



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Revisión del diseño de cimentaciones enfocado en la
capacidad portante y asentamientos en la infraestructura
de la Clínica SANNA, Piura**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Michael Jordy Infantes Roberts

Asesor:
Dr. Ing. William Segundo Araujo Navarro

Piura, enero de 2026

Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Michael Jordy Infantes Roberts, egresado del **Programa Académico** de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con **DNI: 70777907**, declaro que:

Soy autor del trabajo final titulado:

“Revisión del diseño de cimentaciones enfocado en la capacidad portante y asentamientos en la infraestructura de la Clínica SANNA, Piura”

El mismo que presento bajo la modalidad de **Tesis** para optar el Título profesional de Ingeniero Civil.

El texto de mi trabajo final es original y no vulnera los derechos de terceros o, de ser el caso, derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para lo cual, he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas. Asimismo, el texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico; y que la investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.

En caso de detectarse el incumplimiento de lo declarado asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

La asesoría del trabajo estuvo a cargo de los siguientes docentes de la Universidad de Piura:

- Dr. Ing. William Segundo Araujo Navarro, identificado con DNI: 47587927

Declaro (declaramos) que:

Luego de haber empleado el software de coincidencia Turnitin, revisado las fuentes de información señaladas por el autor, y en razón de mi (nuestra) experiencia como investigador(es), declaro (declaramos) que las ideas expuestas en el trabajo final alcanzan las condiciones de calidad, integridad y originalidad acorde a los objetivos institucionales y estándares en materia de investigación. Finalmente, no asumo (asumimos) responsabilidad por la posible vulneración de derechos de autor en el trabajo final referido, pues tal responsabilidad es exclusiva del autor.

Fecha: 01/01/2026.



Firma del asesor



Firma del tutor

Dedicatoria

Dedico este trabajo, con profundo amor y gratitud, a mis padres Patricia Roberts Flores y Miguel Infantes Molina, por su esfuerzo incansable, su apoyo incondicional y por los valores que me inculcaron a lo largo de mi vida. Su ejemplo de perseverancia, responsabilidad y sacrificio ha sido el pilar fundamental que me permitió avanzar y culminar esta etapa tan importante de mi formación profesional.

A mi pareja, Ana Claudia Paiva Pizarro, por su compañía constante, su comprensión y su aliento en los momentos de mayor exigencia. Su apoyo y confianza fueron una fuente permanente de fortaleza y motivación para seguir adelante.

De manera muy especial, dedico este logro a mi hermana Melanny Infantes Roberts, que hoy descansa en el cielo. Su recuerdo vive en mi corazón y su presencia espiritual ha sido una guía silenciosa que me acompañó durante todo este camino. Este trabajo es también un homenaje a su memoria y al amor que trasciende el tiempo y la distancia.

Agradecimientos

Agradezco a Dios, primeramente, por darme la fortaleza, la perseverancia y la oportunidad de culminar esta etapa tan importante de mi vida. A la Universidad de Piura (UDEP), por la formación académica y humana recibida a lo largo de mi carrera. Asimismo, expreso mi sincero agradecimiento a mis amigos y familiares, quienes me acompañaron, apoyaron y alentaron de distintas maneras durante todo mi proceso universitario.



Resumen

La presente tesis tiene como objetivo revisar y evaluar el diseño de las cimentaciones de la infraestructura de la Clínica SANNA, ubicada en la ciudad de Piura, a partir del análisis de la capacidad portante del suelo y de los asentamientos previstos, con la finalidad de garantizar un diseño seguro, eficiente y conforme a la normativa vigente. El estudio se desarrolló sobre la base del análisis del estudio de mecánica de suelos existente, el cual permitió caracterizar un perfil estratigráfico compuesto principalmente por suelos granulares de baja plasticidad, sin presencia de nivel freático en la profundidad explorada, condición favorable para el empleo de cimentaciones superficiales. La metodología incluyó la evaluación de la capacidad portante mediante métodos teóricos clásicos y normativos, aplicando factores de seguridad acordes con la Norma Técnica E.050, así como el cálculo de los asentamientos inmediatos a partir de la teoría de la elasticidad, considerando las propiedades mecánicas del suelo y las cargas transmitidas por la superestructura. Asimismo, se revisaron distintas alternativas de cimentación, tales como zapatas corridas, zapatas combinadas y la losa de cimentación, analizando su desempeño técnico frente a las condiciones del terreno. Los resultados obtenidos evidencian que la capacidad portante del suelo es suficiente para resistir las cargas estructurales previstas y que los asentamientos calculados se mantienen dentro de los límites admisibles, lo cual permite concluir que el diseño de las cimentaciones propuesto es técnicamente viable, seguro y compatible con los requerimientos funcionales de una edificación de uso hospitalario.

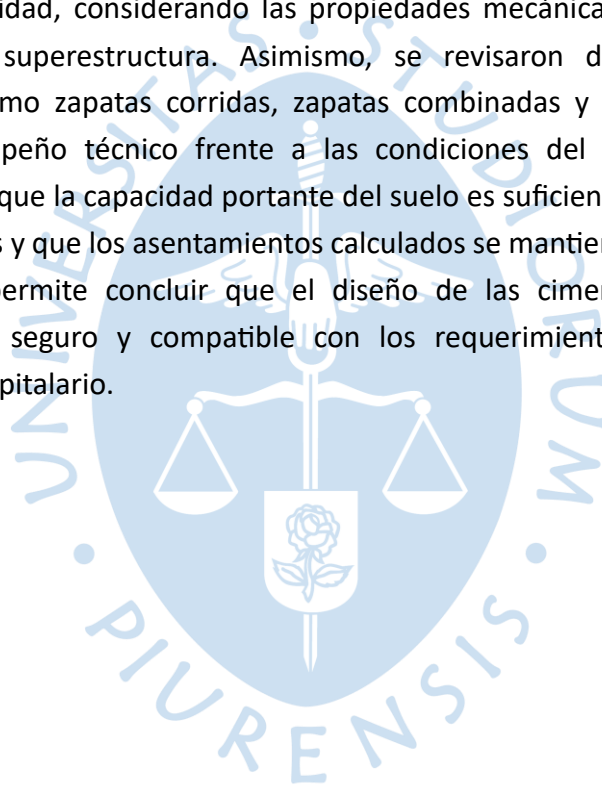
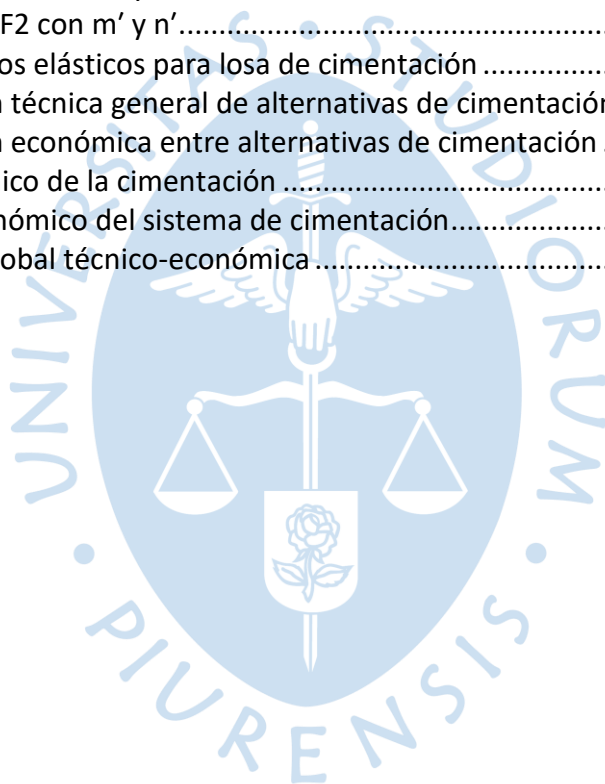


Tabla de contenido

Introducción	9
Capítulo 1 Marco Teórico	10
1.1 Mecánica de suelos	10
1.1.1 <i>Clasificación de suelos</i>	10
1.1.2 <i>Propiedades geotécnicas relevantes</i>	17
1.1.3 <i>Ensayos de laboratorio e in situ</i>	23
1.2 Cimentaciones	27
1.2.1 <i>Tipo de cimentación</i>	28
1.2.2 <i>Criterios de selección en función al estudio de suelos</i>	29
1.2.3 <i>Normativa vigente</i>	31
1.3 Costos unitarios	31
1.3.1 <i>Conceptos de análisis de precios unitarios</i>	31
1.3.2 <i>Variables que influyen en el costo de cimentaciones</i>	32
1.3.3 <i>Relación tipo de cimentación y costo final de obra</i>	32
Capítulo 2 Metodología	34
2.1 Procedimiento general	34
2.2 Recolección de datos	34
2.2.1 <i>Zona de estudio</i>	35
2.2.2 <i>Identificación de parámetros principales</i>	37
2.2.3 <i>Clasificación del suelo según normativa</i>	40
2.2.4 <i>Método de análisis de capacidad portante</i>	40
2.2.5 <i>Método de Análisis de asentamientos</i>	41
2.3 Determinación del tipo de cimentación	42
2.3.1 <i>Evaluación de alternativas de solución</i>	42
2.3.2 <i>Verificación de cumplimiento de normativa</i>	43
2.4 Comparación técnica y económica	44
2.4.1 <i>Análisis de impacto técnico y económico</i>	44
Capítulo 3 Resultados	45
3.1 Descripción técnica de la cimentación propuesta	45
3.2 Perfil estratigráfico	46
3.3 Ensayos de laboratorio	47
3.4 Análisis de la cimentación	49
3.4.1 <i>Determinación de los parámetros de resistencia</i>	49
3.5 Capacidad portante	50
3.5.1 <i>Verificación de capacidad portante</i>	53
3.5.2 <i>Verificación de la capacidad portante de una Losa de cimentación</i>	55
3.6 Asentamiento elástico	58
3.6.1 <i>Verificación de asentamiento elásticos</i>	59
3.6.2 <i>Verificación de asentamientos en una losa de cimentación</i>	60
3.7 Determinación del tipo de cimentación	62
3.8 Verificación de cumplimiento de normativa	63
3.9 Análisis de impacto técnico y económico	64
3.10 Discusión	67
Conclusiones	70
Recomendaciones	72
Referencias	73

Lista de tablas

Tabla 1	Clasificación de materiales de carreteras subrasantes	11
Tabla 2	Sistema unificado de clasificación de suelos.....	13
Tabla 3	Ubicación de las calicatas y profundidad	47
Tabla 4	Ensayos de laboratorio	47
Tabla 5	Resumen de los parámetros de resistencia	50
Tabla 6	Resumen de los parámetros de resistencia reportados en el EMS	53
Tabla 7	Resumen de los parámetros de resistencia reportados en el EMS	54
Tabla 8	Factores de Capacidad Portante según el Ángulo de Fricción interna	56
Tabla 9	Cálculos de capacidad portante	58
Tabla 10	Asentamientos según el EMS	59
Tabla 11	Verificación de asentamientos elásticos	60
Tabla 12	Variación de F1 con m' y n'	61
Tabla 13	Variación de F2 con m' y n'	61
Tabla 14	Asentamientos elásticos para losa de cimentación	61
Tabla 15	Comparación técnica general de alternativas de cimentación	65
Tabla 16	Comparación económica entre alternativas de cimentación	66
Tabla 17	Impacto técnico de la cimentación	66
Tabla 18	Impacto económico del sistema de cimentación.....	67
Tabla 19	Evaluación global técnico-económica.....	67



Lista de figuras

Figura 1 Capacidad de plasticidad.....	13
Figura 2 Clasificación unificada de suelos según el Sistema SUCS.....	15
Figura 3 Diagrama de flujo de clasificación de limos y arcillas	16
Figura 4 Diagrama de flujo de clasificación de limos y arcillas	17
Figura 5 Ubicación de la zona de estudio	36
Figura 6 Ubicación del proyecto	37
Figura 7 Planta de Cimentación de la Clínica Sanna	46



Introducción

El diseño de cimentaciones es un aspecto fundamental de la ingeniería estructural y geotécnica, pues constituye el enlace directo entre la edificación y el suelo que la soporta. Su seguridad y desempeño dependen de una adecuada evaluación de las propiedades del terreno y de la correcta selección del sistema de cimentación. La interacción suelo–estructura, como señalan Terzaghi y Peck (1967), exige combinar la caracterización física y mecánica del subsuelo con el análisis del comportamiento estructural esperado, bajo un marco metodológico riguroso.

Autores como Bowles (1996) y Das (2015) destacan que la capacidad portante y los asentamientos son los parámetros críticos para el diseño de cimentaciones, profundamente influenciados por la clasificación del suelo, su densidad relativa, el historial de esfuerzos y la presencia o ausencia de agua subterránea. Estos factores determinan la manera en que el terreno responde a las cargas aplicadas, por lo que su correcta evaluación resulta indispensable.

En el Perú, la Norma Técnica E.050 del Reglamento Nacional de Edificaciones establece los criterios mínimos para analizar el subsuelo y diseñar cimentaciones superficiales o profundas, integrando bases teóricas desarrolladas por autores como Terzaghi y Meyerhof y adaptándolas a la complejidad geotécnica del territorio nacional. Estudios recientes realizados en Piura, como los de Adanaqué (2022), Zamora (2022) y Mendoza (2023), evidencian la heterogeneidad de los depósitos aluviales de la región y la necesidad de caracterizaciones detalladas para evitar problemas de capacidad portante insuficiente y asentamientos diferenciales.

Las condiciones geotécnicas de Piura marcadas por suelos arenosos de origen aluvial y la variabilidad inducida por eventos como El Niño demandan una evaluación minuciosa antes de ejecutar obras sanitarias o de uso crítico, como consultorios médicos. Según Tomlinson (2001), el diseño de cimentaciones en suelos arenosos debe considerar la capacidad portante, el control de asentamientos y la estabilidad general de la estructura, aspectos particularmente relevantes para edificaciones de uso médico, donde la continuidad operativa y la seguridad estructural son prioritarias.

En este contexto, la presente investigación revisa y evalúa la propuesta de diseño de cimentaciones planteada en el Estudio de Mecánica de Suelos (EMS) para la infraestructura de la Clínica SANNA en Piura. El estudio comprende la revisión de los parámetros geotécnicos del terreno, la definición de las características geométricas y cargas de la cimentación propuesta, la verificación de su cumplimiento con la normativa técnica vigente y el desarrollo de una comparación técnica y económica que permita sustentar conclusiones y recomendaciones orientadas a optimizar el diseño, garantizando condiciones adecuadas de seguridad estructural y eficiencia constructiva.

Capítulo 1

Marco teórico

1.1 Mecánica de suelos

1.1.1 Clasificación de suelos

Dentro del campo de la mecánica de suelos, la clasificación del suelo representa un pilar esencial, pues a partir de ella puede inferirse su comportamiento mecánico y su composición ante cargas estructurales. A través de esta taxonomía, resulta factible interpretar y prever cómo responderá el suelo bajo diversas condiciones de carga sin recurrir a un análisis exhaustivo para cada caso particular. Además, este proceso de clasificación permite estandarizar criterios técnicos que facilitan la toma de decisiones en el diseño y ejecución de proyectos de ingeniería civil, especialmente en obras donde el tipo de suelo influye directamente en la seguridad estructural. Briones e Irigoien (2015) destacan que, mediante una correcta clasificación del suelo, no solo se puede determinar su capacidad portante, sino también establecer parámetros fundamentales para el diseño de cimentaciones superficiales o profundas, evaluar el comportamiento sísmico del terreno y estimar posibles asentamientos diferenciales en estructuras proyectadas. Su aplicación resulta particularmente relevante en zonas de expansión urbana, donde la variabilidad del tipo de suelo puede representar un riesgo potencial si no se identifica y caracteriza adecuadamente en la etapa de planificación (Briones & Irigoien, 2015).

Desde un enfoque ingenieril, y considerando aspectos como la distribución granulométrica y la plasticidad del suelo, existen dos sistemas ampliamente aceptados y utilizados a nivel internacional: el Sistema de Clasificación de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (Das, 2014). Ambos sistemas ofrecen criterios técnicos precisos para la categorización de los suelos en función de su textura, tamaño de partícula y comportamiento plástico, permitiendo así una adecuada selección y evaluación en proyectos de ingeniería civil (Das, 2014).

1.1.1.1 Sistema clasificación AASHTO. El sistema de clasificación AASHTO que se emplea actualmente se detalla en la tabla 1, en la cual se establece que el suelo puede ser categorizado en siete grupos principales. En primer lugar, los suelos correspondientes a los grupos A-1, A-2 y A-3 están compuestos por materiales granulares, caracterizados porque el 35 % o menos de sus partículas pasa por el tamiz N.º 200. En contraste, los suelos incluidos en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 contienen más del 35 % de partículas finas que atraviesan dicho tamiz, lo que influye significativamente en sus propiedades mecánicas y de comportamiento (Das, 2014).

Tabla 1*Clasificación de materiales de carreteras subrasantes*

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)						
	A-1			A-2			
Grupo de clasificación	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)							
Núm. 10	50 máx.						
Núm. 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
Núm. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción de paso núm. 40							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Limo o grava arcillosa y arena			
Clasificación general de la subrasante	Excelente a bueno						

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)				
	A-4		A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6†
Grupo de clasificación					
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)					
Núm. 10					
Núm. 40					
Núm. 200	36 mín.		36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción de paso núm. 40					
Límite líquido	40 máx.		41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	10 máx.		10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Suelos limosos			Suelos arcillosos	
Clasificación general de la subrasante	Regular a malo				

Nota. Tomado de Das, (2015). *Para A-7-5, PI LL 30, †Para A-7-6, PI LL 30.

Este sistema de clasificación se basa fundamentalmente en dos criterios esenciales para determinar la naturaleza y comportamiento del suelo. El primer criterio es el tamaño de grano, que clasifica los materiales en grava, arena y limos-arcillas. Específicamente, la grava está constituida por partículas que pasan por un tamiz de 75 mm y se retienen en el tamiz N.º 10; la arena comprende partículas que pasan por el tamiz N.º 10 pero son retenidas en el tamiz N.º 200; mientras que los limos y arcillas corresponden a las partículas que superan el tamiz N.º 200. Este criterio es crucial porque el tamaño y la distribución de las partículas determinan

en gran medida las propiedades de permeabilidad, compactación y resistencia del suelo (Das, 2014).

El segundo criterio que utiliza el sistema AASHTO es el índice de plasticidad, el cual permite diferenciar entre suelos limosos y arcillosos. En este sentido, los suelos limosos presentan un índice de plasticidad igual o inferior a 10, lo que indica una menor capacidad de deformación plástica. Por otro lado, los suelos arcillosos tienen un índice de plasticidad mayor o igual a 11, reflejando una mayor plasticidad y, por ende, un comportamiento diferente frente a cargas y cambios de humedad. Esta diferenciación es fundamental para el diseño y ejecución de obras civiles, ya que influye directamente en la capacidad portante y en la previsión de asentamientos diferenciales en las estructuras (Das, 2015).

Además, la correcta clasificación de los suelos mediante el sistema AASHTO facilita la estandarización de criterios técnicos que son aplicados en proyectos de ingeniería civil, permitiendo prever el comportamiento del terreno sin necesidad de realizar ensayos extensivos para cada caso particular. De esta forma, se optimizan recursos y se mejora la precisión en el diseño de cimentaciones, carreteras y otras infraestructuras, especialmente en áreas con gran variabilidad geotécnica (Das, 2015).

1.1.1.2 Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS). Se ha consolidado como uno de los sistemas más empleados a nivel internacional debido a su eficacia, practicidad y aplicabilidad en distintos tipos de proyectos de ingeniería civil. Este sistema es ampliamente utilizado tanto en estudios preliminares de suelos como en fases de diseño estructural y control de calidad de obras. Según Morales Chilet (2019), el SUCS no solo permite una categorización clara entre suelos de grano fino y grueso con base en criterios estandarizados como la granulometría y la plasticidad, sino que también proporciona una herramienta confiable para determinar la capacidad portante del terreno y anticipar riesgos como asentamientos diferenciales o fallas estructurales. Su uso es especialmente relevante en zonas urbanas en expansión, donde la variabilidad del suelo representa un factor de alto impacto en la planificación y seguridad de las edificaciones.

El Sistema Unificado de Clasificación clasifica los suelos en dos grandes categorías: Suelos de grano grueso que son de grava y arena en estado natural como se detalla en la tabla 2.

Tabla 2
Sistema unificado de clasificación de suelos

Criterio para la asignación de símbolos de grupo				Símbolos de grupo
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200	Gravas Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4	Gravas limpias Menos de 5% finos ^a	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$ $C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3^c$	GW GP
	Arenas 50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Gravas con finos Más de 12% finos ^{a,d}	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) $PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	GM GC
		Arenas limpias Menos de 5% finos ^b	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$ $C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3^c$	SW SP
	Arenas con finos Más de 12% finos ^{b,d}	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) $PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)		SM SC
		Suelos de grano fino 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200	Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánico $PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2) ^e $PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) ^e
	Limos y arcillas Límite líquido 50 o más		Orgánico	$\frac{\text{Límite líquido: secado}}{\text{Límite líquido: no secado}} < 0.75$; vea la figura 4.2; zona OL
Inorgánico			Gráficos PI en o por encima de línea "A" (figura 4.2) Gráficos PI por debajo de "A" línea (figura 4.2)	CH MH
		Orgánico	$\frac{\text{Límite líquido: secado}}{\text{Límite líquido: no secado}} < 0.75$; vea la figura 4.2; zona OH	OH
Suelos altamente orgánicos Materia orgánica principalmente, color oscuro y orgánico				Pt

^aGravas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC.

^bArenas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.

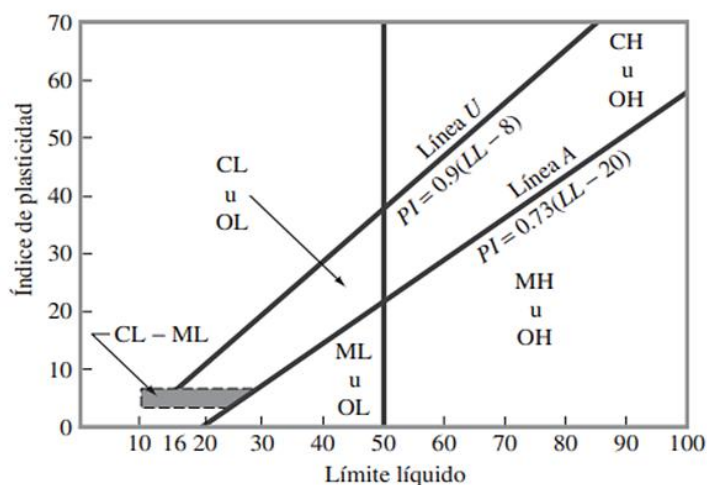
$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}; \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

^dSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo GC-GM o SC-SM.

^eSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo CL-ML.

Nota. Clasificación de suelos según el porcentaje que pasa el tamiz N.º 200: suelos gruesos (< 50 %) identificados con G (gravas) y S (arenas), y suelos finos (≥ 50 %) identificados con M (limos inorgánicos), C (arcillas inorgánicas), O (suelos orgánicos) y Pt (turba y suelos altamente orgánicos). Adaptado de Das (2015).

Figura 1
Capacidad de plasticidad



Nota. Tomado de Das, (2015).

Para realizar una clasificación adecuada del suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), es indispensable contar con ciertos datos técnicos fundamentales. Uno de los primeros aspectos que se deben conocer es el porcentaje de grava presente en la muestra, el cual se refiere a la fracción que pasa por el tamiz de 76.2 mm y queda retenida en el tamiz número 4, cuya apertura es de 4.75 mm (Das, 2015).

De igual forma, es necesario determinar el porcentaje de arena, que corresponde a la fracción que logra pasar por el tamiz número 4 y es retenida en el tamiz número 200, el cual tiene una apertura de 0.075 mm. Esta fracción intermedia es clave para identificar suelos granulares y establecer su comportamiento mecánico en obra (Das, 2015).

También se requiere conocer el porcentaje de limo y arcilla, el cual corresponde a las partículas más finas del suelo que pasan completamente por el tamiz número 200. Estas partículas suelen tener mayor influencia en el comportamiento plástico y compresible del suelo, por lo que su proporción es determinante para la clasificación (Das, 2015).

Además de la distribución granulométrica, se deben calcular dos parámetros esenciales: el coeficiente de uniformidad (C_u) y el coeficiente de curvatura o gradación (C_c). Estos permiten analizar la forma en que se distribuyen los tamaños de partícula dentro de la muestra, lo que influye directamente en la compactación, permeabilidad y resistencia del suelo (Das, 2015).

Otro aspecto crítico es la determinación del límite líquido y del índice de plasticidad de la porción del suelo que pasa por el tamiz número 40 (figura 1). Estos dos parámetros permiten establecer si el suelo fino posee un comportamiento predominantemente limoso o arcilloso, lo cual es vital para anticipar su respuesta frente a cargas y cambios de humedad (Das, 2015).

Con base en estos datos, se procede a asignar los símbolos de grupo del SUCS, que identifican la clasificación específica del suelo. Para suelos de grano grueso de tipo grava, los símbolos incluyen GW, GP, GM, GC, así como combinaciones como GC-GM, GW-GM, GW-GC, GP-GM y GP-GC (Figura 2). Por otro lado, en el caso de los suelos de grano fino, se utilizan símbolos como CL, ML, OL, CH, MH, OH, CL-ML y Pt, este último reservado para suelos altamente orgánicos como la turba y lodos como se muestra en la figura 3 (Das, 2015).

Finalmente, el sistema establece criterios claros para definir las fracciones del suelo. La fracción fina es aquella que pasa por el tamiz número 200, mientras que la fracción gruesa corresponde al material que se retiene en dicho tamiz. Asimismo, la fracción grava está compuesta por las partículas retenidas en el tamiz número 4, y la fracción arena se calcula como la diferencia entre el porcentaje retenido en el tamiz número 200 y el retenido en el tamiz número 4. Estas definiciones son indispensables para el uso correcto de las figuras del SUCS, como las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 del manual técnico, que permiten identificar el grupo del suelo de acuerdo con sus propiedades físicas y de plasticidad (Das, 2015).

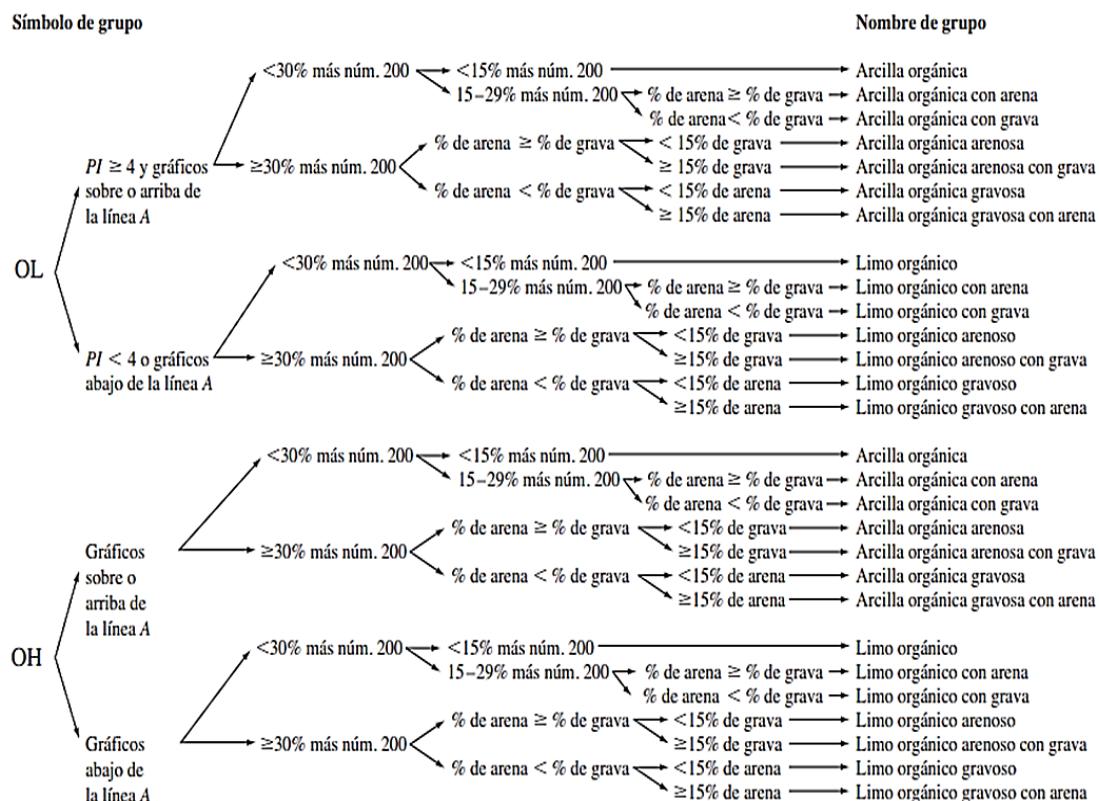
Figura 2

Clasificación unificada de suelos según el Sistema SUCS

Símbolo de grupo		Nombre de grupo
GW	<15% de arena	Grava bien graduada
	$\geq 15\%$ de arena	Grava bien graduada con arena
GP	<15% de arena	Grava mal graduada
	$\geq 15\%$ de arena	Grava mal graduada con arena
GW-GM	<15% de arena	Grava bien graduada con limo
	$\geq 15\%$ de arena	Grava bien graduada con limo y arena
GW-GC	<15% de arena	Grava bien graduada con arcilla (o arcilla limosa)
	$\geq 15\%$ de arena	Grava bien graduada con arcilla y arena (o arcilla limosa y arena)
GP-GM	<15% de arena	Grava mal graduada con limo
	$\geq 15\%$ de arena	Grava mal graduada con limo y arena
GP-GC	<15% de arena	Grava mal graduada con arcilla (o arcilla limosa)
	$\geq 15\%$ de arena	Grava mal graduada con arcilla y arena (o arcilla limosa y arena)
GM	<15% de arena	Grava limosa
	$\geq 15\%$ de arena	Grava limosa con arena
GC	<15% de arena	Grava arcillosa
	$\geq 15\%$ de arena	Grava arcillosa con arena
GC-GM	<15% de arena	Grava limo arcillosa
	$\geq 15\%$ de arena	Grava limo arcillosa con arena
SW	<15% de grava	Arena bien graduada
	$\geq 15\%$ de grava	Arena bien graduada con grava
SP	<15% de grava	Arena mal graduada
	$\geq 15\%$ de grava	Arena mal graduada con grava
SW-SM	<15% de grava	Arena bien graduada con limo
	$\geq 15\%$ de grava	Arena bien graduada con limo y grava
SW-SC	<15% de grava	Arena bien graduada con arcilla (o arcilla limosa)
	$\geq 15\%$ de grava	Arena bien graduada con arcilla y grava (o arcilla limosa y grava)
SP-SM	<15% de grava	Arena mal graduada con limo
	$\geq 15\%$ de grava	Arena mal graduada con limo y grava
SP-SC	<15% de grava	Arena mal graduada con arcilla (o arcilla limosa)
	$\geq 15\%$ de grava	Arena mal graduada con arcilla y grava (o arcilla limosa y grava)
SM	<15% de grava	Arena limosa
	$\geq 15\%$ de grava	Arena limosa con grava
SC	<15% de grava	Arena arcillosa
	$\geq 15\%$ de grava	Arena arcillosa con grava
SC-SM	<15% de grava	Arena limo arcillosa
	$\geq 15\%$ de grava	Arena limo arcillosa con grava

Nota. Tomado de Das, (2015). (Reproducido con permiso del Libro Anual de Normas ASTM, 2010, copyright ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA, 19428).

Figura 4
Diagrama de flujo de clasificación de limos y arcillas



Nota. Tomado de Das, (2014). (Reproducido con permiso del Libro Anual de Normas ASTM, 2010, copyright ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA, 19428).

1.1.2 Propiedades geotécnicas relevantes

Las propiedades geotécnicas para el estudio de mecánica de suelos adquieren un carácter determinante para el análisis, diseño y construcción de las cimentaciones, puesto que influyen directamente en estabilidad del suelo y en el comportamiento estructural de un terreno que actúa bajo cargas. Estas propiedades permiten evaluar la respuesta del suelo frente a esfuerzos, deformaciones, variaciones de humedad y otros factores ambientales o de carga (Das, 2015). El estudio de estas características se realiza mediante ensayos de laboratorio y de campo, los cuales proporcionan los parámetros necesarios para la modelación y diseño geotécnico (Coduto, Yeung & Kitch, 2016).

1.1.2.1 Contenido de humedad. El contenido de humedad representa la proporción de agua presente en un suelo en relación con el peso de sus sólidos secos. Esta propiedad influye directamente en el comportamiento geotécnico del terreno, modificando parámetros fundamentales como la resistencia al corte, la capacidad portante y la compresibilidad del suelo. En suelos cohesivos, una mayor humedad incrementa los asentamientos y reduce la

estabilidad estructural, afectando el diseño de cimentaciones. Cuando el contenido de agua se acerca o supera la saturación, las partículas del suelo pierden fricción entre sí, generando condiciones críticas para la estabilidad de las estructuras apoyadas (Alarcón Pejerrey & Terán Cotrina, 2019).

El contenido de humedad varía según el tipo de suelo, la historia de carga, el grado de compactación y el estado de remoldeado. Estas condiciones alteran la distribución del agua dentro de la estructura del suelo, modificando sus propiedades mecánicas. Investigaciones en suelos limosos-arcillosos demuestran que el contenido óptimo de humedad maximiza la densidad seca y la resistencia al corte; por encima de este valor, la resistencia disminuye, reduciendo la capacidad portante (Panata Tasgacho & Sarzosa Bedoya, 2024).

La relación entre humedad y resistencia al corte es particularmente importante en suelos no saturados. Al compactar un suelo con contenido de humedad óptimo, se incrementa la cohesión aparente y se estabiliza la estructura frente a la humedad residual. Esto se debe a una mejor distribución de las partículas sólidas y a tensiones capilares favorables, traduciéndose en mayor capacidad de carga bajo condiciones reales de campo (Ahmad et al., 2023).

En materiales residuales como las arenas arcillosas, la cohesión y el ángulo de fricción varían con la humedad. La cohesión puede aumentar hasta un punto crítico debido a las fuerzas de succión, pero disminuye después; simultáneamente, el ángulo de fricción tiende a reducirse con la humedad creciente, comprometiendo la estabilidad, especialmente en zonas con alta variabilidad hídrica (Fang et al., 2024).

El contenido de humedad también afecta los límites de Atterberg, la plasticidad y la capacidad del suelo para mantener cohesión. El aumento de humedad eleva el límite líquido y el rango de plasticidad, influyendo en la compresibilidad y asentamientos diferidos. Valores elevados de humedad pueden activar procesos de consolidación secundaria o creep en arcillas blandas, generando desplazamientos progresivos en estructuras (Ahmad et al., 2023).

Para medir con precisión el contenido de humedad, se utiliza el método de secado en horno, que determina la pérdida de masa por evaporación en muestras sometidas a temperaturas controladas. Este procedimiento está estandarizado en normas internacionales como ASTM D2216 y sus equivalentes nacionales, garantizando resultados confiables y replicables (Alarcón Pejerrey & Terán Cotrina, 2019).

1.1.2.2 Densidad aparente. La densidad aparente, también conocida como peso unitario del suelo, se define como la relación entre el peso total del suelo —incluyendo sólidos, agua y aire— y su volumen total. Este parámetro permite conocer el grado de compactación natural del suelo, lo cual es determinante en la evaluación de su comportamiento frente a cargas estructurales. La variación en la densidad aparente influye directamente en

propiedades como la compresibilidad, la porosidad y la capacidad de soporte del terreno, siendo clave para la planificación de proyectos de infraestructura (Gómez Chirinos, 2015).

En el campo de la ingeniería geotécnica, la densidad aparente constituye un factor esencial para el análisis de esfuerzos verticales efectivos, estabilidad de taludes y diseño de cimentaciones. Las técnicas más empleadas para su determinación son el método del cilindro de núcleo, el densímetro nuclear y el cono de arena, los cuales están normalizados por procedimientos como la ASTM D2937 y ASTM D1556. Estos métodos permiten obtener valores confiables de la densidad in situ o en laboratorio, asegurando que los datos representen las condiciones reales del terreno (Gómez Chirinos, 2015).

El comportamiento mecánico del suelo varía en función de su densidad aparente y su grado de saturación. Investigaciones desarrolladas en suelos cohesivos de la región Lambayeque han demostrado que un incremento en la saturación reduce notablemente la cohesión y el ángulo de fricción del suelo, debilitando su resistencia estructural. Dicho fenómeno se atribuye al aumento del contenido de agua en los poros, lo cual reduce la fricción interna entre partículas y genera condiciones más críticas en obras de ingeniería civil (Alarcón Pejerrey & Terán Cotrina, 2019).

Estudios sobre calidad física de suelos en zonas agrícolas han evidenciado que la densidad aparente guarda estrecha relación con la porosidad, la humedad y la permeabilidad del terreno. Una densidad elevada puede disminuir la infiltración del agua y afectar negativamente la aireación del suelo, mientras que densidades bajas pueden reflejar suelos menos compactados con menor capacidad de carga. Estos parámetros son útiles no solo en agricultura, sino también en proyectos de pavimentación, canalización e infraestructura básica (Gómez Chirinos, 2015).

Análisis recientes en suelos arenosos remoldeados a distintos contenidos de humedad han demostrado que una mayor densidad seca incrementa la resistencia al corte. Este comportamiento se explica por la mejor disposición de las partículas y la reducción de vacíos, lo cual favorece una estructura más estable y compacta. La densidad aparente, por tanto, no solo condiciona propiedades físicas del suelo, sino también su desempeño mecánico frente a cargas y deformaciones en condiciones reales de campo (Tesis UPS, 2024).

1.1.2.3 Plasticidad. La plasticidad es una propiedad fundamental de los suelos finos que permite su deformación continua bajo esfuerzos sin que se produzca ruptura. Esta característica se cuantifica a través de los límites de Atterberg: límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad. Su determinación resulta esencial en el análisis del comportamiento del suelo frente a variaciones en su contenido de humedad, pues permite establecer criterios para la clasificación, diseño y evaluación de obras civiles. Dichos límites están relacionados con los

cambios de estado que experimenta un suelo, desde una condición semisólida hasta una líquida, en función de su contenido de agua (Saldaña Vásquez, 2022).

La presencia de minerales arcillosos en el suelo, así como su proporción y tipo, influyen directamente en su plasticidad. Esta propiedad tiene incidencia sobre la compresibilidad, la estabilidad volumétrica y la resistencia mecánica de los suelos, aspectos claves en el diseño de cimentaciones y estructuras de pavimento. Suelos altamente plásticos tienden a presentar mayor potencial de expansión y contracción, lo cual incrementa los riesgos de asentamientos diferenciales y deformaciones indeseadas si no se toman medidas adecuadas en la etapa de diseño. El control de la plasticidad mediante técnicas de estabilización es una práctica frecuente para mejorar el desempeño de estos suelos en condiciones de carga (García Calle, 2023).

El comportamiento plástico del suelo también guarda relación con su capacidad de permeabilidad y compresibilidad. A mayor plasticidad, se suele observar una menor permeabilidad, debido al empaquetamiento más denso de las partículas finas, lo que limita el flujo de agua a través de la masa del suelo. Este efecto contribuye a una mayor acumulación de presiones de poro durante cargas sostenidas, lo cual puede generar procesos de consolidación lenta o diferida. Asimismo, los suelos con elevados límites de Atterberg tienden a presentar mayores valores de compresibilidad y menor resistencia al corte, especialmente cuando superan su contenido de humedad óptimo (Llanos Flores, 2022).

1.1.2.4 Permeabilidad. La permeabilidad del suelo define la facilidad con la que el agua puede fluir a través de su masa. Esta propiedad está estrechamente relacionada con la estructura interna del suelo y su grado de saturación, dado que el tamaño y la continuidad de los poros constituyen la vía que permite el paso del agua (Huarcaya Quiquia & Gonzales, 2024).

La permeabilidad es considerada un criterio esencial en ingeniería geotécnica, pues interviene en el diseño de drenajes, en la estabilidad de taludes, en el proceso de consolidación y en el control de filtraciones. La capacidad del suelo para evacuar agua influye directamente en los niveles de presión de poro que pueden desarrollarse durante la carga (Coduto, Yeung & Kitch, 2016).

Esta propiedad tiende a ser anisotrópica, es decir, depende de la estructura del suelo, su densidad, el contenido de humedad, si el suelo es remoldeado o natural, y la dirección del flujo (ya sea vertical u horizontal). Tales diferencias pueden generar variaciones considerables en el coeficiente de permeabilidad medido en diferentes direcciones (Huarcaya Quiquia & Gonzales, 2024).

La determinación de la permeabilidad se realiza habitualmente mediante ensayos de permeámetro de carga constante o variable, siguiendo estándares como la norma ASTM D2434. En general, los suelos granulares presentan valores altos de permeabilidad, mientras

que los suelos arcillosos muestran valores significativamente menores, lo cual obstaculiza la disipación de presiones de poro (Romero Villajuan, 2022).

En suelos kaolín-arena en condiciones no saturadas se ha observado que la succión del suelo y el contenido de agua ejercen una influencia directa sobre la conductividad hidráulica. Cuanto mayor sea la succión (es decir, cuanto menor es la humedad), más baja tiende a ser la permeabilidad, derivado del estrechamiento de los canales de flujo internos. (Huarcaya Quiquia & Gonzales, 2024)

En loess blando y plástico, bajo condiciones hidromecánicas acopladas, la permeabilidad y el comportamiento mecánico del suelo se encuentran estrechamente relacionados con la densidad seca y el contenido de humedad. A mayor densidad seca el suelo tiende a presentar una disminución significativa de la permeabilidad, debido a la reducción de vacíos y rutas de flujo (Huarcaya Quiquia & Gonzales, 2024).

En suelos tipo sandy loam y clay loam utilizados en cultivos, se ha observado que aquellos con un mayor contenido de partículas finas retienen más agua, lo que resulta en una reducción del coeficiente de permeabilidad. Esta tendencia sugiere que la textura del suelo y la proporción de arcillas tienen un papel determinante en la conductividad hidráulica (Flores Pacheco & Perales Angoma, 2013).

1.1.2.5 Compresibilidad. La compresibilidad se define como la capacidad de un suelo para reducir su volumen al aplicársele una carga. Esta propiedad está directamente relacionada con los asentamientos que presentan las estructuras sobre el terreno. En suelos cohesivos, la compresibilidad es mayor debido a la lenta evacuación del agua de los poros, lo que genera asentamientos diferidos o consolidación (López et al., 2021).

El comportamiento de la compresibilidad se analiza mediante ensayos de consolidación unidimensional siguiendo la norma ASTM D2435. Estos análisis permiten obtener parámetros fundamentales como el coeficiente de consolidación (C_v) y el índice de compresibilidad (C_c), esenciales para predecir el asentamiento del suelo bajo cargas estructurales (González & Herrera, 2020).

Estudios recientes sobre suelos arcillosos modificados muestran que tanto la compresibilidad como la permeabilidad cambian durante el proceso de consolidación, indicando que el coeficiente de compresibilidad no es constante y puede variar con la deformación del suelo (Ramírez et al., 2023).

En suelos loess blandos y plásticos, se ha observado que un aumento en la densidad seca resulta en una disminución significativa de la compresibilidad, debido a la reducción en los espacios vacíos, lo que hace que el suelo sea menos susceptible a cambios volumétricos (Pérez et al., 2022).

1.1.2.6 Resistencia al corte. La resistencia al corte se define como la capacidad de un suelo para resistir esfuerzos que tienden a provocar deslizamiento o ruptura interna. Esta

resistencia está determinada principalmente por la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (ϕ), conforme al criterio de Mohr–Coulomb. Además, la resistencia al corte depende del grado de endurecimiento previo, la estructura del suelo (natural o remoldeado), la plasticidad, el contenido de humedad, la succión y la densidad seca, factores que influyen en su comportamiento mecánico (Das, 2015).

Para el análisis geotécnico de cimentaciones, muros de contención y estabilidad de taludes, la resistencia al corte es uno de los parámetros más importantes. Su evaluación se realiza a través de ensayos como corte directo, triaxial o compresión inconfiada, que permiten determinar la capacidad del suelo para soportar cargas sin fallar (Holtz et al., 2011).

Diversos estudios han demostrado que en mezclas de suelo y roca con alto contenido pétreo, la fricción interna aumenta debido a la interacción entre partículas gruesas. Sin embargo, cuando el contenido de humedad es elevado, la fricción efectiva disminuye, lo que conlleva a una reducción significativa en la resistencia al corte del material (Quispe & Gómez, 2023).

En suelos reforzados con geosintéticos, se ha evidenciado que superar el contenido de humedad óptimo reduce la resistencia al corte en la interfase suelo/geogrid, ya que disminuye la interlock y la adherencia entre partículas, afectando la estabilidad del sistema reforzado (Sánchez & Ruiz, 2022).

Asimismo, estudios en suelos negros, caracterizados por alta plasticidad y sensibilidad a la humedad, han confirmado que las variaciones en el contenido de agua modifican considerablemente tanto la cohesión como el ángulo de fricción, impactando directamente la capacidad portante y la estabilidad del suelo en proyectos de ingeniería civil (Pérez et al., 2021).

1.1.2.7 Capacidad portante. La capacidad portante se define como la máxima presión que un suelo puede soportar sin sufrir fallas por corte o asentamientos excesivos. Este parámetro es fundamental para el diseño de cimentaciones superficiales y profundas, ya que determina la seguridad y estabilidad de las estructuras que se apoyan sobre el terreno. La capacidad portante depende de las propiedades del suelo, el tipo y profundidad de la cimentación, así como las condiciones de carga. Las teorías clásicas, como las desarrolladas por Terzaghi, Meyerhof y Hansen, proporcionan bases para su cálculo, incorporando factores de forma, profundidad y pendiente que influyen en la estimación del valor último de capacidad portante (Coduto et al., 2016).

Estudios recientes han aplicado modelación numérica para evaluar la capacidad portante en suelos estratificados y estabilizados, evidenciando que las variaciones en rigidez, densidad y contenido de humedad de las capas de suelo afectan significativamente el comportamiento y los valores estimados de capacidad portante. Esto demuestra la

importancia de considerar las propiedades reales del suelo en el diseño de cimentaciones para obtener resultados más precisos y confiables (Scienco, 2023).

Además, se ha comprobado que la variabilidad en los resultados de ensayos de laboratorio y campo, tales como resistencia al corte y densidad, afecta la estimación de la capacidad portante. Por lo tanto, es necesario incluir factores de seguridad adecuados en el diseño para mitigar la incertidumbre asociada con los parámetros del suelo, garantizando la estabilidad y seguridad de las estructuras (Bolaños & Hurtado, 2022).

En contextos específicos, como el sitio arqueológico de Machu Picchu en Cusco, Perú, se ha estudiado la capacidad portante de los suelos locales para apoyar las estructuras antiguas. El conocimiento detallado de las propiedades físicas y mecánicas del terreno resulta esencial para el diseño y la preservación de las cimentaciones, permitiendo una intervención adecuada que respete y conserve el patrimonio cultural (SpringerOpen, 2025).

1.1.3 Ensayos de laboratorio e in situ

La caracterización geotécnica debe sustentarse en información obtenida mediante ensayos de laboratorio sobre muestras controladas y ensayos in situ realizados directamente en el terreno. La combinación de ambos tipos de pruebas permite reducir incertidumbres, corregir sesgos de muestreo y obtener parámetros representativos para el diseño de cimentaciones, estabilización de taludes y obras subterráneas (Juárez et al., 2023; Robertson & Cabal, 2022).

1.1.3.1 Ensayos de laboratorio

1.1.3.1.1 Ensayo de límites de Atterberg. Es una prueba básica y ampliamente utilizada en geotecnia para caracterizar el comportamiento de los suelos finos, principalmente limos y arcillas, frente a las variaciones del contenido de humedad. Estos límites permiten identificar los cambios de consistencia del suelo y describir cómo responde el material cuando pasa de un estado sólido a uno plástico y finalmente a un estado líquido, lo que resulta fundamental para su clasificación y análisis ingenieril (Gutiérrez Rodríguez, 2023).

El límite líquido (LL) se define como el contenido de humedad a partir del cual el suelo comienza a comportarse como un fluido viscoso, perdiendo su resistencia al esfuerzo cortante. Este parámetro refleja la capacidad del suelo para retener agua y está estrechamente relacionado con la mineralogía de las arcillas y la superficie específica de las partículas finas. Su determinación es clave para evaluar la sensibilidad del suelo frente a cambios de humedad y cargas externas (Cedeño Vera et al., 2025).

El límite plástico (LP) corresponde al contenido de humedad por debajo del cual el suelo deja de presentar deformaciones plásticas y pasa a un estado semisólido. Físicamente, este límite marca el punto en el que las partículas del suelo ya no pueden deslizarse entre sí sin romper la estructura del material. Su valor es relevante para identificar el rango de humedad en el cual el suelo puede ser moldeado sin agrietarse (Gutiérrez Rodríguez, 2023).

El índice de plasticidad (IP) se obtiene como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, y representa el intervalo de humedad en el que el suelo presenta comportamiento plástico. Este índice es un parámetro ampliamente utilizado para estimar la expansividad, la susceptibilidad al agrietamiento y el potencial de deformación volumétrica de los suelos finos. Asimismo, constituye una variable clave dentro del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) para diferenciar limos y arcillas según su plasticidad (Cedeño Vera et al., 2025).

Aunque el ensayo de límites de Atterberg es de ejecución sencilla, bajo costo y altamente repetible, no permite cuantificar de forma directa parámetros mecánicos como la resistencia al corte o la capacidad portante del suelo. Sin embargo, estos límites son utilizados como parámetros de control en estudios de mejora de suelos y diseño de mezclas estabilizadas. Es importante considerar que la manipulación y el transporte de las muestras pueden alterar su contenido de humedad y afectar su representatividad, por lo que se recomienda un manejo cuidadoso durante el muestreo y el ensayo (Jagodnik & Marušić, 2023).

1.1.3.1.2 Ensayo Proctor / compactación. El ensayo Proctor es un procedimiento de laboratorio fundamental en la ingeniería geotécnica que permite establecer la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca alcanzada por un suelo bajo una energía de compactación determinada. Este ensayo se basa en el principio de que, para una energía de compactación constante, existe un contenido de humedad específico en el cual el suelo alcanza su máxima densidad seca, condición que resulta óptima para garantizar un adecuado comportamiento mecánico del material en obras de ingeniería (Das, 2015).

Existen dos versiones principales del ensayo Proctor que se diferencian por la energía aplicada durante la compactación. El Proctor estándar, normalizado por la ASTM D698, emplea una energía moderada y se utiliza comúnmente para el control de compactación en rellenos y obras convencionales. Por otro lado, el Proctor modificado, regulado por la ASTM D1557, aplica una energía de compactación mayor y se emplea en obras que requieren un mayor grado de densificación, como capas de subrasante, cimentaciones y pavimentos, donde se demanda una mayor capacidad portante y estabilidad del suelo (ASTM International, 2017; Das, 2015).

En ambos ensayos, el procedimiento consiste en compactar muestras del suelo con diferentes contenidos de humedad mediante golpes estandarizados, para posteriormente determinar la densidad seca obtenida en cada caso. A partir de estos datos se construye la curva humedad–densidad seca, de la cual se obtiene la humedad óptima, definida como el contenido de agua que permite alcanzar la máxima densidad seca, y la densidad seca máxima, que representa el mayor grado de compactación posible bajo la energía aplicada (ASTM International, 2017).

Estas relaciones son ampliamente utilizadas como herramientas de control de calidad en obras de movimiento de tierras, ya que permiten comparar la compactación lograda en campo con los valores obtenidos en laboratorio y así estimar el grado de compactación alcanzado. Asimismo, en estudios experimentales y de investigación, el ensayo Proctor se emplea para evaluar el efecto de la estabilización de suelos mediante aditivos, analizando cómo varían la humedad óptima y la densidad seca máxima en función del tratamiento aplicado (Das, 2015).

No obstante, aunque el ensayo Proctor proporciona criterios claros para la compactación y el control de obras, no reproduce completamente las condiciones del terreno natural. Diversos autores señalan que suelos con alto contenido de finos o con una estructura sensible pueden presentar diferencias significativas entre la compactación obtenida en laboratorio y la alcanzada en campo, debido a factores como la heterogeneidad del suelo, las condiciones de confinamiento y la variabilidad de la energía aplicada durante la ejecución de la obra (Das, 2015).

1.1.3.1.3 Ensayo de consolidación unidimensional. El ensayo de consolidación unidimensional, también denominado ensayo edométrico, constituye uno de los fundamentos teóricos más importantes en la mecánica de suelos para el análisis de la compresibilidad y el comportamiento deformacional de los suelos cohesivos. Este ensayo se basa en la teoría clásica de la consolidación, la cual describe el proceso mediante el cual un suelo saturado reduce progresivamente su volumen como consecuencia de la disipación de las presiones intersticiales generadas por la aplicación de una carga vertical, fenómeno que se manifiesta principalmente en forma de asentamientos a largo plazo (Terzaghi et al., 1996; Das, 2015).

El ensayo edométrico idealiza el comportamiento del suelo bajo condiciones de deformación unidimensional, asumiendo que la deformación lateral está restringida y que el flujo de agua se produce únicamente en dirección vertical. Esta simplificación permite analizar de manera controlada la respuesta del suelo frente a incrementos de carga, facilitando la comprensión de los mecanismos que gobiernan la consolidación primaria y secundaria en suelos finos, especialmente arcillas y limos cohesivos (Das, 2015).

A partir del análisis de la relación esfuerzo-deformación obtenida en el ensayo, se definen parámetros teóricos esenciales como el índice de compresibilidad (C_c), que representa la magnitud de la deformación volumétrica del suelo ante cambios de esfuerzo efectivo; el coeficiente de consolidación (C_v), que expresa la velocidad con la que se produce la disipación de las presiones de poros; y la presión de preconsolidación, que permite identificar el historial tensional del suelo. Estos parámetros son ampliamente utilizados en modelos teóricos para la estimación de asentamientos diferidos en estructuras apoyadas sobre suelos cohesivos sometidos a cargas permanentes (Terzaghi et al., 1996; Das, 2015).

En el desarrollo reciente de la teoría de la consolidación, diversos autores han propuesto modelos que superan las simplificaciones del enfoque clásico, incorporando el acoplamiento hidro-mecánico entre la deformación del esqueleto del suelo y la variación de sus propiedades hidráulicas. Estos modelos consideran cambios en la permeabilidad durante el proceso de consolidación, permitiendo una representación más realista del comportamiento del suelo bajo condiciones de carga prolongada, especialmente en materiales con estructura sensible o comportamiento no lineal (Rahimi & Rahardjo, 2023).

1.1.3.1.4 Ensayo de corte directo. El ensayo de corte directo es un método experimental utilizado para evaluar la resistencia al corte del suelo bajo condiciones de drenaje controlado. Este ensayo consiste en someter una muestra de suelo, generalmente de forma prismática o reconstituida, a una carga normal constante, mientras se aplica un desplazamiento horizontal progresivo hasta provocar la falla por deslizamiento. Su fundamento teórico se basa en la relación entre los esfuerzos normales y cortantes que actúan sobre un plano de falla previamente definido (Das, 2015).

Durante el desarrollo del ensayo se registra la relación entre el esfuerzo cortante aplicado y el desplazamiento lateral, lo que permite identificar el punto de falla del material. A partir de esta información se obtienen los parámetros de resistencia al corte del suelo, específicamente la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (ϕ), los cuales constituyen elementos esenciales para el análisis de estabilidad de taludes, capacidad portante y diseño de estructuras geotécnicas. La simplicidad del procedimiento y la claridad de interpretación hacen que este ensayo sea ampliamente utilizado, especialmente en suelos remoldeados o con baja estructura interna (Braja, 2015).

Desde el punto de vista práctico, el ensayo de corte directo se caracteriza por ser una técnica simple, directa y de bajo costo, lo que favorece su aplicación frecuente en estudios preliminares y en laboratorios geotécnicos. Sin embargo, su formulación teórica presenta ciertas limitaciones, ya que el plano de falla está predeterminado por el equipo, lo cual no siempre coincide con el plano de falla natural del suelo. Además, el ensayo no permite reproducir adecuadamente estados de esfuerzo tridimensionales, condición que sí ocurre en el terreno real (Terzaghi et al., 1996).

Otra limitación relevante del ensayo de corte directo es que no permite la medición de las presiones de poros internas, lo que restringe su aplicación en análisis avanzados de comportamiento esfuerzo-deformación, especialmente en suelos saturados. Como consecuencia, en suelos con estructura natural, anisotropía o cementación, el ensayo tiende a subestimar la resistencia al corte real, motivo por el cual sus resultados deben interpretarse con cautela y, en muchos casos, complementarse con otros ensayos más representativos del comportamiento del suelo en campo (ASTM D3080/D3080M-11; Das, 2015).

1.1.3.2 Ensayos in situ

1.1.3.2.1 Penetrómetro de cono (CPT/CPTu). El ensayo de penetración de cono (CPT) y su versión instrumentada con medición de presión de poros (CPTu) constituyen pruebas in situ de carácter continuo que permiten evaluar el comportamiento del suelo directamente en el terreno. El procedimiento consiste en la penetración vertical de un cono metálico equipado con sensores en la punta y la camisa, introducido a velocidad constante, lo que posibilita el registro continuo de parámetros mecánicos a lo largo de la profundidad investigada (Robertson & Cabal, 2022; Mayne, 2023).

Durante la ejecución del ensayo se obtienen mediciones fundamentales como la resistencia de punta (q_c), que refleja la respuesta del suelo frente a la penetración; la resistencia lateral o por fricción (f_s), asociada al rozamiento entre el suelo y la camisa del cono; y, en el caso del CPTu, la presión de poros (u_2) generada durante la penetración. Estos parámetros permiten caracterizar el comportamiento del suelo de manera continua, aportando información detallada sobre la variabilidad estratigráfica y las condiciones de confinamiento existentes en el subsuelo (Robertson & Cabal, 2022).

A partir de los registros obtenidos, es posible desarrollar perfiles estratigráficos del suelo y estimar propiedades geotécnicas relevantes como la resistencia al corte, el ángulo de fricción interna, la densidad relativa y el estado de consolidación, mediante correlaciones empíricas y el uso de índices de clasificación del tipo de suelo, conocidos como Soil Behavior Type (SBT). En los últimos años, estas interpretaciones han sido fortalecidas mediante metodologías que incorporan correcciones por condiciones parcialmente drenadas, amortiguamiento de la señal y calibraciones locales, lo que mejora la confiabilidad de los parámetros estimados (Robertson & Cabal, 2022; Mayne, 2023).

Desde el punto de vista técnico, el ensayo CPT y CPTu se caracteriza por ofrecer una alta resolución vertical y una excelente capacidad para identificar la continuidad de las capas del subsuelo, lo que representa una ventaja significativa frente a ensayos discretos de laboratorio. No obstante, su aplicación presenta ciertas limitaciones, como la necesidad de calibraciones locales para una correcta interpretación de los resultados, el alto costo del equipo especializado y la menor representatividad de algunos comportamientos mecánicos complejos del suelo, especialmente en materiales heterogéneos o altamente estructurados (Robertson & Cabal, 2022; Mayne, 2023).

1.2 Cimentaciones

Las cimentaciones constituyen el elemento estructural fundamental encargado de recibir y transmitir las cargas provenientes de la superestructura hacia el terreno de apoyo, asegurando que estas se distribuyan de manera adecuada para mantener la estabilidad global de la edificación. Su función principal es garantizar que las tensiones inducidas en el suelo no superen su capacidad resistente, evitando fallas por corte, asentamientos excesivos o

deformaciones que comprometan la seguridad y el correcto funcionamiento de la estructura (Juárez et al., 2023).

El diseño de una cimentación está directamente condicionado por las propiedades geotécnicas del suelo, el tipo y magnitud de las cargas actuantes, la geometría de la estructura y las condiciones ambientales del entorno. Una cimentación correctamente diseñada permite controlar los asentamientos totales y diferenciales, asegurando un comportamiento compatible entre la estructura y el suelo de soporte. En este sentido, la evaluación adecuada del terreno y la selección del sistema de cimentación más conveniente resultan determinantes para la durabilidad y seguridad de las obras de ingeniería civil (Juárez et al., 2023).

1.2.1 Tipo de cimentación

1.2.1.1 Cimentaciones superficiales. Las cimentaciones superficiales se definen como aquellas cuyo nivel de apoyo se encuentra a una profundidad relativamente pequeña con respecto a sus dimensiones en planta, estableciéndose de manera general que la relación entre la profundidad de desplante y el ancho de la zapata cumple la condición $D/B \leq 3$. Este tipo de cimentación transmite las cargas de la estructura directamente a las capas superficiales del suelo, por lo que su comportamiento depende de manera directa de la capacidad portante y la deformabilidad de los estratos cercanos a la superficie (Juárez et al., 2023).

Dentro de las cimentaciones superficiales existen diversas configuraciones estructurales, cuya selección responde a la geometría de la edificación y a la disposición de las cargas. Las zapatas aisladas se emplean comúnmente para soportar columnas o pilares individuales, mientras que las zapatas combinadas se utilizan cuando dos o más columnas se encuentran próximas entre sí, de modo que una zapata individual no resulta eficiente. Por su parte, las zapatas corridas se disponen bajo muros de carga, permitiendo una distribución lineal de los esfuerzos hacia el terreno, y las losas de cimentación o plateas se adoptan cuando el suelo presenta baja capacidad portante o cuando las cargas se distribuyen de manera más uniforme en toda el área de apoyo (Juárez et al., 2023).

Desde el punto de vista constructivo y económico, las cimentaciones superficiales se caracterizan por su simplicidad de ejecución, menor requerimiento de equipos especializados y facilidad para el control visual durante su construcción, lo que las convierte en una solución ampliamente utilizada en edificaciones de baja y mediana altura. No obstante, su aplicación está condicionada a la presencia de suelos competentes, capaces de resistir las cargas transmitidas sin provocar asentamientos excesivos o diferenciales que comprometan la estabilidad estructural. Por ello, su uso resulta adecuado únicamente cuando las características geotécnicas del suelo permiten controlar de manera aceptable el comportamiento deformacional de la estructura (Juárez et al., 2023).

1.2.1.2 Cimentaciones profundas. Las cimentaciones profundas se emplean cuando los estratos superficiales del suelo presentan baja capacidad portante, alta compresibilidad o una deformabilidad excesiva, lo que impide transmitir de manera segura las cargas estructurales a poca profundidad. En estos casos, las cargas de la superestructura deben transferirse hacia estratos más competentes ubicados a mayor profundidad, con el objetivo de garantizar la estabilidad global de la edificación y controlar los asentamientos totales y diferenciales (Juárez et al., 2023).

Entre los sistemas más representativos de cimentaciones profundas se encuentran los pilotes, los cuales son elementos estructurales alargados que pueden disponerse de forma vertical o inclinada y construirse en materiales como concreto, acero o madera. De acuerdo con su método constructivo, los pilotes pueden ser prefabricados, hincados en el terreno mediante golpes o vibración, o ejecutadas in situ mediante perforación y posterior colado de concreto. La selección del tipo de pilote depende de las condiciones del suelo, el nivel freático, la magnitud de las cargas y las restricciones constructivas del proyecto (Juárez et al., 2023).

Desde el punto de vista del mecanismo de transmisión de cargas, los pilotes pueden clasificarse en pilotes de fricción, que transmiten la carga principalmente por el rozamiento lateral entre el fuste del pilote y el suelo circundante, y pilotes de punta, que transfieren la mayor parte de la carga directamente a un estrato resistente ubicado en la base. En muchos casos, el comportamiento real corresponde a un sistema combinado, donde ambos mecanismos actúan simultáneamente para resistir las cargas aplicadas, incrementando la capacidad portante del sistema de cimentación (Juárez et al., 2023).

Asimismo, dentro de las cimentaciones profundas se incluyen los cajones o pozos de cimentación, los cuales son estructuras huecas construidas generalmente in situ, utilizadas para soportar grandes cargas o cuando la cimentación debe ejecutarse por debajo del nivel freático. Estos sistemas permiten alcanzar profundidades considerables y ofrecen una elevada capacidad de carga, siendo comunes en puentes, edificios de gran altura y obras de infraestructura pesada (Juárez et al., 2023).

En términos generales, las cimentaciones profundas presentan como principales ventajas la reducción significativa de asentamientos, el aumento de la estabilidad estructural y la posibilidad de construir sobre suelos superficiales desfavorables. Sin embargo, su implementación implica costos elevados, mayores tiempos de ejecución y la necesidad de maquinaria especializada y control técnico riguroso, factores que deben ser cuidadosamente evaluados durante la etapa de diseño para asegurar la viabilidad técnica y económica del proyecto (Juárez et al., 2023).

1.2.2 Criterios de selección en función al estudio de suelos

La elección del tipo de cimentación constituye una decisión técnica fundamental en el diseño de una edificación y depende directamente de los resultados obtenidos en el estudio

geotécnico del suelo. Dicho estudio proporciona la información necesaria para evaluar la interacción suelo-estructura y permite seleccionar el sistema de cimentación más adecuado, garantizando condiciones de seguridad y estabilidad. Diversos autores coinciden en que una decisión incorrecta en esta etapa puede generar problemas estructurales severos, incluso cuando la superestructura ha sido correctamente diseñada (Juárez et al., 2023).

Uno de los factores más relevantes en esta selección es la capacidad portante admisible del suelo (q_{adm}), ya que define la tensión máxima que el terreno puede soportar sin presentar fallas por corte ni asentamientos excesivos. Asimismo, el nivel freático desempeña un papel determinante, dado que la presencia de agua subterránea puede reducir la resistencia efectiva del suelo y originar problemas adicionales como flotación, inestabilidad de excavaciones o fenómenos de licuación en suelos susceptibles. Estos aspectos deben ser evaluados cuidadosamente durante el análisis geotécnico para asegurar un comportamiento adecuado del sistema de cimentación (Juárez et al., 2023; Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018).

Otro criterio esencial corresponde a los asentamientos permisibles, los cuales varían en función del tipo de estructura y su nivel de sensibilidad a deformaciones. Edificaciones como hospitales, industrias o estructuras especiales requieren límites de asentamiento más estrictos en comparación con viviendas convencionales. De igual forma, las condiciones de carga y la geometría estructural, tales como cargas excéntricas, proximidad entre columnas y rigidez del sistema estructural, influyen directamente en el tipo de cimentación a emplear y en su configuración geométrica (Juárez et al., 2023; Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018).

Las condiciones topográficas y de accesibilidad del terreno también inciden en la selección del sistema de cimentación, ya que determinan la viabilidad del uso de determinada maquinaria y métodos constructivos. A ello se suma el análisis del costo y tiempo de ejecución, los cuales deben optimizarse sin comprometer los criterios de seguridad y funcionalidad de la estructura. En este contexto, la elección final debe equilibrar los aspectos técnicos y económicos del proyecto, priorizando siempre el desempeño estructural adecuado (Juárez et al., 2023).

Desde un enfoque integral, la cimentación óptima es aquella que satisface simultáneamente los criterios de seguridad estructural, funcionalidad y economía, siendo el estudio de suelos el soporte técnico principal para la toma de decisiones. En este sentido, se reconoce que una adecuada interpretación de los parámetros geotécnicos permite seleccionar soluciones de cimentación eficientes y confiables, minimizando riesgos durante la vida útil de la edificación (Bowles, 2022).

1.2.3 Normativa vigente

El diseño y la ejecución de las cimentaciones en el Perú se encuentran regulados principalmente por la Norma Técnica E.050 “Suelos y Cimentaciones”, la cual forma parte del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE). Esta norma constituye el marco técnico obligatorio para la evaluación del comportamiento del suelo y el diseño de sistemas de cimentación, estableciendo lineamientos que buscan garantizar la seguridad estructural, la estabilidad del terreno y el adecuado desempeño de las edificaciones durante su vida útil (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018).

La Norma E.050 define los procedimientos mínimos para la exploración y caracterización del subsuelo, incluyendo la profundidad de investigación, el número de sondeos y los ensayos de campo y laboratorio recomendados. Asimismo, establece criterios de aceptación de resultados, métodos de cálculo para la capacidad portante del suelo y la estimación de asentamientos, así como los factores de seguridad y correcciones necesarias en función de la forma, inclinación y profundidad de la cimentación. Estos lineamientos permiten uniformizar los criterios de diseño y reducir la incertidumbre asociada al comportamiento del suelo (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018).

Adicionalmente, la normativa contempla criterios específicos para el diseño de cimentaciones superficiales, profundas y técnicas de mejoramiento del terreno, considerando las distintas condiciones geotécnicas que pueden presentarse en el territorio nacional. De manera complementaria, se recurre a otras normas del RNE, como la Norma E.060 de Concreto Armado y la Norma E.070 de Albañilería, las cuales establecen los requisitos estructurales que deben cumplir los elementos de cimentación en función del material y sistema constructivo empleado (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018; Tomlinson & Woodward, 2021).

En el ámbito internacional, el diseño geotécnico y de cimentaciones se apoya en normativas y guías técnicas ampliamente reconocidas, tales como las especificaciones de la ASTM, la AASHTO, el Eurocódigo 7 (EN 1997-1) y el Código Internacional de Construcción (IBC). Estas referencias proporcionan metodologías avanzadas de cálculo, criterios de diseño y factores de corrección que pueden ser adoptados o adaptados según las condiciones locales del proyecto, contribuyendo a una práctica de ingeniería más robusta y alineada con estándares internacionales (Tomlinson & Woodward, 2021).

1.3 Costos unitarios

1.3.1 Conceptos de análisis de precios unitarios

El Análisis de Precios Unitarios (APU) es el procedimiento técnico mediante el cual se determina el costo de ejecución de una unidad de obra, considerando condiciones constructivas y administrativas previamente definidas. Este análisis es fundamental para la elaboración de presupuestos y la planificación económica de proyectos de construcción, ya

que permite estimar de manera sistemática los recursos necesarios para cada partida (Ministerio de Vivienda, 2018; Arce & López, 2021).

El APU se compone de los costos directos, que incluyen materiales, mano de obra y equipos, así como de los costos indirectos y la utilidad del contratista. Los materiales se cuantifican según su volumen, costo unitario y pérdidas estimadas, mientras que la mano de obra y los equipos se evalúan en función de sus rendimientos, tiempos de uso y costos asociados. A estos componentes se adicionan los gastos generales necesarios para la ejecución de la obra y el margen de utilidad, obteniéndose finalmente el precio unitario, que refleja el costo real y económicamente viable de la actividad constructiva (Ministerio de Vivienda, 2018; Arce & López, 2021).

1.3.2 Variables que influyen en el costo de cimentaciones

Los costos unitarios de las cimentaciones están determinados por una combinación de factores técnicos y económicos que influyen directamente en el proceso constructivo. Entre los más relevantes se encuentran el tipo y la profundidad de la cimentación, así como las condiciones del terreno, tales como la resistencia del suelo, el nivel freático y la naturaleza del material geotécnico. Asimismo, el volumen y la complejidad de las excavaciones, junto con los materiales empleados, como el concreto, el acero y los aditivos, condicionan de manera significativa el costo final de la partida (Tomlinson & Woodward, 2021; Arce & López, 2021).

De igual manera, el rendimiento de la mano de obra y de los equipos, las condiciones ambientales y logísticas del proyecto, así como los plazos de ejecución y la disponibilidad de recursos, influyen directamente en la productividad y, por ende, en los costos unitarios asociados a las cimentaciones. Una adecuada planificación de estos aspectos permite optimizar recursos y reducir sobrecostos durante la ejecución de la obra (Tomlinson & Woodward, 2021; Arce & López, 2021).

En términos globales, se reconoce que las cimentaciones pueden representar aproximadamente entre el 10 % y el 20 % del costo total de una edificación, por lo que incluso pequeñas modificaciones en el diseño o en el tipo de cimentación seleccionada pueden generar variaciones significativas en el presupuesto final. Por esta razón, la correcta evaluación técnica y económica del sistema de cimentación resulta determinante para asegurar la viabilidad financiera del proyecto sin comprometer la seguridad estructural (Juárez et al., 2023).

1.3.3 Relación tipo de cimentación y costo final de obra

Existe una relación directa entre el tipo de cimentación y el costo final del proyecto, ya que las cimentaciones superficiales suelen ser más económicas debido a su menor complejidad constructiva, mientras que las cimentaciones profundas implican mayores costos asociados a perforación, pilotaje y control técnico especializado (Bowles, 2022).

Sin embargo, la elección del sistema de cimentación no debe basarse únicamente en el costo inicial, sino en un análisis del costo total del ciclo de vida de la estructura, considerando aspectos como durabilidad, mantenimiento, seguridad y riesgo de fallas. Un diseño inadecuado puede generar asentamientos o daños estructurales que ocasionen reparaciones costosas, superando el ahorro inicial obtenido (Bowles, 2022).



Capítulo 2

Metodología

2.1 Procedimiento general

El procedimiento general de la presente investigación se orienta a la verificación técnica del diseño de cimentaciones propuesto en el Estudio de Mecánica de Suelos (EMS) del proyecto de la Clínica SANNA - Piura, enfocándose en la evaluación de la capacidad portante y los asentamientos del suelo, conforme a los criterios establecidos en la normativa técnica vigente. Cabe precisar que el estudio no analiza una cimentación ejecutada, sino que se basa en la revisión y validación de la alternativa de cimentación planteada en el EMS mediante cálculos propios y criterios de ingeniería.

En una primera etapa, se realiza la revisión del Estudio de Mecánica de Suelos, recopilando información relevante sobre la ubicación del proyecto, la estratigrafía del terreno, los parámetros geotécnicos obtenidos en laboratorio y campo, así como el nivel freático y las condiciones geológicas del área de estudio. Esta información constituye la base para el análisis posterior del comportamiento del suelo.

Posteriormente, se procede a la definición y descripción de la cimentación propuesta en el EMS, identificando el tipo de cimentación, sus dimensiones geométricas, profundidad de desplante y las cargas transmitidas por la superestructura. Esta etapa permite establecer las condiciones iniciales necesarias para el desarrollo de los cálculos de verificación.

A continuación, se efectúa la verificación de la capacidad portante, aplicando métodos analíticos reconocidos y comparando los resultados obtenidos con los valores consignados en el EMS, evaluando el cumplimiento de los factores de seguridad requeridos. De manera complementaria, se realiza la evaluación de los asentamientos totales y diferenciales, utilizando modelos teóricos y los parámetros de deformabilidad del suelo, verificando que los desplazamientos estimados se encuentren dentro de los límites admisibles para la estructura.

Seguidamente, se desarrolla la verificación del cumplimiento normativo, contrastando los resultados obtenidos con lo establecido en el Reglamento Nacional de Edificaciones y demás normas técnicas aplicables, con el fin de validar la viabilidad del diseño de cimentación propuesto. Finalmente, se lleva a cabo una comparación técnica y económica entre la alternativa analizada y posibles opciones de mejora, cuyos resultados sirven de base para la formulación de conclusiones y recomendaciones orientadas a optimizar el diseño de la cimentación desde el punto de vista de seguridad, desempeño estructural y eficiencia económica.

2.2 Recolección de datos

La recolección de datos se sustentó en información geotécnica confiable y reciente de

la región Piura, integrando estudios geofísico-geotécnicos que describen la heterogeneidad de los suelos aluviales y la influencia del nivel freático en el comportamiento del terreno (Bernal et al., 2024; Zamora, 2022). Estos antecedentes permiten representar de manera adecuada las condiciones reales del subsuelo en zonas urbanas cercanas a la Clínica SANNA.

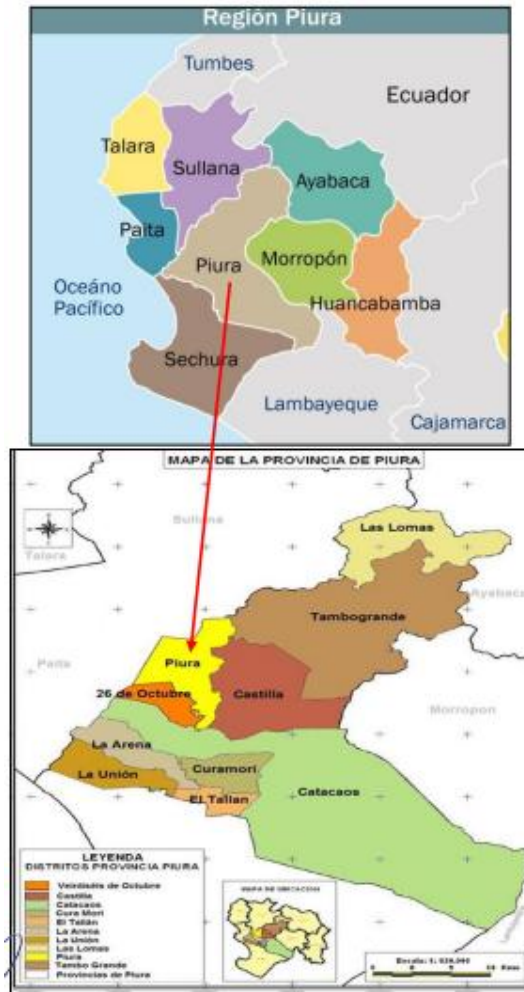
Asimismo, se consideraron investigaciones aplicadas a infraestructura hospitalaria del norte del país, las cuales evidencian que una caracterización insuficiente del subsuelo puede comprometer el desempeño de las cimentaciones, especialmente en suelos blandos o saturados. La información recopilada fue contrastada con criterios técnicos de referencia internacional para el diseño geotécnico, consolidando una base de datos técnicamente coherente para el desarrollo del estudio (Mendoza Ramírez, 2023; Bowles, 1996; Das, 1999).

2.2.1 Zona de estudio

La zona de estudio seleccionada corresponde al terreno ubicado en la Urbanización San Dionicio, designado para la construcción del edificio de consultorios médicos de la Clínica Belén. Este predio se encuentra en el distrito, provincia y región de Piura, en la costa norte del Perú. Su altitud varía entre 29 y 35 metros sobre el nivel del mar, dentro de una extensa llanura aluvial formada por los depósitos recientes del río Piura. Estos sedimentos tienen una influencia directa en las propiedades geotécnicas del suelo, especialmente en su capacidad portante y comportamiento ante cargas estructurales (Colegio de Ingenieros del Perú - CD Piura, 2022).

De acuerdo con la Norma Técnica E.050 "Suelos y Cimentaciones" del Reglamento Nacional de Edificaciones, este tipo de depósitos aluviales suele presentar suelos granulares con baja plasticidad y adecuada compactibilidad, condiciones que favorecen el diseño de cimentaciones superficiales (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018).

Figura 5
Ubicación de la zona de estudio



Piura se localiza dentro de la franja costera del país, caracterizada por un clima árido, cálido y con precipitaciones estacionales. Según los registros del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, las temperaturas promedio anuales oscilan entre los 22 °C y 34 °C, con una humedad relativa media cercana al 70 %. Las lluvias son escasas la mayor parte del año, salvo durante los eventos asociados al Fenómeno El Niño, cuando las precipitaciones se incrementan considerablemente (SENAMHI, 2024). Estas variaciones climáticas tienen un efecto directo sobre el comportamiento del suelo, principalmente en su contenido de humedad. En suelos finos, los cambios de humedad pueden generar expansiones o contracciones, afectando su estabilidad y capacidad portante. Este factor ambiental, por tanto, constituye un parámetro importante en la evaluación geotécnica y en la selección del tipo de cimentación más adecuado para la edificación (Bowles, 2022).

Para llegar a la zona de estudio se hace por las diferentes arterias de la ciudad de Piura, una de estas es por la Av. Loreto Norte, para luego ingresar a la calle San Cristóbal y por último a la Av. San Ramon lugar donde se encuentra el área en estudio en las coordenadas UTM, N = 9426822 E= 541304 (GPS, WGS 84). El entorno inmediato presenta edificaciones entre dos y

cinco niveles, así como centros comerciales, instituciones públicas y privadas, lo que demuestra que se trata de un sector urbano consolidado. Geológicamente, el sitio se encuentra sobre depósitos aluviales cuaternarios conformados por arenas, limos y gravas transportadas por el río Piura. Estos materiales son relativamente homogéneos y estables en grandes extensiones, con suelos de densidad media a alta, limos arenosos, baja plasticidad y buena capacidad de compactación (Juárez, Torres & Sánchez, 2023).

Figura 6

Ubicación del proyecto



Nota. Adaptado de Google Earth, 2024.

El nivel freático se encuentra entre 4.5 y 5.2 m de profundidad, lo cual es favorable para cimentaciones superficiales, ya que reduce el riesgo de presión hidrostática, licuefacción o expansividad por saturación (Tomlinson & Woodward, 2021). Estudios locales del Colegio de Ingenieros del Perú y de las universidades de Piura confirman que la llanura aluvial presenta suelos de buena capacidad portante, asentamientos controlados y un comportamiento estable frente a variaciones de humedad (Colegio de Ingenieros del Perú – CD Piura, 2022). En conjunto, estas condiciones ambientales, urbanas, geológicas e hidrogeológicas ofrecen un contexto favorable para el desarrollo del proyecto y justifican la adopción de soluciones geotécnicas convencionales que garantizan eficiencia técnica, seguridad estructural y sostenibilidad económica.

2.2.2 Identificación de parámetros principales

El análisis del comportamiento del suelo requiere identificar los parámetros geotécnicos esenciales que permitan seleccionar adecuadamente el tipo de cimentación para la edificación proyectada. En el estudio realizado para los consultorios médicos de la Clínica Belén – Piura, se evaluaron los parámetros físicos, mecánicos e hidrogeológicos del terreno

mediante ensayos de campo e investigaciones de laboratorio, de acuerdo con los lineamientos establecidos en la Norma Técnica E.050 “Suelos y Cimentaciones” del Reglamento Nacional de Edificaciones del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS, 2018). Asimismo, se complementó el procedimiento con criterios técnicos derivados de investigaciones académicas desarrolladas en contextos similares en el norte del Perú (Baltazar Miranda, 2019; Chalco Chávez & Olivos García, 2019).

2.2.2.1 Parámetros físicos del suelo. La identificación de los parámetros del suelo se desarrolló mediante un proceso que integró actividades de campo y ensayos de laboratorio, siguiendo estándares internacionales (ASTM) y los lineamientos de la E.050. Esta fase tuvo como propósito obtener la información necesaria para evaluar el comportamiento del subsuelo frente a las cargas estructurales, tal como recomiendan Bowles (1996), Tomlinson Woodward (2011) y las investigaciones recientes del contexto regional y nacional (Palaco & Rodríguez, 2022; Mendoza, 2023).

2.2.2.1.1 Exploración de campo. En el área del proyecto se ejecutaron dos calicatas como parte del estudio geotécnico, alcanzando profundidades de 2.50 m en la Calicata C-1 y 3.00 m en la Calicata C-2, de acuerdo con lo establecido en el estudio de suelos. Estas excavaciones permitieron la observación directa de los diferentes estratos del terreno, facilitando la descripción detallada de sus características físicas, como color, textura, compacidad y estado de humedad. Asimismo, se obtuvieron muestras alteradas e inalteradas, las cuales fueron destinadas a la realización de ensayos de laboratorio para la determinación de parámetros geotécnicos relevantes.

De manera complementaria, se realizaron sondeos mediante el ensayo de penetración estándar (SPT), siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D1586, lo que permitió recuperar muestras a distintas profundidades y estimar indirectamente la resistencia y compacidad relativa del suelo. Este enfoque metodológico resulta coherente con investigaciones recientes que destacan la importancia de combinar calicatas y ensayos SPT para una adecuada caracterización de suelos granulares en zonas con alta variabilidad local (Adanaqué, 2022; Zamora, 2022). Del mismo modo, coincide con estudios internacionales que subrayan la necesidad de obtener parámetros confiables en suelos arenosos, particularmente para el análisis y diseño de cimentaciones superficiales (Pantelidis, 2024; Lukueta & Isobe, 2024).

2.2.2.1.2 Ensayos de laboratorio. La información geotécnica utilizada en la presente investigación fue obtenida a partir de un Estudio de Mecánica de Suelos previamente elaborado para el área del proyecto. Dicho estudio fue desarrollado por especialistas, siguiendo los lineamientos técnicos establecidos por las normas ASTM y la Norma Técnica

E.050 del Reglamento Nacional de Edificaciones, lo que garantiza la confiabilidad y validez de los resultados empleados en el análisis posterior (Bowles, 1996; MVCS, 2023).

De acuerdo con este estudio, las muestras de suelo recuperadas durante la exploración fueron sometidas a ensayos de laboratorio orientados a la caracterización física y mecánica del terreno. Entre estos se incluyeron el análisis granulométrico por tamizado, la determinación del contenido de humedad natural y del peso unitario, los cuales permitieron identificar la textura del suelo, su estado físico y las condiciones reales del subsuelo al momento del muestreo, información indispensable para su correcta clasificación y evaluación geotécnica (Bowles, 1996; Yao et al., 2023).

Asimismo, cuando los materiales presentaron un contenido significativo de finos, el estudio consideró la aplicación de los ensayos de límites de Atterberg para evaluar la plasticidad del suelo. De manera complementaria, se realizaron ensayos de corte directo para la determinación de los parámetros de resistencia al corte y ensayos edométricos para estimar la compresibilidad de los estratos susceptibles a asentamientos. Finalmente, el ensayo Proctor fue empleado para definir las condiciones óptimas de compactación recomendadas para rellenos o nivelaciones, asegurando un adecuado desempeño del suelo compactado en obra, conforme a los criterios técnicos vigentes (Bowles, 1996; MVCS, 2023).

2.2.2.1.3 Integración de parámetros físicos, mecánicos e hidrogeológicos. De acuerdo con la información consignada en el Estudio de Mecánica de Suelos elaborado para el área del proyecto, se procedió a realizar la integración y análisis final de los parámetros geotécnicos disponibles. Dicho estudio proporcionó datos confiables obtenidos mediante exploraciones de campo y ensayos de laboratorio, los cuales permitieron describir de manera consistente el comportamiento físico del suelo, considerando aspectos como la textura, el contenido de humedad y la densidad, así como su influencia en la respuesta del terreno frente a cargas estructurales (Bowles, 1996).

A partir de estos resultados, se analizaron los parámetros mecánicos del suelo, tales como la resistencia al corte, la rigidez y la deformabilidad, los cuales fueron interpretados de forma conjunta para evaluar el desempeño del terreno bajo condiciones de carga. Esta integración de propiedades físicas y mecánicas constituye un procedimiento fundamental para la estimación de la capacidad portante y la evaluación de los asentamientos, tal como lo señalan Bowles (1996) y Tomlinson y Woodward (2011).

Asimismo, el análisis consideró la información hidrogeológica reportada en el estudio, principalmente la posible presencia de agua subterránea y su influencia en el comportamiento del suelo. La evaluación integrada de estos parámetros permitió reducir las incertidumbres asociadas a la variabilidad y heterogeneidad del subsuelo, característica de los suelos aluviales de la costa norte del Perú, tal como ha sido evidenciado en investigaciones recientes desarrolladas en contextos similares (Adanaqué, 2022; Mendoza, 2023).

2.2.3 Clasificación del suelo según normativa

Una vez procesados los datos de laboratorio, se procedió a clasificar los suelos siguiendo los sistemas SUCS y AASHTO, tal como exige la Norma Técnica Peruana E.050 (MVCS, 2023).

2.2.3.1 Clasificación SUCS. El análisis granulométrico y los límites de plasticidad se emplearon para ubicar el suelo dentro del marco del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), conforme a ASTM D2487. Esta clasificación permite interpretar el comportamiento ingenieril de los suelos, especialmente su capacidad de drenaje, compactabilidad y resistencia al corte, aspectos esenciales en proyectos de cimentaciones superficiales.

Los suelos del proyecto presentan características típicas de depósitos aluviales finos, semejantes a los reportados en zonas cercanas por Adanaqué (2022) y Zamora (2022).

2.2.3.2 Clasificación AASHTO. Complementariamente, se aplicó el sistema AASHTO M145, el cual permite una clasificación adicional orientada a evaluar la susceptibilidad del suelo frente a la compactación y variaciones de humedad. Si bien este sistema es comúnmente usado en ingeniería vial, su aplicación resulta útil para obtener una visión más amplia de la calidad del material como soporte (Zamora, 2022).

2.2.3.3 Correlación con la E.050. Los resultados obtenidos mediante SUCS y AASHTO fueron contrastados con los criterios de la E.050 para determinar si los suelos cumplen con las condiciones requeridas para cimentaciones superficiales, particularmente en lo referente a estabilidad volumétrica, ausencia de materia orgánica y capacidad de soporte adecuada (MVCS, 2023).

Esta metodología de clasificación y verificación es coherente con lo utilizado en proyectos similares en el país, donde la correcta identificación del suelo es fundamental para asegurar un diseño seguro y prevenir problemas de asentamientos diferenciales (Mendoza, 2023; Palaco & Rodríguez, 2022).

2.2.4 Método de análisis de capacidad portante

El análisis de la capacidad portante del suelo se desarrolló a partir de la información consignada en el Estudio de Mecánica de Suelos, con la finalidad de comprobar que la cimentación propuesta sea capaz de transmitir las cargas estructurales al terreno de manera segura. Este procedimiento se orientó al cumplimiento de los factores de seguridad establecidos por la normativa vigente y se fundamentó en métodos analíticos ampliamente aceptados en la práctica geotécnica (Bowles, 1996; Das, 2011).

Con base en los resultados del estudio geotécnico, se seleccionaron los parámetros necesarios para el análisis, tales como el peso unitario del suelo, la cohesión efectiva, el ángulo de fricción interna y la profundidad de desplante de la cimentación. Estos valores, obtenidos

mediante ensayos de campo y laboratorio previamente ejecutados, fueron integrados con la geometría de la cimentación y las cargas transmitidas por la superestructura, permitiendo una evaluación coherente del comportamiento del suelo bajo condiciones reales de carga (Das, 2011; Tomlinson & Woodward, 2015).

Para la estimación de la capacidad portante última se aplicaron formulaciones teóricas clásicas, entre ellas las propuestas por Terzaghi, Meyerhof y Hansen, cuya selección dependió del tipo de suelo y del sistema de cimentación considerado. Posteriormente, la capacidad portante admisible fue determinada mediante la aplicación de factores de seguridad adecuados, conforme a lo indicado por la Norma Técnica E.050 del Reglamento Nacional de Edificaciones y la literatura especializada (Bowles, 1996; Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], 2018).

Finalmente, los valores obtenidos fueron contrastados con los resultados reportados en el Estudio de Mecánica de Suelos, con el propósito de verificar la coherencia del diseño propuesto y confirmar el cumplimiento de los criterios de seguridad exigidos. Este análisis constituyó la base técnica para la evaluación comparativa desarrollada en la etapa de resultados (Bowles, 1996; Das, 2011).

2.2.5 Método de Análisis de asentamientos

El análisis de asentamientos se desarrolló con el propósito de evaluar el comportamiento deformacional del suelo ante las cargas transmitidas por la cimentación propuesta, utilizando como base la información contenida en el Estudio de Mecánica de Suelos. Este procedimiento permitió verificar que los desplazamientos verticales estimados se mantuvieran dentro de los límites admisibles para la estructura, garantizando su funcionalidad y desempeño a largo plazo conforme a los criterios de diseño geotécnico aceptados (Bowles, 1996; Das, 2011).

De acuerdo con los resultados del estudio geotécnico, se identificaron los estratos del suelo y se seleccionaron los parámetros de deformabilidad necesarios para el análisis, tales como el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson y los índices de compresibilidad. Estos parámetros, obtenidos a partir de ensayos de laboratorio previamente ejecutados, permitieron evaluar tanto los asentamientos inmediatos como los asentamientos por consolidación, en función del tipo de suelo presente y de sus condiciones de drenaje (Bowles, 1996; Tomlinson & Woodward, 2015).

Para el cálculo de los asentamientos se emplearon modelos teóricos y empíricos ampliamente utilizados en la ingeniería geotécnica, considerando la distribución de esfuerzos inducidos por la cimentación y la profundidad de influencia de las cargas. A partir de estos modelos se estimaron los asentamientos totales y diferenciales, los cuales fueron contrastados con los límites admisibles establecidos en la normativa técnica vigente y en la

literatura especializada (Das, 2011; Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS, 2018).

Los resultados obtenidos permitieron evaluar la viabilidad del diseño de la cimentación desde el punto de vista deformacional y determinar si era necesario considerar medidas de mejora del suelo o ajustes en el sistema de cimentación. Este análisis se constituyó como un complemento esencial del estudio de capacidad portante y sirvió de base para la interpretación de los resultados presentados posteriormente (Bowles, 1996; Tomlinson & Woodward, 2015).

2.3 Determinación del tipo de cimentación

2.3.1 Evaluación de alternativas de solución

La selección de la cimentación más adecuada se realizó mediante un análisis comparativo fundamentado en la información del Estudio de Mecánica de Suelos, el comportamiento esperado del terreno y las características estructurales del proyecto. Este proceso tuvo como objetivo identificar la alternativa que garantice seguridad, funcionalidad y viabilidad constructiva, en concordancia con los criterios establecidos en la normativa vigente y la literatura técnica especializada (Bowles, 1996; Tomlinson & Woodward, 2011; MVCS, 2023).

El análisis consideró, en primer lugar, las cargas estructurales derivadas del diseño arquitectónico y estructural, las cuales fueron empleadas para estimar de manera preliminar las tensiones de contacto transmitidas al suelo. Estas estimaciones permitieron dimensionar el área mínima de apoyo requerida y evaluar la factibilidad de distintos tipos de cimentación superficial, tales como zapatas corridas, zapatas combinadas y plateas, en función de la capacidad portante y los asentamientos admisibles del terreno (Bowles, 1996; Tomlinson & Woodward, 2011).

Asimismo, se evaluó la compatibilidad entre el suelo y la estructura, considerando aspectos como la distribución y proximidad de columnas, la presencia de cargas excéntricas y las restricciones geométricas del proyecto. De manera complementaria, se analizaron las condiciones constructivas del terreno, incluyendo la profundidad de excavación necesaria, la estabilidad de los taludes, la posible presencia de agua subterránea y la accesibilidad para la ejecución de las obras, factores que influyen directamente en la elección del sistema de cimentación (MVCS, 2023).

Este enfoque metodológico responde a recomendaciones de investigaciones recientes que destacan la importancia de seleccionar la cimentación no solo en función de la resistencia del suelo, sino también considerando la interacción suelo–estructura y la sensibilidad a asentamientos, especialmente en suelos arenosos o de comportamiento heterogéneo (Palaco & Rodríguez, 2022; Pantelidis, 2024).

2.3.2 Verificación de cumplimiento de normativa

La cimentación seleccionada fue evaluada mediante un proceso de verificación normativa con el objetivo de comprobar que el diseño cumple con los criterios de seguridad y desempeño exigidos por la normativa vigente. Este procedimiento consideró el comportamiento geotécnico del suelo y la respuesta estructural de la cimentación, siguiendo los principios generales de diseño propuestos en la literatura especializada y en la normativa nacional aplicable (Bowles, 1996).

En una primera etapa, se verificó la capacidad portante del suelo empleando teorías clásicas de falla por corte, adaptadas a la naturaleza granular del terreno identificado en el Estudio de Mecánica de Suelos. Este análisis permitió confirmar que las tensiones transmitidas por la cimentación no superan la capacidad admisible del suelo y que se cumplen los factores de seguridad establecidos por la Norma Técnica E.050 (MVCS, 2023).

Posteriormente, se evaluaron los asentamientos totales y diferenciales asociados a la cimentación, utilizando procedimientos basados en la deformación elástica y la consolidación del suelo. Para ello, se emplearon parámetros obtenidos de ensayos de laboratorio y correlaciones geotécnicas reportadas en estudios desarrollados en condiciones similares, lo que permitió estimar el comportamiento deformacional del terreno de manera consistente (Adanaqué, 2022).

Asimismo, se realizó la verificación de la estabilidad global y local de la cimentación, considerando posibles modos de falla como deslizamiento, volteo, efectos de excentricidad y punzonamiento. Estos criterios se fundamentaron en los lineamientos establecidos por la normativa geotécnica internacional, los cuales complementan los requisitos de la normativa nacional para garantizar un comportamiento seguro de las cimentaciones (Eurocode 7, 2004).

De manera complementaria, se efectuó la verificación estructural de los elementos de cimentación conforme a los requisitos de diseño en concreto armado, revisando los estados límite de flexión, cortante y control de fisuración. Esta etapa permitió asegurar que los elementos estructurales asociados a la cimentación cuenten con la resistencia y durabilidad requeridas durante la vida útil de la edificación (ACI, 2019).

Finalmente, se verificaron las condiciones constructivas asociadas a la ejecución de la cimentación, tales como la compactación del terreno de apoyo, la limpieza del fondo de excavación y el uso de concreto pobre, de acuerdo con lo establecido en la Norma Técnica E.050. Este enfoque integral permitió validar el diseño propuesto bajo criterios normativos y condiciones reales de ejecución (MVCS, 2023).

2.4 Comparación técnica y económica

2.4.1 Análisis de impacto técnico y económico

El análisis técnico–económico se desarrolla con la finalidad de evaluar la viabilidad y conveniencia de la cimentación propuesta en el Estudio de Mecánica de Suelos, considerando de manera conjunta su desempeño estructural y los costos asociados a su ejecución. Este enfoque permite complementar la verificación geotécnica tradicional mediante la integración de criterios de seguridad, funcionalidad y eficiencia económica, tal como se recomienda en la literatura especializada en diseño de cimentaciones (Bowles, 1996).

El procedimiento se inicia con la definición de las alternativas de cimentación a evaluar, incluyendo la solución propuesta en el Estudio de Mecánica de Suelos y, cuando corresponde, alternativas adicionales técnicamente viables. Para cada opción se establecen sus características geométricas, el volumen de obra requerido y los principales elementos constructivos involucrados, asegurando su compatibilidad con las condiciones del suelo y las exigencias estructurales del proyecto (Tomlinson, 2011).

Posteriormente, se realiza la evaluación técnica de cada alternativa, verificando el cumplimiento de los criterios de seguridad geotécnica y estructural definidos a partir de los análisis de capacidad portante y asentamientos. Solo aquellas alternativas que satisfacen estos requisitos son consideradas en la evaluación económica, garantizando que la comparación se efectúe entre opciones técnicamente aceptables y normativamente válidas (MVCS, 2023).

En la etapa de evaluación económica se identifican los costos directos asociados a la ejecución de las cimentaciones, tales como movimiento de tierras, concreto, acero de refuerzo, encofrado y actividades complementarias. Los costos unitarios se obtienen de presupuestos referenciales, bases de datos de precios vigentes y expedientes técnicos similares, lo que permite estimar de manera consistente el costo total de cada alternativa analizada (Arce, 2021).

Finalmente, se efectúa una comparación técnica y económica entre las alternativas evaluadas, considerando indicadores como el costo total, la simplicidad constructiva y el desempeño esperado durante la vida útil de la edificación. Los resultados de este análisis constituyen la base para la selección de la alternativa más conveniente, sirviendo como sustento técnico para la toma de decisiones y para las conclusiones de la investigación (Bowles, 1996).

Capítulo 3

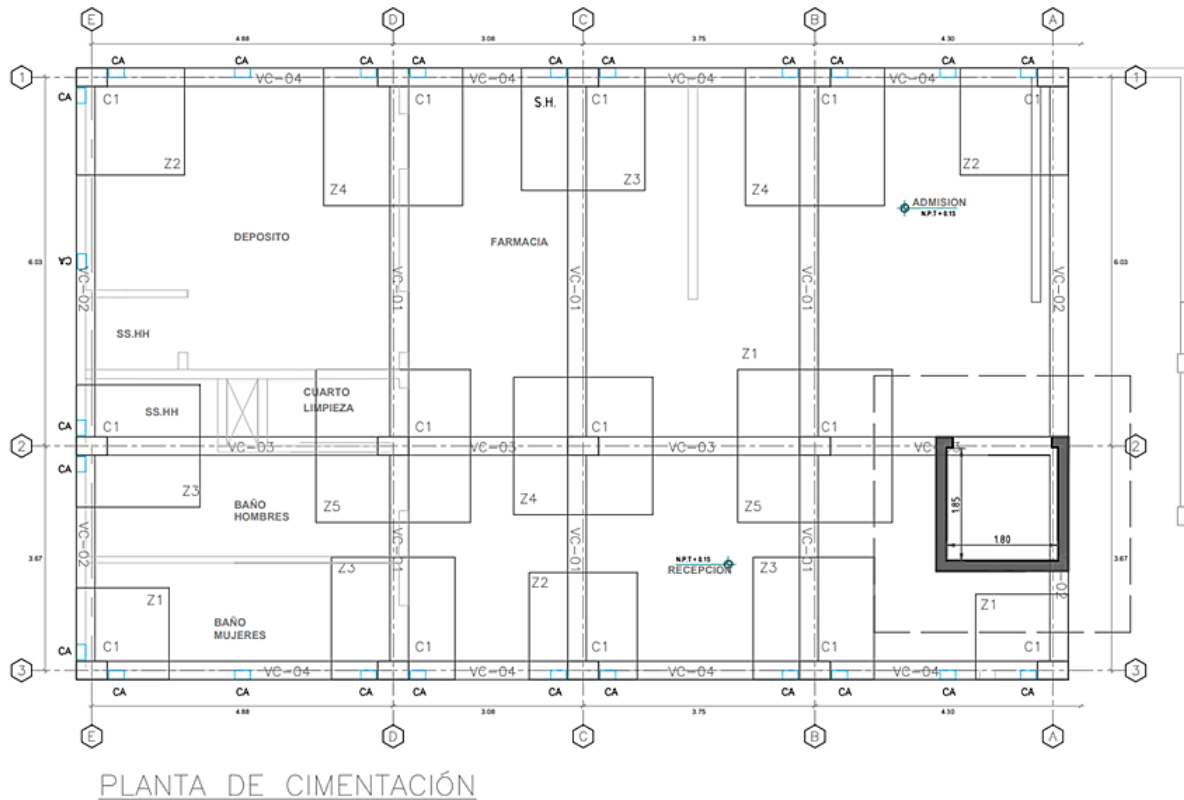
Resultados

3.1 Descripción técnica de la cimentación propuesta

De acuerdo con la propuesta de cimentación definida en el estudio de mecánica de suelos y desarrollada en los planos estructurales del proyecto (Plano E-01: Cimentación y Detalles), la infraestructura de la Clínica SANNA se apoya sobre un sistema de cimentación superficial conformado principalmente por zapatas corridas de concreto armado, destinadas a recibir las cargas de los muros portantes y elementos estructurales lineales. Estas zapatas corridas presentan anchos típicos del orden de 1.50 m, con espesores estructurales aproximados de 0.50 m, y se encuentran empotradas a una profundidad de desplante promedio entre 1.80 m y 1.85 m respecto al nivel del terreno natural.

Previamente al vaciado del concreto estructural, se dispone una capa de solado de concreto simple de 10 cm de espesor, cuya función es regularizar el fondo de excavación y garantizar condiciones adecuadas de apoyo. El concreto estructural especificado para la cimentación corresponde a una resistencia característica $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, conforme a la Norma Técnica E.060.

El refuerzo está constituido por acero corrugado dispuesto en ambas direcciones, con diámetros y separaciones definidas en los detalles constructivos (barras longitudinales y estribos), asegurando el adecuado comportamiento frente a esfuerzos de flexión, cortante y control de fisuración. Este sistema de cimentación es consistente con las condiciones geotécnicas del terreno, caracterizado por suelos arenosos de compacidad media y ausencia de nivel freático en la profundidad explorada, y cumple con los criterios de capacidad portante, asentamientos admisibles y estabilidad establecidos por la Norma Técnica E.050 "Suelos y Cimentaciones".

Figura 7*Planta de Cimentación de la Clínica Sanna*

Nota. La presente planta de cimentación ha sido elaborada a partir del Estudio de Mecánica de Suelos de la Clínica Sanna.

3.2 Perfil estratigráfico

De acuerdo a la exploración efectuada, se obtuvo los siguientes perfiles estratigráficos que presentan las siguientes características:

Calicata N° 01 / Entrada del terreno De 0.00m a 0.10m. Piso existente en regular estado. Muestra-1 de -0.10m a -1.70m. Estrato conformado de arena fina pobremente graduada no plástica de color beige con poco o casi de finos que pasa el tamiz N°200, estrato en estado húmeda y semi compacta de clasificación SUCS (SP) y AASHTO A-3 (0). Muestra-2 de -1.70m hasta -2.50m. Estrato conformado una arena de grano fino pobremente graduada, mezclado con limo no plástica de una coloración beige claro estado húmeda, semi compacta de clasificación SUCS (SP-SM) y AASHTO A-3 (0). No presenta nivel freático ni material saturado hasta la profundidad excavada.

Calicata N° 02 / fondo del terreno De 0.00m a 0.10m. Piso existente en regular estado. Muestra-1 de -0.10m a -1.60m. Estrato conformado de arena fina pobremente graduada no plástica de color beige con poco o casi de finos que pasa el tamiz N°200, estrato en estado húmeda y semi compacta de clasificación SUCS (SP) y AASHTO A-3 (0). Muestra-2 de -1.60m hasta 3.00m. Estrato conformado una arena de grano fino pobremente graduada, mezclado

con limo no plástica de una coloración beige claro estado húmeda, semi compacta de clasificación SUCS (SP-SM) y AASHTO A-3 (0). No presenta nivel freático ni material saturado hasta la profundidad excavada.

Tabla 3

Ubicación de las calicatas y profundidad

Calicata	Ubicación	Datos
		Profundidad (m)
C – 1	Entrada del terreno	0.00 – 2.50
C - 2	Fondo del terreno	0.00 – 3.00

Nota. Adaptada del Estudio de Mecánica de suelos de la Clínica Sanna (2024).

3.3 Ensayos de laboratorio

Los resultados del presente estudio se sustentan en la información obtenida del Estudio de Mecánica de Suelos remitido por la Clínica Sanna. A partir de la excavación de calicatas, se recuperaron muestras representativas del suelo, las cuales fueron sometidas a ensayos estándar de laboratorio en el Laboratorio de Mecánica de Suelos, de acuerdo con las normas de la American Society for Testing and Materials (ASTM). Los resultados obtenidos de dichos ensayos permitieron determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, las cuales se pueden observar en la Tabla 3, y constituyen la base para la interpretación y análisis geotécnico desarrollado en los próximos apartados.

Tabla 4

Ensayos de laboratorio

Calicata	Profundidad (m)	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	Límite Líquido (LL)	Límite Plástico (LP)	Índice de Plasticidad (IP)	W natural (%)	γ (g/cm ³)	Clasificación SUCS	Nivel Freático (m)
01	0.10 – 1.70	0.00	97.0	3.0	N.P	N.P	N.P	4.62	1.623	SP	No presenta
01	1.70 – 2.50	0.00	92.8	7.2	N.P	N.P	N.P	4.62	1.634	SP-SM	No presenta
02	0.10 – 1.60	0.00	96.0	4.0	N.P	N.P	N.P	4.62	1.615	SP	No presenta
02	1.60 – 3.00	0.00	90.6	9.6	N.P	N.P	N.P	4.62	1.628	SP-SM	No presenta

Nota. Adaptada del Estudio de Mecánica de suelos de la Clínica Sanna (2024).

La tabla N° 4 presenta los resultados de los ensayos de laboratorio realizados a las muestras obtenidas mediante 2 calicatas excavadas entre los 0.10 m y 3.00 m de profundidad, intervalo que coincide con la zona de influencia de cimentaciones superficiales. La exploración mediante calicatas permite obtener muestras representativas del suelo en estado natural, información indispensable para definir las propiedades físicas, granulométricas y de humedad del estrato de fundación (Bowles, 1996). Las profundidades muestreadas 0.10 - 1.70 m y 1.70 - 2.50 m en la Calicata 01, y 0.10 - 1.60 m y 1.60 - 3.00 m en la Calicata 02 garantizan una caracterización adecuada del comportamiento del subsuelo frente a las cargas estructurales del proyecto.

En relación con la granulometría, los resultados evidencian que el material está constituido predominantemente por arena fina, con porcentajes que varían entre 90 % y 97 %, mientras que el contenido de grava es nulo y la fracción de finos oscila entre 3 % y 10 %. Este patrón es característico de suelos granulares de origen aluvial, los cuales presentan buen drenaje y baja susceptibilidad a fenómenos de expansión, colapso o contracción volumétrica (MVCS, 2023). Además, la proporción reducida de finos indica que el suelo se comporta principalmente como un material friccional, condición favorable para cimentaciones superficiales al ofrecer una respuesta mecánica predecible y resistencia adecuada al corte (Bowles, 1996).

Los resultados de los límites de Atterberg muestran valores No Plásticos (N.P.) para los límites líquido y plástico, y por consiguiente un índice de plasticidad también no plástico. Esta característica confirma que el suelo no posee minerales arcillosos activos ni tendencia a deformaciones dependientes del contenido de agua. La ausencia de plasticidad indica que se trata de un material con comportamiento granular predominante, lo cual coincide con la clasificación SUCS obtenida y reduce significativamente riesgos por cambios volumétricos, tal como advierten estudios sobre cimentaciones en suelos granulares de baja plasticidad (Adanaqué, 2022; Zamora, 2022).

La humedad natural, reportada con valores cercanos a 4.62 % en todas las muestras, es consistente con el comportamiento de arenas finas sometidas a climas cálidos y secos como los de Piura. De acuerdo con el MVCS (2023), los suelos arenosos de baja humedad presentan mayor estabilidad y menor probabilidad de pérdida de resistencia por saturación. En zonas áridas, esta humedad reducida se asocia a un proceso constante de evaporación que favorece la estabilidad del terreno, disminuyendo riesgos de asentamientos diferenciales ligados a cambios de humedad (Mendoza, 2023).

El peso unitario natural (γ), cuyos valores se encuentran entre 1.615 g/cm³ y 1.634 g/cm³, indica que el suelo posee una densidad media, propia de materiales con estructura granular medianamente compactada. Esta característica es congruente con los valores del ensayo SPT reportados en el estudio de suelos, que suelen mostrar un incremento de resistencia con la profundidad en suelos arenosos de origen aluvial (Zamora, 2022). En

términos geotécnicos, un peso unitario dentro de este rango sugiere un terreno con buena rigidez inicial, capaz de soportar cargas moderadas sin generar deformaciones excesivas.

La clasificación SUCS obtenida en el cuadro agrupa al material en SP (Arena mal gradada) y SP–SM (Arena mal gradada con limo). Los suelos SP se caracterizan por ser arenas limpias con distribución granulométrica uniforme, alto grado de permeabilidad y comportamiento no cohesivo, mientras que los SP SM incorporan un pequeño porcentaje de limos sin llegar a afectar de manera significativa su capacidad portante (Bowles, 1996; MVCS, 2023). Ambos tipos se consideran adecuados para cimentaciones superficiales, y estudios recientes realizados en Piura corroboran que estos suelos presentan buena respuesta a cargas verticales y asentamientos controlables (Adanaqué, 2022; Zamora, 2022).

Finalmente, todas las muestras indican que “No presenta” nivel freático, lo cual implica que no se encontró agua hasta la profundidad explorada. La ausencia de nivel freático es una condición favorable para el diseño de cimentaciones, pues reduce la posibilidad de socavación, evita la pérdida de resistencia efectiva del suelo y simplifica los procedimientos constructivos. De acuerdo con las recomendaciones técnicas de la Norma E.050, la no presencia de agua subterránea mejora la estabilidad del terreno y facilita la excavación sin requerir sistemas de bombeo ni refuerzo adicional (MVCS, 2023).

3.4 Análisis de la cimentación

3.4.1 Determinación de los parámetros de resistencia

Los parámetros de resistencia del suelo, el ángulo de fricción interna (ϕ), la cohesión (c), el peso unitario (γ), el coeficiente de Poisson (μ) y el módulo de elasticidad (E) fueron determinados a partir de ensayos de laboratorio y correlaciones reconocidas internacionalmente. En primer lugar, se ejecutaron ensayos de corte directo sobre muestras representativas obtenidas en campo, siguiendo los procedimientos establecidos en la norma ASTM D3080-11, que es el método estándar aceptado para la determinación de la resistencia al corte de suelos en condición drenada. Este ensayo permitió obtener directamente los valores de cohesión y el ángulo de fricción interna, al analizar la relación entre los esfuerzos normales aplicados y las envolventes de falla generadas (ASTM International, 2011).

De manera complementaria, la interpretación de dichos valores se sustentó en las recomendaciones de la Norma Técnica Peruana NTP E.050 Suelos y Cimentaciones (MVCS, 2018), que establece la validez del ensayo de corte directo como método principal para la obtención de parámetros de resistencia en suelos granulares cuando no presentan plasticidad significativa. Asimismo, el valor del peso unitario se determinó a partir de la densidad natural obtenida en campo mediante calicatas, siguiendo los lineamientos de la NTP 339.127 / ASTM D7263. En el caso del módulo de elasticidad (E) y la relación de Poisson (μ), estos fueron estimados mediante correlaciones empíricas basadas en la granulometría y la compacidad del suelo, acorde con lo propuesto por Terzaghi y Peck (1967) y con las recomendaciones

empleadas habitualmente en estudios geotécnicos nacionales (Crespo Villalaz, 2004). Los valores consolidados se presentan en la Tabla 9, los cuales se utilizaron posteriormente para el cálculo de la capacidad portante y verificación de asentamientos.

Tabla 5

Resumen de los parámetros de resistencia

γ (g/cm ³)	Cohesión, c (kg/cm ²)	Ángulo de fricción, ϕ (°)	Coefficiente de Poisson, μ	Módulo de elasticidad, E (kg/cm ²)
1.615	0.041	30.0	0.25	400.0

Nota. Adaptada del Estudio de Mecánica de suelos de la Clínica Sanna (2024).

3.5 Capacidad portante

La capacidad portante del terreno se determinó empleando la formulación de Terzaghi y Peck (1967), considerando los factores de capacidad portante propuestos por Vesic (1973). Para la obtención de la capacidad portante admisible, se utilizó la expresión recomendada por Terzaghi y Skempton, aplicando el correspondiente factor de seguridad.

El análisis se realizó sobre el segundo estrato dominante, identificado como un suelo arenoso, el cual constituye el nivel de apoyo de la cimentación proyectada. De acuerdo con los resultados del estudio de mecánica de suelos, este estrato presenta un estado de compactación media, condición que puede generar un mecanismo de falla local bajo la acción de las cargas transmitidas por la estructura.

En función de esta condición geotécnica, se procedió a reducir el ángulo de fricción interna del suelo, empleando la expresión para el ángulo de fricción equivalente, con la finalidad de considerar el efecto de la falla local. El ángulo de fricción reducido se determinó mediante la siguiente relación

$$:\phi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{2}{3} \tan \phi\right)$$

Reemplazando el valor del ángulo de fricción obtenido del estudio de mecánica de suelos, se obtuvo un ángulo de fricción reducido de:

$$\phi_1 = 21.05^\circ$$

Con el valor del ángulo de fricción reducido, se calcularon los factores de capacidad portante N_c , N_q y N_γ , los cuales fueron empleados en la ecuación general para la determinación de la capacidad portante última del terreno:

$$q_{ult} = c N_c s_c + q N_q s_q + 0.5 \gamma' B N_\gamma$$

Finalmente, la capacidad portante admisible del terreno se obtuvo dividiendo la capacidad portante última entre el factor de seguridad adoptado, conforme a la expresión:

$$q_{ad} = q_{ult}/fs$$

Los valores obtenidos permiten establecer la capacidad portante admisible del estrato analizado, la cual fue utilizada como parámetro de diseño para la evaluación y selección del tipo de cimentación.

En atención a la norma E050, se ha realizado un ensayo de corte directo, sobre muestras premoldeada obteniendo el siguiente valor. $\phi = 30^\circ$ y una cohesión de 0.041kg/cm².

El cálculo de la capacidad admisible del suelo para cimentaciones superficiales y constituye uno de los elementos fundamentales del estudio geotécnico, ya que permite determinar la presión máxima que puede transmitir la estructura al terreno de fundación sin generar fallas por corte ni asentamientos excesivos. La tabla muestra diferentes combinaciones de profundidad de desplante (Df) y ancho de cimentación (B), considerando un peso unitario natural del suelo de 1.615 g/cm³, valor coherente con la caracterización previa que describe un suelo granular medianamente denso, principalmente compuesto por arenas finas con ligeros contenidos de limo, tal como se evidencia en los ensayos de laboratorio y clasificación SUCS.

Los factores de capacidad portante utilizados en el cuadro, Nc, Nq y Ny, corresponden a las formulaciones clásicas desarrolladas por Terzaghi y extendidas en la literatura geotécnica contemporánea. Los valores presentados (por ejemplo, Nq=7.11 y Ny=6.24) son consistentes con un suelo arenoso con un ángulo de fricción interna aproximado de 30°, lo cual coincide con el tipo de material identificado en el estudio, clasificado como SP y SP–SM según la norma ASTM D2487. Este comportamiento friccional ha sido ampliamente documentado para suelos arenosos de baja plasticidad, donde la resistencia se controla principalmente por los esfuerzos normales efectivos y el interbloqueo entre partículas (Bowles, 1996; Pantelidis, 2024).

Además de los factores principales, el cuadro incluye los coeficientes de forma Sc, Sq y Sy, cuyo valor es apropiado para cimentaciones cuadradas y corridas. Estos factores ajustan la capacidad portante considerando la geometría del elemento estructural y permiten obtener un valor más preciso de la capacidad última (qult). A partir de estos parámetros, los valores de qult obtenidos en el estudio se encuentran entre 2.83 kg/cm² y 4.35 kg/cm², lo que refleja un suelo con buena resistencia al corte y capacidad adecuada para soportar cargas estructurales de edificaciones de mediana envergadura, como las establecidas para el proyecto de consultorios médicos. Resultados similares han sido reportados en estudios desarrollados en Piura, donde se encontraron valores comparables en suelos arenosos aluviales de características físicas semejantes (Adanaqué, 2022; Zamora, 2022).

Para transformar la capacidad última en una capacidad admisible de diseño, el estudio aplica un factor de seguridad de 3.00, tal como recomienda la Norma Técnica E.050 “Suelos y

Cimentaciones” del Reglamento Nacional de Edificaciones para cimentaciones superficiales en suelos granulares. Esta metodología conservadora busca asegurar que las estructuras trabajen dentro de rangos seguros y que se reduzca significativamente el riesgo de falla del terreno. Aplicando este factor, los valores de capacidad admisible resultantes varían entre 0.94 kg/cm^2 y 1.45 kg/cm^2 , dependiendo de la combinación entre profundidad y tamaño de la cimentación. Las zapatas cuadradas más pequeñas, de $1.00 \text{ m} \times 1.00 \text{ m}$, presentan los valores más bajos de capacidad admisible, mientras que las cimentaciones de mayor tamaño alcanzan los valores superiores debido al incremento del área efectiva de contacto y a la reducción relativa de las tensiones transmitidas por unidad de superficie.

Esta tendencia ha sido ampliamente estudiada en ingeniería geotécnica y coincide con los principios de la expansión del bulbo de presiones y la teoría clásica de capacidad portante, donde cimentaciones más grandes tienden a distribuir mejor las cargas y generar incrementos más modestos de tensión en profundidad (Bowles, 1996; Palaco & Rodríguez, 2022). Asimismo, los valores obtenidos se alinean con resultados observados en proyectos similares de infraestructura médica desarrollados en suelos granulares del norte del país, donde Mendoza (2023) reporta capacidades admisibles entre 1.0 kg/cm^2 y 2.0 kg/cm^2 en arenas finas con densidad media a densa.

En conjunto, la información de la tabla N° 6 confirma que el suelo del proyecto presenta una capacidad portante media a buena, adecuada para el uso de cimentaciones superficiales como zapatas corridas y combinadas. Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango esperado para suelos clasificados como SP-SM, que según la literatura internacional presentan un comportamiento mecánico estable, alta permeabilidad y baja compresibilidad, condiciones que favorecen el control de asentamientos y aseguran un desempeño confiable del sistema de cimentación (Pantelidis, 2024; Bowles, 1996).

Tabla 6

Resumen de los parámetros de resistencia reportados en el EMS

Tipo de cimentación	Df (m)	B (m)	γ (g/cm ³)	Nc	Sc	Sq	Nq	Sy	Ny	qult (kg/cm ²)	Fs	qad (kg/cm ²)
Cimentación cuadrada	1.00	1.00	1.615	15.87	1.45	0.60	7.11	1.38	6.24	2.83	3.00	0.94
	1.00	1.50	1.615	15.87	1.45	0.60	7.11	1.38	6.24	2.99	3.00	1.00
	1.00	1.80	1.615	15.87	1.45	0.60	7.11	1.38	6.24	3.08	3.00	1.03
	1.30	1.00	1.615	15.87	1.45	0.60	7.11	1.38	6.24	3.31	3.00	1.10
	1.30	1.50	1.615	15.87	1.45	0.60	7.11	1.38	6.24	3.46	3.00	1.15
	1.30	1.80	1.615	15.87	1.45	0.60	7.11	1.38	6.24	3.55	3.00	1.18
	1.50	1.00	1.615	15.87	1.45	0.60	7.11	1.38	6.24	3.63	3.00	1.21
	1.50	1.50	1.615	15.87	1.45	0.60	7.11	1.38	6.24	3.78	3.00	1.26
	1.50	1.80	1.615	15.87	1.45	0.60	7.11	1.38	6.24	3.87	3.00	1.29
	1.80	1.00	1.615	15.87	1.45	0.60	7.11	1.38	6.24	4.11	3.00	1.37
	1.80	1.50	1.615	15.87	1.45	0.60	7.11	1.38	6.24	4.26	3.00	1.42
	1.80	1.80	1.615	15.87	1.45	0.60	7.11	1.38	6.24	4.35	3.00	1.45
Cimentación corrida	1.00	0.80	1.615	15.87	1.00	1.00	7.11	1.00	6.24	2.51	3.00	0.84
	1.20	0.80	1.615	15.87	1.00	1.00	7.11	1.00	6.24	2.79	3.00	0.93
	1.40	0.80	1.615	15.87	1.00	1.00	7.11	1.00	6.24	3.06	3.00	1.02
	1.60	0.80	1.615	15.87	1.00	1.00	7.11	1.00	6.24	3.34	3.00	1.11

Nota. Adaptada del Estudio de Mecánica de suelos de la Clínica Sanna (2024).

3.5.1 Verificación de capacidad portante

Con la finalidad de verificar la capacidad portante admisible del terreno, se realizó el cálculo correspondiente a partir de los parámetros geotécnicos obtenidos de los ensayos de laboratorio reportados en el Estudio de Mecánica de Suelos. Dichos parámetros fueron empleados como datos de entrada para el cálculo de los factores de capacidad portante y de la capacidad última y admisible del suelo, conforme a las expresiones teóricas propuestas en la literatura geotécnica.

Los resultados del procedimiento de cálculo desarrollado se presentan en la Tabla 7, la cual permite contrastar los valores obtenidos con aquellos reportados en el Estudio de Mecánica de Suelos (Tabla 6), verificando la coherencia y consistencia de los resultados para los distintos tipos y dimensiones de cimentación analizados.

Tabla 7*Resumen de los parámetros de resistencia reportados en el EMS*

Tipo de cimentación	Df	B	Y(g/cm ³)	Nc	Sc	Sy	Nq	Sq	Ny	q ult	FS	q adm (kg/cm ²)
Cimentación cuadrada	1.00	1.00	1.615	18.991	1.30	0.80	8.310	1.38	5.293	3.21	3.00	1.07
	1.00	1.50	1.615	18.991	1.30	0.80	8.310	1.38	5.293	3.38	3.00	1.13
	1.00	1.80	1.615	18.991	1.30	0.80	8.310	1.38	5.293	3.48	3.00	1.16
	1.30	1.00	1.615	18.991	1.30	0.80	8.310	1.38	5.293	3.76	3.00	1.25
	1.30	1.50	1.615	18.991	1.30	0.80	8.310	1.38	5.293	3.93	3.00	1.31
	1.30	1.80	1.615	18.991	1.30	0.80	8.310	1.38	5.293	4.04	3.00	1.35
	1.50	1.00	1.615	18.991	1.30	0.80	8.310	1.38	5.293	4.13	3.00	1.38
	1.50	1.50	1.615	18.991	1.30	0.80	8.310	1.38	5.293	4.30	3.00	1.43
	1.50	1.80	1.615	18.991	1.30	0.80	8.310	1.38	5.293	4.41	3.00	1.47
	1.80	1.00	1.615	18.991	1.30	0.80	8.310	1.38	5.293	4.69	3.00	1.56
	1.80	1.50	1.615	18.991	1.30	0.80	8.310	1.38	5.293	4.86	3.00	1.62
	1.80	1.80	1.615	18.991	1.30	0.80	8.310	1.38	5.293	4.96	3.00	1.65
Cimentación corrida	1.00	0.80	1.615	18.991	1.00	1.00	8.310	1.00	5.293	2.46	3.00	0.82
	1.20	0.80	1.615	18.991	1.00	1.00	8.310	1.00	5.293	2.73	3.00	0.91
	1.40	0.80	1.615	18.991	1.00	1.00	8.310	1.00	5.293	3.00	3.00	1.00
	1.60	0.80	1.615	18.991	1.00	1.00	8.310	1.00	5.293	3.27	3.00	1.09

Nota. Los valores obtenidos muestran una adecuada consistencia y son comparables con los resultados proporcionados por el Estudio de Mecánica de Suelos (Tabla 6). Las ligeras variaciones identificadas se deben principalmente a diferencias en el redondeo numérico y no afectan la interpretación de los resultados ni la selección del tipo de cimentación.

Los valores presentados en la Tabla 7 fueron obtenidos mediante un procedimiento de cálculo propio, desarrollado a partir de los parámetros de resistencia derivados de los ensayos de laboratorio, tales como el ángulo de fricción interna y el peso unitario del suelo. El cálculo de la capacidad portante se realizó siguiendo la formulación clásica de Terzaghi, con la determinación de los factores de capacidad portante N_c , N_q y N_γ , empleando las siguientes expresiones:

$$N_q = e^{(\alpha^2)} / (2 \cdot \cos^2(45^\circ + \varphi/2))$$

$$\alpha = e^{((0.75\pi - \varphi/2) \cdot \tan \varphi)}$$

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot \varphi$$

$$N_\gamma = (\tan \varphi/2) \cdot (K_{p\gamma} / \cos^2 \varphi - 1)$$

donde el coeficiente $K_{p\gamma}$ se determinó mediante la siguiente relación:

$$K_{p\gamma} = 3 \tan^2(45^\circ + (\varphi + 33^\circ)/2)$$

3.5.2 Verificación de la capacidad portante de una Losa de cimentación

La evaluación de la capacidad portante de una losa de cimentación es un proceso clave para asegurar su desempeño frente a las cargas transmitidas por la estructura. Aunque el estudio de mecánica de suelos no contempla explícitamente el diseño de una losa de cimentación, los parámetros físicos-mecánicos obtenidos en laboratorio permiten realizar un análisis confiable sustentado en la teoría clásica presentada en Principios de Ingeniería de Cimentaciones de Das (2010).

Desde una perspectiva técnica, la capacidad última del suelo surge de la combinación de los mecanismos resistentes asociados a la cohesión, la sobrecarga y el peso propio del terreno. Estos componentes son representados mediante los coeficientes de capacidad de carga N_c , N_q y N_γ . No obstante, para que el cálculo refleje adecuadamente condiciones reales, estos coeficientes deben ajustarse mediante factores correctivos que consideren la geometría del cimiento, su profundidad de desplante y la inclinación de la carga.

Tabla 8

Factores de Capacidad Portante según el Ángulo de Fricción interna

ϕ	N_c'	N_q'	N_γ'	ϕ	N_c'	N_q'	N_γ'
0	5.70	1.00	0.00	26	15.53	6.05	2.59
1	5.90	1.07	0.005	27	16.30	6.54	2.88
2	6.10	1.14	0.02	28	17.13	7.07	3.29
3	6.30	1.22	0.04	29	18.03	7.66	3.76
4	6.51	1.30	0.055	30	18.99	8.31	4.39
5	6.74	1.39	0.074	31	20.03	9.03	4.83
6	6.97	1.49	0.10	32	21.16	9.82	5.51
7	7.22	1.59	0.128	33	22.39	10.69	6.32
8	7.47	1.70	0.16	34	23.72	11.67	7.22
9	7.74	1.82	0.20	35	25.18	12.75	8.35
10	8.02	1.94	0.24	36	26.77	13.97	9.41
11	8.32	2.08	0.30	37	28.51	15.32	10.90
12	8.63	2.22	0.35	38	30.43	16.85	12.75
13	8.96	2.38	0.42	39	32.53	18.56	14.71
14	9.31	2.55	0.48	40	34.87	20.50	17.22
15	9.67	2.73	0.57	41	37.45	22.70	19.75
16	10.06	2.92	0.67	42	40.33	25.21	22.50
17	10.47	3.13	0.76	43	43.54	28.06	26.25
18	10.90	3.36	0.88	44	47.13	31.34	30.40
19	11.36	3.61	1.03	45	51.17	35.11	36.00
20	11.85	3.88	1.12	46	55.73	39.48	41.70
21	12.37	4.17	1.35	47	60.91	44.45	49.30
22	12.92	4.48	1.55	48	66.80	50.46	59.25
23	13.51	4.82	1.74	49	73.55	57.41	71.45
24	14.14	5.20	1.97	50	81.31	65.60	85.75
25	14.80	5.60	2.25				

Nota. Adaptada de Das (2010).

En este trabajo se aplicaron los factores de forma, profundidad e inclinación, cuyas expresiones provienen de estudios experimentales ampliamente citados por la literatura geotécnica y recopilados por Das (2010). Los factores de forma, utilizados para reflejar el efecto geométrico del cimiento, derivan de los trabajos de De Beer (1970) y Hansen (1970), quienes establecieron relaciones empíricas basadas en ensayos con cimentaciones de distintas proporciones. Los factores de profundidad, por su parte, corresponden a formulaciones desarrolladas por Hansen (1970), orientadas a capturar el incremento de confinamiento generado cuando el cimiento se encuentra a una mayor profundidad relativa (D_f/B). Finalmente, los factores de inclinación provienen de las investigaciones de Meyerhof (1963) y Hanna y Meyerhof (1981), quienes demostraron que la capacidad portante se reduce cuando la carga aplicada presenta una inclinación β respecto de la vertical.

- Factores de forma:

$$F_c = 1 + (B/L)(N_q/N_c)$$

$$F_q = 1 + (B/L) \cdot \tan \phi$$

$$F_\gamma = 1 - 0.4(B/L)$$

- Factores de profundidad:

$$F_{cd} = 1 + 0.4(D_f/B)$$

$$F_{qd} = 1 + 2 \cdot \tan \varphi \cdot (1 - \operatorname{sen} \varphi)^2 (D_f/B)$$

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

$$F_{cd} = 1 + 0.4 \tan^{(-1(D_f/B))}$$

$$F_{qd} = 1 + 2 \cdot \tan \varphi \cdot (1 - \operatorname{sen} \varphi)^2 \tan^{(-1(D_f/B))}$$

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

- Factores de inclinación:

$$F_{ci} = F_{qi} = (1 - \beta/90^\circ)^2$$

$$F_{\gamma i} = (1 - \beta/\varphi)^2$$

El uso combinado de estos factores, tal como recomienda Das (2010), permite obtener un valor de capacidad portante más fiel a las condiciones del sitio. Así, integrando los parámetros del estudio de suelos con las formulaciones mencionadas, se calcularon la capacidad última (q_{ult}) y la capacidad admisible (q_{adm}) para diferentes profundidades de cimentación, proporcionando una base sólida para la evaluación geotécnica de la losa proyectada.

Tabla 9*Cálculos de capacidad portante*

Tipo de cimentación	Losas de cimentación			
	1.000	1.300	1.500	1.800
Df	1.000	1.300	1.500	1.800
q	0.162	0.210	0.240	0.290
B	10.000	10.000	10.000	10.000
L	18.000	18.000	18.000	18.000
Y	1.615	1.615	1.615	1.615
Nc	12.399	12.399	12.399	12.399
Nq	4.186	4.186	4.186	4.186
Ny	1.360	1.360	1.360	1.360
Fcs	1.188	1.188	1.188	1.188
Fqs	2.443	2.440	2.440	2.440
Fys	0.778	0.778	0.778	0.778
Fcd	1.040	1.052	1.060	1.072
Fqd	1.032	1.041	1.047	1.057
Fyd	1.000	1.000	1.000	1.000
Fci	1.000	1.000	1.000	1.000
Fqi	1.000	1.000	1.000	1.000
Fyi	1.000	1.000	1.000	1.000
C	0.027	0.027	0.027	0.027
q ult	2.976	3.510	3.880	4.430
FS	3.000	3.000	3.000	3.000
q adm	0.992	1.170	1.290	1.480

3.6 Asentamiento elástico

El asentamiento de la cimentación se calculará en base a la teoría de la elasticidad (Lambe y Whitman, 1964). Se asume que el esfuerzo neto transmitido es uniforme en ambos casos. El asentamiento elástico inicial será: El asentamiento, se ha calculado mediante la teoría elástica, que está dado por la fórmula.

$$.S = q ((B(1 - \mu^2) \cdot N))/Es$$

Donde:

S = Asentamiento (cm)

q = Presión de contacto (Kg/cm²)

B = Ancho del área cargada (cm)

y = Relación de poisson = 0.25

Es = Modulo de Elasticidad del suelo (Kg/cm²) = 400

N = Valor de influencia que depende de la relación largo a ancho (L/B) del área cargada. 1.12 (zapatas cuadradas) 2.10 (cimientos corridos)

Tabla 10

Asentamientos según el EMS

Tipo de cimentación	Df (m)	B (m)	qult (kg/cm ²)	Es (kg/cm ²)	μ	N	S (cm)
Zapatas cuadradas	1.00	1.00	0.94	400	0.25	1.12	0.50
	1.00	1.50	1.00	400	0.25	1.12	0.78
	1.00	1.80	1.03	400	0.25	1.12	0.97
	1.30	1.00	1.10	400	0.25	1.12	0.58
	1.30	1.50	1.15	400	0.25	1.12	0.91
	1.30	1.80	1.18	400	0.25	1.12	1.12
	1.50	1.00	1.21	400	0.25	1.12	0.64
	1.50	1.50	1.26	400	0.25	1.12	0.99
	1.50	1.80	1.29	400	0.25	1.12	1.22
	1.80	1.00	1.37	400	0.25	1.12	0.72
	1.80	1.50	1.42	400	0.25	1.12	1.12
Cimentación corrida	1.80	1.80	1.45	400	0.25	1.12	1.37
	1.00	0.80	0.84	400	0.25	2.10	0.19
	1.20	0.80	0.93	400	0.25	2.10	0.21
	1.40	0.80	1.02	400	0.25	2.10	0.23
	1.60	0.80	1.11	400	0.25	2.10	0.25

Nota. Adaptada del Estudio de Mecánica de suelos de la Clínica Sanna (2024). Referente al asentamiento para este tipo de estructuras en esta zona será de 0.99cm. inferior a lo permisible que es 2.54 (1"), según la Norma E-0.50.

3.6.1 Verificación de asentamiento elásticos

La evaluación de los asentamientos elásticos permite verificar que las deformaciones inducidas por las cargas transmitidas al suelo se mantengan dentro de rangos compatibles con el comportamiento elástico del terreno y con los criterios de servicio de la estructura. En la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos para las distintas alternativas de cimentación analizadas, donde se observa que, si bien existen variaciones en la magnitud de los asentamientos calculados, todos los valores se encuentran por debajo del límite admisible de 2.54 cm establecido por la Norma E.050. Este análisis confirma que las cimentaciones evaluadas presentan asentamientos aceptables y que las dimensiones adoptadas resultan adecuadas para garantizar el correcto desempeño estructural y la seguridad del sistema de cimentación.

Tabla 11*Verificación de asentamientos elásticos*

Tipo de cimentación	Df (m)	B (m)	qult (kg/cm ²)	Es (kg/cm ²)	U	N	S (cm)
Cimentación cuadrada	1.00	1.00	1.069	400.00	0.25	1.12	0.281
	1.00	1.50	1.126	400.00	0.25	1.12	0.443
	1.00	1.80	1.160	400.00	0.25	1.12	0.548
	1.30	1.00	1.254	400.00	0.25	1.12	0.329
	1.30	1.50	1.311	400.00	0.25	1.12	0.516
	1.30	1.80	1.345	400.00	0.25	1.12	0.636
	1.50	1.00	1.377	400.00	0.25	1.12	0.362
	1.50	1.50	1.434	400.00	0.25	1.12	0.565
	1.50	1.80	1.469	400.00	0.25	1.12	0.694
	1.80	1.00	1.563	400.00	0.25	1.12	0.410
	1.80	1.50	1.620	400.00	0.25	1.12	0.638
	1.80	1.80	1.654	400.00	0.25	1.12	0.781
cimentación corrida	1.00	0.80	0.821	400.00	0.25	2.10	0.323
	1.20	0.80	0.910	400.00	0.25	2.10	0.358
	1.40	0.80	1.000	400.00	0.25	2.10	0.394
	1.60	0.80	1.089	400.00	0.25	2.10	0.429

3.6.2 Verificación de asentamientos en una losa de cimentación

Para el cálculo de los asentamientos elásticos de la losa de cimentación, se empleó la formulación propuesta por Steinbrenner, la cual permite estimar la deformación vertical considerando la presión neta aplicada, las propiedades elásticas del suelo y la geometría de la cimentación. En esta metodología intervienen factores de influencia que dependen de la relación entre las dimensiones de la losa y la profundidad del estrato deformable. En particular, los coeficientes F_1 y F_2 , así como los exponentes m' y n' , fueron obtenidos a partir de tablas normalizadas. Los valores correspondientes al coeficiente F_1 se presentan en la Tabla 12, mientras que los valores del coeficiente F_2 se muestran en la Tabla 13, los cuales fueron empleados directamente en la estimación de los asentamientos elásticos mediante la expresión de Steinbrenner.

$$Se = q^0(aB) \cdot \frac{(1 - \mu_s^2)}{Es} I_s \cdot I_f$$

Donde:

q_0 : presión neta aplicada sobre la cimentación

μ_s : coeficiente de Poisson del suelo

E_s : módulo de elasticidad promedio del suelo desde $z=0$ hasta $z=4B$

B' : dimensión equivalente para el centro o esquina de la cimentación

Is: factor de forma (Steinbrenner, 1934)

If: factor de influencia

Tabla 12

Variación de F1 con m' y n'

n'	m'									
	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0.25	0.014	0.013	0.013	0.012	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
0.50	0.049	0.046	0.044	0.041	0.040	0.040	0.038	0.038	0.037	0.037
0.75	0.095	0.090	0.087	0.084	0.082	0.080	0.077	0.076	0.074	0.074

Nota. Adaptada a partir de Das (2010).

Tabla 13

Variación de F2 con m' y n'

n'	m'									
	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0.25	0.049	0.050	0.051	0.051	0.051	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052
0.50	0.074	0.077	0.080	0.081	0.083	0.084	0.085	0.087	0.087	0.087
0.75	0.083	0.089	0.093	0.097	0.099	0.101	0.104	0.106	0.107	0.108

Nota. Adaptada a partir de Das (2010).

Este análisis permite comprobar la compatibilidad entre la rigidez de la losa y las propiedades elásticas del terreno de fundación, garantizando un comportamiento estructural adecuado. En este contexto, se determinan los asentamientos elásticos para diferentes configuraciones geométricas de la losa, considerando la presión neta aplicada y los parámetros elásticos del suelo, con el fin de evaluar la influencia de las dimensiones de la cimentación en la magnitud de los asentamientos obtenidos.

Tabla 14

Asentamientos elásticos para losa de cimentación

Tipo de cimentación	Df	B	L	qu _t (kg/cm ²)	Es (kg/cm ²)	U	Is	If	S (cm)
Losa de cimentación	1.00	10.00	18.00	2.976	400.00	0.25	0.055	1.00	0.387
	1.30	10.00	18.00	3.513	400.00	0.25	0.055	1.00	0.457
	1.50	10.00	18.00	3.875	400.00	0.25	0.055	1.00	0.504
	1.80	10.00	18.00	4.428	400.00	0.25	0.055	1.00	0.576

3.7 Determinación del tipo de cimentación

El análisis del tipo de cimentación adecuado para el proyecto partió del reconocimiento detallado de las condiciones del suelo en el área de estudio. Los resultados del estudio de mecánica de suelos evidenciaron la presencia de estratos arenosos clasificados como SP y SP-SM, caracterizados por su baja plasticidad, compacidad media y ausencia de nivel freático dentro de la profundidad explorada. Estas características son consideradas favorables para la implementación de cimentaciones superficiales, siempre que se verifiquen los criterios de capacidad portante y asentamientos establecidos por la Norma Técnica E.050 “Suelos y Cimentaciones” (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS, 2018).

Con esta información como base, se evaluaron tres alternativas de cimentación que se ajustan a las particularidades del terreno y a las necesidades estructurales del proyecto: zapatas corridas, zapatas combinadas y platea o losa de cimentación. La comparación entre estas opciones buscó no solo identificar cuál cumple con los criterios técnicos, sino también determinar su viabilidad constructiva y económica dentro del contexto específico de la edificación proyectada.

En primer lugar, se consideró el uso de zapatas corridas. Este tipo de cimentación consiste en elementos lineales de concreto armado que transmiten las cargas distribuidas de muros o elementos continuos hacia el terreno. Su eficacia en suelos arenosos, donde la resistencia depende principalmente de la fricción interna entre partículas, coincide con las características identificadas en el terreno del proyecto. De acuerdo con la E.050, esta solución es adecuada cuando el suelo presenta uniformidad y capacidad portante suficiente, como es el caso de los estratos analizados (MVCS, 2018). Su principal ventaja radica en que ofrece una construcción sencilla, económica y con asentamientos controlables. No obstante, su desempeño puede verse limitado en situaciones donde predominan cargas puntuales o columnas aisladas, ya que la distribución lineal de esfuerzos exige continuidad estructural para evitar asentamientos diferenciales. A pesar de ello, para la mayor parte del proyecto, la zapata corrida se presenta como una opción eficiente y acorde a las condiciones del suelo (MVCS, 2018).

La segunda alternativa evaluada fue la zapata combinada. Este tipo de cimentación se utiliza cuando la proximidad entre columnas o la cercanía a los límites del terreno dificulta el uso de zapatas aisladas sin incurrir en excentricidades significativas. Su diseño permite centrar la resultante de cargas y mejorar la distribución de esfuerzos, lo cual contribuye a una mayor estabilidad estructural. La E.050 reconoce esta solución como adecuada para situaciones en las que la geometría del terreno impone restricciones o cuando se requiere controlar tensiones excesivas en la base de apoyo (MVCS, 2018). Entre sus ventajas, destaca su capacidad para reducir asentamientos diferenciales entre columnas cercanas. Sin embargo, presenta una mayor complejidad constructiva y demanda un mayor volumen de concreto y acero, lo cual incrementa su costo. Debido a ello, su aplicación en este proyecto se limita a

sectores puntuales donde la disposición estructural genera excentricidades inevitables (MVCS, 2018).

Finalmente, se analizó la alternativa de platea o losa de cimentación. Este sistema consiste en una losa de concreto armado que cubre toda el área de la edificación y distribuye las cargas de manera uniforme hacia el suelo. Se trata de una solución robusta que brinda un excelente control de asentamientos diferenciales y un desempeño estructural sobresaliente, especialmente en suelos de baja capacidad portante o en edificaciones con altas cargas verticales. No obstante, la Norma E.050 aclara que su empleo debe justificarse cuando otras opciones no permitan cumplir con los requisitos de estabilidad y asentamientos (MVCS, 2018). En el caso de este proyecto, el terreno ofrece una capacidad portante adecuada y no presenta condiciones críticas como saturación o estratos compresibles profundos, por lo que la platea representa una alternativa técnicamente válida, pero económicamente innecesaria debido a su elevado costo y a la exigencia de controles constructivos rigurosos.

3.8 Verificación de cumplimiento de normativa

El terreno está compuesto por arenas mal gradadas y arenas limosas (SP–SM), con una compacidad media y sin presencia de nivel freático hasta los 3.00 m explorados, condiciones que coinciden con los criterios de la E.050 para considerar cimentaciones superficiales. Además, los ensayos de corte directo señalan un ángulo de fricción interna de 30° y cohesión baja ($c = 0.041 \text{ kg/cm}^2$), valores compatibles con un comportamiento predominantemente granular.

En cuanto a la capacidad portante, la normativa exige demostrar que la presión transmitida al suelo no exceda la capacidad admisible determinada mediante ensayos o métodos teóricos. El estudio calcula capacidades admisibles entre 0.93 y 1.26 kg/cm^2 para zapatas superficiales, empleando los métodos de Terzaghi–Peck y Vesic. La presión generada por las cargas del proyecto es inferior a 1.50 kg/cm^2 , por lo que se verifica que el diseño cumple con lo requerido por la E.050 respecto a capacidad portante, manteniendo además un factor de seguridad acorde a lo estipulado por la normativa.

La norma también establece límites para los asentamientos totales y diferenciales, de modo que la edificación no presente deformaciones que afecten su funcionamiento. Usando un módulo de elasticidad $E_s = 400 \text{ kg/cm}^2$ y coeficiente de Poisson de 0.25, el estudio estima asentamientos entre 1.12 y 3.34 cm, dependiendo de las dimensiones de las zapatas analizadas. La E.050 considera adecuados asentamientos totales del orden de 2.5 cm para edificaciones convencionales; sin embargo, el comportamiento uniforme del perfil arenoso permite concluir que los asentamientos diferenciales serán mínimos, lo cual mantiene la edificación dentro de los parámetros aceptables para su operación, sin riesgo significativo de daños estructurales.

La estabilidad global también fue revisada según las exigencias de la E.050. El coeficiente de fricción suelo–concreto utilizado en el análisis es de 0.25, valor indicado en el estudio como característico del terreno, y suficiente para asegurar resistencia frente a cargas horizontales. La ausencia de nivel freático, confirmada en los sondeos hasta tres metros, evita problemas de reducción de resistencia o socavación durante la vida útil de la cimentación

Asimismo, se verificó que la resultante de cargas se mantiene dentro del tercio central de las zapatas, cumpliendo el criterio de no generar tensiones de tracción en la base, condición indispensable según la E.050.

En relación con la verificación estructural, la cimentación se evaluó de acuerdo con los criterios de la Norma Técnica E.060 “Concreto Armado”. Para ello se consideró el coeficiente de balasto de 2.72 kg/cm^3 proporcionado por el estudio, lo que permitió revisar adecuadamente la resistencia a punzonamiento, cortante y momento flector. Los resultados confirman que la cimentación propuesta cumple los requisitos estructurales establecidos y garantiza un comportamiento adecuado durante su vida útil

Finalmente, la verificación constructiva confirma que el terreno presenta condiciones favorables para la ejecución de cimentaciones superficiales, tal como se indica en el estudio geotécnico. La excavación puede realizarse sin problemas de estabilidad, la compactación al 95 % Proctor modificado es factible y no existen interferencias de agua subterránea que requieran bombeo o sistemas de drenaje especiales. El estudio recomienda el uso de concreto tipo MS debido a la presencia de sales en baja concentración, lo que contribuye a la durabilidad de la cimentación en concordancia con la E.050.

3.9 Análisis de impacto técnico y económico

La última etapa metodológica consistió en la comparación sistemática de las alternativas de cimentación mediante un enfoque integral que combinó criterios técnicos y económicos. Este tipo de análisis resulta fundamental para seleccionar la solución más adecuada, ya que no solo considera la capacidad portante del suelo, sino también el comportamiento estructural ante asentamientos, excentricidades de carga y la viabilidad constructiva del sistema elegido. De acuerdo con Bowles (1996), una cimentación eficiente debe cumplir simultáneamente con los requisitos de seguridad estructural, control de deformaciones y economía de obra, especialmente en suelos de resistencia media.

Desde el punto de vista técnico, se evaluaron tres alternativas de cimentación: zapata corrida, zapata combinada y platea de cimentación. La comparación se realizó considerando criterios como el tipo de carga transmitida, la compatibilidad con el suelo, el comportamiento ante asentamientos, la respuesta frente a excentricidades y la estabilidad global del sistema. Esta evaluación técnica general se presenta en la Tabla 15, la cual permite identificar las ventajas y limitaciones de cada alternativa en función de las condiciones geotécnicas y estructurales del proyecto.

Tabla 15*Comparación técnica general de alternativas de cimentación*

Criterio técnico	Zapata corrida	Zapata combinada	Platea de cimentación
Tipo de carga	Distribuida y moderada	Excentricidades y cargas combinadas	Cargas altas o columnas muy próximas
Suelo compatible	Suelos granulares SM–ML	Suelos granulares con variaciones moderadas	Suelos blandos o con alta variabilidad
Comportamiento ante asentamientos	Bueno	Muy bueno	Excelente
Respuesta ante excentricidades	Regular	Muy buena	Excelente
Estabilidad global	Alta	Muy alta	Muy alta
Complejidad constructiva	Baja	Media	Alta
Riesgo técnico	Bajo	Bajo	Muy bajo
Adecuación al proyecto	Muy adecuada	Adecuada en zonas específicas	Técnicamente viable, pero sobredimensionada

Nota. Elaboración propia con base en Bowles (1996) y Das (2010).

Complementariamente, se realizó un análisis económico preliminar con el objetivo de estimar los costos asociados a cada alternativa, considerando el consumo de materiales, la mano de obra requerida, el tiempo de ejecución y los costos indirectos de supervisión y control. Este análisis resulta relevante, ya que soluciones técnicamente eficientes pueden no ser económicamente viables para el alcance del proyecto. La Tabla 16 presenta la comparación económica entre las alternativas de cimentación evaluadas.

Tabla 16*Comparación económica entre alternativas de cimentación*

Criterio económico	Zapata corrida	Zapata combinada	Platea de cimentación
Costo estimado (\$/ por m ²)	380 – 450	500 – 650	900 – 1200
Tiempo de ejecución	10 – 14 días	12 – 18 días	22 – 30 días
Requerimiento de concreto	Bajo	Medio	Alto
Requerimiento de acero	Bajo	Medio	Muy alto
Mano de obra	Estándar	Especializada moderada	Más especializada
Equipos necesarios	Básicos	Básicos–intermedios	Equipos avanzados
Costo indirecto	Bajo	Medio	Alto

Nota. Estimaciones referenciales basadas en experiencias de proyectos similares (Mendoza, 2023).

Con el fin de cuantificar el desempeño estructural de cada alternativa, se evaluó el impacto técnico de la cimentación en términos de asentamientos totales y diferenciales, presión transmitida al suelo y capacidad de control frente a momentos inducidos. Estos parámetros permiten comparar objetivamente el comportamiento suelo–estructura de cada sistema. Los resultados de esta evaluación se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17*Impacto técnico de la cimentación*

Aspecto evaluado	Zapata corrida	Zapata combinada	Platea
Asentamiento total estimado	12 – 18 mm	10 – 15 mm	5 – 8 mm
Asentamiento diferencial	6 – 10 mm	5 – 8 mm	2 – 4 mm
Presión transmitida al suelo	Baja	Media	Muy baja
Control ante momentos	Medio	Alto	Muy alto
Rigidización de la base estructural	Media	Media–alta	Muy alta

Nota. Resultados obtenidos del análisis geotécnico y estructural del proyecto, siguiendo criterios de Das (2010).

De manera análoga, se cuantificó el impacto económico relativo de cada sistema de cimentación, comparando el consumo de concreto, acero, mano de obra y los tiempos adicionales asociados al control técnico. Esta evaluación permitió establecer relaciones de costo entre las alternativas, tal como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18*Impacto económico del sistema de cimentación*

Categoría	Zapata corrida	Zapata combinada	Platea
Costo total relativo	1.0 (base)	1.5	2.1
Consumo de concreto	1.0	1.4	2.7
Consumo de acero	1.0	1.35	2.0
Mano de obra	1.0	1.2	1.6
Días adicionales por control	0	2 – 4	8 – 12

Finalmente, se integraron los resultados técnicos y económicos en una evaluación global que permitió determinar la alternativa más conveniente desde una perspectiva costo–beneficio. Esta síntesis comparativa se presenta en la Tabla 19, a partir de la cual se establece la recomendación final del sistema de cimentación.

Tabla 19*Evaluación global técnico-económica*

Criterio global	Zapata corrida	Zapata combinada	Platea
Seguridad estructural	Alta	Alta	Muy alta
Control de asentamientos	Adecuado	Muy bueno	Excelente
Economía de obra	Muy económica	Económica	Poco económica
Tiempo de ejecución	Corto	Medio	Largo
Relación costo–beneficio	Muy alta	Alta	Baja
Recomendación final	Recomendada	Recomendada en zonas específicas	No recomendada

Nota. Evaluación integral basada en criterios técnicos y económicos del proyecto.

3.10 Discusión

Los resultados obtenidos en la presente investigación permiten analizar de manera integral el comportamiento geotécnico y estructural de la cimentación propuesta en el Estudio de Mecánica de Suelos del proyecto, contrastando los valores calculados con los consignados en dicho estudio y con los criterios establecidos en la normativa técnica vigente.

El comportamiento mecánico del suelo observado en los ensayos SPT muestra una tendencia positiva en la que la resistencia aumenta con la profundidad. Este patrón refleja un proceso natural de consolidación y compactación progresiva del material granular, lo que resulta favorable para el diseño de cimentaciones. La homogeneidad del perfil es un aspecto

particularmente relevante, ya que reduce la posibilidad de asentamientos diferenciales, problema señalado en la literatura geotécnica como una de las principales causas de deterioro prematuro en edificaciones cimentadas sobre suelos heterogéneos. Esta estabilidad también fue reportada en la tesis de Mendoza (2023), quien evidenció en proyectos hospitalarios de Cajamarca que suelos granulares con resistencia creciente en profundidad presentan un desempeño altamente confiable para cimentaciones superficiales.

Los parámetros de resistencia al corte, obtenidos mediante los ensayos de laboratorio, reflejan un ángulo de fricción interna cercano a los 30° y una cohesión muy baja. Este comportamiento es propio de suelos granulares densos o medianamente densos, en los que la resistencia depende fundamentalmente del rozamiento entre partículas y no de la presencia de arcillas o limos cohesivos. Estos resultados son congruentes con lo planteado por Bowles (1996) en su clasificación de suelos arenosos, donde señala que valores de fricción en este rango corresponden a materiales con capacidad portante moderada, adecuados para cimentaciones superficiales. Asimismo, la investigación de Palaco y Rodríguez (2022), enfocada en edificaciones de concreto armado en Tacna, reportó valores similares en suelos granulares finos, reforzando la consistencia de la respuesta del suelo piurano frente a los esfuerzos transmitidos por estructuras tipo consultorio.

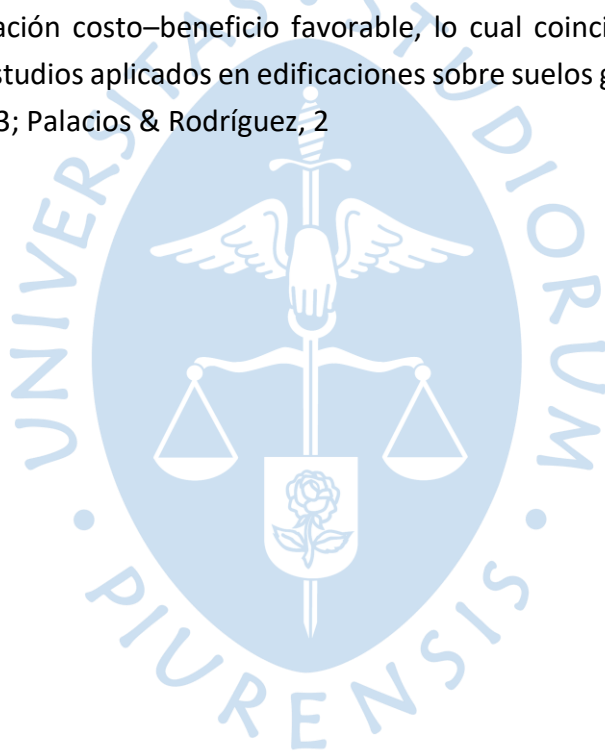
En lo referente a la capacidad portante, los valores obtenidos mediante los métodos de Terzaghi–Peck y de Vesic se ubican dentro del rango esperado para suelos SM–ML, y superan de manera holgada las demandas estructurales previstas para la edificación. Esta concordancia resulta relevante, ya que estudios como los de Pantelidis (2024) señalan que la capacidad portante en este tipo de suelos tiende a mejorar ligeramente con la profundidad debido a la reducción de la holgura entre partículas y al aumento del confinamiento lateral. Los valores obtenidos en el presente estudio se encuentran alineados con esta tendencia, lo cual brinda seguridad adicional para la aplicación de cimentaciones superficiales.

Los asentamientos estimados mediante la teoría elástica se mantienen dentro de rangos normativos. Los suelos granulares suelen presentar asentamientos inmediatos predominantes y muy poco asentamiento diferido, debido a su excelente capacidad de drenaje. Este comportamiento es particularmente favorable para estructuras como consultorios médicos, que requieren un desempeño estable a lo largo del tiempo. Mendoza (2023) reportó resultados similares en edificaciones hospitalarias construidas sobre suelos arenosos, donde los asentamientos totales no superaron los 15 mm, valor cercano a los obtenidos en este estudio. Además, la relativa uniformidad del estrato minimiza el riesgo de asentamientos diferenciales significativos, un hallazgo también resaltado por Zamora (2022), quien observó que la variabilidad del contenido de finos es un factor determinante en el comportamiento deformacional del terreno.

Otro elemento importante es la ausencia de condiciones problemáticas, como suelos expansivos, colapsables o con presencia de materia orgánica, así como la no identificación de

nivel freático en los sondeos realizados. Este conjunto de características reduce considerablemente los riesgos geotécnicos asociados, lo cual contrasta positivamente con estudios internacionales como el de Yao et al. (2023), quienes analizaron cimentaciones en suelos blandos reforzados con pilotes y vigas de amarre, destacando los desafíos que presentan los terrenos de baja competencia y alto contenido de humedad. En comparación, el terreno de Piura ofrece condiciones mucho más favorables, lo que permite una ejecución sencilla y segura de cimentaciones superficiales.

Desde el enfoque técnico - económico, el análisis comparativo de las alternativas de cimentación evidenció que, aunque la platea ofrece un mejor control de asentamientos y una mayor rigidez estructural, su aplicación implica un incremento significativo en los costos y tiempos de ejecución. En contraste, la zapata corrida presenta un desempeño técnico adecuado para las condiciones del suelo evaluado, con asentamientos dentro de los límites normativos y una relación costo-beneficio favorable, lo cual coincide con lo señalado por Bowles (1996) y con estudios aplicados en edificaciones sobre suelos granulares de resistencia media (Mendoza, 2023; Palacios & Rodríguez, 2



Conclusiones

El análisis cuantitativo desarrollado en la presente investigación demuestra una alta consistencia entre los resultados de capacidad portante obtenidos y los valores reportados en el Estudio de Mecánica de Suelos del proyecto. Los parámetros resistentes empleados, particularmente un ángulo de fricción interna cercano a 30° y una cohesión muy baja, son representativos de suelos granulares medianamente densos y generan capacidades últimas comprendidas entre 2.83 kg/cm^2 y 4.35 kg/cm^2 . Al aplicar un factor de seguridad de 3.00 conforme a la Norma Técnica E.050, se obtienen capacidades admisibles que garantizan un diseño seguro, evidenciando que las ligeras diferencias con el estudio base no comprometen la estabilidad ni el nivel de seguridad de la cimentación.

La comparación directa entre las presiones transmitidas por la superestructura y la capacidad admisible del terreno confirma que el estado límite último por falla de corte no es alcanzado en ningún escenario analizado. Las presiones de contacto, inferiores a 1.50 kg/cm^2 , se mantienen por debajo de la resistencia admisible del suelo, lo que valida técnicamente la solución de cimentación propuesta y demuestra que los factores de seguridad adoptados son adecuados para garantizar un comportamiento confiable del sistema suelo-cimiento bajo cargas de servicio.

El análisis de asentamientos elásticos, realizado mediante la teoría de Lambe y Whitman y formulaciones complementarias, evidencia que los asentamientos inmediatos calculados para las zapatas superficiales se encuentran en el rango de 0.99 cm a 1.12 cm, valores significativamente menores al límite máximo permisible de 2.54 cm establecido por la Norma E.050. Este resultado confirma que el criterio de estado límite de servicio se cumple satisfactoriamente, asegurando la funcionalidad y durabilidad de la edificación.

Desde el punto de vista geotécnico, la uniformidad del perfil estratigráfico, compuesto principalmente por arenas finas clasificadas como SP y SP-SM, junto con la ausencia de nivel freático hasta los 3.00 m de profundidad investigados, reduce de manera considerable el riesgo de asentamientos diferenciales. Estas condiciones permiten mantener constantes las tensiones efectivas y la rigidez del suelo, lo que contribuye a un comportamiento deformacional estable de la cimentación.

El análisis técnico-económico desarrollado constituye un aporte relevante de la presente tesis, al integrar criterios de desempeño estructural y viabilidad económica en la selección del sistema de cimentación. Los resultados evidencian que, si bien soluciones más rígidas como la platea de cimentación ofrecen un mejor control de asentamientos, su aplicación implica un incremento significativo en costos y tiempos de ejecución. En contraste, la zapata corrida presenta un desempeño técnico compatible con las condiciones del suelo y una relación costo-beneficio favorable, lo que la convierte en la alternativa más eficiente para el proyecto analizado.

En conjunto, los resultados obtenidos validan y complementan el Estudio de Mecánica de Suelos del proyecto, aportando un análisis comparativo detallado que refuerza la toma de decisiones en el diseño de cimentaciones superficiales. Se concluye que el diseño propuesto para la infraestructura de la Clínica SANNA en Piura es geotécnicamente seguro, técnicamente viable y económicamente eficiente, con márgenes adecuados de seguridad y deformaciones compatibles con el comportamiento estructural esperado.



Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda continuar con el diseño y la ejecución de cimentaciones superficiales mediante zapatas corridas y combinadas, en función de la distribución de cargas y la disposición de los elementos estructurales. Estas soluciones resultan compatibles con el comportamiento del suelo identificado y presentan una relación costo–beneficio favorable, permitiendo un desempeño estructural seguro y confiable durante la vida útil de la edificación, siempre que se cumplan los criterios de diseño y ejecución establecidos por la normativa vigente.

Como alternativa técnica, se recomienda considerar de manera puntual el uso de una losa de cimentación, especialmente en zonas donde se requiera una mayor rigidez estructural o un mejor control de asentamientos diferenciales. Si bien esta solución permite una distribución más uniforme de las cargas y reduce la sensibilidad frente a variaciones locales del suelo, su aplicación debe evaluarse cuidadosamente debido al incremento en los costos y tiempos de ejecución, siendo justificable únicamente cuando las condiciones estructurales o funcionales del proyecto lo demanden.

Asimismo, es indispensable garantizar una adecuada preparación del terreno antes de la ejecución de la cimentación, mediante la limpieza, nivelación y compactación uniforme del fondo de excavación. Estas actividades permiten asegurar una respuesta homogénea del suelo y minimizar el riesgo de deformaciones diferenciales que puedan afectar el desempeño estructural de la edificación.

Finalmente, se recomienda contar con una supervisión geotécnica permanente durante las labores de excavación y cimentación, a fin de verificar que las condiciones reales del subsuelo coincidan con las previstas en el estudio de mecánica de suelos. Esta supervisión permitirá identificar oportunamente posibles variaciones en la estratigrafía o en el estado del suelo y adoptar medidas correctivas que garanticen la estabilidad, seguridad y eficiencia económica del sistema de cimentación.

Referencias

- Adanaqué, L. M. (2022). Determinación de la capacidad portante del suelo de fundación en las manzanas de Rinconada de Piura II – Sub Etapa A y B [Tesis de licenciatura]. Registro Nacional de Trabajos de Investigación – RENATI. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/renati/964265>
- Ahmad, S., Faisal, M., & Khan, M. U. (2023). Effect of moisture content at compaction and grain size distribution on the shear strength of unsaturated soils. *Sustainability*, 15(6), 5123. <https://doi.org/10.3390/su15065123>
- Alarcón Pejerrey, G. R., & Terán Cotrina, J. W. (2019). Variación de los parámetros de resistencia al corte con diferentes grados de saturación en suelos cohesivos [Tesis de pregrado]. Universidad de San Martín de Porres. <https://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/6059>
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2018). AASHTO M 145: Standard specification for classification of soils and soil-aggregate mixtures. AASHTO.
- American Concrete Institute. (2019). ACI 318-19: Building code requirements for structural concrete. ACI.
- ASTM International. (2016). ASTM D1586: Standard test method for standard penetration test (SPT) and split-barrel sampling of soils. ASTM International.
- ASTM International. (2017). ASTM D3080/D3080M: Standard test method for direct shear test of soils. ASTM International.
- ASTM International. (2017). ASTM D698: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. ASTM International
- ASTM International. (2020). ASTM D2487: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International.
- Baltazar Miranda, C. (2019). Alternativas estructurales de diseño en cimentaciones superficiales fundadas en tres tipos de suelos [Tesis de licenciatura]. Universidad Continental. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/5341>
- Bolaños, J., & Hurtado, M. (2022). Effects of soil test variability in the bearing capacity of shallow foundations. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00618-9>

- Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Bowles, J. E. (2022). *Foundation analysis and design* (7th ed.). McGraw-Hill Education.
- Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A. (2016). *Fundamentals of geotechnical engineering* (4th ed.). Pearson.
- Das, B. M. (1999). *Principles of foundation engineering* (4th ed.). PWS Publishing.
- Das, B. M. (2015). *Principios de ingeniería geotécnica* (8.ª ed.). Cengage Learning.
- European Committee for Standardization. (2020). EN 1997-1: Eurocode 7 – Geotechnical design. CEN.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2011). *An introduction to geotechnical engineering* (2nd ed.). Pearson.
- Juárez, E., Rico, A., & Gómez, R. (2023). *Mecánica de suelos aplicada a la ingeniería civil* (3.ª ed.). Editorial Limusa.
- Lukueta, E. K., & Isobe, K. (2024). Bearing capacity of shallow foundations above soil with a cavity. *Applied Sciences*, 14(5), 1975. <https://doi.org/10.3390/app14051975>
- Mayne, P. W. (2023). *Contributions towards geoparameter evaluation using CPT*. University of Kansas.
- Mendoza Ramírez, Y. E. (2023). *Mecánica de suelos aplicada a la verificación de capacidad de carga para cimentaciones en infraestructura hospitalaria* [Tesis]. Universidad Nacional de Cajamarca. <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/5797>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). Norma Técnica E.050: Suelos y cimentaciones. Reglamento Nacional de Edificaciones. <https://www.gob.pe/vivienda>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2023). Norma Técnica E.050: Suelos y cimentaciones. Reglamento Nacional de Edificaciones. <https://www.gob.pe/vivienda>
- Pantelidis, L. (2024). Settlement analysis of shallow foundations on granular soils. *Geotechnical Engineering*, 177(2), 156–168. <https://doi.org/10.1680/jgeen.23.00045>
- Robertson, P. K., & Cabal, K. L. (2022). *Guide to cone penetration testing* (7th ed.). Gregg Drilling.

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). Soil mechanics in engineering practice (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Tomlinson, M. J., & Woodward, J. (2021). Pile design and construction practice (6th ed.). CRC Press.

Yao, Y., Hong, B., Liu, X., Wang, G., Shao, Z., & Sun, D. (2023). Pipe-pile-reinforced soft soil foundations with tie beams. *Applied Sciences*, 13(21), 11786. <https://doi.org/10.3390/app132111786>

Zamora Huancas, A. P. (2022). Determinación de la capacidad portante del suelo de fundación en las manzanas de Rinconada de Piura V [Tesis]. RENATI. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/renati/96453>

