

ESTUDIO COMPARATIVO DE METODOLOGÍAS CLÁSICAS EN EL DISEÑO DE  
CIMENTACIONES SUPERFICIALES Y SU APLICACIÓN PRÁCTICA



MARIA HELENA NUÑEZ FIERRO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
VILLAVICENCIO

2025

ESTUDIO COMPARATIVO DE METODOLOGÍAS CLÁSICAS EN EL DISEÑO DE  
CIMENTACIONES SUPERFICIALES Y SU APLICACIÓN PRÁCTICA

MARIA HELENA NUÑEZ FIERRO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Asesor

Ing. JUAN MANUEL SALGADO DIAZ, Msc

Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Infraestructura Vial

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
VILLAVICENCIO

2025

**Autoridades Académicas**

**P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O. P.**

Rector General

**P. Mauricio Antonio CORTÉS GALLEGO, O. P.**

Vicerrector Académico General

**P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O. P.**

Rector Seccional Villavicencio

**P. Adrián Mauricio GARCIA PEÑARANDA, O. P.**

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

**Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN**

Secretaria General Seccional Villavicencio

**Ing. Luis Fernando DÍAZ CRUZ**

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil

## Contenido

	Pág.
Resumen .....	10
Abstract.....	11
Glosario.....	12
Introducción.....	13
1. Alcance .....	14
2. Formulación del problema.....	15
2.1. Identificación del problema.....	15
2.2. Formulación del Problema .....	15
3. Objetivos .....	16
3.1. Objetivo General .....	16
3.2. Objetivos específicos.....	16
4. Estado del arte .....	17
4.1. Fundamentos del Diseño de Cimentaciones Superficiales.....	17
4.2. Modelos Clásicos de Capacidad de Carga y Asentamientos.....	17
4.3. Factores que Afectan la Capacidad de Carga en Cimentaciones Superficiales .....	18
4.4. Métodos para la Evaluación de Asentamientos en Cimentaciones Superficiales .....	18
4.5. Normativas Internacionales y Factores de Seguridad en el Diseño de Cimentaciones..	19
4.6. Aplicación de Modelado Computacional en Cimentaciones: GEO5 (Software versión demo)	19
4.7. Cimentaciones en Suelos Granulares vs. Suelos Cohesivos .....	19
4.8. Interacción Suelo-Estructura y su Impacto en el Diseño de Cimentaciones.....	20
4.9. Innovaciones en Métodos de Diseño Basados en Inteligencia Artificial.....	20
4.10. Cimentaciones en Condiciones Sísmicas: Diseño y Normativa Aplicable .....	20
4.11. Impacto del Nivel Freático en el Diseño de Cimentaciones.....	20
4.12. Comparación de Métodos Empíricos vs. Métodos Numéricos en Diseño Geotécnico .....	20
4.13. Tendencias y Retos Futuros en el Diseño de Cimentaciones Superficiales .....	20
4.14. Análisis Comparativo de Modelos Numéricos vs. Métodos Empíricos.....	21

4.15.	Influencia del Nivel Freático en el Diseño de Cimentaciones.....	21
4.16.	Evaluación Normativa en Distintas Regiones .....	22
5.	Desarrollo metodológico .....	23
5.1.	Identificar los principales parámetros geotécnicos y estructurales que influyen en el diseño de cimentaciones superficiales .....	23
5.1.1	Parámetros geotécnicos relevantes .....	23
5.1.2	Parámetros estructurales relevantes .....	24
5.1.3	Criterios de selección para análisis comparativo .....	25
5.2.	Describir los fundamentos teóricos, supuestos y limitaciones de las metodologías de Terzaghi, Meyerhof y Vesic.....	26
5.2.1	Método de Terzaghi (1943) .....	26
5.2.2	Método de Meyerhof (1951).....	27
5.2.3	Método de Vesic (1973).....	28
5.2.4	Comparación entre los tres métodos.....	28
5.3.	Aplicar cada metodología mediante ejercicios de cálculo manual en suelos cohesivos y granulares, considerando casos representativos.....	29
5.3.1	Aplicabilidad práctica y representatividad.....	29
5.3.2	Compatibilidad con las metodologías clásicas .....	30
5.3.3	Control de variables para análisis comparativo .....	30
5.3.4	Selección de factores de capacidad de carga y factores de corrección .....	30
5.4.	Cálculo de Asentamientos Estimados en Cimentaciones Superficiales.....	32
5.4.1	Fundamento teórico (suelos cohesivos).....	33
5.4.2	Cálculo de asentamiento inmediato (Caso Hipotético – Granular $\phi = 34^\circ$ ) .....	34
5.4.3	Cálculo de asentamiento inmediato (Cubarral – Suelo GM).....	35
5.5.	Comparar los resultados obtenidos para establecer criterios técnicos que orienten la selección de la metodología más adecuada según las condiciones del terreno.....	36
5.5.1	Análisis comparativo de resultados .....	36
5.5.2	Establecimiento de criterios técnicos.....	37
	Conclusiones.....	39
	Referencias bibliográficas .....	41
	Anexos .....	44

**Lista de Tablas**

	Pág.
<b>Tabla 1</b> Parámetros geotécnicos relevantes .....	23
<b>Tabla 2</b> Parámetros estructurales relevantes .....	25
<b>Tabla 3</b> Comparación entre los tres métodos .....	28
<b>Tabla 4</b> Resultados comparativos .....	32
<b>Tabla 5</b> Resumen de resultados.....	35
<b>Tabla 6</b> Criterios técnicos .....	38

**Lista de Figuras**

Pág.

**Figura 1** Comparación de *qadm* entre métodos por tipo de suelo ..... 37

**Lista de Ecuaciones**

<b>Ecuación 1</b> <i>Capacidad portante última Terzaghi</i> .....	26
<b>Ecuación 2</b> <i>Capacidad portante última Meyerhof</i> .....	27
<b>Ecuación 3</b> <i>Capacidad portante última Vesic</i> .....	28
<b>Ecuación 4</b> <i>Factores de forma Vesic (1973)</i> .....	31
<b>Ecuación 5</b> <i>Factores de profundidad Meyerhof (1951)</i> .....	31
<b>Ecuación 6</b> <i>Ecuación clásica de consolidación</i> .....	33
<b>Ecuación 7</b> <i>Ecuación asentamiento inmediato</i> .....	34

**Lista de Anexos**

	Pág.
<b>Anexo 1</b> Parámetros Geotécnicos Torres A y B.....	44
<b>Anexo 2</b> Parámetros Geotécnicos Cubarral.....	44
<b>Anexo 3</b> Cálculo Capacidad Portante y Asentamientos .....	44

## Resumen

Esta monografía presenta un análisis comparativo de tres metodologías clásicas utilizadas en el diseño de cimentaciones superficiales: Terzaghi, Meyerhof y Vesic. El estudio se enfoca en evaluar la capacidad de carga y los asentamientos generados en suelos cohesivos y granulares, mediante el desarrollo de ejercicios de cálculo manual y la validación con datos reales de estudios de suelos en el departamento del Meta (Colombia). Se establecen criterios técnicos para seleccionar la metodología más adecuada en función de las condiciones geotécnicas del terreno, considerando los factores de forma, profundidad, resistencia al corte y deformabilidad del suelo. Los resultados revelan diferencias significativas entre las metodologías analizadas, con variaciones de hasta un 30% en la capacidad de carga admisible. Se concluye que el uso combinado de métodos clásicos con herramientas computacionales y criterios técnicos específicos mejora la precisión en el diseño y contribuye a la toma de decisiones fundamentadas en proyectos de infraestructura.

**Palabras Clave:** capacidad de carga, asentamientos, cimentaciones superficiales, Terzaghi, Meyerhof, Vesic, suelos cohesivos, suelos granulares.

### **Abstract**

This monograph presents a comparative analysis of three classical methodologies used in the design of shallow foundations: Terzaghi, Meyerhof, and Vesic. The study focuses on evaluating bearing capacity and settlement in cohesive and granular soils through manual calculation exercises and validation using real geotechnical data from the Meta department in Colombia. Technical criteria are established to select the most suitable method based on soil properties, including correction factors for shape, depth, shear strength, and deformability. Results show significant differences among the methodologies, with up to 30% variation in allowable bearing capacity. The study concludes that combining classical methods with computational tools and context-based criteria enhances design accuracy and supports informed decision-making in infrastructure projects.

**Key Word-** bearing capacity, settlements, shallow foundations, Terzaghi, Meyerhof, Vesic, cohesive soils, granular soils.

## Glosario

**Capacidad de carga:** Esfuerzo máximo que puede soportar el suelo sin que ocurra una falla por corte o asentamientos excesivos.

**Cimentación superficial:** Elemento estructural que transfiere las cargas de una edificación a los estratos superiores del suelo, generalmente a profundidades menores a 4 m.

**Cohesión (C'):** Componente de la resistencia al corte del suelo independiente del rozamiento entre partículas.

**Ángulo de fricción interna ( $\phi$ ):** Parámetro que representa la resistencia por fricción entre partículas del suelo.

**Asentamiento:** Deformación vertical del terreno debido a la carga aplicada por la cimentación.

**Índice de compresibilidad (Cc):** Parámetro que mide la deformación volumétrica del suelo en función del esfuerzo aplicado.

**Esfuerzo efectivo ( $\sigma'$ ):** Parte del esfuerzo total que realmente actúa sobre la estructura del suelo y controla su comportamiento mecánico.

**Geo5:** Suite de software geotécnico que permite simular el comportamiento de cimentaciones, muros, taludes y estructuras subterráneas.

**NSR-10:** Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente que establece criterios de diseño para estructuras, incluyendo cimentaciones.

**Método de Schmertmann:** Procedimiento empírico para estimar asentamientos en suelos granulares a partir del ensayo CPT.

## **Introducción**

El diseño de cimentaciones superficiales constituye un elemento fundamental en la ingeniería geotécnica, al encargarse de transferir las cargas estructurales hacia las capas más resistentes del subsuelo. Una evaluación inadecuada puede conducir a fallas estructurales, asentamientos diferenciales o costos innecesarios por sobredimensionamiento. Entre las metodologías más reconocidas para estimar la capacidad de carga de cimentaciones se encuentran las propuestas por Terzaghi, Meyerhof y Vesic, cuyas formulaciones han sido ampliamente aplicadas en la práctica profesional y académica.

Sin embargo, estas metodologías están sujetas a supuestos específicos y producen resultados variables dependiendo del tipo de suelo, la geometría de la cimentación y las condiciones de carga. Por tanto, es necesario realizar un análisis comparativo que permita identificar sus ventajas y limitaciones bajo condiciones controladas y reales.

El presente trabajo tiene como finalidad aplicar y comparar dichas metodologías utilizando ejercicios de cálculo manual sobre suelos granulares y cohesivos, validados con datos provenientes de estudios de suelos del departamento del Meta. Esta aproximación busca establecer criterios técnicos que faciliten la selección de la metodología más adecuada según las condiciones del terreno y los requerimientos estructurales, promoviendo un diseño más preciso, seguro y eficiente.

## **1. Alcance**

La presente monografía tiene como objetivo comparar de manera clara y fundamentada tres metodologías clásicas utilizadas en el diseño de cimentaciones superficiales: Terzaghi, Meyerhof y Vesic. El análisis se centrará en aspectos como la capacidad de carga, los asentamientos y la influencia del tipo de suelo, destacando sus fundamentos teóricos, limitaciones y aplicaciones prácticas. Se emplearán ejercicios de cálculo manual y herramientas básicas como hojas de cálculo, con el fin de ilustrar su aplicabilidad en distintos contextos geotécnicos. Este trabajo se orienta a estudiantes e ingenieros civiles interesados en comprender las diferencias y criterios de uso de cada metodología, dentro del ámbito de la ingeniería geotécnica aplicada al diseño estructural de cimentaciones superficiales.

## **2. Formulación del problema**

### **2.1. Identificación del problema**

El diseño de cimentaciones superficiales representa un componente esencial en la estabilidad y seguridad de las obras civiles. Una evaluación inadecuada puede ocasionar asentamientos diferenciales, fisuración estructural o sobrecostos por sobredimensionamiento. En la práctica profesional, la selección del método de diseño se ve enfrentada a múltiples opciones teóricas, lo cual introduce incertidumbre técnica al no existir una guía clara que oriente cuál metodología es más apropiada para cada tipo de suelo.

Las metodologías propuestas por Terzaghi (1943), Meyerhof (1951) y Vesic (1973) han sido ampliamente utilizadas, cada una basada en diferentes hipótesis de resistencia, geometría de falla y consideraciones de carga. Sin embargo, su aplicación puede producir resultados significativamente distintos cuando se utilizan sobre suelos con características específicas cohesivos, granulares o mixtos. Estas discrepancias pueden afectar tanto la seguridad estructural como la economía del proyecto.

A menudo, estas metodologías no se contrastan entre sí a través de ejercicios prácticos que evidencien sus diferencias y alcances en contextos reales de aplicación. Por ello, surge la necesidad de realizar un análisis comparativo fundamentado, mediante ejercicios de cálculo manual, que permita evaluar la aplicabilidad de cada metodología y establecer criterios técnicos que apoyen una mejor toma de decisiones en proyectos de cimentación.

### **2.2. Formulación del Problema**

¿Cuál de las metodologías clásicas de diseño de cimentaciones superficiales Terzaghi, Meyerhof o Vesic resulta más adecuada para distintos tipos de suelo, considerando variables como la capacidad de carga y los asentamientos, a partir de un análisis comparativo desarrollado mediante ejercicios de cálculo manual y con base en condiciones geotécnicas representativas?

### **3. Objetivos**

#### **3.1. Objetivo General**

Comparar las metodologías clásicas de diseño de cimentaciones superficiales propuestas por Terzaghi, Meyerhof y Vesic, a través de ejercicios de cálculo manual, analizando su aplicabilidad en distintos tipos de suelos y evaluando sus diferencias en términos de capacidad de carga y asentamientos.

#### **3.2. Objetivos específicos**

Identificar los principales parámetros geotécnicos y estructurales que influyen en el diseño de cimentaciones superficiales.

Describir los fundamentos teóricos, supuestos y limitaciones de las metodologías de Terzaghi, Meyerhof y Vesic.

Aplicar cada metodología mediante ejercicios de cálculo manual en suelos cohesivos y granulares, considerando casos representativos.

Comparar los resultados obtenidos para establecer criterios técnicos que orienten la selección de la metodología más adecuada según las condiciones del terreno.

Elaborar conclusiones prácticas sobre la aplicabilidad de cada enfoque, destacando sus ventajas y limitaciones en escenarios reales de la Ingeniería Civil.

## 4. Estado del arte

El diseño de cimentaciones superficiales ha sido objeto de estudio durante décadas, evolucionando desde modelos empíricos hasta análisis avanzados mediante simulaciones computacionales. En este capítulo se revisan las principales metodologías de diseño, los factores que influyen en la capacidad de carga y asentamientos, la normatividad internacional y el uso de herramientas como Geo5 para modelado y verificación de cimentaciones.

### 4.1. Fundamentos del Diseño de Cimentaciones Superficiales

Las cimentaciones superficiales son aquellas que transmiten las cargas estructurales a las capas más cercanas del suelo, generalmente a profundidades menores a 4 metros (Das, 2019). Se utilizan en edificaciones de baja a mediana altura, puentes y otras estructuras donde el suelo presenta una capacidad portante adecuada.

Entre los principales tipos de cimentaciones superficiales se encuentran:

- Zapatas aisladas: Utilizadas para columnas individuales.
- Zapatas corridas: Empleadas en muros estructurales.
- Losas de cimentación: Diseñadas para estructuras con cargas distribuidas uniformemente.

El diseño de cimentaciones superficiales depende de tres factores clave:

- Capacidad de carga: Relacionada con la resistencia del suelo ante la carga aplicada.
- Asentamientos: Deformaciones del suelo debido a la transferencia de carga.
- Factores de seguridad: Incluyen estados límite últimos y de servicio regulados por normativas internacionales.

### 4.2. Modelos Clásicos de Capacidad de Carga y Asentamientos

El primer modelo teórico para capacidad de carga fue propuesto por Terzaghi (1943), quien formuló ecuaciones empíricas basadas en ensayos de laboratorio. Posteriormente, Meyerhof (1951) introdujo coeficientes de forma y profundidad, mejorando la precisión del cálculo. Vesic

(1973) integró modelos de deformabilidad del suelo, permitiendo evaluar cimentaciones sobre suelos de baja rigidez (Budhu, 2011).

Para el análisis de asentamientos, se emplean tres métodos principales:

- Asentamiento inmediato: Determinado a partir de la teoría de elasticidad.
- Asentamiento por consolidación: Aplicable en suelos cohesivos, evaluado con ensayos edométricos (Lambe & Whitman, 1969).
- Asentamiento diferencial: Importante en estructuras sensibles a deformaciones no uniformes.

#### **4.3. Factores que Afectan la Capacidad de Carga en Cimentaciones Superficiales**

La capacidad de carga depende de múltiples factores, entre ellos:

- Propiedades del suelo: La cohesión ( $C'$ ), el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y la densidad del suelo afectan la resistencia a la carga aplicada (Das, 2019).
- Profundidad de cimentación: Mayores profundidades generan un incremento en la presión confinante, mejorando la capacidad de carga.
- Nivel freático: La presencia de agua en la cimentación puede reducir la resistencia efectiva del suelo (Coduto et al., 2016).

#### **4.4. Métodos para la Evaluación de Asentamientos en Cimentaciones Superficiales**

Los asentamientos pueden afectar la estabilidad estructural. Algunos métodos utilizados para su cálculo incluyen:

- Método edométrico: Basado en la relación esfuerzo-deformación obtenida en ensayos de consolidación (Das, 2019).
- Índice de compresión ( $C_c$ ) y coeficiente de compresión ( $m_v$ ): Factores utilizados en arcillas altamente compresibles (Budhu, 2011).
- Modelo del Módulo Dilatómetro (DMT): Método de análisis basado en la medición de la rigidez del suelo.

#### **4.5. Normativas Internacionales y Factores de Seguridad en el Diseño de Cimentaciones**

Las normativas establecen los criterios de seguridad para cimentaciones superficiales. Algunas de las más relevantes son:

- ACI 318 (2019): Regula el diseño de cimentaciones en estructuras de concreto. ((Alcocer et al., 2008)
- Eurocódigo 7 (EN 1997-1-1): Normativa europea para análisis geotécnico (Rodríguez et al., 2014).
- Normativa China: Enfoque basado en coeficientes de seguridad y pruebas de carga in situ.

#### **4.6. Aplicación de Modelado Computacional en Cimentaciones: GEO5 (Software versión demo)**

El software Geo5 permite la simulación de cimentaciones mediante análisis avanzados. Sus funciones incluyen:

- Cálculo de asentamientos y capacidad de carga con ecuaciones de Terzaghi, Meyerhof y Vesic.
- Simulación de cimentaciones en distintos tipos de suelos.
- Evaluación con factores de seguridad ASD, LSD, LRFD y normativas internacionales (Fine Software, 2021).

#### **4.7. Cimentaciones en Suelos Granulares vs. Suelos Cohesivos**

- Suelos granulares: Mayor capacidad de carga y menor asentamiento diferencial (Budhu, 2011).
- Suelos cohesivos: Mayor tendencia a consolidación y menor resistencia inicial (Sivakugan & Das, 2010).

#### **4.8. Interacción Suelo-Estructura y su Impacto en el Diseño de Cimentaciones**

El método de elementos finitos (FEM) permite modelar la interacción suelo-estructura con alta precisión (Hakro et al., 2022).

#### **4.9. Innovaciones en Métodos de Diseño Basados en Inteligencia Artificial**

Se han desarrollado algoritmos de Machine Learning para predecir asentamientos y capacidad de carga con datos históricos (Ou et al., 2024).

#### **4.10. Cimentaciones en Condiciones Sísmicas: Diseño y Normativa Aplicable**

Las cimentaciones en zonas sísmicas requieren estudios de amplificación sísmica y licuefacción. El NSR-10 establece criterios para cimentaciones en suelos susceptibles a sismos.

#### **4.11. Impacto del Nivel Freático en el Diseño de Cimentaciones**

El nivel freático reduce la resistencia efectiva del suelo y afecta la capacidad de carga, por lo que se deben aplicar factores de corrección (Yuan et al., 2022).

#### **4.12. Comparación de Métodos Empíricos vs. Métodos Numéricos en Diseño Geotécnico**

Los métodos numéricos ofrecen mayor precisión, aunque requieren mayor tiempo de procesamiento en comparación con los enfoques empíricos.

#### **4.13. Tendencias y Retos Futuros en el Diseño de Cimentaciones Superficiales**

Se espera un avance en la integración de IA, modelado tridimensional y análisis probabilístico en el diseño de cimentaciones (Awolusi et al., 2024).

- Comparación de Metodologías para el Cálculo de Asentamientos en Suelos Granulares

La investigación realizada por (Flores et al., 2020) compara cinco metodologías para el cálculo de asentamientos en suelos granulares:

- Terzaghi, Peck & Mesri (1996)
- Meyerhof (1965)
- Parry (1971)
- Burland & Burbidge (1985)
- D'Apollonia & Asociados (1970)

Este estudio concluye que el método de Meyerhof presentó la menor variación respecto a valores experimentales (5%), mientras que el método de Parry mostró la mayor desviación (69%)

Este análisis es crucial, ya que evidencia que los métodos empíricos pueden diferir significativamente en su precisión, por lo que su elección debe basarse en el tipo de suelo y la disponibilidad de ensayos de penetración estándar (SPT).

#### **4.14. Análisis Comparativo de Modelos Numéricos vs. Métodos Empíricos**

Los métodos numéricos, como el Método de Elementos Finitos (FEM), han revolucionado la ingeniería geotécnica al permitir una simulación detallada del comportamiento del suelo. Geo5 permite modelar asentamientos y capacidad de carga, validando los resultados con datos de ensayos de campo. Estudios recientes han demostrado que los modelos numéricos pueden reducir la incertidumbre en un 30% en comparación con métodos empíricos. Esto resalta la necesidad de combinar métodos tradicionales con herramientas computacionales para obtener resultados más precisos (Escolano-Sánchez et al., 2015).

#### **4.15. Influencia del Nivel Freático en el Diseño de Cimentaciones**

La presencia de agua subterránea puede afectar la estabilidad de las cimentaciones. El Eurocódigo 7 recomienda reducir la capacidad de carga en un 50% cuando el nivel freático está cerca de la base de la cimentación.

Además, estudios recientes han confirmado que el nivel freático afecta el comportamiento de los suelos granulares de manera menos drástica que en los cohesivos, donde puede inducir fenómenos de licuefacción (Pastor et al., 2018).

#### **4.16. Evaluación Normativa en Distintas Regiones**

El diseño de cimentaciones varía según la normativa aplicada. Se identificaron diferencias clave entre regulaciones:

- ACI 318 (EE.UU.): Criterios específicos para cimentaciones de concreto armado.
- Eurocódigo 7 (Europa): Requiere estudios de confiabilidad con coeficientes de seguridad diferenciados (EUROCÓDIGO 7 PROYECTO GEOTÉCNICO, 1999).
- Normativa China: Integra métodos experimentales para evaluar la resistencia del suelo antes del diseño.

Estas variaciones reflejan enfoques distintos en la seguridad estructural y en los factores de diseño.

## 5. Desarrollo metodológico

### 5.1. Identificar los principales parámetros geotécnicos y estructurales que influyen en el diseño de cimentaciones superficiales

El diseño de cimentaciones superficiales exige una comprensión integral de las condiciones del suelo y de las características de la estructura que se va a soportar. Estos dos aspectos se traducen en parámetros geotécnicos y parámetros estructurales, los cuales deben identificarse, caracterizarse y emplearse de manera rigurosa para garantizar la estabilidad, funcionalidad y seguridad de la cimentación.

Los parámetros que se presentan a continuación son los comúnmente utilizados en el análisis y diseño por métodos clásicos (Terzaghi, Meyerhof y Vesic), tanto para la determinación de la capacidad de carga como para la estimación de asentamientos.

#### 5.1.1 Parámetros geotécnicos relevantes

Estos parámetros se obtienen a partir de exploraciones de campo (como el ensayo de penetración estándar SPT) y ensayos de laboratorio (como granulometría, límites de Atterberg, entre otros). Reflejan el comportamiento mecánico del suelo frente a la carga aplicada.

**Tabla 1**

*Parámetros geotécnicos relevantes*

Parámetro	Símbolo / Unidad	Descripción Técnica	Importancia en el diseño
<b>Cohesión efectiva</b>	$c'$ [kPa]	Componente de la resistencia al corte del suelo que no depende de la fricción.	Clave en suelos cohesivos; influye directamente en la capacidad de carga.
<b>Ángulo de fricción interna</b>	$\phi'$ [°]	Representa la resistencia por fricción entre partículas del suelo.	Principal parámetro en suelos granulares; modifica los factores $N_q, N_\gamma$
Parámetro	Símbolo / Unidad	Descripción Técnica	Importancia en el diseño

Tabla 1. Continuación

<b>Peso unitario del suelo</b>	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Peso por unidad de volumen del suelo (puede ser total, seco o saturado).	Incide en la sobrecarga sobre la cimentación y en la presión efectiva.
<b>Número de golpes SPT</b>	N [golpes/pie]	Resultado del ensayo de penetración estándar, indicador de densidad/resistencia del suelo.	Usado para correlacionar $\phi$ , $c$ , $E_s$ y estimaciones preliminares de asentamientos.
<b>Nivel freático</b>	NF [m]	Profundidad a la que se encuentra el agua subterránea respecto a la superficie del terreno.	Afecta el peso efectivo del suelo y puede inducir condiciones no drenadas.
<b>Índice de plasticidad</b>	IP [%]	Diferencia entre el límite líquido y el límite plástico del suelo.	Relacionado con la compresibilidad y el potencial de asentamiento en suelos finos.
<b>Relación de vacíos inicial</b>	$e_0$ [-]	Volumen de vacíos respecto al volumen de sólidos.	Utilizado para estimar asentamientos por consolidación en suelos cohesivos.
<b>Módulo de elasticidad</b>	$E_s$ [kPa]	Medida de rigidez del suelo frente a cargas verticales.	Necesario para calcular asentamientos en suelos granulares.
<b>Coefficiente de compresibilidad</b>	$C_c$ [-]	Pendiente de la curva $e$ -log $\sigma$ de consolidación.	Esencial en el cálculo de asentamientos primarios en suelos cohesivos.
<b>Altura del estrato compresible</b>	H [m]	Espesor del estrato de suelo que sufrirá deformaciones bajo la zapata.	Multiplicador directo de asentamientos; su correcta identificación es crítica.
<b>Grado de consolidación</b>	U [%]	Porcentaje del asentamiento total que ha ocurrido en un tiempo dado.	Permite predecir el comportamiento en función del tiempo.

### 5.1.2 Parámetros estructurales relevantes

Estos parámetros se definen desde el diseño arquitectónico y estructural, y condicionan tanto el tipo de cimentación como su desempeño bajo cargas.

**Tabla 2***Parámetros estructurales relevantes*

<b>Parámetro</b>	<b>Símbolo / Unidad</b>	<b>Descripción Técnica</b>	<b>Importancia en el diseño</b>
<b>Ancho de la zapata</b>	B [m]	Dimensión transversal de la cimentación.	Influye en los factores de forma y en la presión transmitida al suelo.
<b>Longitud de la zapata</b>	L [m]	Dimensión longitudinal (en zapatas rectangulares o corridas).	En combinación con B, define el área efectiva de carga.
<b>Profundidad de cimentación</b>	Df [m]	Distancia entre la superficie del terreno y la base de la cimentación.	Afecta el esfuerzo efectivo, el tipo de falla y los factores de profundidad.
<b>Carga vertical transmitida</b>	Q [kN]	Resultante de las cargas estructurales que llegan a la cimentación.	Base para calcular la presión de contacto ( $q = \frac{Q}{A}$ ).
<b>Área de la cimentación</b>	A [m <sup>2</sup> ]	Superficie efectiva de la zapata, $A = BXL$ .	Necesaria para distribuir cargas y calcular presiones admisibles.
<b>Forma de la cimentación</b>	—	Cuadrada, rectangular, corrida o circular.	Modifica los factores de forma $S_s, S_q, S_\gamma$ ,
<b>Factor de seguridad</b>	FS [-]	Margen de seguridad exigido por norma para evitar la falla por capacidad portante.	Usado para reducir $q_u$ a $q_{adm}$ y cumplir con NSR-10.
<b>Tipo de carga aplicada</b>	—	Axial centrada, excéntrica o inclinada.	Afecta la distribución de esfuerzos y la forma de falla del terreno.

### 5.1.3 Criterios de selección para análisis comparativo

Para los ejercicios que se desarrollarán en objetivos posteriores, se seleccionaron solo los parámetros que son directamente utilizados por las metodologías de Terzaghi, Meyerhof y Vesic. Además, se normalizaron los valores asumidos para zapatas aisladas sometidas a carga axial centrada, con el fin de establecer una base común de comparación.

En síntesis, el conocimiento de estos parámetros permite:

- Determinar la capacidad portante última y admisible del suelo.
- Evaluar la magnitud y distribución de los asentamientos.

- Seleccionar la metodología de diseño más apropiada según las condiciones del sitio.

## 5.2. Describir los fundamentos teóricos, supuestos y limitaciones de las metodologías de Terzaghi, Meyerhof y Vesic

Las metodologías de Terzaghi, Meyerhof y Vesic han sido fundamentales en la evolución del diseño de cimentaciones superficiales. Estas propuestas constituyen herramientas de cálculo empírico-analítico que permiten estimar la capacidad de carga última del terreno y, posteriormente, su reducción a un valor admisible aplicando un factor de seguridad. A pesar de su vigencia y utilidad, cada método tiene fundamentos, supuestos y limitaciones específicas que deben conocerse para su aplicación adecuada.

### 5.2.1 Método de Terzaghi (1943)

**5.2.1.1. Fundamento teórico.** Basado en la teoría de equilibrio límite, propone una ecuación general para la capacidad portante última ( $q_u$ ) que incluye tres componentes:

- Cohesión ( $c', N_c$ )
- Sobre peso o presión efectiva a la base ( $\gamma D_f N_q$ )
- Peso del suelo encima de la Zapata ( $0.5 \gamma B N_\gamma$ )

**Ecuación 1** Capacidad portante última Terzaghi

$$q_u = c' N_c + \gamma D_f N_q + 0.5 \gamma B N_\gamma$$

### 5.2.1.2. Supuestos clave.

- Cimentación rígida y superficial (profundidad menor que el ancho).
- Falla generalizada del terreno.
- Carga vertical centrada y estática.
- Suelo homogéneo, isotrópico e infinito en extensión.
- No se considera nivel freático elevado.

### 5.2.1.3. Limitaciones.

- Solo aplicable a zapatas rígidas con forma cuadrada o continua.
- Supone suelos sin estratificación ni variación de propiedades con la profundidad.
- No incluye factores de forma, inclinación o pendiente.
- La precisión disminuye en suelos granulares con niveles freáticos altos.

## 5.2.2 Método de Meyerhof (1951)

**5.2.2.1. Fundamento teórico.** Extiende el modelo de Terzaghi, incluyendo factores de corrección por forma ( $s_i$ ), profundidad ( $d_i$ ) e inclinación de carga ( $i_i$ ):

**Ecuación 2** Capacidad portante última Meyerhof

$$q_u = c' N_c s_c d_c i_c + \gamma D_f N_q s_q d_q i_q + 0.5 \gamma B N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma$$

Considera variaciones geométricas y condiciones más realistas.

### 5.2.2.2. Supuestos clave.

- Cimentaciones superficiales de forma rectangular, cuadrada o circular.
- El nivel freático se puede incluir mediante ajustes en los pesos unitarios.
- Validez para suelos homogéneos, aunque permite cierto ajuste por condiciones del sitio.

### 5.2.2.3. Limitaciones.

- Requiere el uso de tablas o fórmulas empíricas para calcular factores de corrección.
- En algunos casos puede sobreestimar la capacidad portante en suelos no homogéneos.
- Se mantiene bajo condiciones de carga vertical centrada.

### 5.2.3 Método de Vesic (1973)

**5.2.3.1. Fundamento teórico** Propone ajustes más sofisticados a los factores de capacidad de carga, especialmente  $N_\gamma$ , y considera de forma más explícita los efectos de deformación del suelo.

Utiliza la misma estructura general de Meyerhof, pero con coeficientes corregidos y más consistentes con la teoría del equilibrio plástico:

**Ecuación 3** Capacidad portante última Vesic

$$q_u = c' N_c s_c d_c + \gamma D_f N_q s_q d_q + 0.5 \gamma B N_\gamma s_\gamma d_\gamma$$

#### 5.2.3.2. Supuestos clave.

- Suelos homogéneos, con posibilidad de tener distintos niveles de compactación.
- Cargas centradas o ligeramente excéntricas.
- Mejora la representación del efecto de forma y profundidad.

#### 5.2.3.3. Limitaciones.

- Requiere mayor cantidad de datos y cuidado en la selección de coeficientes.
- Su aplicación manual puede ser más compleja sin software o tablas detalladas.
- Aunque es más robusto, aún supone condiciones estáticas y homogéneas.

### 5.2.4 Comparación entre los tres métodos

**Tabla 3**

*Comparación entre los tres métodos*

Criterio	Terzaghi (1943)	Meyerhof (1951)	Vesic (1973)
Naturaleza	Empírico-teórico	Empírico corregido	Teórico con ajustes empíricos
Tipos de zapata	Cuadrada, continua	Cuadrada, rectangular, circular	Todas las anteriores
Factores de corrección	No	Sí (forma, profundidad, inclinación)	Sí (más refinados)
Nivel freático	No explícito	Considerado por ajuste en $\gamma$	Considerado

Tabla 3. Continuación

<b>Precisión</b>	Moderada	Alta en condiciones ideales	Alta, mayor robustez teórica
<b>Facilidad de uso manual</b>	Alta	Media	Baja (mayor complejidad)
<b>Aplicabilidad general</b>	Sencilla	Moderadamente amplia	Amplia pero más exigente

### 5.3. Aplicar cada metodología mediante ejercicios de cálculo manual en suelos cohesivos y granulares, considerando casos representativos

Este objetivo busca aplicar de forma manual las metodologías de Terzaghi, Meyerhof y Vesic en el análisis de cimentaciones superficiales sobre dos tipos de suelo: cohesivos (como arcillas) y granulares (como gravas y arenas compactas). Para ello, se formularon ejercicios tipo bajo condiciones controladas, utilizando valores referenciales coherentes con la práctica geotécnica y normativas colombianas.

Estas aplicaciones permiten comparar el comportamiento de los métodos frente a distintas condiciones de resistencia, geometría y profundidad, facilitando la interpretación crítica de los resultados. Para el desarrollo de los ejercicios de cálculo manual con las metodologías de Terzaghi, Meyerhof y Vesic, se adoptaron como base de comparación las siguientes dimensiones:

- **Ancho de zapata ( $B$ ):** 2.0 metros
- **Profundidad de cimentación ( $D_f$ ):** 1.5 metros

Estas dimensiones fueron seleccionadas por razones técnicas, normativas y analíticas, las cuales se detallan a continuación:

#### 5.3.1 Aplicabilidad práctica y representatividad

Las dimensiones escogidas corresponden a valores típicos utilizados en cimentaciones superficiales de estructuras de baja y mediana altura, tales como viviendas multifamiliares, edificios institucionales o comerciales de hasta cinco pisos. Las zapatas aisladas de 2.0 m de ancho son comunes en el contexto latinoamericano, y permiten una adecuada distribución de cargas estructurales sin requerir soluciones profundas o especiales (Das, 2016).

Asimismo, la profundidad de 1.5 m asegura que la base de la cimentación se sitúe por debajo del nivel afectado por cambios estacionales de humedad o temperatura, condición

establecida en el Título H de la NSR-10 como criterio mínimo para garantizar estabilidad a largo plazo (AIS, 2010). Además, en la mayoría de los estudios de suelos utilizados como base para este análisis, el nivel freático se encuentra por debajo de esta profundidad, lo cual evita la necesidad de introducir correcciones adicionales por saturación.

### **5.3.2 *Compatibilidad con las metodologías clásicas***

Las metodologías de Terzaghi, Meyerhof y Vesic asumen zapatas rígidas apoyadas sobre suelos homogéneos y sometidas a cargas verticales centradas. Las dimensiones seleccionadas permiten cumplir con estos supuestos teóricos sin introducir efectos complejos como excentricidad de carga, flexibilidad de la base o interacción con otras cimentaciones cercanas (Das, 2016).

Además, el uso de zapatas cuadradas facilita la aplicación directa de los coeficientes de capacidad de carga ( $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$ ) y de los factores de forma ( $s_i$ ), sin requerir ajustes adicionales por geometría (Meyerhof, 1951).

### **5.3.3 *Control de variables para análisis comparativo***

Al mantener constantes las dimensiones geométricas de la cimentación en todos los ejercicios, se logra un análisis comparativo más riguroso y objetivo entre las metodologías. De esta forma, cualquier variación en los resultados obtenidos podrá atribuirse con mayor certeza a la influencia de los parámetros geotécnicos del suelo y a las diferencias conceptuales de los métodos, y no a cambios en las condiciones geométricas del diseño.

### **5.3.4 *Selección de factores de capacidad de carga y factores de corrección***

Los factores de capacidad de carga utilizados en la presente monografía para las metodologías de Terzaghi, Meyerhof y Vesic fueron seleccionados a partir de tablas técnicas estandarizadas y actualizadas provenientes de la literatura especializada. En particular:

Para los métodos de Terzaghi y Meyerhof, los valores de  $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$  tomaron de las tablas contenidas en el libro *Fundamentals of Foundation Engineering* de Ou, el cual consolida y actualiza los coeficientes propuestos en investigaciones previas y se ajusta al contexto moderno de diseño en cimentaciones (Ou et al., 2024).

Para el método de Vesic, se utilizaron los coeficientes presentados en el artículo original de (Aleksandar Sedmak Vesic, 1973), titulado Análisis de la capacidad de carga de cimentaciones superficiales, publicado por la ASCE, el cual introduce ajustes más refinados en los factores de capacidad, especialmente  $N_\gamma$ , con base en la teoría del equilibrio plástico y la deformación limitada del suelo (Aleksandar Sedmak Vesic, 1973).

Estas tablas proporcionan valores de los factores en función del ángulo de fricción interna del suelo ( $\phi'$ ), asumiendo condiciones ideales de carga vertical centrada, sin presencia de agua en la base de la cimentación.

En particular:

- Los factores de forma para zapatas cuadradas para los métodos de Terzaghi y Meyerhof (1951) se tomaron como:  $s_c=1.3$ ,  $s_q=1.2$ ,  $s_\gamma=0.8$  y para el caso de Vesic (1973), se calcularon con base en las siguientes ecuaciones:

**Ecuación 4** Factores de forma Vesic (1973)

$$s_c = 1 + \left(\frac{N_q}{N_c}\right); s_q = 1 + \tan\phi; s_\gamma = 0.60$$

- Los factores de profundidad para los tres métodos se calcularon usando las ecuaciones empíricas propuestas por Meyerhof, válidas para relaciones  $\frac{D_f}{B} \leq 1$

**Ecuación 5** Factores de profundidad Meyerhof (1951)

$$d_c = 1; d_q = 1 + 0.2 \left(\frac{D_f}{B}\right); d_\gamma = 1 + 0.1 \left(\frac{D_f}{B}\right)$$

Los factores de inclinación ( $i_c, i_q, i_\gamma$ ) no se aplicaron, dado que todos los ejercicios desarrollados en esta monografía asumen carga vertical centrada, lo cual representa una condición ideal y simplificada compatible con los fundamentos teóricos de los tres métodos.

Esta selección garantiza coherencia metodológica y permite aplicar los modelos dentro de sus límites de validez teórica, asegurando comparabilidad, trazabilidad y transparencia en los resultados.

Con el objetivo de realizar una comparación significativa entre las metodologías de Terzaghi, Meyerhof y Vesic, se establecieron tres casos de estudio. El primero corresponde a un caso tipo hipotético, diseñado con parámetros geotécnicos asumidos bajo condiciones ideales, representativas de un suelo granular denso. Los otros dos casos se basan en datos reales obtenidos de estudios de suelos ejecutados previamente en el departamento del Meta: uno sobre un suelo tipo SC (arena arcillosa) en el proyecto Torres A y B, ubicado en Villavicencio, y otro sobre un suelo tipo GM (grava limosa con arena) correspondiente al proyecto de vivienda en el municipio de Cubarral. Esta estructura metodológica permite contrastar el comportamiento de las tres metodologías bajo condiciones teóricas controladas y escenarios reales, lo cual fortalece el análisis comparativo. En todos los casos se aplicó un factor de seguridad igual a 3.0, valor recomendado en la literatura técnica y normativa vigente (Bowles, 1997; Das, 2016), que garantiza un margen adecuado frente a las incertidumbres inherentes al comportamiento del suelo, la variabilidad de los parámetros geotécnicos y las simplificaciones propias de los modelos analíticos utilizados. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los casos:

**Tabla 4***Resultados comparativos*

Caso	Método	qu (kPa)	qadm (kPa)
Suelo Supuesto - Granular ( $\phi=34^\circ$ )	Terzaghi	1809.41	603.14
Suelo Supuesto - Granular ( $\phi=34^\circ$ )	Meyerhof	1710.73	570.24
Suelo Supuesto - Granular ( $\phi=34^\circ$ )	Vesic	1377.55	459.18
Torres A y B - SC ( $\phi=29^\circ$ )	Terzaghi	959.92	319.97
Torres A y B - SC ( $\phi=29^\circ$ )	Meyerhof	944.68	314.89
Torres A y B - SC ( $\phi=29^\circ$ )	Vesic	772.39	257.46
Cubarral - GM ( $\phi=33^\circ$ )	Terzaghi	1565.56	521.85
Cubarral - GM ( $\phi=33^\circ$ )	Meyerhof	1491.99	497.33
Cubarral - GM ( $\phi=33^\circ$ )	Vesic	1205.73	401.91

#### 5.4. Cálculo de Asentamientos Estimados en Cimentaciones Superficiales

El asentamiento de una cimentación es la deformación vertical del terreno bajo la carga transmitida por la estructura. Su cuantificación es tan importante como el cálculo de capacidad portante, ya que un asentamiento excesivo puede generar agrietamientos, pérdida de funcionalidad estructural o daños irreversibles en elementos no estructurales. Existen dos tipos predominantes:

- Asentamiento inmediato o elástico, frecuente en suelos granulares (arenas y gravas), ocurre casi instantáneamente al aplicar la carga.
- Asentamiento por consolidación primaria, característico de suelos cohesivos saturados, ocurre progresivamente con el tiempo debido a la expulsión del agua de los poros.

Para este análisis se aplicaron:

- El método empírico de Schmertmann (1970) en los casos de suelos granulares (Schmertmann, 1970).
- La teoría de consolidación unidimensional de Terzaghi para el caso del suelo cohesivo (SC) en el proyecto Torres A y B (Das, 2016) (Coduto et al., 2016) (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS)., 2010).
- 

#### 5.4.1 *Fundamento teórico (suelos cohesivos)*

La Ecuación 6 clásica de consolidación es:

**Ecuación 6** *Ecuación clásica de consolidación*

$$S = \frac{C_c H}{1 + e_0} + \log \left( \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0} \right)$$

Donde:

$S$ : asentamiento primario [m]

$C_c$ : índice de compresibilidad

$H$ : espesor del estrato cohesivo

$e_0$ : relación de vacíos inicial

$\sigma'_0$ : presión efectiva inicial

$\Delta\sigma$ : incremento de carga vertical

**5.4.1.1. Cálculo de asentamiento por consolidación primaria (Torres A y B – SC).** Los parámetros geotécnicos utilizados para el desarrollo de esta monografía fueron obtenidos a partir de ensayos de laboratorio y exploraciones de campo contenidos en estudios de suelos ejecutados previamente en el departamento del Meta.

Estos informes fueron suministrados para fines académicos por terceros, sin identificación específica de la entidad ejecutora, y se utilizaron exclusivamente con fines investigativos, respetando los principios de confidencialidad y uso responsable de la información técnica.

**5.4.1.2. Parámetros obtenidos del estudio.**

- Tipo de suelo: SC – arcilla con arena.
- Estrato cohesivo activo: espesor  $H=0.55$
- Relación de vacíos inicial:  $e_0=0.85$
- Índice de compresibilidad:  $C_c=0.14$
- Carga neta aplicada:  $\Delta\sigma=60$  kPa
- Presión efectiva inicial a profundidad media:  $\sigma'_0=33.15$

Aplicamos la Ecuación 6, obteniendo los siguientes resultados:

$$S = \frac{C_c H}{1 + e_0} * \log \left( \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0} \right) = \frac{0.14 * 0.55}{1 + 0.85} * \log \left( \frac{33.15 + 60}{33.15} \right)$$

$$S = \frac{0.077}{1.85} * \text{Log}(2.8) = 0.018675m = 18.68 \text{ mm}$$

$$\mathbf{S = 18.68 \text{ mm}}$$

**5.4.2 Cálculo de asentamiento inmediato (Caso Hipotético – Granular  $\phi = 34^\circ$ )**

**5.4.2.1. Fundamento teórico (suelos granular).** La Ecuación 7 para el cálculo de asentamiento inmediato es:

**Ecuación 7** Ecuación asentamiento inmediato

$$S = \frac{q}{E_s} * B * I_z$$

### 5.4.1.3. Parámetros asumidos:

- Carga neta:  $q=450$  kPa
- Módulo de elasticidad:  $E_s=29000$  kPa
- Ancho de zapata:  $B=2.0$  m
- Factor de influencia:  $I_z=0.85$

Aplicamos la Ecuación 7, obteniendo los siguientes resultados:

$$S = \frac{q}{E_s} * B * I_z = \frac{450}{29000} * 2.0 * 0.85 = 0.02637931 \text{ m} = 26.38 \text{ mm}$$

$$S = 26.38 \text{ mm}$$

### 5.4.3 Cálculo de asentamiento inmediato (Cubarral – Suelo GM)

#### 5.4.3.1. Parámetros obtenidos del estudio:

- Carga neta:  $q=450$  kPa
- Módulo de elasticidad:  $E_s=32000$  kPa
- Ancho de zapata:  $B=2.0$  m
- Factor de influencia:  $I_z=0.85$

Aplicamos la Ecuación 7, obteniendo los siguientes resultados:

$$S = \frac{q}{E_s} * B * I_z = \frac{450}{32000} * 2.0 * 0.85 = 0.02390625 \text{ m} = 23.91 \text{ mm}$$

$$S = 23.91 \text{ mm}$$

**Tabla 5**

*Resumen de resultados*

Caso de Estudio	Tipo de Suelo	Método Aplicado	Parámetros Principales	Asentamiento Estimado [mm]
Caso Hipotético	Granular ( $\phi = 34^\circ$ )	Schmertmann	$q=450$ kPa, $E_s=29000$ kPa, $B=2.0$ m, $I_z=0.85$	26.38

Tabla 5. Continuación

<b>Torres A y B</b>	SC ( $\phi = 29^\circ$ )	Consolidación Terzaghi (ajustada)	$C_c=0.14$ , $H=0.55$ m, $e_0=0.85$ , $\Delta\sigma=60$ kPa, $\sigma'_o=33.15$ kPa	18.68
<b>Cubarral</b>	Granular ( $\phi = 33^\circ$ )	Schmertmann	$q=450$ kPa, $E_s=32000$ kPa, $B=2.0$ m, $I_z=0.85$	23.91

Los asentamientos obtenidos para los tres casos se encuentran dentro del rango admisible de 50 mm para cimentaciones superficiales según la NSR-10. No obstante, se evidencia que los suelos granulares pueden presentar asentamientos similares o incluso superiores a los de suelos cohesivos, dependiendo de la rigidez del terreno. Estos resultados ratifican la necesidad de complementar el diseño por capacidad portante con un análisis deformacional riguroso, especialmente en contextos donde se construyan estructuras sensibles al desplazamiento vertical.

### 5.5. Comparar los resultados obtenidos para establecer criterios técnicos que orienten la selección de la metodología más adecuada según las condiciones del terreno

Una vez aplicadas las metodologías de Terzaghi, Meyerhof y Vesic a tres casos de estudio (uno hipotético y dos con datos reales), se procedió a realizar una comparación sistemática de los resultados obtenidos, tanto de la capacidad de carga última ( $q_u$ ) como de la capacidad de carga admisible ( $q_{adm}$ ).

#### 5.5.1 Análisis comparativo de resultados

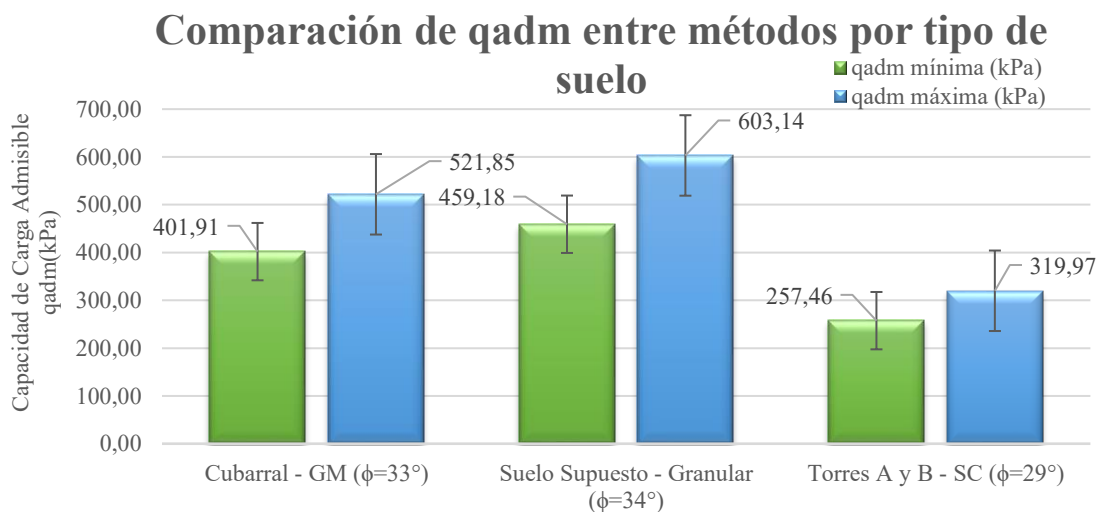
Se realizó una comparación cuantitativa de la capacidad de carga última ( $q_u$ ) y la capacidad admisible ( $q_{adm}$ ), obtenidas mediante las metodologías de Terzaghi, Meyerhof y Vesic para tres casos representativos: un suelo granular supuesto con  $\phi=34^\circ$ , un suelo real tipo SC (Torres A y B) con  $\phi=29^\circ$ , y un suelo real tipo GM (Cubarral) con  $\phi=33^\circ$ . Los resultados indican diferencias significativas entre las metodologías, incluso bajo condiciones geométricas y de carga controladas.

Para el caso supuesto ( $\phi = 34^\circ$ ), se obtuvo una capacidad admisible mínima de 459.18 kPa (Vesic) y una máxima de 603.14 kPa (Terzaghi), lo que representa una diferencia relativa del 31.35%. Esta dispersión se mantiene en el caso Cubarral ( $\phi = 33^\circ$ ), con una diferencia de 29.84% entre los valores extremos (401.91 kPa vs 521.85 kPa), mostrando que incluso en suelos granulares

bien compactados los métodos no convergen completamente. En el caso del suelo SC ( $\phi = 29^\circ$ ), correspondiente a Torres A y B, la diferencia entre métodos también fue notoria, alcanzando un 24.28%, lo cual refleja que la influencia de los factores de forma y profundidad, así como la forma de considerar los componentes de fricción ( $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$ ), tiene un impacto sustancial incluso en suelos de resistencia intermedia. La **Figura 1** presenta una comparación gráfica de los valores mínimos y máximos de capacidad de carga admisible obtenidos mediante los tres métodos analizados (Terzaghi, Meyerhof y Vesic) para cada uno de los casos de estudio.

**Figura 1**

Comparación de  $q_{adm}$  entre métodos por tipo de suelo



La figura evidencia cómo la selección del método de diseño puede influir considerablemente en el dimensionamiento de la cimentación, incluso bajo condiciones geométricas y de carga controladas, lo cual justifica la importancia de establecer criterios técnicos adecuados para cada tipo de terreno.

### 5.5.2 Establecimiento de criterios técnicos

A partir del análisis de resultados, se establecen los siguientes criterios para orientar la elección del método más adecuado según el tipo de terreno:

**Tabla 6**  
*Criterios técnicos*

<b>Condición del terreno</b>	<b>Método recomendado</b>	<b>Razón técnica</b>
Granulares densos ( $\phi > 30^\circ$ )	Meyerhof	Ajusta por forma y profundidad; mayor precisión con datos conocidos.
Suelos mixtos (SC, GM)	Terzaghi o Vesic	Terzaghi es conservador; Vesic ajusta mejor $N_\gamma$ si se desea menor dispersión.
Suelos de resistencia intermedia ( $\phi \approx 28-30^\circ$ )	Vesic	Considera efectos de deformabilidad y corrige valores de fricción.
Análisis preliminar o información limitada	Terzaghi	Rápido, conservador y ampliamente aceptado en fase de prefactibilidad.
Proyectos con alta responsabilidad estructural	Vesic, con validación	Más riguroso; útil si se cuenta con buenos datos geotécnicos.

## Conclusiones

El análisis permitió establecer que los parámetros más determinantes en el diseño de cimentaciones son: el ángulo de fricción interna ( $\phi'$ ), la cohesión efectiva ( $c'$ ), el peso unitario del suelo ( $\gamma$ ), el módulo de elasticidad ( $E_s$ ), así como las dimensiones y la profundidad de la cimentación.

La correcta interpretación de estos parámetros, particularmente su origen (ensayos in situ o de laboratorio), influye significativamente en la precisión del cálculo de la capacidad portante y los asentamientos.

Terzaghi proporciona una metodología sencilla y conservadora, adecuada para análisis preliminares, pero limitada por la ausencia de factores de corrección y su aplicabilidad únicamente a zapatas rígidas cuadradas sobre suelos homogéneos.

Meyerhof y Vesic incorporan factores de forma, profundidad e inclinación, permitiendo mayor realismo en las condiciones de carga. Vesic, además, introduce coeficientes refinados que mejoran la estimación en suelos granulares, pero requiere mayor cantidad de datos y experiencia técnica.

Los cálculos realizados en tres casos distintos evidencian que la metodología seleccionada puede modificar los resultados de capacidad admisible en un rango de hasta un 30%, incluso con parámetros geométricos constantes.

La aplicación manual de los métodos, sin uso de software especializado, permitió no solo entender la lógica interna de cada modelo, sino fortalecer el criterio técnico del diseñador frente a escenarios diversos.

Se verificó que Meyerhof presenta un equilibrio entre simplicidad y precisión, siendo apropiado para suelos mixtos o condiciones no tan homogéneas; Terzaghi es útil como punto de partida conservador, mientras que Vesic es más confiable en suelos granulares bien caracterizados.

La comparación demostró que la convergencia entre métodos es mayor en suelos homogéneos granulares; sin embargo, en suelos cohesivos o estratificados, los resultados divergen notablemente, requiriendo un análisis cuidadoso del contexto geotécnico.

Terzaghi es de fácil aplicación y adecuado para estudios preliminares o zonas con baja variabilidad geotécnica, pero no debe usarse como único criterio en decisiones estructurales finales.

Meyerhof y Vesic requieren una caracterización más completa, pero brindan resultados más ajustados al comportamiento real del terreno, siendo recomendables para diseños definitivos o cimentaciones. Todos los asentamientos calculados se mantuvieron por debajo del límite normativo de 50 mm establecido por la NSR-10, lo cual confirma la viabilidad técnica de las cimentaciones analizadas.

No obstante, se demostró que los suelos granulares no siempre presentan los menores asentamientos; su rigidez efectiva depende directamente del valor de  $E_s$ , por lo que su subestimación puede comprometer el desempeño en servicio.

El análisis de asentamientos evidenció que el diseño geotécnico debe considerar no solo la resistencia última, sino también la compatibilidad deformacional, especialmente en estructuras sensibles a asentamientos diferenciales.

### Referencias bibliográficas

- Alcocer, S. M., Barth, F. G., Becker, R. J., Bondy, K. B., Breen, J. E., Cagley, J. R., Cleland, N. M., Collins, M. P., Corley, W. G., Dolan, C. W., Fiorato, A. E., Anderson, N. S., Aschheim, M. A., Bartlett, F. M., Bonacci, J. F., Browning, J. P., Carino, N. J., Cook, R. A., Covarrubias, J. P., ... Yáñez, F. V. (2008). *Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318)*. <https://drive.google.com/file/d/0B9nKI1tYMgmeNVpOWlIDbjZ3NUk/view?resourcekey=0-IKZ-CWQYzooBQEf0aAfAvQ>
- Aleksandar Sedmak Vesic. (1973). *Analisis de la capacidad de carga de cimentaciones superficiales*. 33–54. [https://datosabiertos.unam.mx/CCUD\\_DOR\\_WS-war/resources/doi/3c608412bea81390](https://datosabiertos.unam.mx/CCUD_DOR_WS-war/resources/doi/3c608412bea81390)
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente – NSR-10. (2010). Título H – Requisitos de diseño y construcción de cimentaciones*. <https://www.scg.org.co/Titulo-H-NSR-10-Decreto%20Final-2010-01-14.pdf>
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (1999). *Eurocódigo 7 Proyecto Geotécnico*. [https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/carreteras/normativa/AN\\_UNE-EN%201997-1.pdf](https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/carreteras/normativa/AN_UNE-EN%201997-1.pdf)
- Awolusi, T. F., Finbarrs-Ezema, B. C., Chukwudulue, I. M., & Azab, M. (2024). *Application of Artificial Intelligence (AI) in Civil Engineering*. 15–46. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-65976-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-65976-8_2)
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis And Desing* (FIFTH, pp. 213–255). McGraw-Hill. <https://drive.google.com/file/d/0B4T1muz90fUoNzRPZml0TzI4bEk/view?resourcekey=0-z5Qyh8WQ2LE52vmAzGaP0Q>
- Budhu, M. (2011). *Soil mechanics and foundations* (THIRD, pp. 422–445). John Wiley & Sons, Inc. [https://books.google.com.co/books/about/Soil\\_Mechanics\\_and\\_Foundations.html?id=7Zz4AAAAQBAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.co/books/about/Soil_Mechanics_and_Foundations.html?id=7Zz4AAAAQBAJ&redir_esc=y)
- Coduto, D., Yeung, M., & Kitch, W. (2016). *Geotechnical Engineering: Principles & Practices* (SECOND, pp. 478–520). Pearson. <https://www.pearsonhighered.com/assets/preface/0/1/3/2/0132368684.pdf>

- Das, B. M. (2016). *Principles of Foundation Engineering* (EIGHTH, pp. 155–211). Cengage Learning. [https://www.academia.edu/44479953/Principles\\_of\\_Foundation\\_Engineering](https://www.academia.edu/44479953/Principles_of_Foundation_Engineering)
- Das, B. M. (2019). *Advanced Soil Mechanics; Fifth Edition* (FIFTH, pp. 585–602). Taylor & Francis Group. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781351215183/advanced-soil-mechanics-fifth-edition-braja-das>
- Escolano-Sánchez, F., Bueno-Aguado, M., & Fernández-Ordóñez, D. (2015). Análisis comparativo entre el método por elementos finitos (FEM) y el método clásico (MC) en la estimación de asientos y cálculo del coeficiente de balasto para el diseño de losas de cimentación en zonas afectadas por cavidades naturales o antrópicas. *Informes de La Construcción*, 67(537), e069. <https://doi.org/10.3989/ic.13.060>
- Fine Software. (2021). *Manual de Ingeniería - Análisis de asentamiento del terreno* (pp. 1–10). GEO 5. <https://www.finesoftware.es/software-geotecnico/manual-ingenieria/>
- Flores, D., Meliton Angeles Ortega, E., Freddy Flores Valencia, R., Manuel Muñoz Vargas, R., Alonso Parian Rivera, B., Marckley, Y., Beyk, Z., & Pablo Lima, J. (2020). *Comparación de metodologías para el cálculo de asentamientos en suelos granulares*. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/18107>
- Hakro, M. R., Kumar, A., Ali, M., Habib, A. F., de Azevedo, A. R. G., Fediuk, R., Sabri, M. M. S., Salmi, A., & Awad, Y. A. (2022). Numerical Analysis of Shallow Foundations with Varying Loading and Soil Conditions. *Buildings*, 12(5), 693. <https://doi.org/10.3390/buildings12050693>
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). *Soil Mechanics* (FIRST, pp. 374–387). John Wiley & Sons, Inc. [https://www.academia.edu/44624675/Mec%C3%A1nica\\_de\\_Suelos\\_T\\_William\\_Lambe\\_Robert\\_V\\_Whitman](https://www.academia.edu/44624675/Mec%C3%A1nica_de_Suelos_T_William_Lambe_Robert_V_Whitman)
- Ou, C.-Y., Yang, K.-H., Teng, F., Chiou, J.-S., Lu, C.-W., Li, A.-J., Ching, J., & Liao, J.-T. (2024). *Fundamentals of Foundation Engineering*. <https://doi.org/10.1201/9781003350019>
- Pastor, J. L., Tomás, R., Cano, M., & Riquelme, A. J. (2018). Estudio comparativo del potencial de licuación de suelos usando las normas españolas y el Eurocódigo. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 70(3), 761–778. <https://doi.org/10.18268/BSGM2018v70n3a9>

- Rodríguez, P. C., Alcaide, A. P., Gepp, J. E., Cornejo, M. O., & Caldentey, A. P. (2014). Bases de cálculo del Eurocódigo 7. Un cambio en la metodología para el proyecto de cimentaciones. *Hormigón y Acero*, 65(271), 31–46. [https://doi.org/10.1016/S0439-5689\(14\)50005-8](https://doi.org/10.1016/S0439-5689(14)50005-8)
- Schmertmann, J. H. (1970). Static Cone to Compute Static Settlement Over Sand. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(3), 1011–1043. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001418>
- Sivakugan, N. ., & Das, B. M. . (2010). *Geotechnical engineering : a practical problem solving approach* (FIRST, pp. 341–377). J. Ross Publishing. [https://books.google.com.co/books/about/Geotechnical\\_Engineering.html?id=ng2LAuFIT7kC&redir\\_esc=y#:~:text=Geotechnical%20Engineering%3A%20A%20Practical%20Problem%20Solving%20Approach%20covers,hands-on%20approach%20with%20a%20very%20strong%20practical%20bias.](https://books.google.com.co/books/about/Geotechnical_Engineering.html?id=ng2LAuFIT7kC&redir_esc=y#:~:text=Geotechnical%20Engineering%3A%20A%20Practical%20Problem%20Solving%20Approach%20covers,hands-on%20approach%20with%20a%20very%20strong%20practical%20bias.)
- Yuan, B., Li, Z., Chen, W., Zhao, J., Lv, J., Song, J., & Cao, X. (2022). Influence of Groundwater Depth on Pile–Soil Mechanical Properties and Fractal Characteristics under Cyclic Loading. *Fractal and Fractional*, 6(4), 198. <https://doi.org/10.3390/fractalfract6040198>

**Anexos**

*Anexo 1 Parámetros Geotécnicos Torres A y B.*

*Anexo 2 Parámetros Geotécnicos Cubarral*

*Anexo 3 Cálculo Capacidad Portante y Asentamientos*