

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES DE TANQUES DE
ALMACENAMIENTO MEDIANTE EL USO DE UN PROGRAMA
COMPUTACIONAL DE ELEMENTOS FINITOS**

**JUAN JOSÉ AVENDAÑO ROJAS
RUTBEL ARLEY RUEDA RODRÍGUEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2012**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES DE TANQUES DE
ALMACENAMIENTO MEDIANTE EL USO DE UN PROGRAMA
COMPUTACIONAL DE ELEMENTOS FINITOS**

**JUAN JOSÉ AVENDAÑO ROJAS
RUTBEL ARLEY RUEDA RODRÍGUEZ**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

**Ing. Wilfredo del Toro Rodríguez
ING. CIVIL M. Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2012**

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Cesar Avendaño Avendaño y Olga Beatriz Rojas Bonilla, por haber creído siempre en mí y ser ese apoyo incondicional que me motiva a ser y dar lo mejor cada día de mi existencia,

A mi hermano Cesar Fernando Avendaño rojas, por ser un fiel ejemplo de bondad, disciplina y perseverancia.

A mi novia, amigos y familiares por quererme tal cual y como soy, sin recibir nada a cambio, iluminando mis pasos cuando mis caminos no eran tan claros.

A mis abuelos Isabel Bonilla Camacho (Q.E.P.D), Secundino Avendaño Guarín y Marina Avendaño López, quienes con sus sabios consejos hacen e hicieron más fácil mi existir

A todos y cada uno de ustedes los guardare siempre en mi corazón.

Infinitas gracias.

Juan José Avendaño Rojas.

DEDICATORIA

A mis amigos, mis profesores,
mis compañeros de universidad y de trabajo;
pero sobre todo a mi mamá,
Raquel Rodríguez que siempre me apoyó,
dio fuerza y supo que decirme,
incluso cuando pensé que todo estaba perdido.

Rutbel Rueda

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	20
1. OBJETIVOS	21
1.1 OBJETIVO GENERAL	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	22
2.1 GENERALIDADES DE LAS CIMENTACIONES	22
2.2 TIPOS DE CIMENTACIONES	22
2.2.1 Cimentaciones superficiales.....	22
2.2.2 Cimentaciones profundas.	23
2.2.3 Cimentaciones semiprofundas.....	23
2.3 NORMAS APLICABLES A LAS CIMENTACIONES SUPERFICIALES	24
2.3.1 Factores de seguridad	24
2.3.2 Factores de seguridad indirectos.	25
2.3.3 Capacidad portante de cimientos superficiales y capacidad portante de punta de cimentaciones profundas.....	25
2.4 PARÁMETROS BASICOS DEL DISEÑO DE CIMENTACIONES	25
2.4.1 Cohesión y ángulo de rozamiento interno o ángulo de fricción.	25
2.4.2 Modulo de elasticidad del suelo.	26
2.4.3 Relación de Poisson.....	26
2.4.4 Humedad.....	26
2.4.5 Esfuerzo efectivo, esfuerzo neutro y esfuerzo total.	27
2.5 ESFUERZOS Y DEFORMACIONES	27
2.5.1 Suelos sin cohesión.	28
2.6 ASENTAMIENTOS	28
2.6.1 Componentes de un asentamiento.....	29
2.6.2 Asentamientos inmediatos de cimentación sobre suelos cohesivos.....	29
2.6.3 Asentamientos inmediatos en suelos granulares.	30
2.7 RESISTENCIA EFECTIVA APROXIMADA CON SPT	30

3. MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	32
4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	33
4.1 SUELO ARENO – LIMOSO (CASABE – ANTIOQUIA)	33
4.1.1 Determinación de las características del suelo.....	33
4.1.2 Modelos analizados. Se.....	37
4.1.2.1 Sin mejoramiento del suelo.	37
4.1.2.2 Con mejoramiento del terreno, e = 1.80 m y D = 36 m.	38
4.1.2.3 Con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 1.80 m y D = 36	39
4.1.2.4 Con mejoramiento del terreno, e = 1.80 m y D = 42 m.	39
4.1.2.5 Con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 1.80 m y D = 42 m.....	40
4.1.2.6 Con mejoramiento del terreno, e = 1.80 m y D = 48 m.	41
4.1.2.7 Con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 1.80 m y D = 48m	41
4.1.2.8 Con mejoramiento del terreno, e = 2.70 m y D = 36 m.	42
4.1.2.9 Con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 2.70 m y D = 36m.	43
4.1.2.10 Con mejoramiento del terreno, e = 2.70 m y D = 42m	43
4.1.2.11 Con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 2.70 m y D = 42m	44
4.1.2.12 Con mejoramiento del terreno, e = 2.70 m y D = 48m	44
4.1.2.13 Con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 2.70 m y D = 48m.	45
4.2 SUELO GRANNULAR DE CONSISTENCIA MEDIA A COMPACTA (BANADIA, SARAVENA – ARAUCA)	45
4.2.1 Determinación de las características del suelo	45
4.2.2 Modelos analizados.....	48
4.2.2.1 Sin mejoramiento del suelo.	48
4.2.2.2 Con mejoramiento del terreno, e = 1.80 m y D = 36m.	49
4.2.2.3 Con mejoramiento del terreno, e = 1.80 m y D = 42 m	49

4.2.2.4 Con mejoramiento del terreno, e = 1.80 m y D = 48 m	50
4.2.2.5 Con mejoramiento del terreno, e = 2.70 m y D = 36m	50
4.2.2.6 Con mejoramiento del terreno, e = 2.70 m y D = 42m	51
4.2.2.7 Con mejoramiento del terreno, e = 2.70 m y D = 48 m	51
4.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	53
CONCLUSIONES	57
BIBLIOGRAFÍA	58
ANEXOS	59

LISTAS DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Factores de Seguridad Indirectos F_SICP Mínicos	25
Tabla 2. Datos de entrada suelo areno – limoso suelto (Casabe – Antioquia)	34
Tabla 3. Datos de entrada suelo granular de consistencia media a compacta (Banadia, Saravena – Arauca)	46
Tabla 4. Tabla comparativa de resultados de desplazamientos después de aplicada la carga	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tanque a simular en el software	33
Figura 2. Grafica τ Vs σ' suelo areno – limoso suelto [limo gris oscuro (1)]	35
Figura 3. Grafica τ Vs σ' suelo areno – limoso suelto [limo gris oscuro con residuos de madera (2)]	35
Figura 4. Grafica τ Vs σ' suelo areno – limoso suelto [limo gris oscuro (3)]	36
Figura 5. Grafica τ Vs σ' suelo areno – limoso suelto [limo arenoso gris oscuro (4)].....	36
Figura 6. Grafica τ Vs σ' suelo areno – limoso suelto [arena limosa fina (5)].....	37
Figura 7. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo areno – limoso suelto, sin mejoramiento del suelo).....	38
Figura 8. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo areno – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 36$ m)	38
Figura 9. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo areno – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 36$ m).....	39
Figura 10. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo areno – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 42$ m)	40
Figura 11. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo areno – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 42$ m)	40
Figura 12. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo areno – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 48$ m)	41
Figura 13. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo areno – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 48$ m) ..	42
Figura 14. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo areno – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 36$ m)	42

Figura 15. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo areno – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 2.70 m y D = 36m)	43
Figura 16. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo areno – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, e = 2.70 m y D = 42m)	43
Figura 17. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo areno – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 2.70 m y D = 42m)	44
Figura 18. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo areno – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, e = 2.70 m y D = 48m)	44
Figura 19. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo areno – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 2.70 m y D = 48m)	45
Figura 20 . Grafica τ Vs σ' suelo granular de consistencia media a compacta (Estrato 1)	47
Figura 21. Grafica τ Vs σ' suelo granular de consistencia media a compacta (Estrato 2)	47
Figura 22. Grafica τ Vs σ' suelo granular de consistencia media a compacta (Estrato 2)	48
Figura 23. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo granular de consistencia media a compacta, sin mejoramiento del suelo)	48
Figura 24. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, e = 1.80 m y D = 36m)	49
Figura 25. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, e = 1.80 m y D = 42 m)	49
Figura 26. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, e = 1.80 m y D = 48 m)	50

Figura 27. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 36$ m)	50
Figura 28. Malla de deformación de la excavación (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 42$ m)	51
Figura 29. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 42$ m)	51
Figura 30. Malla de deformación de la excavación (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 48$ m)	52
Figura 31. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 48$ m)	52
Figura 32. Grafica comparativa entre los asentamientos del suelos areno – limoso suelto y suelo granular de consistencia media a compacta, ambos sin mejoramiento	53
Figura 33. Grafica comparativa entre el asentamiento sin mejoramiento y el promedio de los asentamientos con mejoramiento del terreno del suelo areno – limoso suelto	54
Figura 34. Grafica comparativa entre los asentamientos del suelo areno – limos suelto con mejoramiento de terreno, sin terraplén y con terraplén.....	54
Figura 35. Grafica comparativa entre los asentamientos del suelo areno – limoso suelto con mejoramiento del terreno de $e = 1.80$ m y $e = 2.70$ m	55
Figura 36. Grafica comparativa entre los asentamientos del suelo areno – limoso suelto con mejoramiento del terreno de $D = 36$ m, $D = 42$ m y $D = 48$ m	55
Figura 37. Grafica comparativa entre el asentamiento sin mejoramiento y el promedio de los asentamientos con mejoramiento del terreno del suelo granular de consistencia media a compacta	56

Figura 38. Grafica comparativa entre los asentamientos del suelo granular de consistencia media a compacta con mejoramiento del terreno de $e = 1.80$ m y $e = 2.70$ m56

Figura 39. Grafica comparativa entre los asentamientos del suelo granular de consistencia media a compacta con mejoramiento del terreno de $D = 36$ m, $D = 42$ m y $D = 48$ 56

LISTA DE ANEXOS

	Pag.
Anexos 1. Geometrías de los modelos analizados en la ventana de entrada y desplazamientos totales Uy	60

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO MEDIANTE EL USO DE UN PROGRAMA COMPUTACIONAL DE ELEMENTOS FINITOS¹.

AUTORES: JUAN JOSÉ AVENDAÑO ROJAS

RUTBEL ARLEY RUEDA RODRÍGUEZ²

PALABRAS CLAVES: Cimentaciones superficiales, esfuerzos y asentamientos, suelo, deformación, desplazamiento.

DESCRIPCIÓN:

La geotecnia es una rama muy importante así como citada en la ingeniería civil, y en este caso en particular, el estudio del comportamiento de cimentaciones superficiales permite tener una idea clara de la estabilidad de tanques de almacenamiento o cualquier otra estructura que este en contacto directo con el suelo.

Un programa computacional basado en el método de elementos finitos puede ser usado para la determinación de esfuerzos y asentamientos de suelos. Primero se presenta las generalidades de las cimentaciones, así como los tipos de las mismas. También se hace referencia a las normas aplicables a las cimentaciones superficiales.

Luego se habla de los parámetros básicos a tener en cuenta a la hora de diseñar cimentaciones, así como los esfuerzos y deformaciones. Es también importante nombrar al método de los elementos finitos.

Por último se hace referencia a los datos de entrada del programa, los modelos analizados y los resultados obtenidos, concluyendo que un mejoramiento del terreno, en este caso construida con base granular, siempre tendrá como resultado un mejor comportamiento de las cimentaciones superficiales, también que una gran área de esta no siempre lleva a obtener asentamientos más pequeños pero si es útil aumentar el espesor de la misma.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela Ingeniería Civil, Director Ing. Wilfredo del Toro Rodríguez

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE BEHAVIOR OF FOUNDATIONS OF STORAGE TANKS USING FINITE ELEMENT SOFTWARE³

AUTHORS: JUAN JOSÉ ROJAS AVENDAÑO
RUTBEL ARLEY RUEDA RODRÍGUEZ⁴

KEY WORDS: Shallow Foundations, efforts and settlements, soil, deformation, displacement.

DESCRIPTION:

The geotechnical Engineering is a very important branch of Civil Engineering, and in this particular case, the study of the behavior of superficial foundations allows us to have a clear idea of the stability of storage tanks or any other structure that is in contact with the ground.

A computer program based on the finite element method can be used to determine the stress and settlements of soils. First, some generalities of foundations along with their types are presented. Besides, applied rules to superficial foundations are referred.

Then talk about the basic parameters to consider in the analysis of the behavior and design of shallow foundations and refers the importance of the finite element method like a useful tool for stress strain analysis of foundations.

Finally, the program input data; the analyzed models along with their results are referred in this project, concluding that soil improvement, in this case built with granular foundations, will always have a better superficial foundation performance. Besides, it can be that a large area of this does not always leads to get smaller settlements but it is useful to increase their thickness

³ Work Degree

⁴ Physicomechanical Engineering Faculty, School of Civil Engineering, Director Ing. Wilfredo del Toro Rodríguez

INTRODUCCIÓN

El terreno es un componente más de las estructuras, pero este no posee la misma resistencia y deformabilidad que el resto de la estructura; por tanto es necesario conseguir que esta transmita las cargas al suelo de una manera adecuada y así evitar que falle o se deforme, ahí es donde aparecen las cimentaciones.

Así como las estructuras, no todos los terrenos son iguales; tampoco lo son las cimentaciones. Para elegir el tipo de cimentación a utilizar se debe tener en cuenta las características del terreno así como la función y cargas de la estructura a construir.

El objetivo de un estudio geotécnico es obtener las propiedades de un terreno y así calcular tensiones, deformaciones, condiciones de estabilidad, etc; y existen programas computacionales que facilitan esta labor, en este caso se usó un programa basado en el método de elementos finitos, que es un método alternativo de cálculo con respecto a los métodos clásicos. El método de elementos finitos se originó en el campo del análisis estructural. El cual usa un modelo matemático bastante simple para simular el comportamiento de un suelo.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar el comportamiento de cimentaciones de tanques de almacenamiento, con la ayuda de un programa usando el método de elementos finitos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Hacer una revisión teórica del comportamiento de cimentaciones flexibles.
- Utilizar un programa basado en el método de elementos finitos para analizar la deformación de distintos tipos de fundaciones de tanques en suelo.
- Modelar un número limitado de cimentaciones de tanques sobre distintos tipos de suelo ayudados con el programa anteriormente mencionado.
- Hacer una comparación de los resultados encontrados en el estudio realizado.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 GENERALIDADES DE LAS CIMENTACIONES

Se entiende por cimentación al componente encargado de transmitir las cargas que actúan en la estructura al terreno, dando como resultado un sistema de esfuerzos que son resistidos sin que se genere asentamientos o al menos sin que estos ocasionen daños, gracias a que comparado con el terreno la estructura ofrece una gran rigidez.

La función de la cimentación es asegurar que no se presenten asentamientos excesivos, que generen que la estructura sufra cualquier daño. Se debe tener cuidado con los asentamientos diferenciales, aún más que con el asentamiento total, porque los asentamiento diferenciales pueden hacer que la estructura colapse gracias a que está rota alrededor de un plano horizontal.

El tipo de cimentación a usar depende principalmente de las características mecánicas del suelo (cohesión, nivel freático, ángulo de fricción y cargas existentes). Con todos estos datos se calcula la capacidad portante del terreno; con esto y la homogeneidad del mismo se define el de cimentación a usar. Es más común usar cimentaciones superficiales (cuando se apoya en un estrato de suelo cerca a la superficie), ya que es mucho más económica y fácil de ejecutar. Solo cuando la homogeneidad del terreno o la capacidad portante del mismo no permitan usar una cimentación superficial se usará otro tipo de cimentación.

2.2 TIPOS DE CIMENTACIONES

Las cimentaciones se clasifican según la profundidad a la que estas se apoyan, si se encuentran apoyadas sobre un estrato de suelo próximo a la superficie se conocen como cimentaciones superficiales. En caso contrario se denominan cimentaciones profundas.

2.2.1 Cimentaciones superficiales. Se entiende por cimentaciones superficiales a las que se apoyan en las capas de suelo poco profundas. En este tipo de cimentación, la carga se reparte en un plano de apoyo horizontal. En estructuras de orden importante las cimentaciones, incluidas las superficiales, son apoyadas a suficiente profundidad, para así garantizar que no se produzcan daños. Entre las

cimentaciones superficiales se encuentran: las cimentaciones ciclópeas, zapatas y losas de cimentación.

La cimentación en concreto ciclópeo consiste en vaciar dentro de zanjas con paramentos verticales concreto mezclado con rocas de tamaño considerable. Este tipo de cimentación se usa en terrenos cohesivos que permitan excavar zanjas con paredes internas verticales.

Las zapatas son empleadas en terrenos homogéneos y con muy buena resistencia a la compresión. Son encargadas de transmitir las tensiones a las que está sometida la estructura al suelo. Existen varios tipos de zapatas, si sirven como apoyo a un solo pilar se llaman zapatas aisladas; para dos pilares que se encuentran cerca, se conocen como zapatas combinadas y las zapatas corridas se usan para soportar muros o hileras de pilares.

Una losa de cimentación es una placa flotante apoyada sobre el terreno, posee un espesor proporcional a los momentos flectores que actúan sobre ella, ya que está sometida principalmente a esfuerzos de flexión. Las losas de cimentación son usadas cuando la estructura posee una superficie pequeña respecto a su volumen, cuando el terreno cuenta con una estratificación irregular y se pueden presentar asentamientos diferenciales.

2.2.2 Cimentaciones profundas. Deben ser más profundas, para poder proporcionar una gran área sobre la que se distribuye un esfuerzo muy grande y así soportar la carga, ya que se basa en la fricción entre la cimentación y el suelo. Pueden estar constituidas por muros verticales profundos de hormigón, llamados pantallas o por pilares hincados que se conocen como pilotes.

Se utilizan cuando los esfuerzos transmitidos por la estructura no pueden ser distribuidos a través de una cimentación superficial. Cuando se trabaja sobre terrenos de relleno o baja calidad, donde los estratos próximos al cimiento pueden provocar asentamientos imprevisibles. También cuando la estructura está sometida a esfuerzos por vientos y los cimientos son sometidos a tracción.

2.2.3 Cimentaciones semiprofundas. Son soluciones intermedias entre las cimentaciones superficiales y profundas, por lo que se catalogan como semiprofundas. En ciertas ocasiones deben hacerse bajo el agua, cuando un río no puede desviarse, en ese caso se trabaja en cámaras presurizadas.

2.3 NORMAS APLICABLES A LAS CIMENTACIONES SUPERFICIALES

2.3.1 Factores de seguridad. DEFINICIÓN — En Ingeniería Civil el Factor de Seguridad F_S se define como la relación entre fuerzas resistentes F_R y actuantes F_A y también pueden usarse esfuerzos y se usa para evaluar el Estado Límite de Falla:

$$F_S = F_R / F_A$$

$$F_S = \tau_f / \tau_A$$

En Ingeniería Geotécnica el Factor de Seguridad Básico o directo, F_{SB} , se define como la relación entre esfuerzo cortante último resistente o esfuerzo cortante a la falla τ_f y esfuerzo cortante actuante τ_A

$$F_{SB} = \tau_f / \tau_A$$

De igual forma el esfuerzo cortante a la falla τ_f se expresa con el Criterio de Mohr-Coulomb, mediante la siguiente ecuación:

$$\tau_f = C' + \sigma' \tan \varphi'$$

En la cual

τ_f	=	esfuerzo cortante a la falla
C'	=	intercepto de cohesión efectiva
φ'	=	ángulo de fricción efectivo
σ'	=	esfuerzo normal efectivo
		$\sigma' = \sigma - U_F$
σ	=	esfuerzo normal total
U_F	=	presión de fluidos o presión de poros
U_W	=	presión de líquido (agua) para materiales saturados
U_A	=	presión de gas (aire) para materiales secos

Se advierte que los esfuerzos normales empleados son valores relativos a la presión atmosférica P_A y que cualquier otra definición de esfuerzo cortante a la falla debe ir en término de esfuerzos efectivos, salvo lo expresado en $F_{SB} = \tau_f / \tau_A$.

También se define el esfuerzo cortante actuante τ_A como esfuerzo cortante de trabajo o de diseño τ_D y entonces:

$$\tau_A = [C' + \sigma' \tan \phi'] / F_{SB}^1$$

Por tanto es importante tener en cuenta a la hora de elegir un factor de seguridad la magnitud de la estructura a construir, la información del terreno con la que se cuenta y los resultados de una potencial falla. Siempre el factor de seguridad debe ser igual a mayor que la unidad.

2.3.2 Factores de seguridad indirectos. Para cimentaciones se aconsejan los siguientes factores de seguridad indirectos mínimos:

2.3.3 Capacidad portante de cimientos superficiales y capacidad portante de punta de cimentaciones profundas ² Para estos casos se aconsejan los siguientes valores:

Tabla 1. Factores de Seguridad Indirectos F_{SICP} Mínimos

Condición	F_{SICP} Mínimo
	Diseño
Carga Muerta + Carga Viva Normal	3.0
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	2.5
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1.5

Fuente: NSR - 10

2.4 PARÁMETROS BASICOS DEL DISEÑO DE CIMENTACIONES

2.4.1 Cohesión y ángulo de rozamiento interno o ángulo de fricción. Para evaluar la resistencia al deslizamiento a lo largo de una superficie plana inclinada, se parte del hecho experimental de que el deslizamiento entre dos cuerpos sólidos se produce cuando la fuerza tangencial entre ellos alcanza un valor, T_r , proporcional a la fuerza normal, N , siendo la constante de proporcionalidad el denominado coeficiente de rozamiento entre ambas superficies, μ_r :

¹ Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10 Numeral H.2.4

² Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10 Numeral H.4.7

$$T_r = \mu_r * N$$

La resistencia al deslizamiento por unidad de superficie en un plano en el interior del suelo se debe sólo al rozamiento entre partículas, y debe ser por tanto proporcional a la presión normal actuante en dicho plano; el coeficiente de rozamiento se expresa como tangente de un ángulo, ángulo de rozamiento interno o ángulo de fricción del suelo, ϕ :

$$\tau_r = \sigma' * tg\phi$$

En “tierras cohesivas”, se supone que puede haber otro sumando de valor constante e independiente de dicha presión normal, que se denomina cohesión, c . Así pues, la resistencia tangencial según un plano vendría dada en el caso general por:

$$\tau_r = c + \sigma' * tg\phi$$

2.4.2 Modulo de elasticidad del suelo. El programa computacional usado para desarrollar este proyecto usa el modulo de elasticidad como un módulo de rigidez y dado el comportamiento no lineal típico de los suelos normalmente consolidados, es conveniente usar el módulo de rigidez tangente a la parte inicial de la curva esfuerzo – deformación sino se recomienda usar el módulo de rigidez correspondiente a la pendiente de la recta entre el origen y el punto correspondiente a la mitad de la resistencia máxima.

2.4.3 Relación de Poisson. Se trata de uno de los parámetros más difíciles de evaluar en el contexto de la mecánica de suelos, pero al mismo tiempo, de los más relevantes en el análisis numérico por elementos finitos y particularmente en el modelo *Morh – Coulomb*. Normalmente la relación de Poisson efectiva puede ser evaluada a través de la relación de un ensayo triaxial drenado, midiendo las distintas variables de deformación unitaria.

2.4.4 Humedad. Humedad es el contenido de agua de un suelo, la posición del nivel freático determina casi siempre el grado de humedad de un suelo, y la resistencia del mismo depende del contenido de agua.

Este dato es conseguido en el laboratorio tomando el peso de una muestra de suelo antes y después de ser secado:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de la muestra seca}} \times 100$$

2.4.5 Esfuerzo efectivo, esfuerzo neutro y esfuerzo total. El suelo de cimentación está compuesto de tres fases y cada una reacciona de manera independiente a la carga, debe determinarse la distribución de esfuerzo entre las fases y luego establecer el esfuerzo en la masa de suelo. El agua se puede considerar como incompresible, pero la resistencia a esfuerzo cortante se le considera nula porque en la realidad la velocidad de aplicación de la carga es tan lenta que son despreciables los efectos de la viscosidad.

El esfuerzo total es el esfuerzo de toda la masa de suelo.

Ahora bien el esfuerzo neutro es el que soporta los poros del suelo llenos de agua y no tiene influencia sustancial sobre la relación de vacíos o cualquier propiedad mecánica del suelo ya que es incapaz de soportar esfuerzo cortante.

El esfuerzo efectivo es el que soporta directamente el esqueleto del suelo, este tiene influencia en las condiciones de esfuerzo que conducen a la rotura, ya que el cambio en los esfuerzos efectivos conducen a un cambio de esfuerzos, como la distorsión, la compresión y la resistencia cortante.

Este último es el que más relación tiene con el comportamiento del suelo. El esfuerzo efectivo es igual al esfuerzo total menos la presión de poros. La consolidación y la resistencia del suelo dependen del esfuerzo efectivo.

2.5 ESFUERZOS Y DEFORMACIONES

Los asentamientos en las estructuras son determinados por la relación de esfuerzos y deformaciones de los suelos que las soportan. La determinación de los valores en las relaciones esfuerzo – deformación de los suelos, usualmente se llevan a cabo en el ensayo de compresión triaxial.

La deformación de suelos granulares depende de la distorsión provocada por la deformación y por el deslizamiento entre partículas que ocurre por la misma distorsión, esto genera pequeños movimientos. El comportamiento esfuerzo – deformación de estos suelos se caracterizan por tres etapas:

Cuando se aplica una presión inicial, esta se vuelve mas rígida dando origen a un encaje en el sistema de partículas, cuando se aumenta la presión este sistema colapsa y se genera uno más compacto. Finalmente, el sistema de partículas se comprime y genera fracturas en los puntos de contacto y se da un deslizamiento adicional.

Si se aumenta la carga, las partículas se fracturan y ocurre una fluencia, cuando esta etapa se inicia se perciben chasquidos por el rompimiento de las partículas.

La arena se hace cada vez más rígida cuando las presiones aumentan, la fractura de las partículas hacen el sistema más compacto.

2.5.1 Suelos sin cohesión. Los suelos sin cohesión están formados por granos de forma redondeada o angulosa, las partículas están en contacto entre ellas y desarrollan esfuerzos más altos que el promedio del suelo. Cuando se aumenta el esfuerzo cortante, el sistema reacciona simultáneamente, primero las partículas se desarrollan más o menos elásticamente. También se presenta aplastamientos locales en los puntos de contacto con más altos esfuerzos. Por último, la distorsión y el aplastamiento provocan traslaciones y rotaciones de los granos restantes, variando el tamaño de los vacíos. La deformación del suelo es definido por el vector resultante de estos movimientos.

2.6 ASENTAMIENTOS

Cuando se diseñan cimentaciones es muy importante controlar los asentamientos, para evitar que éstas generen daños debido a los excesos en los límites permitidos. Los suelos deben ser materiales no homogéneos, anisotrópicos y no elásticos. La consideración del módulo de elasticidad en los suelos, implica su aumento con respecto a la profundidad del mismo, ya que aumenta la carga a causa del peso propio, no pasa lo mismo con la relación de Poisson que varía con muchos factores. Aunque muchas veces las distribuciones de esfuerzos se obtienen aplicando la teoría de elasticidad, caso contrario cuando ocurre con los desplazamientos, y aquí entra el método de elementos finitos para calcular

esfuerzos y desplazamientos, ya que permite el modelamiento de suelos en condiciones muy similares a las reales.

2.6.1 Componentes de un asentamiento. El asentamiento total es un proceso que ocurre a lo largo del tiempo y se divide en varias etapas, asentamiento inmediato, asentamiento por consolidación y asentamiento por compresión secundaria.

El asentamiento inmediato ocurre cuando la carga es aplicada, este no es elástico. El asentamiento por consolidación ocurre gracias a la expulsión de agua de los vacíos y por último el asentamiento por compresión secundaria, el cual se inicia cuando se ha disipado la presión de poros y se produce la compresión de suelo. La diferencia entre el asentamiento por consolidación y el asentamiento por compresión secundaria hay que tener en cuenta el proceso físico en relación al tiempo del asentamiento. En los asentamientos por consolidación la razón de tiempo es controlada por la razón de agua expulsada de los vacíos en el suelo, y en los asentamientos por compresión secundaria el tiempo es proporcional a la magnitud de esqueleto que cede por si mismo, se comprime y desliza, después que la presión de poros tiende a cero y el esfuerzo se hace constante.

La respuesta del suelo a la carga aplicada no es lineal, sin embargo la experiencia indica que la escala de tiempo y las magnitudes relativas de las tres componentes puede diferir por órdenes de magnitud

En suelos granulares, los asentamientos ocurren simultáneamente con la aplicación de la carga gracias a la expulsión de agua de manera instantánea, es muy importante en estos suelos la componente de asentamientos inmediatos.

2.6.2 Asentamientos inmediatos de cimentación sobre suelos cohesivos. El peso de la estructura produce además de la compresión sobre el subsuelo, también una deformación lateral. Por tanto una fracción del asentamiento se puede considerar como acortamiento vertical debido a la disminución del volumen, y la fracción restante será un acortamiento adicional producido por una deformación lateral.

Ahora bien, en suelos cohesivos el asentamiento inmediato se determina con la teoría de elasticidad lineal, los perfiles son simplificados. Si el espesor del estrato superior es grande con respecto a las demás dimensiones, el asentamiento inmediato en la superficie del suelo puede ser obtenido como si el suelo fuera homogéneo e isotrópico con una profundidad infinita, o sea, solo son necesarios el

modulo de elasticidad y la relación de Poisson. Y si el estrato superior es delgado, se debe considerar el efecto de estratificación.

En los suelos no estratificados, si el subsuelo es perfectamente elástico y homogéneo, el asentamiento debido a la deformación lateral será considerablemente mayor que el producido por la disminución de volumen. Debe distinguirse entre las cargas sobre arcillas y las cargas sobre arenas. En las cargas sobre arcillas, el asentamiento debido a la deformación lateral es pequeño con respecto al asentamiento total. Por el contrario cuando la cimentación descansa sobre limos o arenas, la segunda parte del asentamiento es mucho mayor que la primera.

Muchos suelos son profundos y no homogéneos, no estratificados. Cuando la dimensión menor del área cargada es igual o mayor al espesor del estrato de cimentación, se tiene en cuenta la estratificación. Esto es importante en suelos compuestos por un estrato blando sobre roca o estrato de suelo duro. Se puede aproximar a una capa delgada de material elástico sobre una base rígida, son importantes la forma del área cargada y el espesor del estrato compresible relacionado con el ancho del área cargada.

2.6.3 Asentamientos inmediatos en suelos granulares. Los asentamientos de suelos granulares pueden ser considerados inmediatos, por que el exceso de presión de poros es disipado rápidamente mientras se aplica la carga, incluidos los suelos saturados que están por debajo del nivel freático. Son determinantes la relación de esfuerzos y deformaciones.

A cierta profundidad debajo de la superficie de la arena, la presión de confinamiento es proporcional a la presión efectiva producida en la superficie, ahora, si el nivel freático sube de una profundidad mayor que la magnitud de la base del asentamiento, debajo de la cota de fundación, hasta alcanzar la superficie de arena, la presión de confinamiento disminuye más o menos hasta la mitad, o sea, que el asentamiento se duplica.

2.7 RESISTENCIA EFECTIVA APROXIMADA CON SPT

El procedimiento para obtener ϕ' y c' con SPT es el siguiente:

a) Obtener el valor N en campo, con una profundidad respectiva e identificar al tipo de suelo en el cual se hizo el ensayo.

- b) Colocar al ensayo la profundidad media entre las dos lecturas de golpes que se usen.
- c) Obtener o estimar el valor del peso unitario total de la muestra, preferiblemente en el sitio. Esta se puede obtener de la muestra de la cuchara pérdida, pero corrigiendo el área por la compresión que sufre la muestra al entrar al muestreador.
- d) Obtener lo más fiablemente posible la posición del nivel piezométrico.
- e) Calcular el valor de los esfuerzos totales, la presión de poros y los esfuerzos efectivos para toda la columna de ensayo. Hay que tener en cuenta que el material puede estar saturado y la presión de poros puede ser negativa hasta la altura de capilaridad.
- f) El valor de N_{45} para Colombia se corrige por confinamiento con la formulación de C_n de Seed-Idriss (Marcuson): $C_n = 1 - K * \log R_s$ ($K = 1.41$ para $R_s < 1$; $K = 0.92$ para $R_s \geq 1$), teniendo cuidado que $C_n \leq 2$.
- g) Se obtiene el valor ϕ'_{eq} con la siguiente fórmula: $\phi'_{eq} = 15 + (12.5 \times N_{145})^{0.5}$
- h) Se calcula el valor de $\tau = \sigma' \times \tan(\phi'_{eq})$
- i) Se agrupan los valores τ y σ' por tipos de materiales.
- j) Se hace la regresión τ Vs σ' para cada tipo de material y se obtiene c' y $\tan\phi'$. Si en la regresión resulta $c' < 0$, se obliga a la regresión a pasar por cero.
- k) Se puede obtener ϕ' mínimo de cada material haciendo ϕ' mínimo = ϕ'_{eq} mínimo.
- l) Se colocan los resultados en un diagrama $c' - \tan\phi'$ y si son materiales del mismo origen geológico, los puntos se alinean en forma aproximada.

3. MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El procedimiento de los elementos finitos es más versátil que el enfoque de la energía e incluso es aplicable a problemas para los que no existen principios de energía o aun no se han planteado.

Cada fenómeno en la naturaleza puede ser modelado por alguna ecuación diferencial, que puede ser resuelta por varios métodos para la formulación de las ecuaciones del elemento.

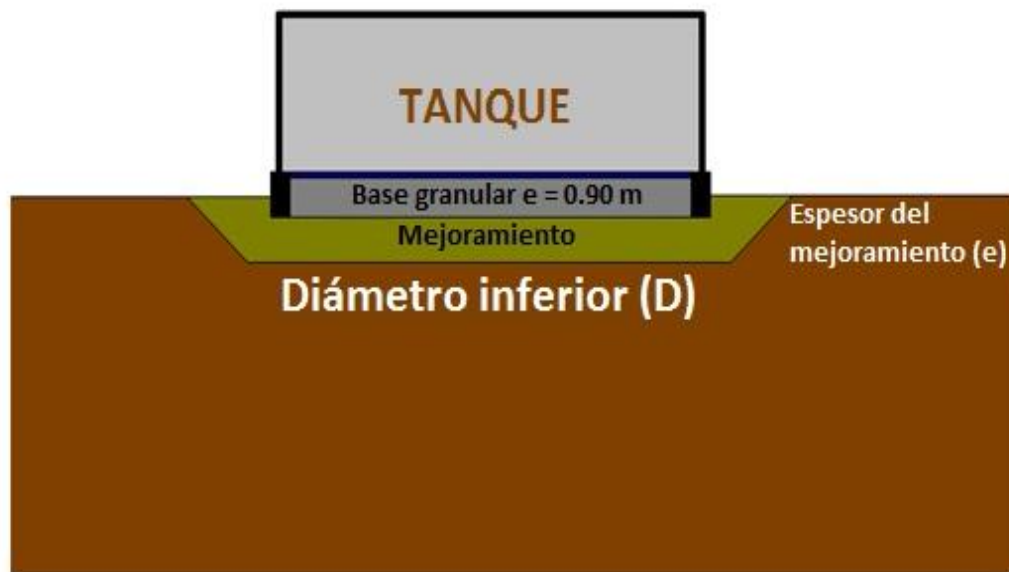
Los sistemas bidimensionales se pueden clasificar en dos tipos: Los que se modelan con ecuaciones que involucran una función escalar de posición en Ω y los que se definen por ecuaciones que involucran funciones vectoriales de posición $u = (u, v)$, en forma de sistemas de ecuaciones acopladas.

Ecuaciones del primer tipo aparecen en la descripción de problemas físicos, como por ejemplo, el flujo en medios porosos. Del segundo tipo son las ecuaciones de fenómenos como la elasticidad plana.

4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Se modeló la cimentación de un tanque de 30 metros de diámetro, 11.6 metros de altura y una capacidad de 8200 toneladas. Este tanque se colocó sobre dos perfiles de suelos diferentes, con fines de comparar su comportamiento en cada uno de ellos.

Figura 1. Tanque a simular en el software



Fuente: Autores del proyecto

4.1 SUELO ARENO – LIMOSO (CASABE – ANTIOQUIA)

4.1.1 Determinación de las características del suelo. En la Tabla 2 se muestran los datos necesarios para generar la gráfica de τ Vs σ' y así encontrar la cohesión (c) y el ángulo de fricción (ϕ) de los estratos de suelo.

Tabla 2 . Datos de entrada suelo areno – limoso suelto (Casabe – Antioquia)

ESTUDIO DE SUELOS

LUGAR: CASABE (ANTIOQUIA)

DESCRIPCIÓN DEL SUELO: SUELO ARENO-LIMOSO SUELTO

Estrato Unificado	N - CAMPO	τ_{sat} (KN/m ²)	τ_{sat} (KN/m ²)	Espesor de estrato (m)	Esfuerzo efectivo (kn/m ²)	Rs	Ca	N corregido	θ Eq (Kiskids)	θ Eq (Kiskids)rad	τ	E (KN/m ²)	Angulo de fricción	Cohesión (KN/m ²)
LIMO ARENOSO GRIS OSCURO	2	17.07	14.715	0.5	8.535	0.087	2	4	22.011	0.3052	3.4607	3744.883	25.43	1
	2	17.07	14.715	0.5	17.07	0.174	2	4	22.071	0.3052	6.3214			
	4	16.35	14.715	0.5	25.545	0.260	1824	7.295	24.543	0.426	11.666			
	7	16.35	14.715	0.5	34.02	0.347	1648	11.538	27.069	0.471	17.341			
	5	16.72	14.715	0.5	42.38	0.432	1514	7.565	24.727	0.432	18.577			
	5	16.72	14.715	0.5	50.74	0.517	1404	7.018	24.366	0.425	22.380			
	5	16.35	14.715	0.5	58.915	0.601	1312	6.560	24.056	0.420	26.293			
	6	16.35	14.715	0.5	67.09	0.684	1232	7.395	24.614	0.430	30.737			
8	16.1	14.715	0.5	75.14	0.766	1163	8.305	25.785	0.450	36.293				
LIMO GRIS OSCURO CON RESIDUOS DE MADERA	6	16.24	14.715	0.5	83.26	0.849	1100	6.602	24.084	0.420	37.216	6476.182	24.63	1
	8	16.24	14.715	0.5	91.38	0.932	1043	6.346	25.214	0.440	43.028			
	11	16.24	14.715	0.5	99.5	1.015	994	6.036	26.632	0.466	50.026			
	7	16.42	14.715	0.5	107.71	1.098	943	5.738	24.177	0.422	48.355			
	3	16.42	14.715	0.5	115.92	1.182	893	5.439	25.246	0.441	54.662			
	8	16.45	14.715	0.5	124.145	1.266	846	5.146	24.577	0.428	56.822			
	7	16.45	14.715	0.5	132.37	1.350	800	4.851	23.776	0.415	58.315			
	7	16.64	14.715	0.5	140.63	1.433	756	4.561	23.654	0.413	61.823			
	9	16.64	14.715	0.5	148.91	1.519	714	4.274	24.680	0.431	66.473			
	9	16.85	14.715	0.5	157.235	1.604	674	4.001	24.953	0.429	71.876			
12	16.85	14.715	0.5	165.66	1.689	636	3.731	25.889	0.452	80.402				
LIMO ARENOSO GRIS OSCURO	23	16.72	14.715	0.5	174.02	1.774	600	3.466	23.887	0.522	100.013	15703	27.6	4.75
	16	16.72	14.715	0.5	182.38	1.860	572	3.204	27.265	0.476	33.931			
	21	16.63	14.715	0.5	190.635	1.944	546	2.944	28.884	0.504	105.198			
	22	16.63	14.715	1	207.325	2.114	520	2.684	28.883	0.504	114.371			
LIMO ARENOSO GRIS OSCURO	12	16.53	14.715	0.5	215.59	2.198	496	2.423	25.153	0.433	101.167	16117.750	23.74	15.1
	19	16.53	14.715	0.5	223.855	2.283	470	2.161	27.617	0.482	117.112			
	20	16.55	14.715	0.5	232.13	2.367	446	1.901	27.804	0.485	122.408			
	19	16.55	14.715	0.5	240.405	2.451	422	1.642	27.346	0.477	124.325			
	18	16.36	14.715	0.5	248.685	2.535	400	1.382	26.886	0.463	126.190			
	16	16.36	14.715	0.5	257.065	2.620	378	1.122	26.086	0.455	126.004			
	16	16.86	14.715	0.5	265.345	2.704	358	0.862	25.363	0.453	123.461			
	17	16.86	14.715	0.5	274.225	2.789	338	0.602	26.189	0.457	134.870			
ARENA LIMOSA FINA	24	17.16	14.715	0.5	282.805	2.884	318	0.342	28.155	0.491	151.353	24703.50	28.2	1
	21	17.16	14.715	0.5	291.385	2.971	298	0.082	27.177	0.474	143.606			
	23	17.16	14.715	0.5	299.965	3.059	278	0.182	27.613	0.482	156.302			
	24	17.16	14.715	0.5	308.545	3.146	258	0.382	27.752	0.484	162.947			
	23	17.27	14.715	0.5	317.18	3.234	238	0.582	28.874	0.504	174.906			
	28	17.27	14.715	0.5	325.815	3.322	218	0.782	28.434	0.497	176.862			
	28	17.27	14.715	0.5	334.45	3.410	198	0.982	28.358	0.495	180.521			
	32	17.27	14.715	0.5	343.085	3.498	178	1.182	29.137	0.509	191.250			
	32	17.19	14.715	0.5	351.68	3.586	158	1.382	28.387	0.506	194.912			
	30	17.19	14.715	0.5	360.275	3.674	138	1.582	28.418	0.496	194.346			
	33	17.19	14.715	0.5	368.87	3.761	118	1.782	28.394	0.505	203.914			
	29	17.19	14.715	0.5	377.465	3.849	98	1.982	27.354	0.488	200.144			
	40	17.22	14.715	0.5	386.075	3.937	78	2.182	30.041	0.524	223.271			
	45	17.22	14.715	0.5	394.685	4.025	58	2.382	30.797	0.538	235.256			
	47	17.43	14.715	0.5	403.4	4.113	38	2.582	30.385	0.541	242.245			
	51	17.43	14.715	0.5	412.115	4.202	18	2.782	31.687	0.550	252.418			

En la figuras 2, 3 4 y 5 se ubican los valores los valores de τ y σ' de los diferentes estratos del suelo, con estos datos se realizó una regresión lineal y así obtener la ecuación de la recta y por tanto la cohesión del terreno así como el ángulo de fricción del mismo.

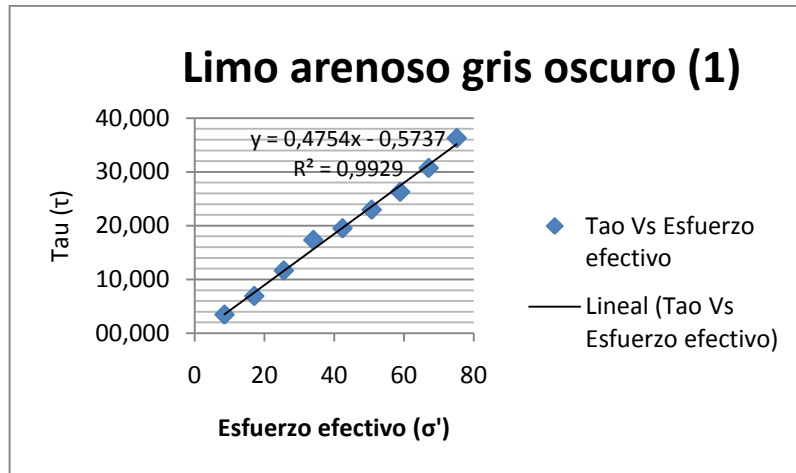


Figura 2. Grafica τ Vs σ' suelo areno – limoso suelto [limo gris oscuro (1)]

De la figura anterior se obtuvo la cohesión y el ángulo de fricción del estrato:

$$\phi = 25.43^\circ$$

$$C = 1 \text{ KN/m}^2$$

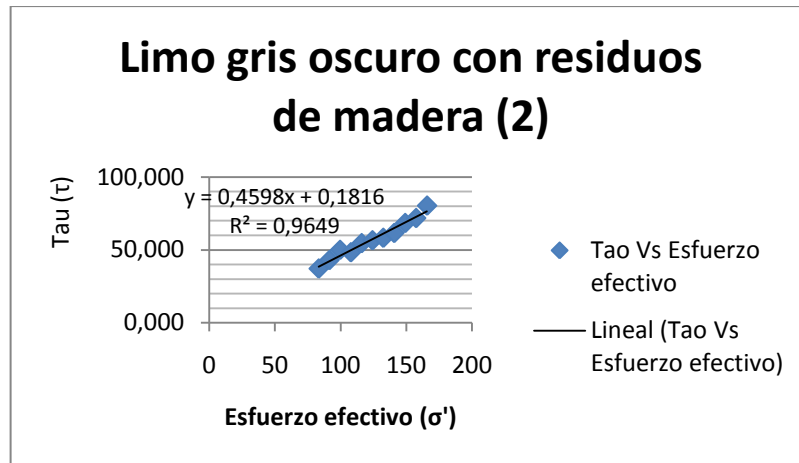


Figura 3. Grafica τ Vs σ' suelo areno – limoso suelto [limo gris oscuro con residuos de madera (2)]

e la figura anterior se obtuvo la cohesión y el ángulo de fricción del estrato:

$$\phi = 24.69^\circ$$

$$C = 1 \text{ KN/m}^2$$

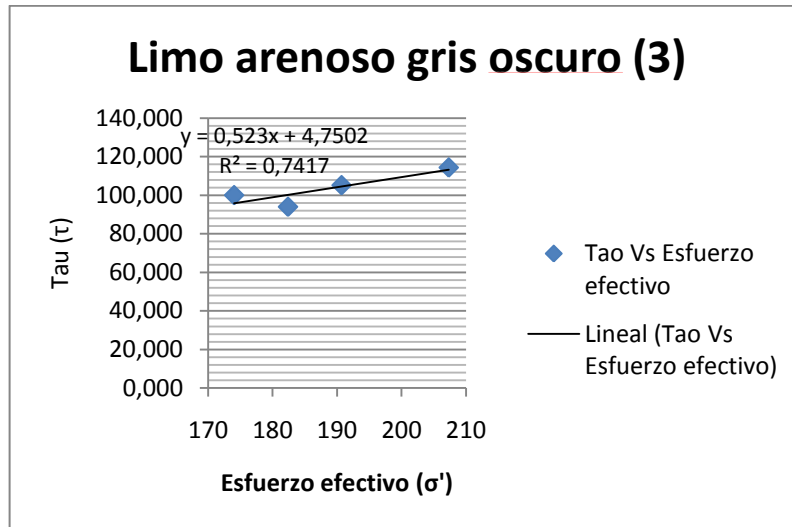


Figura 4. Grafica τ Vs σ' suelo areno – limoso suelto [limo gris oscuro (3)]

De la figura anterior se obtuvo la cohesión y el ángulo de fricción del estrato:

$$\phi = 27.60^\circ$$

$$C = 4.75 \text{ KN/m}^2$$

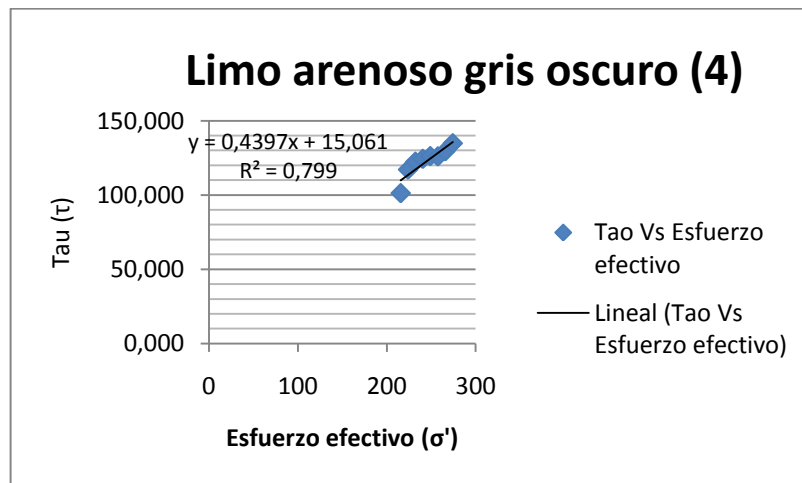


Figura 5. Grafica τ Vs σ' suelo areno – limoso suelto [limo arenoso gris oscuro (4)]

De la figura anterior se obtuvo la cohesión y el ángulo de fricción del estrato:

$$\phi = 23.74^\circ$$

$$C = 15.10 \text{ KN/m}^2$$

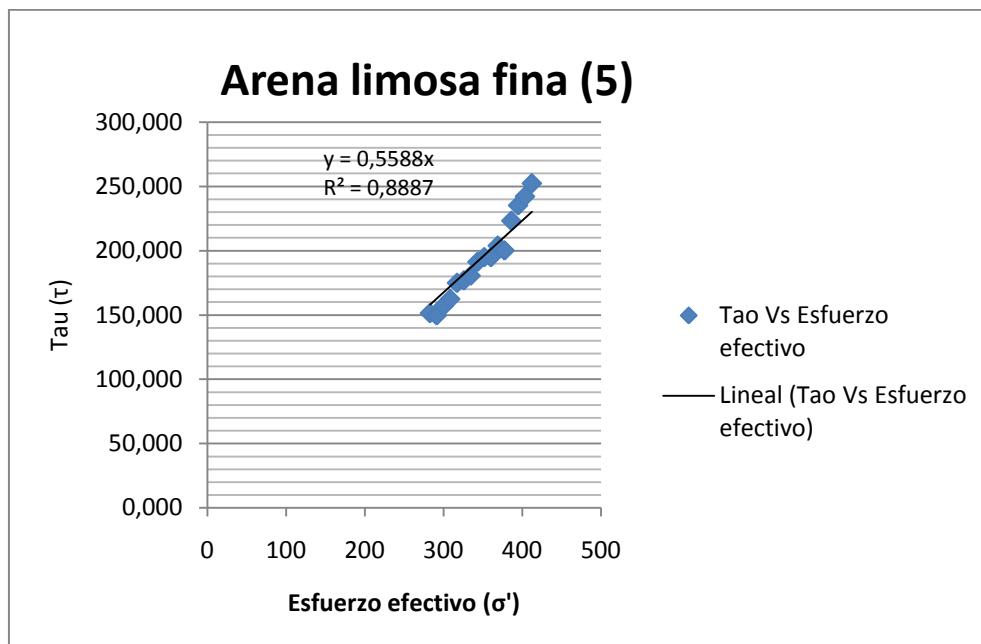


Figura 6. Grafica τ Vs σ' suelo areno – limoso suelto [arena limosa fina (5)]

De la figura anterior se obtuvo la cohesión y el ángulo de fricción del estrato:

$$\phi = 23.2^\circ$$

$$C = 1 \text{ KN/m}^2$$

4.1.2 Modelos analizados. Se modela el mismo tanque sobre terreno suelo areno – limoso suelto y terreno granular de consistencia media a compacta planteando varias opciones de cimentación superficial flexible, como, mejoramiento del terreno con material de remplazo más resistente, tipo sub-base granular con varias dimensiones y diámetros; igualmente la colocación de un terraplén sobre la superficie del terreno.

4.1.2.1 Sin mejoramiento del suelo. En este caso el tanque será soportado sobre una viga anular de sección 0.9 x 0.5 y se aplicará una base granular con espesor de 0.90 m.

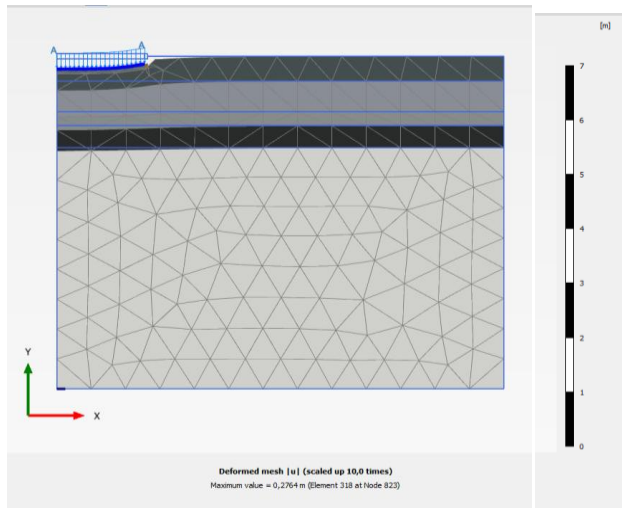


Figura 7. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo arena – limoso suelto, sin mejoramiento del suelo)

Después de aplicada la carga se observa un desplazamiento vertical de 27.64 cm.

4.1.2.2 Con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 36$ m. Ahora se usará aparte de la viga anular y la base granular un mejoramiento del terreno compuesto por una sub-base granular de espesor de dos veces la altura de la viga anular, o sea, 1.80 m, y un diámetro inferior del mejoramiento de 36 m.

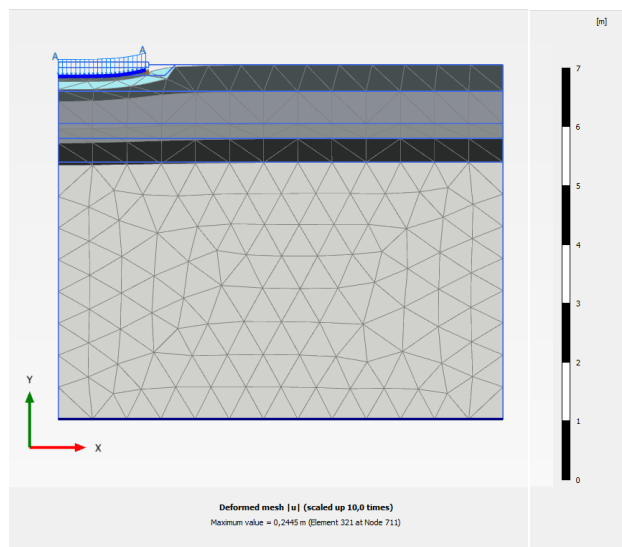


Figura 8. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 36$ m)

Después de aplicada la carga se observa un desplazamiento vertical de 24.45 cm.

4.1.2.3 Con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 36$. En esta ocasión además de la viga anular, la base granular y el mejoramiento con sub-base granular, se construirá un terraplén sobre la superficie del terreno para cimentar el tanque de almacenamiento.

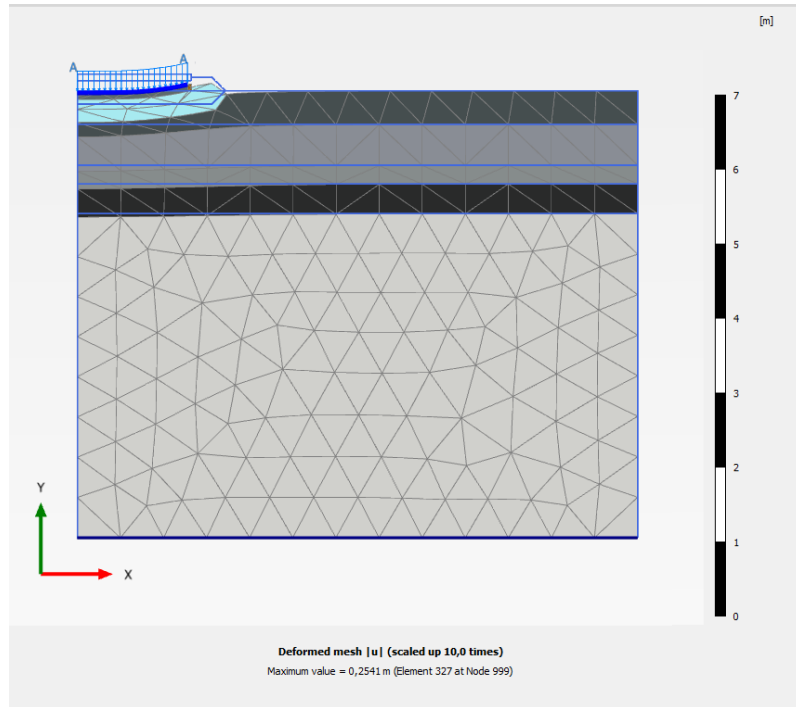


Figura 9. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 36$ m)

Después de aplicada la carga se observa un desplazamiento vertical de 25.41 cm.

4.1.2.4 Con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 42$ m. Ahora para cimentar el tanque se usará una viga anular con la misma sección que el caso anterior, al igual que una base granular y un mejoramiento del terreno de 1.80 m de espesor y diámetro inferior de 42 m.

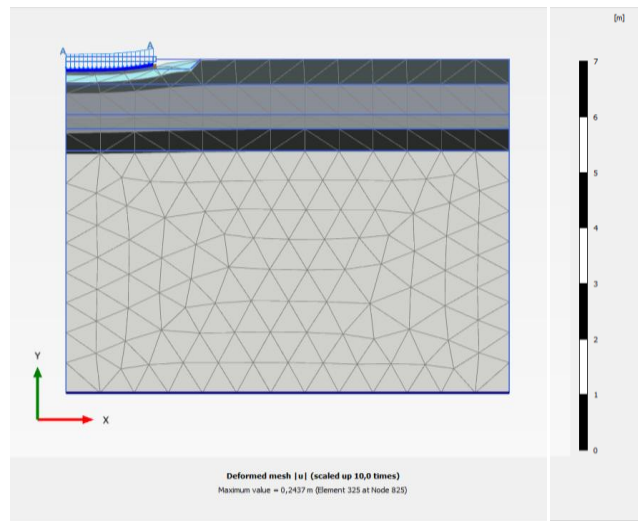


Figura 10. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 42$ m)

Después de aplicada la carga se observa un desplazamiento vertical de 24.37 cm.

4.1.2.5 Con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 42$ m. En esta ocasión se modelará el tanque de almacenamiento cimentado sobre una viga anular, la base granular, el mejoramiento con sub-base granular y un terraplén sobre la superficie del terreno.

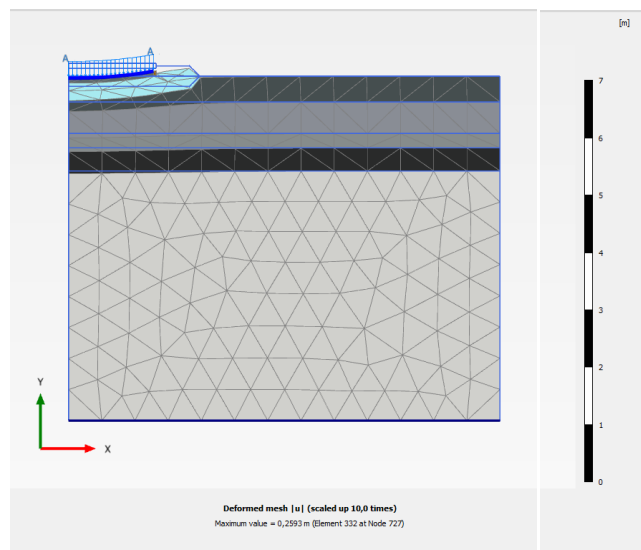


Figura 11. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 42$ m)

Después de aplicada la carga se observa un desplazamiento vertical de 25.93 cm.

4.1.2.6 Con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 48$ m. Ahora para cimentar el tanque se usará una viga anular, al igual que una base granular y un mejoramiento del terreno de 1.80 m de espesor y diámetro inferior de 48 m.

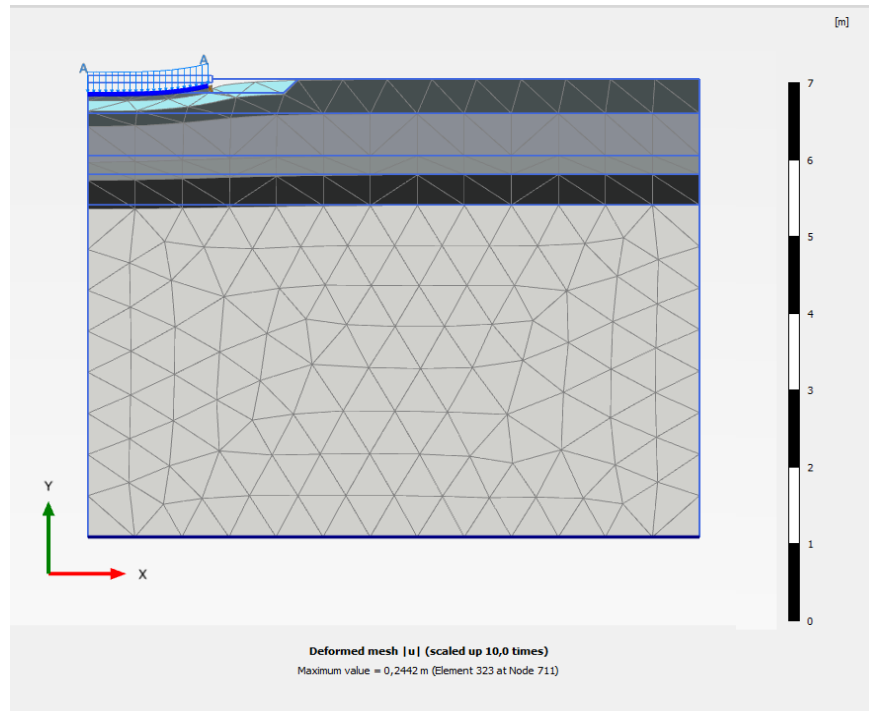


Figura 12. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo areno – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 48$ m)

Después de aplicada la carga se observa un desplazamiento vertical de 24.42 cm.

4.1.2.7 Con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 48$ m. En esta ocasión se modelará el tanque de almacenamiento cimentado sobre una viga anular, la base granular, el mejoramiento con sub-base granular y un terraplén sobre la superficie del terreno.

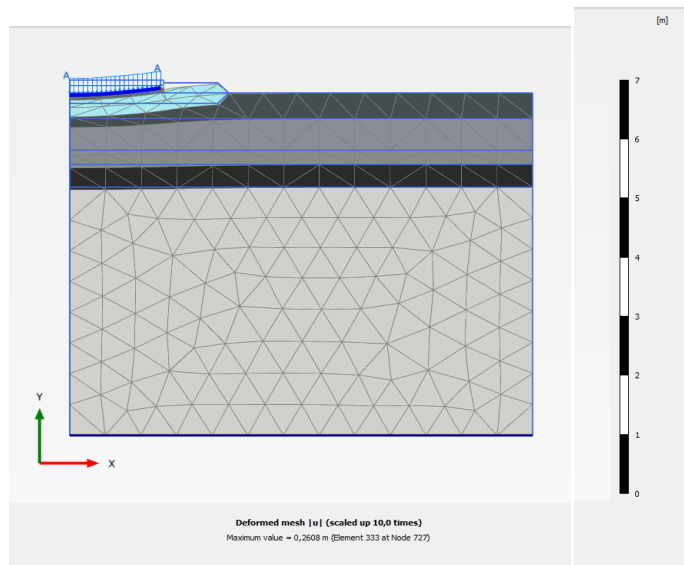


Figura 13. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 48$ m)

Después de aplicada la carga se observa un desplazamiento vertical de 26.08 cm.

4.1.2.8 Con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 36$ m. Ahora para cimentar el tanque se usará una viga anular, al igual que una base granular y un mejoramiento del terreno de 2.70 m de espesor y diámetro inferior de 36 m.

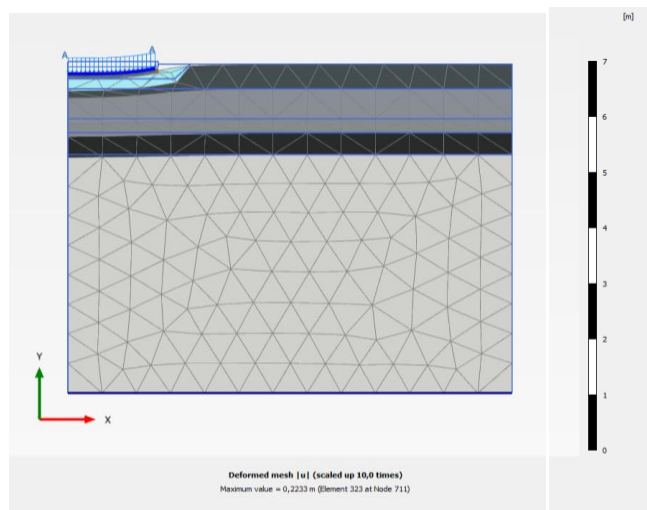


Figura 14. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 36$ m)

Después de aplicada la carga se observa un desplazamiento vertical de 22.33 cm.

4.1.2.9 Con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 36$ m. En esta ocasión se modelará el tanque de almacenamiento cimentado sobre una viga anular, la base granular, el mejoramiento con sub-base granular y un terraplén sobre la superficie del terreno.

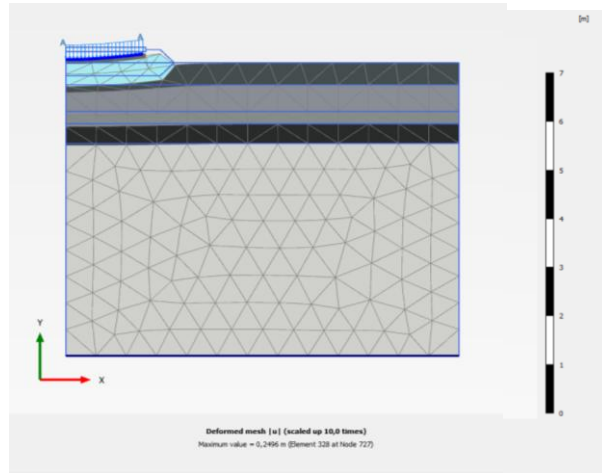


Figura 15. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 36$ m)

Después de aplicada la carga se observa un desplazamiento vertical de 24.96 cm.

4.1.2.10 Con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 42$ m . Ahora para cimentar el tanque se usará una viga anular, al igual que una base granular y un mejoramiento del terreno de 2.70 m de espesor y diámetro inferior de 42 m.

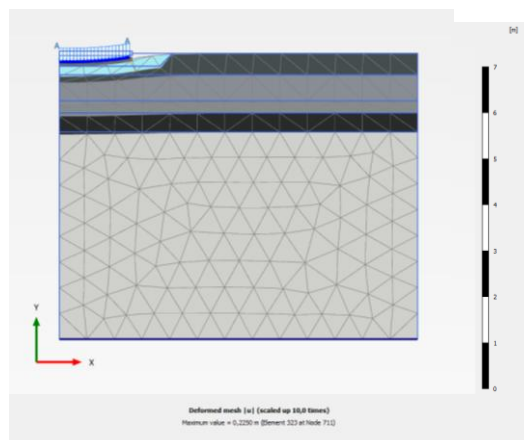


Figura 16. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 42$ m)

Después de aplicada la carga se observa un desplazamiento vertical de 22.50 cm.

4.1.2.11 Con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 42$ m . En esta ocasión se modelará el tanque de almacenamiento cimentado sobre una viga anular, la base granular, el mejoramiento con sub-base granular y un terraplén sobre la superficie del terreno.

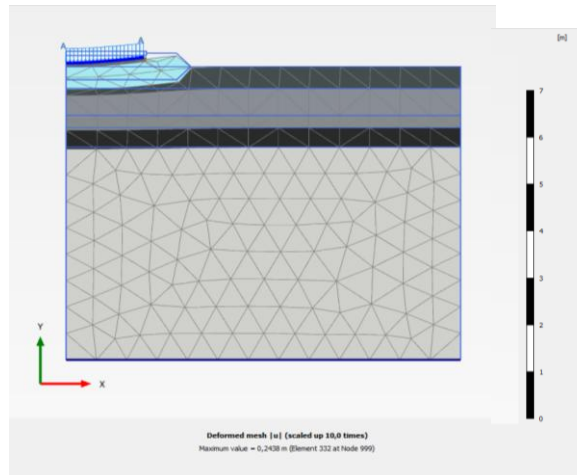


Figura 17. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 42$ m)

Después de aplicada la carga se observa un desplazamiento vertical de 24.38 cm.

4.1.2.12 Con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 48$ m . Ahora para cimentar el tanque se usará una viga anular, al igual que una base granular y un mejoramiento del terreno de 2.70 m de espesor y diámetro inferior de 48 m.

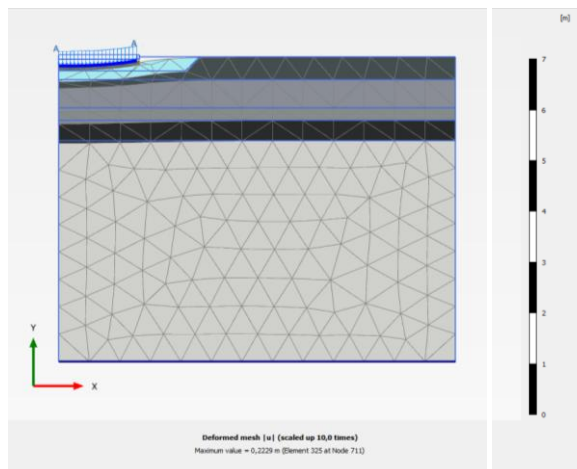


Figura 18. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 48$ m)

Después de aplicada la carga se observa un desplazamiento vertical de 22.29 cm.

4.1.2.13 Con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 48$ m. En esta ocasión se modelará el tanque de almacenamiento cimentado sobre una viga anular, la base granular, el mejoramiento con sub-base granular y un terraplén sobre la superficie del terreno.

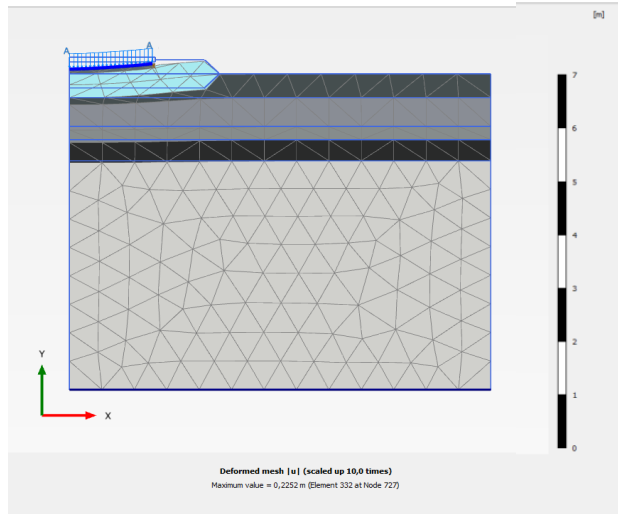


Figura 19. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo areno – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 48$ m)

Después de aplicada la carga se observa un desplazamiento vertical de 22.52 cm.

4.2 SUELO GRANULAR DE CONSISTENCIA MEDIA A COMPACTA (BANADIA, SARAVERA – ARAUCA)

4.2.1 Determinación de las características del suelo . En la Tabla 3 se muestran los datos necesarios para generar la grafica de τ Vs σ' y así encontrar la cohesión (c) y el ángulo de fricción (ϕ) de los diferentes estratos del suelo.

Tabla 3. Datos de entrada suelo granular de consistencia media a compacta (Banadia, Saravena – Arauca)

ESTUDIO DE SUELOS

LUGAR: BANADIA (SARAVENA - ARAUCA)

DESCRIPCIÓN DEL SUELO: SUELO GRANULAR DE CONSISTENCIA MEDIA A COMPACTA

Estrato Unificado	N - CAMPO	Tsat (KN/m ²)	Tunsat (KN/m ²)	Espesor de estrato (m)	Esfuerzo efectivo (kn/m ²)	Rs	Cn	N corregido	Ø Eq (Kishida)	ØEq (Kishida)rad	τ	E (KN/m ²)	Ángulo de fricción	Cohesión (KN/m ²)
LIMO ARENOSO DE BAJA PLASTICIDAD CONSISTENCIA MEDIO FIRME COLOR HABANO AMARILLENTO	11	18.84	17.168	0.7	13.188	0.134	2	22	31.583	0.551	8.108	6894	27.04	1
	6	19.56	17.168	0.8	28.836	0.294	1.750	10.497	26.455	0.462	14.348			
	10	19.11	17.168	1.5	57.501	0.586	1.327	13.269	27.879	0.487	30.418			
ARENA LIMOSA POBREMENTE GRADADA DE HUMEDAD ALTA MEDIANAMENTE DENSO COLOR HABANO AMARILLENTO	28	18.91	17.168	2	95.321	0.972	1.017	26.453	33.184	0.579	62.338	16392.4	25.93	12.5
	24	18.85	17.168	2	133.021	1.356	0.878	21.077	31.232	0.545	80.660			
	15	18.49	17.168	1	151.511	1.545	0.826	12.393	27.446	0.479	78.692			
	16	19.37	17.168	1	170.881	1.742	0.778	12.450	27.475	0.480	88.860			
	26	18.96	17.168	2	208.801	2.129	0.698	18.150	30.062	0.525	120.854			
ARENA LIMOSA PRESENTA GRAYAS CON TAMAÑOS HASTA DE 1" DE HUMEDAD MODERADA DENSO COLOR GRIS OSCURO	32	18.86	17.168	2	246.521	2.514	0.632	20.215	30.896	0.539	147.516	27959	27.64	13.8
	34	18.8	17.168	2	284.121	2.897	0.575	19.550	30.632	0.535	168.245			
	31	18.8	17.168	2	321.721	3.281	0.525	16.285	29.268	0.511	180.303			
	31	19.53	17.168	2	360.781	3.679	0.480	14.866	28.632	0.500	196.964			
	34	19.53	17.168	4	438.901	4.475	0.401	13.642	28.059	0.490	233.943			
	57	19.45	17.168	7.7	588.666	6.003	0.284	16.184	29.223	0.510	329.309			

En las figuras 20, 21 y 22 se ubican los valores los valores de τ y σ' de los diferentes estratos del suelo, con estos datos se realizó una regresión lineal y así obtener la ecuación de la recta y por tanto la cohesión del terreno así como el ángulo de fricción de los mismos.

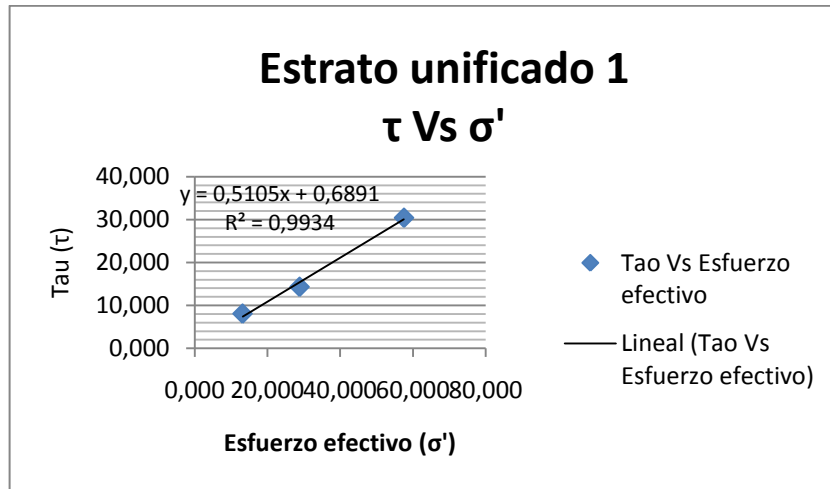


Figura 20 . Grafica τ Vs σ' suelo granular de consistencia media a compacta (Estrato 1)

De la figura anterior se obtuvo la cohesión y el ángulo de fricción del terreno:

$$\phi = 27.04^\circ$$

$$C = 1 \text{ KN/m}^2$$

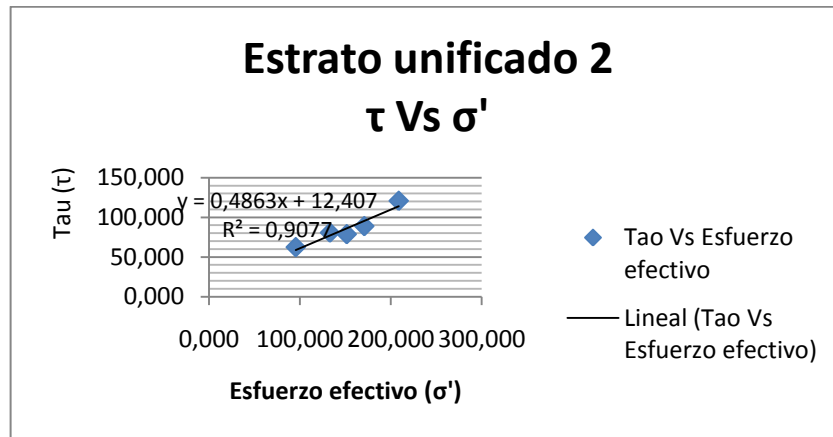


Figura 21. Grafica τ Vs σ' suelo granular de consistencia media a compacta (Estrato 2)

De la figura anterior se obtuvo la cohesión y el ángulo de fricción del terreno:

$$\phi = 25.93^\circ$$

$$C = 12.5 \text{ KN/m}^2$$

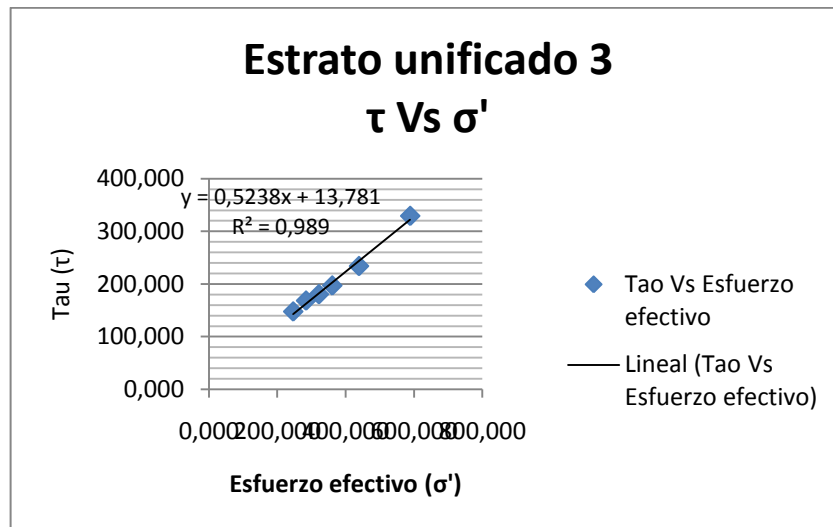


Figura 22. Grafica τ Vs σ' suelo granular de consistencia media a compacta (Estrato 2)

De la figura anterior se obtuvo la cohesión y el ángulo de fricción del terreno:

$$\phi = 27.64^\circ$$

$$C = 13.8 \text{ KN/m}^2$$

4.2.2 Modelos analizados

4.2.2.1 Sin mejoramiento del suelo. En este caso el tanque será soportado sobre una viga anular de sección 0.9 x 0.5 y se aplicará una base granular con espesor de 0.90 m.

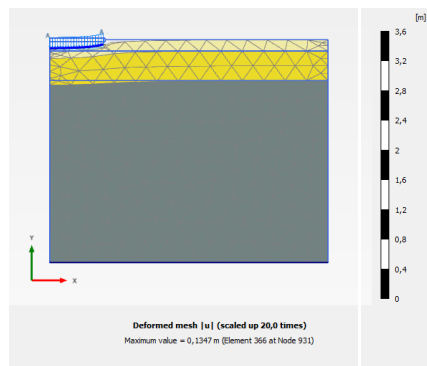


Figura 23. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo granular de consistencia media a compacta, sin mejoramiento del suelo)

Después de aplicada la carga se observa un desplazamiento vertical de 13.47 cm.

4.2.2.2 Con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 36$ m. Ahora se usará aparte de la viga anular y la base granular un mejoramiento del terreno compuesto por una sub-base granular de espesor de dos veces la altura de la viga anular, o sea, 1.80 m, y un diámetro inferior del mejoramiento de 36 m.

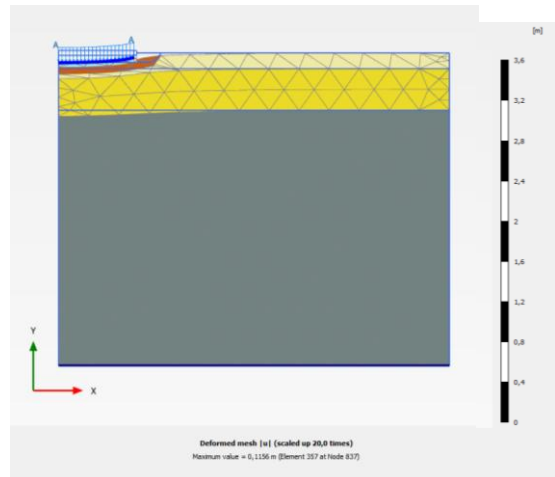


Figura 24. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 36$ m)

Después de aplicada la carga se observa un desplazamiento vertical de 11.56 cm.

4.2.2.3 Con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 42$ m . Ahora para cimentar el tanque se usará una viga anular con la misma sección que el caso anterior, al igual que una base granular y un mejoramiento del terreno de 1.80 m de espesor y diámetro inferior de 42 m.

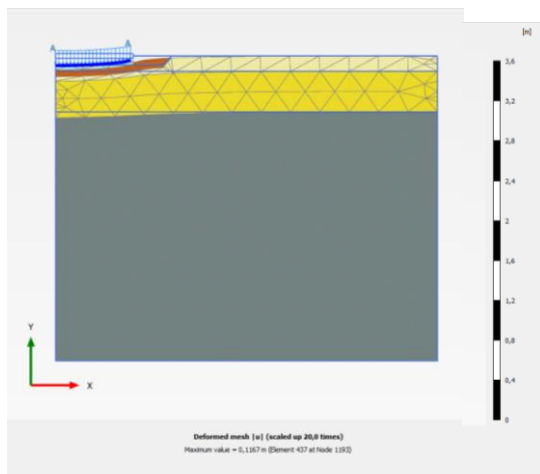


Figura 25. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 42$ m)

Después de aplicada la carga se observa un desplazamiento vertical de 11.67 cm.

4.2.2.4 Con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 48$ m Ahora para cimentar el tanque se usará una viga anular, al igual que una base granular y un mejoramiento del terreno de 1.80 m de espesor y diámetro inferior de 48 m.

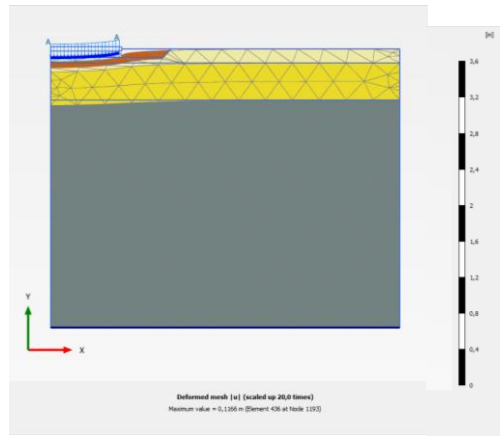


Figura 26. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 48$ m)

Después de aplicada la carga se observa un desplazamiento vertical de 11.66 cm.

4.2.2.5 Con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 36$ m . Ahora se usará aparte de la viga anular y la base granular un mejoramiento del terreno compuesto por una sub-base granular de espesor de dos veces la altura de la viga anular, o sea, 2.70 m, y un diámetro inferior del mejoramiento de 36 m.

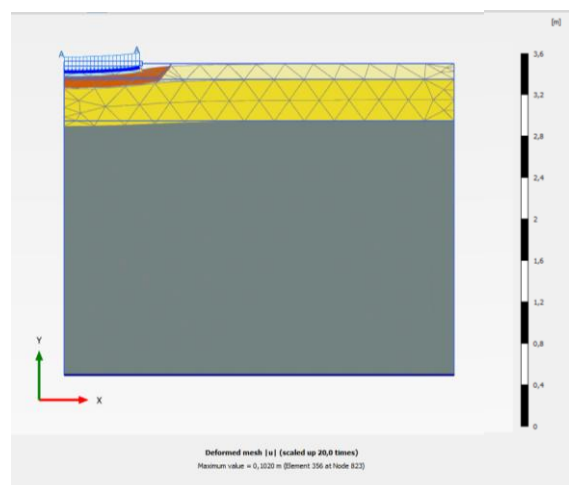


Figura 27. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 36$ m)

Después de aplicada la carga se observa un desplazamiento vertical de 10.20 cm.

4.2.2.6 Con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 42$ m Ahora para cimentar el tanque se usará una viga anular con la misma sección que el caso anterior, al igual que una base granular y un mejoramiento del terreno de 2.70 m de espesor y diámetro inferior de 42 m.

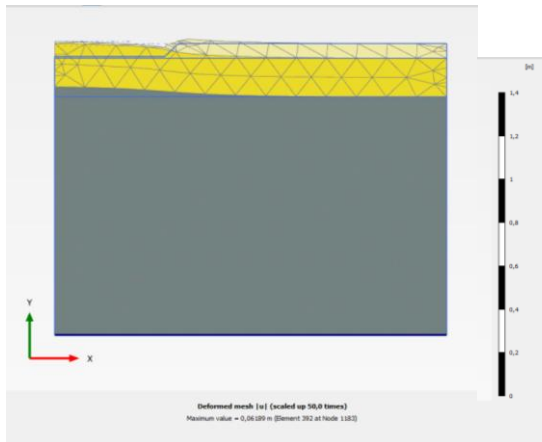


Figura 28. Malla de deformación de la excavación (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 42$ m)

En este caso se presentó una falla en la fase de excavación, por lo que se debió disminuir la pendiente de excavación para instalar el reemplazo de terreno a una relación 2:1.

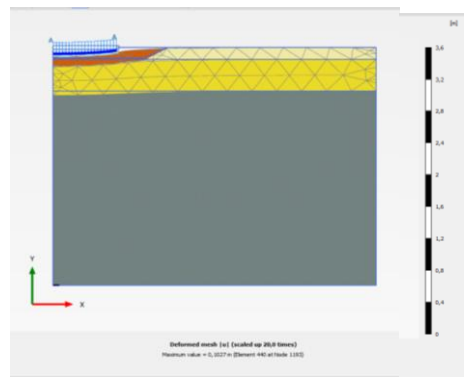


Figura 29. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 42$ m)

Después de aplicada la carga se observa un desplazamiento vertical de 10.27 cm.

4.2.2.7 Con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 48$ m . Ahora para cimentar el tanque se usará una viga anular, al igual que una base granular y un mejoramiento del terreno de 2.70 m de espesor y diámetro inferior de 48 m.

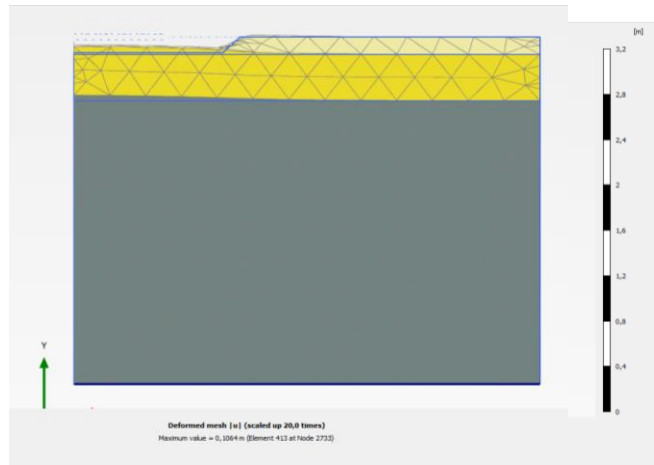


Figura 30. Malla de deformación de la excavación (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 48$ m)

En este caso nuevamente se presentó una falla en la fase de excavación, por lo que se debió disminuir la pendiente de excavación para instalar el reemplazo de terreno a una relación 2:1.

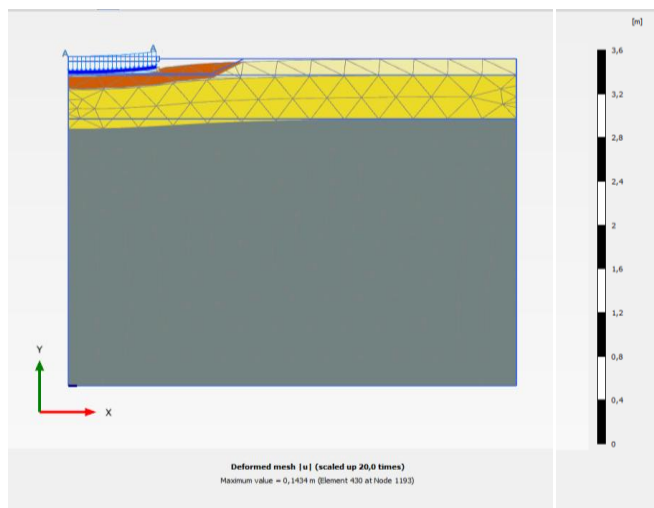


Figura 31. Malla de deformación después de aplicada la carga (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 48$ m)

Después de aplicada la carga se observa un desplazamiento vertical de 14.34 cm.

4.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

TABLA COMPARATIVA DE DESPLAZAMIENTOS VERTICALES DESPUÉS DE APLICADA LA CARGA									
SUELO ARENO - LIMOSO SUELTO					SUELO GRANULAR DE CONSISTENCIA MEDIA A COMPACTA				
SIN MEJORAMIENTO DEL TERRENO	CON MEJORAMIENTO DEL TERRENO					SIN MEJORAMIENTO DEL TERRENO	CON MEJORAMIENTO DEL TERRENO		
	D	e = 1.80 m		e = 2.70 m			D	e = 1.80 m	e = 2.70 m
		SIN TERRAPLÉN	CON TERRAPLÉN	SIN TERRAPLÉN	CON TERRAPLÉN				
27.64 cm	36 m	24.45 cm	25.41 cm	22.33 cm	24.96 cm	13.47 cm	36 m	11.56 cm	10.20 cm
	42 m	24.37 cm	25.93 cm	22.50 cm	24.38 cm		42 m	11.67 cm	10.27 cm
	48 m	24.42 cm	26.08 cm	22.29 cm	22.52 cm		48 m	11.66 cm	14.34 cm

Tabla 4. Tabla comparativa de resultados de desplazamientos después de aplicada la carga

En la figura 31 se muestra la diferencia en el comportamiento de los asentamientos de un suelo areno – limoso suelto y un suelo granular de consistencia media a compacta. El suelo granular de consistencia media a compacta presenta menor asentamiento que el suelo areno – limosos suelto en un 51.27%.

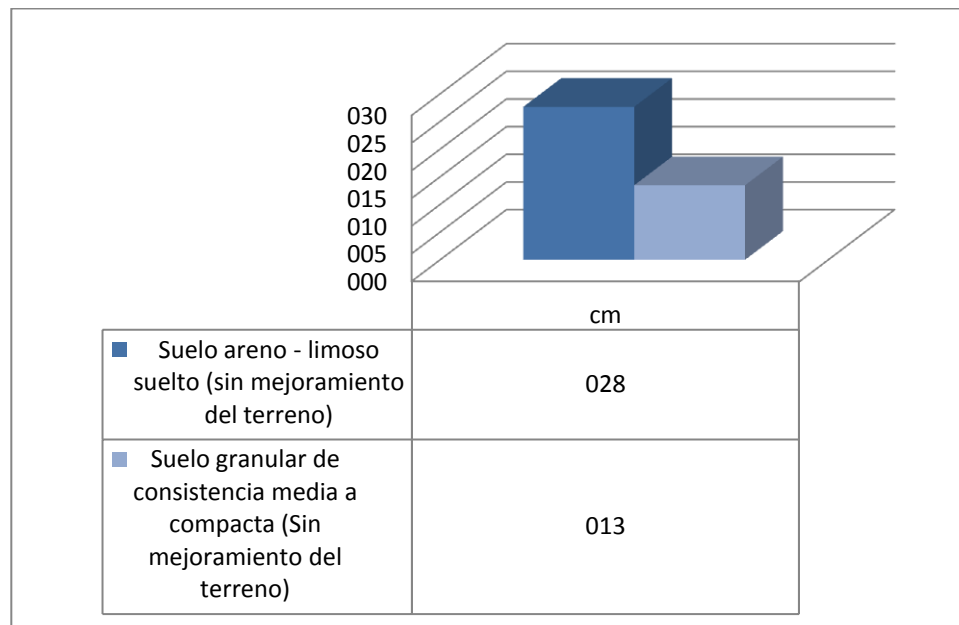


Figura 32. Grafica comparativa entre los asentamientos del suelos areno – limoso suelto y suelo granular de consistencia media a compacta, ambos sin mejoramiento

Cuando se mejora el terreno en un suelo areno – limoso suelto, este presenta asentamientos 9.33% menores, con respecto al que no posee este mejoramiento.

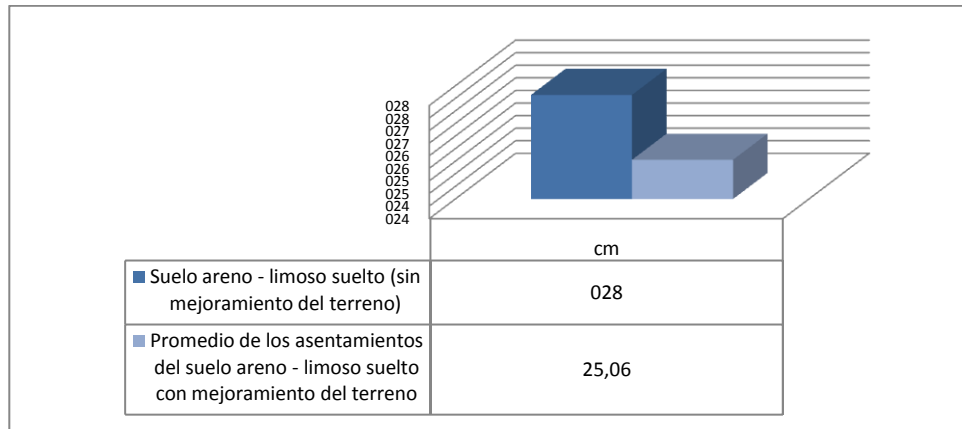


Figura 33. Grafica comparativa entre el asentamiento sin mejoramiento y el promedio de los asentamientos con mejoramiento del terreno del suelo areno – limoso suelto

Durante esta investigación se encontró que el uso de un terraplén sobre la superficie del terreno, no garantiza un mejor comportamiento de los asentamientos. En la figura 33 se muestra que cuando se usa un terraplén en un suelo areno – limoso suelto, los asentamientos de este aumentan un 5.89 % con respecto al que no lo usa.

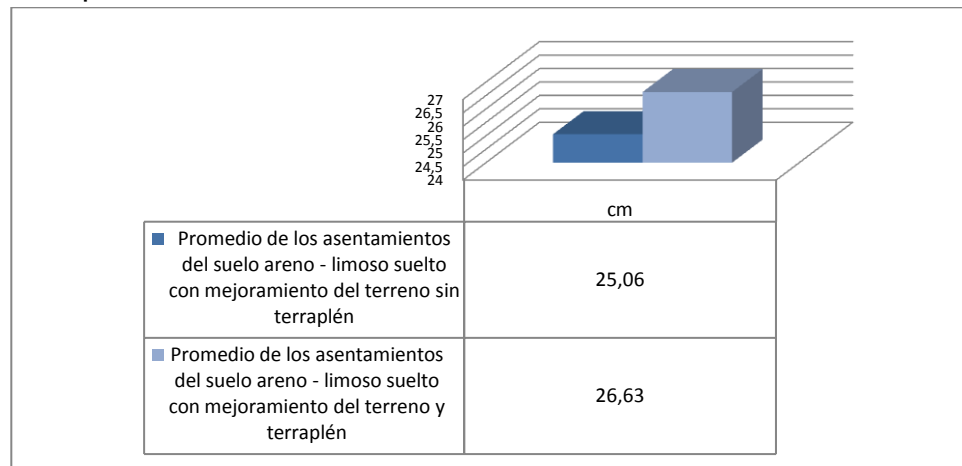


Figura 34. Grafica comparativa entre los asentamientos del suelo areno – limos suelto con mejoramiento de terreno, sin terraplén y con terraplén

El aumento del espesor del mejoramiento del terreno (e) es una buena opción para obtener asentamientos menores. En la figura 34 se observa que los asentamientos disminuyeron un 5.93 % al aumentar el espesor del mejoramiento del terreno de 1.80 a 2.70 en el suelo areno – limoso suelto.

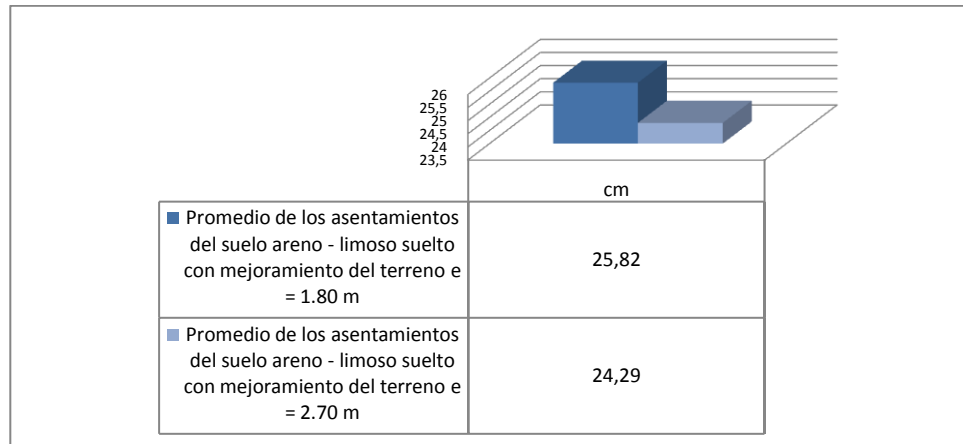


Figura 35. Grafica comparativa entre los asentamientos del suelo areno – limoso suelto con mejoramiento del terreno de e = 1.80 m y e = 2.70 m

El aumentar el diámetro inferior del mejoramiento del terreno (D) no siempre garantiza unos asentamientos menores.

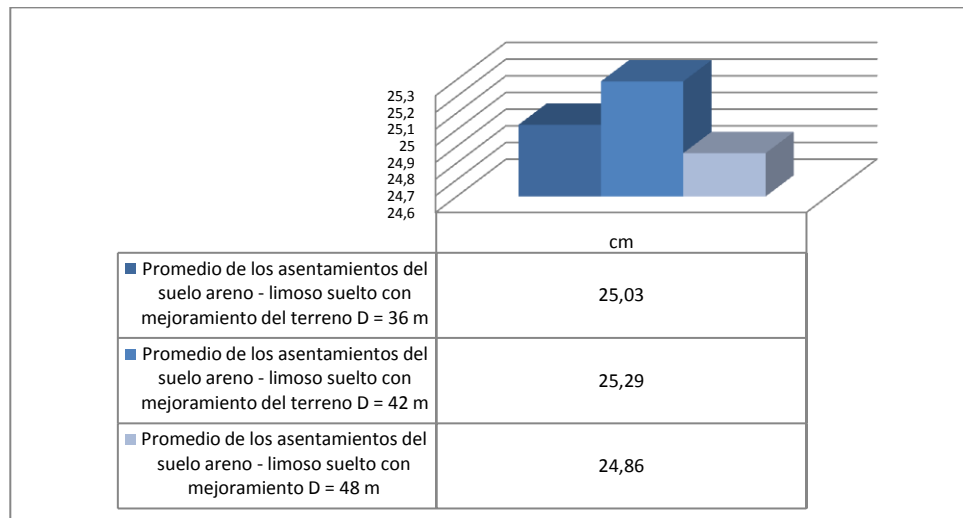


Figura 36. Grafica comparativa entre los asentamientos del suelo areno – limoso suelto con mejoramiento del terreno de D = 36 m, D = 42 m y D = 48 m

Los asentamientos en el suelo granular de consistencia media a compacta disminuyeron un 8.46% al usar mejoramiento en el terreno.

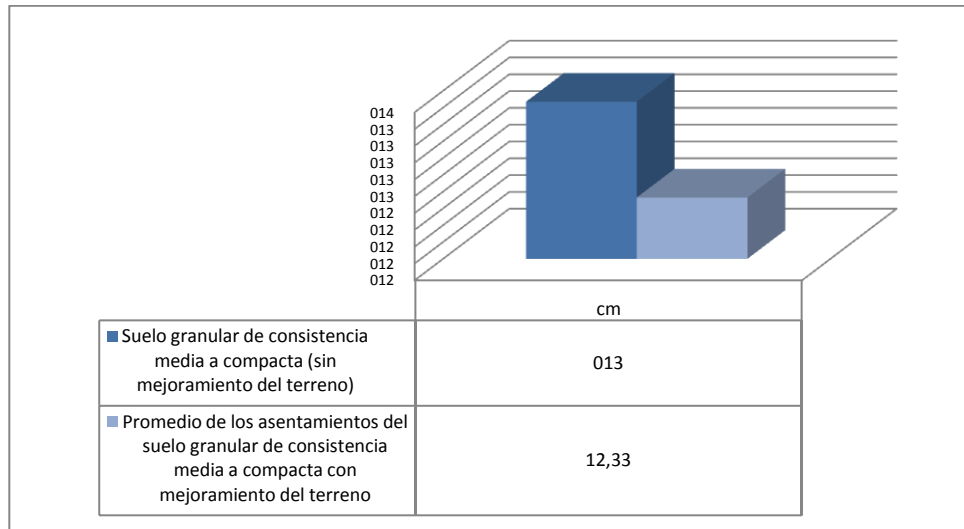


Figura 37. Grafica comparativa entre el asentamiento sin mejoramiento y el promedio de los asentamientos con mejoramiento del terreno del suelo granular de consistencia media a compacta

Cuando se aumenta el espesor del mejoramiento (e) de 1.80 m a 2.70 m en el suelo granular de consistencia media a compacta, los asentamientos disminuyen un 3.2 %.

Figura 38. Grafica comparativa entre los asentamientos del suelo granular de consistencia media a compacta con mejoramiento del terreno de e = 1.80 m y e = 2.70 m

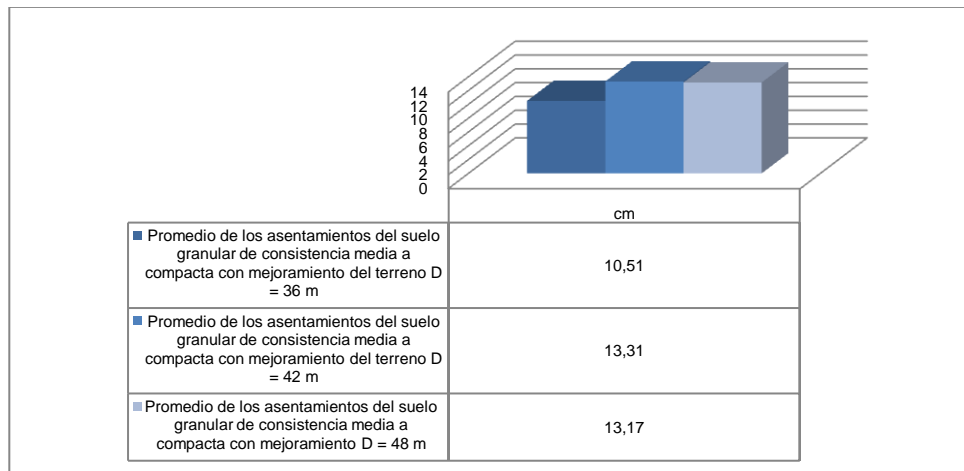


Figura 39. Grafica comparativa entre los asentamientos del suelo granular de consistencia media a compacta con mejoramiento del terreno de D = 36 m, D = 42 m y D = 48

CONCLUSIONES

El éxito del diseño de cimentaciones superficiales, usando un programa computacional, basado en el método de elementos finitos, no solo depende del correcto ingreso de los datos de entrada, también es necesario, tener un buen manejo del software, o sea, tener conocimientos técnicos del mismo.

El programa computacional usado durante la elaboración de este proyecto, se basa en la aplicación del método de elementos finitos, lo que lo hace una herramienta útil a la hora de resolver problemas de ingeniería, en particular situaciones geotécnicas.

Unos correctos datos de entrada que nazcan de un estudio de suelos adecuado, garantizarán la precisión deseada en los resultados.

Observando los resultados obtenidos se evidencia que el uso de un mejoramiento para el terreno es de gran ayuda para disminuir los asentamientos, en esta investigación se obtuvo una disminución de 9.33 % en la magnitud de los asentamientos en el suelo areno – limoso suelto al usar un mejoramiento del terreno, y un 8.46 % en el caso del suelo granular de consistencia media a compacta; pero aumentar el diámetro del mismo no garantiza un mejor comportamiento de la cimentación.

Aumentar el espesor del mejoramiento del terreno (e) garantiza obtener unos asentamientos más bajos, se evidenció que los asentamientos mejoran o disminuyen entre un 3% y 6% cuando se aumenta el espesor de 1.80 m a 2.70 m.

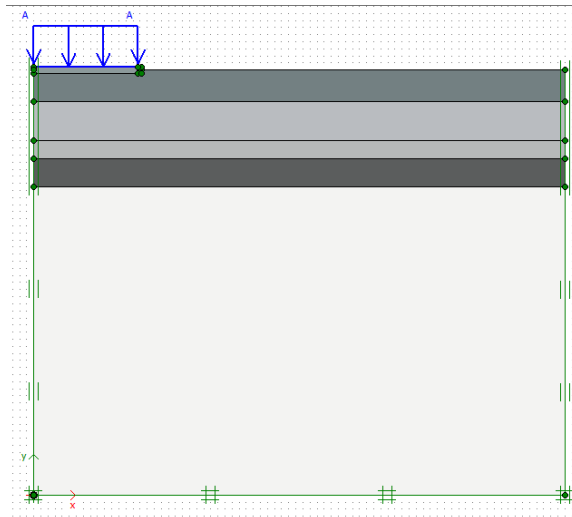
Usar un terraplén construido con el mismo material del reemplazo, no hace que se comporte mejor la cimentación, incluso según los resultados obtenidos a través de los modelamientos en el software usado muestra que los asentamientos obtenidos cuando se usa dicho terraplén son mayores en un 5.89% que los que no lo usan.

BIBLIOGRAFÍA

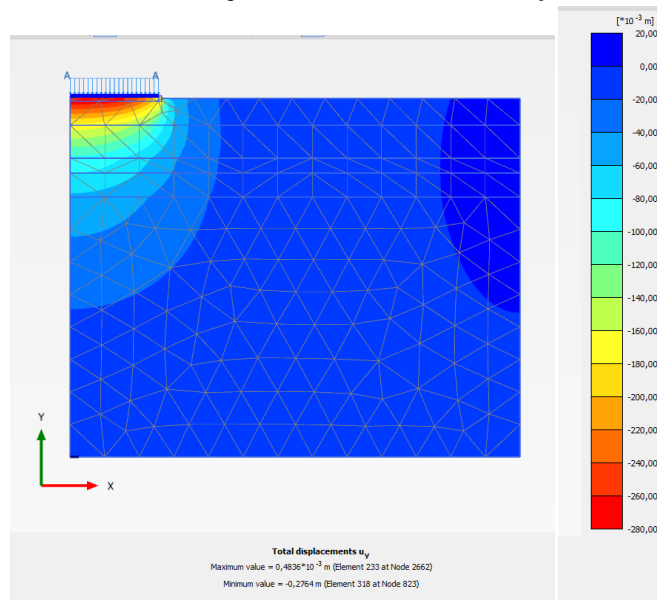
- Acevedo R., Javier E. (2001) ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES APLICANDO EL METODO DE ELEMENTOS FINITOS. Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander.
- BOWLES, Joseph, “Foundation analysis and design”. Nueva York, 1996. Norma NSR – 2010. Bogotá, 2010
- RAJA DAS, “Ingeniería de Cimentaciones”, Ciudad de México, 1996.
- RUIZ VAZQUEZ, Mariano “Geología aplicada a la ingeniería civil” México 2008
- R.B.J Brinkgreve. Manual de Referencia PLAXIS. *Delft University of Technology & PLAXIS b.v., Países Bajos* 2004.

ANEXOS

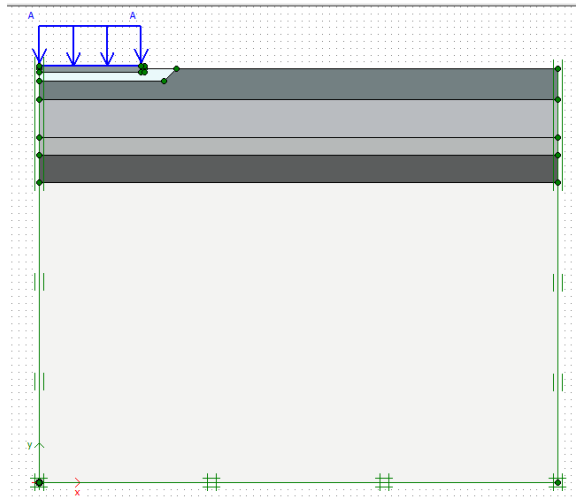
Anexos 1. Geometrías de los modelos analizados en la ventana de entrada y desplazamientos totales U_y



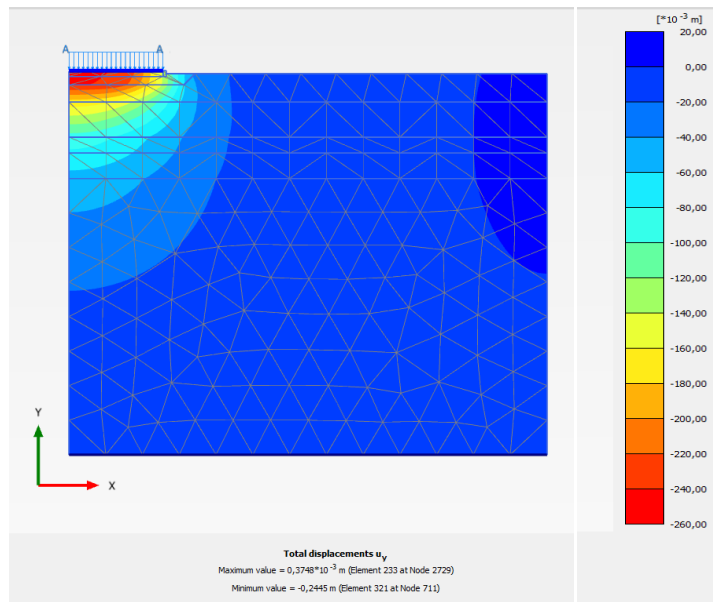
Geometría del modelo en la ventana de entrada (suelo arena – limoso suelto, sin mejoramiento del suelo)



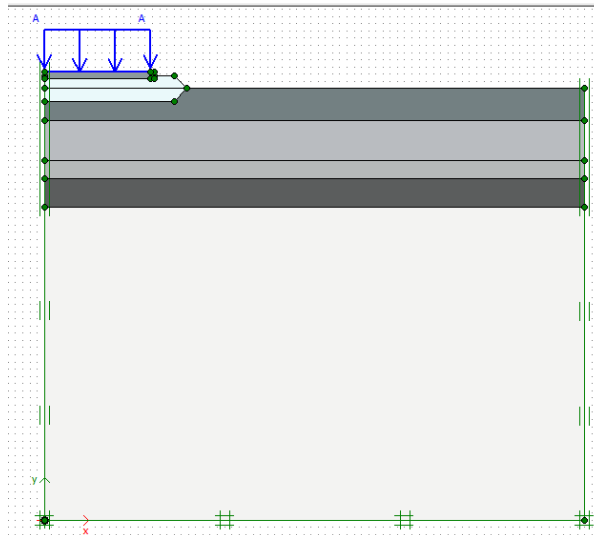
Desplazamientos totales U_y – CARGA (suelo arena – limoso suelto, sin mejoramiento del suelo)



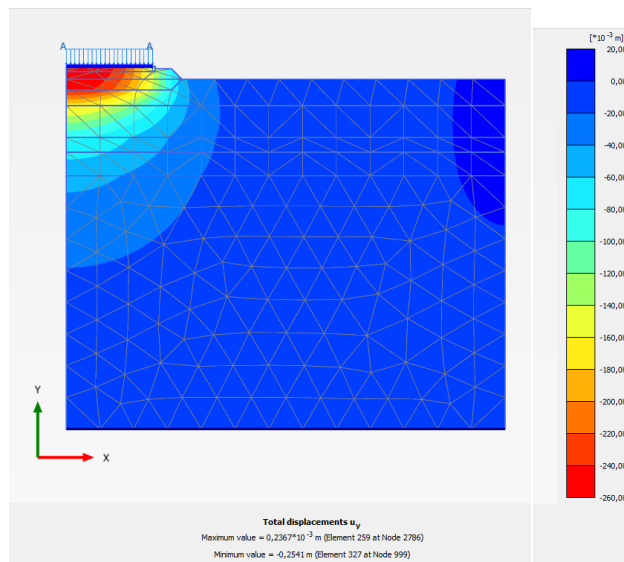
Geometría del modelo en la ventana de entrada (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, e = 1.80 m y D = 36 m)



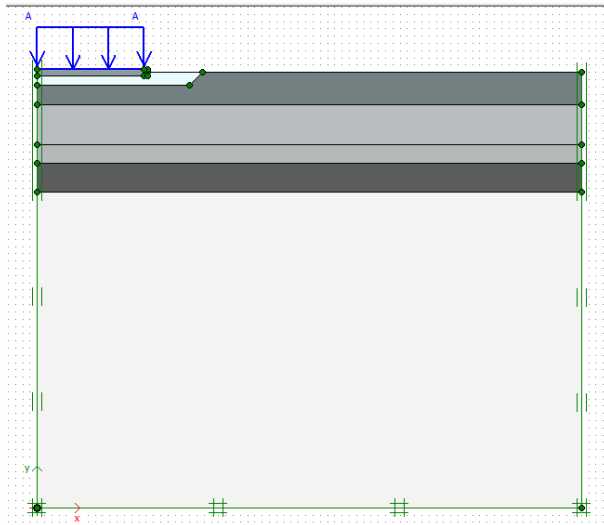
Desplazamientos totales U_y – CARGA (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, e = 1.80 m y D = 36 m)



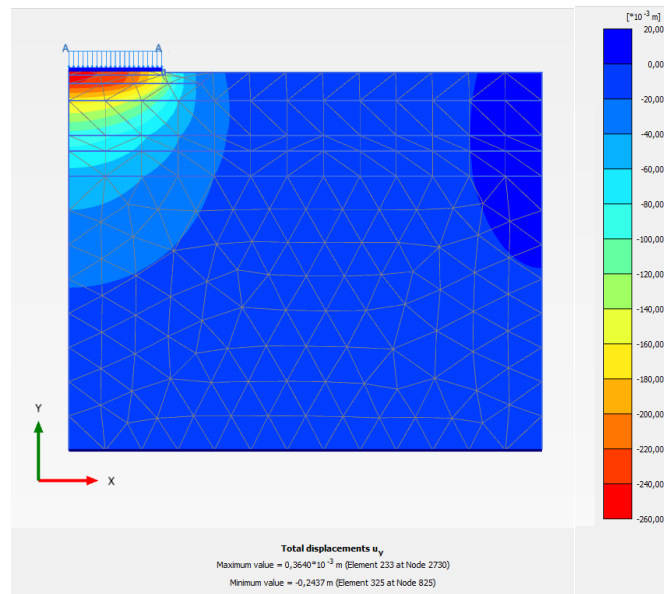
Geometría del modelo en la ventana de entrada (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 1.80 m y D = 36 m)



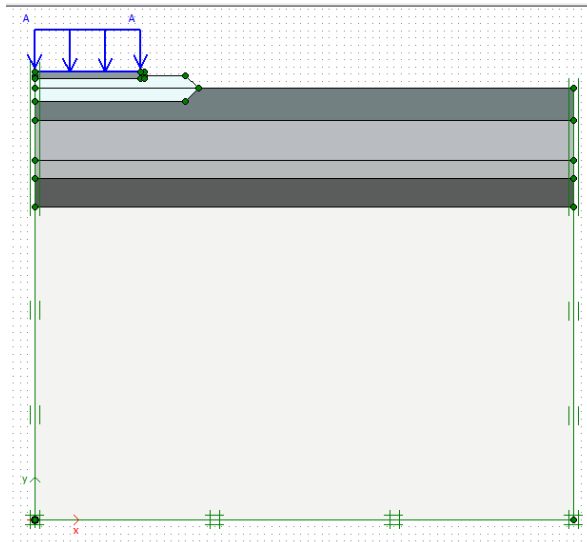
Desplazamientos totales U_y – CARGA (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 1.80 m y D = 36 m)



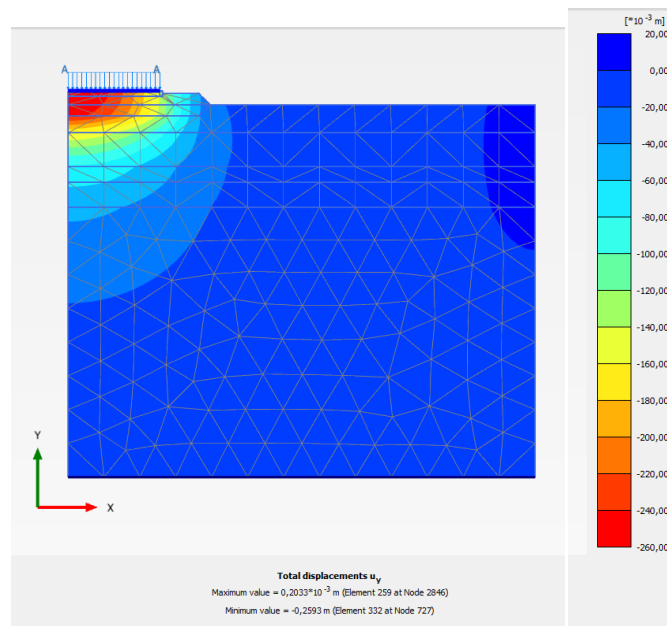
Geometría del modelo en la ventana de entrada (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, e = 1.80 m y D = 42 m)



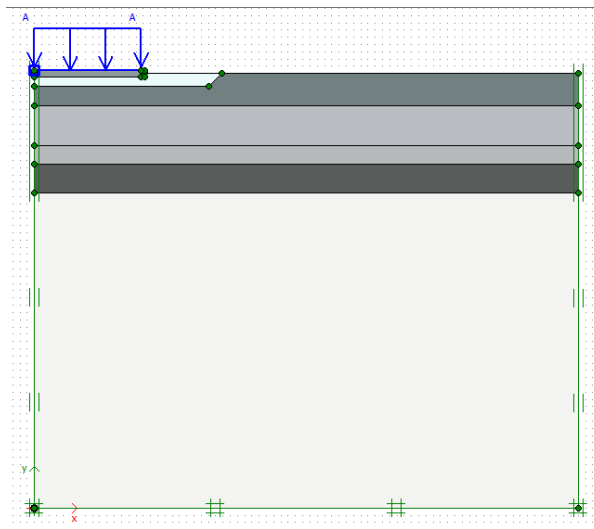
Desplazamientos totales U_y – CARGA (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, e = 1.80 m y D = 42 m)



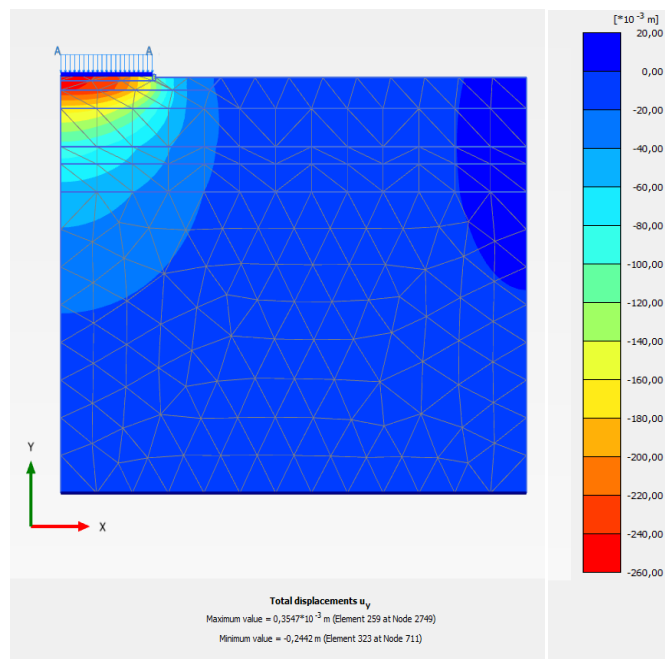
Geometría del modelo en la ventana de entrada (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 1.80 m y D = 42 m)



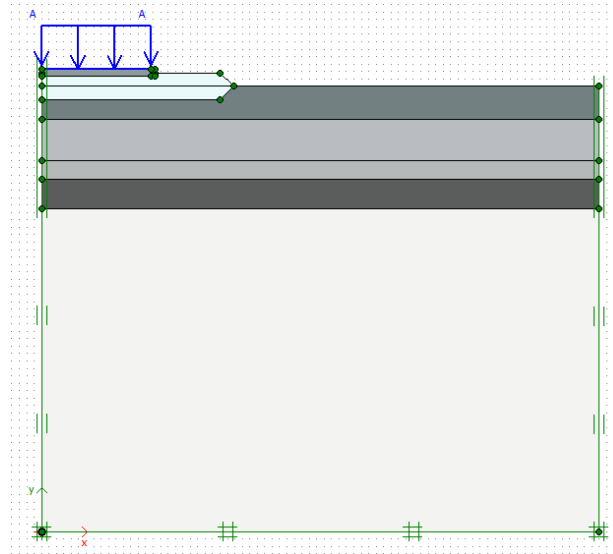
Desplazamientos totales U_y – CARGA (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 1.80 m y D = 42 m)



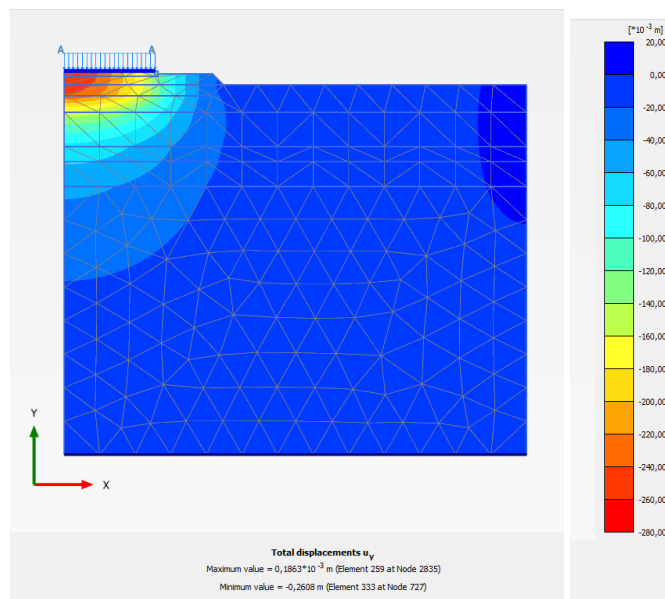
Geometría del modelo en la ventana de entrada (suelo areno – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, e = 1.80 m y D = 48 m)



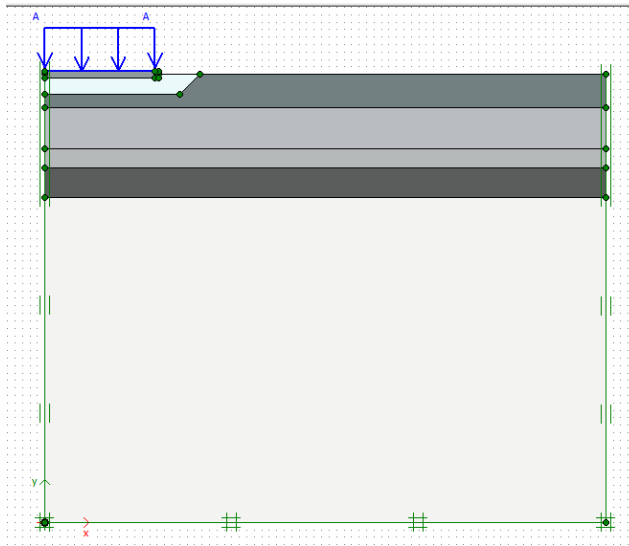
Desplazamientos totales U_y – CARGA (suelo areno – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, e = 1.80 m y D = 48 m)



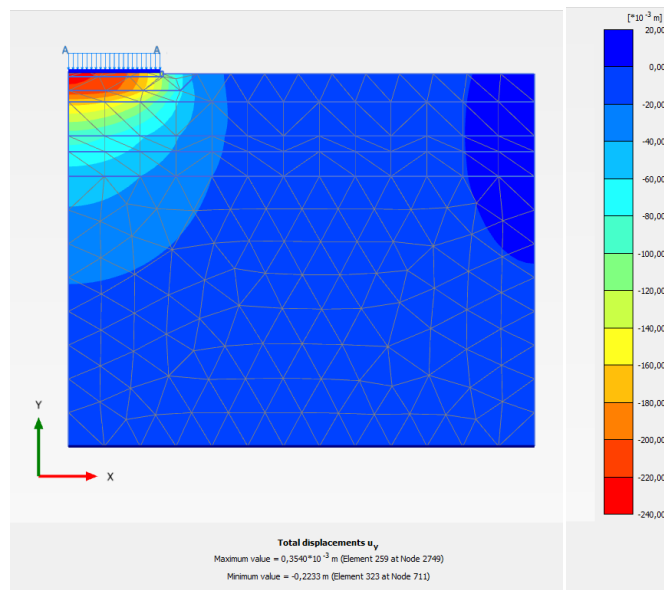
Geometría del modelo en la ventana de entrada (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 1.80 m y D = 48m)



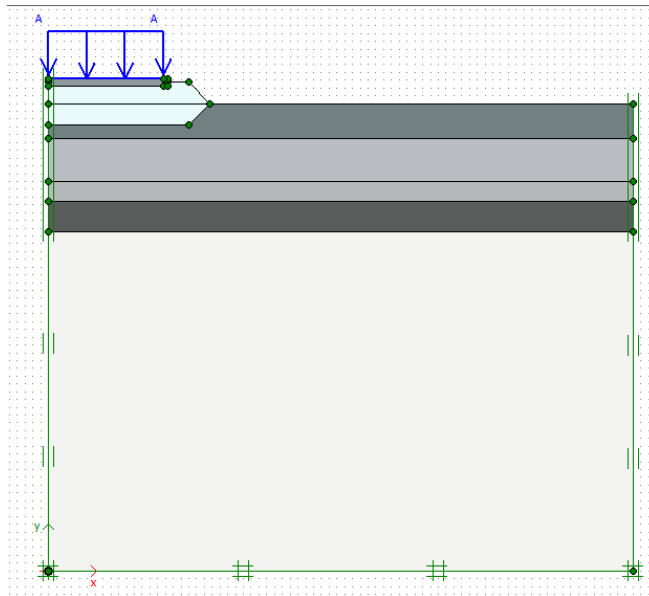
Desplazamientos totales U_y – CARGA (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 1.80 m y D = 48m)



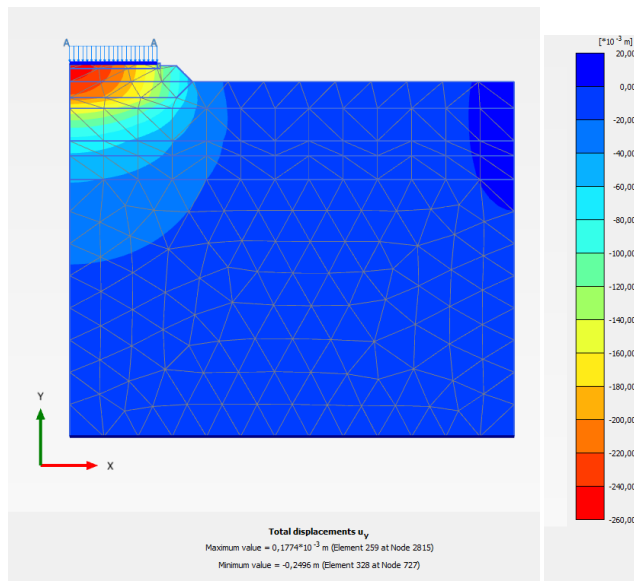
Geometría del modelo en la ventana de entrada (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 36$ m)



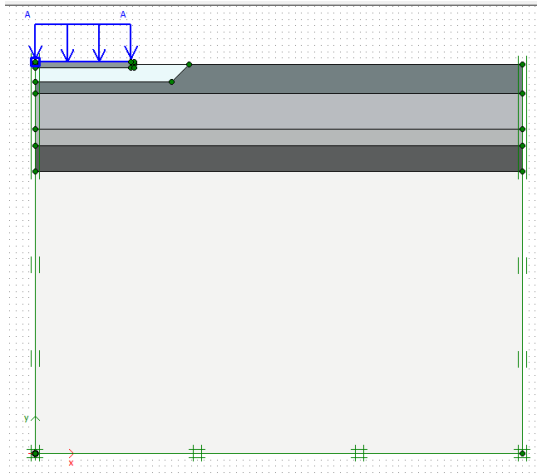
Desplazamientos totales U_y – CARGA (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 36$ m)



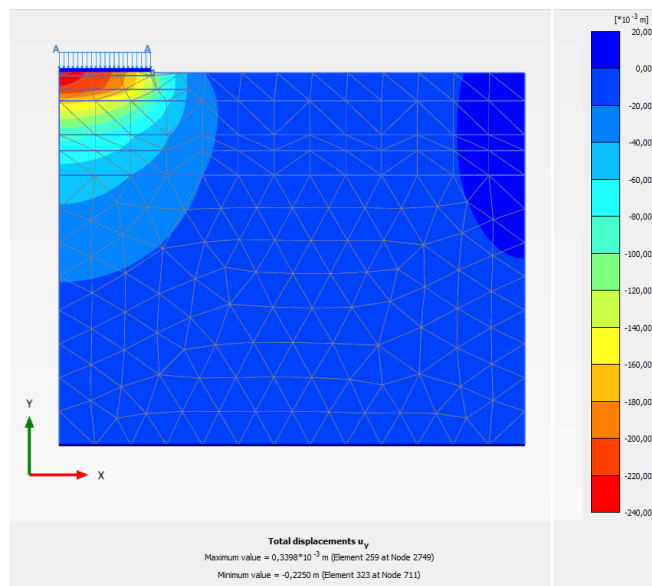
Geometría del modelo en la ventana de entrada (suelo areno – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 2.70 m y D = 36m)



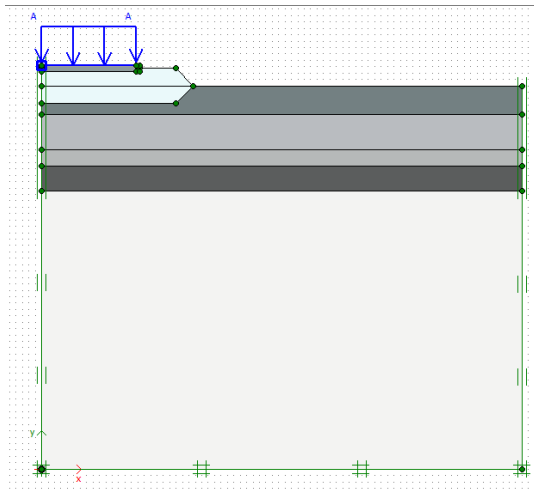
Desplazamientos totales U_y – CARGA (suelo areno – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 2.70 m y D = 36m)



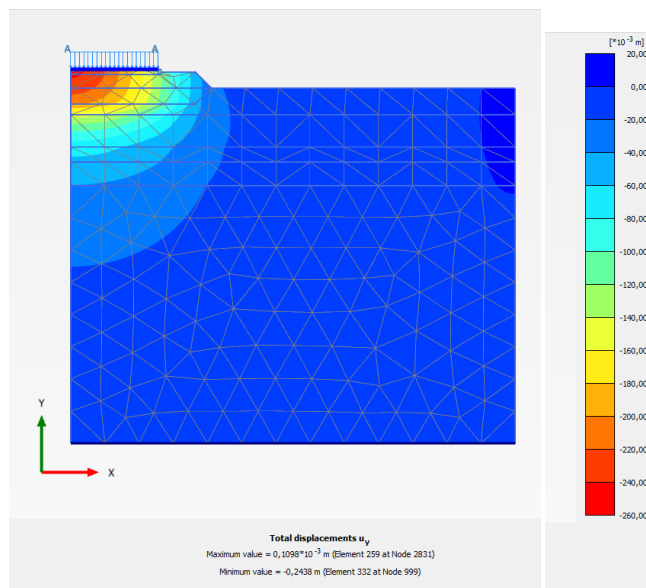
Geometría del modelo en la ventana de entrada (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 42$ m)



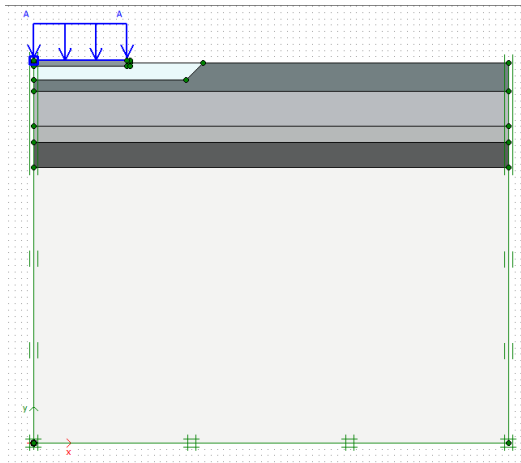
Desplazamientos totales U_y – CARGA (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 42$ m)



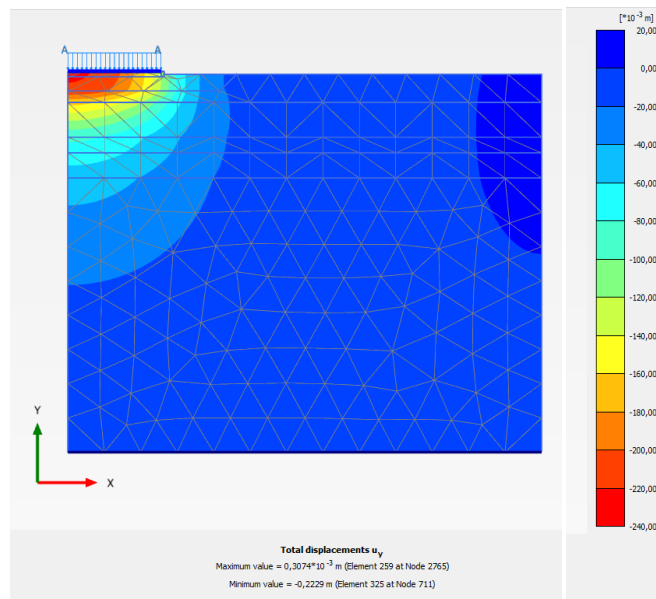
Geometría del modelo en la ventana de entrada (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 2.70 m y D = 42m)



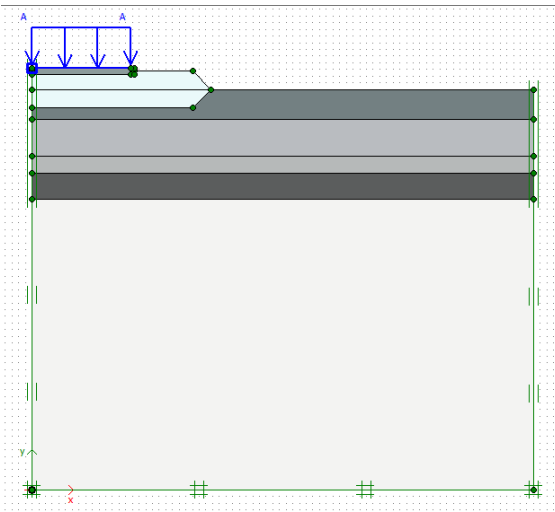
Desplazamientos totales U_y – CARGA (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 2.70 m y D = 42m)



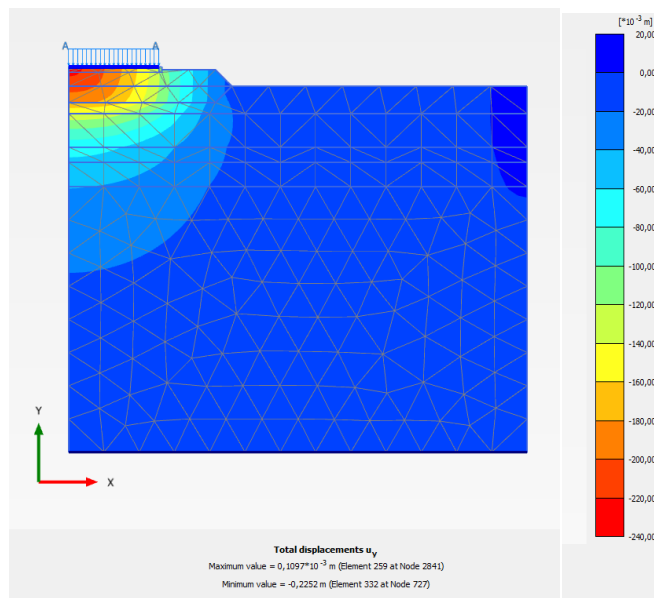
Geometría del modelo en la ventana de entrada (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 48$ m)



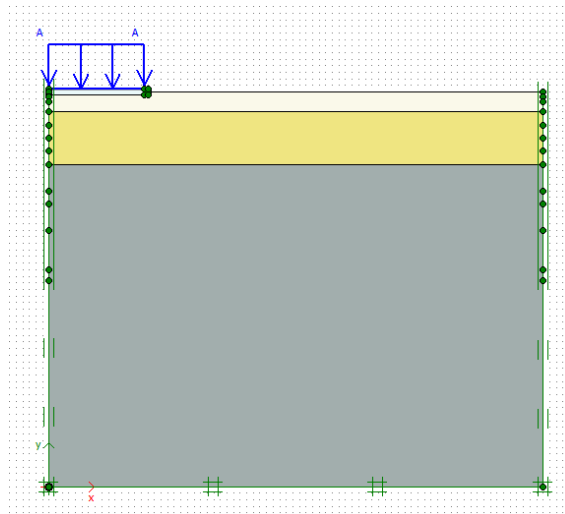
Desplazamientos totales U_y – CARGA (suelo arena – limoso suelto, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 48$ m)



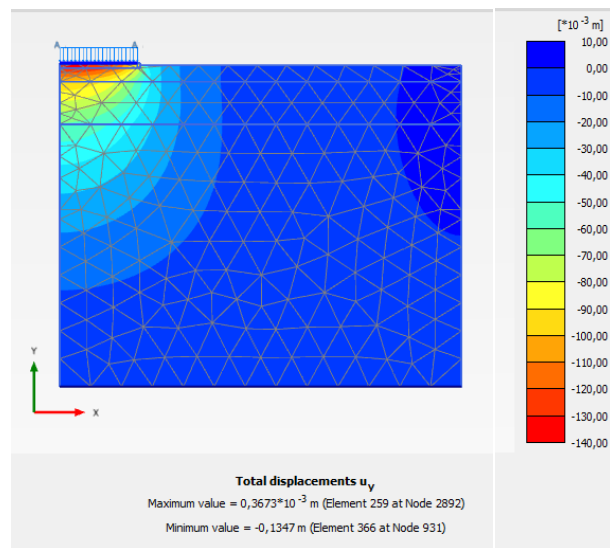
Geometría del modelo en la ventana de entrada (suelo areno – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 2.70 m y D = 48m)



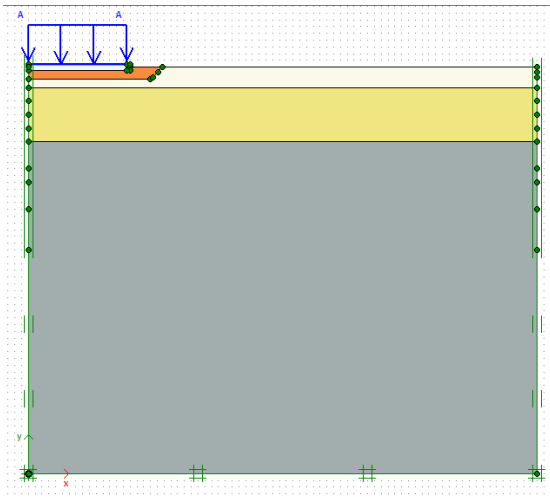
Desplazamientos totales U_y – CARGA (suelo areno – limoso suelto, con mejoramiento del terreno y terraplén sobre la superficie del terreno, e = 2.70 m y D = 48m)



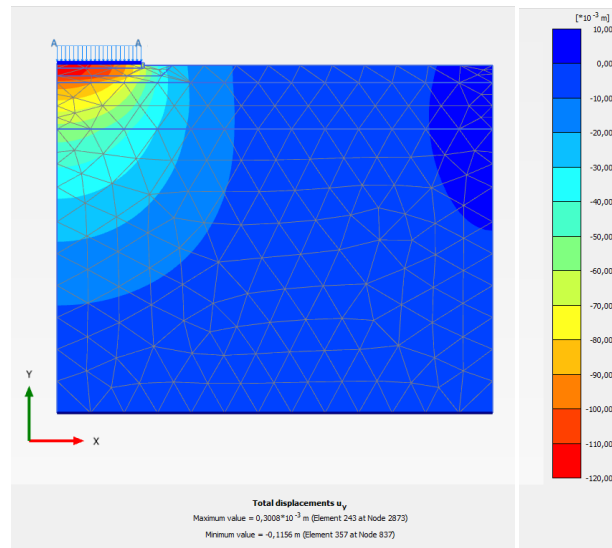
Geometría del modelo en la ventana de entrada (suelo granular de consistencia media a compacta, sin mejoramiento del suelo)



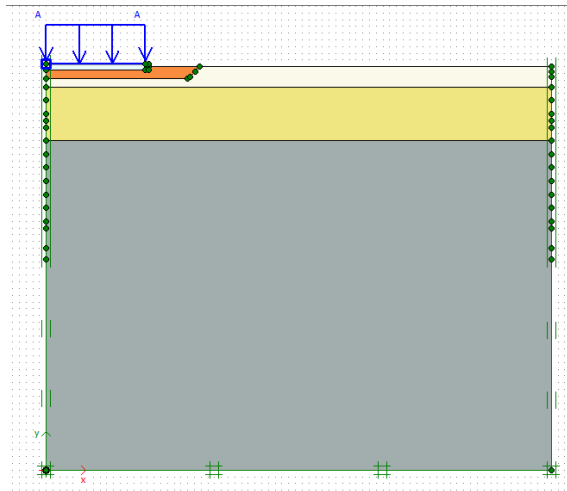
Desplazamientos totales U_y – CARGA (suelo granular de consistencia media a compacta, sin mejoramiento del suelo)



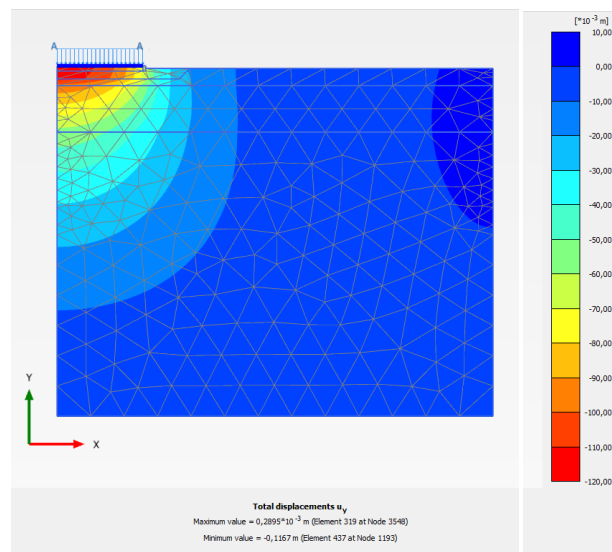
Geometría del modelo en la ventana de entrada (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 36$ m)



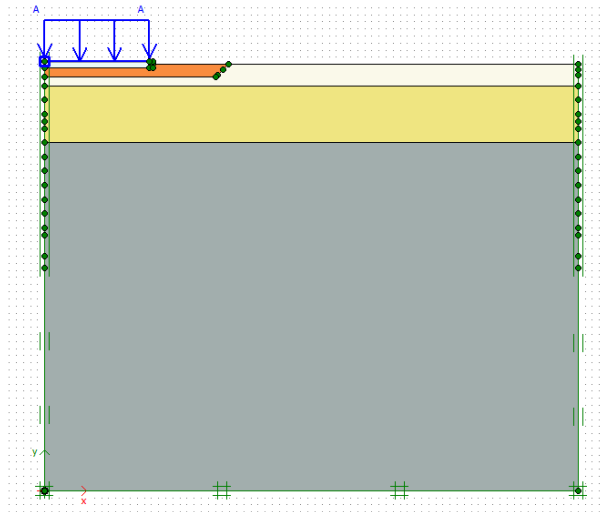
Desplazamientos totales U_y – CARGA (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 36$ m)



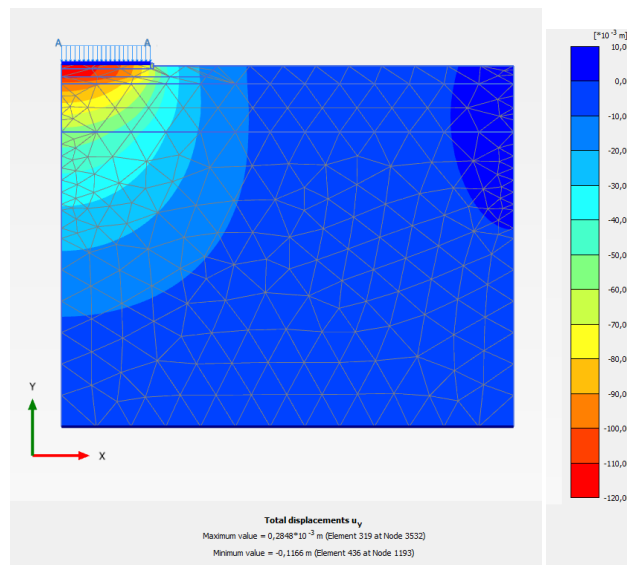
Geometría del modelo en la ventana de entrada (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 42$ m)



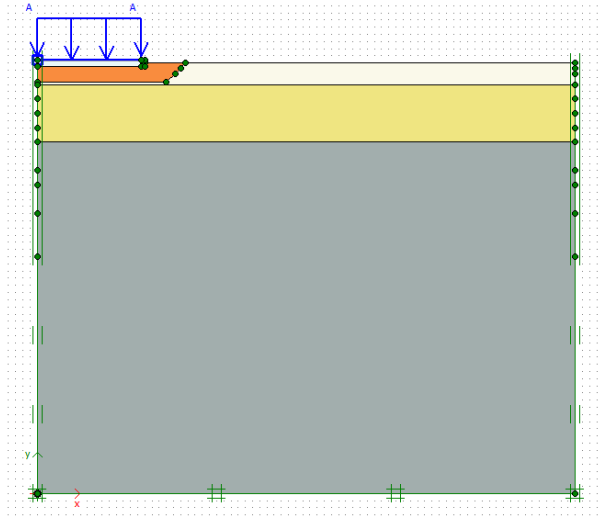
Desplazamientos totales U_y – CARGA (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 42$ m)



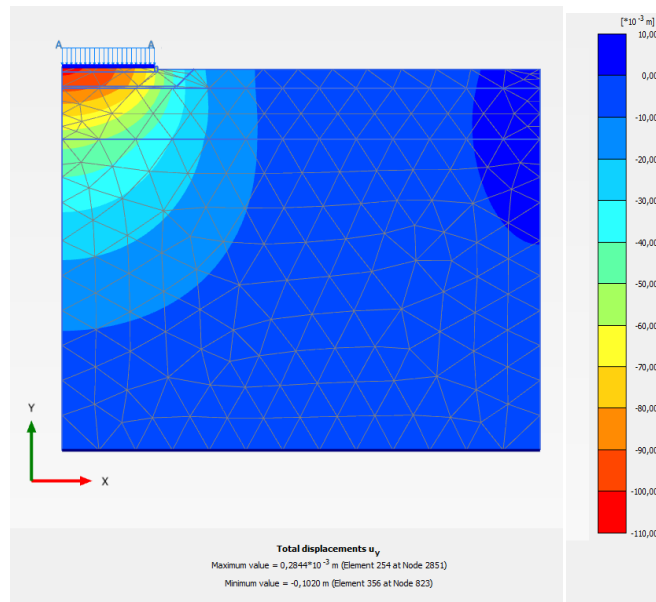
Geometría del modelo en la ventana de entrada (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 48$ m)



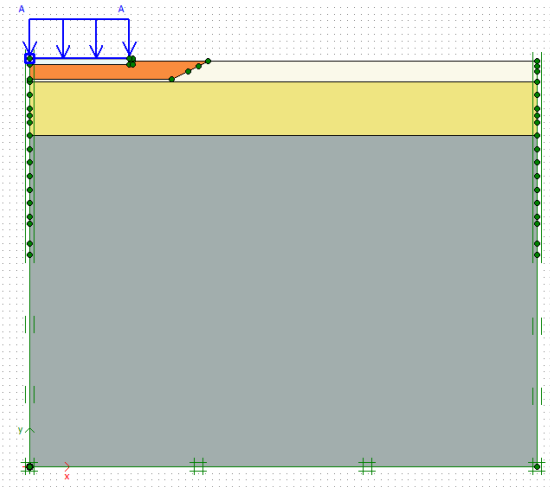
Desplazamientos totales U_y – CARGA (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 1.80$ m y $D = 48$ m)



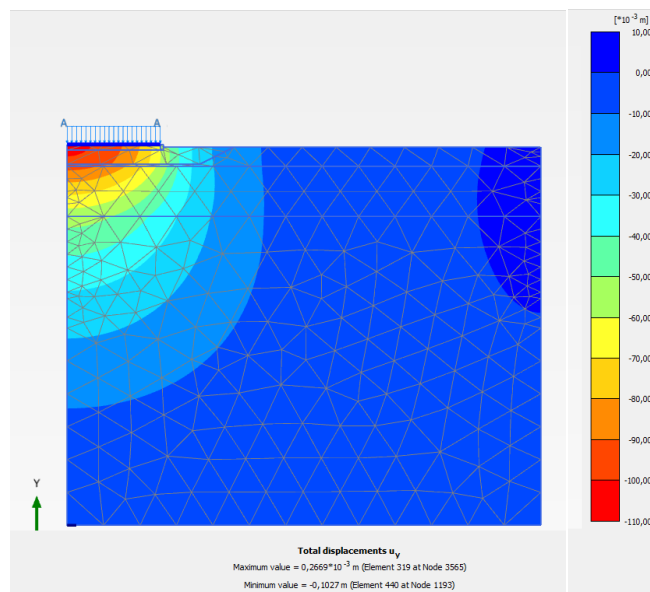
Geometría del modelo en la ventana de entrada (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 36$ m)



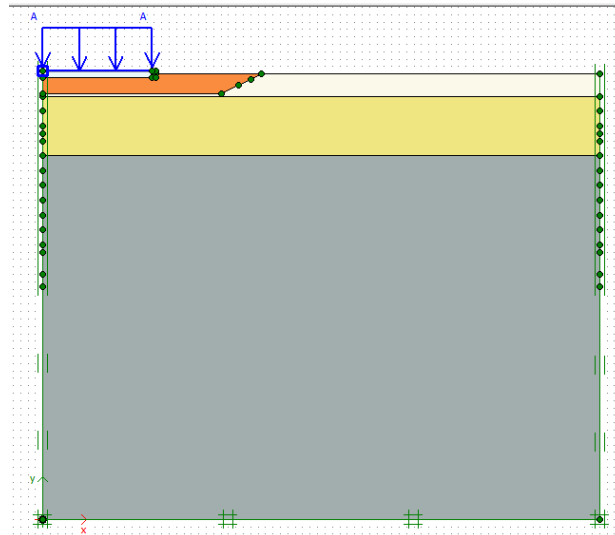
Desplazamientos totales U_y – CARGA (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 36$ m)



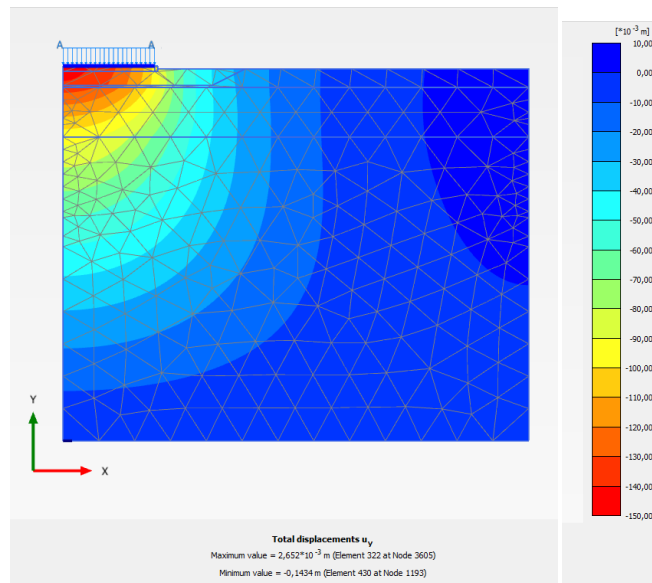
Geometría del modelo en la ventana de entrada (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 42$ m)



Desplazamientos totales U_y – CARGA (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 42$ m)



Geometría del modelo en la ventana de entrada (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 48$ m)



Desplazamientos totales U_y – CARGA (suelo granular de consistencia media a compacta, con mejoramiento del terreno, $e = 2.70$ m y $D = 48$ m)