



**Optimización y mejoramiento en el diseño de cimentaciones, de acuerdo al análisis
geotécnico de los estudios de suelo**

Jose Alfredo Medrano Torres

Informe de semestre de industria para optar al título de ingeniero civil

Asesor interno

Yenni Mariana Ramírez Mazo, Ingeniera civil.

Asesor externo

Edelin Palacios Mena, Especialista en mecánica de suelos y geotecnia.

Universidad de Antioquia
Facultad ingeniería, Escuela ambiental
Ingeniería Civil
Apartadó, Antioquia
2023

Cita	(Medrano-Torres, 2023)
Referencia	Medrano-Torres, J. A., (2023). <i>Optimización y mejoramiento en el diseño de cimentaciones, de acuerdo al análisis geotécnico de los estudios de suelo</i> [Semestre de industria]. Universidad de Antioquia, Apartadó, Antioquia, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Este título lo dedico principalmente a Dios,
por la vida y brindarme la sabiduría necesaria para afrontar los retos
que se presentaron durante mi vida personal y universitaria, también a mis padres por el apoyo
incondicional que me han brindado, la paciencia y confianza que siempre han tenido con
mi formación profesional, a mis familiares y a todas las personas
que me han ayudado a alcanzar este objetivo.

Agradecimientos

Primeramente, a Dios y a mis familiares, por haberme acompañado en este largo proceso y
especialmente a mis padres y hermana por su amor, cariño y comprensión, por ser ese motor que
impulsaba durante estos años mis deseos y ganas de culminar esta bella carrera.

Agradezco grandemente a mi alma mater, a mi querida Universidad de Antioquia por la
formación que me ha dado y los grandes aprendizajes académicos, sociales y culturales que ha
inculcado en mi ser, a todos los docentes que con gran dedicación me acompañaron durante toda
la carrera y a toda la comunidad universitaria que estaba, está y estará presente en la historia de
esta bella y gloriosa alma mater.

A la empresa LABSUELO E INGENIERÍA S.A.S. por hacer parte de mi formación y darme la
oportunidad de realizar mis prácticas profesionales.

A todas las personas que han aportado para mi formación profesional, académica y personal para
alcanzar este logro.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos	12
2. Marco teórico	13
3. Metodología	29
4. Resultados y análisis.	31
5. Conclusiones	58
Referencias	59

Lista de tablas

Tabla 1 Valores típicos de peso unitario en suelos.	16
Tabla 2 Valores orientativos de densidades de suelos.	17
Tabla 3 Tamaño estándar de tamices.	18
Tabla 4 Prefijos para la clasificación de suelo (SUCS).	19
Tabla 5 Clasificación de suelo según la AASHTO.	20
Tabla 6 Valores orientativos para el coeficiente de Poisson.	22
Tabla 7 Relación de los golpes del SPT con el Ángulo de fricción en arcillas.	23
Tabla 8 Valores estimados de cohesión y ángulo de fricción, basado en número de golpes sin corregir del SPT.	23
Tabla 9 Relación del módulo de elasticidad con el número de golpes del SPT.	24
Tabla 11 Método constitutivo a utilizar según el material.	35
Tabla 12 Configuración general para el suelo a modelar.	44
Tabla 13 Capacidad portante del suelo, ejemplo 1.	46
Tabla 14 Metodologías usadas para análisis geotécnico de cada perfil de suelo.	49
Tabla 15 Capacidad de carga del suelo para la cimentación del perfil N°1.	52
Tabla 16 Capacidad de carga del suelo para la cimentación del perfil N°2.	52
Tabla 10 Permeabilidad según tipo de suelo - clasificación SUCS. Adaptado de: Sowers 1978.	54

Lista de figuras

Ilustración 1 Detalle del tomador de muestra para el ensayo SPT.	13
Ilustración 2 Tipos de martillo para realizar el ensayo SPT.	14
Ilustración 3 Correlación entre el número de golpes y parámetros geotécnicos en suelos granulares.	15
Ilustración 4 Perfil de suelo.	15
Ilustración 5 Entorno gráfico de inicio del software PLAXIS 2D.	21
Ilustración 6 Diagrama de una zapata: espesor y vuelo.	28
Ilustración 7 Clasificación general de las zapatas.	28
Ilustración 8 Esquemas y ecuaciones para el cálculo de la capacidad portante de un suelo.	32
Ilustración 9 Casos de afectación en la capacidad portante de un suelo, debido a la presencia del nivel freático.	32
Ilustración 10 Ejemplo para cálculo de capacidad portante.	33
Ilustración 11 Ejercicio resuelto en hoja de cálculo de capacidad portante.	34
Ilustración 12 Resultado del ejercicio de capacidad portante en el libro de Bowles.	34
Ilustración 13 Mapa geológico colombiano según el IGAC en la zona de estudio, Urabá.	36
Ilustración 14 Ejemplo de un problema de deformación plana y de uno axisimétrico.	37
Ilustración 15 Ventana de configuración general.	38
Ilustración 16 Pestaña Dimensiones en la ventana de configuración general.	38

Ilustración 17 Ventana principal del programa de introducción de datos y creación de la geometría.	39
Ilustración 18 Ventana de conjunto de configuración de los materiales.	39
Ilustración 19 Introducción de parámetros iniciales de los suelos.	40
Ilustración 20 Base de datos de materiales.	40
Ilustración 21 Configuración general del modelo para los suelos finos.	41
Ilustración 22 Carga por columna usada para los análisis en todos los modelos constitutivos.	41
Ilustración 23 Configuración general para el material: concreto.	42
Ilustración 24 Introducción de parámetros para el concreto.	42
Ilustración 25 Condiciones de borde, generación de malla y punto análisis.	43
Ilustración 26 Ubicación general del nivel freático.	43
Ilustración 27 Configuración general del suelo a modelar.	44
Ilustración 28 Parámetros geotécnicos introducidos al modelo de Mohr-Coulomb.	45
Ilustración 29 Asentamientos totales en el estrato de suelo, escala 1:20.	45
Ilustración 30 Esfuerzo promedio transmitidos al suelo, debido a la carga por columna.	45
Ilustración 31 Curva esfuerzo – deformación.	46
Ilustración 32 Perfil 1: Predominan estratos arcillosos.	47
Ilustración 33 Perfil 2: Perfil con presencia de arenas.	48
Ilustración 34 Geometría de la cimentación superficial usada para el análisis geotécnico.	48
Ilustración 35 Carga introducida en los modelos para el análisis geotécnico.	49
Ilustración 36 Presión de poros en los estratos de suelo, debido a la presencia del nivel freático en cada perfil.	50
Ilustración 37 Asentamientos totales del suelo en cada perfil.	51
Ilustración 38 Esfuerzo promedio en los perfiles de suelo.	51
Ilustración 39 Curva esfuerzo - deformación del perfil N°1.	53
Ilustración 40 Curva esfuerzo - deformación del perfil N°2.	53
Ilustración 41 Correlaciones de parámetros geotécnicos para la elaboración de modelo computacional para el análisis geotécnico.	54
Ilustración 42 Memoria para cálculo de parámetros para introducción de variables en el software PLAXIS 2D.	55
Ilustración 43 Valores estimados de cohesión y cuadro para interpolar valores, según el número de golpes del ensayo SPT.	55
Ilustración 44 Formatos para cálculo de capacidad portante del suelo - Terzaghi.	56
Ilustración 45 Formatos para cálculo de capacidad portante del suelo – Hansen.	57

Siglas, acrónimos y abreviaturas

NSR-10	Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente
SPT	Standard Penetration Test
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
AASTHO	American Association of State Highway and Transportation Officials
SGC	Servicio Geológico Colombiano
kg	Kilogramo
kN	Kilonewton
MPa	Megapascal
f^c	Resistencia a la compresión simple del concreto
m	Metros
cm	Centímetro
mm	Milímetros
UdeA	Universidad de Antioquia

Resumen

La mejora de procesos en el diseño de cimentaciones superficiales para la empresa LABSUELO E INGENIERÍA S.A.S. representa gestión de la calidad enmarcada en optimización del recurso tiempo, de manera que sea posible disminuir su inversión en desarrollo de cálculos y centrar su uso en la construcción de análisis geotécnico y las respectivas recomendaciones ingenieriles del proyecto.

Este documento pretende alcanzar dicha optimización a través de la modelación de dos perfiles de suelo predominante en la región de Urabá, conformados por suelos finos con capacidad portante media a baja y un alto nivel freático, para constatar los resultados con los obtenidos en el cálculo analítico de capacidad portante del suelo. Para ello fue necesario realizar una revisión bibliográfica sobre las metodologías y normativa aplicable, exploración del software PLAXIS 2D, comprensión de las metodologías constitutivas disponibles en la herramienta computacional, y la elaboración de dos modelos que brindaran información para el desarrollo de un análisis geotécnico.

Se presentan los resultados del proceso evidenciados en la modelación numérica de los perfiles y las hojas de cálculo correspondientes a la obtención analítica de la capacidad portante y el asentamiento del terreno, aportando agilidad, eficiencia, y economía a los futuros diseños geotécnicos de las cimentaciones superficiales que ejecutará la empresa LABSUELO E INGENIERIA S.A.S.

Palabras clave: Cimentaciones, geotecnia, cimentaciones superficiales, perfil de suelo, capacidad portante, modelo computacional, PLAXIS 2D.

Abstract

The improvement of processes in the design of shallow foundations for the company LABSUELO E INGENIERÍA S.A.S. represents quality management framed in time resource optimization, so that it is possible to reduce its investment in the development of calculations and focus its use in the construction of geotechnical analysis and the respective engineering recommendations of the project.

This document aims to achieve such optimization through the modeling of two predominant soil profiles in the region of Urabá, consisting of fine soils with medium to low bearing capacity and a high water table, in order to verify the results with those obtained in the analytical calculation of soil bearing capacity. For this purpose, it was necessary to carry out a bibliographic review of the methodologies and applicable regulations, exploration of the PLAXIS 2D software, understanding of the constitutive methodologies available in the computational tool, and the elaboration of two models that would provide information for the development of a geotechnical analysis.

The results of the process are presented, evidenced in the numerical modeling of the profiles and the spreadsheets corresponding to the analytical obtaining of the bearing capacity and the settlement of the soil, providing agility, efficiency and economy to the future geotechnical designs of the superficial foundations to be executed by the company LABSUELO E INGENIERIA S.A.S.

Keywords: Foundations, geotechnical engineering, shallow foundations, soil profile, bearing capacity, computational model, PLAXIS 2D.

Introducción

En los últimos años la construcción de obras civiles en la región de Urabá ha aumentado considerablemente, debido a la inversión que diversos sectores económicos han realizado en el sector (Colombiano, 2022). Es por ello por lo que la realización de estudios geotécnicos y obras civiles se hace cada vez más frecuente en la región. La normatividad colombiana establece que todas las obras civiles deben contar con los estudios geotécnicos según el grupo de uso de la edificación u obra a construir, estas normas se detallan con precisión en el TÍTULO H del REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE (NSR-10), allí, se establecen los estudios mínimos que debe tener cada proyecto a ejecutar, de acuerdo a las características que condicionan el desarrollo de la obra civil, permitiendo realizar un análisis sobre la necesidad de realizar un estudio geotécnico preliminar o definitivo.

La NSR-10 explica que un estudio geotécnico preliminar, tiene como finalidad brindar un primer acercamiento a las características del terreno, sin embargo, este no es obligatorio realizarlo, sino que depende del nivel de detalle y precisión de cada proyecto en particular (AIS, 2010), por otro lado, el estudio geotécnico definitivo, si es de presentación obligatoria para todos los proyectos de infraestructura urbanos y suburbanos en cualquier grupo de uso, este estudio se realiza en la etapa de pre construcción, presentando un alto impacto en la elaboración del diseño estructural del proyecto. La norma establece que un estudio geotécnico definitivo debe definir el tipo de suelo, el diseño y las recomendaciones para el proceso constructivo de la cimentación (AIS, 2010), en aras de suministrar información detallada y suficiente para la elaboración de diseños óptimos y seguros que brinden seguridad a las personas.

Los avances en los estudios en asociación con la evolución de la tecnología han permitido desarrollar los diseños con mayor efectividad, debido a que anteriormente los estudios geotécnicos se realizaban, mediante el uso de tablas y ábacos, por lo tanto, los tiempos que demandaba realizar un diseño completo para una cimentación era mucho mayor comparado con el tiempo requerido en la actualidad. Existe variedad de software en el mercado para el diseño de cimentaciones; tales como PLAXIS 2D, GEO5, CYPECAD, SAP2000, entre otros.

La empresa LABSUELO E INGENIERIA S.A.S. está ubicada en el municipio de Apartadó, Antioquia y lleva más de diez años en el mercado, prestando servicios de ingeniería civil, especializada en laboratorio de suelos y concretos, estudios de suelos, diseños arquitectónicos, diseños estructurales y construcción de cimentaciones, aportando confiabilidad y seguridad a las infraestructuras (Labsuelo e Ingeniería, 2022). Actualmente en la empresa no se usa ningún software geotécnico para el diseño de cimentaciones, estos diseños son realizados con tablas, ábacos y hojas de cálculo. La realización de los diseños bajo esta metodología ocasiona que los tiempos de entrega al cliente puedan ser mejorados y así aumentar la eficiencia de la empresa en sus diseños.

Es por ello que este proyecto pretende generar una metodología de diseño para la estandarización sistemática de procesos durante el análisis geotécnico y la implementación de modelos constitutivos aplicables para los perfiles de suelo de la región de Urabá, haciendo uso del software PLAXIS 2D para el diseño de las cimentaciones superficiales. De este modo; se reducen los tiempos de atención, ante la amplia y creciente demanda del sector construcción en la región, expandiendo su cobertura actualmente para la realización de diseños de manera más frecuentes, sin afectar la calidad y efectividad de los mismos, por parte de la empresa LABUSELO E INGENIERIA S.A.S.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Optimizar el análisis geotécnico de los estudios de suelo para el diseño de cimentaciones superficiales que realiza la empresa LABSUELO E INGENIERÍA S.A.S.

1.2 Objetivos específicos

- Reconocer los parámetros geotécnicos, tipo de perfiles de suelo y métodos de análisis para el cálculo de cimentaciones.
- Implementar el software PLAXIS 2D para el diseño y análisis de cimentaciones.
- Incorporar perfiles de suelos que presenta la región de Urabá.
- Seleccionar las teorías más aplicables al análisis geotécnico de los suelos de Urabá.
- Conocer las distintas metodologías de cálculo que permite realizar el software PLAXIS 2D para el análisis geotécnico.

2. Marco teórico

En un *estudio geotécnico* es fundamental el reporte del perfil del suelo en aras de una toma de decisiones acertadas para la ejecución de un proyecto ingenieril, este debe contener los datos del proyecto, subsuelo, de cada unidad geológica o de suelo, análisis geotécnicos, recomendaciones para diseño, recomendaciones para la protección de predios vecinos y recomendaciones para construcción (AIS, 2010).

Perfil de suelo

El perfil de suelo es una sección o corte vertical que en Colombia generalmente se obtiene a partir del Standard Penetration Test (SPT), el cual es un método de exploración muy usado en suelos, debido a su fácil ejecución y la cantidad de correlaciones que tiene el ensayo con parámetros geotécnicos de importancia para el análisis geotécnico del suelo. Este método consiste en introducir una cuchara partida al estrato de suelo con ayuda de un martillo que pesa aproximadamente 63.5 kg y se dejará caer libremente a una altura de 75 cm, luego se registra el número de golpes que se realizaron en tres repeticiones en los que la avanzó 15 cm, es decir, la longitud total de la perforación para la toma de una muestra es 45 cm (INV E-111, 2013).

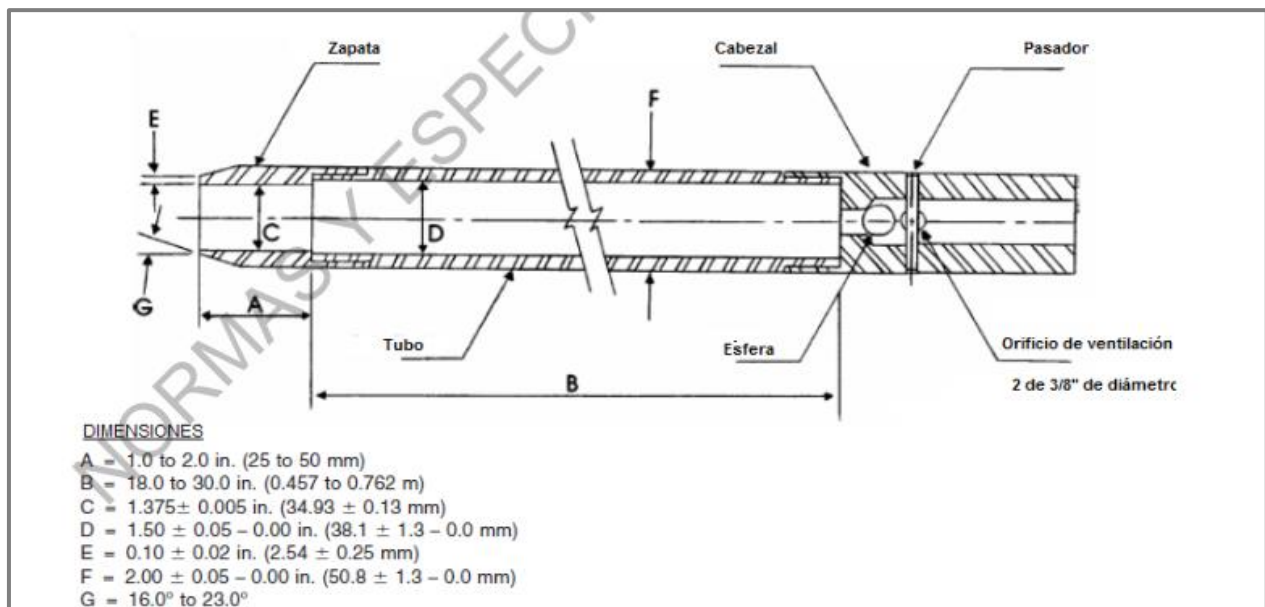


Ilustración 1 Detalle del tomador de muestra para el ensayo SPT. Fuente: INV-13 Sección 111.

En la ilustración 1 se detalla la forma del tomamuestra para ejecutar el ensayo SPT y se observa que es un tubo hueco, esto con la finalidad de que la muestra de suelo se incorpore dentro de él a medida que vamos hincando la varilla en el estrato de suelo.

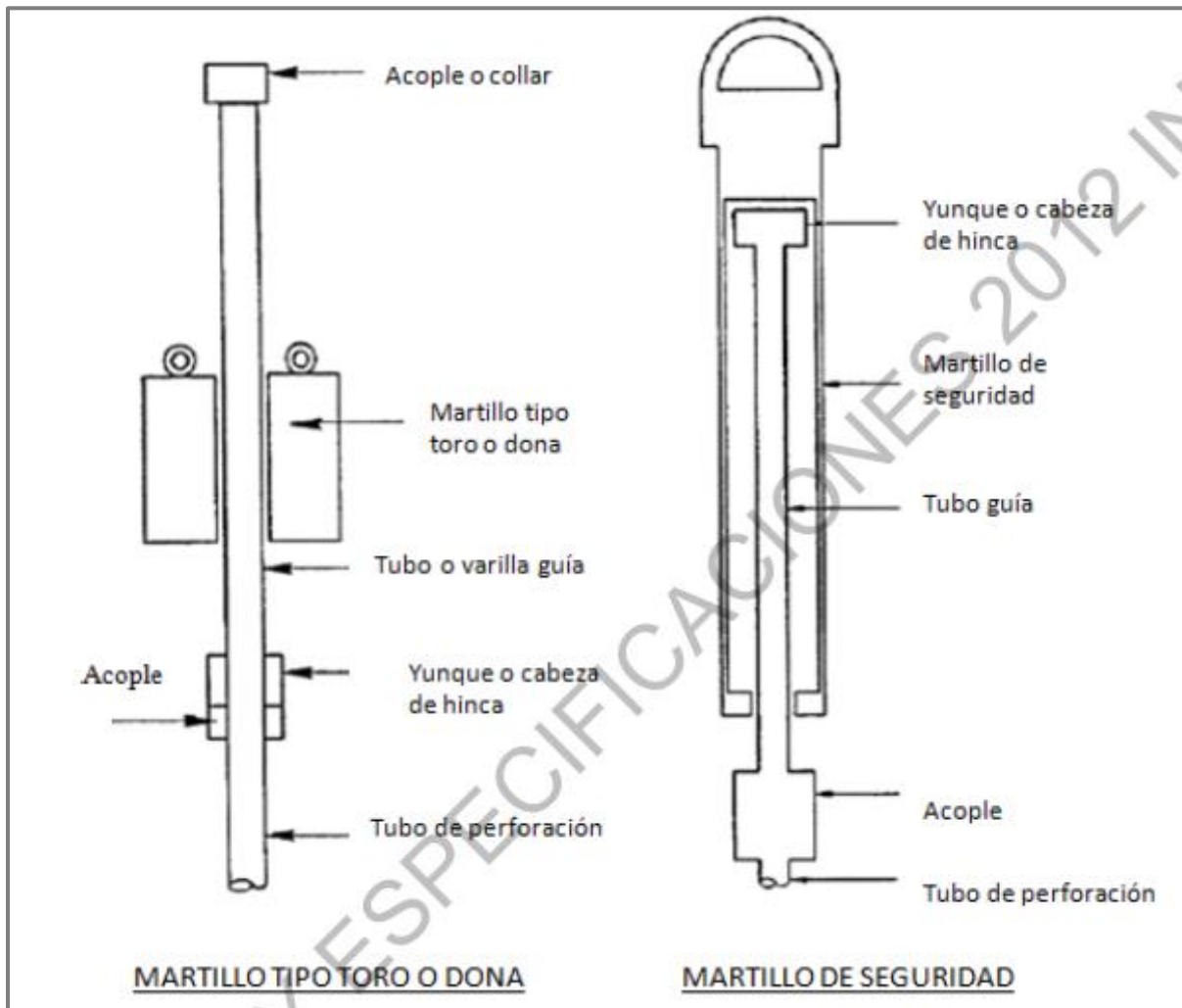


Ilustración 2 Tipos de martillo para realizar el ensayo SPT. Fuente: INV-13 Sección 111.

El hincado de la varilla en el suelo se logra gracias a la energía transmitida por el martillo, debido a esto es importante conocer la forma y peso de este instrumento porque a partir de la precisión de este con las dimensiones y peso estándar así mismo será la precisión de los parámetros geotécnicos obtenidos mediante correlación SPT. En la ilustración 2 se muestran dos tipos de martillos: el martillo tipo dona, consta de una masa hueca en el centro que permite la caída libre por la varilla guía hasta impactar al yunque o golpeador y el martillo de seguridad, que debido a su forma brinda mayor seguridad al operario.

Las correlaciones que se encuentran disponibles en la literatura para clasificar los suelos, según el número de golpes, en términos de granulometría, ensayos de consistencia, color, olor y penetración dinámica permiten elaborar un perfil de suelo aproximado correspondiente a la perforación realizada y lograr dar una buena aproximación en los modelos que se realizan en un software geotécnico (Crespo, 1996).

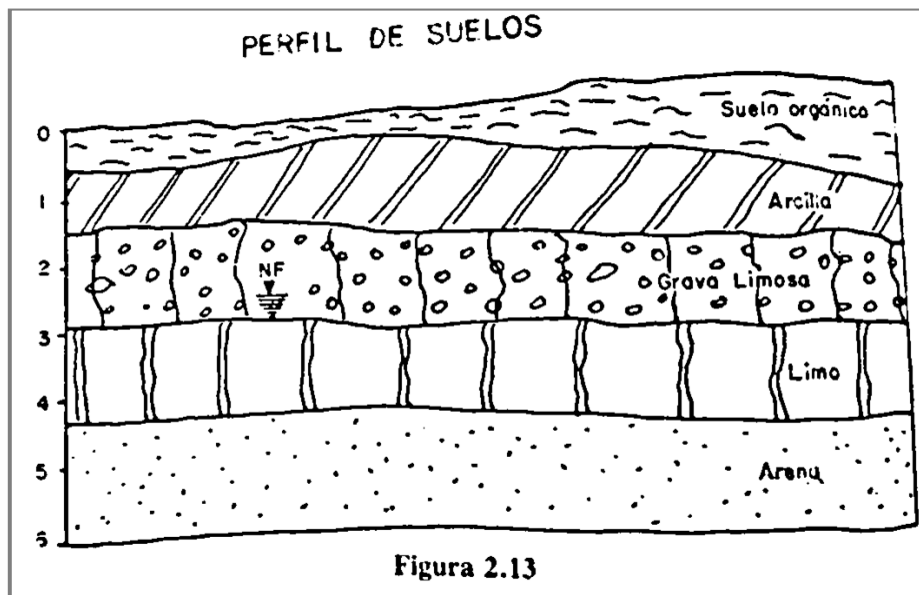


Ilustración 4 Perfil de suelo. Fuente: (Crespo, 1996)

TABLE 3-4
Empirical values for ϕ , D_r , and unit weight of granular soils based on the SPT at about 6 m depth and normally consolidated [approximately, $\phi = 28^\circ + 15^\circ D_r (\pm 2^\circ)$]

Description	Very loose	Loose	Medium	Dense	Very dense
Relative density D_r	0	0.15	0.35	0.65	0.85
SPT N'_{70} : fine	1-2	3-6	7-15	16-30	?
medium	2-3	4-7	8-20	21-40	> 40
coarse	3-6	5-9	10-25	26-45	> 45
ϕ : fine	26-28	28-30	30-34	33-38	
medium	27-28	30-32	32-36	36-42	< 50
coarse	28-30	30-34	33-40	40-50	
γ_{wet} , kN/m ³	11-16*	14-18	17-20	17-22	20-23

* Excavated soil or material dumped from a truck has a unit weight of 11 to 14 kN/m³ and must be quite dense to weigh much over 21 kN/m³. No existing soil has a $D_r = 0.00$ nor a value of 1.00. Common ranges are from 0.3 to 0.7.

Ilustración 3 Correlación entre el número de golpes y parámetros geotécnicos en suelos granulares. Fuente: (Bowles, 1997).

Las correlaciones que aparecen en la literatura sobre el ensayo SPT y parámetros geotécnicos del suelo tienen un alto impacto en la obtención rápida de resultados de diseño para una cimentación, también permiten comparar los resultados que muestra un modelo computacional y confrontar el error de ambos, precisión de cálculos y resultado final.

La estimación de estos parámetros del suelo no se realiza únicamente con ensayos SPT, también en la literatura hay reporte de valores típicos aproximados de algunos parámetros geotécnicos.

Tabla 1 Valores típicos de peso unitario en suelos. Fuente: (Murthy, 2002).

Soil no.	Description of soil	Porosity	Void ratio	Water content	Unit weight	
		n %	e	$w\%$	γ_d	γ_{sat}
1	2	3	4	5	6	7
1	Uniform sand, loose	46	0.85	32	14.0	18.5
2	Uniform sand, loose	34	0.51	19	17.0	20.5
3	Mixed-grained sand, loose	40	0.67	25	15.6	19.5
4	Mixed-grained sand, dense	30	0.43	16	18.2	21.2
5	Glacial till, mixed grained	20	0.25	9	20.8	22.7
6	Soft glacial clay	55	1.20	45	11.9	17.3
7	Soft glacial clay	37	0.60	22	16.7	20.3
8	Soft slightly organic clay	66	1.90	70	9.1	15.5
9	Soft highly organic clay	75	3.00	110	6.8	14.0
10	Soft bentonite	84	5.20	194	4.2	12.4

Tabla 2 Valores orientativos de densidades de suelos. Fuente: (CTE, 2006).

Tabla D.26. Valores orientativos de densidades de suelos			
Tipo de suelo		γ_{sat} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)
Grava		20 – 22	15 – 17
Arena		18 – 20	13 – 16
Limo		18 – 20	14 – 18
Arcilla		16 – 22	14 – 21

Tabla D.27. Propiedades básicas de los suelos			
Clase de suelo		Peso específico aparente (kN/m ³)	Ángulo de rozamiento interno
Terreno natural	Grava	19 – 22	34° - 45°
	Arena	17 – 20	30° - 36°
	Limo	17 – 20	25 – 32°
	Arcilla	15 – 22	16° – 28°
Rellenos	Tierra vegetal	17	25°
	Terraplén	17	30°
	Pedraplén	18	40°

Los parámetros de resistencia de un suelo se pueden obtener a partir de las correlaciones que establece la literatura para el ensayo SPT, sin embargo, la manera idónea de obtener estos resultados es a través de ensayos de laboratorio. Estos ensayos se deben realizar para garantizar que las propiedades físicas que introduciremos al modelo estén acorde al estrato de suelo específico del lugar de interés.

Los ensayos de laboratorio que se deben realizar como mínimo para la caracterización de un estrato de suelo son:

- **Granulometría:** Este ensayo se realiza mediante un análisis mecánico de suelo, el cual consiste en conocer como está distribuido los tamaños de la partícula de suelo. El procedimiento consiste en agitar una muestra de suelo a través de una pila de tamices con aberturas diferentes que se ubican según la abertura del tamiz de manera decreciente. A continuación, se muestra los tamaños estándar de tamices para realizar el ensayo de granulometría con el fin de clasificar el suelo (INV E-213, 2013).

Tabla 3 Tamaño estándar de tamices. Fuente: (Das, 2013).

Tamiz núm.	Abertura (mm)
4	4.750
6	3.350
8	2.360
10	2.000
16	1.180
20	0.850
30	0.600
40	0.425
50	0.300
60	0.250
80	0.180
100	0.150
140	0.106
170	0.088
200	0.075
270	0.053

- **Límites de Atterberg:** Actualmente en la ingeniería el termino aplica solamente a los límites líquido, plástico y límite de contracción. Estos límites diferencian los estados de consistencia que presentan los suelos plásticos (Das, 2013).

Después de haber realizados estos ensayos, es posible caracterizar el suelo bajo la clasificación SUCS y AASHTO.

SUCS: Este sistema de clasificación actualmente es el más aceptado porque es el que mejor satisface los diferentes campos de aplicación de la mecánica de suelos. El SUCS presentado por Arthur Casagrande separa los suelos gruesos de los finos mediante el tamizado a través de la malla No.200, estableciendo que para suelos en los que pase el 50% o menos de su peso, se clasificará como suelos gruesos y para suelos que pase más del 50% se clasificará como suelos finos. La clasificación SUCS presenta detalladamente seis principales tipos de suelos cada uno con su prefijo que proviene de su traducción al inglés y en cada uno de estos tipos también establece clasificaciones más específicas mediante sufijos, con el fin de enmarcar las distintas posibilidades en que se puede encontrar un estrato de suelo en la naturaleza (Crespo, 1996).

Ese sistema de clasificación básicamente se basa en cuatro criterios:

1. Porcentaje de finos.

2. Porcentaje de grava y arena.
3. Límite líquido y plástico
4. Coeficiente de uniformidad y curvatura.

Para clasificar el suelo por medio del SUCS se usa un prefijo y sufijo, por ejemplo, para referir a una arena arcillosa será SC o para una arcilla de alta plasticidad será CH. A continuación, se muestra los prefijos usados para la clasificación del suelo mediante el SUCS.

Tabla 4 Prefijos para la clasificación de suelo (SUCS).

Fuente: Elaboración propia. Adaptado de: (Crespo, 1996).

PREFIJO	
G	Grava
S	Arena
M	Limo
C	Arcilla
O	Suelos orgánicos
P	Turbas
L	Suelo de baja plasticidad
H	Suelo de alta plasticidad
W	Bien gradada
P	Pobremente gradada

AASHTO: Este sistema clasifica el suelo en siete grupos que va desde el A-1 a el A-7, pero dentro de cada grupo hay subgrupos asociados permitiendo así clasificar el suelo de manera más discreta. El AASHTO también clasifica el suelo basándose en la distribución del tamaño de sus partículas y su índice de plasticidad (Das, 2013).

Tabla 5 Clasificación de suelo según la AASHTO.

Fuente: Elaboración propia Adaptado de: (Yepes, 2021).

TABLA DE CLASIFICACION DE LA AASTHO												
CLASIFICACION GENERAL		MATERIALES GRANULARES (35% o menos del total pasa el tamiz N°200)						MATERIAL LIMO ARCILLOSO (Mas del 35% del total pasa el tamiz N° 200)				
CLASIFICACION DE GRUPO		A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7
		A - 1 - A	A - 1 - b		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
porcentaje de material que pasa el tamiz N°	10	50 max										
	40	30 max	50 max	51 min								
	200	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
características de la fraccion que pasa el tamiz N° 40	LL				40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
	IP	6 max	6 max	NP	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min
indice de grupo		0	0	0	0	0	4 max	4 max	8 max	12 max	16 max	20 max

El perfil de suelos presenta la información de que tipo de suelo se tiene a cada profundidad, para realizar un análisis geotécnico también es necesario conocer las propiedades físico-mecánicas del material como lo son:

- ✓ Gravedad específica
- ✓ Módulo de elasticidad
- ✓ Módulo de Poisson
- ✓ Permeabilidad
- ✓ Angulo de fricción
- ✓ Cohesión
- ✓ Angulo de dilatancia

Posteriormente a la obtención de estos parámetros y la presencia del nivel de agua en los estratos es posible la modelación del perfil de suelo para conocer los esfuerzos iniciales que tiene la masa de suelo y los que presentará después de implantada la carga de servicio que se requiere transmitir a causa de la edificación, es allí donde se requiere un modelo computacional o software geotécnico para optimizar el proceso de diseño.

Uno de los softwares disponibles en el mercado para el diseño geotécnico es PLAXIS 2D. Su interfaz de inicio es sencilla, así como se muestra en la ilustración 4, permitiendo al usuario gestionar los modelos con facilidad. Gracias a que el software está basado en un análisis bidimensional apoyado en elementos finitos que consiste en generar una malla en la geometría que le asignamos al modelo como se observa en la ventana de configuraciones generales mediante la ilustración 6, esta división de la capa de suelos en elementos finitos se realiza con el fin de representar de mejor manera la masa de suelo y así obtener más información de cómo es el comportamiento del estrato al someterlo a esfuerzo. Finalmente, se define la finura que tendrá esta malla que puede ser tan definida como el usuario lo requiera, permitiendo realizar modelos con infinidad de variedades geométricas en la interfaz de introducción de datos que se muestra en la ilustración 5 (Bentley, 2022).

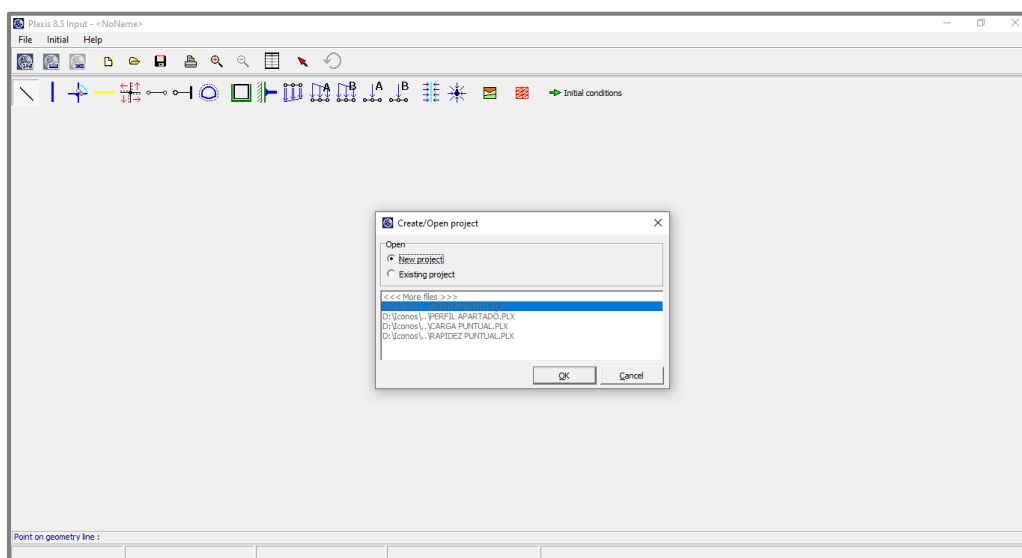


Ilustración 5 Entorno gráfico de inicio del software PLAXIS 2D. Fuente: Elaboración propia.

PLAXIS admite varios modelos constitutivos para simular el comportamiento del suelo, con el fin de obtener los esfuerzos a los que están sometidos los estratos de suelo a causa de su propio peso, presencia del agua y cargas externas. A continuación, se describe cada modelo constitutivo que el software permite usar para el análisis geotécnico (Plaxis, 2004):

Modelo elástico lineal:

Este modelo se basa en la ley de Hooke de elasticidad lineal isótropa, es decir, establece de entrada en las condiciones iniciales que el material presenta una variabilidad lineal en sus esfuerzos internos. Para la implementación de este modelo es necesario conocer los parámetros de rigidez elástica, estos se cuantifican u obtienen con el módulo de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson (ν). Este modelo elástico lineal tiene muchas limitaciones para simular el comportamiento de los suelos, sin embargo, su uso es adecuado para simular capas rígidas de suelo o elementos de concreto.

Para el concreto se recomienda establecer los siguientes valores como parámetros iniciales:

- ν = Varía entre 0.15 y 0.20 (Yaipen, 2022).
- $E = 1.25 * 10^6 \sqrt{f'_c}$, donde f'_c se introducirá en $\frac{kgf}{cm^2}$ y como resultado se obtendrá E en kPa (Segura, 2011).

Modelo de Mohr-Coulomb:

Este modelo se fundamenta en una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante para definir una envolvente de falla. Se utiliza como primera aproximación y se obtienen resultados de alta aceptación, debido a eso es el modelo más usado para modelar el comportamiento del suelo en general. Este método incluye cinco parámetros a saber: el módulo de elasticidad (E), el coeficiente de Poisson (ν), la cohesión (c), el ángulo de fricción (ϕ) y el ángulo de dilatación (ψ). Los parámetros a introducir al software pueden ser estimados para esta metodología como se describe a continuación:

- El módulo de Poisson (ν) que requiere el modelo se establecerá de acuerdo a los valores orientativos que se encuentran en la literatura:

Tabla 6 Valores orientativos para el coeficiente de Poisson. Fuente: (CTE, 2006).

Tipo de suelo	Coefficiente de Poisson
Arcillas blandas normalmente consolidadas	0,40
Arcillas medias	0,30
Arcillas duras preconsolidadas	0,15
Arenas y suelos granulares	0,30

- La cohesión (c) y Ángulo de fricción (ϕ) se estimará para los suelos granulares, de acuerdo a valores estimados por Karol (1960) y para las arcillas se tomará el valor del ángulo de fricción de acuerdo a los valores que reporta Crespo, mediante el número de golpes del ensayo SPT.

Tabla 7 Relación de los golpes del SPT con el Ángulo de fricción en arcillas.

Fuente: (Crespo, 1996).

N	En arcillas		ϕ Ángulo de fricción interna	E kg/cm ²
	q_v , kg/cm ²	Descripción		
< 2	< 0.25	Muy blanda	0°	3
2 – 4	0.25 – 0.50	Blanda	0 – 2	30
4 – 8	0.50 – 1.00	Media	2 – 4	45 – 90
8 – 15	1.00 – 2.00	Compacta	4 – 6	90 – 200
15 – 30	2.00 – 4.00	Muy compacta	6 – 12	> 200
> 30	> 4.00	Dura	> 14	

Tabla 8 Valores estimados de cohesión y ángulo de fricción, basado en número de golpes sin corregir del SPT. Fuente: (Karol,1960).

Soil Type and SPT Blow Counts	Undisturbed Soil	
	Cohesion (psf)	Friction Angle (°)
Cohesive soils		
Very soft (<2)	250	0
Soft (2-4)	250-500	0
Firm (4-8)	500-1,000	0
Stiff (8-15)	1,000-2,000	0
Very stiff (15-30)	2,000-4,000	0
Hard (>30)	4,000	0
Cohesionless soils		
Loose (<10)	0	28
Medium (10-30)	0	28-30
Dense (>30)	0	32
Intermediate soils		
Loose (<10)	100	8
Medium (10-30)	100-1,000	8-12
Dense (>30)	1,000	12

- Módulo de elasticidad (E), se estimará con una correlación del ensayo SPT que se estima a partir del número de golpes y el tipo de suelo que se penetra como se describe en la siguiente tabla:

Tabla 9 Relación del módulo de elasticidad con el número de golpes del SPT. Fuente: (AAHSTO 2004).

Estimating E_s from SPT N-value	
Soil Type	E_s (tsf)
Silts, sandy silts, slightly cohesive mixtures	4 N_{160}
Clean fine to medium sands and slightly silty sands	7 N_{160}
Coarse sands and sands with little gravel	10 N_{160}
Sandy gravel and gravels	12 N_{160}

Modelo para Roca Fracturada (Jointed Rock model):

Se trata de un modelo elástico-plástico anisótropo en que la rotura por acción de las tensiones tangenciales sólo puede producirse en un número limitado de direcciones de deslizamiento. Este modelo puede ser utilizado para simular el comportamiento de roca estratificada o fracturada, por lo tanto, no es común usar este método constitutivo para modelar el comportamiento de los estratos de suelos que presenta el eje bananero de la región de Urabá.

Modelo de Suelo con Endurecimiento (Hardening Soil model):

Se trata de una variante elastoplástica, formulado en el marco de la plasticidad de endurecimiento por fricción. Además, el modelo incluye el endurecimiento por compresión para simular la compactación irreversible del suelo bajo una compresión primaria. Este modelo de segundo orden puede ser utilizado para simular el comportamiento de arenas y gravas, así como de tipos de suelo más blandos, como arcillas y sedimentos.

Este método constitutivo se recomienda usar para arenas, gravas y arcillas de consistencia muy compacta o dura. Los parámetros que se requieren para implementar esta metodología son E_{50} , E_{oed} , y E_{ur} .

E_{50}^{ref} , Rígidez secante en ensayos triaxiales.

E_{oed}^{ref} : Rígidez tangente en cargas edométricas.

E_{ur}^{ref} : Rígidez en descarga – recarga.

A continuación, se muestra cómo se estiman estos parámetros para obtener una aproximación inicial del comportamiento del suelo mediante esta metodología.

$$E_{50}^{ref} = \frac{(1 - \nu)E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad E_{oed}^{ref} \approx E_{50}^{ref} \quad E_{oed}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$$

Donde ν es el módulo de Poisson del suelo a analizar y E es el módulo de elasticidad del material.

Modelo para Suelo Blando (Soft Soil model):

Se trata de un modelo que puede ser utilizado para simular el comportamiento de suelos blandos como arcillas normalmente consolidadas y turbas. El modelo proporciona buenos resultados en las situaciones de compresión primaria, por lo tanto, se recomienda usar para modelar arcillas, limos y suelos orgánicos.

Para analizar un estrato de suelo con este método constitutivo se requiere conocer dos variables que son λ^* y κ^* que son dependientes del índice de compresión C_c del suelo, definido como la pendiente obtenida de la curva de consolidación, sin embargo, Skempton en 1944 definió que este índice se puede estimar mediante el límite líquido (LL) del suelo como se muestra a continuación:

- Para muestras inalteradas: $C_c = 0.009(LL - 10)$
- Para muestras alteradas: $C_c = 0.007(LL - 10)$

De acuerdo con Cam, Kulhawy y Mane que proponen como estimar el índice de abultamiento C_s de los suelos en términos del índice de plasticidad (IP) se implementa la siguiente ecuación para estimar los parámetros necesarios para usar este método constitutivo:

- Para suelos cohesivos: $C_s \approx \frac{PI}{370}$

Finalmente, las variables λ^* y κ^* que se introducirán al modelo se definen de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{C_c}{2.3} \rightarrow \lambda^* = \frac{\lambda}{1 + e}$$

$$\kappa = 1.3 * \frac{1 - \nu}{1 + \nu} \rightarrow \kappa^* = \frac{\kappa}{1 + e}$$

Donde e es la relación de vacíos y ν el módulo de Poisson del suelo.

Cimentaciones Profundas

Las cimentaciones profundas están conformadas por un sistema de elementos estructurales que se encargan de transmitir adecuadamente las cargas al suelo a profundidades considerables (Muñoz, 2015). Se opta por este grupo de cimentaciones cuando el esfuerzo que necesito disipar en el subsuelo es alto y la capacidad portante de los estratos superiores no alcanzan la sollicitación deseada. Las cimentaciones profundas que se usan en Colombia son:

Pilotes: Los pilotes son la primera opción al pensar en cimentación profunda. Son elementos esbeltos que se introducen en el suelo a percusión buscando llegar a un estrato de suelo competente, según los requerimientos de resistencia para la fundación de la estructura, o desarrollando su capacidad de soporte por fricción. Pueden trabajar solos o combinados con sistemas de placas de cimentación (Muñoz, 2015).

Dados: Para complementar las estructuras de cimentación con pilotes, se construyen unos elementos de gran rigidez, capaces de distribuir las cargas de la superestructura que transmiten a la columna entre los pilotes que agrupan. Son conocidos como dados y, en búsqueda de esta gran rigidez, poseen un espesor y contenido de acero considerables (Muñoz, 2015).

Pantallas: Las pantallas son estructuras de contención que facilitan los procesos de excavación y dan garantía al proceso constructivo, además de generar un aporte importante al manejo del agua. El estudio geotécnico determina su uso y entrega los parámetros con los que deben ser diseñadas (Muñoz, 2015).

Caissons: Los caissons son una solución intermedia entre cimentaciones superficiales y cimentaciones con pilotes. Su origen se remonta al intento de resolver económicamente el problema presentado cuando el nivel de cimentación es considerable por ser el estrato superior incompetente para una cimentación superficial, más no al punto de requerir pilotes.

Posee ventajas como la facilidad en la perforación, ausencia de vibraciones, no exigencia de equipo costoso y el permitir la inspección directa del estrato sobre el que se está cimentando, sin embargo, debe tenerse en cuenta que su uso exige diámetros no menores a 0.8 m y una calidad en el suelo con las características geotécnicas suficientes para proveer

seguridad a la excavación de cada anillo, ya que el proceso de excavación es manual (Muñoz, 2015).

Cimentaciones superficiales

Son aquellas que se apoyan en capas superficiales del suelo, soportando las cargas a través de la ampliación de su base. Se presentan como solución de cimentación para estructuras de poca altura, cargas relativamente bajas o localizadas en suelos de fundación con capacidad portante aceptable (Muñoz, 2015). Algunos tipos de cimentaciones superficiales son:

Zapatas: las zapatas son un tipo de cimentación superficial que puede ser empleada en suelos de una capacidad portante media o alta. En este grupo de cimentación se tienen varias alternativas para emplear, las cuáles son:

Zapatas aisladas y vigas de amarre: se componen de un ancho dado de concreto que recibe cargas de un elemento estructural vertical y las trasmite a suelo de manera uniforme, anclando la estructura con vigas de amarre entre dados. La NSR-10 exige vigas de amarre entre zapatas aisladas, para todas las zonas de amenaza sísmica (baja, media y alta).

Zapatas corridas: una zapata corrida es comúnmente utilizada como elemento de cimentación de sistemas estructurales con muros portantes o sobre la que se van a apoyar tres o más columnas de la estructura. Este tipo de cimentación tiene una ventaja considerable frente a las zapatas aisladas porque tiene una menor sensibilidad a presentar asentamientos diferenciales en el terreno, debido a que distribuye de mejor manera las cargas de la estructura.

En general las zapatas pueden subdividirse en varios tipos, de acuerdo a diferentes criterios como la relación entre el canto y el vuelo o la ubicación de la carga vertical. A continuación, se detalla el vuelo y el canto de una zapata.

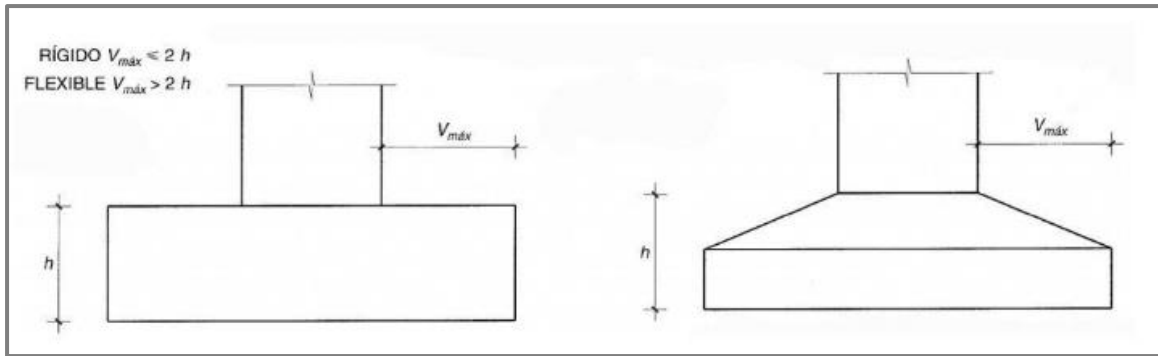


Ilustración 6 Diagrama de una zapata: espesor y vuelo. Fuente: (Agudelo, 2016)

Vuelo: $V_{m\acute{a}x}$, es la distancia desde la cara de la columna al borde de la base de la zapata.

Canto: h , es el máximo espesor de la zapata.

En general las zapatas se clasifican según su forma, relación canto/vuelo y ubicación de la carga vertical como se muestra a continuación:



Ilustración 7 Clasificación general de las zapatas. Fuente: ASOCRETO (Muñoz, 2015).

Placas de cimentación: Las placas flotantes o de cimentación, comúnmente conocida como losa de cimentación brinda una solución efectiva a los casos en los que es necesario transmitir las cargas al suelo a través de una gran área, de manera que los esfuerzos de contacto sean

relativamente bajos o cuando se tiene que el espacio entre zapatas es muy cerca mejor se opta por elegir una losa de cimentación. Su uso es común en edificios con sótanos sobre suelos de baja capacidad portante, donde la compensación entre el suelo excavado y el peso de la estructura permite que esta última “flote”. Su efecto es similar al de un barco en el agua (Muñoz, 2015).

3. Metodología

Este proyecto se desarrolló en cinco etapas que se pueden resumir en tres momentos, previamente se realizó una consulta detallada de los softwares geotécnicos disponibles en el mercado, posteriormente se hizo una revisión de las metodologías de análisis de suelos adecuadas para el diseño de cimentaciones según los perfiles de suelos que presenta la región de Urabá y finalmente analiza un diseño ya realizado por el empleador bajo su metodología actual, para luego replicarlo en el modelo que se propone en este proyecto y comprobar que los resultados obtenidos son confiables para posteriores aplicaciones. A continuación, se detalla cada una de las etapas que conforman la metodología del proyecto:

ETAPA I. Revisión bibliográfica sobre las metodologías de cálculo aplicables para el diseño geotécnico de cimentaciones.

En esta etapa se consultaron las metodologías de cálculo para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales y el cálculo de la capacidad portante del suelo de acuerdo al procedimiento detallado en la cuarta edición del libro Fundamentos de ingeniería geotécnica de Braja M. Das, Foundation analysis and design fifth edition de Joseph E. Bowles y el libro de Mecánica de suelos y cimentaciones de Crespo publicado en 1996; la elección de este material bibliográfico se debió a la estructura completa de los procedimientos presentados y la ejemplificación adecuada de las ecuaciones con diagramas que representan la situación física a analizar. También se consultó para una elaboración de la hoja de cálculo para la obtención de la capacidad portante de un suelo. También se consultó la NSR-10 para tener presente las recomendaciones y exigencias que se establece para un informe geotécnico, es decir, como debe ser la exploración, condiciones de análisis, parámetros físicos a tener presente e influencia de la estructura a la que se le realizará el análisis geotécnico.

Se extrajeron las ecuaciones que plantea el libro de Bowles para el cálculo de la capacidad portante de un suelo mediante la formulación de Hansen y Terzagui, sin embargo, también fue necesario consultar el libro de Braja M. Das para implementar las correcciones a causa de la presencia del nivel freático.

ETAPA II. Identificación de las teorías aplicables a los perfiles de suelo de Urabá a la luz de la normativa colombiana.

Durante esta etapa se revisó los modelos disponibles del software PLAXIS 2D, para la identificación de teorías aplicables a los perfiles de suelo del eje bananero de la región de Urabá, de acuerdo a la revisión bibliográfica realizada, también se constató la recomendaciones de aplicabilidad de cada modelo constitutivo según el manual de uso del software PLAXIS 2D y finalmente se consultó en el IGAC, como fuente de información primaria, los tipos de suelos predominantes en el eje bananero de la región de Urabá, con el fin de establecer las metodologías que se usarían para los perfiles de suelo de la región.

ETAPA III. Reconocimiento y exploración de la herramienta software PLAXIS 2D.

Se identificó el proceso de introducción de parámetros geotécnicos para cada modelo constitutivo, la determinación de las ventanas del software para el detalle de cada modelo, la introducción de valores para la elaboración del modelo computacional, determinación de las condiciones de borde del modelo, ubicación del nivel freático, creación de la malla para el cálculo finito del modelo computacional, proceso de cálculo del modelo, ventanas de resultados de esfuerzos, deformación, grado de saturación y la obtención de las curvas esfuerzo deformación.

ETAPA IV. Evaluación y verificación de resultados de diseño de cimentación superficial, de acuerdo con la NSR-10.

Para la elaboración del modelo computacional se usaron perfiles estratigráficos de la empresa LABSUELO E INGENIERIA obtenidos mediante la ejecución del ensayo SPT y se hizo uso de correlaciones para la obtención de parámetros geotécnicos para la implementación de los modelos constitutivos en el software PLAXIS 2D. También se consultó en la NSR-10 el aparte H.3.1 necesario para identificar las unidades de construcción, el aparte H.3.3 para constatar cómo debe ser el procedimiento para los ensayos de laboratorio que se requiere para realizar un análisis geotécnico y el apartado H.4.2 que se refiere los cálculos específicos para una cimentación.

Posteriormente, se procedió a introducir un modelo al software PLAXIS 2D para obtener los esfuerzos que siente el suelo al implantar la cimentación, para posteriormente diseñar la cimentación superficial que cumpla con los requisitos solicitados por la estructura y la normativa colombiana.

ETAPA V. Elaboración de documentación del proyecto a través de un manual de procedimientos de cálculo para el diseño de cimentaciones.

Finalmente, se documentaron todos los datos y archivos del proyecto. Los archivos que se elaboraron para la implementación de la metodología de diseño consisten en hojas de cálculo para la estimación de la permeabilidad de los suelos, de acuerdo a la clasificación SUCS, memoria de cálculo para obtener los valores de los parámetros necesarios a introducir en el software PLAXIS 2D, según la metodología seleccionada, y posteriormente este pueda ser aplicado a distintos proyectos o estudios geotécnicos.

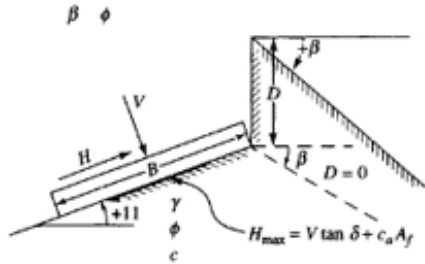
Esta documentación se realizó en un libro de Excel que contiene correlaciones de parámetros físicos del suelo con el ensayo SPT reportando en diferentes bibliografías, una hoja que permite calcular los parámetros efectivos de las variables geotécnicas que requiere el programa para implementar los modelos constitutivos, y dos hojas de cálculo para el análisis de la capacidad portante de un suelo usando las ecuaciones de Terzaghi y Hansen. Las ecuaciones usadas para la elaboración de esas hojas de cálculo se extrajeron del libro “Foundation analysis and design fifth edition” de Joseph E. Bowles, “Mecánica de suelos y cimentaciones” de Crespo publicado en 1996 y “Fundamentos de ingeniería geotécnica cuarta edición” de Braja M. Das.

4. Resultados y análisis.

ETAPA I. Revisión bibliográfica sobre las metodologías de cálculo aplicables para el diseño geotécnico de cimentaciones.

Las ecuaciones que fueron resultado de la revisión bibliográfica para la construcción de la hoja de cálculo de capacidad portante de un suelo son mostradas a continuación:

Notes: $\beta + \eta = 90^\circ$ (Both β and η have signs (+) shown.)



For: $L/B < 2$ use ϕ_{1r}

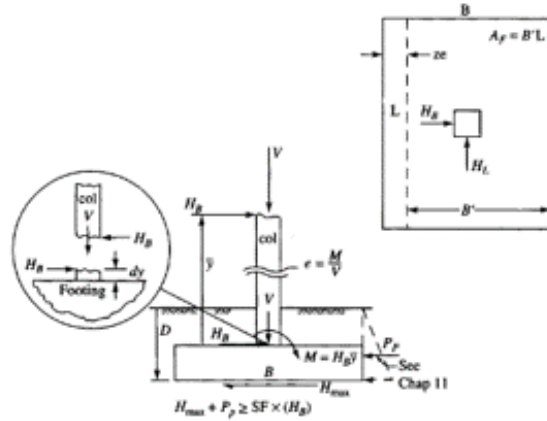
$L/B > 2$ use $\phi_{pr} = 1.5 \phi_{1r} - 17^\circ$

$\phi_u \leq 34^\circ$ use $\phi_u = \phi_{pa}$

$\delta =$ friction angle between base and soil ($.5\phi \leq \delta \leq \phi$)

$A_f = B'L'$ (effective area)

$c_a =$ base adhesion (0.6 to 1.0c)



Inclination factors	Ground factors (base on slope)
$i_c = 1 - \frac{mH_i}{A_f c_a N_c} \quad (\phi = 0)$	$g_c' = \frac{\beta}{5.14} \quad \beta \text{ in radians}$
$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_q - 1} \quad (\phi > 0)$	$g_c = i_q - \frac{1 - i_q}{5.14 \tan \phi} \quad \phi > 0$
i_q , and m defined below	i_q defined with i_c
$i_q = \left[1.0 - \frac{H_i}{V + A_f c_a \cot \phi} \right]^m$	$g_q = g_y = (1.0 - \tan \beta)^2$
Base factors (tilted base)	
$i_y = \left[1.0 - \frac{H_i}{V + A_f c_a \cot \phi} \right]^{m+1}$	$b_c' = g_c' \quad (\phi = 0)$
$m = m_B = \frac{2 + B/L}{1 + B/L}$	$b_c = 1 - \frac{2\beta}{5.14 \tan \phi}$
$m = m_L = \frac{2 + L/B}{1 + L/B}$	$b_q = b_y = (1.0 - \eta \tan \phi)^2$

Ilustración 8 Esquemas y ecuaciones para el cálculo de la capacidad portante de un suelo (Bowles, 1997).

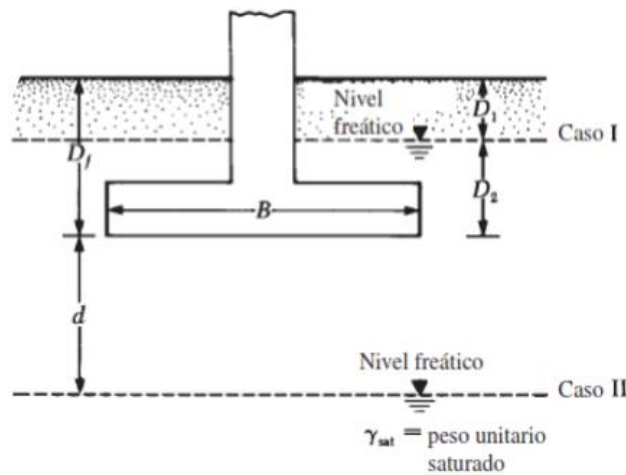


Ilustración 9 Casos de afectación en la capacidad portante de un suelo, debido a la presencia del nivel freático (Das, 2013).

En la ilustración 11 se muestran tres posibles casos en los que se podrá ubicar el nivel freático en un terreno, donde el caso I se refiere a que la presencia de agua en el subsuelo se encuentra más cerca al nivel del terreno que la longitud de desplante de la cimentación, el caso II indica que el nivel freático está ubicado entre la longitud de desplante y el ancho de la cimentación superficial y el caso III es cuando la diferencia de distancia entre la longitud de desplante y el nivel freático supera el ancho de la cimentación, indicando que el agua no afectará la capacidad portante del suelo.

Finalmente se procedió a comprobar la funcionalidad de la hoja de cálculo, para esto se eligió un ejemplo resuelto del libro de Bowles. El ejemplo seleccionado se muestra a continuación:

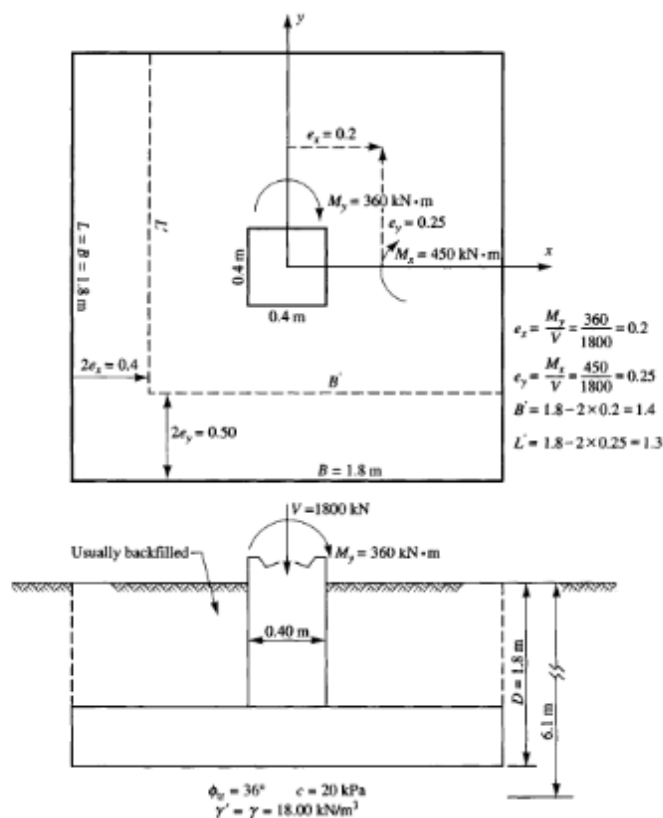



Ilustración 10 Ejemplo para cálculo de capacidad portante (Bowles, 1997).

Al introducir todos los datos que sugiere el ejercicio en la hoja de cálculo, se obtuvo un resultado de 1782.7 kPa. A continuación, se muestran resultados obtenidos mediante la hoja de cálculo:

	Labsuelos E Ingeniería S.A.S Nit: 900268808-1 CII 91 No. 95a-62 B/ Manzanares Apartado-Antioquia Tel: 8283650 Cel: 3104353851 Labsuelosltda@yahoo.es	CAPACIDAD DE CARGA DEL SUELO HANSEN
Proyecto:		Fecha:
Cliente:		Municipio:

Datos			
CONDICIÓN DE ANÁLISIS DEL SUELO			
GENERAL			
C' (kPa)	20,0	e _c (m)	0,25
γ _{sat} (kN/m ³)	18	e _y (m)	0,2
γ _{subto} (kN/m ³)	18	B (m)	1,8
γ _{agua} (kN/m ³)	9,81	L (m)	1,8
φ' (°)	36	B'	1,40
D _i (m)	1,8	L'	1,30
N.F (m)	6,1	F.S	3,0
q (kPa)	32,40	d (m)	4,30
k	1,0	θ (°)	90
A _t	3,24	β (°)	0
Ca	16,0	P (kN)	1800
α ₁	3	η (°)	0
α ₂	3		

TIPO CIMENTACIÓN		
RECTANGULAR		
Corrección N.F		
CASO III		

Carga			Forma			Profundidad		
N _c	51	Sc	1,80	d _c	1,40			
N _s	38	Sq	1,63	d _s	1,25			
N _r	40	S _r	0,60	d _r	1,00			

Inclinación de carga			Inclinación Terreno		
i _c	1,00	g _c	1,00	b _c	1,00
i _s	1,00	g _s	1,00	b _s	1,00
i _r	1,00	g _r	1,00	b _r	1,00

CAPACIDAD DE CARGA	
q _{ult} (kPa)	5348,2
F _{adm} (kN)	9733,8
q _{adm} (kPa)	1782,7
q _{adm} (kg/cm ²)	18,18
q _{adm} (ton/m ²)	181,8

Angulo medido respecto a la horizontal	
β (°)	Inclinación de la cimentación
η (°)	Inclinación del terreno

CAPACIDAD DE CARGA
Ecuación general

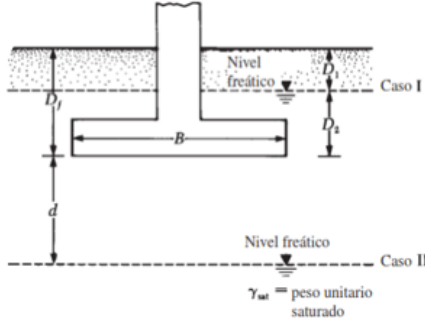
$$q_u = cN_c F_c + qN_q F_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_\gamma$$

donde:

$$F_c = s_c a_c i_c g_c b_c$$

$$F_q = s_q a_q i_q g_q b_q$$

$$F_\gamma = s_\gamma a_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma$$



Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica 4ed - Das Braja

Ilustración 11 Ejercicio resuelto en hoja de cálculo de capacidad portante.

Inserting values computed above with terms of value 1.0 not shown (except d_γ) and using $B' = 1.3$, we obtain

$$\begin{aligned}
 q_{ult} &= 20(51)(1.69)(1.4) + 1.8(18.0)(38)(1.55)(1.25) \\
 &\quad + 0.5(18.0)(1.3)(40)(0.62)(1.0) \\
 &= 2413 + 2385 + 290 = 5088 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

For SF = 3.0 the allowable soil pressure q_a is

$$q_a = 5088/3 = 1696 \rightarrow \mathbf{1700 \text{ kPa}}$$

Ilustración 12 Resultado del ejercicio de capacidad portante en el libro de Bowles (Bowles, 1997).

Finalmente, se puede observar que la hoja de cálculo de capacidad portante de un suelo construida para la empresa LABSUELO E INGENIERIA S.A.S. es funcional y arroja resultados conforme a la literatura, debido a que, la hoja de cálculo tiene como resultado 1782.7 kPa y el libro

de Bowles 1700 kPa, por lo tanto ambos resultados se pueden tomar como aceptables porque las cifras significativas que usa el libro de Bowles es lo que aleja el resultado de la hoja de cálculo.

A partir de la revisión bibliográfica realizada, es posible afirmar que la capacidad de carga de un suelo se debe interpretar como un valor dentro de un conjunto general de datos, debido a que este valor solo indica la capacidad portante que tiene el suelo para una condición de análisis específica y/o metodología utilizada.

ETAPA II. Identificación de las teorías aplicables a los perfiles de suelo de Urabá a la luz de la normativa colombiana.

Después de revisada la literatura del libro de Bowles, Crespo y Braja M. Das y de acuerdo a las recomendaciones del manual de PLAXIS 2D para la implementación de sus métodos constitutivos de análisis, se clasificaron los métodos a usar según el tipo de suelo que se desea analizar en la región de Urabá, como se describe en la siguiente tabla:

Tabla 10 Método constitutivo a utilizar según el material. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO CONSTITUTIVO DEL SOFTWARE PLAXIS 2D	TIPO DE MATERIAL
Modelo elástico – lineal.	Concreto
Modelo Mohr Coulomb	Todos los suelos
Modelo para Roca Fracturada	No aplica
Modelo de Suelo con Endurecimiento	Gravas y arenas
Modelo para Suelo Blando	Turbas, arcillas y limos

Como resultado de esta etapa se pudo determinar que los suelos que principalmente se encuentran en Urabá, son del tipo Areniscas líticas a sublíticas de grano medio interestratificadas con lodolitas; localmente turbas y lentes de conglomerados arenosos ($n_1 n_2 - St$), esto de acuerdo a lo reportado por el SGC (2020).

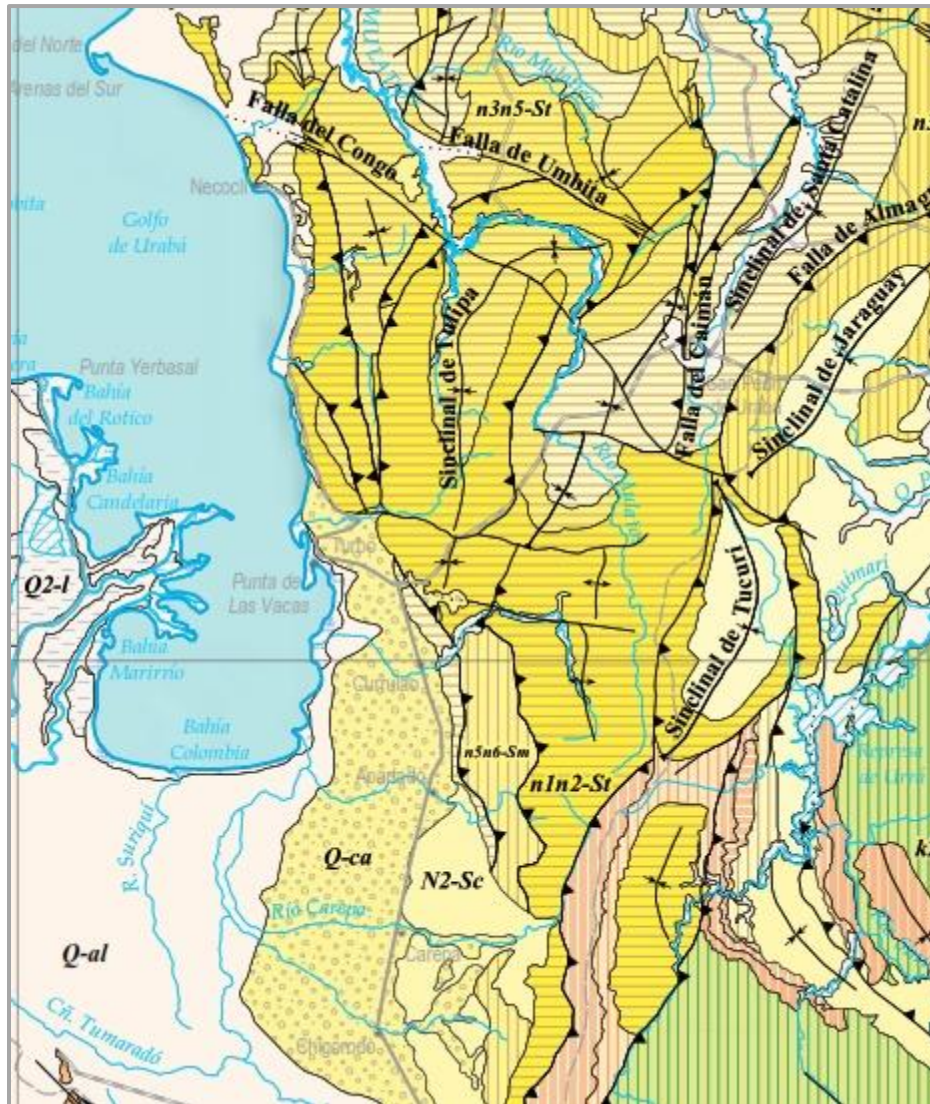


Ilustración 13 Mapa geológico colombiano según el IGAC en la zona de estudio, Urabá. (Gomez & Montes, 2020)

ETAPA III. Reconocimiento y exploración de la herramienta software PLAXIS 2D.

El software PLAXIS 2D presenta un manual muy completo, lo que permite que el usuario pueda en todo momento consultar el funcionamiento y requerimiento de cada módulo que contiene el software. Su interfaz permite construir perfiles con mallas de alta definición, lo que lo convierte en un software con modelos computacionales muy potentes para la realización de análisis geotécnicos de baja y alta complejidad.

A continuación, se muestra como es el procedimiento de introducción de los parámetros al modelo geotécnico para la obtención del esfuerzo y la deformación que presentará el estrato de suelo, debido al cambio de esfuerzos ocasionado por la cimentación superficial.

1. La primera ventana es la de configuración general, en la cual se deben introducir los siguientes datos:

Title: Título con el que se guardará el proyecto.

Comments: En este aparte se introducen los comentarios.

Model: PLAXIS 2D permite dos tipos de modelos; de deformación plana (plane strain) y Axisimétricos (Axisymmetric).

Plane strain: Se usará cuando se tenga una cimentación superficial con geometría rectangular o cuadrada.

Axisymmetric: Se utiliza para modelos con estructuras circulares, con sección transversal radial más o menos uniforme.

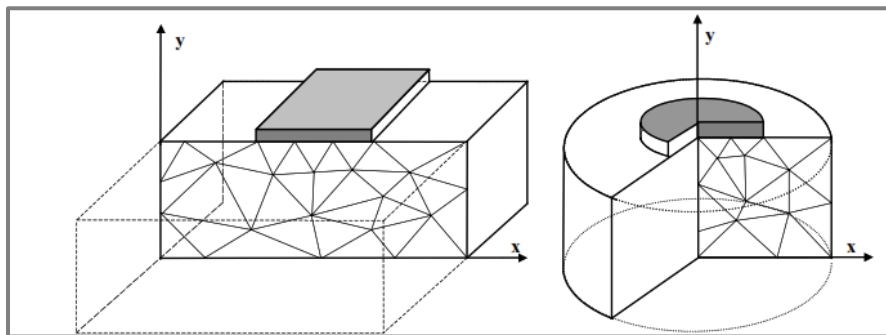


Ilustración 14 Ejemplo de un problema de deformación plana y de uno axisimétrico.

Fuente: (Plaxis, 2004)

Elements: PLAXIS 2D le permite al usuario seleccionar elementos triangulares de 6 nodos o de 15 nodos para modelar el suelo, sin embargo, se recomienda elegir el de 15 nodos para proporcionar mayor exactitud en los cálculos.

Acceleration: Por defecto el software ya tiene la gravedad definida con un valor de 9.80 m/s^2 y con una orientación de -90° . Además de la gravedad PLAXIS 2D le permite al usuario hacer análisis dinámicos introduciendo valor de aceleración en la dirección x y y, estas aceleraciones se deben introducir como múltiplo de la aceleración de la gravedad.

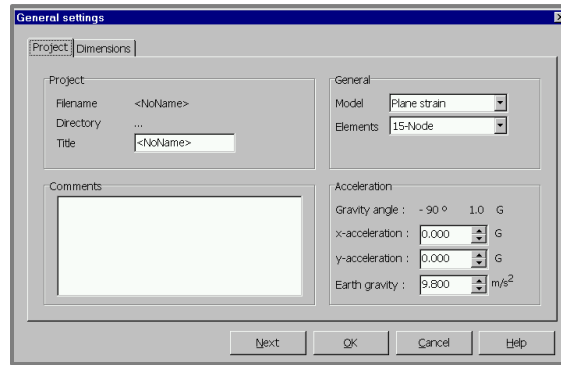


Ilustración 15 Ventana de configuración general. Fuente: (Plaxis, 2004)

Dimensions: En esta pestaña se configuran las unidades en que se correrá el modelo y las dimensiones de la grilla de trabajo.

Geometry dimensions: En este aparte se establece el área de trabajo del proyecto, es importante tener en cuenta que PLAXIS 2D por defecto dejará espacio disponible a los lados de la ventana, con el fin de no saturar el modelo.

Grid: Se utiliza para definir el espaciamiento de la grilla o malla de trabajo y permite establecer un número de intervalos entre espacio para poder introducir puntos entre cada espaciamiento.

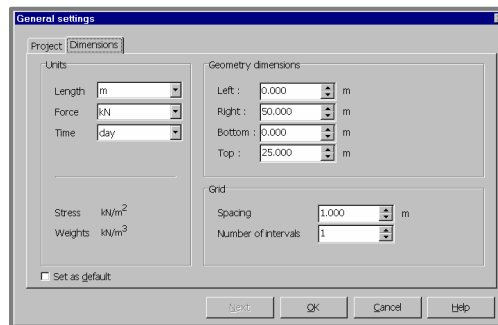


Ilustración 16 Pestaña Dimensions en la ventana de configuración general.

Fuente: (Plaxis, 2004)

Ya definida la configuración general del modelo se generará un lienzo de trabajo de acuerdo a los datos que se introducen inicialmente, en este aparte ya se inicia con la creación de la geometría del modelo. La introducción de puntos para dibujar la geometría se puede realizar manual mediante coordenadas o dando clic sobre el lienzo.

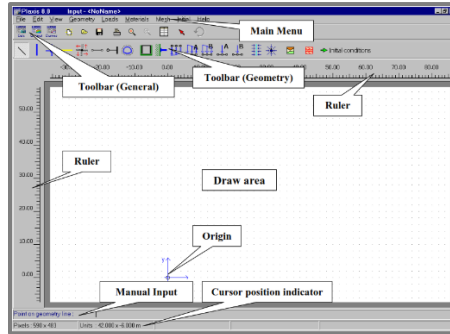


Ilustración 17 Ventana principal del programa de introducción de datos y creación de la geometría. Fuente: (Plaxis, 2004)

Las propiedades de los materiales que se van a usar en el modelo se definen con sus propiedades generales y los parámetros requeridos según el método constitutivo con el que se analizará el material. A continuación, se muestra la venta principal para la configuración de los materiales:

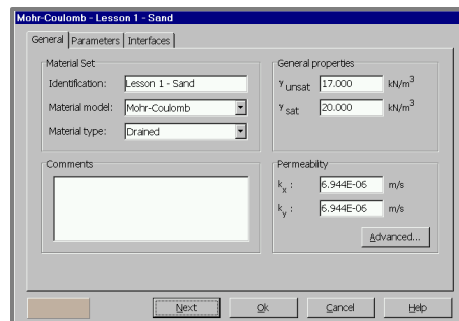


Ilustración 18 Ventana de conjunto de configuración de los materiales. Fuente: (Plaxis, 2004)



La ventana que se mostró anteriormente se desprende luego de pulsar este icono y dar clic en crear nuevo material.



Posterior a la introducción de todos los materiales que se usarán en el modelo y la elaboración de la geometría, se deberá pulsar este icono para generar los elementos finitos que determina la precisión del análisis numérico.

Finalmente, se concluye la introducción de datos iniciales al modelo y se procede a establecer la posición del nivel freático del perfil de suelo para posteriormente iniciar a calcular los esfuerzos y asentamientos que presentará el perfil según las condiciones establecidas en el modelo.

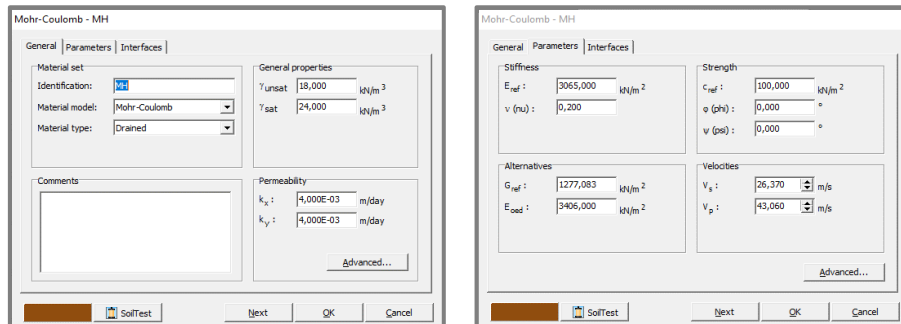


Ilustración 19 Introducción de parámetros iniciales de los suelos.

Posterior a la inspección detallada del software, se recomienda que se use el modelo plano de PLAXIS 2D (plane strain) para el análisis de asentamiento y distribución de cargas al subsuelo debido a la sobrecarga que soportará la cimentación, con el fin de no suponer simetrías que pueden o no ser reales en obra.

Se creó una base de datos preliminar con los suelos predominantes de la región a manera de introducción, de igual manera se pretende que esta vaya creciendo conforme se realicen estudios de suelos para así aumentar la base de datos del software y aumentar la eficiencia conforme se adquiera experiencia en el manejo de la herramienta computacional.

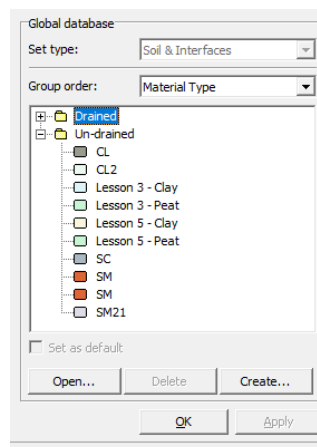


Ilustración 20 Base de datos de materiales. Fuente: Elaboración propia.

ETAPA IV. Evaluación y verificación de resultados de diseño de cimentación superficial, de acuerdo con la NSR-10.

Cada uno de los modelos constitutivos descritos han sido ejecutados en el software PLAXIS 2D en dos perfiles de suelo con condiciones diferentes para analizar los resultados que se obtiene con cada uno de ellos para suelos finos y granulares, y así concluir que metodología es más apropiada para cada tipo de suelo. A continuación, se indica el proceso y respectivos resultados de un proceso de evaluación y verificación de diseño.

Primeramente, se analizó el comportamiento con los diferentes modelos constitutivos para un suelo fino. A continuación, se ilustra el modelo generalizado con el que se analizaron las distintas metodologías, consiste en un estrato de suelo fino con 8.0 m de espesor, una zapata con base de 1.50 m, concreto de 21 MPa, longitud de desplante a 1.50 m y una carga que baja por columna de 550 kN/m.

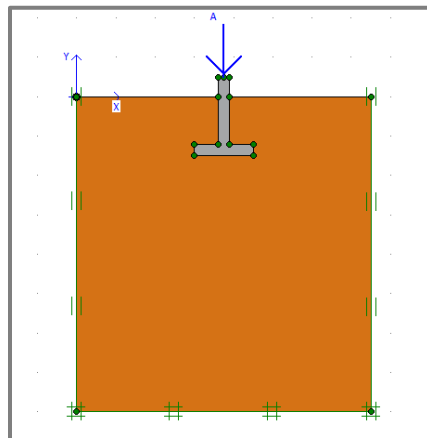


Ilustración 21 Configuración general del modelo para los suelos finos.

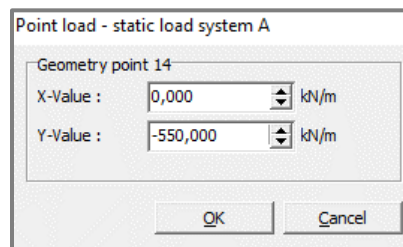


Ilustración 22 Carga por columna usada para los análisis en todos los modelos constitutivos.

Para la modelación de los elementos de concreto se recomienda modelar el material bajo la metodología elástica – lineal (Linear Elastic), el tipo de material configurarlo como no poroso

(Non-porous), módulo de Poisson (ν), y módulo de elasticidad según lo recomendado en el marco teórico para obtener mejores resultados en el modelo.

Linear Elastic - Concreto

General Parameters Interfaces

Material set

Identification: Concreto

Material model: Linear Elastic

Material type: Non-porous

General properties

γ_{unsat} : 24,000 kN/m³

γ_{sat} : 24,000 kN/m³

Comments

21 MPa

Permeability

k_x : 0,000 m/day

k_y : 0,000 m/day

Advanced...

SoilTest Next OK Cancel

Ilustración 23 Configuración general para el material: concreto.

Linear Elastic - Concreto

General Parameters Interfaces

Stiffness

E_{ref} : 1,811E+07 kN/m²

ν (nu): 0,150

Alternatives

G_{ref} : 7,876E+06 kN/m²

E_{oed} : 1,913E+07 kN/m²

Velocities

V_s : 1793,000 m/s

V_p : 2795,000 m/s

Advanced...

SoilTest Next OK Cancel

Ilustración 24 Introducción de parámetros para el concreto.

Antes de la ejecución del modelo es importante definir las condiciones de frontera o borde que presentará la modelación y definir la grid o malla, con el fin de que el software pueda modelar con precisión la situación de análisis. Después de establecer las condiciones iniciales es necesario definir el punto de interés que permitirá comprobar la respuesta del suelo mediante la curva esfuerzo – deformación.

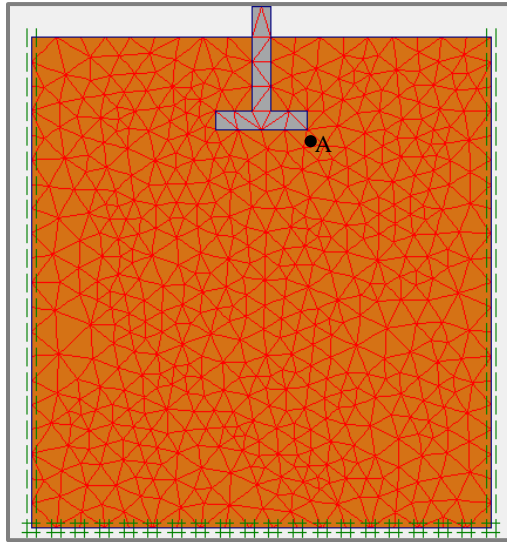


Ilustración 25 Condiciones de borde, generación de malla y punto análisis.

Las condiciones de nivel freático se definieron de tal forma que no tengan impacto en el comportamiento del suelo, debido a que, el objeto de análisis es la respuesta de los modelos constitutivos a los diferentes tipos de suelo y determinar cuál es el que brinda resultados confiables.

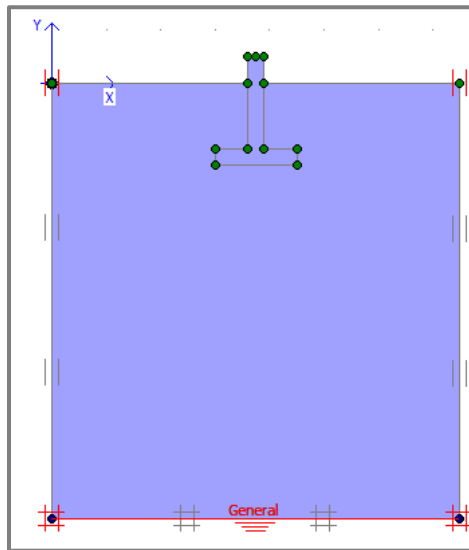


Ilustración 26 Ubicación general del nivel freático.

Con la geometría y parámetros del concreto definidos queda concentrarse en lo que es el objeto de análisis, en este caso el suelo, primeramente, se hizo el análisis con cada metodología para suelos finos. Este análisis se realizó para un limo arcilloso con alta plasticidad (MH) y las propiedades generales del suelo se muestra en la tabla 5 y los parámetros con que se simuló el modelo se ilustra

para cada metodología debido a que los datos de entrada varían en los modelos constitutivos que ofrece PLAXIS 2D.

Tabla 11 Configuración general para el suelo a modelar.

Tipo suelo (SUCS)	MH
Tipo de material	Drenado
Peso específico saturado (kN/m³)	24
Peso específico seco (kN/m³)	18
Permeabilidad (m/día)	0.004

A continuación, se muestra cómo se introdujeron los datos al software PLAXIS 2D. En los distintos métodos constitutivos se tiene la misma configuración que se ilustran, solo cambia la selección de la metodología que se elige en el modelo del material (Material model).

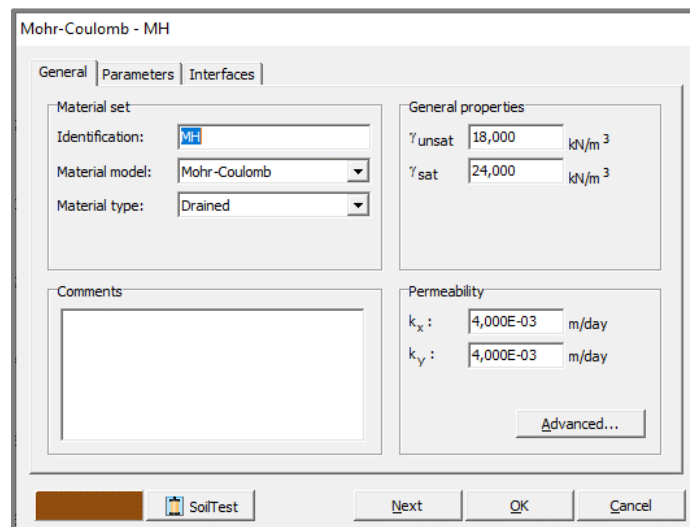


Ilustración 27 Configuración general del suelo a modelar.

Para Mohr-Coulomb se introdujeron los datos que se ilustra a continuación, de acuerdo a lo que se definió en el marco teórico del modelo. En la ilustración se observa que aparecen cuatro parámetros que no fueron introducidos, esto se debe a que el software PLAXIS 2D los estima mediante los parámetros que se le introducen.

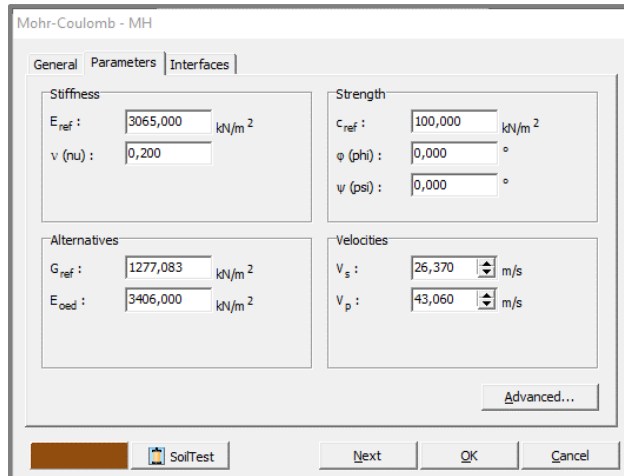


Ilustración 28 Parámetros geotécnicos introducidos al modelo de Mohr-Coulomb.

Luego de definir todos los parámetros del modelo se procede a calcular los asentamientos y esfuerzos que presentará el estrato de suelo, a continuación, se muestran los resultados obtenidos para este primer acercamiento al software:

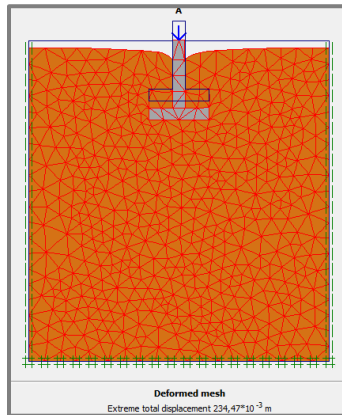


Ilustración 29 Asentamientos totales en el estrato de suelo, escala 1:20.

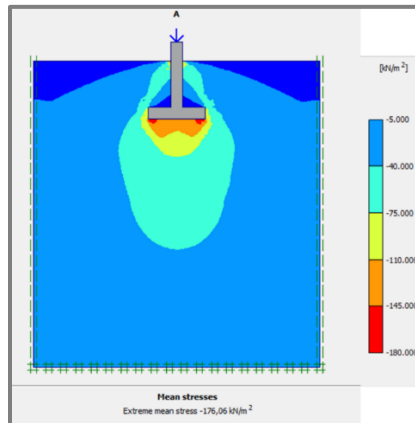


Ilustración 30 Esfuerzo promedio transmitidos al suelo, debido a la carga por columna.

En la ilustración 22 se observa el esfuerzo promedio que experimenta el estrato de suelo, debido a las cargas que bajan por la columna hasta la cimentación. El suelo debe ser capaz de soportar los esfuerzos transmitidos por la estructura, por lo tanto, se deberá calcular la capacidad de carga del suelo. Para el cálculo de esta capacidad portante se empleará la formulación de Hansen, a continuación, se muestra dicha capacidad a la longitud de desplante (D_f) diseñada:

Tabla 12 Capacidad portante del suelo, ejemplo 1.

CAPACIDAD DE CARGA DEL SUELO - HANSEN

Datos			
C' (kPa)	100	B (m)	1,5
γ_{sat} (kN/m ³)	24	L (m)	1,5
γ_{num} (kN/m ³)	18	γ_{agua} (kN/m ³)	9,81
ϕ' (°)	0	N.F (m)	10
D_f (m)	1,5		
TIPO CIMENTACIÓN			
RECTANGULAR			
Corrección N.F			
CASO III			

Carga		Forma		Profundidad	
N_c	5,14	S_c	1,19	d_c	1,40
N_q	1,00	S_q	1,00	d_q	1,00
N_γ	0,00	S_γ	0,60	d_γ	1,00

CAPACIDAD DE CARGA	
q_{ult} (kPa)	887,1
F_{adm} (kN)	1996,0

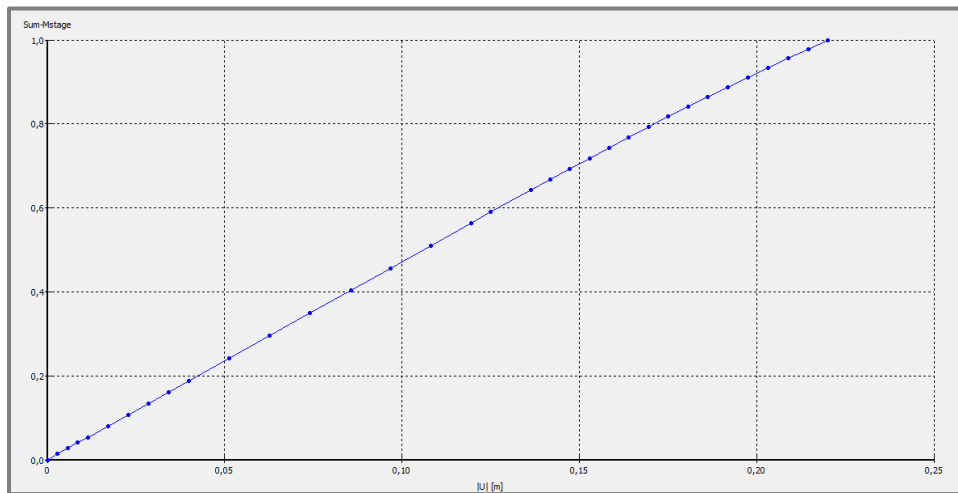


Ilustración 31 Curva esfuerzo – deformación.

En la ilustración 23 se observa la curva esfuerzo – deformación obtenida en el modelo, de acuerdo a las condiciones de carga a la que está sometido el material y los parámetros mecánicos que se establecieron. Esta curva que arroja el software PLAXIS 2D en su eje de ordenadas presenta una escala que va de 0 – 1, donde el 1 indica que el modelo aplicó toda la carga introducida sin que el

material colapsara, en el caso de que el material llegue a la rotura sin aplicar todos los esfuerzos se podrá inspeccionar esta curva esfuerzo – deformación para mayor análisis de los resultados.

Finalmente, el cálculo del factor de seguridad (F.S) se podrá estimar con la división de la fuerza admisible calculada en el análisis de capacidad de carga y la fuerza introducida al modelo geotécnico como se muestra a continuación:

$$F.S = \frac{F_{adm}}{P * B}$$

Siendo, P la carga puntual por columna expresada en [kN/m], B el ancho de la zapata en [m] y F_{adm} la carga que puede soportar el estrato de suelo en [kN].

Por lo tanto, el análisis geotécnico para la cimentación superficial propuesta en este ejemplo da como resultado un asentamiento total de 23.45 cm y un F.S de 1.45 para una carga de 550 kN/m que apoyará en una base de 1.5 m que según la NSR-10 puede corresponder a una edificación de 3 niveles.

Después de mostrar un primer modelo como acercamiento al funcionamiento del software PLAXIS 2D, se procede a analizar dos perfiles de suelos cada uno con características particulares, uno en donde predominan los estratos arcillosos y otro perfil de suelo que cuenta con la presencia de materiales mixtos que según la clasificación SUCS están en el grupo de las arenas, a continuación, se muestra e identifica cada perfil a analizar:

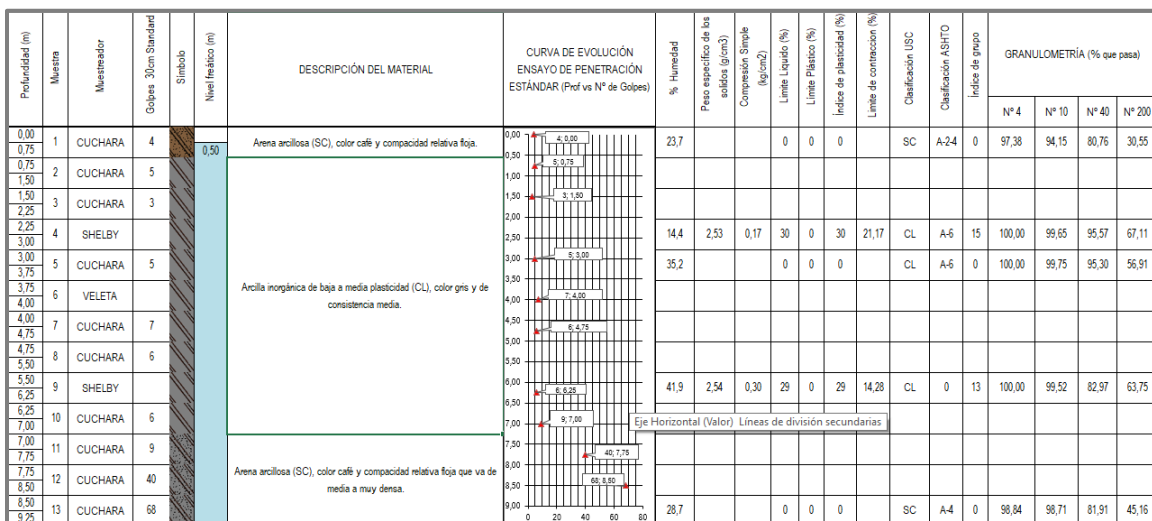


Ilustración 32 Perfil 1: Predominan estratos arcillosos.

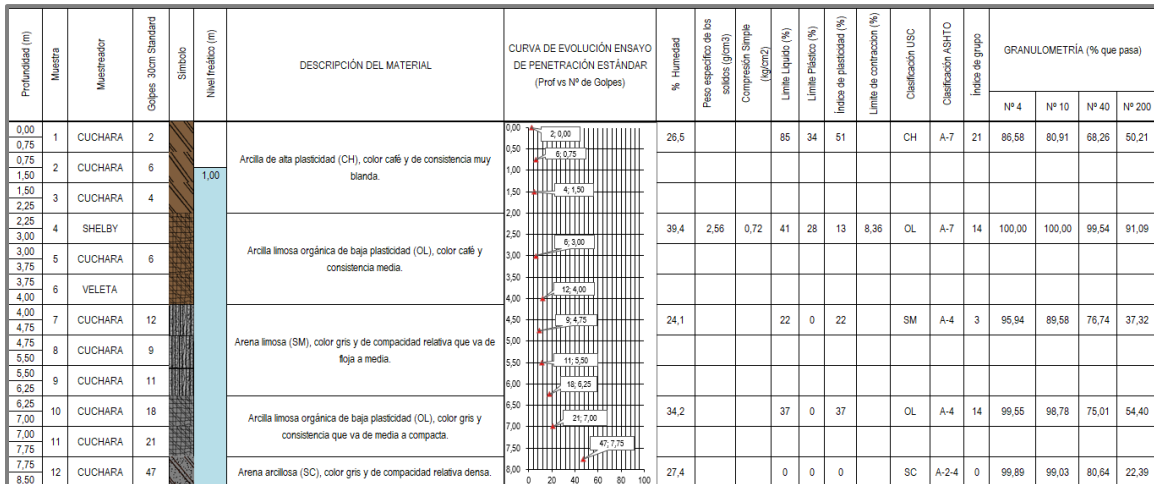


Ilustración 33 Perfil 2: Perfil con presencia de arenas.

Ambos perfiles de suelos se analizaron con la misma carga de servicio y dimensiones geométricas de la cimentación superficial, con el fin de obtener mayor análisis en el comportamiento de cada perfil de suelo.

A continuación, se detalla la cimentación superficial que se propuso para analizar cada modelo:

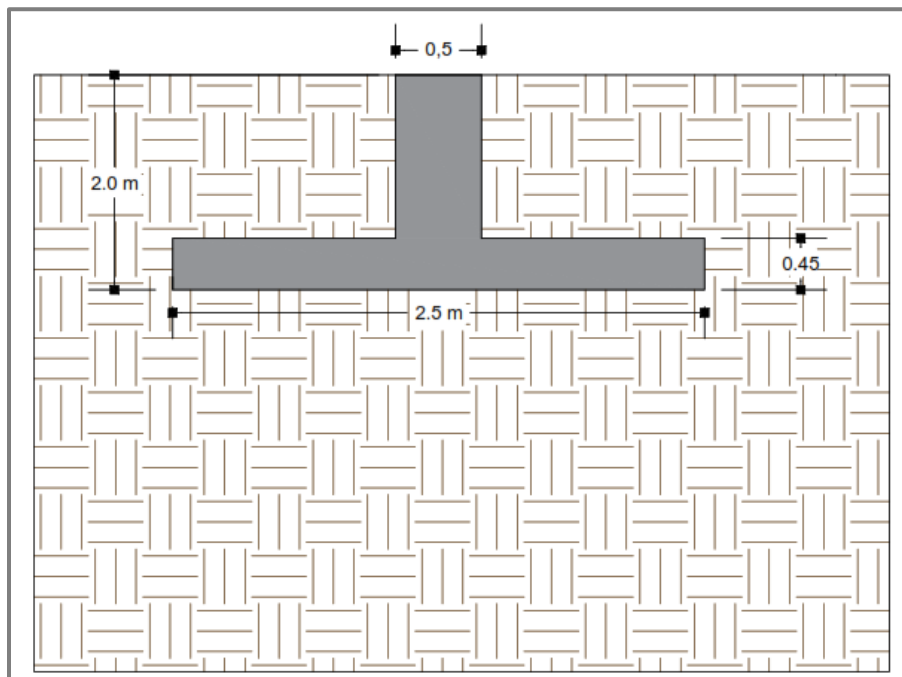


Ilustración 34 Geometría de la cimentación superficial usada para el análisis geotécnico.

La carga de servicio que se estableció para el análisis geotécnico es de 800 kN, sin embargo, el software PLAXIS 2D permite introducir cargas puntuales por metro de profundidad, es decir

[kN/m]. Por lo tanto, la carga de servicio introducida al modelo se estableció de la siguiente manera:

$P_l = \frac{P}{L}$, Donde P es la carga usada para el análisis (800kN) y L el largo de la cimentación superficial. En este caso se analiza una zapata cuadrada, por lo tanto, el largo de la zapata es de 2.5 m.

$$P_l = \frac{800 \text{ kN}}{2.5 \text{ m}} \rightarrow P_l = 320 \text{ kN/m}$$

Esta carga por metro es la que se introdujo en el software PLAXIS, pero con signo negativo para indicar que la dirección tiene el mismo sentido que la fuerza de gravedad.

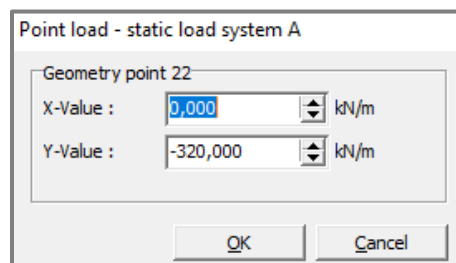


Ilustración 35 Carga introducida en los modelos para el análisis geotécnico.

De acuerdo a los resultados obtenidos del ensayo SPT que se resumen en la ilustración 24 e ilustración 25 se modeló el perfil de suelo en PLAXIS 2D, a continuación, se resume el espesor de los estratos, tipo de suelo y metodología usada para el análisis geotécnico en cada perfil de suelo.

Tabla 13 Metodologías usadas para análisis geotécnico de cada perfil de suelo.

Perfil N°1		
Profundidad (m)	SUCS	Método constitutivo usado
0.00 – 0.75	SC	Hardening soil model
0.75 – 7.00	CL	Soft soil model
7.00 – 12.00	SC	Hardening soil model
Perfil N°2		
Profundidad (m)	SUCS	Método constitutivo usado
0.00 – 2.25	CH	Soft soil model
2.25 – 4.00	OL	Soft soil model

4.00 – 6.25	SM	Hardening soil model
6.25 – 7.75	OL	Soft soil model
7.75 – 15.00	SC	Hardening soil model

Después de tener definido como se modelará cada estrato de suelo, de acuerdo a las recomendaciones que se establecen en el presente trabajo según el tipo de suelo se procede con el cálculo de los parámetros que requiere cada metodología con las ecuaciones que se establecieron en el marco teórico. A continuación, se muestran los resultados obtenidos de cada modelo:

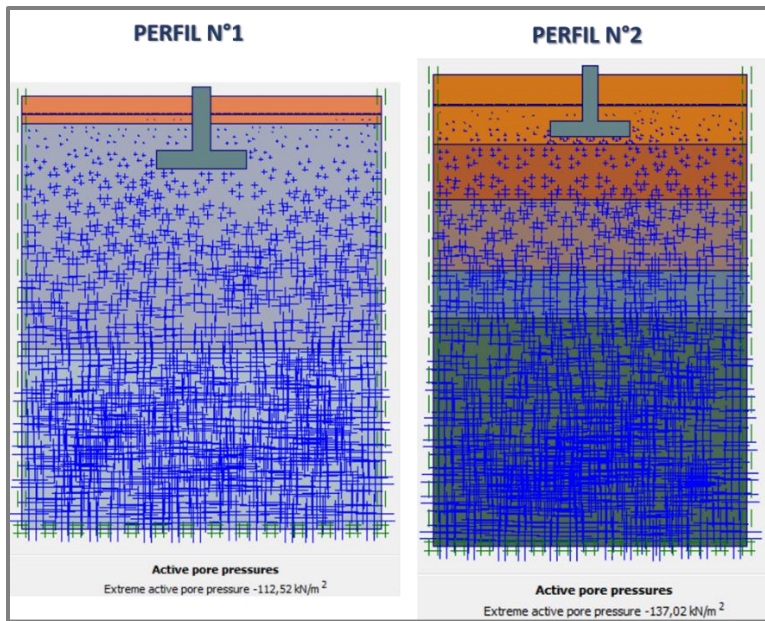


Ilustración 36 Presión de poros en los estratos de suelo, debido a la presencia del nivel freático en cada perfil.

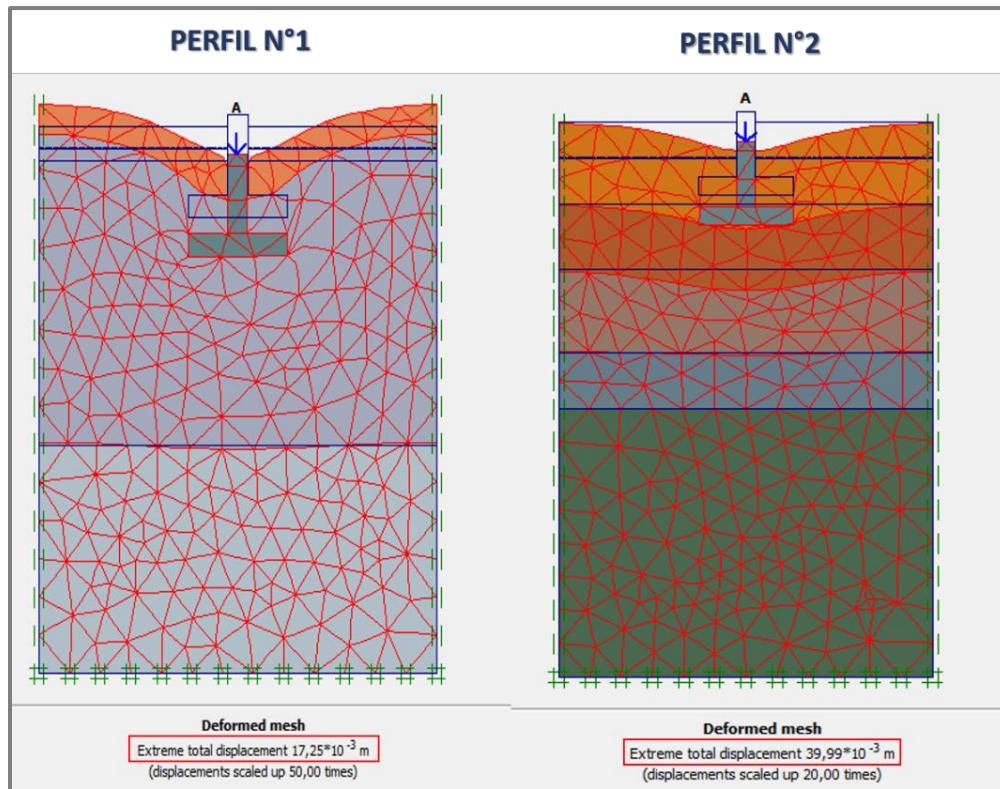


Ilustración 37 Asentamientos totales del suelo en cada perfil.

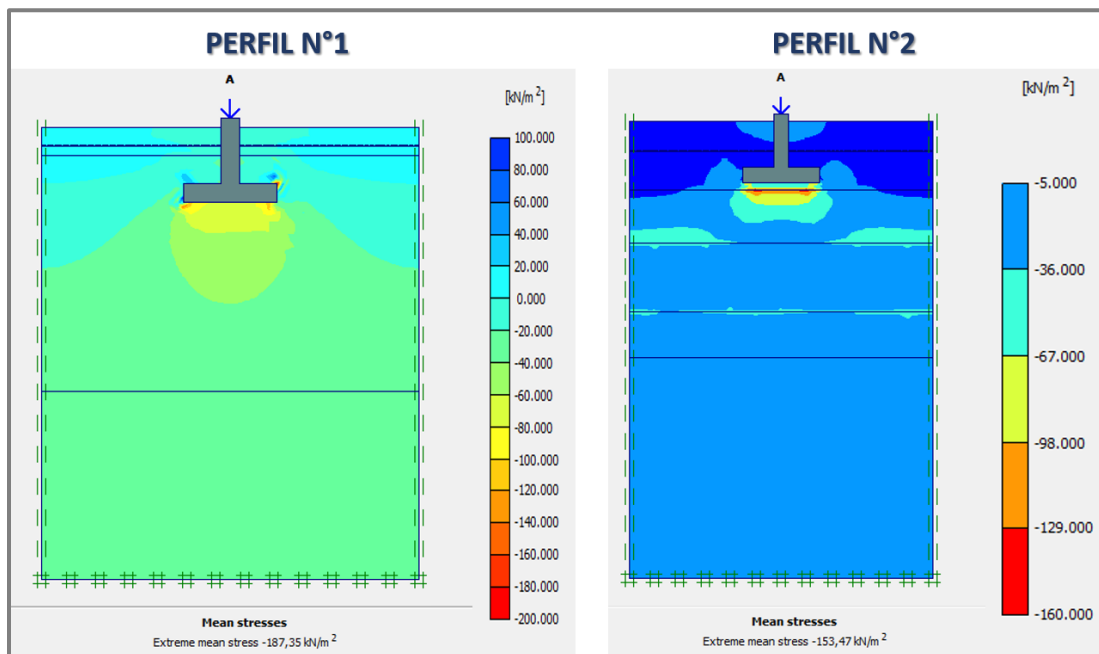


Ilustración 38 Esfuerzo promedio en los perfiles de suelo.

Los resultados que se obtuvieron en el software PLAXIS 2D, deben ser comparados con la capacidad de carga de cada suelo a la longitud de desplante que se indicó en el diseño de la cimentación superficial, por ende, se procede a calcular dicha capacidad portante para cada perfil.

Tabla 14 Capacidad de carga del suelo para la cimentación del perfil N°1

Datos			
C' (kPa)	37,5	B (m)	2,5
γ_{sat} (kN/m ³)	19	L (m)	2,5
γ_{hum} (kN/m ³)	16	γ_{agua} (kN/m ³)	9,81
ϕ' (°)	3	N.F (m)	0,5
D _f (m)	2		
TIPO CIMENTACIÓN			
RECTANGULAR			
Corrección N.F			
CASO I			

Carga		Forma		Profundidad	
N _c	5,90	Sc	1,22	d _c	1,32
N _q	1,31	Sq	1,05	d _q	1,08
N _γ	0,02	S _γ	0,60	d _γ	1,00

CAPACIDAD DE CARGA	
q _{ult} (kPa)	389,3
F _{adm} (kN)	2433,0

Tabla 15 Capacidad de carga del suelo para la cimentación del perfil N°2

Datos			
C' (kPa)	25	B (m)	2,5
γ_{sat} (kN/m ³)	22	L (m)	2,5
γ_{hum} (kN/m ³)	19	γ_{agua} (kN/m ³)	9,81
ϕ' (°)	2	N.F (m)	1
D _f (m)	2		
TIPO CIMENTACIÓN			
RECTANGULAR			
Corrección N.F			
CASO I			

Carga		Forma		Profundidad	
N _c	5,63	Sc	1,21	d _c	1,32
N _q	1,20	Sq	1,03	d _q	1,05
N _γ	0,01	S _γ	0,60	d _γ	1,00

CAPACIDAD DE CARGA	
q _{ult} (kPa)	266,1
F _{adm} (kN)	1662,9

De acuerdo a los análisis realizados y mostrados anteriormente mediante ilustraciones y tablas se identifica que la cimentación propuesta para cada perfil presenta asentamientos totales de 17 mm y 40 mm para los perfiles 1 y 2 respectivamente.

Finalmente, al inspeccionar la curva esfuerzo – deformación se identifica que el modelo completó satisfactoriamente la aplicación de toda la carga de servicio sin que el suelo llegara a un estado de falla. A continuación, se muestra la curva esfuerzo – deformación para cada modelo:

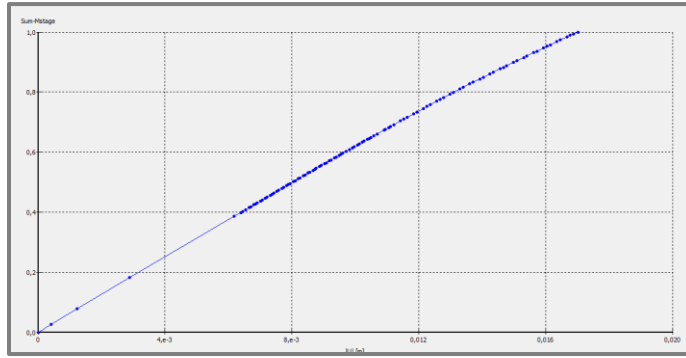


Ilustración 39 Curva esfuerzo - deformación del perfil N°1

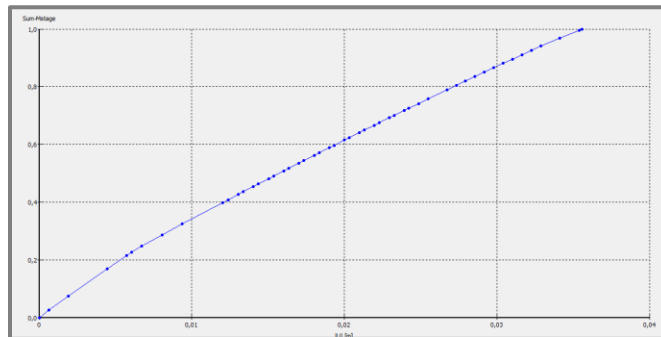


Ilustración 40 Curva esfuerzo - deformación del perfil N°2

El factor de seguridad del diseño de la cimentación superficial, de acuerdo al análisis geotécnico en los perfiles 1 y 2 es de 3.04 y 2.08 respectivamente.

ETAPA V. Elaboración de documentación del proyecto a través de un manual de procedimientos de cálculo para el diseño de cimentaciones.

Se presenta extractos del archivo de Excel con las correlaciones de parámetros geotécnicos para el cálculo de la capacidad portante de un suelo y el análisis finito, mediante el modelo computacional que se construye en el software PLAXIS 2D.

Relación de los golpes del SPT con el Ángulo de fricción en arcillas. (Crespo, 1996)

N	En arcillas		ϕ Ángulo de fricción interna	E kg/cm ²
	q_u , kg/cm ²	Descripción		
< 2	< 0.25	Muy blanda	0°	3
2 - 4	0.25 - 0.50	Blanda	0 - 2	30
4 - 8	0.50 - 1.00	Media	2 - 4	45 - 90
8 - 15	1.00 - 2.00	Compacta	4 - 6	90 - 200
15 - 30	2.00 - 4.00	Muy compacta	6 - 12	> 200
> 30	> 4.00	Dura	> 14	

Correlación entre el número de golpes y parámetros geotécnicos en suelos granulares. (Bowles, 1988)

TABLE 3-4
Empirical values for ϕ , D_r , and unit weight of granular soils based on the SPT at about 6 m depth and normally consolidated [approximately, $\phi = 28^\circ + 15^\circ D_r$, ($\pm 2^\circ$)]

Description	Very loose	Loose	Medium	Dense	Very dense
Relative density D_r	0	0.15	0.35	0.65	0.85
SPT N_{60} :					
fine	1-2	3-6	7-15	16-30	?
medium	2-3	4-7	8-20	21-40	> 40
course	3-6	5-9	10-25	26-45	> 45
ϕ :					
fine	26-28	28-30	30-34	33-38	
medium	27-28	30-32	32-36	36-42	< 50
course	28-30	30-34	33-40	40-50	
γ_{sat} , kN/m ³	11-16*	14-18	17-20	17-22	20-23

* Excavated soil or material dumped from a truck has a unit weight of 11 to 14 kN/m³ and must be quite dense to weigh much over 21 kN/m³. No existing soil has a $D_r = 0.00$ nor a value of 1.00. Common ranges are from 0.3 to 0.7.

Valores orientativos de ángulo fricción. (CTE, 2006)

Tabla D.26. Valores orientativos de densidades de suelos

Tipo de suelo	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)
Grava	20 - 22	15 - 17
Arena	18 - 20	13 - 16
Limo	18 - 20	14 - 18
Arcilla	16 - 22	14 - 21

Tabla D.27. Propiedades básicas de los suelos

Clase de suelo	Peso específico aparente (kN/m ³)	Ángulo de rozamiento interno
Terreno natural	19 - 22	34° - 45°

Relación de los golpes del SPT con el Ángulo de fricción en arenas. (Crespo, 1996)

Tabla 11.2

N	En arenas		ϕ Ángulo de fricción interna	E kg/cm ²
	Descripción	Compacidad relativa		
0 - 4	Muy floja	0 - 15%	28°	100

Ilustración 41 Correlaciones de parámetros geotécnicos para la elaboración de modelo computacional para el análisis geotécnico.

Se evidencia en ella la utilidad en el proceso porque permite obtener parámetros geotécnicos mediante el ensayo SPT de manera rápida y en un mismo lugar, otorgando eficiencia en el proceso de la elaboración del modelo computacional para el análisis geotécnico.

Tabla 16 permeabilidad según tipo de suelo - clasificación SUCS. Adaptado de: Sowers 1978.

Suelo	Descripción	Clasificación USCS	Permeabilidad (m/s)	Permeabilidad promedio (m/s)	Permeabilidad (m/día)			
					min	prom	max	
Gravas	Bien gradadas	GW	1E-03	1E-01	5,1E-02	86,4	4363,2	8640
	Bien seleccionadas	GP	1E-02	1E+01	5,0E+00	864,0	432432	864000
	Limosas	GM	1E-07	1E-05	5,1E-06	0,01	0,4363	0,9
	Arcillosas	GC	1E-08	1E-06	5,1E-07	0,001	0,0436	0,09
Arenas	Bien gradadas	SW	1E-05	1E-03	5,1E-04	0,8640	43,63	86,4
	Bien seleccionadas	SP	1E-04	1E-02	5,1E-03	8,64	436,32	864
	Limosas	SM	1E-07	1E-05	5,1E-06	0,01	0,4363	0,9
	Arcillosas	SC	1E-08	1E-06	5,1E-07	0,001	0,0436	0,1
Limos	Baja Plasticidad	ML	1E-09	1E-07	5,1E-08	0,0001	0,004	0,01
	Alta Plasticidad	MH	1E-09	1E-07	5,1E-08			
Arcillas	Baja Plasticidad	CL	1E-09	1E-07	5,1E-08	0,0000	0,0004	0,001
	Alta Plasticidad	CH	1E-10	1E-08	5,1E-09			

MEMORIA PARA CÁLCULO DE PARÁMETROS PARA INTRODUCCIÓN DE VARIABLES EN EL SOFTWARE PLAXIS 2D					
LINEAR ELASTIC		SOFT SOIL MODEL		HARDENING SOIL MODEL	
MATERIAL	CONCRETO	SUCS	CH	SUCS	SC
f'c (kgf/cm ²)	245	e	1	NºGolpes	39
ν	0,15	LL	40	v	0,3
E (kPa)	19565594,8	IP	30	E (kPa)	26142,48
		ν	0,3	Eoed (kPa)	35191,80
		Cc	0,2100	E ₅₀ (kPa)	35191,80
		Cs	0,0811	Eur	105575,40
		λ	0,0913		
		κ	0,0568		
		λ*	0,046		
		κ*	0,028		

Ilustración 42 Memoria para cálculo de parámetros para introducción de variables en el software PLAXIS 2D.

Valores estimados de cohesión y ángulo de fricción, basado en número de golpes sin corregir del SPT. Karol (1960)

Soil Type and SPT Blow Counts	Undisturbed Soil	
	Cohesion (psf)	Friction Angle (°)
Cohesive soils		
Very soft (<2)	250	0
Soft (2-4)	250-500	0
Firm (4-8)	500-1,000	0
Stiff (8-15)	1,000-2,000	0
Very stiff (15-30)	2,000-4,000	0
Hard (>30)	4,000	0
Cohesionless soils		
Loose (<10)	0	28
Medium (10-30)	0	28-30
Dense (>30)	0	32
Intermediate soils		
Loose (<10)	100	8
Medium (10-30)	100-1,000	8-12
Dense (>30)	1,000	12

NºGolpes	Cohesión (psf)
10	100
30	1000

10	100
----	-----

C' (kPa)	5
----------	---

Ilustración 43 Valores estimados de cohesión y cuadro para interpolar valores, según el número de golpes del ensayo SPT.



Labsuelos E Ingeniería S.A.S
 Nit: 900268808-1
 Cll 91 No. 95a-62 B./ Manzanares
 Apartado-Antioquia
 Tel: 8283630 Cel: 3104353851
 Labsuelositda@yahoo.es

CAPACIDAD DE CARGA DEL SUELO TERZAGUI

Proyecto:

Fecha:

Cliente:

Municipio:

Datos			
C' (kPa)	37,5	B(m)	2,5
γ_{sat} (kN/m ³)	19,0	L(m)	2,5
γ_{suelo} (kN/m ³)	16,0	γ_{agua} (kN/m ³)	9,81
ϕ' (°)	3,0	q (kPa)	9,00
D _y (m)	0,6	d (m)	---
N.F (m)	0,6	F.S	3,0

TIPO CIMENTACIÓN
CORRIDA
CORRECCIÓN N.F
CASO I

Nota: El CASO III de la corrección por presencia del nivel freático (N.F) no afecta la capacidad de soporte del suelo a la profundidad de desplante analizada

Carga	
N _c	6,62
N _q	1,35
N _γ	0,06

CAPACIDAD DE CARGA

Cimentación corrida

$$q_u = c'N_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma$$

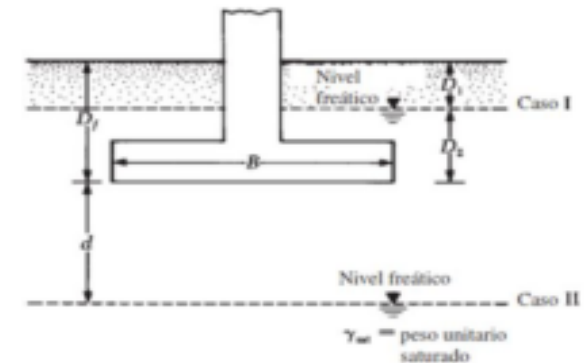
Zapata cuadrada

$$q_u = 1.3c'N_c + qN_q + 0.4\gamma BN_\gamma$$

Zapata circular

$$q_u = 1.3c'N_c + qN_q + 0.3\gamma BN_\gamma$$

CAPACIDAD DE CARGA	
q _{ult} (kPa)	262,0
F _{ult} (kN)	1637,6
q _{adm} (kPa)	87,3
q _{adm} (kg/cm ²)	0,89
q _{adm} (ton/m ²)	8,91



Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica 4ed - Das Braja

Ilustración 44 Formatos para cálculo de capacidad portante del suelo - Terzaghi.



LabSuelos E Ingeniería S.A.S
 Nit: 900268808-1
 Cll 91 No. 95a-62 B./ Manzanares
 Apartado-Antioquia
 Tel: 8283650 Cel: 3104333831
 LabSuelos Ltda@yahoo.es

CAPACIDAD DE CARGA DEL SUELO HANSEN

Proyecto:		Fecha:	
Cliente:		Municipio:	

Datos			
CONDICIÓN DE ANÁLISIS DEL SUELO			
GENERAL			
C' (kPa)	3,0	e_s (m)	0
γ_{sat} (kN/m ³)	17,5	e_y (m)	0,246
$\gamma_{sat,0}$ (kN/m ³)	17,5	B (m)	2,2
γ_{agua} (kN/m ³)	9,81	L (m)	1,8
ϕ (°)	31,5	B'	1,71
D_f (m)	0,6	L'	1,80
N.F (m)	0,6	F.S	1,4
q (kPa)	10,50	d (m)	---
k	0,3	θ (°)	90
A_f	3,96	β (°)	0
C_a	4,0	P (kN)	1
α_1	3	η (°)	0
α_2	3		
TIPO CIMENTACIÓN			
RECTANGULAR			
Corrección N.F			
CASO I			

Nota: El CASO III de la corrección por presencia del nivel freático (N.F) no afecta la capacidad de soporte del suelo a la profundidad de desplante analizada

Carga	Forma	Profundidad
N_c	34	S_c 1,61 d_c 1,11
N_q	22	S_q 1,50 d_q 1,08
N_γ	19	S_γ 0,62 d_γ 1,00

Inclinación de carga	Inclinación Terreno
i_c	i_c 1,00 b_c 1,00
i_q	i_q 1,00 b_q 1,00
i_γ	i_γ 1,00 b_γ 1,00

CAPACIDAD DE CARGA	
q_{ult} (kPa)	751,5
F_{adm} (kN)	2310,3
q_{adm} (kPa)	536,8
q_{adm} (kg/cm ²)	5,47
q_{adm} (ton/m ²)	54,7

Angulo medido respecto a la horizontal	
	Celdas usadas para análisis de cargas que difieren a una inclinación de 90° con respecto la horizontal (q')
β (°)	Inclinación de la cimentación
η (°)	Inclinación del terreno

CAPACIDAD DE CARGA

Ecuación general

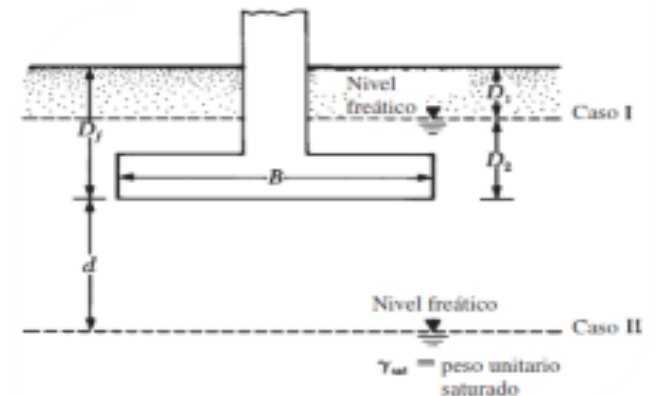
$$q_u = cN_c F_c + qN_q F_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_\gamma$$

donde,

$$F_c = x_c a_c i_c g_c b_c$$

$$F_q = x_q a_q i_q g_q b_q$$

$$F_\gamma = x_\gamma a_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma$$



Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica 4ed - Das Braja

Ilustración 45 Formatos para cálculo de capacidad portante del suelo – Hansen.

5. Conclusiones

La implementación del software PLAXIS 2D brinda eficiencia en la realización de los análisis geotécnicos para el diseño de cimentaciones superficiales en la empresa LABSUELO E INGENIERÍA S.A.S. La modelación del perfil de suelo y su información característica asociada, en comparación con el desarrollo de diseños sin software, permite el estudio de la propagación de esfuerzos y deformaciones en el terreno en el que se cimentará la estructura en muy poco tiempo, facilitando obtener más escenarios de análisis y la posibilidad de proyectar recomendaciones más precisas y mayor información para brindar recomendaciones ingenieriles eficientes y detalladas.

La implementación de la hoja de cálculo para la capacidad de carga del suelo otorga la posibilidad de entender los procesos y métodos de diseño de la cimentación superficial a través de la determinación de la carga máxima que soporta el suelo en relación con la carga máxima transmitida por columna y las propiedades geotécnicas implicadas en esta respuesta. De esta manera, se puede decidir de forma más certera sobre posibles alternativas en el diseño.

La sistematización de perfiles de suelo de Urabá resulta ser una herramienta muy conveniente para obtener más confiabilidad de precisión en los resultados arrojados por el diseño. Sin embargo, no es un factor determinante en la calidad del mismo sino en la aproximación de la modelación, dado que igual es mandatorio según la NSR-10 contar con registros de campo y laboratorio para el desarrollo de cálculos. Se logró la creación de una base de datos preliminar con los suelos predominantes de la región que podrá ser alimentada en un futuro a través de los registros de exploraciones geotécnicas realizadas por la empresa.

El conocimiento de las metodologías de cálculo y los modelos constitutivos implica una adecuada representación de la realidad, precisión en la comprensión del comportamiento del sistema suelo-estructura según las variables implicadas, optimización de costos en el levantamiento de datos para ensayos de laboratorio, disminución de los tiempos de procesamiento de datos, y en general y aporte significativo al servicio al cliente de la empresa.

Referencias

- Agudelo, J. (2016). *Estructurando*. Obtenido de <https://estructurando.net/2016/08/08/pregunta-con-trampa-cuando-podemos-decir-que-una-zapata-es-rigida-o-flexible/>
- AIS. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. Bogotá D.C.
- Bowles, J. (1997). *FOUNDATION ANALYSIS AND DESIGN*. The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Colombiano. (2022). Con Puerto Antioquia llegarán inversiones por USD 774 millones.
- Crespo. (1996). *MECÁNICA DE SUELO Y CIMENTACIONES*.
- CTE. (2006). *Código técnico de la edificación*. Madrid.
- Das, B. M. (2013). *FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA 4TH EDICIÓN*.
- Gomez, J., & Montes, N. (2020). *Mapa Geológico de Colombia en Relieve 2020*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Imasalab. (2013). *Anexo C. Cálculos Justificativos*.
- INV E-111. (2013). *Ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido*. INVIAS.
- INV E-213. (2013). *Análisis granulométrico de los agregados finos y gruesos*. INVIAS.
- Labsuelo e Ingeniería. (2022). *labsueloseingenieria*. Obtenido de www.labsueloseingenieria.com
- Muñoz, H. (2015). *Construcción, Interventoría y Supervisión Técnica de las Edificaciones de Concreto Estructural. Asocreto*.
- Murthy, V. (2002). Porosity, void ratio, water content, and unit weights of typical soils in natural state. En Murthy, *Geotechnical Engineering*. New York: Marcel Dekker.
- Plaxis. (2004). *Manual de Referencia PLAXIS 2D versión 8*.
- Segura, J. (2011). *Estructuras de concreto I*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Yaipen, R. (2022). *Determinación del módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, módulo de corte del concreto, utilizando materiales de la región de Piura*. Chiclayo.
- Yepes, V. (2021). *Procedimientos de construcción para la compactación y mejora del terreno*.