- 22 : Factores de profundidad, caso II, para  $\phi = 0$  (Hansen, 1970)

$$F_{cd} = 1 + 0.4 \tan^{-1} \left(\frac{D_f}{B}\right) \dots\dots\dots(22)$$

$$F_{qd} = 1$$

$$F_{\gamma d} = 1$$

EC- 23 : Factores de profundidad, caso II, para  $\phi > 0$  (Hansen, 1970)

$$F_{cd} = F_{qd} - \frac{1 - F_{qd}}{N_c \tan \phi'} \dots\dots\dots(23)$$

$$F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi' (1 - \text{sen } \phi')^2 \tan^{-1} \left( \frac{D_f}{B} \right)$$

$$F_{\gamma d} = 1$$

Factores de inclinación

EC- 24 : Factores de inclinación (Hanna y Meyerhof, 1981)

$$F_{ci} = F_{qi} = \left( 1 - \frac{\beta^\circ}{90^\circ} \right)^2 \dots\dots\dots(24)$$

$$F_{\gamma i} = \left( 1 - \frac{\beta}{\phi'} \right)$$

Donde:

$\beta$ = inclinación de la carga sobre la cimentación respecto a la vertical

**Capacidad de carga basado en la NTP E.050 Suelos y Cimentaciones.**

La ecuación de capacidad portante empleada por la NTP varía en el uso de los factores de carga y de forma, así como la inclinación de la carga, respecto a las anteriores fórmulas.

EC- 25: Capacidad portante (NTP E0.50)

$$q_u = S_c i_c N_c c + i_q \gamma_1 D_f N_q + 0.5 s_\gamma i_\gamma \gamma_2 B' N_\gamma \dots\dots\dots(25)$$

Factores de Carga:

EC- 26: Factores de carga (NTP E.050)

$$N_q = e^{\pi \tan \phi'} \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) \dots\dots\dots(26)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi'$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1,4 \phi')$$

Factores de forma

*EC- 27: Factores de forma (NTP E.050)*

$$s_c = 1 + 0.2 \left( \frac{B}{L} \right) \dots\dots\dots(27)$$

$$s_\gamma = 1 - 0.2 \left( \frac{B}{L} \right)$$

Factores de inclinación

*EC- 28: Factores de inclinación (NTP E.050)*

$$F_{ci} = F_{qi} = \left( 1 - \frac{\beta^\circ}{90^\circ} \right)^2 \dots\dots\dots(28)$$

$$F_{\gamma i} = \left( 1 - \frac{\beta}{\phi'} \right)$$

**2.2.2. Adición de Cal para la Estabilización de Suelos Expansivos**

Quizás uno de los materiales de la industria de la construcción que cada día es más popular es el uso de la cal para estabilizar el suelo. Esta aplicación suele darse en carreteras y cimentaciones, donde la presencia de arcilla supone una amenaza para la estabilidad de la estructura colocada sobre ella. El proceso se lleva a cabo de la siguiente manera: primero, se mezcla la cal con la tierra en estado seco. Luego, se agrega agua en una cantidad adecuada, generalmente un 2% más alta que el valor óptimo. Por último, se compacta la mezcla hasta alcanzar el nivel requerido para reducir el riesgo de la presencia de arcilla, ya que la cal actúa como inhibidor de la plasticidad y aporta elementos de dureza en su lento proceso de fraguado.

Pero puede combinarse químicamente de forma eficaz con varios minerales de la arcilla. Braja M Das (2011) menciona que un suelo que contenga una mezcla de cemento o cal en un 5% respecto a su peso seco es suficiente para estabilizarlo para los diferentes casos que pueda presentar un suelo. La influencia de la adición de cal en un suelo expansivo principalmente reduce su expansión y contracción, como también sus parámetros de plasticidad, en general reduce la expansividad del suelo.

“Este tipo de trabajo de estabilización se puede hacer hasta una profundidad de 1 a 1.5 m. Para la estabilización con cal se utiliza por lo general cal hidratada con contenido alto de calcio y cal dolomita” (M Das, 2011, p. 710).

### ***2.2.3. Adición de Cemento para la Estabilización de Suelos Expansivos***

Actualmente, se utilizan agentes químicos para estabilizar el suelo en condiciones físicas y mecánicas deficientes en vías y calles. Uno de estos agentes es el suelo-cemento, que se produce mezclando un suelo disgregado con cemento y agua, compactando la mezcla y permitiendo un curado adecuado. Este proceso produce un suelo con mejores propiedades mecánicas y una durabilidad mucho mayor.

“Como la cal el cemento ayuda a incrementar la resistencia de los suelos y la resistencia crece con el tiempo de curado” (M Das, 2011, p. 814). La adición de cemento a un suelo mejora su capacidad portante y reduce su permeabilidad hidráulica.

La cantidad de cemento que va a intervenir, según investigaciones anteriores varía de 9% a 15%, que mediante ensayos de compactación se determina el contenido de agua ideal para lograr la máxima densidad del suelo.

### **2.3. Marco Conceptual**

**Cimentación.** La cimentación de una estructura se compone por elementos que transmiten el peso y la carga producida por la edificación dirigido al terreno o suelo de fundación de forma distribuida sin superar la presión última del suelo (M Das, 2011, p. 1).

**Suelo.** Cada tipo de suelo se origina a partir de la fragmentación física y química de las rocas, a excepción de los suelos orgánicos, los cuales se forman a partir de la descomposición de organismos vivos (Huanca Borda, 1996, p. 149).

**Suelo arcilloso.** Son suelos que en su estructura contiene grandes cantidades de arcilla, como también barro y arena en pocas cantidades respecto a la arcilla. Habitualmente este suelo es expansivo debido a que en sus espacios vacíos retiene agua y este hace que incremente su volumen y su fácil deformabilidad (M Das, 2013, p. 7).

**Capacidad Portante.** Técnicamente es la máxima expresión media de contacto entre las cimentaciones y el terreno, tal que no ocurra un fallo debido a fuerzas cortantes o un desplazamiento vertical diferenciado abrupto (M Das, 2011, p. 133)

**Cal (Óxido de Calcio).** La cal es un compuesto alcalino blanco o blanquecino que, cuando se le proporciona agua, este se hidrata o se apaga, liberando calor. Tienen menor resistencia y velocidad de fraguado que los morteros

de cemento, pero también son más prácticos que estos en cuanto a trabajabilidad (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018a, p. 8).

**Cemento.** Se trata de un conglomerante compuesto de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas que fueron sometidos a un proceso de molienda mecánica, esta se caracteriza por petrificarse al entrar en contacto con el agua. Este material que se obtiene triturando estas rocas se le denomina clínker, al agregarle una proporción mínima de yeso se convierte en cemento con el propósito de evitar que la mezcla fragüe y se encoja al endurecerse después de añadir agua (Pasquel Carbajal, 1998, p. 17).

**Estabilización de Suelos con Cal.** Este consiste en distorsionar de manera positiva las propiedades geotécnicas de un suelo, obteniendo como resultado la mejora en sus características de resistencia y estabilidad, empleando la mezcla del suelo con adición de cal y curarlo con agua. La estabilización con cal se recomienda preferentemente en suelos con granos finos (arcillosos) como también en suelos orgánicos (Instituto del Cemento y sus Aplicaciones, 2008, p. 20).

**Estabilización de Suelos con Cemento.** Se define que es la combinación del suelo con cemento, también denominado suelo-cemento que también involucra agua y posiblemente otros aditivos. Se complementa con la compactación y curado adecuado para finalmente obtener un suelo más compacto y resistente (Instituto del Cemento y sus Aplicaciones, 2008, p. 22).

**Ensayo de análisis granulométricos para suelos.** Usualmente para obtener la dimensión de los granos gruesos se ejecuta la prueba de granulometría por medio del tamizado, este ensayo se desarrolla escogiendo una muestra representativa del suelo deshidratado, sin contenido de fino y tamizándolo a través

de las mallas ordenadas de acuerdo al tamaño de su abertura, de forma descendente (Comité Técnico permanente de Geotecnia, 1999, p. 8).

**Ensayo de Límite de líquido (LL).** Este proceso se establece empleando la copa de Casagrande, que es el ensayo D-4318 de la norma ASTM. Se calcula como el contenido de agua necesario para que la ranura se cierre 12.7 mm (1/2 pulgada) después de 25 golpes (Comité Técnico permanente de Geotecnia, 2014, p. 3).

**Ensayo de Límite de plástico (LP).** El límite plástico (prueba D-4318 de la ASTM) es la cantidad de agua medido porcentualmente con el cual un espécimen de suelo en forma cilíndrica, de diámetro de 3.18mm (1/8 in) se agrieta. Esto refiere al porcentaje de agua mínimo necesario para que el material adquiera cierta plasticidad y pueda ser moldeado sin romperse (Comité Técnico permanente de Geotecnia, 2014, p. 3).

**Índice de plasticidad.** El resultado de la resta entre el LL y LP se designa como Índice Plástico (IP) y es un parámetro muy importante a la hora de clasificar los suelos (Comité Técnico permanente de Geotecnia, 2014, p. 4).

**Ensayo de corte directo.** Es una prueba para determinar la resistencia al corte de un suelo. Esta prueba se utiliza para idealizar las condiciones de un suelo frente a un plano en el que actúan dos cargas, una vertical, perpendicular a la muestra y otro horizontal, paralelo a la muestra de suelo (Comité Técnico permanente de Geotecnia, 2017, p. 4).

**Cohesión del suelo.** Esta propiedad es la fuerza con la que las partículas de un suelo se mantienen unidas, sin embargo, esto depende de la cantidad de



puntos unidos entre cada partícula con las partículas vecinas del suelo (M Das, 2013).

**Ángulo de fricción interna.** También llamado fuerza de rozamiento interna, es una de las características de los suelos granulares, que está relacionado con el ángulo de reposo del material y este depende de la fricción entre partículas (M Das, 2013).

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Hipótesis**

##### ***3.1.1. Hipótesis General***

Ejerce mayor influencia la adición de cemento que la cal en la capacidad portante del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022.

##### ***3.1.2. Hipótesis Específicas***

➤ Existe diferencias en la influencia de adición de cal y cemento en las propiedades geotécnicas del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay - Apurímac - 2022.

➤ Existe diferencias en la influencia de adición de cal y cemento en las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac – 2022.

## **3.2. Método**

### **3.2.1. Método de la Investigación**

El método es el sendero por el cual se debe recorrer para alcanzar los objetivos establecidos inicialmente, Nel Quezada (2010) sostiene que “método y metodología son dos conceptos diferentes. El método es el procedimiento para lograr objetivos. Metodología es el estudio del método” (p.32).

El desarrollo de criterios para la investigación ha originado diferentes métodos, los más habituales son el método inductivo y deductivo, donde se describe que “la inducción consiste en ir de los casos particulares a la generalización. La deducción, en ir de lo general a lo particular” (Nel Quezada, 2010, p. 33). En relación con lo anterior, en el estudio actual se empleó el método deductivo, partiendo de premisas válidas de investigaciones, libros y normas de construcción acerca de la geotecnia que fueron aplicados de forma experimental con la finalidad de mejorar la capacidad portante del suelo de las viviendas unifamiliares a través de la incorporación de aditivos y obtener resultados particulares para este tipo de terreno.

Prosiguiendo con el desarrollo del método, esta investigación presenta un enfoque cuantitativo del que “se vale de la lógica o razonamiento deductivo, que parte de la teoría, de la cual se derivan las hipótesis que el investigador somete a prueba. De lo general a lo particular” (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018, p. 7). De ese modo, la presente investigación inicia de una idea que se sostiene en preguntas y objetivos, se rige de una base teórica de preposiciones de la ingeniería de suelos y cimentaciones. Las preguntas derivaron a hipótesis que para probarlas se prosiguió una metodología, y conforme a los resultados con un

análisis estadístico, se midieron las variables de la adición de cal y cemento. Finalmente, se extrajeron conclusiones entorno a la hipótesis.

### **3.3. Tipo de Investigación**

Conforme a la intención del investigador, existen dos tipos de estudio, las cuales son: básica, que incursiona en el nuevo conocimiento y aplicada, que usa el conocimiento adquirido para ponerlos en práctica. Por lo tanto, el presente se rige a una investigación aplicada la cual Zamora y Calixto (2021) consideran que “la investigación aplicada busca resolver problemas que se presentan en la sociedad en función a los conocimientos que se han adquirido” (p.10). Por lo tanto, esta investigación parte de conocimientos emitidos por otros investigadores, tal como las teorías de capacidad de carga de Terzaghi o Meyerhof, los cuales son válidos, y se aplican para determinar la capacidad portante del área de investigación.

### **3.4. Nivel o Alcance de Investigación**

En el contexto de esta investigación el alcance es correlacional, “la utilidad principal de los estudios correlacionales es saber cómo se puede comportar un concepto o una variable al conocer el comportamiento de otras variables vinculadas” (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018, p. 110). Para el presente caso, las variables independientes: adición de cal y adición de cemento, manipulados en ciertos porcentajes, se relaciona de manera positiva (directamente proporcional) con la variable dependiente: capacidad portante del suelo, mediante ello se comprueba la influencia de estas variables con la variable dependiente.

### **3.5. Diseño de Investigación**

El estudio se realizó en un contexto experimental, “los diseños experimentales manipulan y aprueban tratamientos, estímulos, influencias o intervenciones (denominadas variables independientes) para observar sus efectos sobre otras variables (las dependientes) en una situación de control” (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018, p. 152). Dicho esto, en la presente investigación las variables: adición de cal y cemento, fueron manipulados intencionalmente, con la finalidad de determinar la influencia en la variable dependiente.

Los datos se recolectaron a través de un estudio transversal, ya que “describen relaciones entre dos o más categorías, conceptos o variables en un momento determinado, ya sea en términos correlacionales, o en función de la relación causa-efecto” (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018, p. 179). Ante esto, los resultados de la variable dependiente aplicando los métodos de estabilización de suelo de la variable independiente se midieron en un determinado lapso y no durante rotundos lapsos de tiempo.

### **3.6. Operacionalización de Variables**

**Variable independiente 1:** Adición de Cal

**Variable independiente 2:** Adición de Cemento

**Variable dependiente:** Capacidad portante

**Tabla 5**

*Operacionalización de variables*

Título: “Análisis comparativo de la influencia de adición de cal y cemento en la capacidad portante del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral – Abancay – Apurímac – 2022”

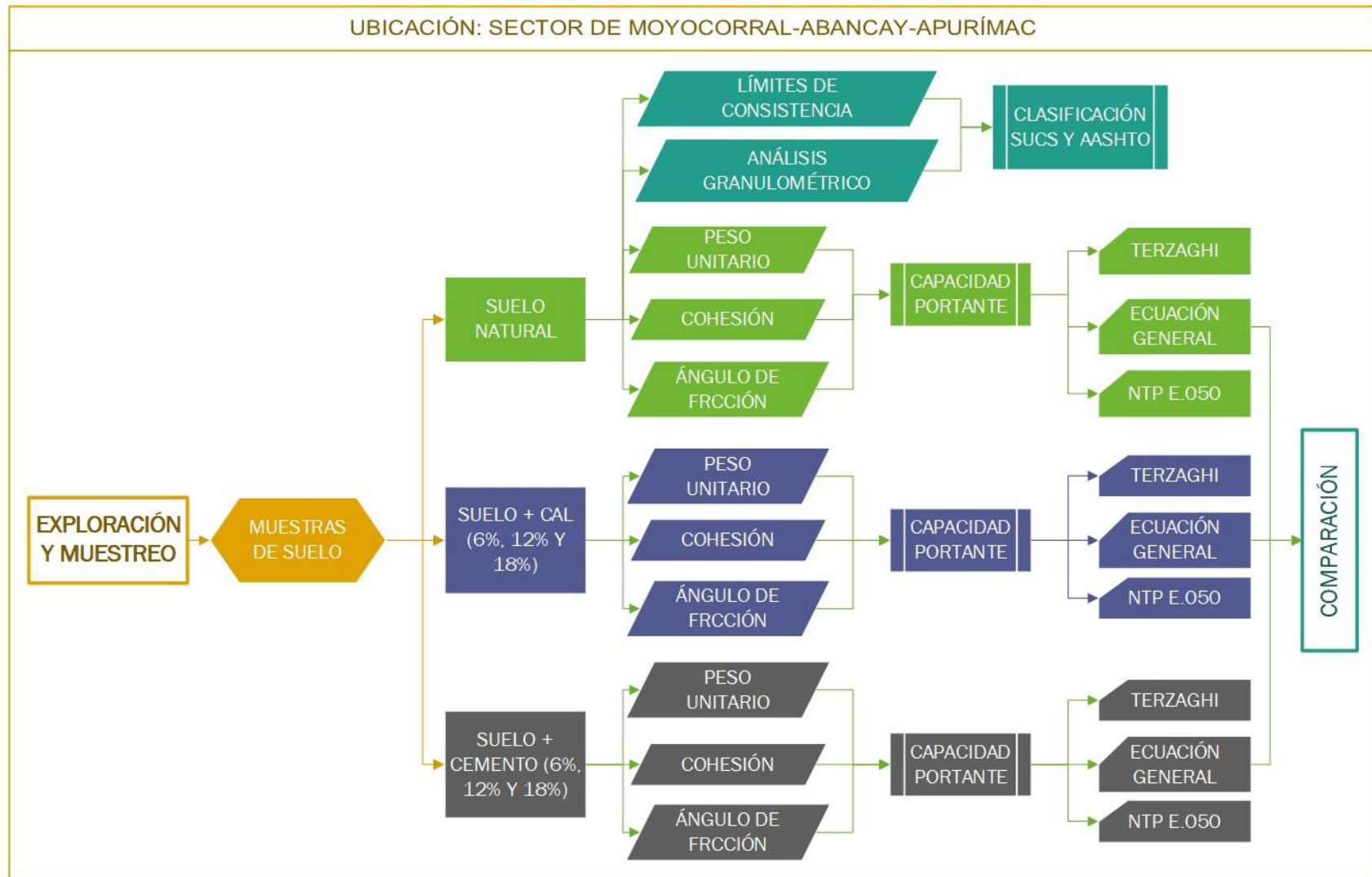
Variables	Definición Conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición	Instrumento
V.I. 1: Adición de Cal	La cal se obtiene mediante la calcinación de la piedra caliza y se utiliza para mejorar materiales y suelos.	Se adiciona en diferentes proporciones respecto al peso seco de la muestra de suelo.	Dosificación	0%,6%,12% y 18%	Razón	Ficha de recolección de datos de balanza digital ( <b>¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.</b> )
V.I. 2: Adición de Cemento	El cemento es un polvo fino, que al mezclarse con agua se convierte en pasta que une materiales y forma estructuras sólidas	Se adiciona en diferentes proporciones respecto al peso seco de la muestra de suelo.	Dosificación	0%,6%,12% y 18%	Razón	Ficha de recolección de datos de balanza digital ( <b>¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.</b> )
V.D: Capacidad Portante	Técnicamente la capacidad portante es la máxima expresión media de contacto entre las cimentaciones y el terreno tal que no se produzcan un fallo por cortante del suelo o un asentamiento deferencial excesivo (M Das, 2011, p. 133)	Se determina utilizando ecuaciones en base a las propiedades de resistencia al corte y las propiedades geotécnicas del suelo natural y mejorado.	Propiedades geotécnicas	Contenido de humedad natural	Razón	Ficha de recolección de datos ( <b>¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.</b> )
				Granulometría	Razón	Ficha de Recolección de datos ( <b>¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.</b> )
				Límites de Consistencia	Razón	Ficha de recolección de datos ( <b>¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.</b> )
				Clasificación de suelos SUCS y ASHTOO	Nominal	Ficha de recolección de datos ( <b>¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.</b> )
				Densidad de terreno	Razón	Ficha de recolección de datos ( <b>¡Error! No se</b>

			<b>encuentra el origen de la referencia.)</b>
	Cohesión	Razón	Ficha de recolección de datos ( <b>¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.)</b>
Propiedades de resistencia al esfuerzo cortante	Ángulo de Fricción Interna	Razón	Ficha de recolección de datos ( <b>¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.)</b>
	Densidad Máxima Seca	Razón	Ficha de recolección de datos ( <b>¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.)</b>

Nota: V.I: Variable independiente, V.D: Variable dependiente

**Figura 14**

*Procedimiento de la investigación*





### 3.7. Población, Muestra y Muestreo

#### 3.7.1. Población

Si una investigación es natural entonces se señala a la población como “el conjunto de objetos, hechos, eventos que se van a estudiar con las variadas técnicas que hemos analizado supra” (Ñaupas Paitán et al., 2014, p. 246). El suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas unifamiliares del sector de Moyocorral constituye la población. Este sector está compuesto por 150 viviendas según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), en un espacio de 2.27 hectáreas de terreno aproximadamente. El mapa de localización se puede apreciar en el Anexo 4.

**Figura 15**

*Ubicación georreferencial de la población*



**Tabla 6***Cuadro de áreas de uso de suelos y vías*

Descripción	Área (m <sup>2</sup> )	Área (Ha)
Área de viviendas	22762.343	2.28
Educación	6040.354	0.60
Vías	2701.93	0.27
Recreación (Estadio)	6506.372	0.65
<b>Total:</b>	<b>38010.999</b>	<b>3.80</b>

**3.7.2. Muestra**

La muestra es definido como "El proceso mediante el cual se llevan a cabo diversas acciones para examinar cómo se distribuyen ciertos rasgos en la totalidad de una población, universo o grupo, partiendo de la observación de una muestra representativa de dicha población" (Tamayo y Tamayo, 2006, p. 179).

En ese contexto, para la presente investigación se trabajó por el método no probabilístico o muestreo por conveniencia, "en las muestras no probabilísticas, la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la investigación o los propósitos del investigador" (Hernández Sampieri, 2014, p. 189).

Se ha tomado en cuenta la NTP E.050 Suelos y Cimentaciones, que recomienda realizar 3 puntos de exploración por cada diez mil metros cuadrados de habitación urbana para fines de unifamiliares de hasta 3 niveles, proporcionando un total de 6 sitios de prospección donde se realizaron una calicata por cada sitio, como se verifica en la Figura 16 y Tabla 7.

**Figura 16**

*Ubicación de las calicatas en la zona de estudio*



**Tabla 7**

*Coordenadas UTM 84 de los puntos de muestreo*

Calicata	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)
C-01	727326.15	8492882.54	2656
C-02	727420.87	8492967.77	2665
C-03	727532.74	8493015.36	2664
C-04	727553.79	8492922.51	2644
C-05	727460.19	8492855.17	2645

Para la caracterización del suelo natural, se tomaron muestras dependiendo del tipo de ensayo como se indica en la Tabla 8, dando un total de 57 kg de muestras de suelo por cada punto de exploración. La unidad de análisis para el mejoramiento del suelo estará compuesta por el suelo más desfavorable con la incorporación de los aditivos en ciertos porcentajes, el peso total utilizado será de 84 kg, en la Tabla 9 se distingue a mayor detalle.

**Tabla 8**

*Cantidad de muestra para la caracterización del suelo natural*

Tipo de ensayo	Peso mínimo	Peso recomendado	Peso muestreado
Clasificación SUCS	10 kg	10 kg	15 kg
Proctor modificado	32 kg	40 kg	40 kg
Corte Directo	1 kg	2 kg	2kg
Cantidad total de muestra por calicata:			57 kg

Nota: Para el desarrollo de la tabla se ha seguido las recomendaciones del estudio de Polinario Casimiro (2021, p. 39).

**Tabla 9**

*Cantidad de muestra para la caracterización del suelo mejorado*

Tipo de ensayo	Cantidad de adición						Subtotal
	6% Cal	12 % Cal	18 % Cal	6 % Cemento	12% Cemento	18 % Cemento	
Límites de consistencia	2.50kg	2.50kg	2.50kg	2.50kg	2.50kg	2.50kg	15.00kg
Proctor modificado	20.00kg	20.00kg	20.00kg	20.00kg	20.00kg	20.00kg	60.00kg
Corte Directo	2.50kg	2.50kg	2.50kg	2.50kg	2.50kg	2.50kg	15.00kg
<b>Total:</b>							84 kg

### **3.8. Técnicas e Instrumentos**

#### ***3.8.1. Técnica para la Recolección de Datos.***

Se desarrolló como principal técnica la observación científica .“El investigador durante la observación registra los datos directamente del objeto de investigación tal y como ocurren” (Sivestre Miraya & Huamán Nahula, 2019, p. 360). Tomando en cuenta la literatura y para ser más precisos, se manejó los siguientes tipos de observación: observación de campo, observación de laboratorio y observación experimental. Para realizar la prospección del suelo y su estratigrafía se usó la observación de campo, para los ensayos que determinaron tanto las propiedades geotécnicas como las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante se utilizó la observación de laboratorio y, por último, para ver el efecto que produce la cal y el cemento en la capacidad portante del suelo se usó la observación experimental. Sin embargo, para el conocimiento y desarrollo de las anteriores técnicas fue fundamental la utilización de técnicas para la revisión documental, que permitió la comprensión de la ingeniería geotécnica, asimismo, sus procesos, los ensayos requeridos, las fórmulas para obtener la capacidad de carga y los antecedentes referidos al tema de estudio.

#### ***3.8.2. Instrumentos de Recolección de Datos.***

Los instrumentos que se manejaron para medir los indicadores fueron las fichas de observación y control, Sivestre Miraya & Huamán Nahula (2019) considera que “es una herramienta simple y fácil de usar, pero muy útil para registrar datos que surgen como producto de la interacción directa entre el observador y la realidad que está siendo observada” (pag.370). Por lo tanto, el suelo, que es el objeto del presente

estudio fue sometido a ensayos de laboratorio y de campo, que determinaron sus características geotécnicas como sus propiedades de resistencia al esfuerzo cortante, y mediante fichas de observación y recolección se recopilaron los datos.

La validez de instrumentos pretende garantizar la confiabilidad de los resultados, por ello, en el presente estudio, las fichas fueron validadas por 3 especialistas del rubro, un especialista en metodología de la investigación y un especialista en estadística. Y mediante la aplicación del coeficiente de Validez del Contenido presentado por Hernández Nieto, 2002, se demuestra la validez y concordancia de los instrumentos. Todo ello se puede apreciar en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

A continuación, se expone los métodos, fuentes e instrumentos que se manejaron para la medición de los indicadores:

#### **Tabla 10**

*Procedimiento, técnicas e instrumentos para la recolección de datos de cada indicador*

Indicadores	Recolección de datos		
	Procedimiento	Técnica	Instrumento
Dosificación de cal	Diferentes dosificaciones de cal	Revisión documental	Ficha de recolección de datos de balanza digital
Dosificación de cemento	Diferentes dosificaciones de cemento	Revisión documental	Ficha de recolección de datos de balanza digital
Granulometría	Ensayo de análisis granulométrico	Observación de laboratorio	Ficha de recolección de datos de ensayo de granulometría
Granulometría	Ensayo de análisis granulométrico	Observación de laboratorio	Ficha de recolección de datos de ensayo de granulometría
Límites de consistencia	Ensayo de límite líquido, plástico e índice de plasticidad	Observación de laboratorio	Ficha de recolección de datos de ensayo de límites de consistencia
Contenido de humedad natural	Ensayo de contenido de humedad	Observación de laboratorio	Ficha de recolección de datos de ensayo de contenido natural
Peso específico	Ensayo de densidad de campo	Observación de campo	Ficha de recolección de datos de ensayo de densidad de campo
Cohesión	Ensayo de corte directo	Observación de laboratorio	Ficha de recolección de datos de ensayo de corte directo
Ángulo de fricción	Ensayo de corte directo	Observación de laboratorio	Ficha de recolección de datos de ensayo de corte directo
Peso específico máximo	Ensayo de compactación	Observación de laboratorio	Ficha de recolección de datos de ensayo de compactación
Humedad óptima	Ensayo de compactación	Observación de laboratorio	Ficha de recolección de datos de ensayo de compactación
Capacidad portante del suelo	Teorías de la capacidad portante del suelo como Terzaghi, Meyerhof y la NTP E.050.	Análisis de la capacidad portante	Hoja de cálculo de la capacidad portante

Nota: Para el procedimiento de la tabla se tomó como guía la investigación de Polinario Casimiro (2021, p. 39).

### **3.9. Consideraciones Éticas**

En la actualidad, la investigación científica es un instrumento primordial para generar nuevo conocimiento, por ello es vital que la información dada sea confiable y servible a otros investigadores, en consecuencia, se debe respetar los aspectos éticos para la publicación de una investigación. Ante ello, la presente investigación contiene información genuina, texto redactado de mi propia autoría, evitando el plagio, citando ideas de investigadores otorgándoles el reconocimiento que se lo merecen, trabajando con datos y resultados reales de los ensayos ejecutados, por último, se garantiza la no manipulación de datos y resultados.

### **3.10. Procesamiento Estadístico**

La investigación empleó la prueba de Student (T-student) como herramienta para la estadística inferencial. Este procedimiento evalúa si dos grupos exhiben divergencias entre sí, en ese sentido, se formula la hipótesis nula que supone que ambos grupos no muestran diferencias significativas y la hipótesis alterna supone que los grupos muestran diferencias significativas. Es importante mencionar que los datos de la población deben corresponder a una distribución normal, entonces es vital realizar una prueba de normalidad para corresponder si la prueba t será la idónea.

En ese contexto, en el estudio se distinguen dos grupos, el primero, los datos obtenidos producto de la adición de cal y segundo los datos obtenidos producto de la



adición de cemento, los resultados al procesar estadísticamente se presentan en apartados posteriores.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. Resultados**

Por lo que se refiere a los resultados, se presenta de forma ordenada, sujeto al orden de los objetivos específicos planteados, mostrando valores característicos que son indispensables en un estudio de suelos. Del mismo modo, se presentan los resultados en base al objetivo general, siguiendo estrictamente lo propuesto en el marco teórico y la metodología de la investigación.

##### ***4.1.1. Respuesta al Objetivo General***

“Analizar la influencia de la adición de cal comparado con la adición de cemento en la capacidad portante del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022”.

Mediante los valores de cohesión, ángulo de fricción y densidad húmeda, se ha calculado la capacidad portante para cimentaciones cuadradas y corridas a diferentes

profundidades, donde se utilizó la ecuación dada por la NTP E.050 suelos y cimentaciones (2018b), la teoría de Terzaghi y la ecuación general de la capacidad de carga, aplicando un factor de seguridad igual a 3.

**Capacidad portante del suelo Natural.** Los valores de capacidad portante del suelo natural no han discrepado mucho en cada punto de prospección, los resultados se muestran en la Tabla 11. Los resultados a diferentes profundidades se muestran en la Tabla 12 y Tabla 13.

**Tabla 11**

*Capacidad portante del suelo del sector de Moyocorral (NTP E.050)*

Descripción	Calicata					
	01	02	03	04	05	06
Tipo de cimentación	Cuadrada de 1.50 m de lado	Cuadrada de 1.50 m de lado	Cuadrada de 1.50 m de lado	Cuadrada de 1.50 m de lado	Cuadrada de 1.50 m de lado	Cuadrada de 1.50 m de lado
Profundidad de desplante (Df)	1.50 m	1.50 m	1.50 m	1.50 m	1.50 m	1.50 m
Capacidad portante	1.19 kg/cm <sup>2</sup>	1.17 kg/cm <sup>2</sup>	1.25 kg/cm <sup>2</sup>	1.49 kg/cm <sup>2</sup>	1.65 kg/cm <sup>2</sup>	1.13 kg/cm <sup>2</sup>

Nota: La capacidad portante se ha estimado con la ecuación que se estipula en la NTP E.050 Suelos y Cimentaciones (2018), este procedimiento proporciona resultados más conservadores respecto a la teoría de Terzaghi y la ecuación general de la capacidad de carga.

**Tabla 12***Capacidad portante del suelo para una cimentación cuadrada de 1.50m x 1.50m*

Calicata	Profundidad (m)	Capacidad portante (kg/cm <sup>2</sup> )		
		Ecuación de la NTP E.050 Suelos y Cimentaciones	Ecuación de Terzaghi	Ecuación general de la capacidad de carga
01	0.80	0.87	0.96	1.18
	1.50	1.19	1.34	1.91
	1.80	1.33	1.50	2.10
	2.00	1.42	1.61	2.30
	2.50	1.66	1.88	2.78
	3.00	1.89	2.16	3.27
02	0.80	0.87	0.97	1.18
	1.50	1.17	1.32	1.86
	1.80	1.30	1.46	2.03
	2.00	1.38	1.56	2.20
	2.50	1.59	1.81	2.64
	3.00	1.80	2.06	3.08
03	0.80	0.88	0.95	1.19
	1.50	1.25	1.38	1.99
	1.80	1.40	1.57	2.22
	2.00	1.51	1.69	2.44
	2.50	1.77	2.00	2.99
	3.00	2.03	2.31	3.54
04	0.80	1.21	1.42	1.67
	1.50	1.49	1.74	2.38
	1.80	1.61	1.88	2.52
	2.00	1.69	1.97	2.69
	2.50	1.89	2.20	3.12
	3.00	2.09	2.44	3.54
05	0.80	1.30	1.51	1.81
	1.50	1.65	1.93	2.68
	1.80	1.80	2.10	2.88
	2.00	1.90	2.22	3.10
	2.50	2.16	2.52	3.65
	3.00	2.41	2.82	4.19
06	0.80	0.92	1.08	2
	1.50	1.13	1.32	1.77
	1.80	1.22	1.42	1.87

Calicata	Profundidad (m)	Capacidad portante (kg/cm <sup>2</sup> )		
		Ecuación de la NTP E.050 Suelos y Cimentaciones	Ecuación de Terzaghi	Ecuación general de la capacidad de carga
	2.00	1.28	1.49	2.00
	2.50	1.43	1.66	2.31
	3.00	1.58	1.83	2.61

Nota: Los resultados de la capacidad portante según la NTP E.050 Suelos y Cimentaciones (2018), son menores en relación a la teoría de Terzaghi y la ecuación general de la capacidad de carga.

**Tabla 13**

*Capacidad portante del suelo para una cimentación corrida de ancho de 0.40m*

Calicata	Profundidad (m)	Capacidad portante (kg/cm <sup>2</sup> )	
		Ecuación de Terzaghi	Ecuación general de capacidad de carga
01	0.60	0.65	0.75
	0.80	0.76	0.89
	1.00	0.87	1.04
	1.20	0.98	1.18
	1.40	1.09	1.32
	1.50	1.14	1.39
02	0.60	0.67	0.78
	0.80	0.77	0.91
	1.00	0.87	1.05
	1.20	0.97	1.18
	1.40	1.07	1.31
	1.50	1.12	1.37
03	0.60	0.63	0.72
	0.80	0.75	0.88
	1.00	0.87	1.04
	1.20	1.00	1.20
	1.40	1.12	1.35
	1.50	1.18	1.43

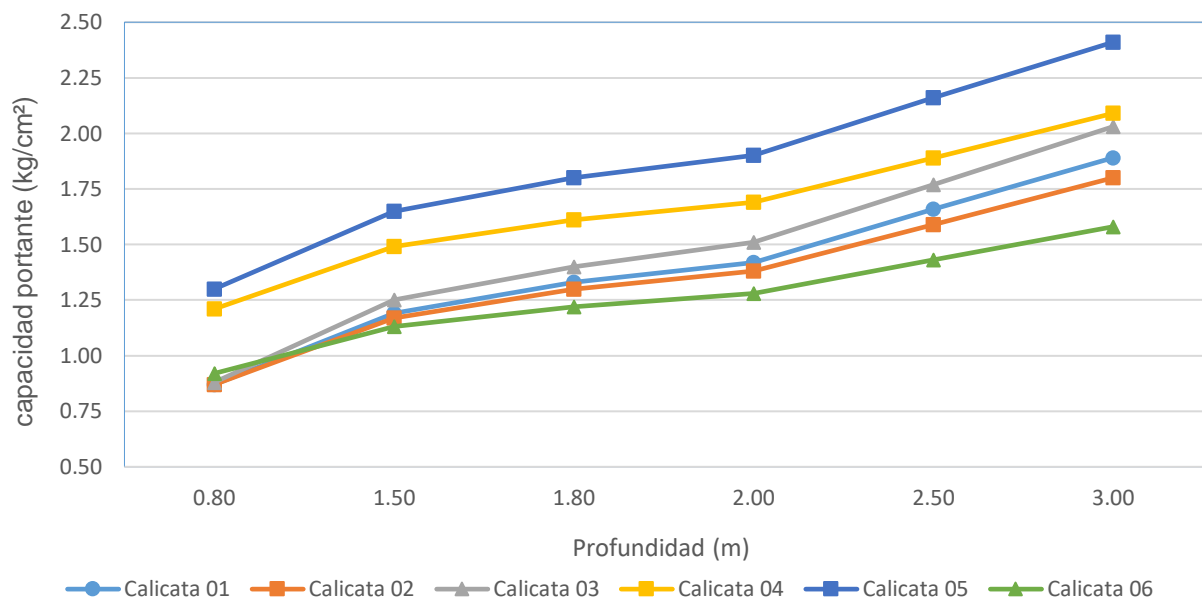
Calicata	Profundidad (m)	Capacidad portante (kg/cm <sup>2</sup> )	
		Ecuación de Terzaghi	Ecuación general de capacidad de carga
04	0.60	1.02	1.18
	0.80	1.12	1.33
	1.00	1.21	1.46
	1.20	1.30	1.59
	1.40	1.39	1.72
	1.50	1.44	1.78
05	0.60	1.06	1.21
	0.80	1.18	1.38
	1.00	1.30	1.55
	1.20	1.42	1.71
	1.40	1.54	1.87
	1.50	1.60	1.95
06	0.60	0.78	0.92
	0.80	0.85	1.03
	1.00	0.92	1.14
	1.20	0.99	1.23
	1.40	1.06	1.33
	1.50	1.09	1.38

Nota: La Tabla muestra la capacidad portante, determinado por medio de dos ecuaciones distintas, la cual se calculó para una cimentación corrida de ancho de 0.40m. Los resultados obtenidos revelan que utilizando la primera ecuación los valores son inferiores en comparación con la segunda ecuación.

Para poder distinguir de mejor manera los resultados de la capacidad portante a diferentes profundidades en una cimentación cuadrada de 1.50 m de lado, se muestra la Figura 17. Cabe resaltar que este representa los resultados en función a la ecuación de la NTP E.050.

**Figura 17**

*Variación de la capacidad portante a diferentes profundidades (cimentación cuadrada)*

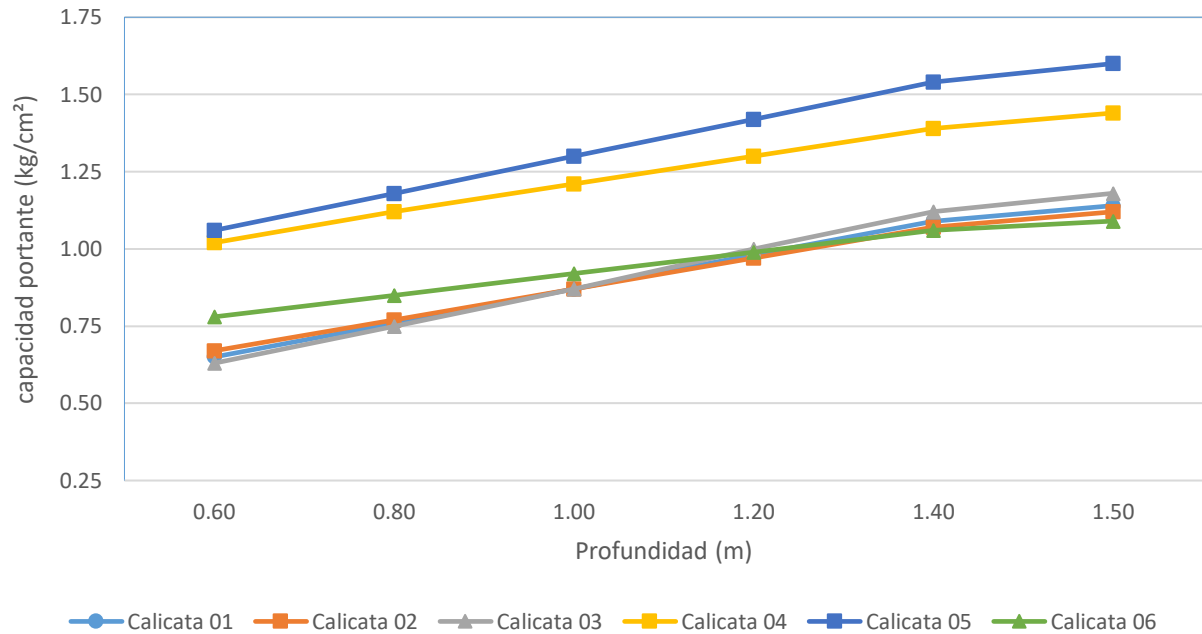


Nota: El gráfico representa la capacidad portante a diferentes profundidades (NTP E.050), es importante agregar que la línea que representa la calicata 06 es inferior a las demás y la calicata 05 es el más elevado.

Mediante la Figura 18 se distingue los valores de capacidad portante para una cimentación corrida de ancho de 0.40m utilizando la teoría de Terzaghi.

**Figura 18**

*Variación de la capacidad portante a diferentes profundidades (cimentación corrida)*



Nota: El gráfico representa la comparación de la capacidad portante a distintas profundidades (utilizando la teoría de Terzaghi). La calicata 01, 02, 03 y 06 ostentan valores similares, en cambio, la calicata 04 y 05 presentan valores superiores.

**Capacidad Portante del Suelo con Adición de Cal y Cemento.** El suelo con la adición de cal y cemento ha incrementado su capacidad portante en gran porcentaje, viendo resultados óptimos con la adición de cemento, sin embargo, los resultados no son muy distantes respecto al tratamiento con cal, ambos productos influyeron de manera casi similar en el suelo. Con respecto a los resultados, en la Tabla 14, Tabla 15 y

Tabla 16 se distinguen los diferentes valores determinados mediante diferentes ecuaciones de capacidad portante a distintas profundidades y para dos tipos de



cimentación. A cerca de los tipos de cimentación, se ha considerado una cimentación cuadrada de dimensiones de 1.50 m x 1.50 m y una cimentación corrida de ancho de 0.40 m, es importante aclarar que investigaciones respecto a la capacidad portante concluyen que el ancho de la cimentación en un determinado rango no influye considerablemente en los cálculos, por ello, se está considerando aquellas dimensiones.

**Tabla 14**

*Capacidad portante del suelo natural y con adición de cal y cemento (ecuación NTP E.050)*

Tipo de cimentación	Profundidad (m)	Capacidad portante (kg/cm <sup>2</sup> )						
		Suelo natural	Adición de cal			Adición de cemento		
			6%	12%	18%	6%	12%	18%
Cuadrada 1.50m x 1.50m	0.80	0.92	1.31	1.87	2.00	1.83	2.19	2.34
	1.50	1.13	1.74	2.31	2.45	2.18	2.61	2.78
	1.80	1.22	1.93	2.50	2.65	2.33	2.78	2.97
	2.00	1.28	2.05	2.63	2.78	2.43	2.90	3.10
	2.50	1.43	2.36	2.94	3.10	2.68	3.20	3.41
	3.00	1.58	2.67	3.26	3.42	2.93	3.49	3.72

**Tabla 15**

*Capacidad portante del suelo natural y con adición de cal y cemento (ecuación de Terzaghi)*

Tipo de cimentación	Profundidad (m)	Capacidad portante (kg/cm <sup>2</sup> )						
		Suelo natural	Adición de cal			Adición de cemento		
			6%	12%	18%	6%	12%	18%
Cuadrada 1.50m x 1.50m	0.80	1.08	1.44	2.18	2.34	2.17	2.61	2.80
	1.50	1.32	1.96	2.70	2.88	2.58	3.10	3.32
	1.80	1.42	2.18	2.93	3.11	2.76	3.31	3.54

	2.00	1.49	2.33	3.08	3.26	2.87	3.45	3.69
	2.50	1.66	2.69	3.45	3.65	3.17	3.80	4.06
	3.00	1.83	3.06	3.82	4.03	3.46	4.15	4.43
Corrida b=0.40m	0.60	0.78	0.98	1.54	1.67	1.58	1.89	2.02
	0.80	0.85	1.13	1.69	1.82	1.69	2.03	2.17
	1.00	0.92	1.28	1.84	1.97	1.81	2.17	2.32
	1.20	0.99	1.42	1.99	2.13	1.93	2.31	2.47
	1.40	1.06	1.57	2.14	2.28	2.05	2.45	2.62
	1.50	1.09	1.64	2.22	2.36	2.10	2.52	2.69

**Tabla 16**

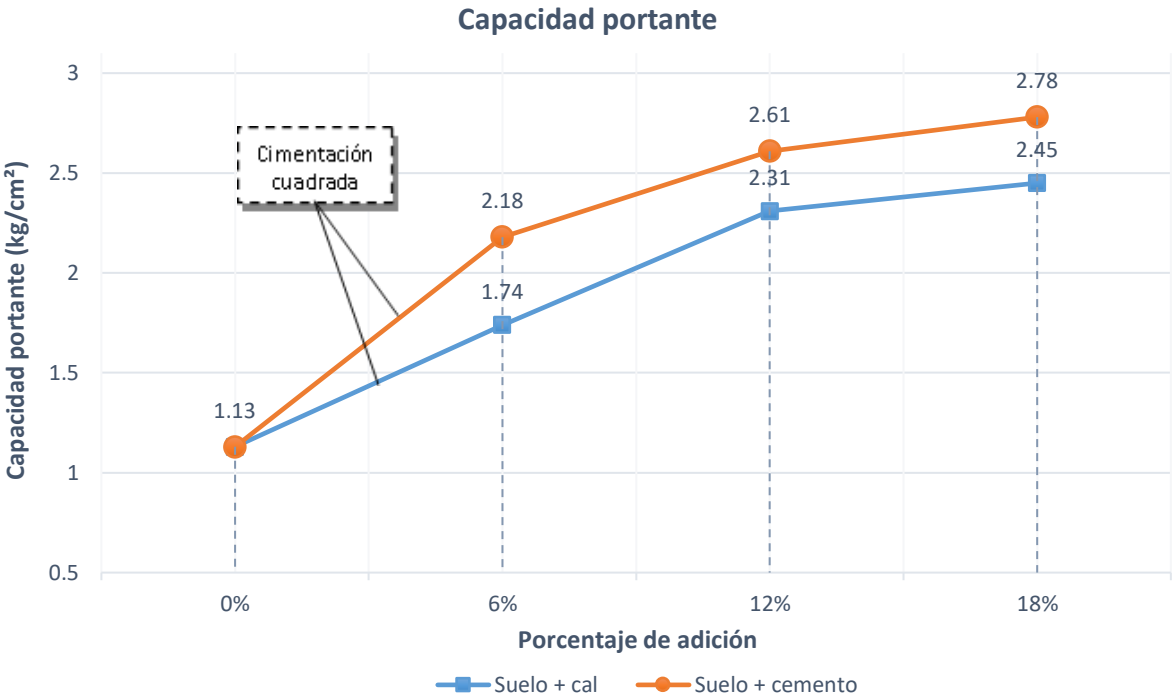
*Capacidad portante del suelo natural y con adición de cal y cemento (ecuación general de la capacidad de carga)*

Tipo de cimentación	Profundidad (m)	Capacidad portante (kg/cm <sup>2</sup> )						
		Suelo natural	Adición de cal			Adición de cemento		
			6%	12%	18%	6%	12%	18%
Cuadrada 1.50m x 1.50m	0.80	1.25	1.77	2.60	2.79	2.54	3.07	3.29
	1.50	1.77	2.78	3.74	3.98	3.51	4.23	4.53
	1.80	1.87	3.05	3.98	4.22	3.67	4.43	4.74
	2.00	2.00	3.32	4.27	4.52	3.90	4.70	5.04
	2.50	2.31	3.98	4.97	5.24	4.46	5.38	5.76
	3.00	2.61	4.66	5.67	5.97	5.01	6.05	6.47
Corrida b=0.40m	0.60	0.92	1.11	1.73	1.87	1.80	2.13	2.27
	0.80	1.03	1.31	1.96	2.10	1.99	2.35	2.51
	1.00	1.14	1.50	2.17	2.32	2.17	2.56	2.73
	1.20	1.23	1.69	2.37	2.53	2.34	2.76	2.94
	1.40	1.33	1.88	2.57	2.74	2.50	2.96	3.15
	1.50	1.38	1.98	2.67	2.84	2.58	3.05	3.25

Para culminar, se expone una comparación de los resultados de la adición de ambos tratamientos, teniendo en cuenta la tipología de la cimentación, ya sea corrida o cuadrada. Para no extender esta sección, se consideró sólo los resultados para una cimentación cuadrada de 1.50m x 1.50m, y de profundidad de desplante de 1.50m, para el caso de la cimentación corrida se consideró un ancho de 0.40m a un nivel de desplante de 0.60m. Los resultados se observan mediante la Figura 19, Figura 20 y Figura 21.

**Figura 19**

*Comparación de la capacidad portante del suelo natural y con adición de cal y cemento (según NTP E.050)*

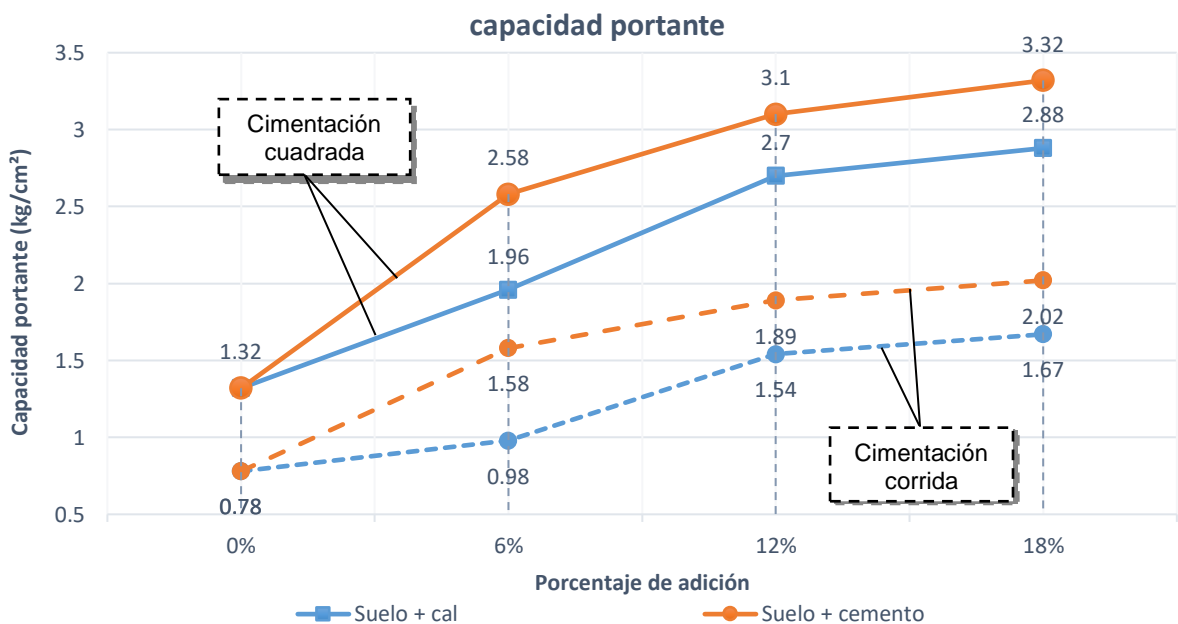


Nota: El incremento con la adición del 6%, 12% y 18% de cal fue del 53.98%, 104.42% y 116.81%, y para la adición de cemento el incremento fue de 72.92%, 130.97% y 146.02% respectivamente.

En la Figura 20 se realiza la comparación de la capacidad portante del suelo con la adición de cal y cemento, utilizando la ecuación de Terzaghi.

**Figura 20**

*Comparación de la capacidad portante del suelo natural y con adición de cal y cemento (Ecuación de Terzaghi)*

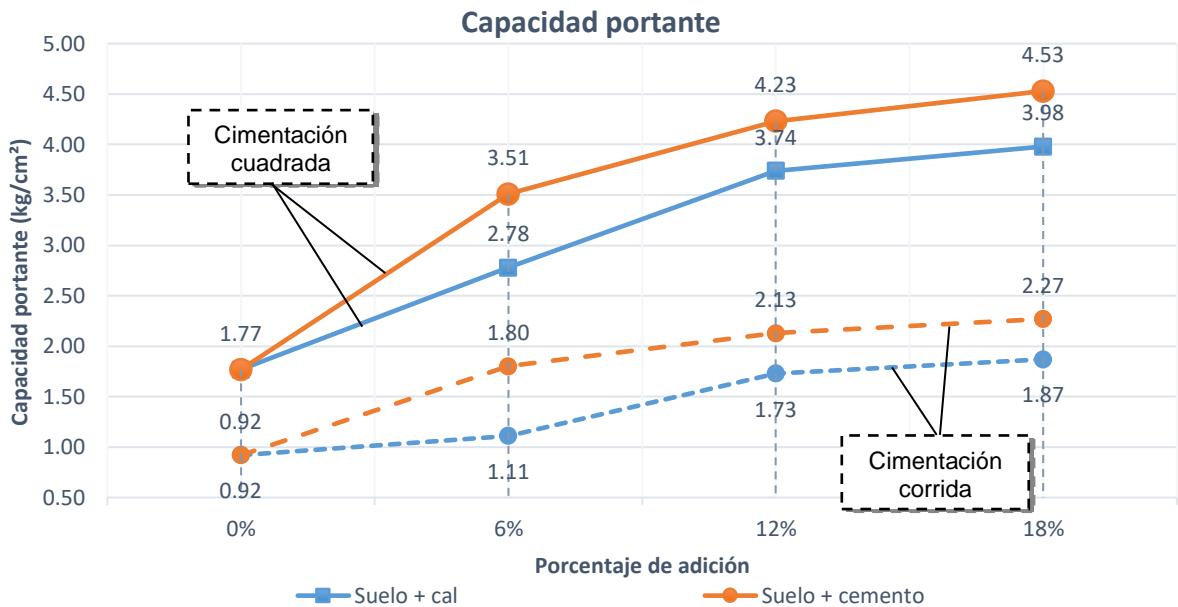


Nota: Para la cimentación cuadrada la capacidad portante con la adición de cal incrementó 48.48%, 104.48% y 118.18%, para la adición de cemento incrementó 95.45%, 134.85% y 151.52%. Para una cimentación corrida, con la adición de cal, el incremento fue de 25.64%, 97.44% y 114.10%, con la adición de cemento aumentó 102.56%, 142.31% y 158.97% respectivamente.

En la Figura 21 se realiza la comparación de la capacidad portante del suelo con la adición de cal y cemento, utilizando la ecuación general de capacidad de carga, para un cimiento corrido y un cimiento cuadrado.

**Figura 21**

*Comparación de la capacidad portante del suelo natural y con adición de cal y cemento (Ecuación general de capacidad de carga)*



Nota: Para la cimentación cuadrada la capacidad portante con la adición de cal incrementó 57.06%, 111.30% y 124.86%; para la adición de cemento incrementó 98.31%, 138.98% y 155.93%. Para una cimentación corrida, con la adición de cal, el incremento fue de 20.65%, 88.04% y 103.26%, y con la adición de cemento incrementó 95.65%, 131.52% y 146.74% respectivamente.

#### **4.1.2. Respuesta al Objetivo Específico 1**

“Determinar la influencia de la adición de cal comparado con la adición de cemento en las propiedades geotécnicas del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022”.

En esta sección se define las características geotécnicas del suelo natural del sector de Moyocorral, que corresponde a su estratigrafía, humedad natural, granulometría, plasticidad, densidad y clasificación SUCS. Posterior a ello, se muestran los resultados de la influencia de la cal y cemento en la plasticidad del suelo, considerándose esta propiedad una de las más afectadas por la adición. Simultáneamente, se evidencia la comparación de los resultados de la influencia de estos aditivos en las propiedades geotécnicas del suelo.

**Propiedades Geotécnicas del Suelo Natural.** En el presente apartado, se detallan los resultados de los ensayos de campo y de laboratorio que determinaron las características del suelo, iniciando por la descripción de su estratigrafía.

***Estratigrafía del Suelo Natural.*** A través de la prospección a cielo abierto en 6 puntos diferentes mediante maquinaria pesada, hasta una profundidad de 4 metros, se ha determinado la estratigrafía del suelo y su densidad natural. Seguidamente, la Figura 22 hace referencia a la estratigrafía del suelo, distinguiéndose el color del suelo, marrón rojizo, así como su textura y composición, probándose así la similitud del suelo en diferentes puntos del terreno.

Para tener un mayor detalle de la estratigrafía de la zona de estudio, la Figura 23 es un modelo tridimensional, donde se distingue la composición del terreno ha cierta aproximación. En el modelo se percibe la presencia de arena arcillosa con una ligera capa de arena limosa y la existencia de material orgánico en la capa superior. Importante mencionar que no hubo la existencia de napa freática hasta una profundidad de 4 metros.

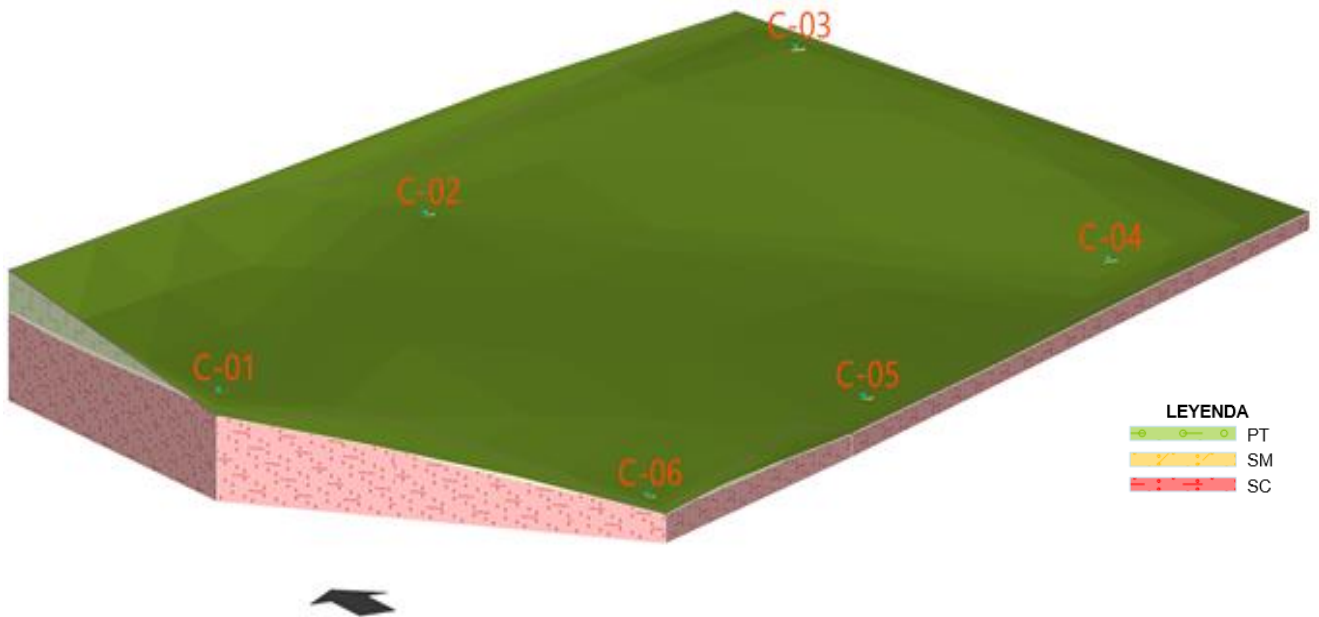
**Figura 22**

*Determinación de la estratigrafía y densidad del suelo natural*



**Figura 23**

*Vista tridimensional de la estratigrafía del suelo*

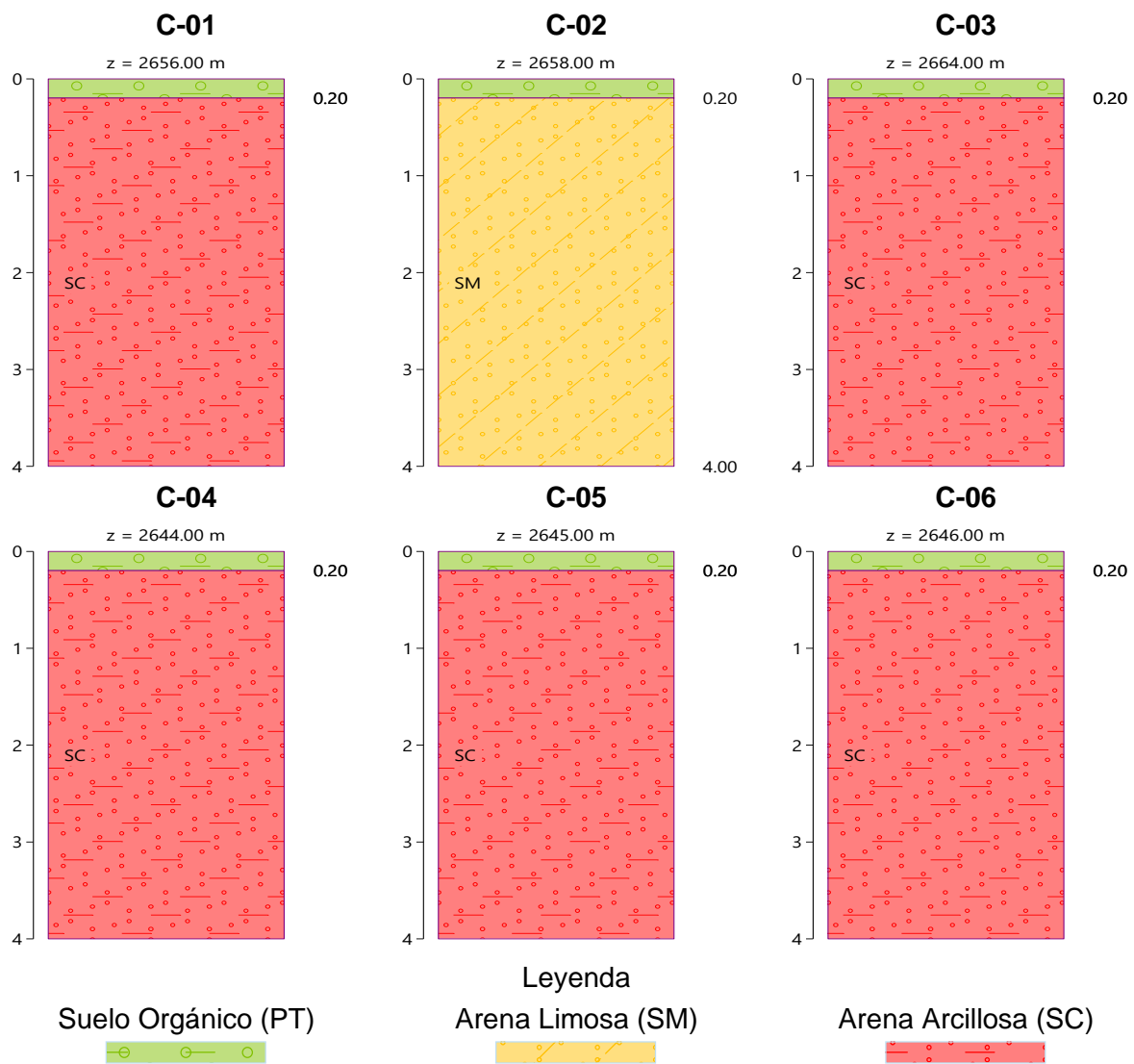


Nota: PT: Suelo orgánico, SM: Arena limosa, SC: Arena arcillosa

En la Figura 24 se observa las secciones estratigráficas de cada punto de prospección, percibiéndose la composición similar en cada calicata, excepto en la calicata 02. En el Anexo 3 se puede distinguir las secciones, los cortes y otras vistas tridimensionales.

**Figura 24**

*Perfil estratigráfico en cada punto de prospección*





**Humedad del Suelo Natural.** Concerniente a la humedad natural, se han obtenido valores similares en las calicatas 02, 03 y 04 con un 6.59 %, la calicata 01 presenta 8.36 % y las calicatas 05 y 06 presentan mayor contenido de humedad con un valor de 9.78%, como se verifica en la Tabla 17.

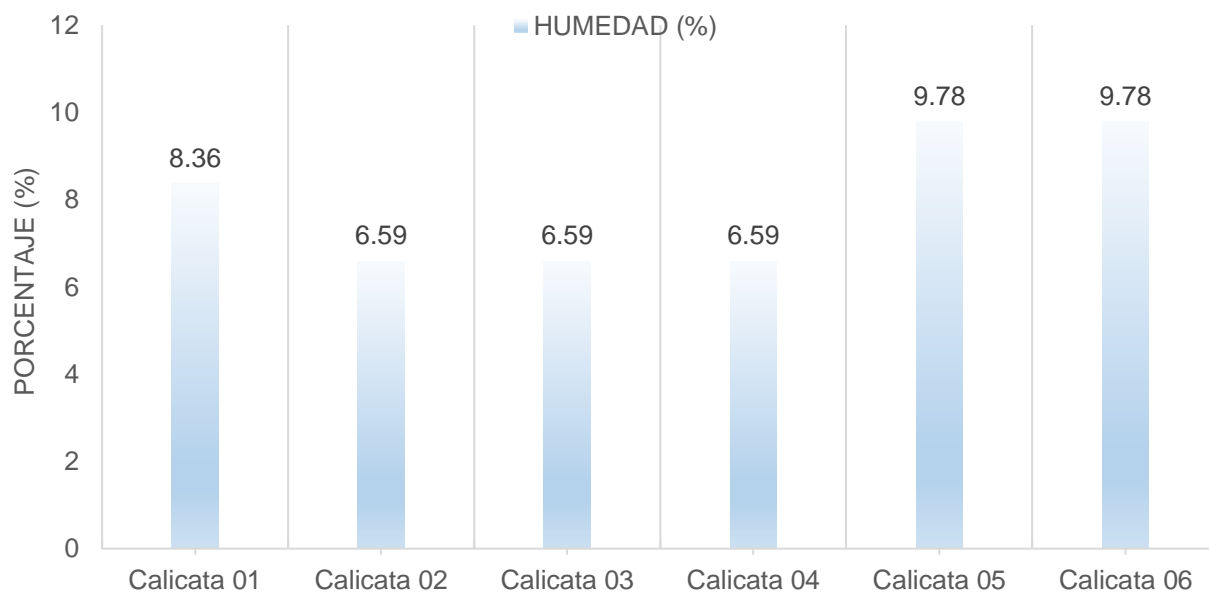
**Tabla 17**

*Contenido de humedad del suelo natural*

Descripción	Calicata					
	01	02	03	04	05	06
Humedad natural (%)	8.36	6.59	6.59	6.59	9.78	9.78

**Figura 25**

*Análisis de datos del contenido de humedad del suelo natural*



**Análisis Granulométrico del Suelo Natural.** Respecto al análisis granulométrico, las muestras de los diferentes suelos, presentan una composición similar de grava, arena y fino, distinguiéndose mayor contenido de arena y finos. La

muestra de la calicata 03 se compone de mayor contenido de finos, con un 42.12 % como se distingue en la Figura 26.

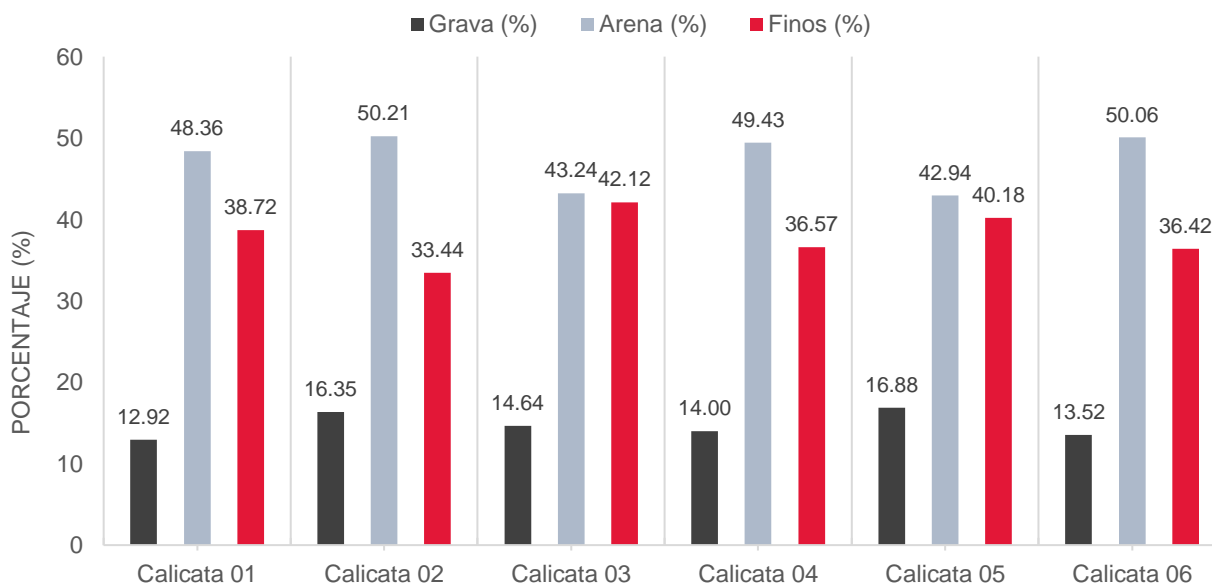
**Tabla 18**

*Composición granulométrica del suelo natural*

Descripción	Calicata					
	01	02	03	04	05	06
Grava (%)	12.92	16.35	14.64	14.00	16.88	13.52
Arena (%)	48.36	50.21	43.24	49.43	42.94	50.06
Fino (%)	38.72	33.44	42.12	36.57	40.18	36.42

**Figura 26**

*Análisis de datos de la composición granulométrica del suelo natural*



Nota: La porción dominante en todas las muestras de las calicatas es la arena, luego son los finos con porcentajes considerables y poca presencia de grava.

**Límites de Consistencia del Suelo Natural.** Se determinó el límite líquido, límite e índice plásticos, y se verifica que la calicata 06 presenta valores altos de

plasticidad respecto a las otras muestras, interpretándose así que este es la muestra de suelo más expansiva. Los resultados se pueden detallar en la Tabla 19.

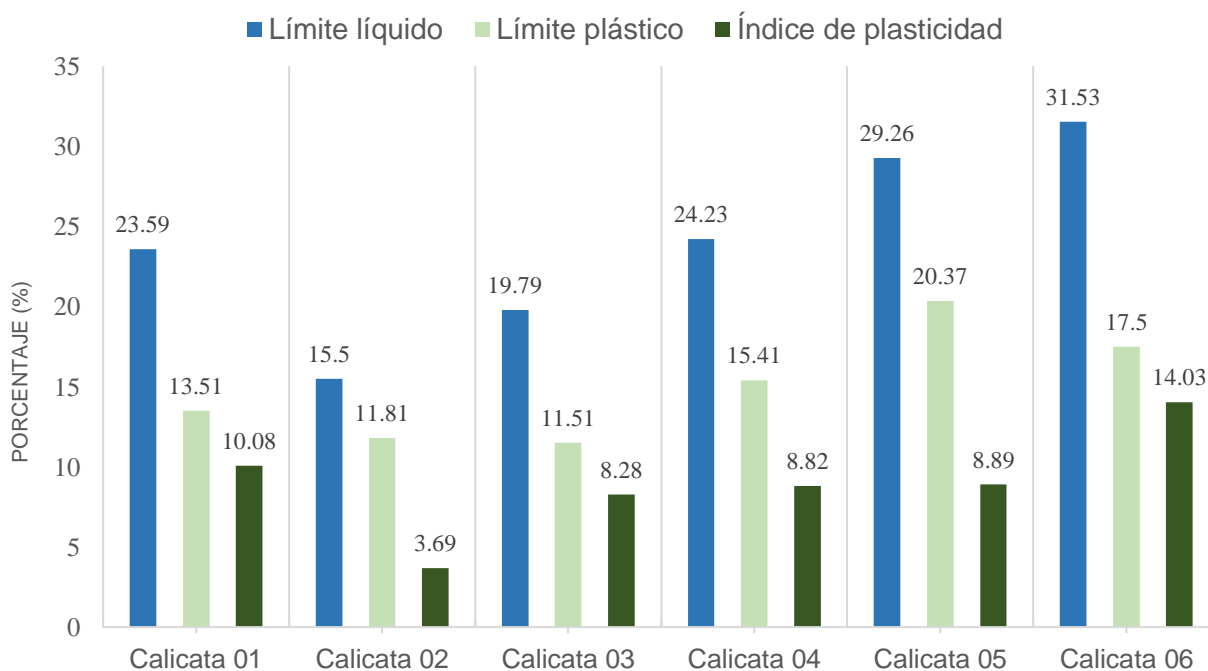
**Tabla 19**

*Límites de consistencia del suelo natural*

Descripción	Calicata					
	01	02	03	04	05	06
Límite líquido (%)	23.59	15.50	19.79	24.23	29.26	31.53
Límite plástico (%)	13.51	11.81	11.51	15.41	20.37	17.50
Índice de plasticidad (%)	10.08	3.69	8.28	8.82	8.89	14.03

**Figura 27**

*Análisis de datos de los límites de consistencia del suelo natural*

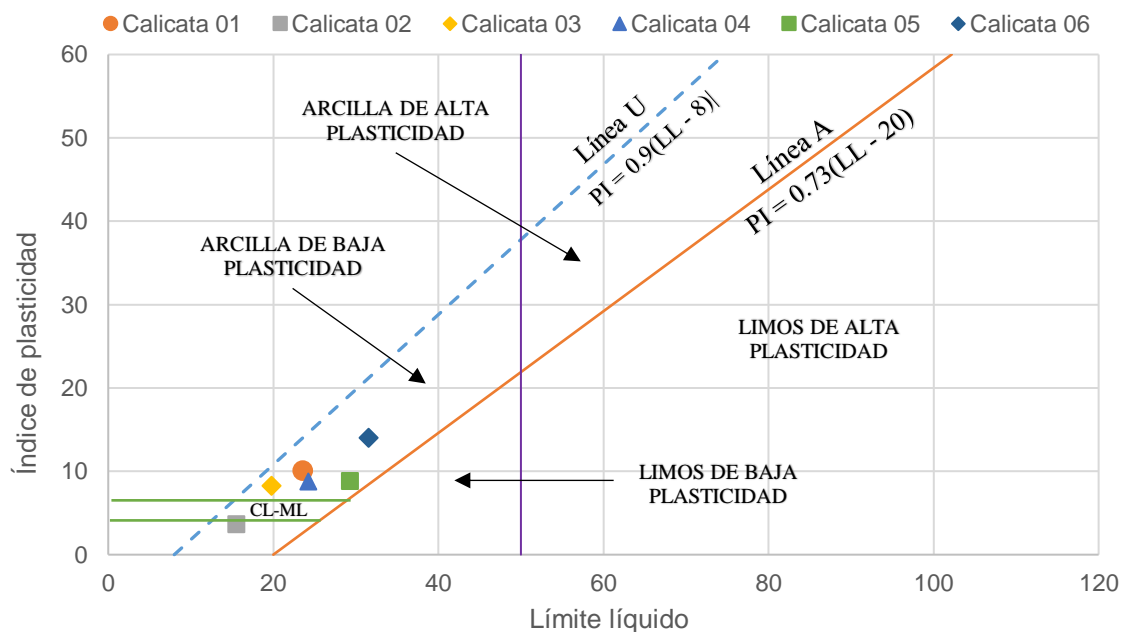


Nota: En la figura se muestra que la calicata 06 presenta porcentajes de plasticidad más altas y la calicata 02 más bajas en comparación de los demás.

Mediante el ábaco de Casagrande, se expone la clasificación de la fracción fina del suelo, hallándose arcilla en la composición de los especímenes de suelo de las calicatas 01, 03, 04, 05 y 06, sin embargo, en la muestra de la calicata 02 se obtuvo limo. En definitiva, estos resultados indican la similitud que existe en la composición del suelo y se puede detallar de mejor manera en la Figura 28.

**Figura 28**

*Carta de plasticidad de Casagrande para la clasificación del suelo natural*



Nota: La mayoría de puntos coinciden en el espacio de arcilla de baja plasticidad, por otro lado, un punto hace referencia a limos de baja plasticidad.

**Densidad del Suelo Natural.** Prosiguiendo con las propiedades geotécnicas, el ensayo de cono de arena ha determinado la densidad natural del suelo in situ, obteniendo como resultado valores muy cercanos, siendo el máximo de  $1.85 \text{ gr/cm}^3$  y el mínimo de  $1.82 \text{ gr/cm}^3$ , los demás valores se observan en la Tabla 20.

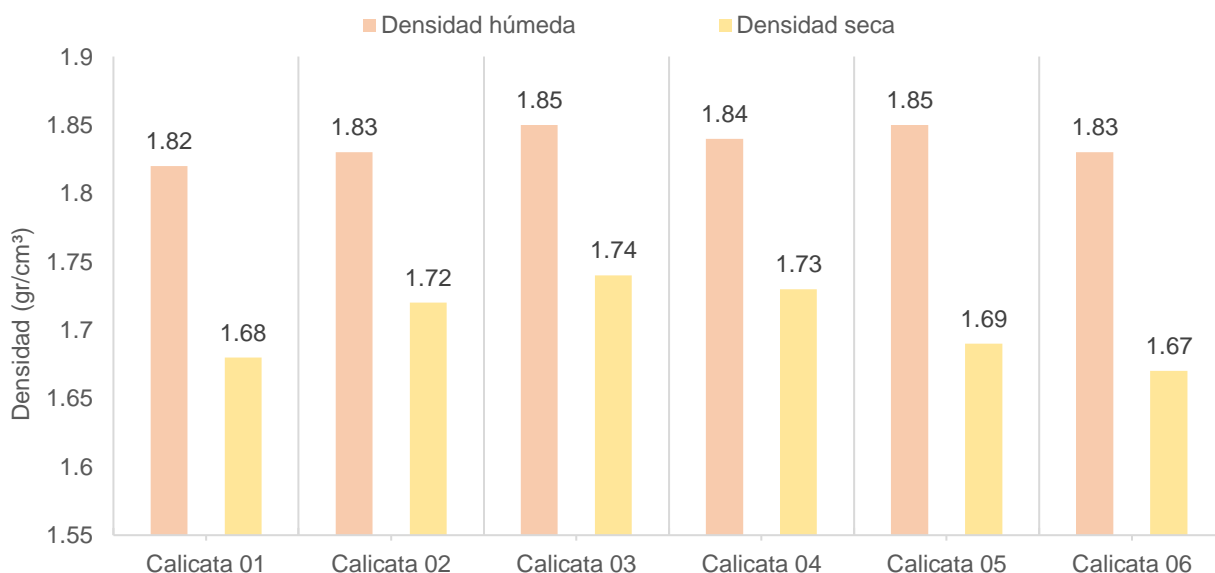
**Tabla 20**

*Densidad húmeda y seca del suelo natural*

Calicata	Calicata 01	Calicata 02	Calicata 03	Calicata 04	Calicata 05	Calicata 06
Densidad húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.82	1.83	1.85	1.84	1.85	1.83
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.68	1.72	1.74	1.73	1.69	1.67

**Figura 29**

*Análisis de datos de la densidad natural del suelo*



Nota: Los valores de densidad son similares, observándose una variación mínima.

**Clasificación del Suelo Natural SUCS y AASTHO.** A continuación, la Tabla 21 sintetiza las principales características del suelo, discriminadas por cada calicata, así mismo, se determina la clasificación del suelo según SUCS y AASTHO, estableciendo que las calicatas 01, 03, 04, 05 y 06 son arenas arcillosas con presencia de grava (SC), en cambio, la calicata 02 es arena limosa con presencia de grava según

SUCS. Por otra parte, según la clasificación AASHTO, se puede verificar valores más variados, por ejemplo, las calicatas 01, 03, 04 y 05 son suelos limosos (A-4), la calicata 06 es un suelo arcilloso (A-6) y por último la calicata 02 es un suelo arcilloso con presencia de limo (A-2-4).

**Tabla 21**

*Clasificación del suelo según SUCS y AASHTO de las muestras extraídas de las calicatas*

Descripción	Calicata					
	01	02	03	04	05	06
Profundidad	4.00 m	4.00 m	4.00 m	4.00 m	4.00m	4.00 m
Grava (%)	12.92	16.35	14.64	14.00	16.88	13.52
Arena (%)	48.36	50.21	43.24	49.43	42.94	50.06
Finos (%)	38.72	33.44	42.12	36.57	40.18	36.42
Límite líquido (%)	23.59	15.5	19.79	24.23	29.26	31.53
Límite plástico (%)	13.51	11.81	11.51	15.41	20.37	17.5
Índice de plasticidad	10.08	3.69	8.28	8.82	8.89	14.03
Densidad húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.82	1.83	1.85	1.84	1.85	1.83
Clasificación SUCS	Arena arcillosa con grava (SC)	Arena limosa con grava (SM)	Arena arcillosa con grava (SC)	Arena arcillosa con grava (SC)	Arena arcillosa con grava (SC)	Arena arcillosa con grava (SC)
Clasificación AASTHO	A-4 Suelo limoso	A-2-4 Grava y arena arcillosa o limosa	A-4 Suelo Limoso	A-4 Suelo Limoso	A-4 Suelo limoso	A-6 Suelo arcilloso

**Propiedades Geotécnicas del Suelo con la Adición de Cal y Cemento.** En la anterior sección, se puede verificar las principales propiedades geotécnicas del suelo natural, en el presente apartado, se viene a describir los resultados de la influencia de la adición de cal y cemento en el suelo de Moyocorral, en porcentajes de 6%, 12% y 18%. Para ello, se ha elegido la muestra de la calicata 06 por presentar condiciones desfavorables respecto a su capacidad portante y su plasticidad. Los resultados se abordan de manera secuencial, empezando por la plasticidad del suelo, su densidad, propiedades de resistencia al corte y en último lugar la capacidad portante del suelo.

**Límites de Consistencia del Suelo con Adición de Cal y Cemento.** Se han ensayado muestras tratadas con cal y por otra parte cemento. Los resultados de la influencia en la plasticidad del suelo se comprueban en la Tabla 22.

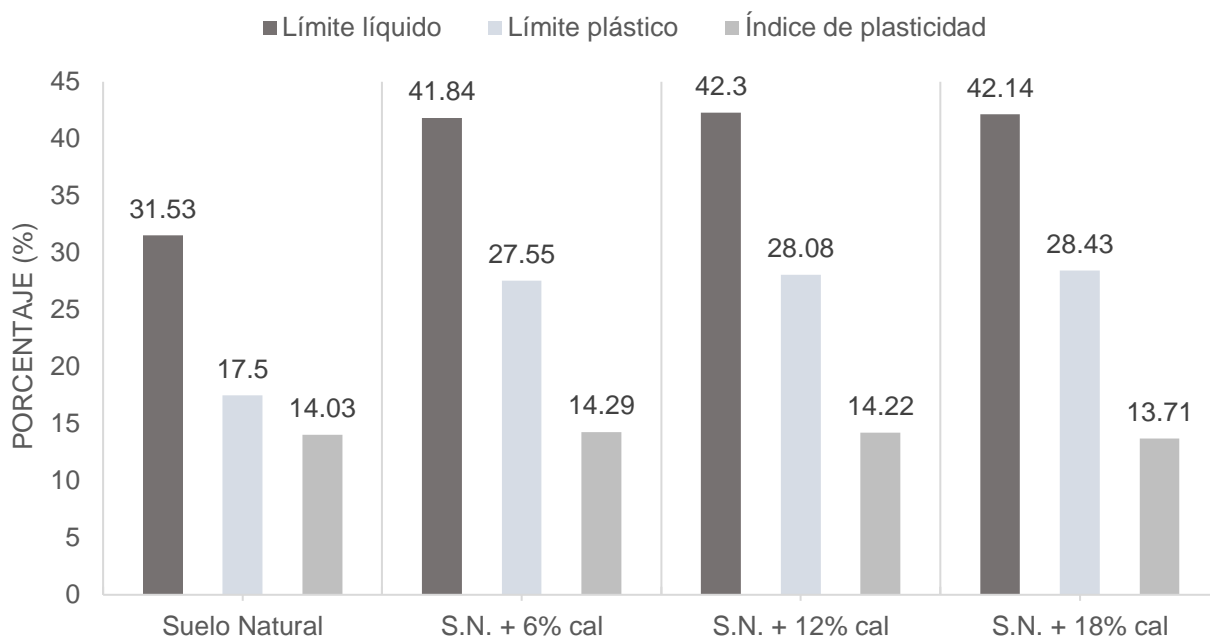
**Tabla 22**

*Límites de consistencia del suelo con adición de cal en porcentajes del 6%, 12% y 18%*

Descripción	Porcentajes de adición de cal			
	Suelo natural	6%	12%	18%
Límite líquido (%)	31.53	41.84	42.30	42.14
Límite plástico (%)	17.50	27.55	28.08	28.43
Índice de plasticidad (%)	14.03	14.29	14.22	13.71

**Figura 30**

*Análisis de datos de límites de consistencia del suelo con adición de cal*



De igual manera, los resultados al adicionar cemento a las muestras de suelo proporcionaron valores similares respecto a los resultados de adición de cal, como se detalla en la Tabla 23. Más adelante se puede verificar el análisis comparativo de ambos resultados.

**Tabla 23**

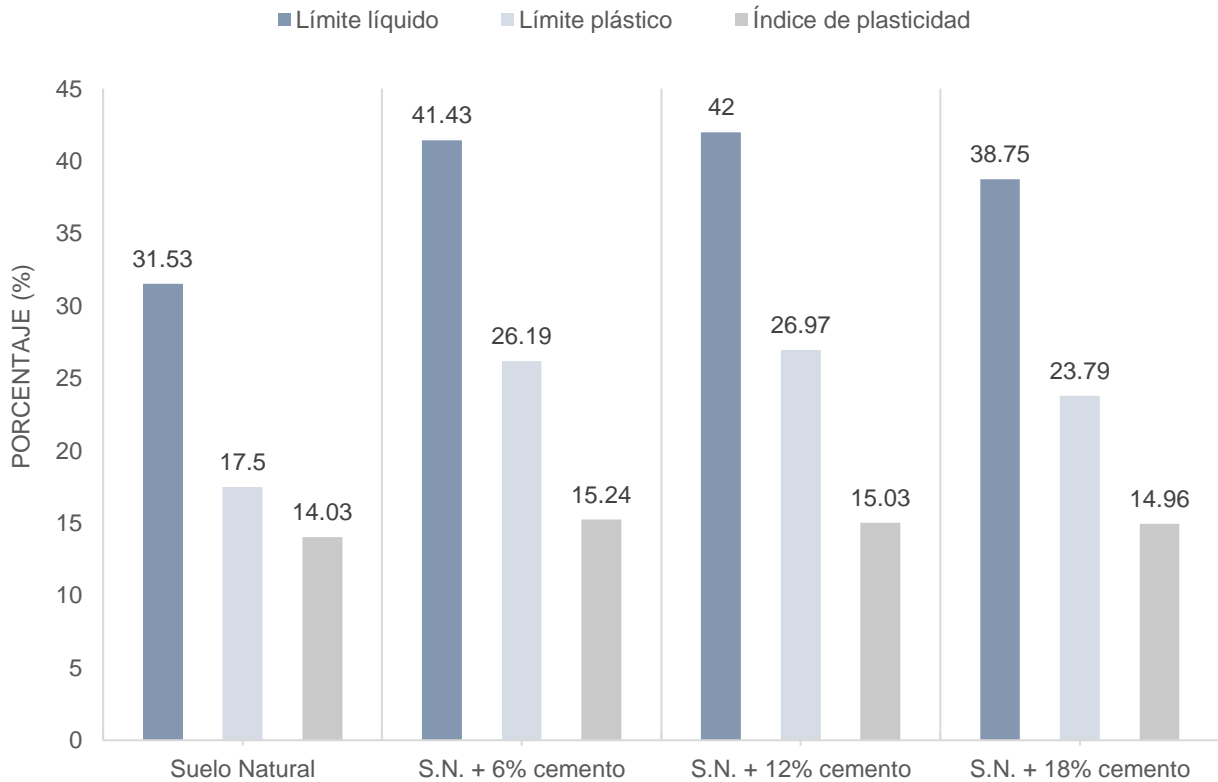
*Límites de consistencia del suelo con adición de cemento en porcentajes del 6%, 12% y 18%*

Descripción	Porcentajes de adición de cemento			
	Suelo natural	6%	12%	18%
Límite líquido (%)	31.53	41.43	42.00	38.75
Límite plástico (%)	17.50	26.19	26.97	23.79
Índice de plasticidad (%)	14.03	15.24	15.03	14.96



**Figura 31**

*Análisis de datos de límites de consistencia del suelo con adición de cemento*



La adición de cal y cemento tuvo un impacto significativo en las características del suelo estudiado. Específicamente, se encontró que la incorporación de cal y cemento provocó un aumento tanto en el límite líquido como en el límite plástico del suelo.

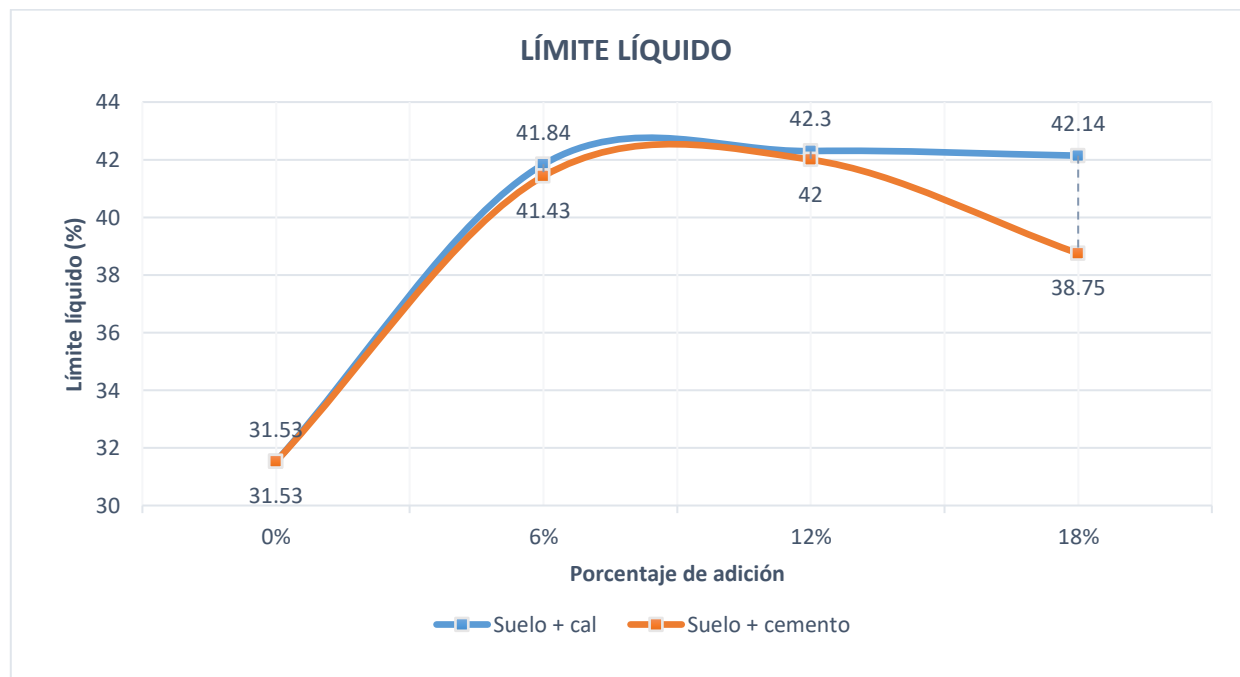
Sin embargo, se identificó una diferencia notable en el comportamiento del índice plástico al considerar la adición de cal. Se observó que, a diferencia de lo esperado, el índice plástico no mostró una variación significativa en valores distantes. Incluso se pudo constatar una ligera disminución en algunos casos, lo que indica que la adición de cal pudo haber contribuido a la disminución de la plasticidad del suelo.

En contraste, al analizar la adición de cemento, se encontró que el valor del índice plástico experimentó un incremento de hasta un 8.62%. Esto sugiere que la incorporación de cemento pudo haber aumentado la plasticidad del suelo.

Para una visualización más detallada de estos resultados, se hace referencia a la Figura 32 y Figura 33, donde se presenta una comparación exhaustiva de los valores obtenidos con relación a estas propiedades del suelo. Estas figuras proporcionan información visual clave para comprender mejor los efectos de la adición de cal y cemento en las características plásticas del suelo estudiado.

### Figura 32

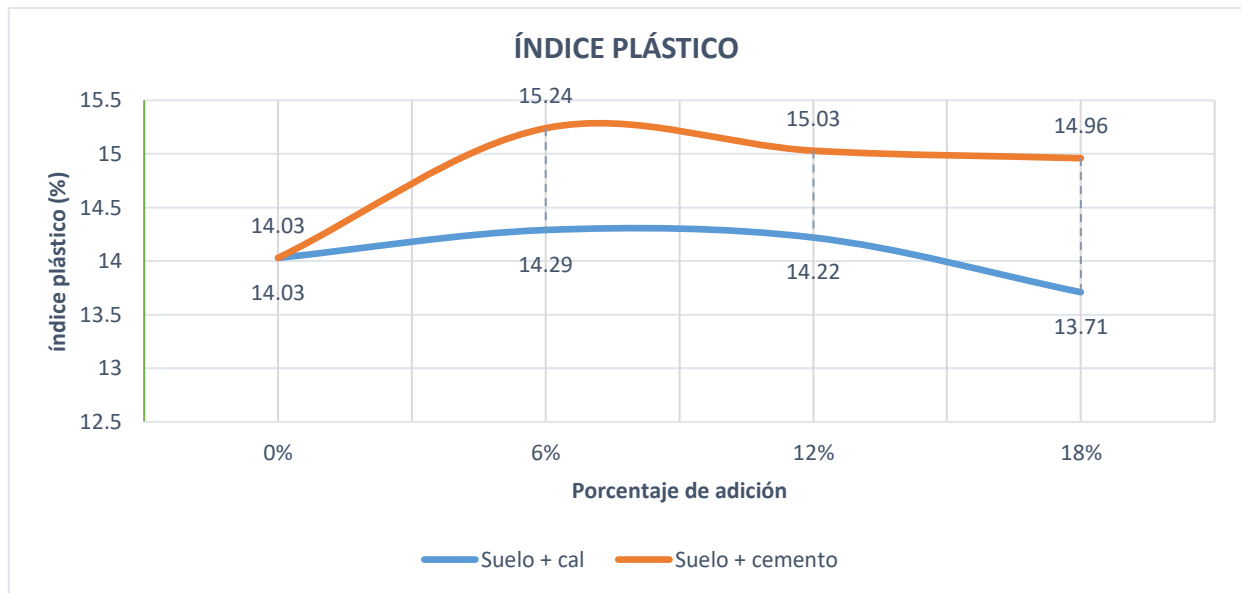
*Comparación del límite líquido del suelo natural y con adición de cal y cemento*



Nota: Al adicionar cal en 6%,12% y 18% ha incrementado el límite liquido en 35.87%, 34.16% y 33.65% respectivamente, por otro lado, al adicionar cemento en los mismos porcentajes ha incrementado en 31.40%, 33.21% y 22.90%.

**Figura 33**

*Comparación del índice plástico del suelo natural y con adición de cal y cemento*



Nota: El índice plástico al adicionar cal en 6% y 12% aumentó en 1.85% y 1.35% , sin embargo, con la adición de cal en 18% ha disminuido el índice plástico en 2.28%. En cambio, al adicionar cemento ha incrementado en 8.62%,7.13% y 6.63%.

#### **4.1.3. Respuesta al Objetivo Específico 2**

“Determinar la influencia de la adición de cal comparado con la adición de cemento en las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022”

En cuanto a las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante, se ha realizado la prueba de corte directo para determinar la cohesión y ángulo de fricción interna del suelo natural y el suelo con la adición de cal y cemento.

**Propiedades de Resistencia al Esfuerzo Cortante del Suelo Natural.** Como resultado de los ensayos realizados, se alcanzó valores de ángulo de fricción que fluctúan de hasta en 7 grados. Respecto a la cohesión del suelo, se obtuvo valores que fluctúan entre 0.06 kg/cm<sup>2</sup> y 0.18 kg/cm<sup>2</sup> (Tabla 24).

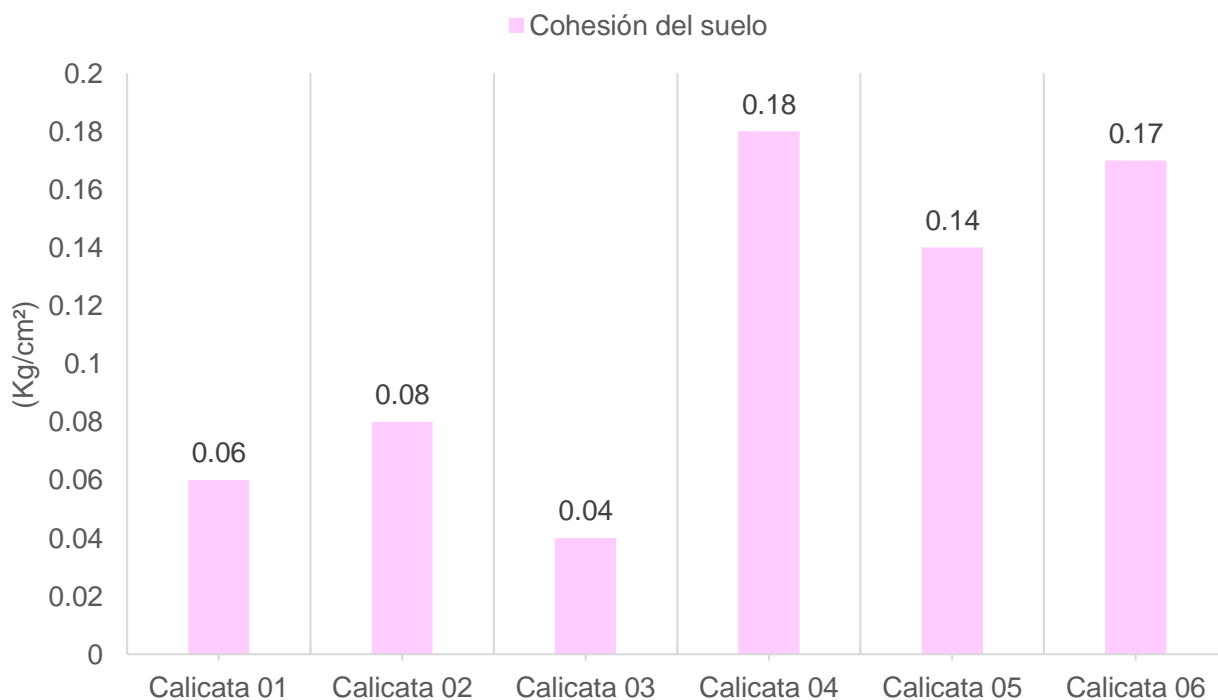
**Tabla 24**

*Propiedades de resistencia al esfuerzo cortante del suelo natural*

Propiedades	Calicata 01	Calicata 02	Calicata 03	Calicata 04	Calicata 05	Calicata 06
Densidad húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.82	1.83	1.85	1.84	1.85	1.83
Cohesión del suelo (kg/cm <sup>2</sup> )	0.06	0.08	0.04	0.18	0.14	0.17
Ángulo de fricción (°)	30.96	29.68	32.21	28.81	31.80	25.08

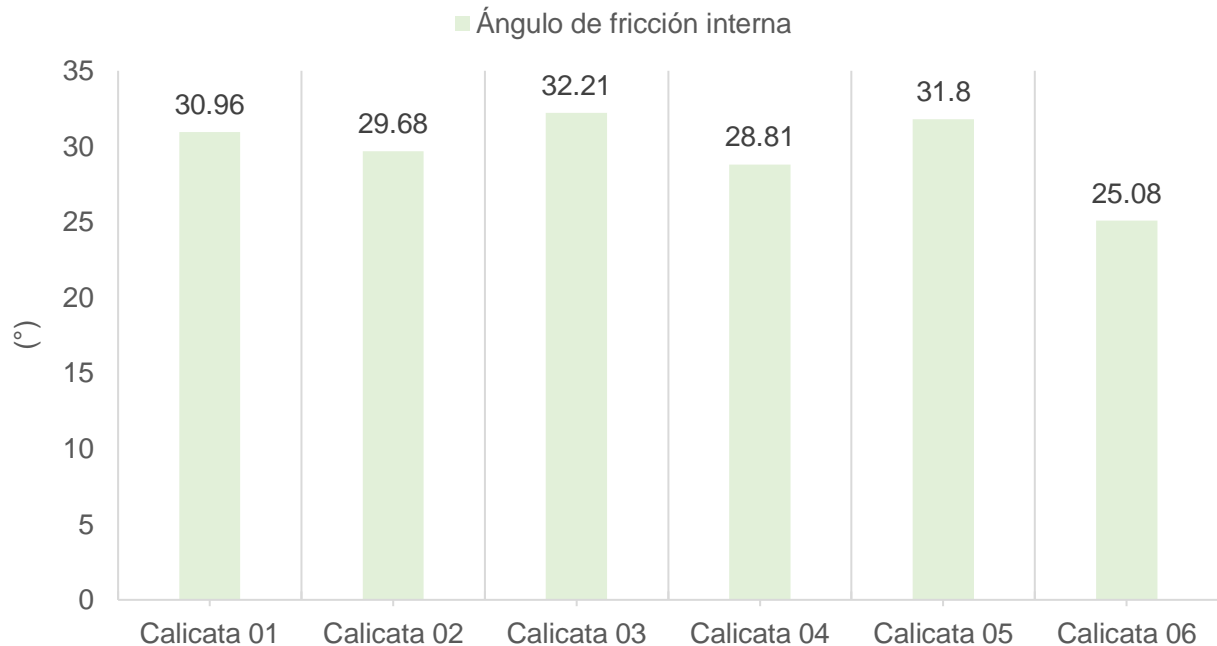
**Figura 34**

*Diagrama de barras con datos de cohesión del suelo natural*



**Figura 35**

*Diagrama de barras con datos del ángulo de fricción interna del suelo natural*



**Propiedades de Resistencia al Esfuerzo Cortante del Suelo con Adición de Cal y Cemento.** De acuerdo con los valores determinados, se observa el incremento de estas propiedades al adicionar cal y cemento, tanto la cohesión como el ángulo de fricción incrementan su valor. Los datos se visualizan en la Tabla 25 y Tabla 26.

**Tabla 25**

*Propiedades de resistencia al esfuerzo cortante del suelo con adición de cal*

Descripción	Porcentajes de adición de cal			
	Suelo natural	6%	12%	18%
Cohesión (kg/cm <sup>2</sup> )	0.17	0.09	0.20	0.22
Ángulo de fricción interna (°)	25.08	33.42	33.49	33.62
Densidad máxima seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.96	1.99	2.01	2.04

**Tabla 26**

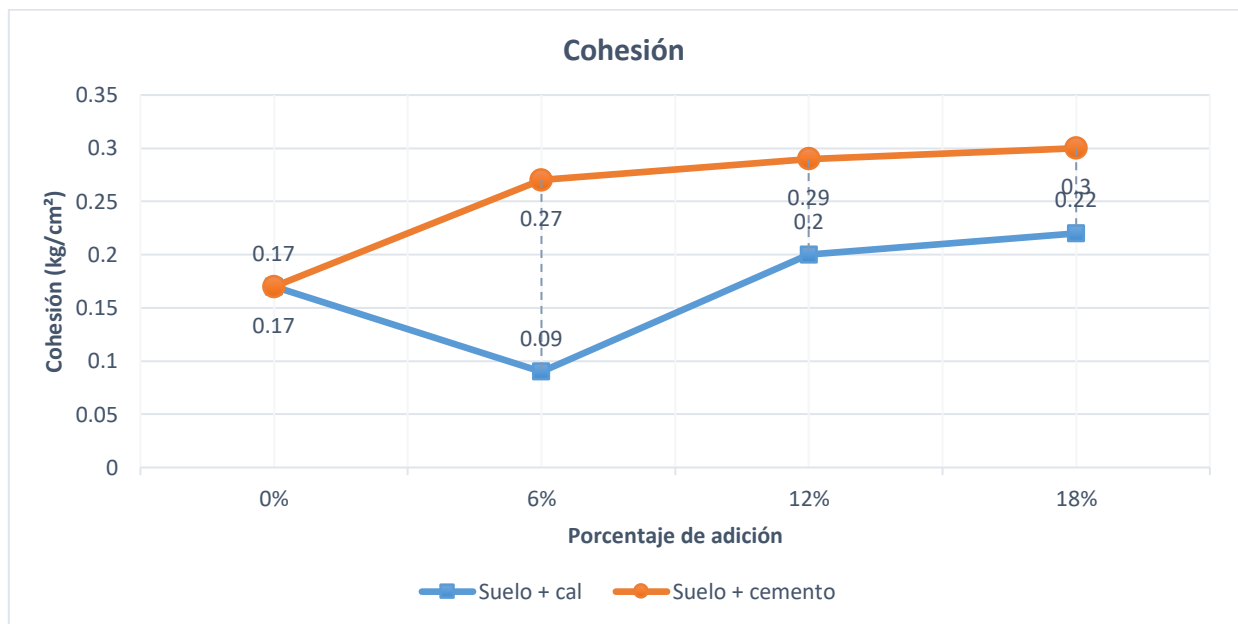
*Propiedades de resistencia al esfuerzo cortante del suelo con adición de cemento*

Descripción	Porcentajes de adición de cemento			
	Suelo natural	6%	12%	18%
Cohesión (kg/cm <sup>2</sup> )	0.17	0.27	0.29	0.30
Ángulo de fricción interna (°)	25.08	30.71	32.62	33.26
Densidad máxima seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.96	2.00	2.03	2.04

En la Figura 36 y Figura 37 se detalla la comparación del resultado de la adición de cal y cemento en la cohesión y ángulo de fricción del suelo.

**Figura 36**

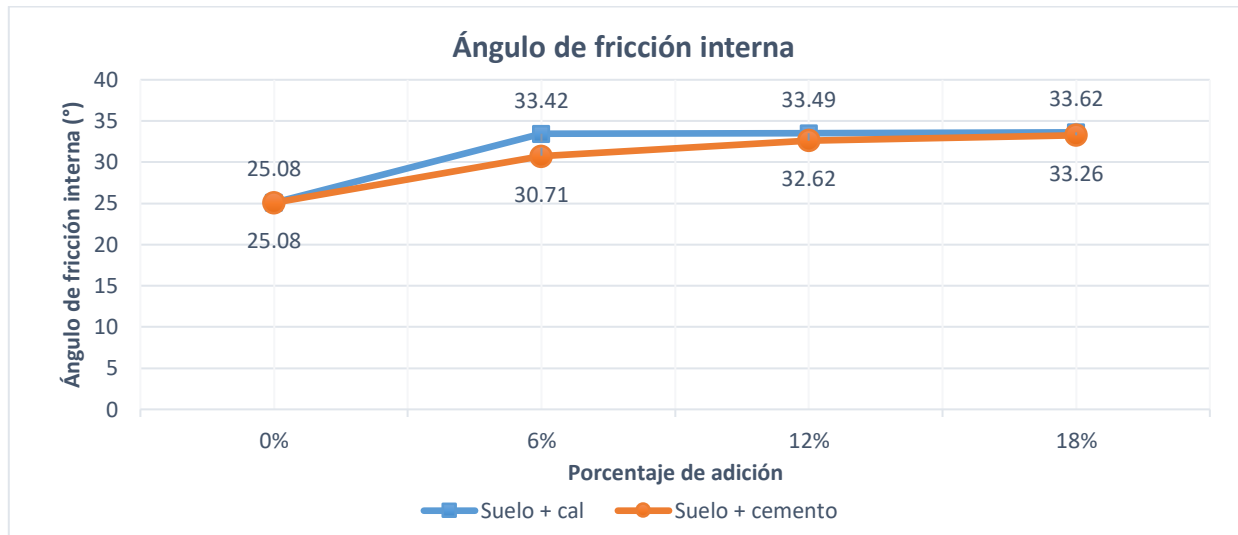
*Comparación de la cohesión del suelo natural y con adición de cal y cemento*



Nota: Con la adición de cal en 6% la cohesión ha disminuido en un 58.82%, con la adición del 12% y 18% ha incrementado en 17.65% y 29.41%. Por otra parte, con la adición de cemento en los mismos porcentajes la cohesión ha incrementado en un 58.82%, 70.59% y 76.47%.

**Figura 37**

*Comparación del ángulo de fricción interna del suelo natural y con adición de cal y cemento*



Nota: Con la adición de cal en 6%,12% y 18% el ángulo de fricción incrementó en 33.25%, 33.53% y 34.05%. Por otra parte, con la adición de cemento en las mismas proporciones el ángulo de fricción ha incrementado en 22.45%, 30.06% y 32.62%.

#### **4.2. Discusión de Resultados**

Entorno a los resultados obtenidos, se observa que la adición de cal y cemento ha influido de forma positiva en las propiedades de resistencia al corte, como también en la capacidad portante del suelo del sector de Moyocorral de la ciudad de Abancay, siendo este un suelo clasificado como arena arcillosa (SC).

La cohesión incrementó al adicionar cal hasta en un 29.13% respecto al suelo natural, pero, al adicionar cemento la cohesión ha incrementado hasta en un 76.47%, por lo tanto, la adición de cemento influyó más en la cohesión. Por otro lado, el ángulo

de fricción del suelo también ha incrementado, con la adición de cal aumentó hasta en un 34.05% y con la adición de cemento aumentó hasta en un 32.62%, siendo la cal más influyente en este aspecto, pero no por mucho.

Respecto a la capacidad portante, tomando en cuenta los resultados alcanzados con la ecuación de la NTP E.050, este valor ha incrementado en gran medida, siendo con la adición de cal hasta en un 116.81% y con la adición de cemento hasta en un 146.02%, dicho de otra manera, este valor ha incrementado en más del doble, siendo el cemento más influyente.

Estos resultados, se asemejan a investigaciones de otros autores, como Peralta Sánchez (2021) que al adicionar lechada de cal, cemento diluido y ladrillo triturado a un suelo categorizado como limo de alta plasticidad (MH) incrementó su ángulo de fricción, en cambio, la cohesión del suelo disminuyó hasta en un 20%. Aun así, al realizar el cálculo de la capacidad portante mediante la ecuación de Terzaghi para una cimentación cuadrada con los nuevos valores de cohesión y ángulo de fricción, este llegó a incrementar hasta en un 22.22%.

Por otro lado, Polinario Casimiro (2021) al adicionar ceniza volcánica al suelo clasificado como grava arcillosa-limosa (GC-GM) incrementó la cohesión hasta 12 veces su valor inicial, pero, su ángulo de fricción disminuyó hasta en un 10% y en algunos casos incrementó hasta en un 4.98%. Eso sí, se determinó su capacidad portante para una cimentación de 0.60m de profundidad y de tipo losa de 6m de ancho con estos valores mejorados, mediante la ecuación de Terzaghi, dando como resultado el incremento hasta en un 141% respecto al suelo natural.



Para Braja M. Das (2011), autor reconocido internacionalmente, en su texto “*Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*”, menciona que al adicionar cal, disminuye el límite líquido, e índice de plasticidad del suelo, mejora las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante y deformación del suelo. También menciona que, así como la cal, el cemento ayuda a aumentar las propiedades de resistencia del suelo y se incrementa más con el tiempo de curado. Estas afirmaciones muestran una relación con los resultados de la investigación, pero no concuerda respecto a la disminución de la plasticidad del suelo, debido a que, en la presente investigación al adicionar cal y cemento, el límite líquido ha incrementado su valor, como también el límite plástico, pero el índice de plasticidad se ha mantenido e incluso disminuido. En ese sentido, en este estudio no se asemejan estos resultados con lo propuesto por Braja M. Das.

Ahora bien, los resultados se dieron a nivel de laboratorio, elaborando muestras de suelos con adición cal y cemento, poniéndolos a prueba en ese instante, y aun así se obtuvieron buenos resultados, sin embargo, según expertos en el tema, el uso de la cal y cemento en campo se debe dar con un curado por días. Si aquello lo llevásemos a nivel de laboratorio, se realizaría muestras con un curado por días y que probablemente se tendrían mejores resultados. Asimismo, estos resultados podrían contrastarse con resultados de campo, utilizando métodos para determinar la capacidad de carga como el ensayo de placa de carga o también ensayos de penetración dinámica, de este modo se podría tener ecuaciones de capacidad portante específicas para suelo reforzado con cal o cemento.

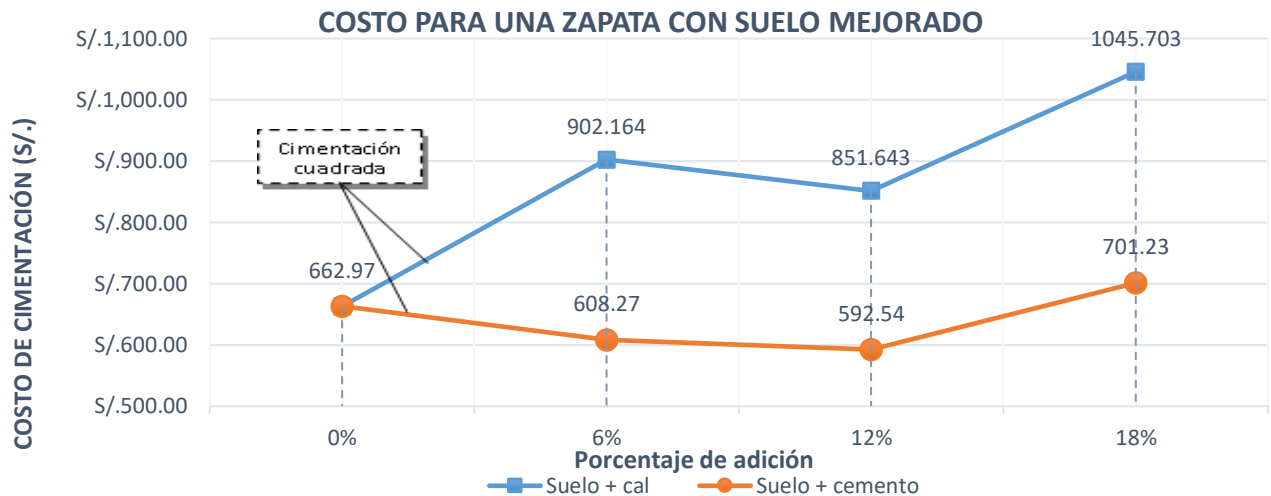
Por otra parte, la capacidad portante se ha determinado mediante 03 ecuaciones distintas: ecuación de Terzaghi, la ecuación general de la capacidad de carga y la ecuación mostrada en la NTP E.050. Cada una de estas ecuaciones se componen por factores de forma, profundidad, carga e incluso de inclinación, que fueron propuestos por autores como Meyerhof, Hanna, De Beer y Vesic mediante pruebas de laboratorio y de campo. En ese sentido, con la ecuación de la NTP E.050 se obtuvo valores más conservadores, en cambio, con la ecuación general de la capacidad de carga se obtuvo valores superiores, cabe mencionar que esta última ecuación considera muchos aspectos para su cálculo. La ecuación propuesta por Terzaghi se limita solo a cimentaciones corridas, cuadradas y circulares, en cambio las otras ecuaciones pueden usarse para los mismos casos incluyendo cimentaciones rectangulares, pero ninguna de estas ecuaciones considera condiciones sísmicas. Existen teorías acerca de la capacidad de carga sísmicas, pero aún no han sido experimentadas en campo lo cual hace que se reduzca la confiabilidad, pudiéndose considerar un tema de investigación importante.

El procedimiento para el mejoramiento del suelo con cal o cemento se da de manera similar para ambos casos, sin embargo, al realizar un análisis de costos de construcción de una zapata cuadrada con y sin mejoramiento del suelo, podemos comprobar que, al aumentar la capacidad portante del suelo, se reduce las dimensiones de la zapata, y en el caso del cemento esto se traduce a ahorro económico y se garantiza el buen funcionamiento del cimiento. La Figura 38 nos da a entender el ahorro al utilizar como estabilizador el cemento en un 12%, incluso más económico que utilizar un 6% de adición. El costo total se reduce hasta en un 10%, sin

embargo, al utilizar cal, los precios incrementan, probablemente sea por el costo de este producto.

**Figura 38**

*Comparación de precios de construcción de una zapata con y sin suelo mejorado*



Nota: La comparación se hizo para una cimentación cuadrada de 1.50m x 1.50m, de espesor de 0.60m , a una profundidad de desplante de 1.50 m. En los Anexos se puede observar el análisis de precios unitarios y el cálculo de los costos totales.

### 4.3. Prueba de Hipótesis

La prueba para cada hipótesis de la presente investigación se dio a través del software estadístico JAMOV, además, se utilizó la prueba T de student para muestras independientes, como ya se había mencionado anteriormente, el cual respalda datos que tienen una distribución normal, como también sirve para muestras pequeñas.

Respecto a los resultados de la prueba. Primero se detalla la prueba de la hipótesis general y luego la hipótesis específica 1 y 2.

#### 4.3.1. Hipótesis General

Se ingresó los datos obtenidos de la influencia de cal y cemento en la capacidad portante del suelo, a partir de esto, se estableció la estadística descriptiva e inferencial, obteniendo los siguientes valores.

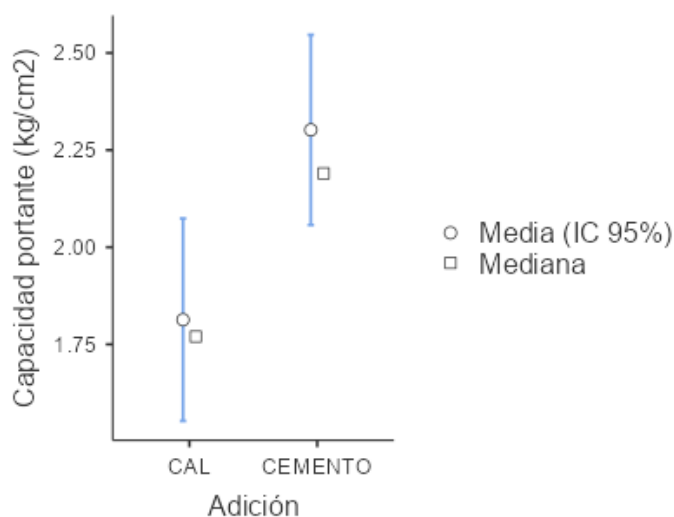
**Tabla 27**

*Medidas de tendencia central y dispersión de la hipótesis general*

Grupo	Media	Mediana	Desviación Estándar	Error Estándar
Cal	1.81	1.77	0.515	0.133
Cemento	2.30	2.19	0.484	0.125

**Figura 39**

*Gráfica descriptiva de la media y mediana de la hipótesis general (variable: capacidad portante del suelo)*



Para la prueba se consideró un nivel de significancia de 5%, siendo  $\alpha = 0.05$ , dicho esto, en la Tabla 28 se detalla el enunciado de la hipótesis nula y alterna, como también los resultados de la prueba estadística.

**Tabla 28**

*Resultados de la hipótesis general (variable: capacidad portante del suelo)*

Planteamiento de la hipótesis							
<i>H<sub>0</sub></i> : [ $\mu_{\text{cemento}} = \mu_{\text{cal}}$ ] No ejerce mayor influencia la adición de cemento que la cal en la capacidad portante del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022.							
<i>H<sub>a</sub></i> : [ $\mu_{\text{cemento}} > \mu_{\text{cal}}$ ] Ejerce mayor influencia la adición de cemento que la cal en la capacidad portante del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022.							
Prueba de normalidad (Shapiro-Wik)							
W		p				p > 0.05	
0.965		0.410				los datos presentan una distribución normal	
Prueba T para muestras independientes							
	Estadístico	Grados de libertad	p	Diferencia de medias	EE de la diferencia	Intervalo de confianza al 95 %	
						Inferior	Superior
Capacidad Portante del Suelo	-2.68	28.0	0.006	-0.489	0.182	-Inf	-0.178
Decisión							
Dado que $p < 0.05$ . Se rechaza la <i>H<sub>0</sub></i> y se acepta la <i>H<sub>a</sub></i> = Ejerce mayor influencia la adición de cemento que la cal en la capacidad portante del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022.							

### 4.3.2. Hipótesis Específica 01

Se ingresó los datos obtenidos de la influencia de cal y cemento en el índice plástico del suelo, a partir de esto, se realizó la estadística descriptiva e inferencial, obteniendo así los siguientes valores.

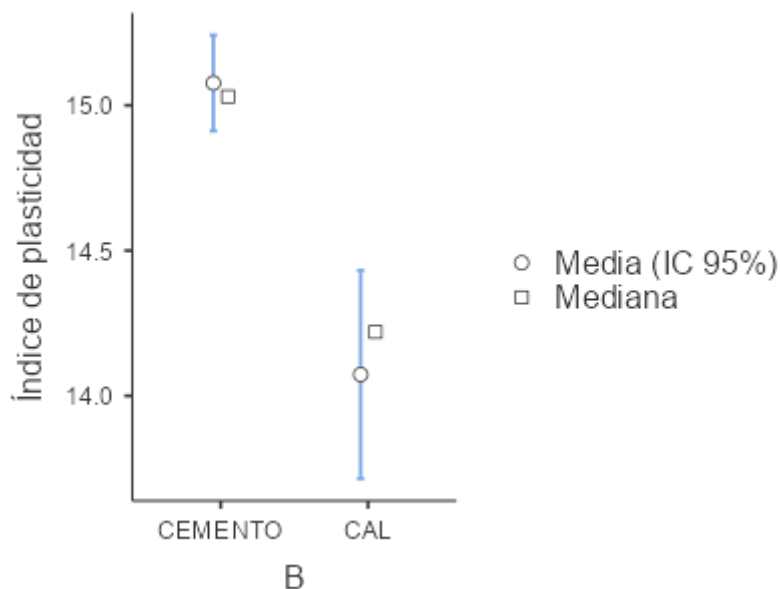
**Tabla 29**

*Medidas de tendencia central y dispersión de la Hipótesis específica 01*

Grupo	Media	Mediana	Desviación Estándar	Error Estándar
CEMENTO	15.1	15.0	0.146	0.0841
CAL	14.1	14.2	0.317	0.183

**Figura 40**

*Gráfica descriptiva de la media y mediana de la hipótesis específica 01*



Para la prueba de hipótesis se estableció un nivel de significancia de 5%, siendo  $\alpha = 0.05$ , dicho esto, en la Tabla 30 se detalla el enunciado de la hipótesis nula y alterna, como también los valores numéricos de la prueba estadística.

**Tabla 30**

*Resultados de la hipótesis específica 1*

Planteamiento de la hipótesis							
$H_0$ : [ $\mu_{\text{cemento}} = \mu_{\text{cal}}$ ] No existe diferencias en la influencia de adición de cal y cemento en las propiedades geotécnicas del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022.							
$H_a$ : [ $\mu_{\text{cemento}} \neq \mu_{\text{cal}}$ ] Existe diferencias en la influencia de adición de cal y cemento en las propiedades geotécnicas del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022.							
Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)							
W		p	p > 0.05				
0.904		0.397	los datos presentan una distribución normal				
Prueba T para muestras independientes							
	Estadístico	Grados de libertad	p	Diferencia de medias	EE de la diferencia	Intervalo de confianza al 95 %	
						Inferior	Superior
Índice de Plasticidad	4.99	4.00	0.008	1.00	0.201	0.445	1.56
Decisión							
Dado que $p < 0.05$ . Se rechaza la $H_0$ y se acepta la $H_a$ = Existe diferencias en la influencia de adición de cal y cemento en las propiedades geotécnicas del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022.							

### 4.3.3. Hipótesis Específica 02

Se ingresó los datos obtenidos de la influencia de cal y cemento en dos variables: cohesión y el ángulo de fricción del suelo, a partir de esto, se realizó la estadística descriptiva e inferencial para cada variable, obteniendo así los siguientes valores.

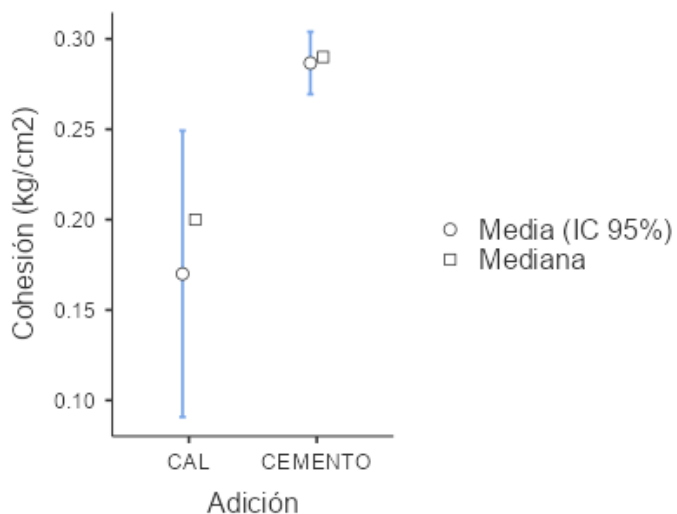
**Tabla 31**

*Medidas de tendencia central y dispersión de la Hipótesis específica 2  
(variable:cohesión del suelo)*

Grupo	Media	Mediana	Desviación Estándar	Error Estándar
Cal	0.170	0.200	0.0700	0.0404
Cemento	0.287	0.290	0.0153	0.00882

**Figura 41**

*Gráfica descriptiva de la media y mediana de la hipótesis específica 2 (variable: cohesión del suelo)*





Para la prueba de hipótesis se consideró un nivel de significancia del 5%, siendo  $\alpha = 0.05$ , dicho esto, en la Tabla 32 se detalla el enunciado de la hipótesis nula y alterna, como también los valores numéricos de la prueba estadística para la variable: cohesión del suelo.

**Tabla 32**

*Resultados de la hipótesis específica 02 (variable:cohesión del suelo)*

Planteamiento de la hipótesis							
$H_0$ : [ $\mu_{\text{cemento}} = \mu_{\text{cal}}$ ] No existe diferencias en la influencia de adición de cal y cemento en la cohesión del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022							
$H_a$ : [ $\mu_{\text{cemento}} \neq \mu_{\text{cal}}$ ] Existe diferencias en la influencia de adición de cal y cemento en la cohesión del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022.							
Prueba de normalidad (Shapiro-Wik)							
W	p	p > 0.05					
0.927	0.559	los datos presentan una distribución normal					
Prueba T para muestras independientes							
	Estadístico	Grados de libertad	p	Diferencia de medias	EE de la diferencia	Intervalo de confianza al 95 %	
						Inferior	Superior
Cohesión del suelo	-2.82	4.00	0.048	-0.117	0.0414	-0.232	- 0.00182
Decisión							
Dado que $p < 0.05$ . Se rechaza la $H_0$ y se acepta la $H_a$ = Existe diferencias en la influencia de adición de cal y cemento en la cohesión del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022.							

Para el caso de la segunda variable: ángulo de fricción del suelo, se tiene los siguientes datos estadísticos descriptivos y la prueba de hipótesis.

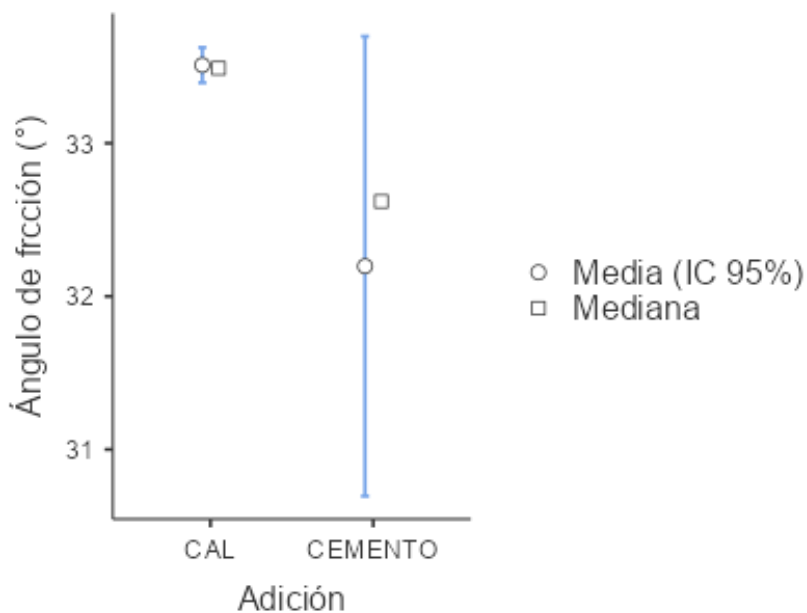
**Tabla 33**

*Medidas de tendencia central y dispersión de la Hipótesis específica 2  
(variable: ángulo de fricción interna del suelo)*

Grupo	Media	Mediana	Desviación Estándar	Error Estándar
Cal	33.5	33.5	0.101	0.0586
Cemento	32.2	32.6	1.33	0.766

**Figura 42**

*Gráfica descriptiva de la media y mediana de la hipótesis específica 2 (cohesión del suelo)*



Para la prueba de hipótesis se consideró un nivel de significancia de 5%, siendo  $\alpha = 0.05$ , dicho esto, en la Tabla 34 se detalla el planteamiento de la hipótesis nula y alterna, como también los datos numéricos de la prueba estadística.

**Tabla 34**

*Resultados de la hipótesis específica 02 (variable: ángulo de fricción interna del suelo)*

Planteamiento de la hipótesis							
$H_0$ : [ $\mu_{\text{cemento}} = \mu_{\text{cal}}$ ] No existe diferencias en la influencia de adición de cal y cemento en el ángulo de fricción del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022.							
$H_a$ : [ $\mu_{\text{cemento}} \neq \mu_{\text{cal}}$ ] Existe diferencias en la influencia de adición de cal y cemento en el ángulo de fricción del suelo de cimentación de las viviendas autoconstruidas del sector de Moyocorral - Abancay – Apurímac - 2022.							
Prueba de normalidad (Shapiro-Wik)							
W		p	p > 0.05				
0.910		0.437	los datos presentan una distribución normal				
Prueba T para muestras independientes							
	Estadístico	Grados de libertad	p	Diferencia de medias	EE de la diferencia	Intervalo de confianza al 95 %	
						Inferior	Superior
Ángulo de fricción Interna	1.71	4.00	0.163	1.31	0.768	-0.819	3.45
Decisión							
Dado que $p > 0.05$ . Se rechaza la $H_a$ y se acepta la $H_0$ = No existe diferencias en la influencia de adición de cal y cemento en el ángulo de fricción del suelo de cimentación							

## CONCLUSIONES

- 1. Del objetivo general.** Se analizó la influencia de la adición de cal comparado con la adición de cemento en la capacidad portante del suelo de cimentación del sector de Moyocorral, donde este valor incrementó con la adición de estos, independientemente del tipo de cimentación, sus dimensiones o profundidad de desplante, este parámetro siempre incrementa con el uso de estos aditivos. Con la adición del 18% de cal o cemento, se obtuvo mejores resultados que con el 6% o 12%, llegando así a incrementar en más del doble del valor patrón. Al comparar los resultados, se ha encontrado que la capacidad portante del suelo con la adición de cemento es mayor que con la adición de cal, y que el aumento en la capacidad portante aproximadamente es del 146.02% con cemento y del 116.81% con cal. En la Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16 se presentan estos resultados. Es importante mencionar que la proporción más adecuada fue del 12% de cemento en aspectos técnicos y económicos, puesto que los precios de construcción de la cimentación podrían reducirse hasta en un 10%, como se demuestra en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**
- 2. Del objetivo específico 1.** Se determinó la influencia de la adición de cal comparado con la adición de cemento en las propiedades geotécnicas del suelo de cimentación del sector de Moyocorral, donde el suelo natural se clasifica como arena arcillosa (SC) y arena limosa (SM) según el sistema SUCS, además, presenta una ligera capa de material orgánico en su superficie. Al adicionar cal a la muestra patrón en dosificaciones del 6%, 12% y 18%, el límite líquido incrementó de 31.53% a 41.84%, 42.30% y 42.14% respectivamente, el límite plástico llegó a incrementar de 17.50% a 27.55%, 28.08%, y 28.43%. El índice plástico no ha variado

significativamente con la adición de cal, teniéndose la variación de 14.03% a 15.24%, 15.03% y 14.96% respectivamente, todo ello se observa en la Tabla 22. Por otro lado, al adicionar cemento a la muestra patrón en porcentajes de 6%, 12% y 18%, el límite líquido incrementó de 31.53% a valores de 41.43%, 42.00% y 38.75% respectivamente, el límite plástico ha incrementado de 17.50% a valores de 26.19%, 26.97% y 23.79%, sin embargo, el índice plástico no ha variado significativamente con la adición, teniéndose la variación de 14.03% a 15.24%, 15.03% y 14.96% respectivamente, esto se muestra en la Tabla 23. En conclusión, se ha observado que tanto el cemento como la cal influyen en las propiedades geotécnicas del suelo, aumentando tanto el límite líquido como el límite plástico. Además, se ha notado que el índice plástico aumenta con la adición de cemento, mientras que con la adición de cal dicho valor no varía significativamente.

- 3. Del objetivo específico 2.** Se determinó la influencia de la adición de cal comparado con la adición de cemento en las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante del suelo de cimentación del sector Moyocorral. Tanto la cohesión como el ángulo de fricción variaron con la adición de cal y cemento. Con la adición de cal en 6% ha disminuido la cohesión de 0.17 kg/cm<sup>2</sup> a 0.09 kg/cm<sup>2</sup>, pero con la adición del 12% y 18% esta propiedad ha incrementado, dando valores de 0.20 kg/cm<sup>2</sup> y 0.22kg/cm<sup>2</sup> respectivamente, del mismo modo, el ángulo de fricción incrementó de 25.08° a 33.42°,33.49° y 33.62° respectivamente, del mismo modo, la densidad máxima seca ha incrementado de 1.96 gr/cm<sup>3</sup> a 2.04 gr/cm<sup>3</sup>, estos valores se observan en la Tabla 25. Por otro lado, con la adición de cemento en los mismos porcentajes; la cohesión del suelo ha incrementado de 0.17 kg/cm<sup>2</sup> a 0.27 kg/cm<sup>2</sup>, 0.29 kg/cm<sup>2</sup> y 0.30 kg/cm<sup>2</sup>

respectivamente, de igual forma el ángulo de fricción ha acrecentado de 25.08° a 30.71°, 32.62° y 33.26° respectivamente, de igual manera, la densidad máxima seca ha incrementado de 1.96 gr/cm<sup>3</sup> a 2.04 gr/cm<sup>3</sup>, es importante mencionar que la humedad óptima se reduce con la adición de estos estabilizadores, todo ello se plasma en la Tabla 26. Al comparar estos resultados, la adición de cemento ha actuado mejor que la adición de cal respecto a la cohesión del suelo, pero la adición de cal sostuvo valores ligeramente superiores a la adición de cemento respecto al ángulo de fricción, en definitiva, ambos estabilizadores mejoraron las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante del suelo de Moyocorral.

## RECOMENDACIONES

1. Entorno al objetivo general, se recomienda analizar la capacidad portante del suelo de cimentación mediante métodos de campo, uno de estos métodos es el ensayo de placa de carga, el cual mide la deformación del suelo entorno a la carga aplicada. Por lo tanto, se recomienda a los colegas interesados en la geotecnia que realicen investigaciones a nivel real y apliquen técnicas innovadoras, como el ensayo de placa de carga para la determinación de la capacidad portante del suelo. De esta manera, se podrán mejorar las técnicas de diseño de cimentaciones en nuestro entorno nacional y contribuir a la seguridad y estabilidad de las edificaciones.
2. En cuanto al objetivo específico 1, se recomienda determinar la plasticidad de las muestras de suelo con adición de cal o cemento con varios días de curado. Existen numerosos estudios que indican que las propiedades del suelo mejoran con el tiempo y un correcto proceso de curado. Es necesario señalar que el tiempo de curado puede variar en función de la proporción de adición de cal o cemento, así como de las características del suelo de cimentación. Por ello, se recomienda que se realice un análisis detallado de las propiedades de las muestras a diferentes tiempos de curado para determinar el mejor momento para su uso en la construcción de cimentaciones.
3. En relación con el objetivo específico 2, se recomienda determinar la cohesión y el ángulo de fricción del suelo natural y del suelo mejorado a través de la utilización de ensayos de campo, y comparar los resultados obtenidos con los ensayos de laboratorio. Entre los ensayos de campo que se pueden utilizar para este fin, destacan el ensayo de penetración estándar (SPT) y el ensayo de penetración

dinámica ligera (DPL). Estos ensayos permiten obtener información valiosa acerca del comportamiento del suelo en su estado natural y mejorado. Es importante tener en cuenta que, si bien los ensayos de laboratorio son precisos y reproducibles, los ensayos de campo proporcionan información más cercana a las condiciones reales del terreno. Por ello, es fundamental realizar una comparación rigurosa entre ambos tipos de ensayos para evaluar las diferencias que puedan existir en los resultados. Cabe destacar que la realización de ensayos de campo requiere de un presupuesto adecuado para cubrir los costos de equipos, personal y materiales necesarios para llevar a cabo estas pruebas. Sin embargo, los beneficios de obtener datos más precisos sobre el comportamiento del suelo en el campo justifican el costo adicional que se pueda requerir.

4. Para poder tratar el suelo con los aditivos, se recomienda compactar este en capas de 0.20m a 0.30m de espesor, la cantidad de cemento dependerá del volumen de suelo a tratar, además, se recomienda la mejora de 1.00m a 1.50m de espesor debajo de la profundidad de desplante de la cimentación, la humedad óptima debe estar entre rangos del 10% y 11% para tener un compactado correcto para este tipo de suelo. En ese sentido, el curado del material mejorado es importante y este se puede dar durante un periodo de 7 días como mínimo. Cabe destacar que los resultados son estrictamente válidos para la zona de estudio, para otros tipos de terrenos se recomienda realizar un análisis cuidadoso de las características del suelo y definir los objetivos de la estabilización antes de tomar una decisión sobre la cantidad y tipo de estabilizador a utilizar.



5. En el campo de la ingeniería de cimentaciones, es importante tener en cuenta aspectos económicos al momento de seleccionar un aditivo para mejorar las propiedades del suelo. En ese sentido, se ha encontrado que el uso de cemento es una opción más accesible en el mercado local, en comparación con la cal. Además, se ha determinado que una proporción del 6% y 12% de cemento en el suelo es suficiente para lograr un incremento significativo en la capacidad portante del mismo. Estos resultados podrían ser de gran utilidad para el sector de la construcción, ya que podrían contribuir a reducir costos en la utilización de materiales estabilizadores en la mejora del suelo de cimentación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bowles, J. E. (1990). *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil* (Segunda edición). McGraw-Hill.
- C.-H. Serrano, M.-P. Cruz, & I.-F. Martin-Schmädke. (2020). *Application of the Dynamic Compaction for Large Imprint Structures in Córdoba, Argentina*. 29 (54).
- Clavijo Aldana, D. E., & Jurado Rendón, C. G. (2016). *Estabilización de suelos con cemento tipo MH para mejorar las características físicas y mecánicas del material de subsuelo de la zona de talleres y cocheras de la PLMQ, sector Quitumbe*. [Tesis de Pregrado]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Comité Técnico permanente de Geotecnia. (1999). *NTP 339.128 1999 SUELOS.Método de ensayo para el análisis granulométrico*.
- Comité Técnico permanente de Geotecnia. (2014). *NTP 339.129 1999 SUELOS.Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos*.
- Comité Técnico permanente de Geotecnia. (2017). *NTP 339.171 2002 SUELOS.Método de ensayo normalizado para el ensayo de corte directo de suelos bajo condiciones consolidadas no drenadas*.
- Díaz Bravo, J. (2021). *Conceptualización de la metodología para el uso del relleno fluido suelo- cemento en el mejoramiento de suelos de baja capacidad portante en edificaciones-2020* [Tesis de Pregrado]. Universidad Nacional Hermilio Valdizán.

- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta edición). McGraw-Hill.
- Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (Primera edición). MCGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C. V.
- Huanca Borda, A. R. (1996). *Problemas de mecánica de suelos* (Segunda Edición). HB Editores.
- idencity, E. (2018). El alto riesgo de las viviendas informales en el Perú. *Idencity*.  
<https://www.idencityconsulting.com/viviendas-informales-en-el-peru/>
- Instituto del Cemento y sus Aplicaciones. (2008). *Manual de estabilización de suelos con cemento o cal*. Vaquero Servicios de Publicaciones, S.L.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1998). *Mecánica de suelos* (Noriega editores). Limusa.
- Leon Rojas, J. M. (2018). *Mejoramiento de suelos con material de préstamo para reducir la cimentación de viviendas en el Condominio Alcala de Henares Chíncha—Ica, 2018*. [Tesis de Pregrado]. Universidad César Vallejo.
- López Martínez, M. A. (2017). *Mejoramiento de las propiedades físico mecánicas de los suelos arenosos del sector de Pomasqui para cimentaciones superficiales y contrapisos, mediante el uso de cemento tipo MH* [Tesis de Pregrado]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- López Sumarriva, J. Johel, & Ortiz Pinares, G. (2018). *Estabilización de suelos arcillosos con cal para el tratamiento de la subrasante en las calles de la urbanización San Luis de la ciudad de Abancay*. [Tesis de Pregrado]. Universidad Tecnológica de los Andes.

- M Das, B. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones* (Séptima Edición). Cengage Learning.
- M Das, B. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (Cuarta edición). Cengage Learning.
- Meyerhof, G. G. (1976). *Bearing capacity and settlement of pile foundations*.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018a). *CE.020 Estabilización de suelos y taludes*.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018b). *NTP E.050 Suelos y Cimentaciones*.
- Municipalidad provincial de Abancay, Apurímac. (2012). *Plan de desarrollo urbano de la ciudad de Abancay 2012-2021*. D.S. 004-2011-VIVIENDA.
- Nel Quezada, L. (2010). *Metodología de la investigación* (Primera edición). Empresa editora Macro E.I.R.L.
- Niño Santiesteban, A. I. (2018). *Adición de cal para mejora de suelos con fines de cimentación en condominio Monte—Carmelo, distrito El Carmen—Chincha—Ica, 2018*. [Tesis de Pregrado]. Universidad César Vallejo.
- Núñez Solís, L. O., & Rodas Romo, N. I. (2015). *Guía para el mejoramiento de la capacidad de carga en terrenos de consistencia blanda a media*. [Tesis de Pregrado]. Universidad Central del Ecuador.
- Ñaupas Paitán, H., Mejía Mejía, E., Novoa Ramírez, E., & Villagomez Páucar, A. (2014). *Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis* (Cuarta edición). Ediciones de la U.
- Pasquel Carbajal, E. (1998). *Tópicos de tecnología del concreto en el Perú* (Segunda edición). Consejo nacional del CIP.

- Peralta Sánchez, L. (2021). *Mejoramiento de la capacidad portante del suelo aplicando distintas dosis de residuos triturados de ladrillo, lechada de cal y cemento diluido: Caso urbanización «Los Pinos», Chota-2020*. [Tesis de Pregrado]. Universidad Autónoma de Chota.
- Polinario Casimiro, D. A. (2021). *Mejoramiento del suelo con clasificación SUCS GC-GM mediante la adición de ceniza volcánica en la ciudad de Arequipa* [Tesis de Pregrado]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Sánchez Moreno, J. M. (2019). Guía para identificar grietas en muros y paredes. *Intenso Albacete*. <https://www.intensoalbacete.com/guia-para-identificar-grietas-en-muros-y-paredes/>
- Sivestre Miraya, I., & Huamán Nahula, C. (2019). *Pasos para elaborar la investigación y la redacción de la tesis universitaria* (Primera edición). Editorial San Marcos E.I.R.L.
- Tacca Huaracca, J. A. (2021). *Estabilización de suelo arcillosos con adición de cal para el mejoramiento de la subrasante, vía de evitamiento, Abancay—Apurímac, 2021*. [Tesis de Pregrado]. Universidad César Vallejo.
- Tamayo y Tamayo, M. (2006). *El proceso de la investigación científica*. (Cuarta Edición). NORIEGA EDITORES.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics* (Primera edición). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470172766>
- Toirac Corral, J. (2015). El suelo-cemento como material de construcción. *Ciencia y Sociedad*, 53.

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos se encuentran resguardados en la oficina de repositorio en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes.