

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL MODELAMIENTO EN TRES
DIMENSIONES SOBRE EL VALOR DE LOS ASENTAMIENTOS INMEDIATOS
DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES**

MÓNICA ESTEFANÍA CORONADO SERRANO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOMECAICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2019

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL MODELAMIENTO EN TRES
DIMENSIONES SOBRE EL VALOR DE LOS ASENTAMIENTOS INMEDIATOS
DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES**

MÓNICA ESTEFANÍA CORONADO SERRANO

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniera Civil

Director

WILFREDO DEL TORO RODRÍGUEZ

MSC. Desarrollo de Comportamientos en Medios Lineales no Homogéneos

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE FISICOMECAICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2019

DEDICATORIA

A Dios

Por llenarme de bendiciones, salud y darme la posibilidad de llegar hasta acá y seguir adelante.

A mi madre Martha Cecilia Serrano Serrano

Por su amor, apoyo y dedicación hacia mí, me ha dado fuerza y seguridad para cumplir este logro.

A mi padre Alfredo Coronado Quevedo

Por su amor, apoyo y comprensión en todo momento, siempre indicándome el mejor camino para llegar hasta acá.

A mi hermano Christian Alfredo Coronado Serrano

Por su amor y su confianza en mí, en todo momento.

A mi familia

Por sus oraciones, su apoyo y sus consejos.

A mis abuelos, María Cecilia, Gustavo Serrano y primita Xiomy

Por siempre darme la fuerza y motivación para seguir adelante y cumplir mis objetivos.

A mi novio

Por su apoyo, paciencia y compañía en este largo camino de cumplir nuestros sueños.

A mis amigos

Por sus enseñanzas y consejos durante toda nuestra formación profesional.

MÓNICA ESTEFANÍA CORONADO SERRANO

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa agradecimiento al grupo de investigación, Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander por facilitar el equipo de computo con los softwares de modelamiento geotécnico RS2 y RS3, estos con sus respectivas licencias.

Se agradece al profesor Wilfredo del Toro Rodriguez y al investigador Oscar Sanchez, por los consejos y aportes conceptuales brindados en el desarrollo de la investigación.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS.....	17
1.1 OBJETIVO GENERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. MARCO TEÓRICO	18
2.1 ASENTAMIENTO.....	18
2.2 ASENTAMIENTOS INMEDIATOS O ELÁSTICOS	19
2.3 ASENTAMIENTO EN ARCILLAS	23
2.3.1 Caso A.	23
2.3.2 Caso B.	24
2.4 ASENTAMIENTO DE SUELO ARENOSO: USO DEL FACTOR DE INFLUENCIA DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA.....	25
2.5 SOFTWARE DE MODELAMIENTO PARA CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS INMEDIATOS DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES.....	28
2.5.1 Rocscience – RS2.	28
2.5.2 Rocscience – RS3.	29
3. METODOLOGÍA	31
3.1 MODELO DE ESTUDIO.....	32
3.2 PARÁMETROS ELÁSTICOS DE CADA MODELO DE ESTUDIO.....	33
3.3 DIMENSIONES DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES USADAS EN CADA MODELO DE ESTUDIO	35
3.4 SOFTWARES USADOS PARA LA REALIZACIÓN DE LOS MODELAMIENTOS	35

3.5 MÉTODOS TEÓRICOS USADOS PARA EL CÁLCULO MANUAL DE LOS ASENTAMIENTOS INMEDIATOS	36
3.6 PROCEDIMIENTO USADO PARA MODELAR EN EL SOFTWARE RS2	36
3.7 PROCEDIMIENTO USADO PARA MODELAR EN EL SOFTWARE RS3	38
4. RESULTADOS.....	41
4.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL MODELO DE ESTUDIO GENERADO POR EL SOFTWARE RS2	41
4.2 VALORES DE ASENTAMIENTOS INMEDIATOS OBTENIDOS EN CADA MODELO DE ESTUDIO POR MEDIO DEL SOFTWARE RS3.....	42
4.3 VALORES DE ASENTAMIENTOS INMEDIATOS OBTENIDOS EN CADA MODELO DE ESTUDIO POR MEDIO DE MÉTODOS TEÓRICOS	44
4.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS MÉTODO TEÓRICO I VS MODELAMIENTO EN RS3, EN SUELOS ARENOSOS	47
4.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS MÉTODO TEÓRICO II VS MODELAMIENTO EN RS3, EN SUELOS ARENOSOS	49
4.6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS MÉTODO TEÓRICO I VS MODELAMIENTO EN RS3, EN SUELOS ARCILLOSOS.....	51
4.7 COMPARACIÓN DE RESULTADOS MÉTODO TEÓRICO II VS MODELAMIENTO EN RS3, EN SUELOS ARCILLOSOS.....	53
5. CONCLUSIONES	56
BIBLIOGRAFÍA.....	58
ANEXOS	59

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Asentamiento elástico de cimentaciones rígidas y flexibles.....	18
Figura 2. Asentamiento elástico de una cimentación superficial.....	20
Figura 3. Variación del factor de influencia de la deformación unitaria con la profundidad y L/B.....	27
Figura 4. Metodología para la estimación de la influencia del modelamiento en tres dimensiones sobre el valor de los asentamientos inmediatos de cimentaciones superficiales.....	31
Figura 5. Esquema del modelo de estudio usado en los modelamientos.	32
Figura 6. Ilustración del modelo de estudio creado por medio del software de modelamiento geotécnico RS2.	38
Figura 7. Ilustración del modelo de estudio creado por medio del software de modelamiento geotécnico RS3.	40
Figura 8. Diagramas de asentamientos generados por RS3 para cada tipo de suelo con la zapata cuadrada L/B=1.....	42
Figura 9. Valores de asentamientos inmediatos generados en MODELO 1, por la zapata cuadrada L/B=1, obtenidos mediante el modelamiento en rs3.	43
Figura 10. Valores de asentamientos inmediatos generados en MODELO 2, por la zapata rectangular L/B=3, obtenidos mediante el modelamiento en RS3.....	43
Figura 11. Valores de asentamientos inmediatos generados en MODELO 3, por la zapata rectangular L/B=4, obtenidos mediante el modelamiento en RS3.....	44
Figura 12. Valores de asentamientos inmediatos generados por la zapata cuadrada L/B=1, sobre suelos arenosos, obtenidos a partir de métodos teóricos.	44

Figura 13. Valores de asentamientos inmediatos generados por la zapata rectangular $L/B=3$, sobre suelos arenosos, obtenidos a partir de métodos teóricos.	45
Figura 14. Valores de asentamientos inmediatos generados por la zapata rectangular $L/B=4$, sobre suelos arenosos, obtenidos a partir de métodos teóricos.	45
Figura 15. Valores de asentamientos inmediatos generados por la zapata cuadrada $L/B=1$, sobre suelos arcillosos, obtenidos a partir de métodos teóricos.	46
Figura 16. Valores de asentamientos inmediatos generados por la zapata rectangular $L/B=3$, sobre suelos arcillosos, obtenidos a partir de métodos teóricos.	46
Figura 17. Valores de asentamientos inmediatos generados por la zapata rectangular $L/B=4$, sobre suelos arcillosos, obtenidos a partir de métodos teóricos.	47
Figura 18. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en la zapata cuadrada $L/B=1$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico I en suelos arenosos.	48
Figura 19. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata rectangular $L/B=3$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico I en suelos arenosos.	48
Figura 20. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata rectangular $L/B=4$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico I en suelos arenosos.	49
Figura 21. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata cuadrada $L/B=1$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico II en suelos arenosos.	50
Figura 22. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata rectangular $L/B=3$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico II en suelos arenosos.	50

Figura 23. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata rectangular $L/B=4$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico II en suelos arenosos.	51
Figura 24. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata cuadrada $L/B=1$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico I en suelos arcillosos.	52
Figura 25. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata rectangular $L/B=3$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico I en suelos arcillosos.	52
Figura 26. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata rectangular $L/B=4$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico I en suelos arcillosos.	53
Figura 27. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata cuadrada $L/B=1$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico II en suelos arcillosos.	54
Figura 28. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata rectangular $L/B=3$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico II en suelos arcillosos.	54
Figura 29. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata rectangular $L/B=4$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico II en suelos arcillosos.	55

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Variación de I_f con D_f/B , B/L y μ_s ,.....	22
Tabla 2. Valores de C_d , dependiendo de la geometría del cimiento	23
Tabla 3. Valores de C'_d , dependiendo de la geometría del cimiento y la altura del estrato.....	25
Tabla 4. Relación de vacíos, contenido de humedad y peso unitario seco para algunos típicos de suelo en estado natural.....	33
Tabla 5. Parámetros elásticos para varios tipos de suelo.....	34
Tabla 6. Valores de parámetros de los suelos a utilizar en los modelamientos.	34
Tabla 7. Dimensiones de cimentaciones superficiales para cada modelo de estudio.	35

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Modelamiento y paso a paso en software Rocscience-RS3.	59
ANEXO B. Gráficos para análisis de datos.	64

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL MODELAMIENTO EN TRES DIMENSIONES SOBRE EL VALOR DE LOS ASENTAMIENTOS INMEDIATOS DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES.*

AUTOR: MÓNICA ESTEFANÍA CORONADO SERRANO**

PALABRAS CLAVE: Cimentaciones Superficiales, Asentamientos Inmediatos, Elementos Finitos, Suelos Granulares, Suelos Arcillosos, Peso Específico, Módulo De Elasticidad, Razón De Poisson.

DESCRIPCIÓN

En el campo de la ingeniería civil es común hablar de lo impredecible que puede ser el estudio de algún suelo debido a la diversidad de factores que influyen en su comportamiento, ya que al analizar un suelo la relación entre los movimientos del terreno y la estabilidad de las estructuras construidas sobre él es compleja, dado que existen varios mecanismos generadores de movimientos y además diversos tipos de estructuras que disponen de diferente capacidad para soportar dicho movimiento. Por esto, en la actualidad contamos con un gran número de herramientas computacionales que ayudan a facilitar su estudio.

Por ejemplo, para el caso de problemas de tipo esfuerzo-deformación existen softwares de modelamiento geotécnico que pueden considerar tanto dos (2) como tres (3) dimensiones y mediante el uso del método de los elementos finitos, conllevan a resultados muy próximos de los que se calculan a través de métodos teóricos.

El objetivo del presente proyecto es el de comparar los valores de asentamientos inmediatos que se producen en un suelo bajo las mismas condiciones, obtenidos mediante los programas RS2 (2D) y RS3 (3D) de Rocscience y métodos teóricos basados en la teoría de la elasticidad, con la intención de contribuir a un mejor y mayor uso de estas herramientas en la ingeniería, no solo de profesionales sino también de estudiantes en formación que se benefician al interesarse en el manejo de estos softwares tan útiles.

* Trabajo de grado

** Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Wilfredo Del Toro Rodríguez, MSC. Desarrollo de Comportamientos en Medios Lineales no Homogéneos

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF MODELLING IN THREE DIMENSIONS ON THE VALUE OF IMMEDIATE SETTLEMENTS OF SURFACE FOUNDATIONS.*

AUTHOR: MÓNICA ESTEFANÍA CORONADO SERRANO**

KEYWORDS: Surface Foundations, Immediate Settlements, Finite Element, Granular Soils, Clay Soils, Specific Weight, Elasticity Module, Poisson Ratio.

DESCRIPTION

In the field of civil engineering it is common to speak of how unpredictable the study of some soil can be due to the diversity of factors that influence its behavior, because when analysing a soil the relationship between the movements of the ground and the stability of the structures built on it is complex, given that there are several mechanisms that generate movements and also different types of structures that have different capacity to support such movement. For this reason, we currently have a large number of computer tools that help facilitate your study.

For example, for stress-strain problems there are geotechnical modelling software that can consider both two (2) and three (3) dimensions and by using the finite element method, lead to results very close to those calculated through theoretical methods.

The objective of this project is to compare the values of immediate settlements that occur in a soil under the same conditions, obtained through the RS2 (2D) and RS3 (3D) programmes of Rocscience and theoretical methods based on the theory of elasticity, with the intention of contributing to a better and greater use of these tools in engineering, not only professionals but also students in training who benefit from being interested in the management of these very useful software.

* Degree work

** Faculty of Physicomechanics. School of Civil Engineering. Director: Wilfredo Del Toro Rodríguez, MSC. Behavior Development in Non-Homogeneous Linear Media

INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería civil es común hablar de lo impredecible que puede ser el estudio de algún suelo debido a la diversidad de factores que influyen en su comportamiento, ya que al analizar un suelo la relación entre los movimientos del terreno y la estabilidad de las estructuras construidas sobre él es compleja, porque existen varios mecanismos generadores de movimientos y además diversos tipos de estructuras que disponen de diferente capacidad para soportar dicho movimiento. En aras de querer evaluar mejor este fenómeno se han desarrollado y planteado diferentes metodologías computacionales y teóricas para estudiar, analizar y comprender como las diferentes condiciones a las que puede ser expuesto un suelo pueden afectar a este mismo y las diversas estructuras que este pueda estar soportando. ¹

En la actualidad contamos con un gran número de herramientas computacionales que ayudan a facilitar el estudio de este tipo de problemas y viendo la importancia que han tomado en el campo profesional, se creó este proyecto la intención de contribuir a un mejor y mayor uso de estas herramientas en la ingeniería, no solo de profesionales sino también de estudiantes en formación que se benefician al interesarse en el manejo de estos softwares tan útiles.

Por esto se quiere determinar la eficiencia del modelamiento en los softwares geotécnicos RS2 y RS3 de Rocscience de elementos finitos que manejan 2 y 3 dimensiones respectivamente, sobre los métodos teóricos usados en problemas de esfuerzo-deformación para calcular asentamientos inmediatos generados en una masa de suelo que se encuentra bajo una cimentación superficial.

¹ RINCÓN, Jelver O.; PITA, Jorge A. “Análisis de asentamientos diferenciales por consolidación para diversos factores a partir de metodologías teóricas y computacionales”, Tesis pregrado; Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2016

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar el análisis comparativo de los asentamientos inmediatos de cimentaciones superficiales, calculados por medio del uso de los softwares de modelamiento geotécnico, RS2 y RS3, con los obtenidos mediante ecuaciones teóricas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

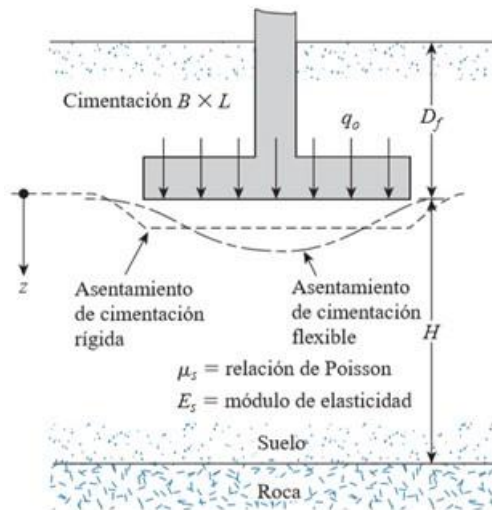
1. Seleccionar las ecuaciones teóricas de acuerdo con el tipo de suelo, así como las características de los modelos a utilizar.
2. Desarrollar los modelamientos correspondientes y compilar los resultados de cada uno de ellos.
3. Realizar el análisis comparativo de los resultados entre los modelos y los métodos teóricos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ASENTAMIENTO

Es la deformación vertical generada en una masa de suelo que se encuentra sometida a cargas de una cimentación o estructura construida sobre su superficie. El asentamiento dependerá del tipo de cimentación. Ya sea la cimentación flexible o totalmente rígida. Figura 1.

Figura 1. Asentamiento elástico de cimentaciones rígidas y flexibles.



El asentamiento de una cimentación se puede dividir en dos categorías principales: a) asentamiento elástico, o inmediato y b) asentamiento por consolidación. El asentamiento inmediato, o elástico de una cimentación tiene lugar durante o inmediatamente después de la construcción de la estructura. El asentamiento por consolidación ocurre al paso del tiempo. El agua de los poros es expulsada de los

espacios vacíos de los suelos arcillosos saturados sumergidos en agua. El asentamiento total de una cimentación es la suma del asentamiento elástico y del asentamiento por consolidación.²

2.2 ASENTAMIENTOS INMEDIATOS O ELÁSTICOS

El asentamiento inmediato o elástico, es causado por la deformación elástica del suelo, puede darse en suelos arenosos y arcillosos húmedos o secos, y no se espera algún cambio de humedad en el proceso. Se observa mejor en los suelos granulares (suelos arenosos o suelos arcillosos no saturados).

Las propiedades del suelo necesarias para determinar el asentamiento elástico son:

E_s : Módulo de elasticidad

μ_s : Relación de poisson del suelo

El asentamiento elástico de una cimentación superficial se puede estimar utilizando la teoría de la elasticidad. De la ley de Hooke, según se aplica en la figura 1.2, se obtiene

$$S_e = \int_0^H \epsilon_z dz = \frac{1}{E_s} \int_0^H (\Delta\sigma_z - \mu_s \Delta\sigma_x - \mu_s \Delta\sigma_y) dz \quad (1.1)$$

donde:

S_e : asentamiento elástico

E_s : módulo de elasticidad del suelo

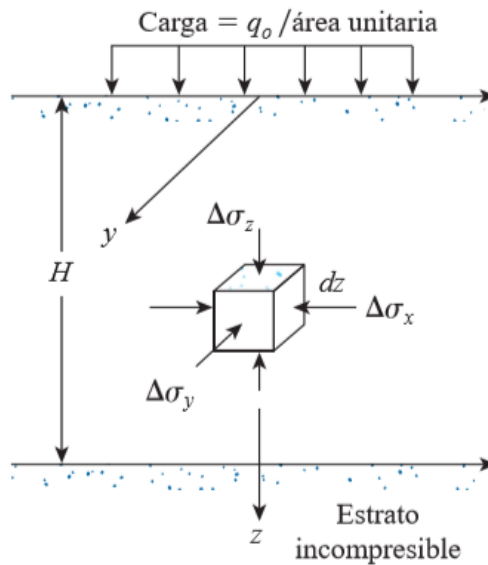
² BRAJA M. Das, “Fundamentos de ingeniería de cimentaciones”, Séptima edición, Cengage learning, 2012

H: espesor del estrato de suelo

μ_s : relación de poisson del suelo

$\Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y, \Delta\sigma_z$: incremento del esfuerzo debido a la carga neta aplicada sobre la cimentación en las direcciones x, y y z, respectivamente.

Figura 2. Asentamiento elástico de una cimentación superficial.



En teoría, si la cimentación es perfectamente flexible según Bowles 1987, el asentamiento se puede expresar como

$$S_e = q_0 (\alpha B') \frac{1 - \mu_s^2}{E_s} I_s I_f \quad (1.2)$$

donde:

q_0 : presión neta aplicada sobre la cimentación.

E_s : módulo de elasticidad del suelo.

μ_s : relación de poisson del suelo.

$B' = B/2$ para el centro de la cimentación.

$= B$ para una esquina de la cimentación.

I_s : factor de forma (Steinbrenner, 1934).

$$I_s = F_1 + \frac{1-2\mu_s}{1-\mu_s} F_2 \quad (1.3)$$

$$F_1 = \frac{1}{\pi} (A_0 + A_1) \quad (1.4)$$

$$F_2 = \frac{n'}{2\pi} \tan^{-1} A_2 \quad (1.5)$$

$$A_0 = m' \ln \frac{(1 + \sqrt{m'^2 + 1}) \sqrt{m'^2 + n'^2}}{m' (1 + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1})} \quad (1.6)$$

$$A_1 = \ln \frac{(m' + \sqrt{m'^2 + 1}) \sqrt{1 + n'^2}}{m' + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}} \quad (1.7)$$

$$A_2 = \frac{m'}{n' \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}} \quad (1.8)$$

I_f : factor de profundidad (Fox, 1948) = $f\left(\frac{D_f}{B}, \mu_s, \frac{L}{B}\right)$

α : factor que depende de la ubicación sobre la cimentación donde se calcula el asentamiento.

Para calcular el asentamiento en el centro de la cimentación, se utiliza

$$\alpha = 4, \quad m' = \frac{L}{B}, \quad n' = \frac{H}{\left(\frac{B}{2}\right)}$$

Para calcular el asentamiento en una esquina de la cimentación

$$\alpha=1, \quad m'=\frac{L}{B}, \quad n'=\frac{H}{B}$$

La variación de I_f con $\frac{D_f}{B}$ (para $\mu_s=0.3, 0.4$ y 0.5) se da en la tabla 1.

Tabla 1. Variación de I_f con D_f/B , B/L y μ_s ,

μ_s	B/L			
	D_f/B	0.2	0.5	1.0
0.3	0.2	0.95	0.93	0.90
	0.4	0.90	0.86	0.81
	0.6	0.85	0.80	0.74
	1.0	0.78	0.71	0.65
0.4	0.2	0.97	0.96	0.93
	0.4	0.93	0.89	0.85
	0.6	0.89	0.84	0.78
	1.0	0.82	0.75	0.69
0.5	0.2	0.99	0.98	0.96
	0.4	0.95	0.93	0.89
	0.6	0.92	0.87	0.82
	1.0	0.85	0.79	0.72

Fuente: BRAJA, M. Das, "Fundamentos de ingeniería de cimentaciones", Séptima edición, Cengage learning, 2012

El asentamiento elástico de una cimentación rígida se puede estimar con

$$S_{e(\text{rígida})} = 0.93 S_{e(\text{flexible, centro})} \quad (1.9)$$

2.3 ASENTAMIENTO EN ARCILLAS

2.3.1 Caso A. Cuando la altura del estrato del suelo bajo la cimentación es semi-infinita.³

Para este caso la ecuación adecuada para determinar el asentamiento inmediato es:

$$S_e = \frac{q B (1 - \mu_s^2)}{E_s} C_d \quad (1.10)$$

donde:

q: carga en unidades de esfuerzo

B: base de la cimentación

μ_s : relación de poisson del suelo

E_s : módulo de elasticidad del suelo

C_d : Coeficiente o factor de forma que depende de la geometría del problema, rigidez del plano cargado y forma de la carga. Obsérvese valores de C_d en Tabla 2.

Tabla 2. Valores de C_d , dependiendo de la geometría del cimient

Forma	Centro	Esquina	Mitad lado corto	Mitad lado largo	Promedio
Circular flexible	1	0.64	0.64	0.64	0.85
Circular rígido	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79
Cuadrado	1.12	0.56	0.76	0.76	0.95
Cuadrado rígido	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

³ RONDÓN, José Alberto; TORRADO G., Luz Marina. “Cimentaciones Asentamientos”, Ingeas SAS, Docencia, Diapositivas de clase

Forma	Centro	Esquina	Mitad lado corto	Mitad lado largo	Promedio
Rectangular					
Largo/ Ancho					
1.5	1.36	0.67	0.89	0.97	1.15
2	1.52	0.76	0.98	1.12	1.3
3	1.78	0.88	1.11	1.35	1.52
5	2.1	1.05	1.27	1.68	1.83
10	2.53	1.26	1.49	2.12	2.29

Fuente: RONDÓN, José Alberto; TORRADO G., Luz Marina. "Cimentaciones Asentamientos", Ingeas SAS, Docencia, Diapositivas de clase.

2.3.2 Caso B. Cuando la capa del estrato de suelo bajo la cimentación se encuentra limitada por una base o capa rígida. ⁴

Para este caso la ecuación adecuada para determinar el asentamiento inmediato es:

$$S_e = \frac{q B (1 - \mu_s^2)}{E_s} C'_d \quad (1.11)$$

donde:

q: carga en unidades de esfuerzo

B: base de la cimentación

μ_s : relación de poisson del suelo

E_s : módulo de elasticidad del suelo

C'_d : Coeficiente o factor de forma que depende de la geometría del problema, rigidez del plano cargado y forma de la carga, depende además del espesor de la capa. Obsérvese valores de C'_d en Tabla 3.

⁴ Ibíd.

Tabla 3. Valores de C'_d , dependiendo de la geometría del cimiento y la altura del estrato

FORMA DEL CIMIENTO							
Circular		Rectangular					
H/B	diam=B	L/B=1	L/B=1.5	L/B=2	L/B=3	L/B=5	L/B=10
0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
0.25	0.24	0.24	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
0.5	0.48	0.48	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
1	0.7	0.75	0.81	0.83	0.83	0.83	0.83
1.5	0.8	0.86	0.97	1.03	1.07	1.08	1.08
2.5	0.88	0.97	1.12	1.22	1.33	1.39	1.4
3.5	0.91	1.01	1.19	1.31	1.45	1.56	1.59
5	0.94	1.05	1.24	1.38	1.55	1.72	1.82
∞	1	1.12	1.36	1.52	1.78	2.1	2.53

Fuente: RONDÓN, José Alberto; TORRADO G., Luz Marina. "Cimentaciones Asentamientos", Ingeas SAS, Docencia, Diapositivas de clase.

2.4 ASENTAMIENTO DE SUELO ARENOSO: USO DEL FACTOR DE INFLUENCIA DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA

El asentamiento de suelos granulares también se puede evaluar utilizando el factor de influencia de la deformación unitaria semi-empírico propuesto por Schmertmann y colaboradores (1978).⁵ De acuerdo con este método (figura 4), el asentamiento es:

$$S_e = C_1 C_2 (\bar{q} - q) \sum_0^{z_2} \frac{I_z}{E_s} \Delta z \quad (1.12)$$

⁵ BRAJA, Óp. Cit. 2012

donde:

I_z : factor de influencia de la deformación unitaria.

C_1 : un factor de corrección para la profundidad del empotramiento de la cimentación.

C_2 : un factor de corrección para tomar en cuenta la fluencia plástica del suelo.

$\bar{q}$: esfuerzo a nivel de la cimentación.

q : esfuerzo efectivo de la base de la cimentación.

E_s : módulo de elasticidad del suelo.

$$C_1 = 1 - 0.5 \left[\frac{q}{\bar{q} - q} \right] \quad (1.13)$$

$$C_2 = 1 + 0.2 \log \left(\frac{t_{\text{años}}}{0.1} \right) \quad (1.14)$$

$$q = \gamma D_f \quad (1.15)$$

La variación recomendada del factor de influencia de la deformación unitaria I_z para cimentaciones cuadradas ($L/B=1$) o circulares y para cimentaciones con $L/B \geq 10$ se muestra en la figura 1.5. Los diagramas I_z para $1 < L/B < 10$ se pueden interpolar.⁶

El valor máximo de I_z (es decir, $I_{z(m)}$) ocurre en $z = z_1$ y luego se reduce a cero en $z = z_2$. El valor máximo de I_z se puede calcular como:

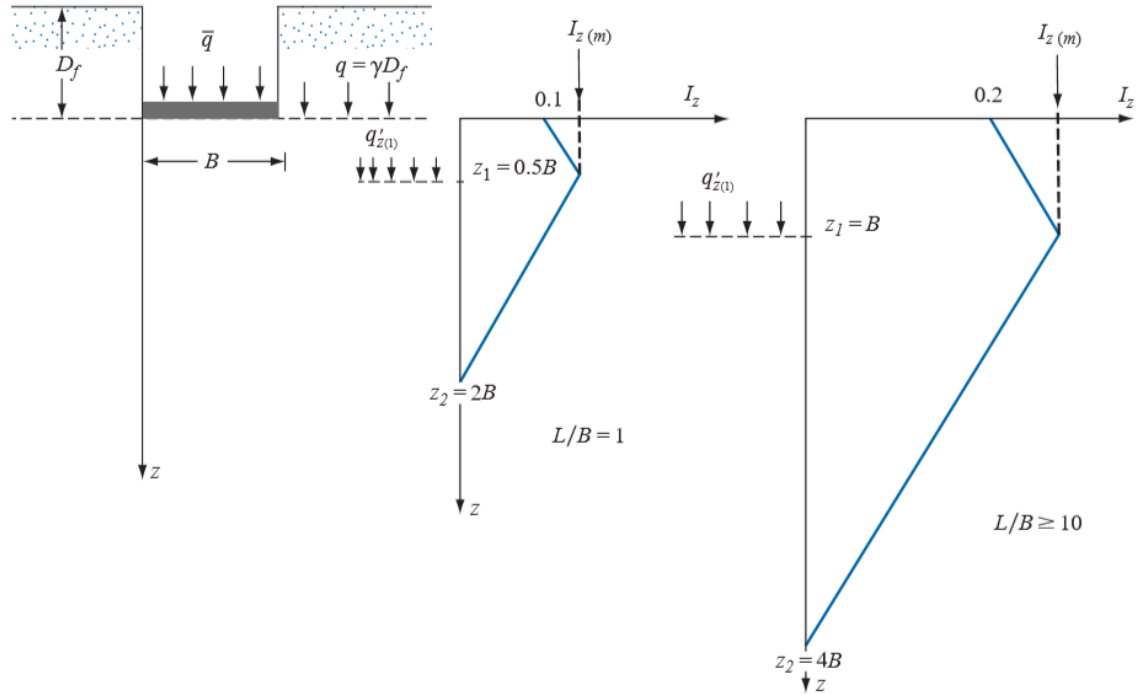
$$I_{z(m)} = 0.5 + 0.1 \sqrt{\frac{\bar{q} - q}{q'_{z(1)}}} \quad (1.16)$$

donde:

$q'_{z(1)}$: esfuerzo efectivo a una profundidad z_1 antes de la construcción de la cimentación.

⁶ BRAJA, Óp. Cit. 2012

Figura 3. Variación del factor de influencia de la deformación unitaria con la profundidad y L/B.



Las relaciones siguientes las sugiere Salgado (2008) para la interpolación de I_z en $z=0$, z_1/B y z_2/B para cimentaciones rectangulares.⁷

I_z en $z = 0$

$$I_z = 0.1 + 0.0111 \left(\frac{L}{B} - 1 \right) \leq 0.2 \quad (1.17)$$

Variación de z_1/B para $I_{z(m)}$

$$\frac{z_1}{B} = 0.5 + 0.0555 \left(\frac{L}{B} - 1 \right) \leq 1 \quad (1.18)$$

⁷ BRAJA, Óp. Cit. 2012

Variación de z_2/B

$$\frac{z_2}{B} = 2 + 0.222 \left(\frac{L}{B} - 1 \right) \leq 4 \quad (1.19)$$

Schmertmann y colaboradores (1978) sugieren que:

$$E_s = 2.5 q_c \text{ (para cimentación cuadrada)} \quad (1.20)$$

y

$$E_s = 3.5 q_c \text{ (para } L/B \geq 10 \text{)} \quad (1.21)$$

donde:

q_c : resistencia de penetración de cono.

Terzaghi y colaboradores, 1996:

$$E_{s(\text{rectangular})} = \left(1 + 0.4 \log \frac{L}{B} \right) E_{s(\text{cuadrada})} \quad (1.22)$$

2.5 SOFTWARE DE MODELAMIENTO PARA CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS INMEDIATOS DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES

2.5.1 Rocscience – RS2. RS2 (anteriormente RS 2 o Phase 2) es un poderoso programa de elementos finitos en 2D para aplicaciones de suelo y roca.

RS2 se puede utilizar para una amplia gama de proyectos de ingeniería, incluyendo diseño de excavación, estabilidad de taludes, filtración de agua subterránea, análisis probabilístico, consolidación y capacidades de análisis dinámico.⁸

Los modelos complejos de múltiples etapas se pueden crear fácilmente y analizar rápidamente: túneles en rocas débiles o articuladas, cavernas subterráneas de potencia, minas a cielo abierto y taludes, terraplenes, estructuras terrestres estabilizadas MSE y mucho más. Se puede abordar el fracaso progresivo, la interacción de soporte y una variedad de otros problemas.

Una de las principales características de RS2 es el análisis de estabilidad de pendiente de elementos finitos utilizando el método de reducción de la resistencia al corte. Esta opción está completamente automatizada y se puede usar con varios criterios de falla, incluidos Mohr-Coulomb y Generalized Hoek-Brown. Los modelos de pendiente se pueden importar o exportar entre Slide2 y RS2, lo que permite una fácil comparación del equilibrio límite y los resultados de elementos finitos.⁹

2.5.2 Rocscience – RS3. RS3 es un nuevo programa para el análisis 3D de estructuras geotécnicas para aplicaciones civiles y mineras.

Aplicable tanto para rocas como para suelos (RS3 = programa de análisis tridimensional de rocas y suelos), RS3 es un programa de análisis de elementos finitos de propósito general para excavaciones subterráneas, diseño de túneles y soportes, excavaciones de superficie, diseño de cimientos, terraplenes, consolidación, infiltración de agua subterránea y más. Las características más recientes en RS3 incluyen análisis dinámico y reducción automática de la resistencia al corte.¹⁰

⁸ ROCSCIENCE. Software RS2. Disponible en: <https://www.rocscience.com/software/rs2>

⁹ ROCSCIENCE. Software RS3. Op. Cit.

¹⁰ Ibid.

La geometría del modelo tridimensional se crea con herramientas CAD o importando archivos 3D como DXF. RS3 ofrece flexibilidad completa para la organización de excavaciones, instalación de soporte, carga y todos los demás aspectos de modelado. Los modelos con hasta varios cientos de etapas diferentes se pueden analizar con RS3.

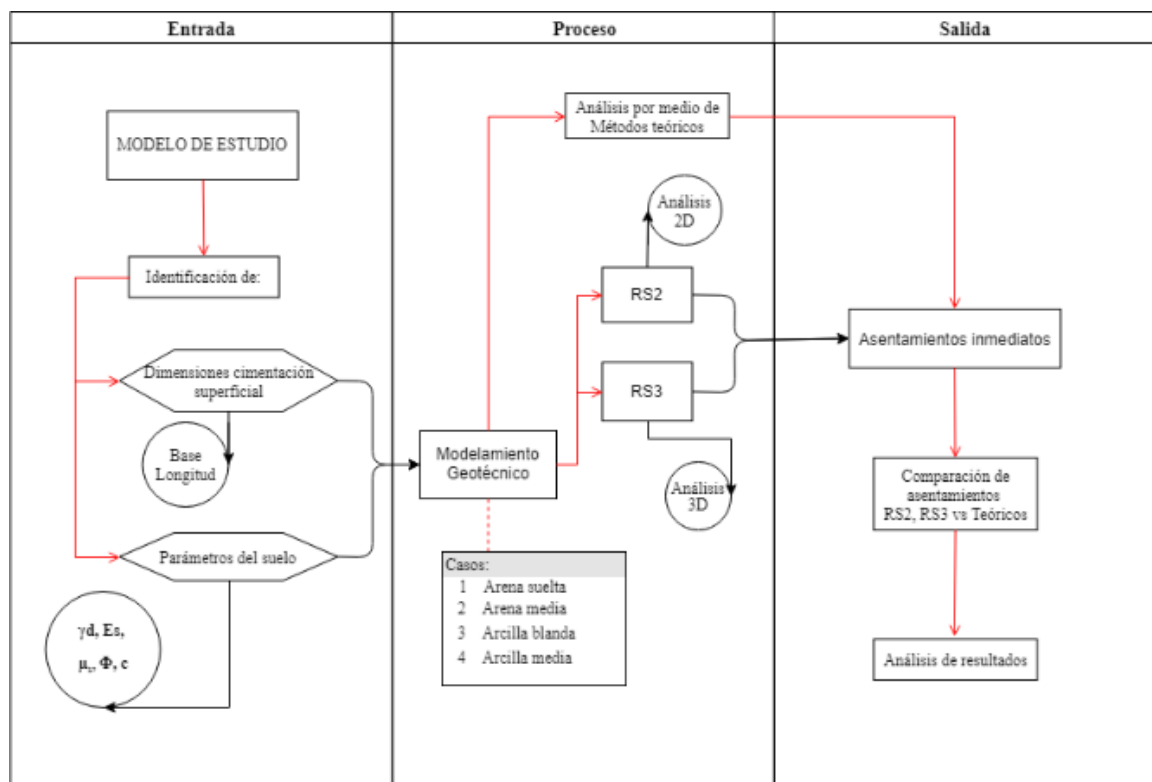
Después de calcular el análisis, RS3 ofrece numerosas opciones para ver y mostrar resultados en 2D y 3D (por ejemplo, desplazamientos, presión de poro, tensiones, deformaciones, vectores de flujo). Puede contornear resultados en superficies de excavación o planos de visualización definidos por el usuario, trazar resultados a lo largo de cualquier línea, trazar fuerzas de apoyo detalladas y desplazamientos, y trazar resultados diferenciales entre etapas. Los resultados y las imágenes se pueden exportar y personalizar para presentaciones e informes.¹¹

¹¹ Ibid.

3. METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta que el objetivo del proyecto es realizar el análisis comparativo de los asentamientos inmediatos de cimentaciones superficiales, calculados por medio del uso de los softwares de modelamiento geotécnico RS2 y RS3, con los obtenidos mediante ecuaciones teóricas, se aplicó la siguiente metodología durante el proceso de estudio: (Figura 4)

Figura 4. Metodología para la estimación de la influencia del modelamiento en tres dimensiones sobre el valor de los asentamientos inmediatos de cimentaciones superficiales.

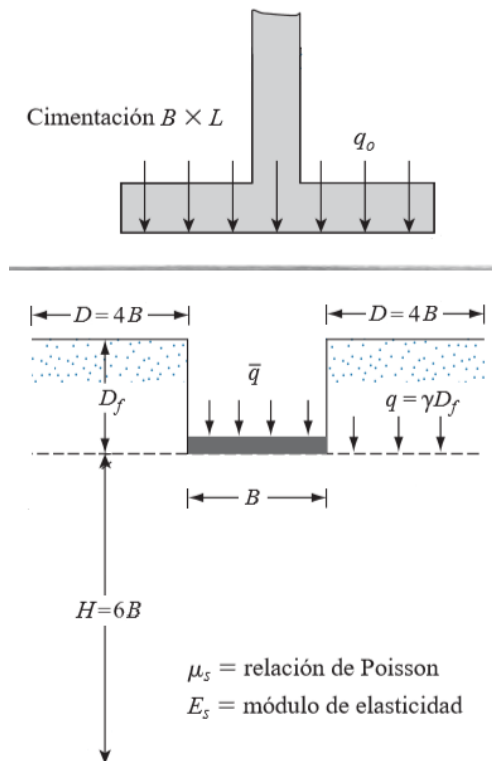


3.1 MODELO DE ESTUDIO

En este modelo de estudio se utilizó como cimentación superficial una zapata aislada soportando una carga $q_o = 150 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ que se encuentra a una profundidad $D_f = 1 \text{ [m]}$, sobre un suelo en su estado natural con parámetros elásticos específicos (según el tipo de suelo que se analizó).

El modelamiento se hizo con una altura de estrato bajo la cimentación de 6 veces la base ($H = 6B$). A los laterales de la cimentación se tomó una distancia D igual a 4 veces la base ($D = 4B$). Figura 5.

Figura 5. Esquema del modelo de estudio usado en los modelamientos.



A partir de este modelo se analizaron 4 casos diferentes de modelamiento:

- **Caso 1:** Cimentación sobre arena suelta.
- **Caso 2:** Cimentación sobre arena media.
- **Caso 3:** Cimentación sobre arcilla blanda.
- **Caso 4:** Cimentación sobre arcilla media.

3.2 PARÁMETROS ELÁSTICOS DE CADA MODELO DE ESTUDIO

Para determinar los valores de los parametros de cada suelo a analizar, se usaron las siguientes tablas (4, 5) con valores estandares ya establecidos comunmente, de acuerdo al tipo de suelo.

Tabla 4. Relación de vacíos, contenido de humedad y peso unitario seco para algunos típicos de suelo en estado natural

Nombre descriptivo	e	W (%)	γ_d (kPa)
Arena suelta uniforme	0.8	30	14.5
Arena densa uniforme	0.45	16	18
Arena limosa suelta de grano angular	0.65	25	16
Arena limosa densa de grano angular	0.4	15	19
Arcilla firme	0.6	21	17
Arcilla suave	0.9 - 1.4	30 – 50	11.5 – 14.5
Loess	0.9	25	13.5
Arcilla orgánica suave	2.5 – 3.2	90 – 120	6 – 8
Tilita glacial	0.3	10	21

Fuente: Braja M. Das, “Fundamentos de ingeniería geotécnica”, Cuarta edición, Cengage learning, 2015

Tabla 5. Parámetros elásticos para varios tipos de suelo

Tipo de suelo	Módulo de elasticidad, E_s (MPa)	Relación de Poisson, μ_s
Arena suelta	10 - 25	0.2 – 0.40
Arena semi-densa	15 - 30	0.25 – 0.40
Arena densa	35 - 55	0.3 – 0.45
Arena limosa	10 - 20	0.2 – 0.40
Arena y grava	70 – 170	0.15 – 0.35
Arcilla blanda	4 - 20	0.2 – 0.5
Arcilla media	20 - 40	
Arcilla dura	40 - 100	

Fuente: Braja M. Das, “Fundamentos de ingeniería geotécnica”, Cuarta edición, Cengage learning, 2015

Los valores compilados que se usaron en el modelamiento para cada tipo de suelo se encuentran a continuación en la tabla 6.

Tabla 6. Valores de parámetros de los suelos a utilizar en los modelamientos.

Tipo de suelo	E_s (MPa)	γ_d (kPa)	μ_s
Arena suelta	18	23	0.3
Arena media	23	18	0.325
Arcilla blanda	12	13	0.3
Arcilla media	30	15	0.35

3.3 DIMENSIONES DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES USADAS EN CADA MODELO DE ESTUDIO

En este estudio se utilizaron 3 zapatas con distintas dimensiones (Tabla 7), con el fin de analizar las diferencias en el comportamiento de los asentamientos al modelar en cada software (rs2 y rs3), cuando varia la relación de la longitud sobre la base de la cimentación.

Tabla 7. Dimensiones de cimentaciones superficiales para cada modelo de estudio.

	Forma	L/B	B (m)	L (m)	Espesor (m)
Modelo 1	Cuadrada	1	1	1	0.5
Modelo 2	Rectangular	3	1	3	0.5
Modelo 3	Rectangular	4	1	4	0.5

3.4 SOFTWARES USADOS PARA LA REALIZACIÓN DE LOS MODELAMIENTOS

Los modelamientos se crearon con ayuda de los softwares de elementos finitos para modelamiento geotécnico RS2 y RS3 de Rocscience, para 2 y 3 dimensiones.

3.5 MÉTODOS TEÓRICOS USADOS PARA EL CÁLCULO MANUAL DE LOS ASENTAMIENTOS INMEDIATOS

Con la intención de evaluar la veracidad de la eficiencia del uso de las herramientas computacionales ante la aplicación de metodos teoricos se quiso comparar con más de un tipo diferente de metodo teórico en cada tipo de suelo (arenoso y arcilloso) para el cálculo de los asentamientos inmediatos. A continuación se mencionan los metodos teoricos usados en el desarrollo del proyecto:

Para suelos arcillosos:

- **Método I:** Método clásico: Coeficiente Cd.
- **Método II:** Método basado en el principio de la teoría de la elasticidad: Para cimentaciones perfectamente flexibles (Timoshenko y Goodier).

Para suelos arenosos:

- **Método I:** Método propuesto por Schmertmann y colaboradores (1978), utilizando el factor de influencia de la deformación unitaria.
- **Método II:** Método basado en el principio de la teoría de la elasticidad: Para cimentaciones perfectamente flexibles (Timoshenko y Goodier).

3.6 PROCEDIMIENTO USADO PARA MODELAR EN EL SOFTWARE RS2

El procedimiento que se usó para crear los modelos en RS2 fue el siguiente:

Paso 1. Definir unidades: metros [m], kilo pascales [kPa]

Paso 2. Definir límite externo: Ingresar coordenadas los puntos que limitan el campo externo de estudio.

Paso 3. Definir límite de excavación: Ingresar las coordenadas de los puntos que limitan la excavación.

Paso 4. Definir materiales: Ingresar los parámetros elásticos y de fuerza del suelo a analizar.

Paso 5. Definir revestimiento: Elegir el revestimiento en concreto reforzado y darle un grosor de 0.5m.

Paso 6. Añadir cargas: Asignar la carga distribuida sobre el límite inferior de la excavación y la fuerza de la gravedad sobre el campo de estudio.

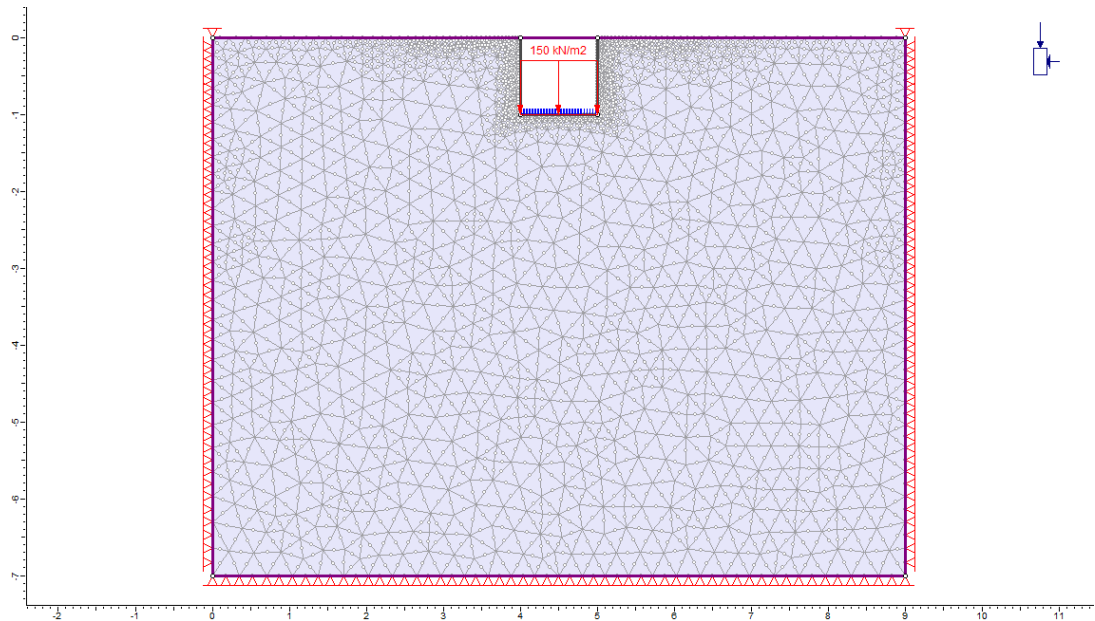
Paso 7. Definir condiciones de frontera: En los extremos del límite externo ubicar pines para restringir el movimiento en las dos direcciones (x, y). A excepción de los límites superiores de la superficie externa.

Paso 8. Discretizar y añadir malla: elegir como tipo de elemento para análisis un triángulo de 6 nodos.

Paso 9. Asignar el revestimiento: Seleccionar el límite inferior de la excavación y agregar el revestimiento.

Paso 10. Calcular: Correr el programa e interpretar los resultados.
El modelo terminado debe quedar finalmente como muestra la figura 6.

Figura 6. Ilustración del modelo de estudio creado por medio del software de modelamiento geotécnico RS2.



3.7 PROCEDIMIENTO USADO PARA MODELAR EN EL SOFTWARE RS3

El procedimiento que se usó para crear los modelos en RS3 fue el siguiente:

Paso 1. Definir unidades: metros [m], kilo pascales [kPa].

Paso 2. Definir materiales: Ingresar los parámetros elásticos y de fuerza del suelo a analizar.

Paso 3. Definir revestimiento: Elegir el revestimiento en concreto reforzado y darle un grosor de 0.5m.

Paso 4. Definir campo externo: Ingresar coordenadas de los puntos que limitan el campo externo de estudio.

Paso 5. Definir campo de excavación: Ingresar las coordenadas de los puntos que limitan la excavación.

Paso 6. Dividir geometría: Separar el campo externo y el campo de la excavación.

Paso 7. Asignar campo de revestimiento: Ocultar la excavación, seleccionar el campo inferior de la excavación y agregar el revestimiento.

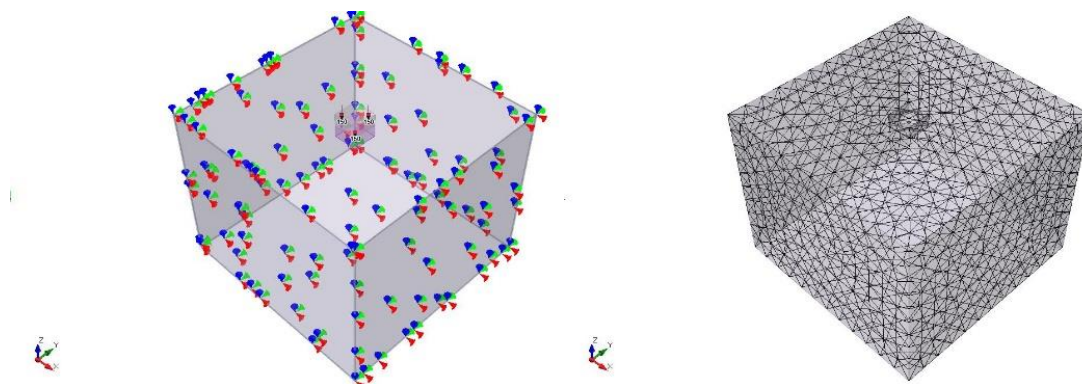
Paso 8. Añadir cargas: Seleccionar el campo inferior de la excavación y asignar la carga distribuida además de la fuerza de la gravedad sobre el campo de estudio.

Paso 9. Definir condiciones de frontera: En los extremos del campo externo ubicar pines para restringir el movimiento en las tres direcciones (x, y, z). a excepción de los límites superiores de la superficie externa.

Paso 10. Asignar malla: Elegir como tipo de elemento para análisis un tetraedro de 4 nodos.

Paso 11. Calcular: Correr el programa e interpretar los resultados.
El modelo terminado debe quedar finalmente como muestra la figura 7.

Figura 7. Ilustración del modelo de estudio creado por medio del software de modelamiento geotécnico RS3.



4. RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL MODELO DE ESTUDIO GENERADO POR EL SOFTWARE RS2

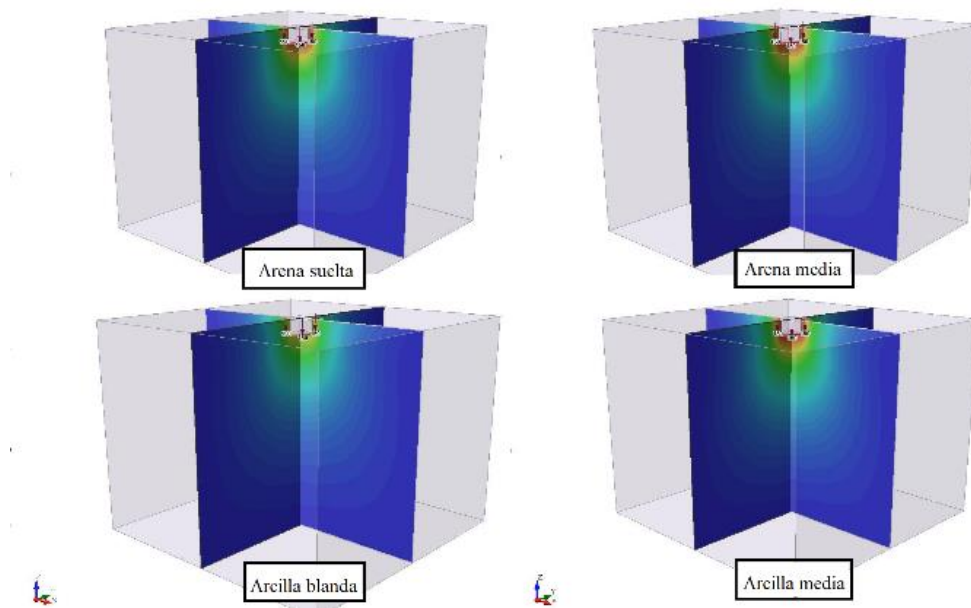
Después de crear en RS2 el primer modelo de estudio, se analizó qué factores involucra el programa a la hora de calcular los desplazamientos (asentamientos), que se generan en el suelo tras ubicar la carga de la cimentación, y se determinó, que a pesar de que se pueden ingresar al programa las principales especificaciones planteadas en el modelo de estudio, tales como los parámetros del suelo y la superficie en concreto reforzada sometida a una carga distribuida específica, este software no permite especificar una profundidad en la estructura de concreto reforzado que represente la geometría real de la cimentación, lo que hace que no sea posible obtener con RS2 el análisis que se requiere para este proyecto, al no poderse variar las relaciones ancho/largo.

Esto debido a que RS2 es un programa que está diseñado preferentemente para problemas de ingeniería que requieren el análisis de cargas laterales, es decir, problemas de deformación plana, como filtración de aguas subterráneas, estabilidad de taludes, diseño de excavaciones, análisis de muros de contención, etc.

4.2 VALORES DE ASENTAMIENTOS INMEDIATOS OBTENIDOS EN CADA MODELO DE ESTUDIO POR MEDIO DEL SOFTWARE RS3.

Al contrario del modelamiento en el software RS2, en el caso de RS3 si es posible hablar de analizar los asentamientos inmediatos presentados en un suelo que está sometido a la carga de una cimentación de cualquier forma. Figura 8.

Figura 8. Diagramas de asentamientos generados por RS3 para cada tipo de suelo con la zapata cuadrada $L/B=1$.



A continuación, en las Figuras 9, 10 y 11 se compilan los resultados de los asentamientos obtenidos con ayuda del software RS3, en cada modelo para los diferentes tipos de suelo analizados.

Figura 9. Valores de asentamientos inmediatos generados en MODELO 1, por la zapata cuadrada $L/B=1$, obtenidos mediante el modelamiento en rs3.

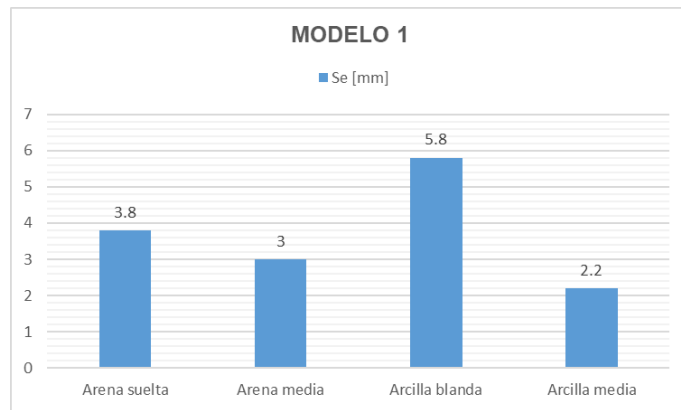


Figura 10. Valores de asentamientos inmediatos generados en MODELO 2, por la zapata rectangular $L/B=3$, obtenidos mediante el modelamiento en RS3.

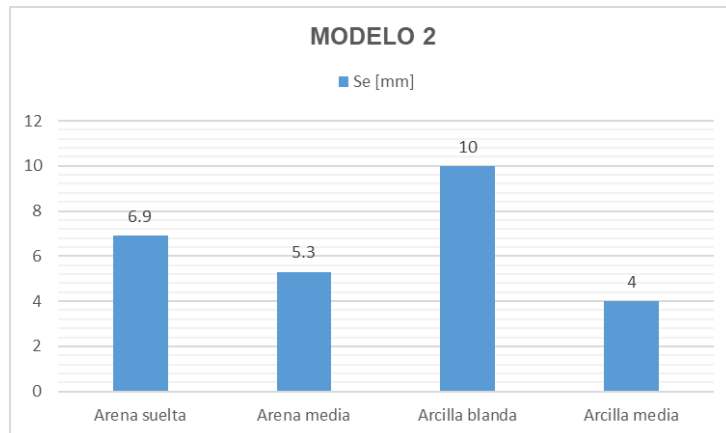
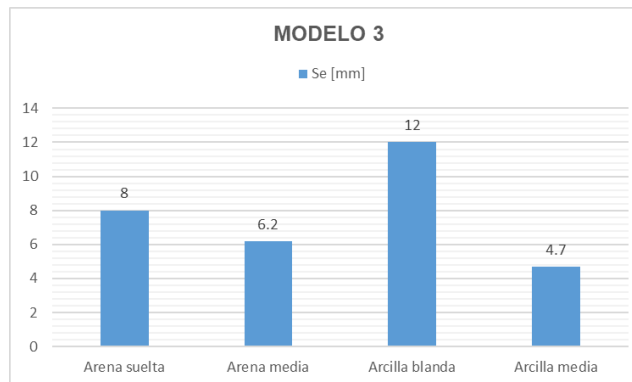


Figura 11. Valores de asentamientos inmediatos generados en MODELO 3, por la zapata rectangular $L/B=4$, obtenidos mediante el modelamiento en RS3.



4.3 VALORES DE ASENTAMIENTOS INMEDIATOS OBTENIDOS EN CADA MODELO DE ESTUDIO POR MEDIO DE MÉTODOS TEÓRICOS

- Suelos arenosos.

Figura 12. Valores de asentamientos inmediatos generados por la zapata cuadrada $L/B=1$, sobre suelos arenosos, obtenidos a partir de métodos teóricos.

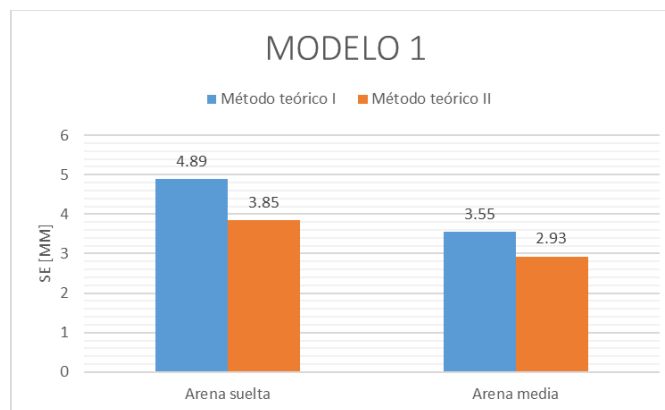


Figura 13. Valores de asentamientos inmediatos generados por la zapata rectangular $L/B=3$, sobre suelos arenosos, obtenidos a partir de métodos teóricos.

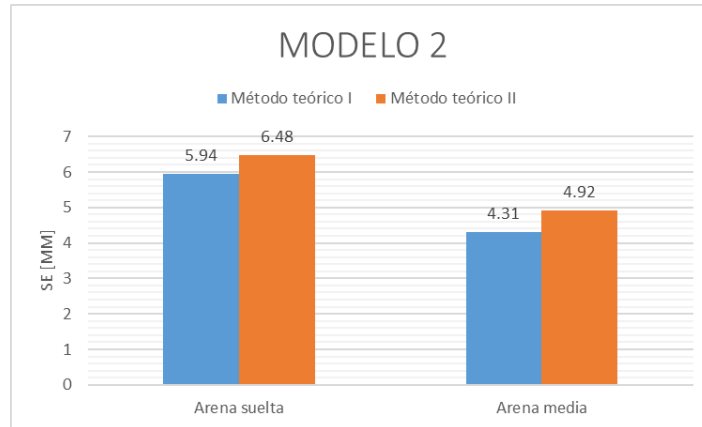
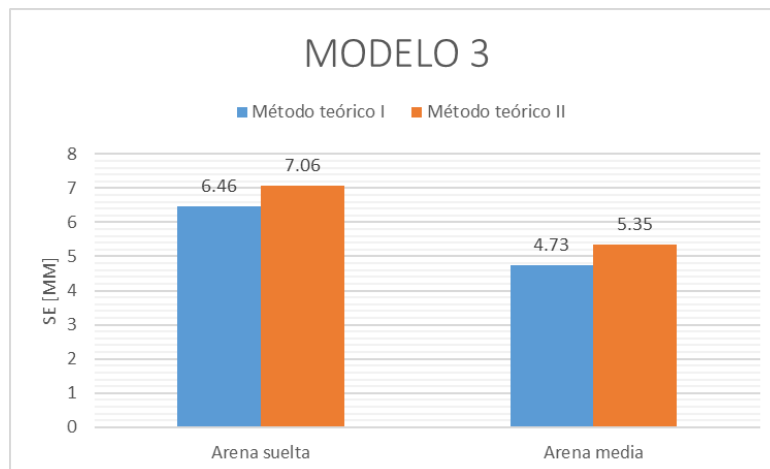


Figura 14. Valores de asentamientos inmediatos generados por la zapata rectangular $L/B=4$, sobre suelos arenosos, obtenidos a partir de métodos teóricos.



- Suelos arcillosos.

Figura 15. Valores de asentamientos inmediatos generados por la zapata cuadrada $L/B=1$, sobre suelos arcillosos, obtenidos a partir de métodos teóricos.

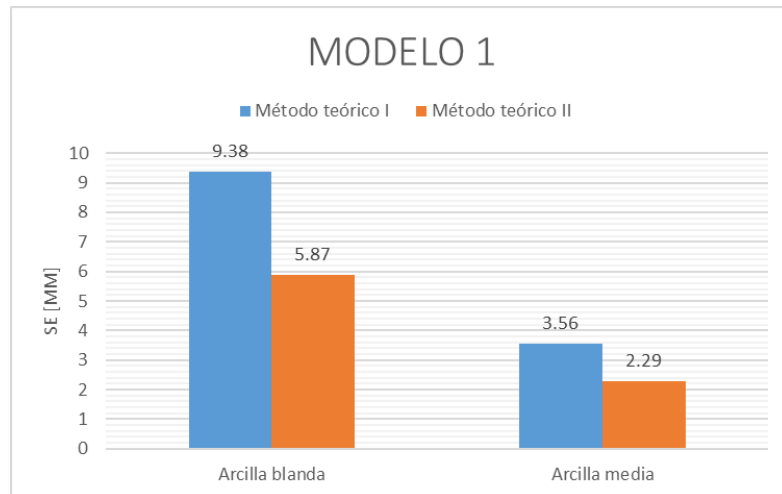


Figura 16. Valores de asentamientos inmediatos generados por la zapata rectangular $L/B=3$, sobre suelos arcillosos, obtenidos a partir de métodos teóricos.

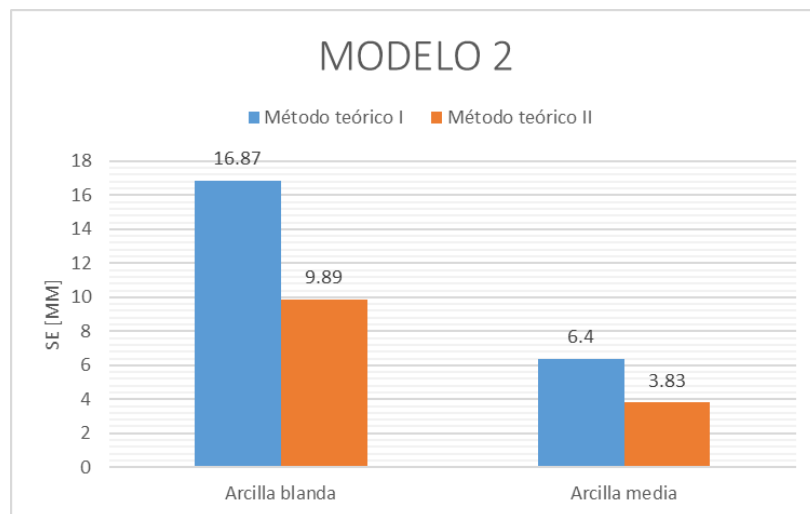
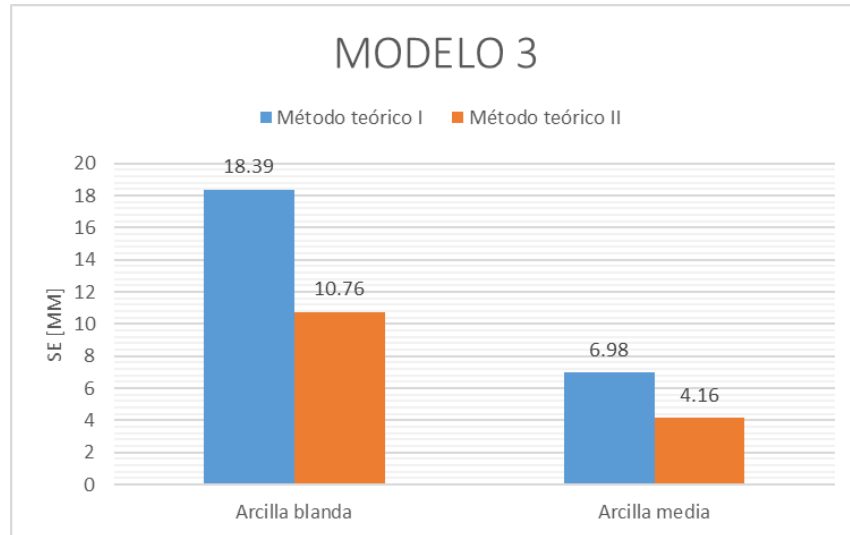


Figura 17. Valores de asentamientos inmediatos generados por la zapata rectangular $L/B=4$, sobre suelos arcillosos, obtenidos a partir de métodos teóricos.



4.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS MÉTODO TEÓRICO I VS MODELAMIENTO EN RS3, EN SUELOS ARENOSOS

Como se puede observar en las gráficas (18, 19 y 20), la diferencia en porcentaje presentada entre los asentamientos inmediatos calculados por RS3 y los obtenidos mediante el uso del método teórico de Schmertmann y Hartman (1978) para arenas, oscila entre el 15% y 31%.

Además, cabe resaltar que para el caso de la zapata cuadrada además de que los resultados en el método teórico están por encima de los de RS3, al contrario del resto de las zapatas de estudio, esta presenta un menor porcentaje de diferencia.

Figura 18. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en la zapata cuadrada $L/B=1$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico I en suelos arenosos.

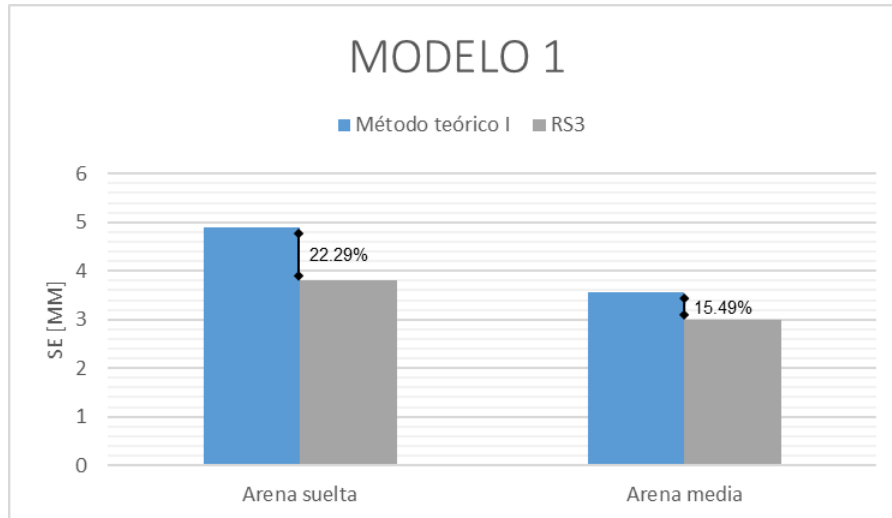


Figura 19. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata rectangular $L/B=3$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico I en suelos arenosos.

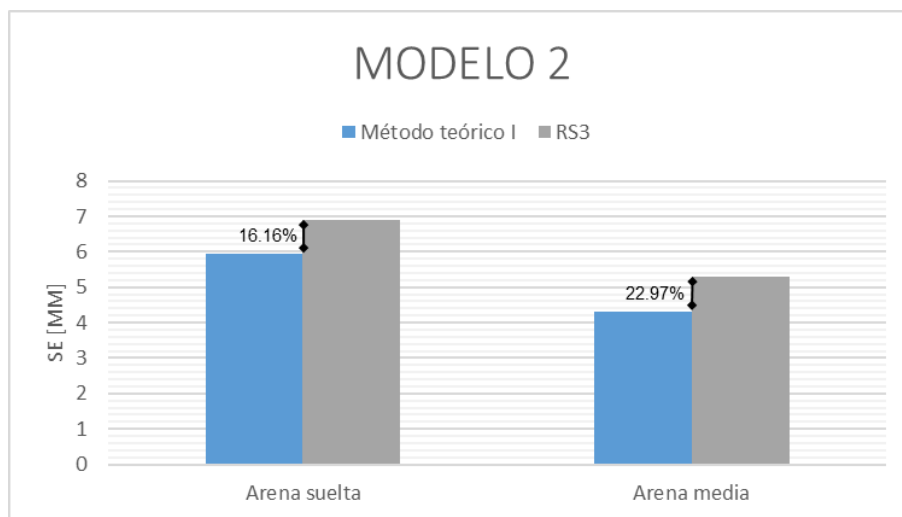
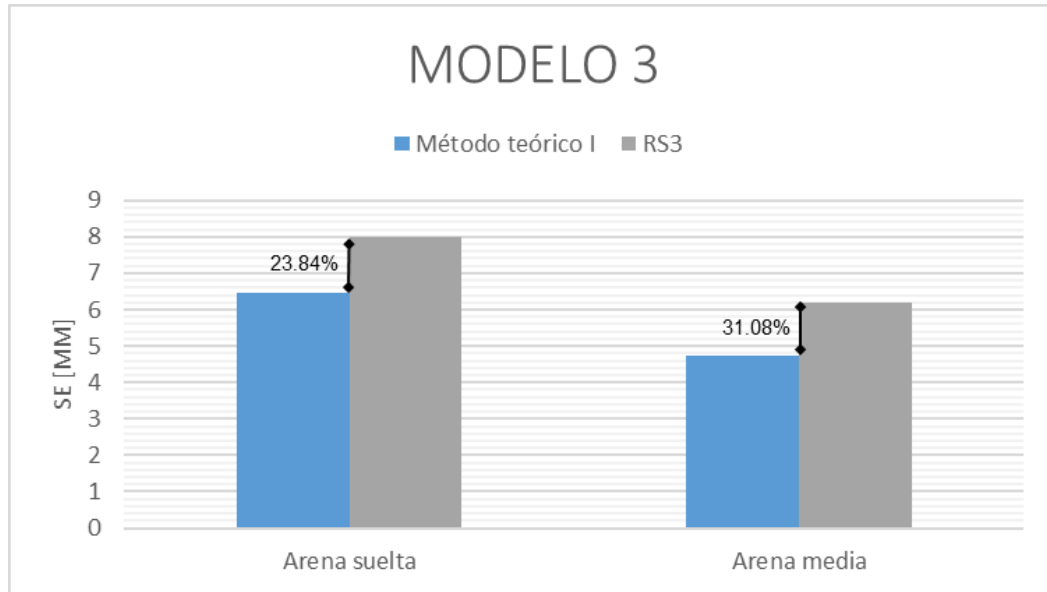


Figura 20. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata rectangular $L/B=4$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico I en suelos arenosos.



4.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS MÉTODO TEÓRICO II VS MODELAMIENTO EN RS3, EN SUELOS ARENOSOS

Al observar las gráficas (21, 22 y 23), se evidencia que la diferencia en porcentaje presentada entre los asentamientos inmediatos calculados por RS3 y los obtenidos mediante el uso del método teórico de Timoshenko y Goodier, para cimentaciones completamente flexibles y además para cálculo en todo tipo de suelo, oscila entre el 1% y 16%. Y se destaca que en la zapata cuadrada es en donde menor porcentaje de diferencia se presenta.

Figura 21. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata cuadrada $L/B=1$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico II en suelos arenosos.

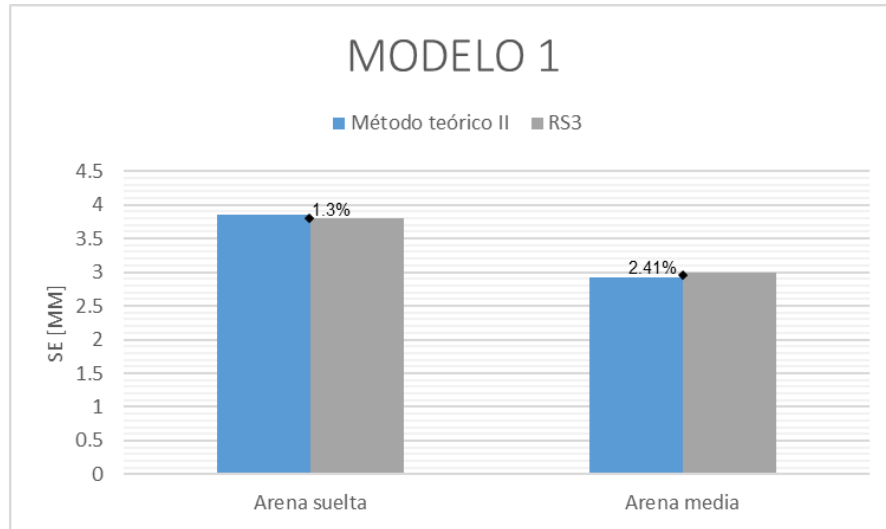


Figura 22. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata rectangular $L/B=3$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico II en suelos arenosos.

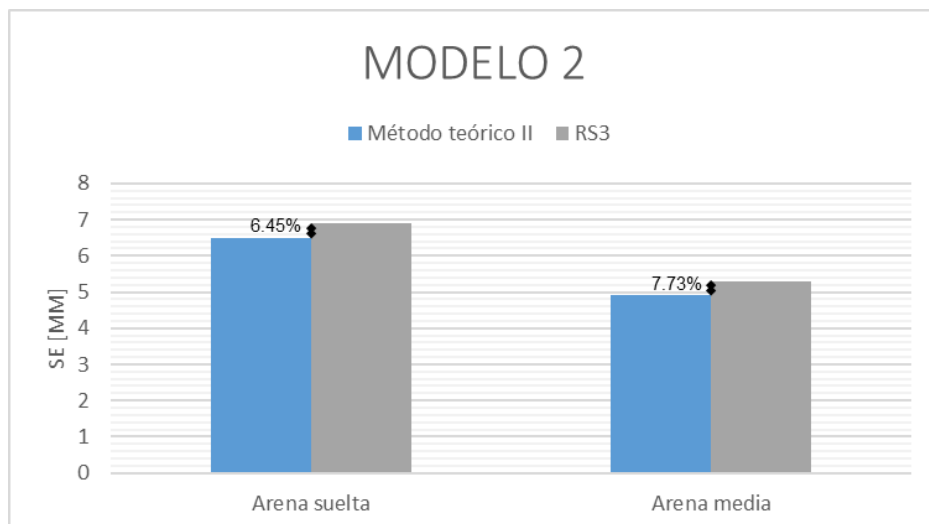
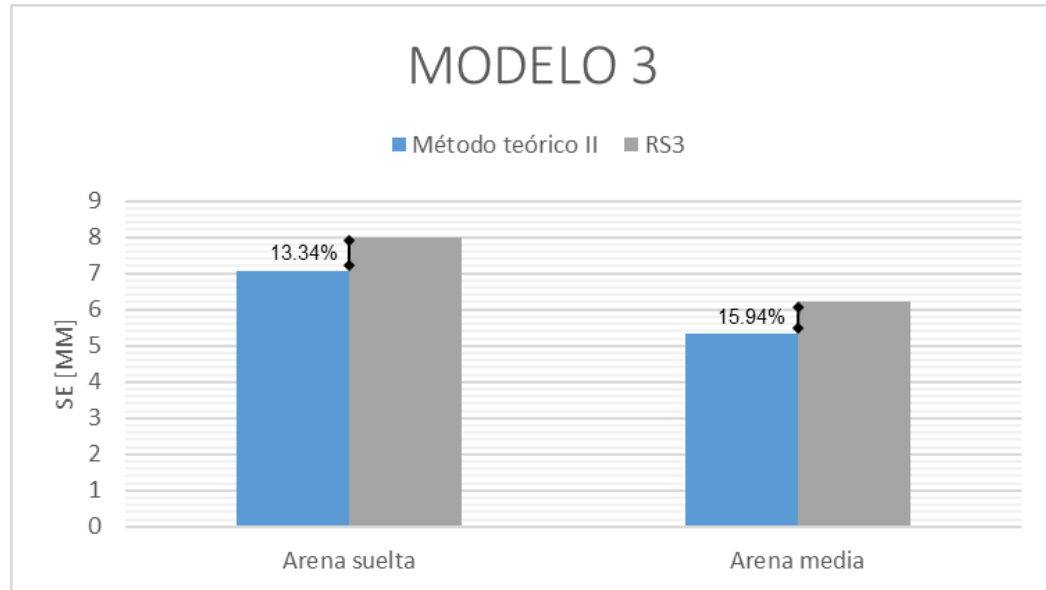


Figura 23. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata rectangular $L/B=4$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico II en suelos arenosos.



4.6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS MÉTODO TEÓRICO I VS MODELAMIENTO EN RS3, EN SUELOS ARCILLOSOS

Según se observa en las gráficas (24, 25 y 26), la diferencia en porcentaje que se presenta entre los asentamientos inmediatos calculados por RS3 y los obtenidos mediante el uso del método teórico clásico: Coeficiente C_d para el cálculo de asentamientos inmediatos en arcillas, oscila entre el 33% y 41%.

Evidenciando que, a diferencia de los casos con las arenas, con este método el porcentaje menor se presenta en la zapata rectangular con $L/B=4$, y todos los resultados calculados por el método teórico son mayores a los generados por RS3.

Figura 24. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata cuadrada $L/B=1$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico I en suelos arcillosos.

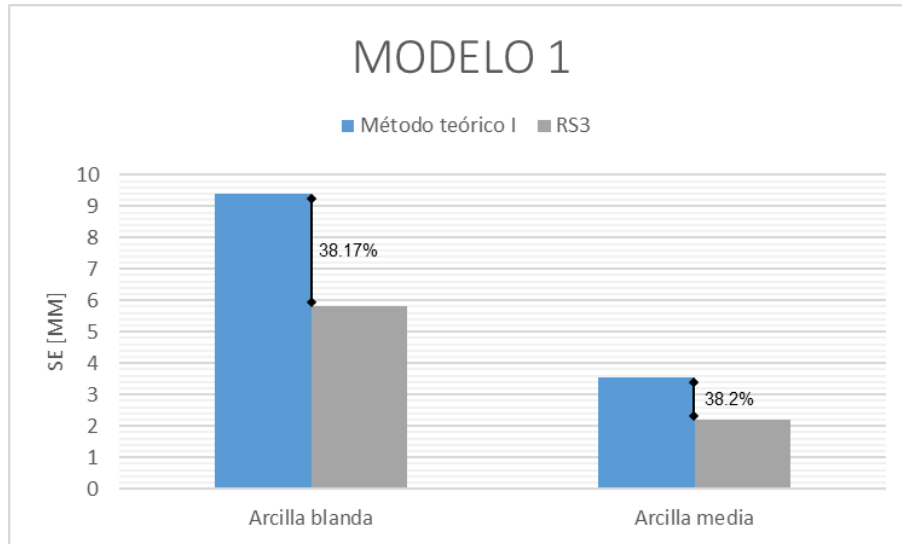


Figura 25. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata rectangular $L/B=3$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico I en suelos arcillosos.

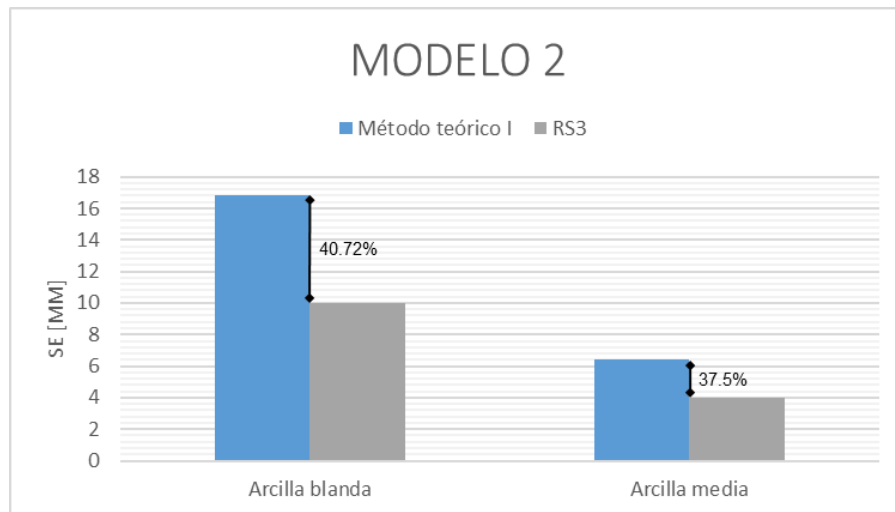
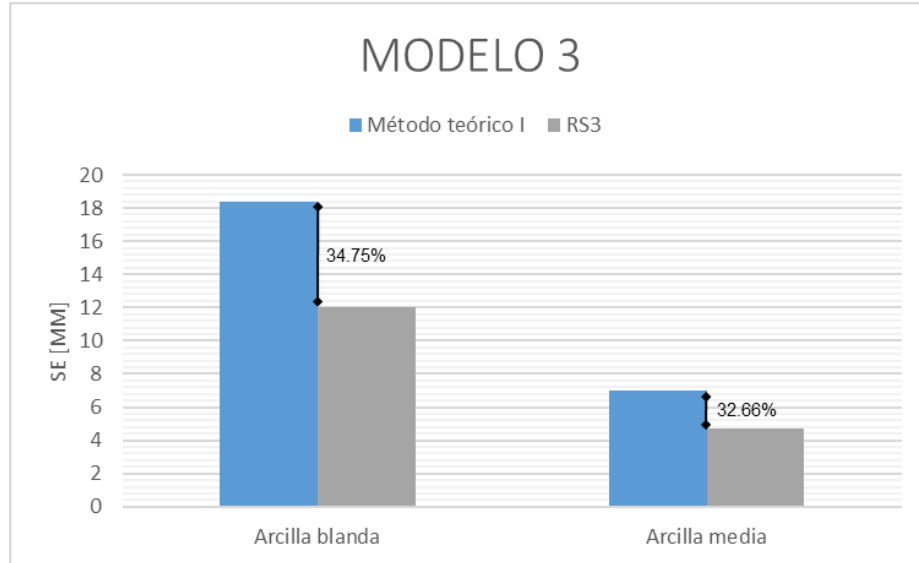


Figura 26. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata rectangular $L/B=4$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico I en suelos arcillosos.



4.7 COMPARACIÓN DE RESULTADOS MÉTODO TEÓRICO II VS MODELAMIENTO EN RS3, EN SUELOS ARCILLOSOS

Al observar las gráficas (27, 28 y 29), se evidencia que la diferencia en porcentaje presentada entre los asentamientos inmediatos calculados por RS3 y los obtenidos mediante el uso del método teórico de Timoshenko y Goodier, para cimentaciones completamente flexibles y además para cálculo en todo tipo de suelo, oscila entre el 1% y 13%. Y que, para el caso de la zapata cuadrada, además de que los resultados en el método teórico están por encima de los de RS3, al contrario del resto de las zapatas de estudio, esta presenta un menor porcentaje de diferencia.

Figura 27. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata cuadrada $L/B=1$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico II en suelos arcillosos.

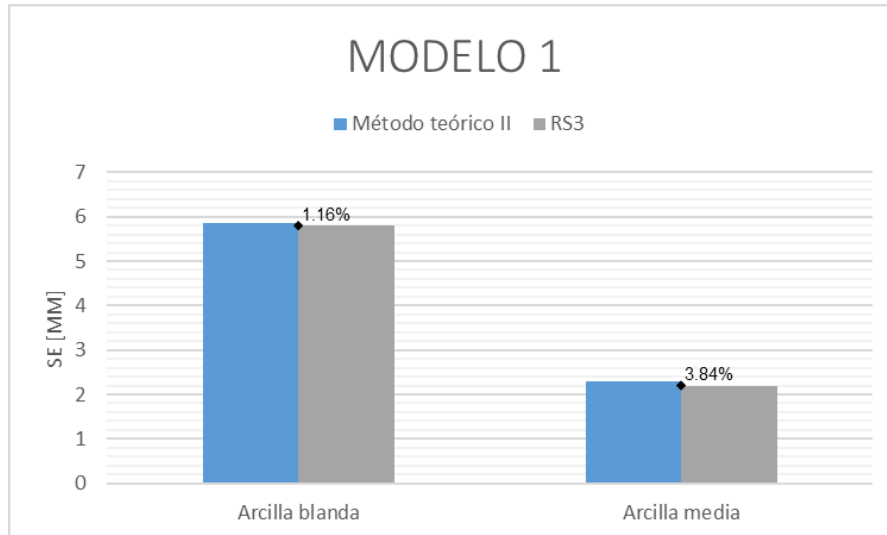


Figura 28. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata rectangular $L/B=3$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico II en suelos arcillosos.

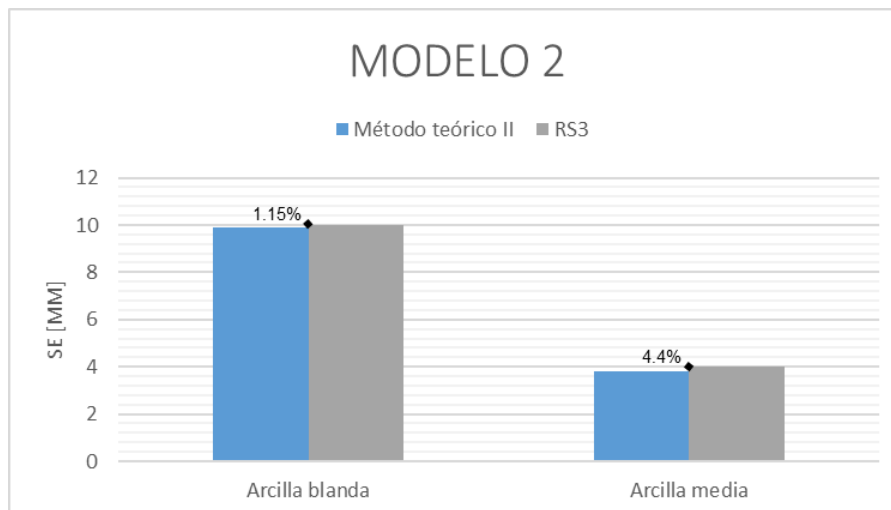
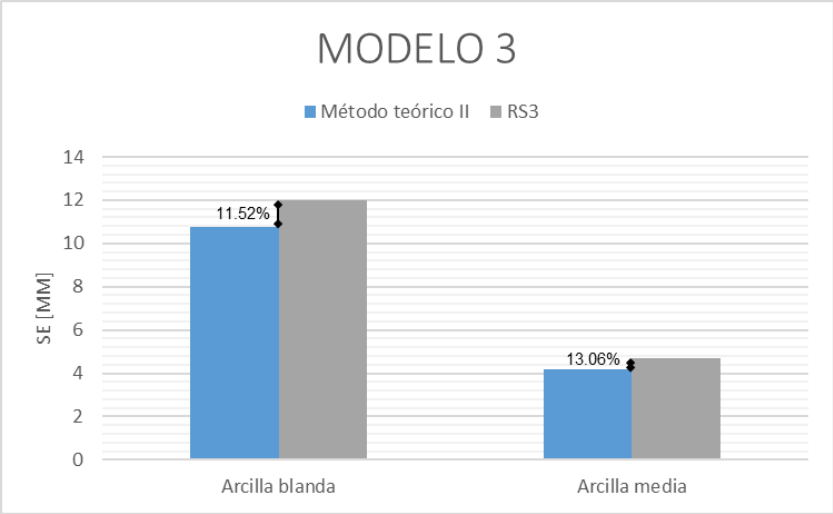


Figura 29. Diferencias entre los asentamientos inmediatos generados en zapata rectangular $L/B=4$, por RS3 y los obtenidos a partir del método teórico II en suelos arcillosos.



5. CONCLUSIONES

- Luego de analizar detalladamente durante el desarrollo de este proyecto el manejo del software de elementos finitos RS2 de Rocscience se determinó, que debido a que este programa está diseñado solo para problemas de ingeniería que requieran análisis de deformación plana, lo que no permite variar las relaciones ancho/largo de las cimentaciones superficiales planteadas en los modelos de estudio, con este software no es posible obtener el análisis que se requiere para este proyecto.
- Se observa que los resultados generados a partir de los modelamientos con el software de elementos finitos RS3 de Rocscience, son muy próximos a los calculados por los métodos teóricos analizados, especialmente a los obtenidos por el método teórico de Timoshenko y Goodier que, tanto para suelos arenosos como arcillosos, se observan diferencias en porcentaje entre el 1% y el 16%.
- Se evidencia que las soluciones con RS3, se aproximan más a las de los métodos teóricos cuando se trata de cimentaciones cuadradas, esto a excepción, del método teórico clásico: Coeficiente C_d para el cálculo de asentamientos inmediatos en arcillas que a diferencia de los demás, presenta un menor porcentaje de diferencia en la zapata rectangular con relación $L/B=4$.
- Es importante resaltar que, a pesar de que con este proyecto se demostró que el uso de herramientas computacionales como en este caso RS3 de Rocscience, genera resultados muy próximos a los calculados mediante el uso de los métodos teóricos que generalmente son los más usados para estos problemas de esfuerzo-deformación en el campo profesional, no hay que olvidar que estas metodologías de análisis siguen siendo aproximaciones a lo que se presenta realmente. Por esta razón, debe entenderse que la única manera de conocer con

exactitud el valor de un asentamiento inmediato presente en un suelo, es haciendo la medición del mismo directamente en el campo.

BIBLIOGRAFÍA

BRAJA M. Das, Fundamentos de ingeniería de cimentaciones. Séptima edición. Cengage learning. 2012.

BRAJA M. Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica. Cuarta edición. Cengage learning. 2015.

JOSEPH, E.; BOWLES, P.E, S.E, Foundation analysis and design. Fifth edition. The McGraw-Hill Companies. 1997.

RINCÓN, Jelver O.; PITA, Jorge A. Análisis de asentamientos diferenciales por consolidación para diversos factores a partir de metodologías teóricas y computacionales. Tesis pregrado; Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2016

ROCSCIENCE. Software RS2. Disponible en:
<https://www.rocscience.com/software/rs2>

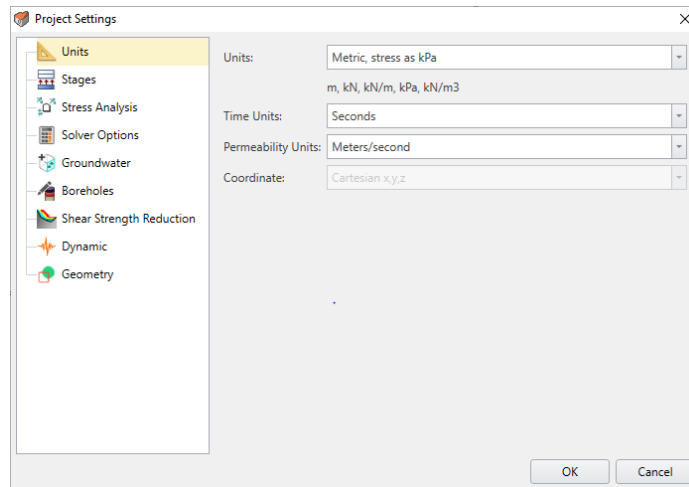
ROCSCIENCE. Software RS3. Disponible en:
<https://www.rocscience.com/software/rs3>

RONDÓN, José Alberto; TORRADO G., Luz Marina. Cimentaciones Asentamientos. Ingeas SAS. Docencia. Diapositivas de clase.

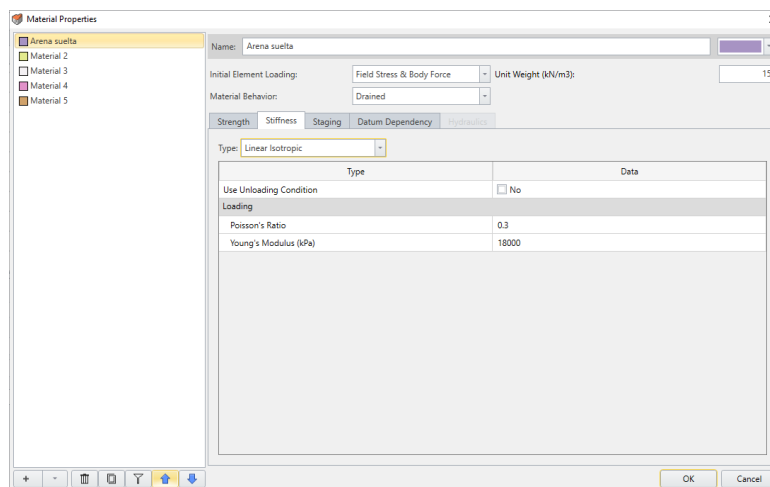
ANEXOS

ANEXO A. Modelamiento y paso a paso en software Rocscience-RS3.

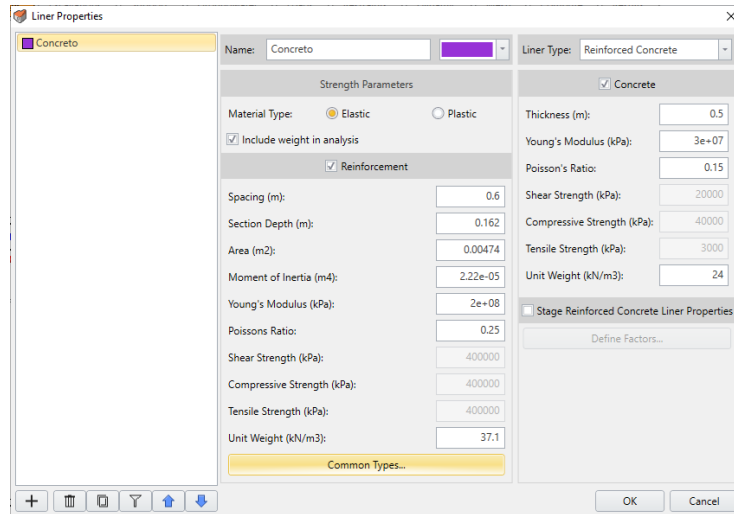
- **Paso 1.** Definir unidades: metros [m], kilo pascales [kPa].



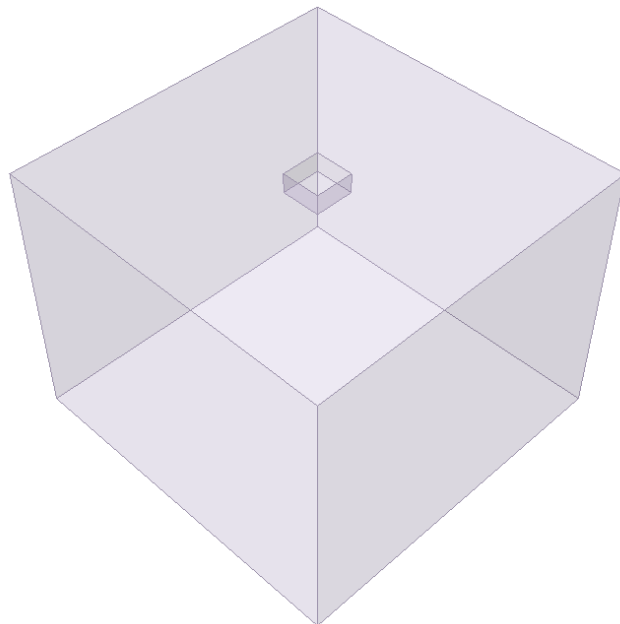
- **Paso 2.** Definir materiales: ingresar los parámetros elásticos y de fuerza del suelo a analizar.



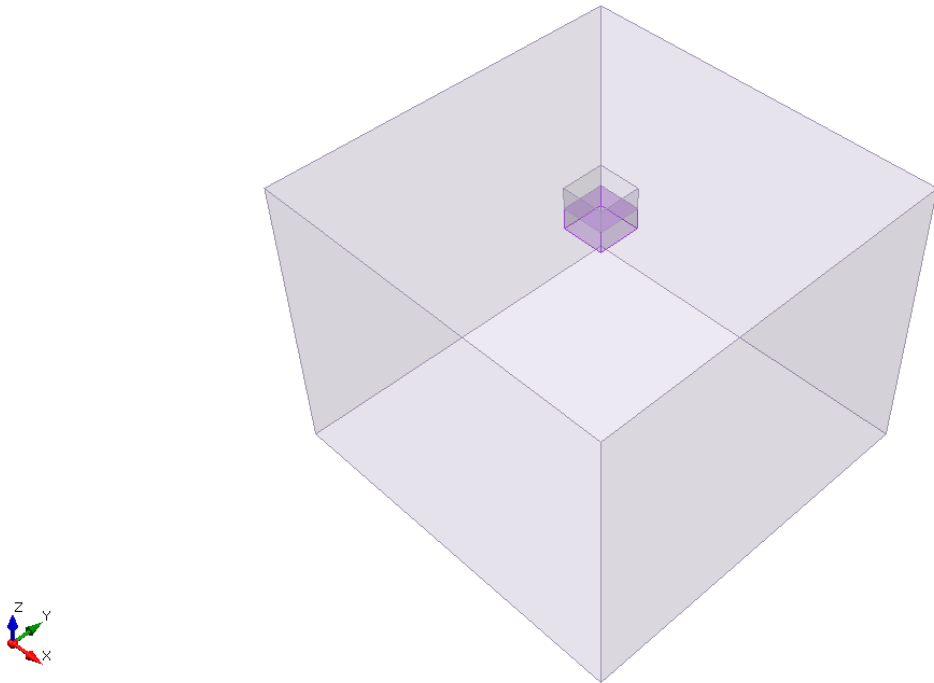
- **Paso 3.** Definir revestimiento: elegir en concreto reforzado y darle un espesor de 0.5m.



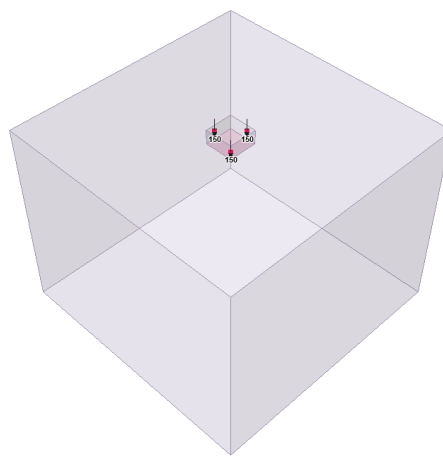
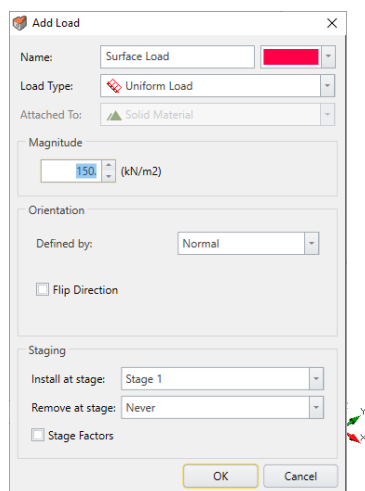
- **Paso 4.** Definir campo externo: ingresar coordenadas de los puntos que limitan el campo externo de estudio.
- **Paso 5.** Definir campo de excavación: ingresar las coordenadas de los puntos que limitan la excavación.
- **Paso 6.** Dividir geometría: separar el campo externo y la carga el campo de la excavación.



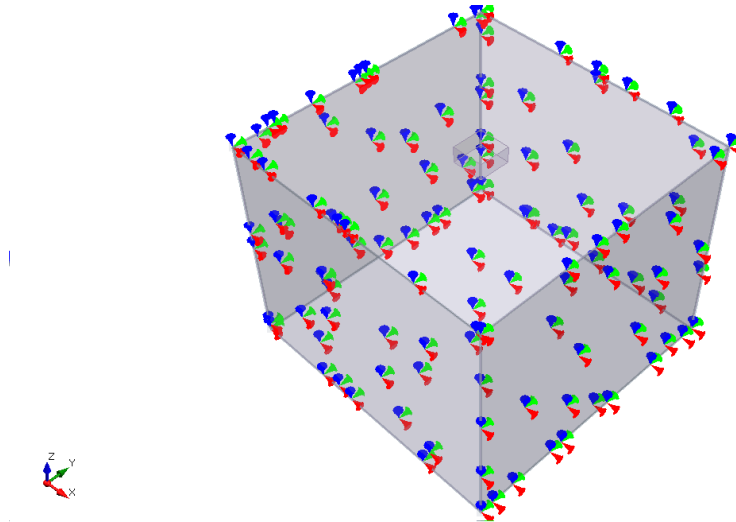
- **Paso 7.** Asignar campo de revestimiento: ocultar la excavación, seleccionar el campo inferior de la excavación y agregar el revestimiento.



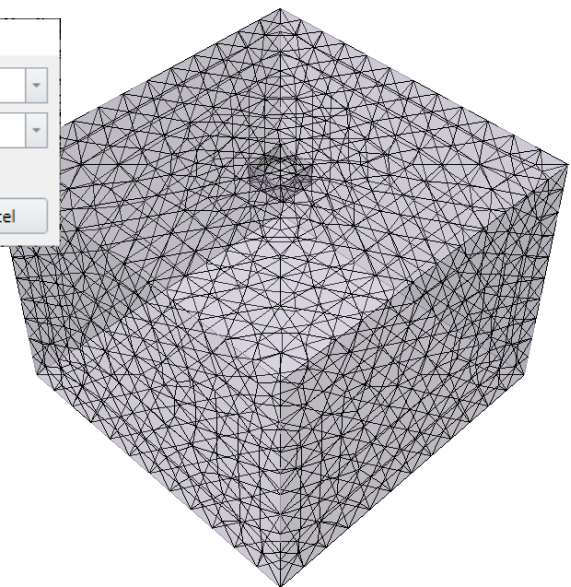
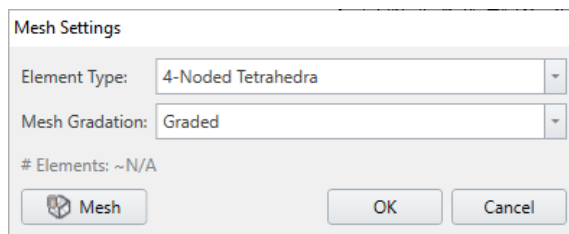
- **Paso 8.** Añadir cargas: seleccionar el campo inferior de la excavación y asignar la carga distribuida además de la fuerza de la gravedad sobre el campo de estudio.



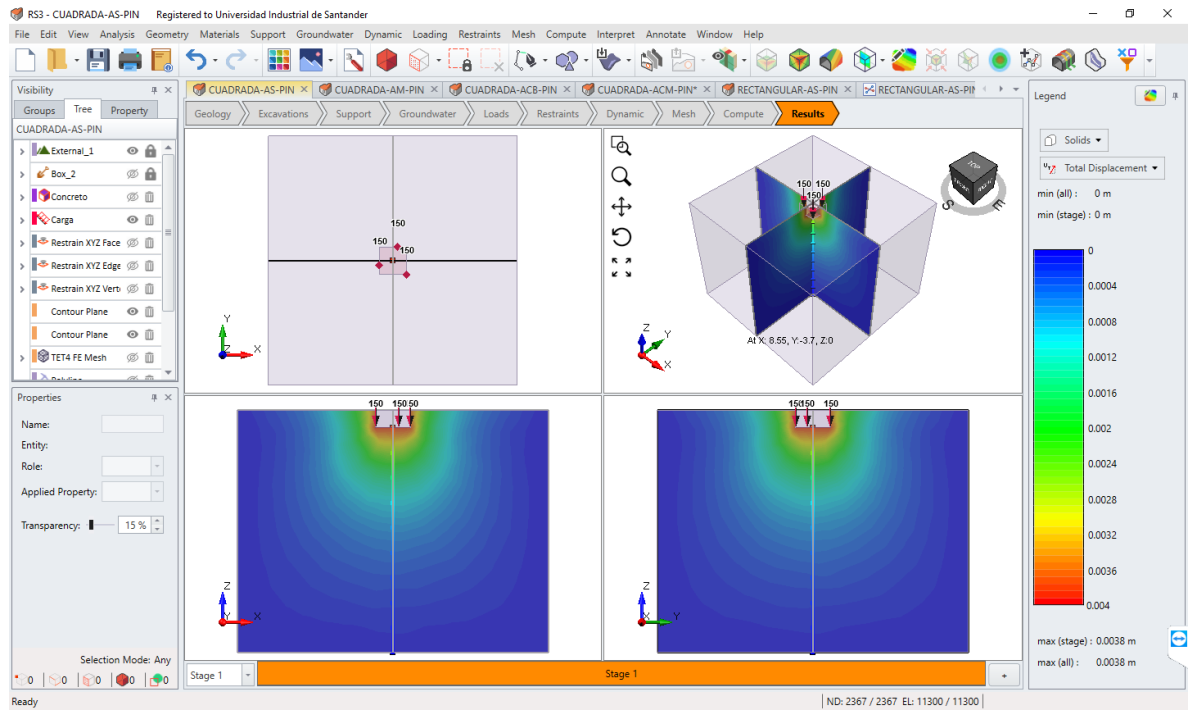
- **Paso 9.** Definir condiciones de frontera: en los extremos del campo externo ubicar pines para restringir el movimiento en las tres direcciones (x , y , z). a excepción de los límites superiores de la superficie externa.



- **Paso 10.** Asignar malla: elegir como tipo de elemento para análisis un tetraedro de 4 nodos.

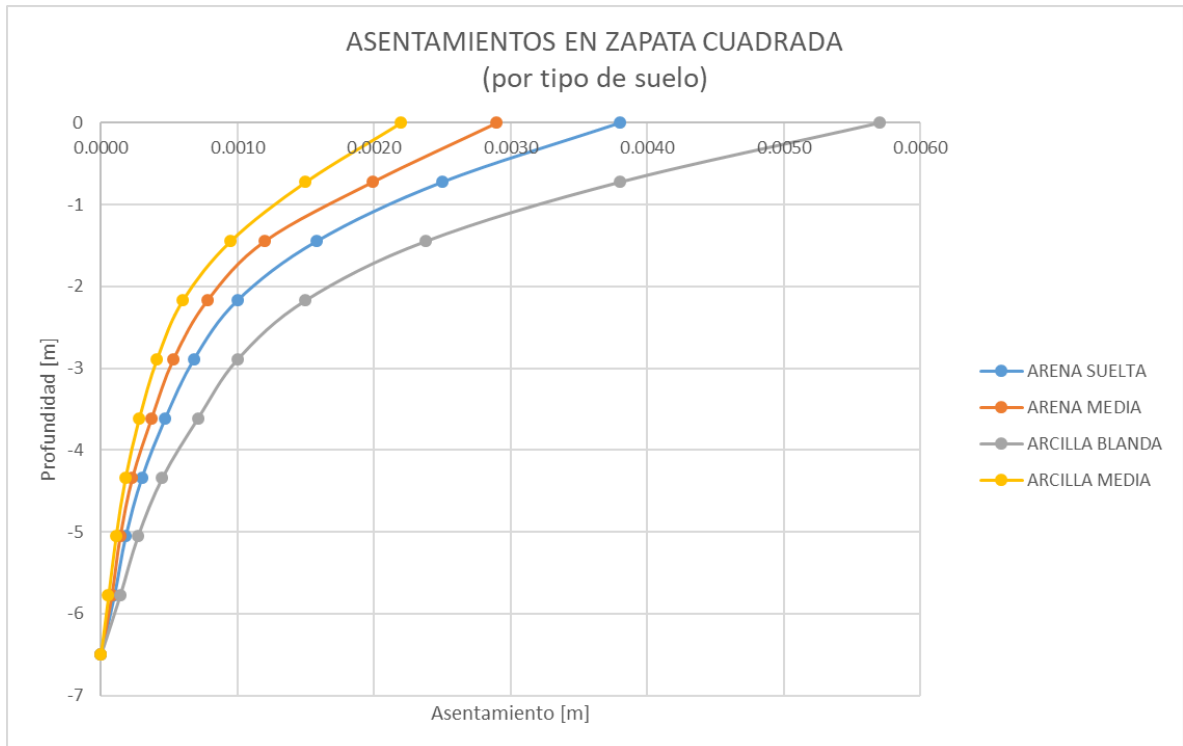


- **Paso 11.** Calcular: correr el programa e interpretar los resultados.



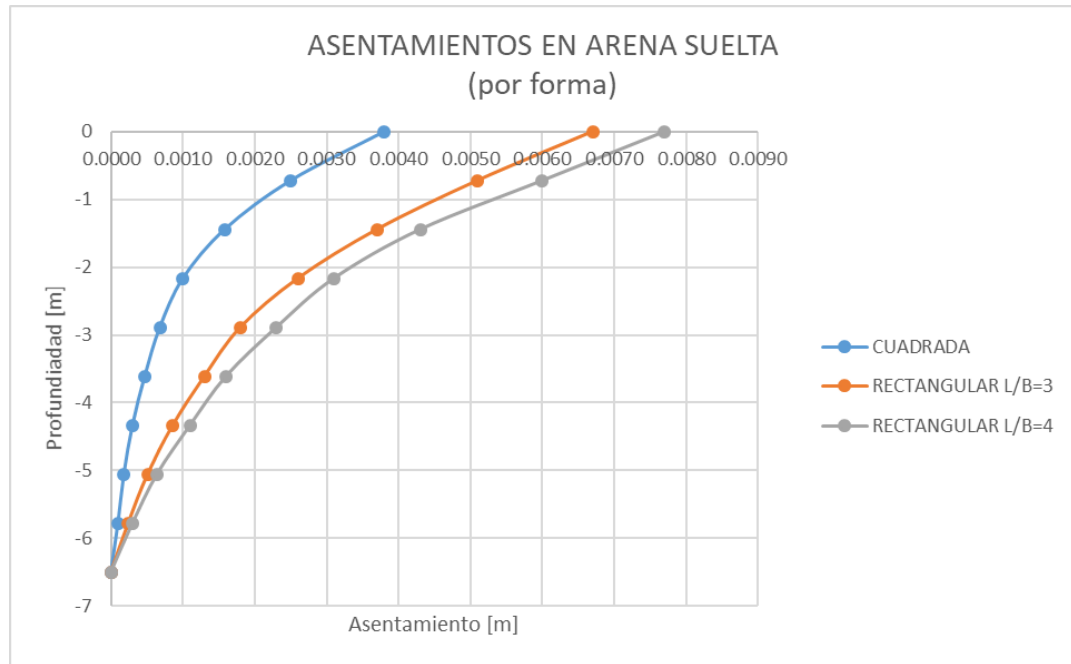
ANEXO B. Gráficos para análisis de datos.

- Gráfico de comportamiento de asentamientos inmediatos obtenidos en la zapata cuadrada, clasificados por tipo de suelo.



- Se demostró que, de los suelos estudiados, el más firme es la arcilla media.

- Gráfico de comportamiento de asentamientos inmediatos obtenidos en arena suelta, clasificados por forma de zapata.



- Al aumentar 3 veces la longitud en el caso de la zapata $L/b=3$, con respecto a la zapata cuadrada, el asentamiento inmediato máximo solo aumenta en un 81.58 %

- A medida que se va aumentando la longitud de la zapata manteniendo una misma base, el resultado será cada vez más próximo al anterior.