

**OPTIMIZACIÓN DE MEZCLAS DE SUELO CEMENTO Y ESPESORES DEL
ESTRATO DE REEMPLAZO CON LIMOS INORGÁNICOS PARA
CIMENTACIONES SUPERFICIALES**

ADRIANA CAROLINA GRASS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN GEOTECNIA
BUCARAMANGA**

2017

**OPTIMIZACIÓN DE MEZCLAS DE SUELO CEMENTO Y ESPESORES DEL
ESTRATO DE REEMPLAZO CON LIMOS INORGÁNICOS PARA
CIMENTACIONES SUPERFICIALES**

ADRIANA CAROLINA GRASS

**Trabajo de aplicación para optar al título de
Magíster en Geotecnia**

Director:

**WILFREDO DEL TORO RODRÍGUEZ
M, Sc. en Ingeniería Civil – Área Geotecnia**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN GEOTECNIA
BUCARAMANGA**

2017

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
2. JUSTIFICACIÓN.....	20
3. OBJETIVOS.....	21
3.1 OBJETIVO GENERAL	21
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
4. LIMITACIONES.....	22
5. MARCO TEÓRICO	23
5.1 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	23
5.1.1 Estabilización Mecánica.....	23
5.1.2 Estabilización Física	24
5.1.3 Estabilización Química.....	24
5.1.4 Estabilización físico-química	24
5.2 SUELO-CEMENTO.....	24
5.3 SUELO.....	25
5.4 CEMENTO	26
5.5 AGUA.....	26
5.6 PROPIEDADES DE LOS SUELOS TRATADOS CON CEMENTO	27
5.6.1 Características de Compactación.	27
5.6.2 Resistencia a la compresión simple.....	28

5.6.3 Densidad.....	28
5.6.4 Módulo de elasticidad.	29
5.6.5 Permeabilidad.	29
5.7 APLICACIÓN DE SOFTWARE PARA LOS MODELOS.	29
5.7.1 Software Plaxis 3D Foundation.....	29
6. METODOLOGÍA	30
6.1 EXTRACCIÓN MUESTRAS.....	30
6.2 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO.....	30
6.3 ELECCIÓN DE LOS PORCENTAJES DE CEMENTO PARA CADA MEZCLA	31
6.3.1 Ensayos de Laboratorio	31
6.4 REPRESENTACIÓN GRÁFICA, INTERPRETACIÓN DE DATOS DE LABORATORIO Y MODELACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS.....	31
6.5 REPRESENTACIÓN GRÁFICA Y CONCLUSIONES	32
7. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA	33
7.1 ANÁLISIS E IDENTIFICACIÓN DEL SUELO.....	33
7.2 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO.....	34
7.2.1 Granulometría	34
7.2.2 Clasificación del suelo	34
7.2.3 Características del suelo.....	35
7.3 ELECCIÓN DE LOS PORCENTAJES DE CEMENTO PARA CADA MEZCLA	35
7.4 ENSAYOS DE LABORATORIO.....	36
7.4.1 Ensayo modificado de compactación (Norma INVIAS Capítulo E-142).	36
7.4.2 Relaciones Humedad-Densidad de Mezclas de suelo cemento (Norma INVIAS Capítulo E-611)	37
7.4.3 Preparación y curado de Probetas de Suelo-Cemento para pruebas de compresión (Norma INVIAS Capítulo E-612).....	37

7.4.4 Ensayo de Resistencia a la Compresión de Cilindros Moldeados de Suelo – Cemento (Norma INVIAS Capítulo E- 614).....	38
7.5 REPRESENTACIÓN GRÁFICA, INTERPRETACIÓN DE DATOS DE LABORATORIO	40
7.5.1 Análisis e interpretación de los resultados de los Ensayos a la Compresión simple en los especímenes de Suelo-Cemento	40
7.6 PROCEDIMIENTO DE LA MODELACIÓN	42
7.6.1 Creación del modelo del suelo natural	43
7.6.2 Fase de cálculos	43
7.6.3 Creación de los modelos con los diseños de mezcla de suelo-cemento	44
7.6.4 Fase de cálculo	45
7.6.5 Resultados de la Modelación	46
7.6.6 Representación Gráfica	50
7.6.5 Ejemplo aplicativo de la gráfica.....	52
8. CONCLUSIONES	56
BIBLIOGRAFÍA.....	57
ANEXOS	59

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Localización de la extracción de la muestra – Vereda Helechales – Floridablanca - Santander.....	33
Fotografía 2. Probetas pre moldeadas de suelo cemento	38
Fotografía 3. Probeta fallada con mezcla de suelo-cemento al 5%	39
Fotografía 4. Probeta fallada con mezcla de suelo-cemento al 7%	39
Fotografía 5. Probeta fallada con mezcla de suelo-cemento al 10%	40

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Carga Vs Deformación (compactación óptima)	41
Gráfica 2. Gráfica normalizada para mejoramiento del 5%.....	50
Gráfica 3. Gráfica normalizada para mejoramiento del 7%.....	51
Gráfica 4. Gráfica normalizada para mejoramiento del 10%.....	51
Gráfica 5. Gráfica normalizada para mejoramiento de suelo cemento variable entre el 5% y el 10%	52
Gráfica 6. Gráfica normalizada para mejoramiento del 5%.....	53

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Comportamiento del suelo en su estado natural	44
Ilustración 2. Modelo conceptual de la zapata con el reemplazo en selo cemento.	45
Ilustración 3. Modelo del estrato de reemplazo para la cimentación.....	46

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Aumento en la Resistencia a la compresión simple con el tiempo para varios tipos de suelos	26
Tabla 2. Granulometría	34
Tabla 3. Clasificación del Suelo	34
Tabla 4. Caracterización del suelo	35
Tabla 5. Contenido de Cemento (%), según la clasificación del Suelo	36
Tabla 6. Densidad Máxima – Humedad Óptima del suelo	36
Tabla 7. Peso unitario Máximo de Mezclas con Suelo-Cemento	37
Tabla 8. Resultados de ensayos de compresión de suelo-cemento de carga y deformación controlada con la compactación óptima	40
Tabla 9. Propiedades del suelo en su estado natural	42
Tabla 10. Parámetros de las mezclas de Suelo-Cemento	43
Tabla 11. Diseños de mezcla – Capacidad de Carga (Zapata 1m x 1m).....	46
Tabla 12. Diseños de mezcla – Capacidad de Carga (Zapata 2m x 2m).....	47
Tabla 13. Diseños de mezcla – Capacidad de Carga (Zapata 3m x 3m).....	48

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. ENSAYO DE LABORATORIO	59
ANEXO B. MODELOS PLAXIS 3D FOUNDATION	68

GLOSARIO

Arcilla. Son partículas muy pequeñas, de dimensiones menores de 5 micras. En los suelos finos, producto en general del ataque químico de las aguas a las rocas o a otros suelos, las arcillas se agrupan dejando poros muy grandes, al punto que los espacios vacíos (comúnmente llenos de agua) pueden representar volúmenes 5 a 10 veces mayores que el volumen sólido de las partículas.

Arena. Son el producto de la disgregación de las rocas en granos pequeños, variando sus componentes mineralógicos de acuerdo a su procedencia: las hay silíceas, calcáreas, calizas, micáceas, etc. Son granos duros que han resistido a la acción de erosión y desgaste por lo que las de mejor calidad son las silíceas, producto de fragmentación de rocas cuarzosas. Sometido a compresión un suelo arenoso resiste de acuerdo con su compacidad, y a la dureza de los granos.

Capacidad de Carga. Capacidad del suelo para soportar una carga sin que se produzcan fallas dentro de su masa. Esta capacidad varía no solamente con la resistencia del suelo, sino también con la magnitud y distribución de la carga.

Cimentación. Es la parte soportante de una estructura. Este término se aplica usualmente en forma restrictiva al miembro que transmite la carga de la superestructura a la tierra. Es una conexión estructural cuyo proyecto depende de las características de ambos, la estructura y el suelo o roca y debe cumplir los siguientes requisitos:

- a. Debe colocarse a una profundidad adecuada para impedir los daños de heladas, levantamientos, socavaciones o los daños que puedan causar futuras construcciones cercanas.

- b. Debe ser segura contra la falla del suelo
- c. No debe asentarse tanto que desfigure o dañe la estructura

Compactación. Es la densificación del suelo por remoción de aire, lo que requiere energía mecánica. El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso específico seco.

Estabilización de suelo. Modificación de las características de un suelo mediante uso de productos químicos o tratamiento físico para corregir una deficiencia para darle mayor resistencia al terreno o para disminuir su plasticidad.

Limos. Son suelos cuyas partículas tienen tamaños comprendidos entre 2 y 5 micras como mínimo y de 0.06 a 0.075mm como máximo, es decir con una composición granulométrica intermedia entre la de las arenas y la de las arcillas.

Plaxis. Paquete de elementos finitos destinados a los dos análisis dimensionales de la deformación y la estabilidad en la Ingeniería geotécnica.

Resistencia. Capacidad de los materiales para soportar esfuerzos. Se determina cuantificando la fuerza máxima por unidad de área de sección que resiste un material antes de romperse.

Suelo cemento. Mezcla de suelo, convenientemente pulverizado, con determinadas porciones de agua y cemento que se compacta y cura para obtener mayor densidad.

Suelo. En términos ingenieriles, se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta junto con el líquido y gas que ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas.

RESUMEN

TÍTULO: Optimización de mezclas de suelo cemento y espesores del estrato de reemplazo con limos inorgánicos para cimentaciones superficiales*

AUTORA: Adriana Carolina Grass**

PALABRAS CLAVE: Suelo-Cemento, Capacidad de soporte, Cimentaciones superficiales.

DESCRIPCIÓN

El objetivo principal de este trabajo es brindar a los profesionales de áreas afines a la ingeniería y construcción de obras civiles, un modelo gráfico que sirva de consulta para definir la relación suelo-cemento, en porcentaje en peso del suelo (%) y el espesor de capa de este material de reemplazo, para obtener una disminución de los asentamientos del suelo en sus condiciones originales encontradas en campo al momento de iniciar la excavación para cimentaciones superficiales.

Las mezclas de suelo-cemento son comúnmente utilizadas en obras civiles para mejorar las condiciones del suelo existente; en algunos casos se realizan mezclas sin contar con un diseño de mezcla que garantice cumplir los requerimientos exigidos para el proyecto sin generar sobrecostos por exceso de materiales y mano de obra al no tener en cuenta la proporción adecuada de cemento y los espesores de remplazo.

Este modelo gráfico brinda valores reales en cuanto al incremento de la capacidad portante reflejados en la disminución de los asentamientos del suelo, utilizando un diseño de mezcla con el porcentaje de cemento y el espesor de capa adecuado, es decir mezclas de suelo-cemento al 5%, 7% y 10% de contenido de cemento en proporción al peso seco del material, con espesores de remplazo de 0.4m, 0.6m, 0.8m, 1.0m, 1.2 m, 1.4m, 1.6 m y 2.0 m.

En este trabajo se presentan las propiedades mecánicas obtenidas de los resultados de laboratorio para las mezclas con los porcentajes de cemento mencionados; así como su modelación en el Software PLAXIS 3D FOUNDATION donde se procesaron dichas propiedades mecánicas evaluadas para los espesores de capa de reemplazo propuestos, dando como resultado el modelo gráfico de estos valores.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela De Ingeniería Civil. Maestría en Geotecnia.
Director: Ing. Wilfredo Del Toro

ABSTRACT

TITLE: Optimization of cement mixtures and thicknesses of the replacement layer with inorganic silts for surface foundations*

AUTHOR: Adriana Carolina Grass**

KEYWORDS: Soil-Cement, Supporting capacity, Surface foundations.

DESCRIPCIÓN

The main objective of this work is to provide professionals in areas related to engineering and construction of civil works, a graphic model that serves as a query to define the soil-cement ratio, in percentage by weight of soil (%) and thickness Of layer of this replacement material, to obtain an increase in the bearing capacity of the soil in its original conditions found in the field at the moment of the excavation for superficial foundations.

Soil-cement mixtures are commonly used in civil works to improve existing soil conditions; In some cases mixtures are made without having a mix design that guarantees to meet the requirements required for the project without generating surcharges for excess materials and labor, failing to take into account the adequate proportion of cement and the replacement thicknesses.

This graphical model provides real values for the increase of the load bearing capacity of the soil reaching up to 24% of its original capacity, using a mixture design with the percentage of cement and the appropriate layer thickness, ie soil-cement mixtures To 5%, 7% and 10% of cement content in proportion to the dry weight of the material, with replacement thicknesses of 0.4m, 0.6m, 0.8m, 1.0m, 1.2m, 1.4m, 1.6 m, 1.8m and 2.0m.

In this work the mechanical properties obtained from the laboratory results are presented for the mixtures with the percentages of cement mentioned; As well as its modeling in the PLAXIS 3D FOUNDATION Software where these evaluated mechanical properties were processed for the proposed replacement layer thicknesses, resulting in the graphic model of these values.

* Project of grade

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School Of Civil Engineering. MSc in Geotechnics.
Director: Ing. Wilfredo Del Toro

INTRODUCCIÓN

Teniendo claro que previo al diseño y ejecución de un proyecto se debe contar con un estudio geotécnico, en algunos casos, durante el proceso de la excavación para la cimentación, se presentan cambios en las características de los estratos de suelo en relación con los resultados obtenidos en los sondeos realizados durante la fase del estudio, siendo estos no competentes para soportar las cargas de diseño, ya sea por presencia de rellenos, materiales expansivos o depósitos enterrados, etc.; en este caso el geotecnista debe realizar una visita a campo para revisión, ajuste y replantear el diseño de la cimentación; por lo que el constructor decide escavar y profundizar la cimentación hasta la cota donde encuentre el estrato competente para soportar la edificación o toman como mejor opción cambiar de cimentación superficial a cimentación profunda, lo cual incrementa los costos y los tiempos del proyecto por cantidades de obra adicionales que no se tenían contempladas al inicio del proyecto.

En el desarrollo de este proyecto se quiere realizar diseños donde se involucre el mejoramiento de estos suelos; mediante el reemplazo de material blando o poco competente, por mezclas de suelo-cemento de diferentes espesores y dosificaciones, haciendo uso de limos inorgánicos de baja plasticidad que son comunes en nuestra región, de esta manera aumentar la capacidad portante disminuyendo los asentamientos del terreno sin tener que realizar modificaciones en los diseños iniciales de la cimentación del proyecto.

Con el fin de optimizar la implementación del mejoramiento utilizando suelo cemento se realiza el análisis de las deformaciones entre el suelo y la cimentación incorporando diferentes porcentajes de suelo cemento en diferentes secciones de zapatas, para este análisis se realizó la extracción de muestras inalteradas a las

cuales se les realiza una adición de suelo cemento del 5%, 7% y 10%, las muestras mejoradas se llevan al ensayo de compresión inconfiada donde se estiman las propiedades geotécnicas de diseño, con los resultados obtenidos se construye un modelo de elementos finitos en el software Plaxis 3D el cual permite determinar las deformaciones máximas esperadas entre las zapatas y el suelo mejorado al aplicarle una carga específica; con los resultados obtenidos se elabora una gráfica normalizada que permite integrar el espesor de mejoramiento, los asentamientos esperados, la dimensión de la zapata, las propiedades de resistencia del suelo y la presión de contacto existente entre el suelo y la estructura.

A continuación se detallan los procedimientos, resultados, observaciones y conclusiones obtenidas del presente proyecto.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los procesos constructivos de edificaciones de baja y media categoría se evidencian algunos casos donde las condiciones geotécnicas en el terreno no se ajustan a las expuestas en el estudio de suelos, presentando limitaciones de tipo geotécnico que pueden incrementar significativamente los costos de la cimentación; en los últimos tiempos una solución rápida para mejorar las condiciones del suelo de fundación es la aplicación de suelo cemento en diferentes dosificaciones, sin embargo, el uso de la misma no se encuentra reglamentada o especificada, es por esto que se incurre en dosificaciones incorrectas, sobre diseños o dosificaciones inferiores a las necesarias.

Es por esta razón que surge la necesidad de investigar el comportamiento de los suelos al incorporarle diferentes porcentajes de suelo cemento con el fin de estandarizar una metodología que permita al constructor o al diseñador tener una guía de consulta sobre los espesores porcentajes y disminución de los asentamientos así incluir el mejoramiento mencionado.

2. JUSTIFICACIÓN

La finalidad de este proyecto es ofrecer a los profesionales en ingeniería civil y constructores, un modelo gráfico en el cual se pueda encontrar diferentes valores de espesores de remplazo con mezcla de suelo cemento en tres proporciones diferentes, y el aporte de este, para definir relaciones de dimensión de zapatas y espesores que sean óptimos para nuestro proyecto, brindando valores requeridos de asentamientos.

Con el modelo gráfico se busca facilitar los diseños de mezcla de suelo-cemento para mejorar las condiciones de un suelo que no cumple por si solo con la resistencia necesaria para un proyecto definido sin sobrepasar los requerimientos del proyecto, evitando los sobrecostos en materiales.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Optimizar mezclas de suelo-cemento y espesores del estrato de reemplazo en limos inorgánicos de baja plasticidad para cimentaciones superficiales.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir las características del suelo con el cual se realizan los mejoramientos con mezcla de suelo-cemento.
- Realizar ensayos modificados de compactación a las mezclas de suelo-cemento para calcular su densidad máxima y humedad óptima.
- Realizar ensayos a compresión de las mezclas de suelo-cemento con sus diferentes proporciones para determinar sus propiedades mecánicas.
- Modelar los diferentes de espesores de reemplazo en software PLAXIS con los datos arrojados en los laboratorios para las diferentes mezclas de suelo cemento.
- Desarrollar la representación gráfica de la relación entre el espesor de suelo cemento y las deformaciones esperadas para zapatas de diferentes secciones

4. LIMITACIONES

El proyecto se limita a diseños de mezcla de suelo-cemento con contenido de cemento de 5%, 7% y 10% para un suelo tipo A-6 del Sistema AASHTO y las características del suelo son un limo inorgánico de baja plasticidad en condiciones no saturadas, los espesores de remplazo son de 0.4m, 0.6m, 0.8m, 1.0m, 1.2 m, 1.4m, 1.6 m y 2.0 m. y para zapatas de cimentación de sección cuadrada de 1x1, 2x2 y 3x3.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Muchas veces el suelo de un lugar seleccionado para construir un proyecto, no es el más apropiado para soportar las cargas generadas por las estructuras tales como edificios, cimentaciones para equipos, vías y demás.

Algunas veces los primeros estratos no son los más adecuados y deben ser removidos y reemplazados por un suelo mejorado en el cual la fundación pueda ser construida. El suelo usado como relleno debe ser bien compactado para soportar las cargas estructurales deseadas.

Se presentan varias técnicas y agentes estabilizadores para ser usadas con el propósito de:

- Reducir los asentamientos de las estructuras
- Mejorar la resistencia al corte del suelo y aumentar la capacidad de carga de la cimentación.
- Incrementar el factor de seguridad en contra de la posible falla de terraplenes y presas en tierra.
- Reducir la expansión y reducción de suelos.¹

Los principales procesos de estabilización se clasifican en:

5.1.1 Estabilización Mecánica. Comprende la manipulación y compactación de los suelos para mejorar su densificación. En campo la compactación depende de varios

¹ BRAJA. M Das Fundamentos de Ingeniería de cimentaciones Séptima Edición. 2011

factores, como del tipo de compactador, tipo de suelo, contenido de humedad, espesor de capa, número de pasadas del equipo y su velocidad.

5.1.2 Estabilización Física. Busca obtener una adecuada granulometría mediante el agregado de materiales granulares o cohesivos o los dos, los más usados son los geotextiles.

5.1.3 Estabilización Química. Se logra mediante el intercambio iónico entre los granos del suelo y el producto estabilizante como la cal, cemento portland, productos asfálticos, cloruro de sodio y cloruro de calcio, Escorias de fundición, polímeros, hule de neumáticos.

5.1.4 Estabilización físico-química. Produce cambios en las propiedades del suelo mediante el uso de cementos orgánicos, inorgánicos y materiales impermeabilizantes.

5.2 SUELO-CEMENTO

La estabilización con suelo-cemento es una de las técnicas más utilizadas, esta se inicia desde el año 1917 cuando Amies patentó un primer procedimiento de mejoramiento de suelos a base de mezclarles proporciones variables de cemento tipo Portland. Actualmente se proporcionan mezclas con base en criterio de resistencia, generalmente realizando una prueba de compresión simple²

El suelo-cemento es una mezcla de suelo convenientemente pulverizado, con determinadas proporciones de agua y cemento, compactada y curada de tal modo

² RICO RODRÍGUEZ Alfonso La ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y Aeropistas. 2005

que se pueda obtener un material con mayor densidad. Las propiedades de estas mezclas pueden variar según los materiales y proporciones que las conforman.³

El suelo-cemento es comúnmente aplicado en la construcción de vías, estabilización de taludes, estabilización de suelos base para fundaciones y fabricación de ladrillos.

Su principal característica es la fácil obtención "In Situ; utilizando en su mayor parte el suelo del sitio donde se desarrollará el proyecto. Por lo tanto se reducen los costos por concepto de transporte por acarreo de material.

Sus propiedades dependen de parámetros como son el tipo de suelo, el % de cemento, la humedad de la mezcla y el proceso de curado. El suelo cemento tiene propiedades mecánicas y físicas que son:

5.3 SUELO

Cualquier suelo puede ser estabilizado con cemento excepto los suelos que sean muy plásticos, orgánicos o que tengan altos contenidos de sal que puedan afectar la función del cemento. Uno de los objetivos de la mezcla es limitar las características del suelo, principalmente el índice de plasticidad y la granulometría.⁴ Se alcanza una mayor resistencia a la compresión simple en mezclas con suelos bien gradados y con partículas duras que en la mezcla de suelos mal gradados y con partículas menos duras. También es mayor en suelos granulares que en mezclas de suelos finos y plásticos. En la Tabla 1 se presentan valores de resistencia a la compresión simple para diferentes tipos de suelo.

³ TORRENTE, M. y SAGÜÉS, L. Estabilización de Suelos. Suelo Cemento. Editores Técnicos Asociados S.A., Barcelona. 1968

⁴ FEDERACIÓN INTERAMERICANA DEL CEMENTO (FICEM) Suelo-Cemento 1ra Parte, [en línea] disponible en: <http://www.imcyc.com/ct2008/mar08/ingenieria.htm>

Tabla 1. Aumento en la Resistencia a la compresión simple con el tiempo para varios tipos de suelos

TIPO DE SUELO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMBLE (Kg/cm ²)	
	7 días	28 días
Gravas y Arenas (A-1, A-2 Y A-3)	21-42	28-70
Suelos limosos (A-4 y A.5)	17-35	21-63
Suelos Arcillosos (A-6 y A-7)	14-28	18-42

Fuente: DE LA FUENTE LAVALLE Eduardo. Suelo-Cemento sus usos, propiedades y aplicaciones M en I. Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto. 1995

5.4 CEMENTO

Material finamente pulverizado, que se desarrolla como conglomerante hidráulico al ser hidratado. Para la estabilización de suelos puede hacerse uso de cualquier cemento, pero el más utilizado es Cemento Portland tipo I que está compuesto por silicatos de calcio hidráulicos, los que se forman con la hidratación del cemento portland y son los responsables de sus características adherentes.

El cemento portland puede ser usado para mejorar la calidad del suelo o para la transformación del suelo en una masa cementada, que aumenta significativamente su resistencia y durabilidad. La cantidad de cemento dependerá de si el suelo debe ser modificado o estabilizado.

5.5 AGUA

Es esencial en las reacciones con el cemento portland, las funciones principales del agua en las mezclas de suelo-cemento son:

- Hidratar el cemento para producir la aglutinación de las partículas sólidas.

- Producir la lubricación entre las partículas para facilitar la compactación.⁵

El contenido de agua se determina teniendo en cuenta la manejabilidad de la mezcla y la necesidad de evitar las grietas excesivas y para alcanzar la compactación adecuada con el equipo disponible. De acuerdo al IMCYC (Instituto Mexicano del cemento y del concreto A.C) la cantidad de agua varía comúnmente entre el 10% y 20% del peso seco de la mezcla en suelos plásticos y menores del 10% en los suelos granulares.

5.6 PROPIEDADES DE LOS SUELOS TRATADOS CON CEMENTO

Los suelos estabilizados con cemento presentan propiedades mejoradas en cuanto a deformabilidad y resistencia. Las propiedades del material dependen de los siguientes factores:

- Características del suelo
- Dosificación de cemento
- Proceso de fabricación, compactación y curado.

Adicionalmente influye la presión de confinamiento o el contenido de agua durante la fabricación.

5.6.1 Características de Compactación. La compactación es un factor fundamental en el resultado final. Una buena compactación aumentará significativamente las propiedades deseables del suelo-cemento; al contrario si no se realiza una buena compactación los resultados serán pobres. Bajo las mismas condiciones de compactación, la adición de cemento a un suelo hace variar el punto

⁵ Revista del ISCYC No 15

óptimo del Proctor, tanto en lo referente a la humedad óptima como a densidad máxima.

5.6.2 Resistencia a la compresión simple. Es la propiedad más característica de este material, la mayoría de valores de resistencia que se encuentran en los documentos son los usualmente obtenidos por los investigadores, con una gran dispersión del promedio general, esto se debe a que los resultados de los ensayos a compresión de las probetas de suelo cemento están dados en función al diseño utilizado, según sea preferencia o necesidad del diseñador. A continuación se referencian algunos valores de resistencia dados en muestras a los 28 días.

- La Portland Cement Association de los EUA dan valores promedios entre 30 y 65Kg/cm² para el diseño de pavimentos. (valores comparativamente bajos)
- En Inglaterra y Alemania se obtienen los más altos valores, similares a los de los concretos pobres, alcanzando resistencias de 150kg/cm².

Los valores de resistencia obtenidos dependen de varios factores entre los más destacados son el tipo y cantidad de cemento, la energía de compactación aplicada, la eficiencia lograda en el mezclado, el tipo y cantidad de materia orgánica y sales en el suelo, la cantidad de agua, el tipo de suelo utilizado y la duración del curado.

La resistencia a la compresión simple aumenta con el tiempo. Todos los experimentos y mediciones demuestran que aumentan considerablemente durante los primeros 90 días; de uno a tres tantos más que a los siete días, y luego continua aumentando, pero cada vez más lento hasta alcanzar su valor límite.⁶

5.6.3 Densidad. La densidad influye en las propiedades del material tanto como el contenido de cemento. La densidad es tomada como un parámetro de control en campo. La relación humedad óptima – densidad máxima, puede variar para un

⁶ DE LA FUENTE LAVALLE Eduardo Suelo-Cemento sus usos, propiedades y aplicaciones M en I. Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto. 1995

mismo tipo de suelo y contenido de cemento, si se cambia la energía de compactación.

5.6.4 Módulo de elasticidad. El módulo de elasticidad estático es muy variable y depende del tipo de suelo y de la cantidad de cemento principalmente. En general este módulo es bajo comparándolo con el del concreto y muy alto si se le compara con el del suelo natural.

5.6.5 Permeabilidad. La permeabilidad es reducida con la adición de cemento, y esta dependerá del tipo de suelo, el contenido de cemento y la compactación aplicada.

5.7 APLICACIÓN DE SOFTWARE PARA LOS MODELOS.

Para el trabajo en desarrollo se toma como herramienta el Software PLAXIS 3D FOUNDATION para la modelación de las diferentes condiciones del suelo.

5.7.1 Software Plaxis 3D Foundation. Este programa es un paquete de elementos finitos desarrollado para el análisis de estructuras de cimentación en tres dimensiones, incluyendo fundaciones de borde. Esto combina procedimientos simples de entrada gráfica que permite generar modelos de elementos finitos complejos, con avanzados resultados y procedimientos de cálculo.

6. METODOLOGÍA

Este trabajo busca obtener un modelo grafico representativo de los incrementos porcentuales de la resistencia Vs los espesores de estrato a ser remplazados para los diseños de mezcla, con contenido de cemento de 5, 7 y 10 %, para brindar al constructor una solución rápida y segura, en caso de presentarse durante el proceso de construcción, suelos que no sean competentes, para soportar las cargas de diseño del proyecto; a continuación se listan los pasos requeridos para obtener las gráficas.

6.1 EXTRACCIÓN MUESTRAS

Se obtiene la muestra garantizando que no contenga material orgánico, se extrae y se almacena en sacos de fibra y es llevada al laboratorio.

6.2 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

Comprende la descripción del suelo a ser involucrado en el diseño de mezcla y su caracterización en cuanto a granulometría, humedad óptima, densidad máxima e Índice de plasticidad y resistencia.

6.3 ELECCIÓN DE LOS PORCENTAJES DE CEMENTO PARA CADA MEZCLA

Para la elección de los porcentajes de cemento para cada diseño de mezcla y procedimiento a efectuarse se toma como referencia lo indicado en las Normas vigentes del Invias del Capítulo E – 612.

6.3.1 Ensayos de Laboratorio

- Ensayo modificado de compactación (Norma INVIAAS Capítulo E-142)
- Relaciones Humedad-Densidad de Mezclas de suelo cemento (Norma INVIAAS Capítulo E-611)
- Preparación y curado de Probetas de Suelo-Cemento para pruebas de compresión (Norma INVIAAS Capítulo E-612)
- Ensayo de Resistencia a la Compresión de Cilindros Moldeados de Suelo – Cemento (Norma INVIAAS Capítulo E- 614)

6.4 REPRESENTACIÓN GRÁFICA, INTERPRETACIÓN DE DATOS DE LABORATORIO Y MODELACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS

Se presentan los resultados de los ensayos realizados. Teniendo en cuenta las características de: Humedad óptima, densidad máxima, valores de resistencia obtenidos en los ensayos de compresión simple.

Con las resistencias a la compresión obtenidas para cada diseño de mezcla, se presentan los valores del módulo de Young aplicando la siguiente fórmula:

Formula de Illinois DOT

$$E(KSI) = 500 + f'c^7$$

$f'c$: Resistencia a compresión ($\frac{lb}{pg^2}$)

Teniendo los parámetros de las mezclas de suelo, se realiza la modelación de los estratos en el Programa Plaxis 3D Foundation variando el espesor y utilizando los parámetros arrojados en los ensayos de laboratorio para cada mezcla.

6.5 REPRESENTACIÓN GRÁFICA Y CONCLUSIONES

Una vez realizados los modelos, se digitalizan los resultados y se generan las gráficas, en las que se ve representado cada diseño de mezcla, el incremento de resistencia en % y los espesores de los estratos de reemplazo.

Con la información obtenida se desarrolla una gráfica normalizada que sirve de consulta a los constructores.

⁷ SÁNCHEZ SABOGAL Fernando. Formula de Illinois DOT

7. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

7.1 ANÁLISIS E IDENTIFICACIÓN DEL SUELO.

El Suelo utilizado proviene del Municipio de Floridablanca, Vereda Helechales, con coordenadas N1272774.068 – E1111404.585, el suelo en este sector corresponde a un limo inorgánico de baja plasticidad, la topografía presenta pendientes cortas y convexas, conforma una amplia gama de pisos térmicos que van del cálido al frío, relieve ligeramente montañoso a escarpado. Los escarpes se han originado por combinación de fenómenos de tectonismo, fallas y erosión geológica.

Fotografía 1. Localización de la extracción de la muestra – Vereda Helechales – Floridablanca - Santander



7.2 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

Se realizaron los siguientes ensayos donde se define la caracterización y propiedades mecánicas del suelo.

Ensayo de humedad, ensayo de granulometría por tamizado, ensayos de límite líquido, límite plástico y clasificación con sistema unificado de clasificación S.U.C.S y AASHTO, obteniendo la siguiente información:

7.2.1 Granulometría

Tabla 2. Granulometría

Granulometría	
Grava%	2.8
Arena%	20.3
Finos%	76.9
Total	100.0

7.2.2 Clasificación del suelo

Tabla 3. Clasificación del Suelo

Clasificación del Suelo	
Límite líquido	35,6
Límite plástico	25,1
Índice de plasticidad	10,6
Humedad Natural	24,5
Índice de grupo	8
AASHTO	A-6
U.S.C	ML

7.2.3 Características del suelo

Tabla 4. Caracterización del suelo

Información muestra inalterada	
Humedad %	24,6
Volumen (cm ³)	197.14
Área (cm ²)	19.71
Peso (gr)	305.6
Altura (cm)	10.0
Diam. Prom (cm)	5.01
γ_h (g/cm ³)	1.55
γ_d (g/cm ³)	1.24
q_u (Kg/cm ²)	0.79
Cu (Kg/cm ³)	0.40
E (MPa)	3525,47

7.3 ELECCIÓN DE LOS PORCENTAJES DE CEMENTO PARA CADA MEZCLA

El cemento utilizado en la mezcla, fue un Cemento Portland Tipo I que cumple con los valores de la norma NTC 121 y 321⁸, Según lo indicado en las Normas vigentes del Invias del Capítulo E-612 que presentan los siguientes contenidos de cemento.

⁸ CEMENTO ARGOS Especificaciones Técnicas

Tabla 5. Contenido de Cemento (%), según la clasificación del Suelo

CLASIFICACIÓN AASHTO	CONTENIDO DE CEMENTO, %
A-1-b (0)	2 3 5
A-4 (5)	3 5 7 10
A-6 (10)	3 5 7 10
A-4 (8)	4 6 8 10

Fuente: Normas INVIAS 2012 Tabla 612-2

Para este proyecto, se tomaron los contenidos de cemento en 5, 7 y 10% correspondientes a mezclas de suelo-cemento para suelos clasificados como A-6 según AASHTO

7.4 ENSAYOS DE LABORATORIO

7.4.1 Ensayo modificado de compactación (Norma INVIAS Capítulo E-142). Se realizó ensayo modificado de compactación para el material natural dando los siguientes resultados:

Tabla 6. Densidad Máxima – Humedad Óptima del suelo

Humedad %	24,6
γ_d (g/cm ³)	1,55

7.4.2 Relaciones Humedad-Densidad de Mezclas de suelo cemento (Norma INVIAS Capítulo E-611). Usando el contenido estimado de cemento, se determina la relación humedad- densidad para cada uno de los diseños de mezcla de suelo cemento mediante el procedimiento del Método A, de lo cual se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 7. Densidad Máxima – Humedad Óptima de las mezclas de Suelo Cemento

Contenido de Cemento	5%	7%	10%
Densidad Máxima (gr/cm³)	1.71	1.66	1.60
Humedad Óptima (%)	21.8	23.8	22.6

7.4.3 Preparación y curado de Probetas de Suelo-Cemento para pruebas de compresión (Norma INVIAS Capítulo E-612). Se preparan las mezclas de suelo-cemento para los ensayos de compresión, las probetas se fabrican utilizando moldes cilíndricos de 101.6mm de diámetro y de 116.4mm de altura para aplicar el procedimiento del Método A, el cual se emplea únicamente para materiales que retienen el 30% o menos del material en el tamiz de 19mm (3/4”).

Se realiza la compactación de las mezclas mediante la aplicación golpes distribuidos uniformemente por capa, en tres capas, aplicadas con la caída libre del martillo con una altura de 305mm por encima del nivel del suelo-cemento. Este proceso se realizó de la siguiente manera:

- Tres especímenes a los que se les aplica la compactación óptima.
- Seis especímenes a los que se les aplica la compactación por debajo de la óptima.

Estos especímenes se realizan de esta manera para analizar el comportamiento de cada situación presentada en cuanto a las deformaciones y resistencia que se obtienen de los diferentes procesos de compactación.

Una vez realizada la compactación, se extraen las probetas de los cilindros y se curan por 7 días antes de realizar las pruebas. Para los ensayos de compresión simple se usarán tres especímenes de acuerdo con ASTM D-1633.

Fotografía 2. Probetas pre moldeadas de suelo cemento



7.4.4 Ensayo de Resistencia a la Compresión de Cilindros Moldeados de Suelo – Cemento (Norma INVIAS Capítulo E- 614). Transcurridos los 7 días de curado, se aplica el ensayo de resistencia a la compresión simple mediante el Método A, dónde los especímenes se fabricaron de acuerdo a la norma Invias Capítulo E-612, una vez curados y sumergidos en agua por 4 horas, se procede a realizar el ensayo utilizando el Banco de Carga Humboldt MH3000.

Fotografía 3. Probeta fallada con mezcla de suelo-cemento al 5%



Fotografía 4. Probeta fallada con mezcla de suelo-cemento al 7%



Fotografía 5. Probeta fallada con mezcla de suelo-cemento al 10%



7.5 REPRESENTACIÓN GRÁFICA, INTERPRETACIÓN DE DATOS DE LABORATORIO

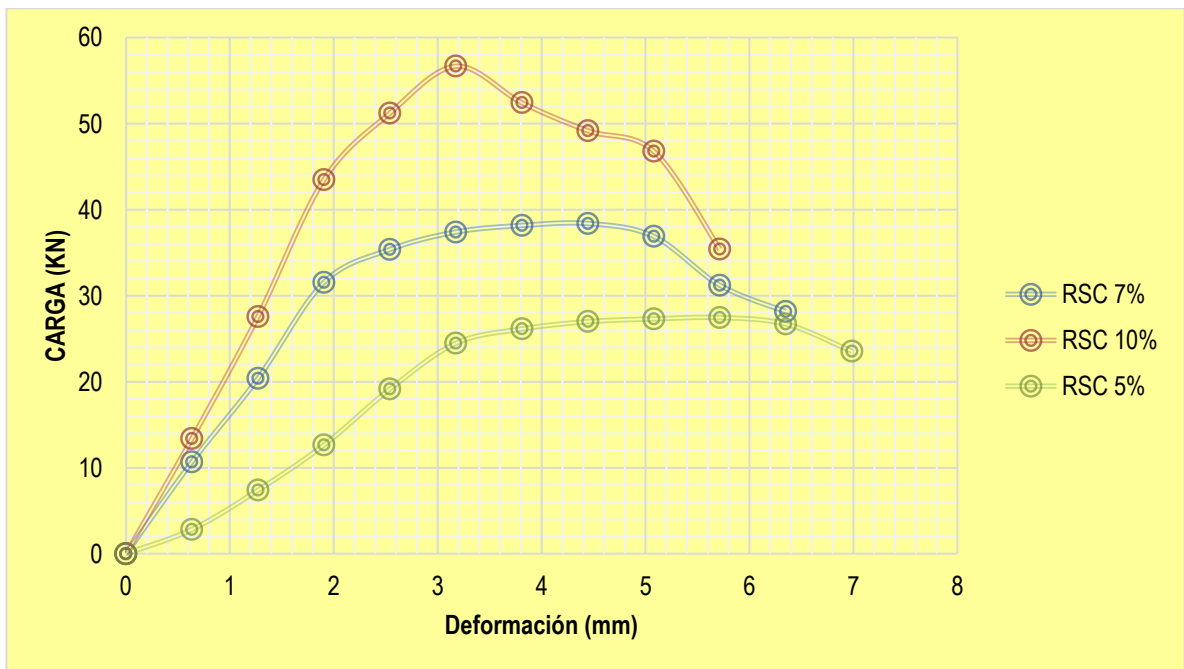
7.5.1 Análisis e interpretación de los resultados de los Ensayos a la Compresión simple en los especímenes de Suelo-Cemento. Con las mediciones de carga y deformación del ensayo de compresión, se obtiene la curva de Carga Vs Deformación del material.

Tabla 8. Resultados de ensayos de compresión de suelo-cemento de carga y deformación controlada con la compactación óptima

		7 DIAS		
0,001"	Deformación	5%	7%	10%
LINEAS	mm	CARGA 1 (KN)	CARGA 2 (KN)	CARGA 3 (KN)
0	0	0	0	0
25	0.635	2.84	10.68	13.39
50	1.27	7.39	20.37	27.57
75	1.905	12.65	31.53	43.49
100	2.54	19.15	35.36	51.23

		7 DIAS		
0,001"	Deformación	5%	7%	10%
LINEAS	mm	CARGA 1 (KN)	CARGA 2 (KN)	CARGA 3 (KN)
125	3.175	24.48	37.39	56.68
150	3.81	26.14	38.15	52.44
175	4.445	26.99	38.38	49.18
200	5.08	27.31	36.88	46.79
225	5.715	27.46	31.21	35.41
250	6.35	26.7	28.15	
275	6.985	23.55		
máx.		27.46	38.38	56.68
ESFUERZO KN/M²		3393.74	4743.33	7005.00

Gráfica 1. Carga Vs Deformación



De los resultados obtenidos de las Gráficas podemos deducir que:

- El comportamiento de la carga, con respecto a la deformación, aumenta a medida que se incrementa el contenido de cemento en las mezclas; se evidencia que el incremento provoca un comportamiento de falla diferente, debido al aumento en la rigidez; como se observa en las gráficas del 10% de relación suelo-cemento.
- La variación en la densidad genera entre un 30% y un 40% de incremento en las resistencias.

7.6 PROCEDIMIENTO DE LA MODELACIÓN

Se realiza la modelación, utilizando los parámetros obtenidos en el ensayo de laboratorio de Resistencia a la Compresión Simple y del ensayo modificado de compactación para las muestras óptimas, elaboradas con los contenidos de cemento de 5%, 7% y 10%; variando los espesores de capa de reemplazo; encontrando los asentamientos para diferentes estratos.

- Parámetros de ingreso al Software Plaxis.

Tabla 9. Propiedades Mecánicas del suelo en su estado natural

Humedad (%)	qu Kg/cm ²	qu lb/pul ²	C (Kg/cm ²)	γ h (g/cm ³)	γ sat (g/cm ³)	v	Φ	E (Mpa)
24.6	0.79	11.24	7.75	1.55	2	0,35	28	3525.47

Tabla 10. Propiedades mecánicas de las mezclas de Suelo-Cemento

% Relación suelo cemento	qu Kg/cm²	qu lb/pul²	γ h (g/cm³)	E (Mpa)
5	27.46	390.64	1.60	6141.79
7	38.38	545.99	1.65	7213.04
10	56.68	806.32	1.70	9008.27

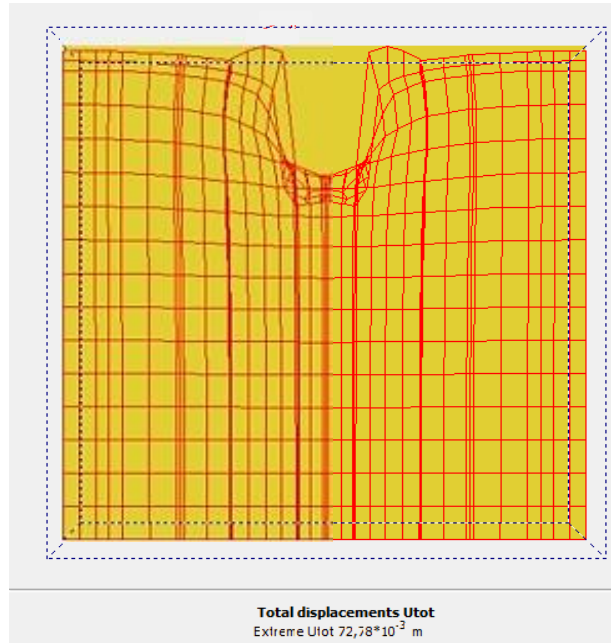
7.6.1 Creación del modelo del suelo natural

- Se pre dimensiona el modelo a 10x10x10m
- Se dimensiona el área de aplicación de la carga
- Se crea el material, ML con los parámetros establecidos
- Se crea la zapata superficial y se asigna el material de concreto
- Se localiza la carga en la zapata
- Se genera la malla 2d y después la 3d

7.6.2 Fase de cálculos

- Se crean dos fases, inicial y de carga
- Se asigna la carga, para el proyecto se aplicará como presión de contacto un valor igual a 200 KN/m², es decir para las zapatas en base 1 se aplica una carga igual a 200KN, para zapatas en base 2 se aplica una carga igual a 800 KN y para zapatas en base 3 una carga igual a 1800 KN
- Se asigna el punto de cálculo para las deformaciones
- Se da inicio al cálculo
- Se revisa el modelo 3d de deformación

Ilustración 1. Comportamiento del suelo en su estado natural



Una vez obtenidos los resultados del modelo del suelo en condiciones naturales, se continua con la modelación para los espesores de estrato de remplazo de 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 1.6, 1.8 y 2.0 m. (Ver anexos)

7.6.3 Creación de los modelos con los diseños de mezcla de suelo-cemento

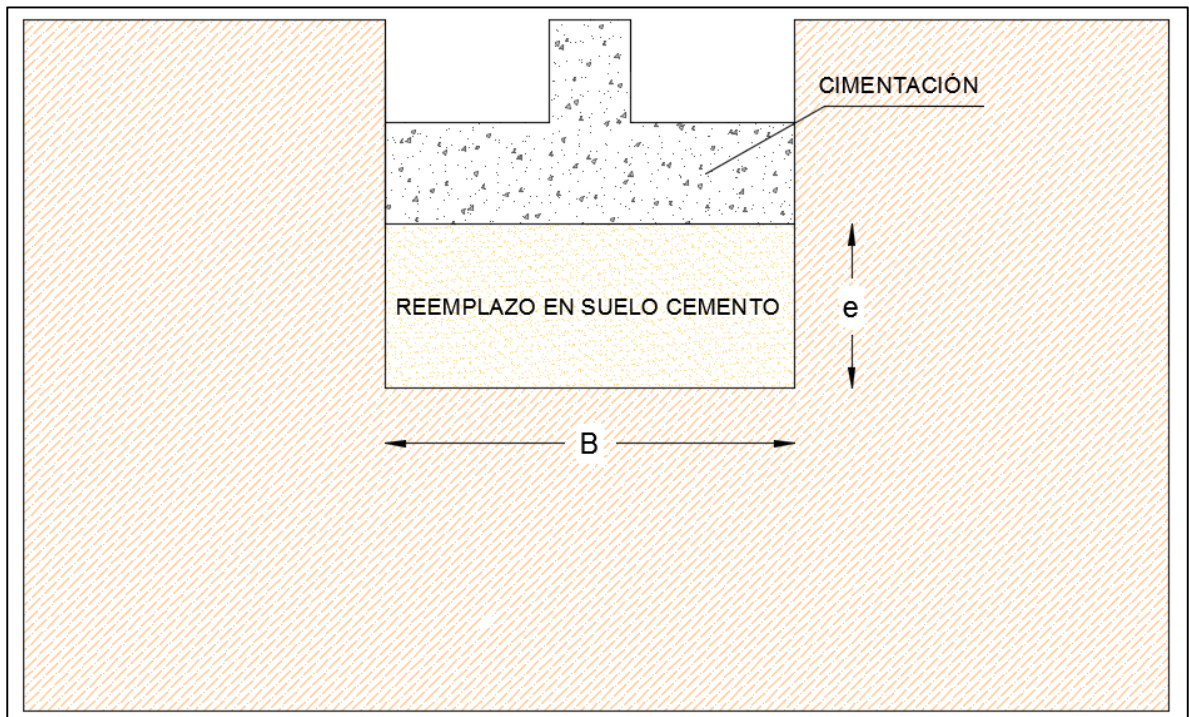
- Se pre dimensiona el modelo a 10x10x10m
- Se dimensiona el área de aplicación de la carga a 1 m²
- Se crean dos material, 1-ML con los parámetros establecidos y 2-suelo cemento al 5%, 7% y 10%
- Se asigna los materiales y se crea el espesor de remplazo
- Se crea la zapata superficial y se asigna el material de concreto
- Se localiza la carga en la zapata
- Se genera la malla 2d y después la 3d

7.6.4 Fase de cálculo

- Se crean dos fases, inicial y de carga
- Se asigna la carga, 200KN (ZAPATAS 1X1m), 800 KN (ZAPATAS 2X2 m) y 1800 KN (ZAPATAS 3X3).
- Se asigna el punto de cálculo para las deformaciones
- Se da inicio al cálculo
- Se revisa el modelo 3d de deformación

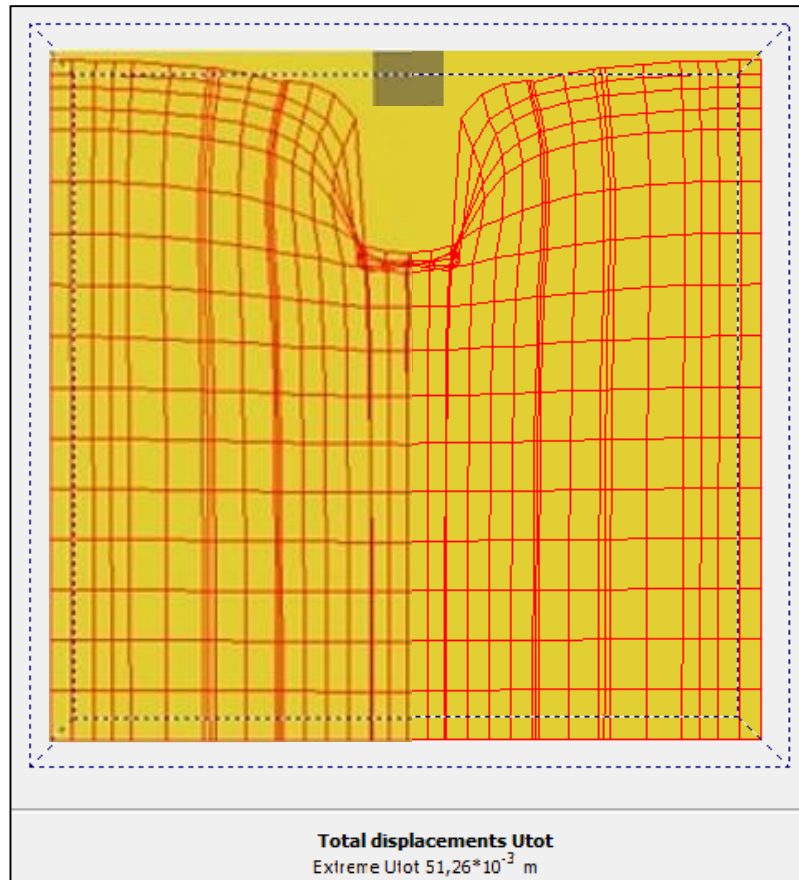
A continuación, se presenta gráficamente el modelo conceptual de la zapata incorporando en el perfil la adición en suelo cemento (ver Ilustración 2)

Ilustración 2. Modelo conceptual de la zapata con el reemplazo en suelo cemento.



En la siguiente figura se ilustra la modelación ejecutada

Ilustración 3. Modelo del estrato de reemplazo para la cimentación.



7.6.5 Resultados de la Modelación. Teniendo en cuenta que el principal propósito de la modelación es obtener los asentamientos para diferentes espesores de mejoramiento en secciones diferentes de zapatas con reemplazos de material variable, en la Tabla 11 el resumen de los resultados obtenidos de la modelación.

Tabla 11. Diseños de mezcla – Capacidad de Carga (Zapata 1m x 1m).

Espesor (cm)	Asentamientos [mm]	Asentamientos [m]
40	65.22	0.0652
60	63.79	0.0638
80	61.56	0.0616
100	59.66	0.0597

Espesor (cm)	Asentamientos [mm]	Asentamientos [m]
120	53.89	0.0539
140	53.28	0.0533
160	53.10	0.0531
180	53.03	0.0530
200	52.48	0.0525
40	62.68	0.0627
60	60.58	0.0606
80	57.36	0.0574
100	55.39	0.0554
120	51.56	0.0516
140	50.72	0.0507
160	50.40	0.0504
180	49.91	0.0499
200	49.51	0.0495
40	60.08	0.0601
60	57.26	0.0573
80	53.91	0.0539
100	51.26	0.0513
120	49.59	0.0496
140	48.61	0.0486
160	48.20	0.0482
180	47.19	0.0472
200	46.72	0.0467

Tabla 12. Diseños de mezcla – Capacidad de Carga (Zapata 2m x 2m).

Espesor (cm)	Asentamientos [mm]	Asentamientos [m]
40	70.06	0.070
60	68.87	0.069
80	68.66	0.069
100	66.34	0.066
120	65.93	0.066
140	65.10	0.065
160	64.77	0.065
180	64.04	0.064
200	63.55	0.064
40	65.18	0.065

Espesor (cm)	Asentamientos [mm]	Asentamientos [m]
60	64.70	0.065
80	64.55	0.065
100	64.11	0.064
120	64.05	0.064
140	63.74	0.064
160	62.55	0.063
180	62.25	0.062
200	62.06	0.062
40	63.99	0.064
60	63.50	0.064
80	62.83	0.063
100	62.09	0.062
120	61.74	0.062
140	61.24	0.061
160	61.03	0.061
180	60.88	0.061
200	60.25	0.060

Tabla 13. Diseños de mezcla – Capacidad de Carga (Zapata 3m x 3m).

Espesor (cm)	Asentamientos [mm]	Asentamientos [m]
40	67.56	0.06756
60	66.90	0.0669
80	66.68	0.06668
100	66.61	0.06661
120	66.56	0.06656
140	66.53	0.06653
160	66.22	0.06622
180	65.92	0.06592
200	65.31	0.06531
40	65.90	0.0659
60	65.42	0.06542
80	65.11	0.06511
100	64.95	0.06495
120	64.72	0.06472
140	64.66	0.06466
160	64.04	0.06404

Espesor (cm)	Asentamientos [mm]	Asentamientos [m]
180	63.77	0.06377
200	63.61	0.06361
40	64.83	0.06483
60	64.34	0.06434
80	63.99	0.06399
100	63.24	0.06324
120	63.14	0.06314
140	63.03	0.06303
160	62.70	0.0627
180	62.26	0.06226
200	61.76	0.06176

Con base en los resultados obtenidos se realiza la representación gráfica del comportamiento de los diseños de mezcla de suelo cemento con respecto a los espesores de los estratos a ser remplazados, que servirá de guía cuando se cuente con la presencia de suelos de características similares en zapatas con sección de 1m x 1m, 2m x 2m y 3m x 3m.

Para la normalización de la gráfica se define incluir en las abscisas la relación existente entre el espesor de mejoramiento y la base de la zapata, mientras que para las ordenadas se establece la relación existente entre las deformaciones, el módulo de elasticidad del suelo y la presión de contacto dispuesta en una respectiva base de zapatas, estas relaciones se observan en las siguientes ecuaciones:

$$Abcisas (x) = \frac{e}{B}$$

$$Ordenadas (y) = \frac{\rho * E}{q * B}$$

Donde:

E: Módulo de elasticidad del suelo [MPa].

e: Espesor del mejoramiento.

B: Base de la zapata.

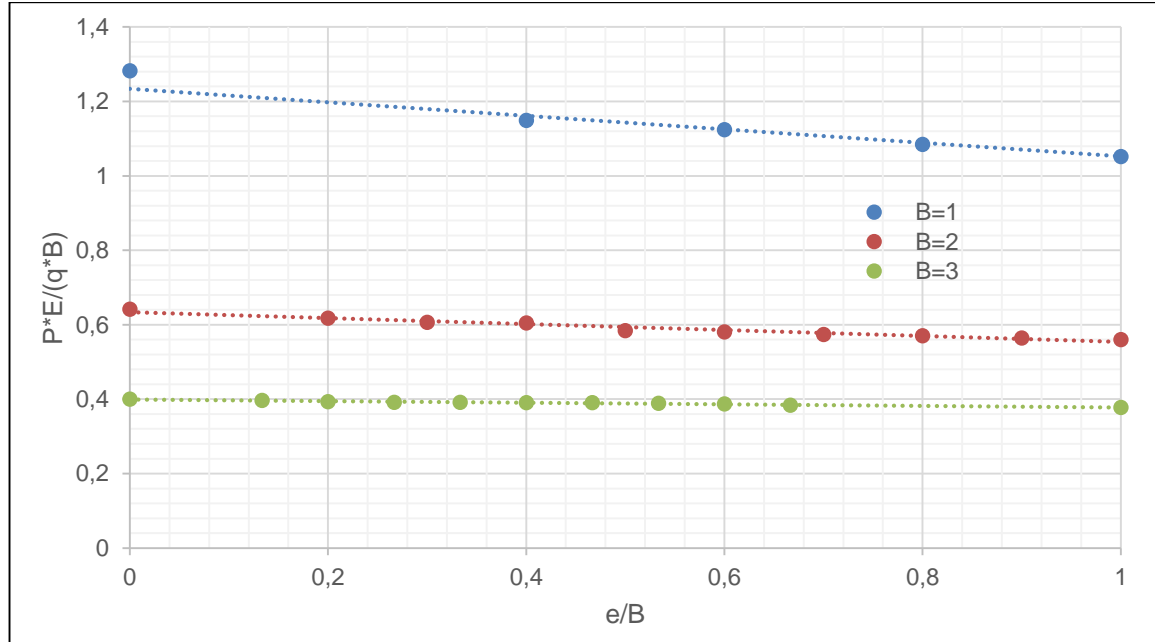
ρ : Asentamientos [m]

q: Presión de contacto [kPa]

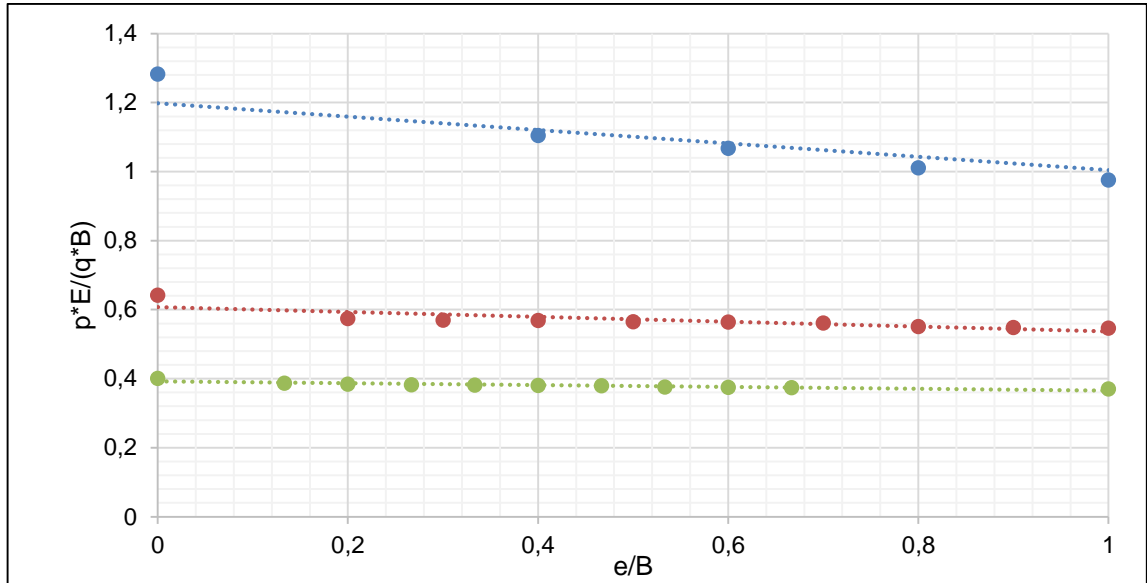
a partir de los resultados obtenidos en las modelaciones en plaxis y las relaciones expuestas anteriormente se realiza la normalización de las gráficas presentada a continuación:

7.6.6 Representación Gráfica

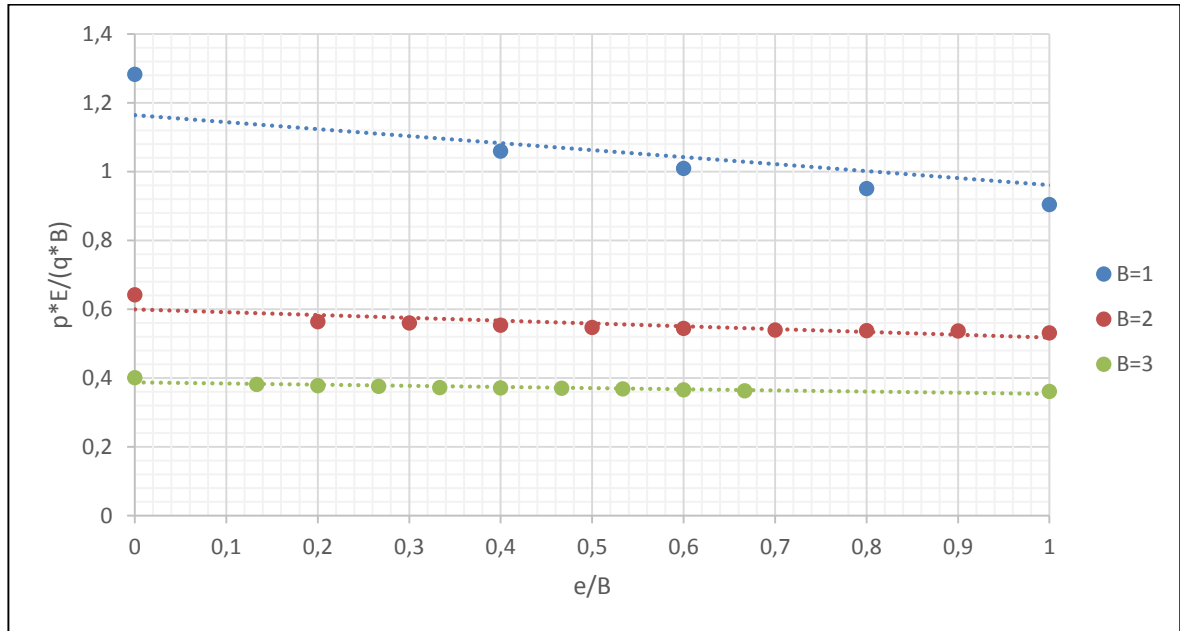
Gráfica 2. Gráfica normalizada para mejoramiento del 5%



Gráfica 3. Gráfica normalizada para mejoramiento del 7%



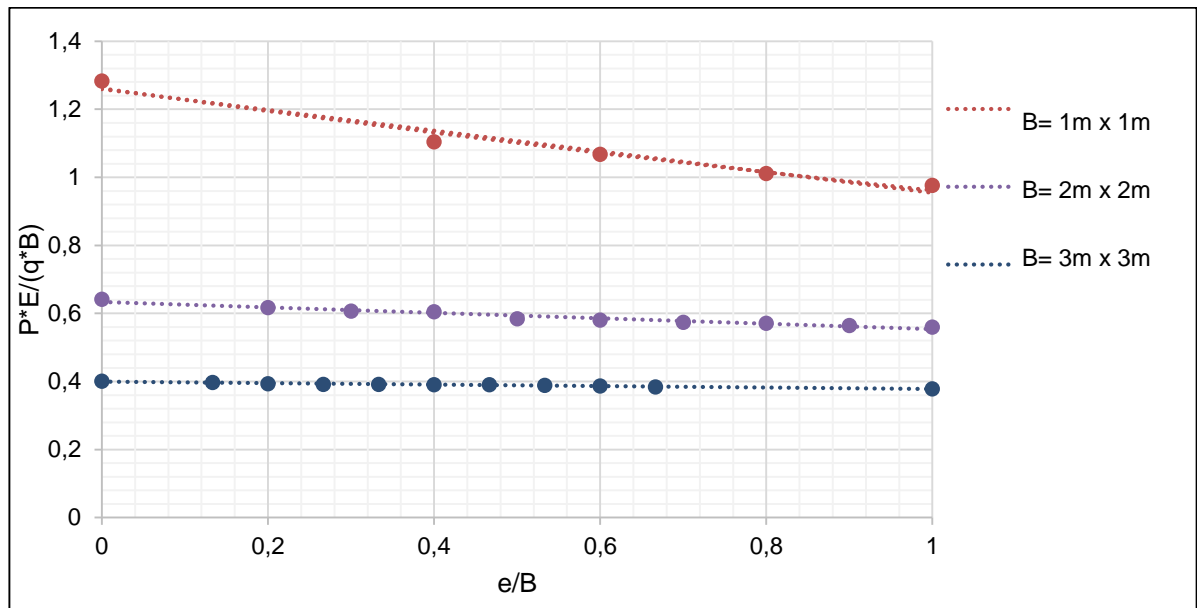
Gráfica 4. Gráfica normalizada para mejoramiento del 10%



Teniendo en cuenta que los resultados obtenidos con mejoramiento del 5%, 7% y 10% presentan una baja dispersión, se propone la integración de los resultados en una gráfica normalizada con los promedios de las deformaciones generalizando la

gráfica para mejoramientos de suelo cemento entre el 5% y el 10%, a continuación, se presenta la gráfica referida.

Gráfica 5. Gráfica normalizada para mejoramiento de suelo cemento variable entre el 5% y el 10%



7.6.5 Ejemplo aplicativo de la gráfica.

A continuación, se expone la aplicación de la gráfica dentro del diseño y construcción de cimentaciones superficiales para edificaciones de categoría baja y categoría media:

Dentro de un proyecto se requiere la construcción de zapatas para la cimentación de su estructura; sin embargo, se cuenta con la limitante de obtener asentamientos máximos de 120 mm debido a que las viviendas contiguas presentan alta susceptibilidad a daños en sus acabados. Con el fin de minimizar costos en concreto el constructor define utilizar mejoramiento en suelo cemento al 5% sin embargo desconoce el espesor que debe utilizar, el suelo donde se cimentará la estructura corresponde a Limos Inorgánicos de baja plasticidad con un módulo de elasticidad

igual a 3525.5 MPa y en el estudio de suelos se define una presión de contacto entre zapata estructura igual a 400 kPa y se recomienda utilizar zapatas con base de 1.0 metro, a continuación se presenta el proceso necesario para obtener este parámetro:

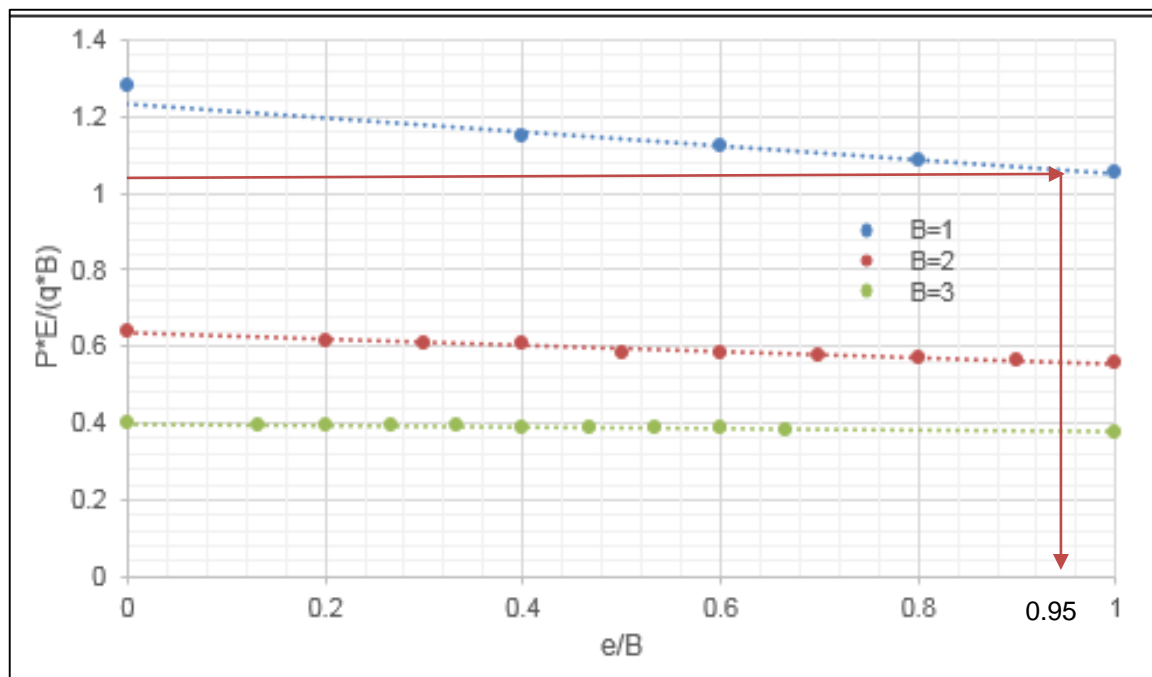
Inicialmente se calcula la relación que debe expresar las ordenadas la cual cuenta con la limitante correspondiente a los asentamientos:

$$\frac{P * E}{q * B} = \frac{0.120 * 3525.5}{400 * 1}$$

$$\frac{P * E}{q * B} = 1.057$$

Con el parámetro de 1.1 aproximado ingresamos a la gráfica buscando la línea de tendencia correspondiente a las zapatas de 1 metro de base:

Gráfica 6. Gráfica normalizada para mejoramiento del 5%



La relación obtenida corresponde a 0.95 es decir que el espesor de mejoramiento necesario corresponde a:

$$\frac{e}{1} = 0.95$$

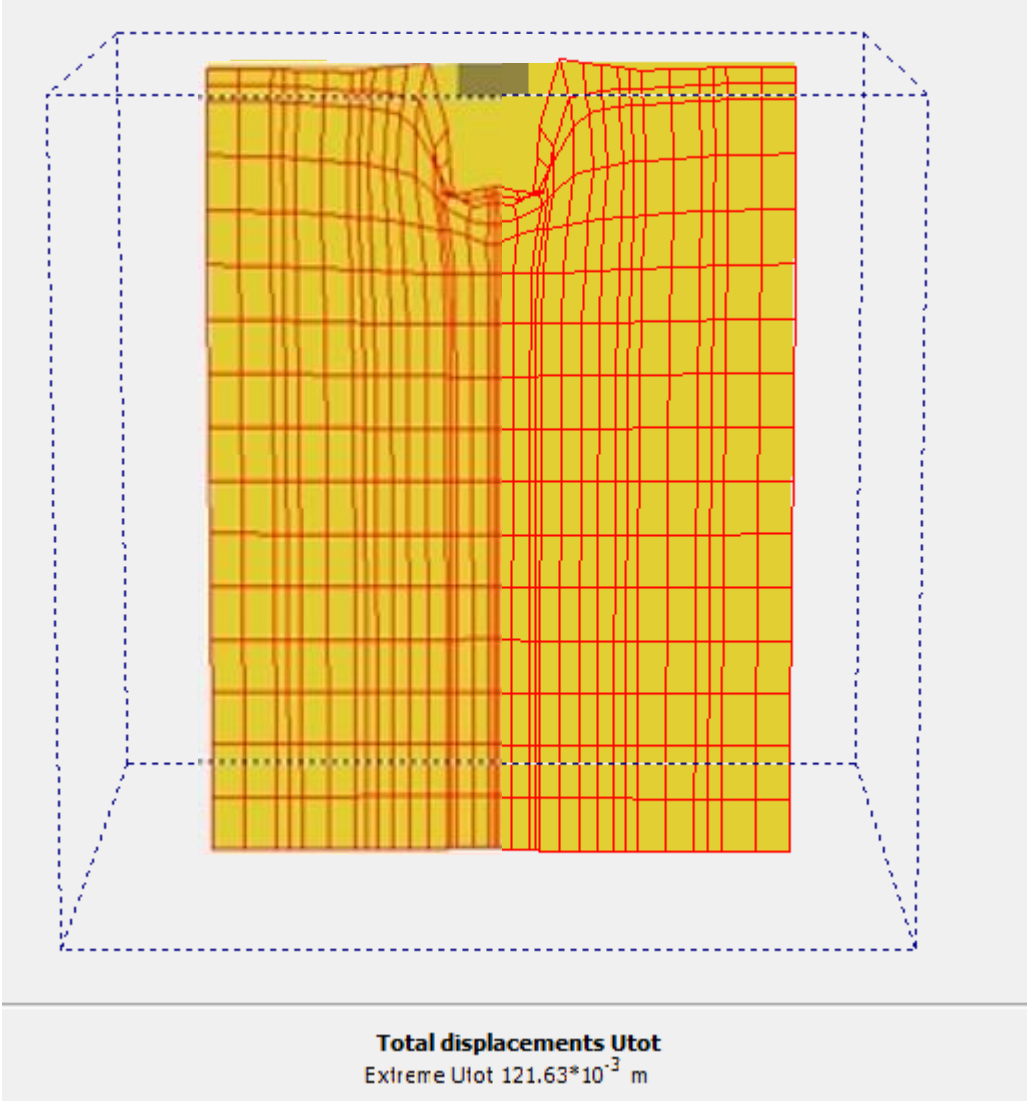
$$e = 0.95 \text{ m}$$

De acuerdo con la gráfica el espesor requerido de suelo cemento al 5% en una zapata de 1 metro de base corresponde a 0.95 metros el cual teóricamente generara asentamientos máximos de 120 mm con una presión de contacto de 400 kPa, con el fin de corroborar esta información se realiza un modelo con elementos finitos ingresando la información suministrada con un mejoramiento en suelo cemento con espesor de 95 mm teniendo en cuenta que la presión de contacto equivale a 400 kPa y la zapata analizada presenta una superficie de 1 m² la carga aplicada en el modelo corresponde a 400 KN, el resultado de los asentamientos se resume en la siguiente figura, en ella se observa que la deformación obtenida en la modelación con elementos finitos corresponde a 121.63 mm, de acuerdo a este resultado se estima el porcentaje de error con el valor obtenido en la gráfica

$$\frac{120\text{mm} - 121.63 \text{ mm}}{120 \text{ mm}} * 100 = 1.36 \%$$

A partir de la modelación se observa que los resultados de la gráfica presentan un porcentaje de error aproximado del 1.36%, siendo este un margen tolerable para aplicación de la gráfica normalizada.

Gráfica 7. Resultado del modelo de elementos finitos para el ejemplo aplicativo



8. CONCLUSIONES

- De los resultados obtenidos se observa que, al aumentar el espesor de la capa de reemplazo para todos los diseños de mezcla, se disminuyen proporcionalmente los asentamientos obtenidos.
- En las gráficas se observa que la relación entre la deformación y la base de la zapata disminuye al aumentar las dimensiones de la cimentación.
- Las gráficas permiten no solamente conocer el espesor reemplazo requerido en cada caso particular, también es útil para evaluar los asentamientos aproximados en una estructura con mejoramiento en suelo cemento.
- Al incorporar suelo cemento como mejoramiento, los asentamientos disminuyen significativamente ocasionando una disminución en secciones de cimentación.
- El método propuesto es recomendado para suelos principalmente finos con bajas plasticidades y bajo estructuras de categoría media y baja.

BIBLIOGRAFÍA

BERRY Peter L. REID David. Mecánica de suelos. McGraw-Hill

BRAJA M. Das. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. Edit. International Thomson, 7ma Edición

CIVIL GEEKS Guía para la Estabilización de Suelos. [en línea] disponible en: <http://civilgeeks.com/2015/06/27/guia-la-estabilizacion-suelos/>

COPERNICO Módulo 7. Materiales para base y subbase. [en línea] disponible en: http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%207.pdf

DE LA FUENTE LAVALLE Eduardo. Suelo-Cemento sus usos, propiedades y aplicaciones M en I. Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto. 1995

Geotecnia I, Segunda Parte, Departamento de Construcciones Civiles, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. 2013

Norma INVIAS 2012, Sección 600, Capítulos E-611, E-612, E-613, E-614

Revista del ISCYC No 15. Sección: Propiedades de los suelos mejorados y suelocemento [en línea] disponible en: https://issuu.com/bibliotecaiscyc/docs/revista_15

SÁNCHEZ SABOGAL Fernando. Formula de Illinois DOT: Presentación Materiales para base y Sub-base.

SOWERS George B. Introducción a la Mecánica de suelos y Cimentaciones. México: Edit. Limusa-Wiley, S.A, 1972

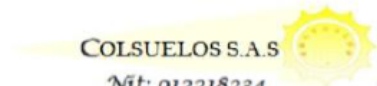
UNIVERSIDAD DEL CAUCA Capítulo 5. Distribución de esfuerzos en el suelo debido a cargas. [en línea] disponible en: ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Geotecnia/profesor_lucio_cruz/Curso%20Fundaciones/Capitulos%20del%20no%20nacido%20Libro/Cap%EDtulo%2005%20%20Distribuci%F3n%20de%20esfuerzos%20en%20el%20suelo%20debido%20a%20cargas.pdf

ANEXOS

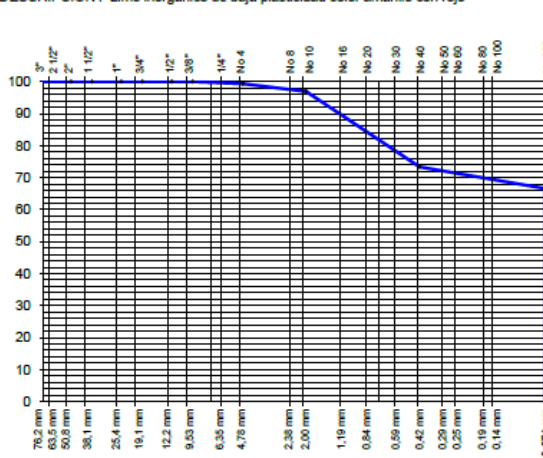
ANEXO A. ENSAYO DE LABORATORIO

1. ENSAYOS DE LABORATORIO

1.1 Clasificación de Suelos

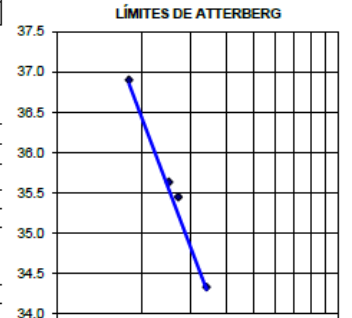
 <p>COLSUELOS S.A.S Nít: 912218234</p>	CLASIFICACIÓN DE SUELOS (PASA 200 - ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS - LIMITE LIQUIDO - LIMITE PLASTICO)	CÓD. <u>PP-001</u> FECHA ENSAYO: <u>12-dic-16</u>

EMPRESA : PROYECTO DE GRADO ADRIANA CAROLINA GRASS
 SONDEO : -
 PROFUNDIDAD : -
 DESCRIPCIÓN : Limo inorgánico de baja plasticidad color amarillo con rojo



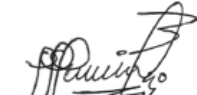
GRADACIÓN			
PESO INICIAL (gr): 407.6			
TAMIZ	PERO	% RETENIDO	% PASA
No			
3"	0.0	0.0	100.0
2"	0.0	0.0	100.0
1 1/2"	0.0	0.0	100.0
1"	0.0	0.0	100.0
3/4"	0.0	0.0	100.0
1/2"	0.0	0.0	100.0
3/8"	4.3	1.1	98.9
No 4	7.0	1.7	97.2
10	7.5	1.8	95.4
40	57.0	14.0	81.4
200	18.3	4.5	78.9
200	313.5	76.9	0.0

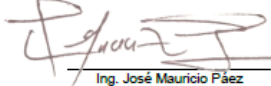
LÍMITES DE ATTERBERG				
LÍMITE LIQUIDO				
No GOLPES	34	27	18	
P ₁ (gr)	25.12	24.00	23.70	
P ₂ (gr)	20.88	19.92	19.56	
P ₃ (gr)	8.53	8.41	8.34	
% HUMEDAD	34.3	35.4	36.9	
LÍMITE PLÁSTICO				
				w. Nral
P ₁ (gr)	14.05	13.44		117.70
P ₂ (gr)	12.88	12.43		101.30
P ₃ (gr)	8.20	8.41		34.60
% HUMEDAD	25.0	25.1		24.6



OBSERVACIONES:

GRAVA %	2.8
ARENA %	20.3
FINOS %	76.9
TOTAL	100.0

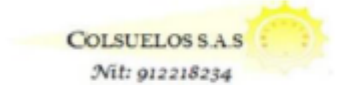

 Jose Vicerly Páez
 Laboratorista


 Ing. José Mauricio Páez
 Revisó

CLASIFICACIÓN

ÍNDICE DE GRUPO: 8
 A A S H T O : A - 6
 U. S. C. : ML

1.2 Ensayos modificado de compactación Muestra de Suelo Natural

	ENSAYO DE COMPACTACIÓN EN LABORATORIO EQUIPO MODIFICADO Norma I.N.V. E-142		COD: <u>CPR-01</u>
			FECHA: <u>15-dic-16</u>

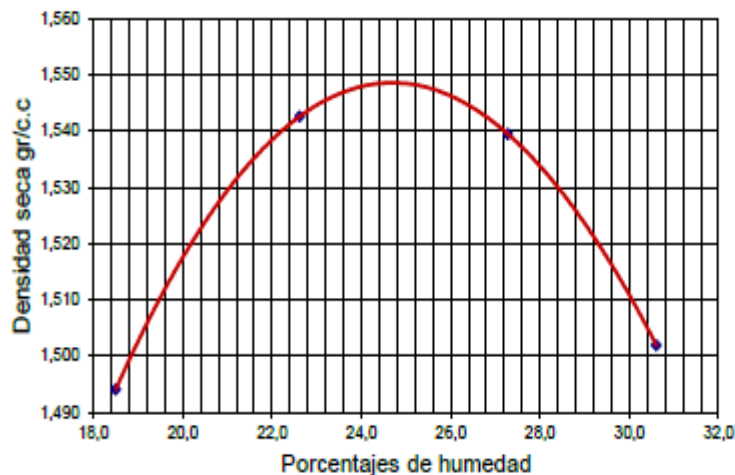
EMPRESA: Proyecto de Grado Adriana Grass

APIQUE: -

MATERIAL: Limo Inorgánico de baja a mediana plasticidad

DENSIDAD	PESO MOLDE + SUELO COMPACTADO (gr)	5781	5895	5959	5981
	PESO MOLDE (gr)	4113	4113	4113	4113
	PESO SUELO COMPACTADO (gr)	1668,0	1782,0	1848,0	1848,0
	VOLUMEN DEL MOLDE (c.c.)	942,1	942,1	942,1	942,1
	DENSIDAD HÚMEDA (gr/c.c.)	1,771	1,892	1,959	1,962
	DENSIDAD SECA (gr/c.c.)	1,494	1,543	1,539	1,502
HUMEDAD	TARA No				
	PESO SUELO HUMEDA + TARA (gr)	119,1	115,3	118,2	105,2
	PESO SUELO SECO + TARA (gr)	101,3	95,1	94,0	82,0
	PESO TARA (gr)	5,1	5,8	5,3	6,2
	PESO AGUA (gr)	17,8	20,2	24,2	23,2
	PESO SUELO SECO (gr)	96,2	89,3	88,7	75,8
	HUMEDAD (%)	18,5	22,8	27,3	30,8

PROCTOR MODIFICADO



TIPO DE ENSAYO

PROCTOR MODIFICADO

VOL. MOLDE: 942,1 c.c.
 PESO MART.: 10 lb
 No CAPAS: 5
 H. CAIDA: 18"
 No GOLPES: 25

ENSAYO SOBRE MATERIAL

PASA TAMIZ: 3/4"

RESULTADOS:

D. SECA MÁX.: 1,550 gr/cm³
 % HUM. OPT.: 24,6

OBSERVACIONES:

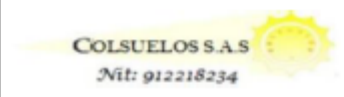


LABORATORISTA: LUIS ERNESTO PÁEZ

REVISÓ: ING. MÓNICA JOHANNA CASTRO

LABORATORIO DE CONCRETOS, SUELOS, RODAS Y PAVIMENTOS - CALLE 204 B 40-18 ANZO (FLORIDABLANCA) - 318678403 ; 6488067

1.3 Ensayos modificado de compactación Suelo-Cemento al 5%

	ENSAYO DE COMPACTACIÓN EN LABORATORIO EQUIPO MODIFICADO Norma I.N.V. E- 611	COD: <u>CPR-01</u>
		FECHA: <u>15-dic-16</u>

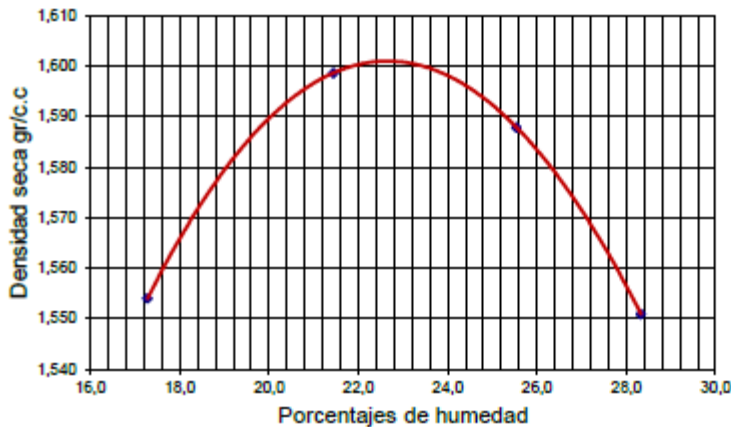
EMPRESA: Proyecto de Grado Adriana Grass

APIQUE: -

MATERIAL: Suelo-Cemento 5%

DENSIDAD	PESO MOLDE + SUELO COMPACTADO (gr)	5830	5942	5991	5988
	PESO MOLDE (gr)	4113	4113	4113	4113
	PESO SUELO COMPACTADO (gr)	1717,0	1829,0	1878,0	1875,0
	VOLUMEN DEL MOLDE (c.c.)	942,1	942,1	942,1	942,1
	DENSIDAD HÚMEDA (gr/c.c.)	1,823	1,941	1,993	1,990
HUMEDAD	DENSIDAD SECA (gr/c.c.)	1,554	1,599	1,588	1,551
	TARA No				
	PESO SUELO HUMEDA + TARA (gr)	134,5	128,3	129,3	130,1
	PESO SUELO SECO + TARA (gr)	116,2	107,2	104,7	103,3
	PESO TARA (gr)	10,3	8,8	8,4	8,7
	PESO AGUA (gr)	18,3	21,1	24,6	26,8
	PESO SUELO SECO (gr)	105,9	98,4	96,3	94,6
	HUMEDAD (%)	17,3	21,4	25,5	28,3

PROCTOR MODIFICADO



TIPO DE ENSAYO

PROCTOR MODIFICADO

VOL. MOLDE: 942,1 c.c.
 PESO MART.: 10 lb
 No CAPAS: 5
 H. CAIDA: 18 "
 No GOLPES: 25

ENSAYO SOBRE MATERIAL

PASA TAMIZ: 3 / 4 "

RESULTADOS:

D. SECA MAX.: 1,602 gr/cm³
 % HUM. OPT.: 22,8

OBSERVACIONES:

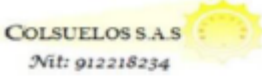


LABORATORISTA: LUIS ERNESTO PÁEZ

REVISÓ: ING. MÓNICA JOHANNA CASTRO

LABORATORIO DE CONCRETOS, SUELOS, RODAS Y PAVIMENTOS - CALLE 294 B 40-19 ANDES (FLORIDABLANCA) - 318878403 ; 8488087

1.4 Ensayos modificado de compactación Suelo-Cemento al 7%

 COLSUELOS S.A.S Nit: 912218234	ENSAYO DE COMPACTACIÓN EN LABORATORIO EQUIPO MODIFICADO Norma I.N.V. E-611	COD: <u>CPR-01</u>
		FECHA: <u>15-dic-16</u>

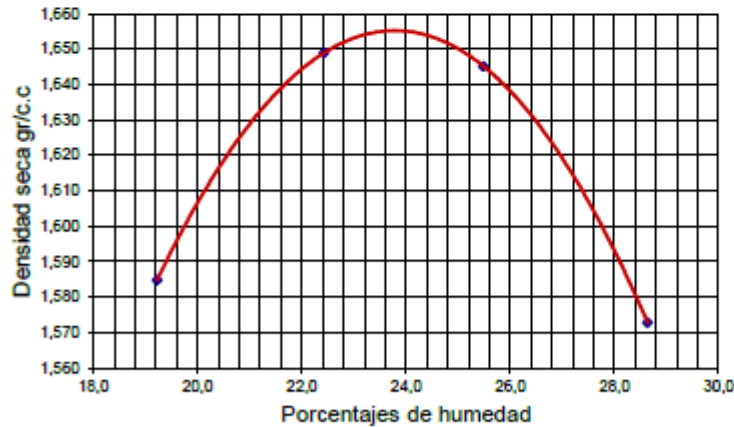
EMPRESA: Proyecto de Grado Adriana Grass

APIQUE: -

MATERIAL: Suelo-Cemento 7%

DENSIDAD	PESO MOLDE + SUELO COMPACTADO (gr)	5893	6015	6058	6019
	PESO MOLDE (gr)	4113	4113	4113	4113
	PESO SUELO COMPACTADO (gr)	1780,0	1902,0	1945,0	1906,0
	VOLUMEN DEL MOLDE (c.c.)	942,1	942,1	942,1	942,1
	DENSIDAD HUMEDA (gr/c.c.)	1,889	2,019	2,065	2,023
DENSIDAD SECA (gr/c.c.)	1,585	1,649	1,645	1,573	
HUMEDAD	TARA No				
	PESO SUELO HUMEDA + TARA (gr)	158,3	194,2	145,4	148,9
	PESO SUELO SECO + TARA (gr)	134,6	160,6	117,8	118,0
	PESO TARA (gr)	11,3	10,8	9,5	10,1
	PESO AGUA (gr)	23,7	33,6	27,6	30,9
	PESO SUELO SECO (gr)	123,3	149,8	108,3	107,9
	HUMEDAD (%)	19,2	22,4	25,5	28,6

PROCTOR MODIFICADO



TIPO DE ENSAYO

PROCTOR MODIFICADO

VOL MOLDE: 942,1 c.c.
 PESO MART: 10 lb
 No CAPAS: 5
 H. CALDA: 18 "
 No GOLPES: 25

ENSAYO SOBRE MATERIAL

PASA TAMIZ: 3 / 4 "

RESULTADOS:

D. SECA MÁX.: 1,655 gr/cm³
 % HUM. OPT.: 23,8

OBSERVACIONES:

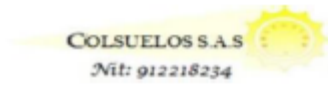


LABORATORISTA: LUIS ERNESTO PÁEZ

REVISÓ: ING. MÓNICA JOHANNA CASTRO

LABORATORIO DE CONCRETOS, SUELOS, RIGAS Y PAVIMENTOS - CALLE 294 B 40-19 ANDES (FLORIDABLANCA) - 318676403 ; 8488987

1.5 Ensayos modificado de compactación Suelo-Cemento al 10%

 <p>COLSUELOS S.A.S Nit: 912218234</p>	<p>ENSAYO DE COMPACTACIÓN EN LABORATORIO EQUIPO MODIFICADO Norma I.N.V. E-611</p>	COD: <u>CPR-01</u>
		FECHA: <u>15-dic-16</u>

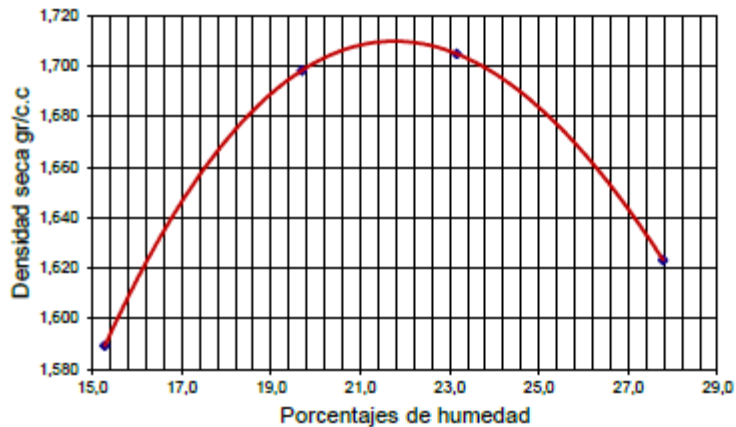
EMPRESA: Proyecto de Grado Adriana Grass

APIQUE: -

MATERIAL: Suelo-Cemento 10%

DENSIDAD	PESO MOLDE + SUELO COMPACTADO (gr)	5839	6028	6091	6067
	PESO MOLDE (gr)	4113	4113	4113	4113
	PESO SUELO COMPACTADO (gr)	1726,0	1915,0	1978,0	1954,0
	VOLUMEN DEL MOLDE (c.c.)	942,1	942,1	942,1	942,1
	DENSIDAD HUMEDA (gr/c.c.)	1,832	2,033	2,100	2,074
DENSIDAD SECA (gr/c.c.)	1,589	1,698	1,705	1,623	
HUMEDAD	TARA No				
	PESO SUELO HUMEDA + TARA (gr)	164,9	168,5	151,6	163,7
	PESO SUELO SECO + TARA (gr)	144,7	142,7	125,5	130,7
	PESO TARA (gr)	12,5	11,7	12,8	11,9
	PESO AGUA (gr)	20,2	25,8	26,1	33,0
	PESO SUELO SECO (gr)	132,2	131,0	112,7	118,8
	HUMEDAD (%)	15,3	19,7	23,2	27,8

PROCTOR MODIFICADO



TIPO DE ENSAYO

PROCTOR MODIFICADO

VOL. MOLDE: 942,1 c.c.
 PESO MART.: 10 lb
 No CAPAS: 5
 H. CAÍDA: 18"
 No GOLPES: 25

ENSAYO SOBRE MATERIAL

PASA TAMIZ: 3/4"

RESULTADOS:

D. SECA MÁX.: 1,710 gr/cm³
 % HUM. OPT.: 21,8

OBSERVACIONES:



LABORATORISTA: LUIS ERNESTO PÁEZ

REVISÓ: ING. MÓNICA JOHANNA CASTRO

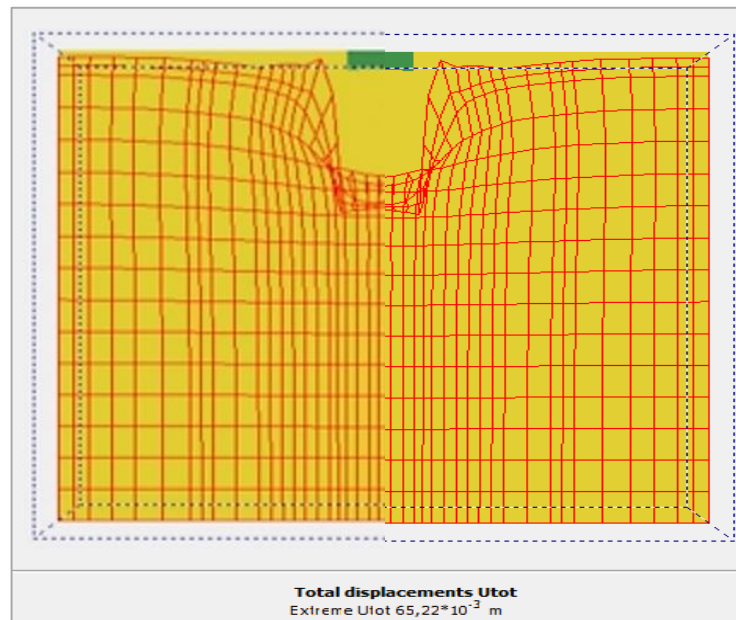
LABORATORIO DE CONCRETOS, SUELOS, RODAJ Y PAVIMENTOS - CALLE 204 B 40-19 ANDES (FLORIDABLANCA) - 31887403 ; 8488067

Anexo B. Modelos Plaxis 3D Foundation

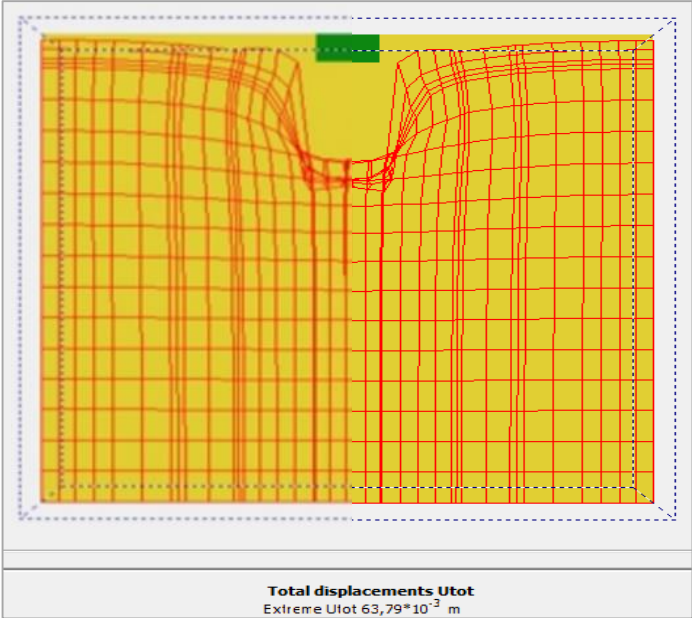
2. Modelos Plaxis 3D Foundation para zapatas con sección (1m x 1m)

2.1 Modelos con mezcla de suelo-cemento del 5% de contenido de cemento

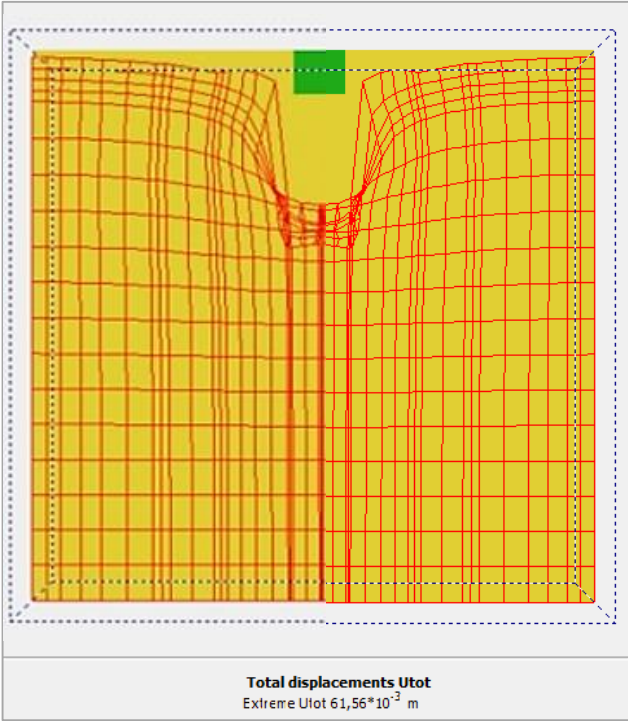
2.1.1 *Espesor de estrato de remplazo de 0.4m*



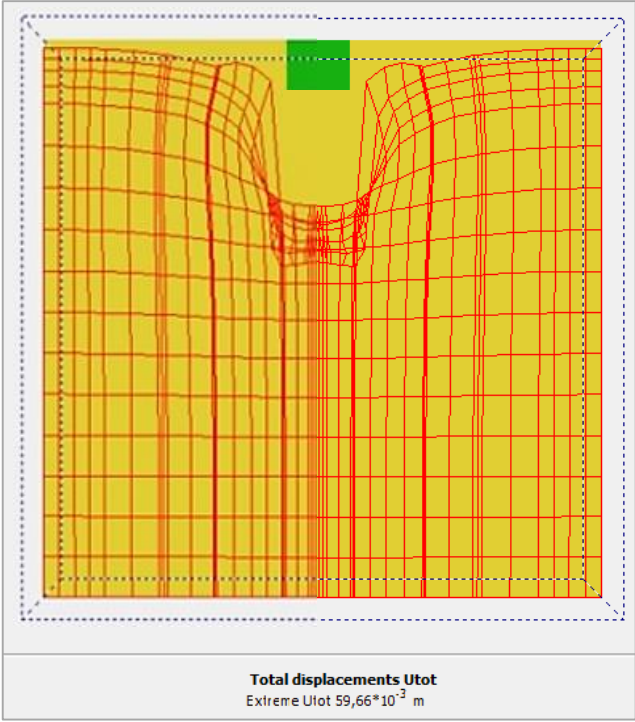
2.1.2 *Espesor de estrato de remplazo de 0.6m*



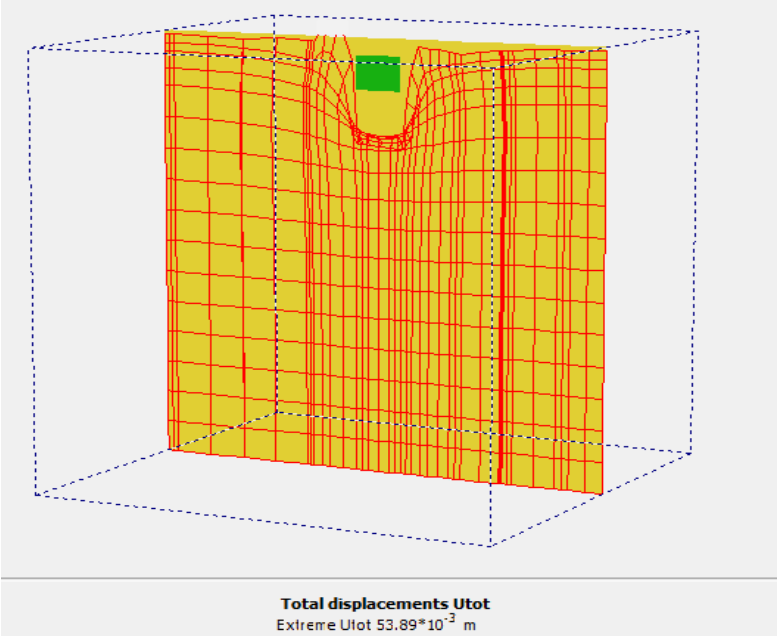
2.1.3 *Espesor de estrato de remplazo de 0.8m*



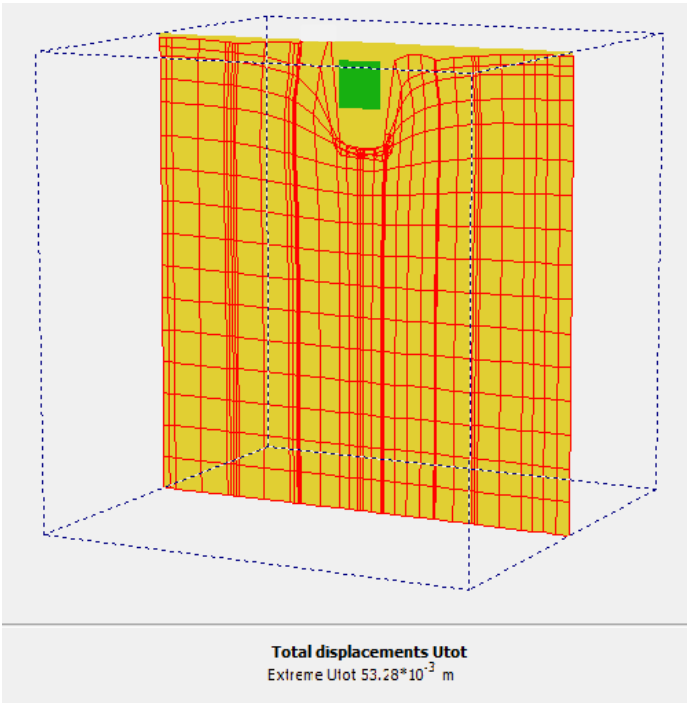
2.1.4 *Espesor de estrato de remplazo de 1.0m*



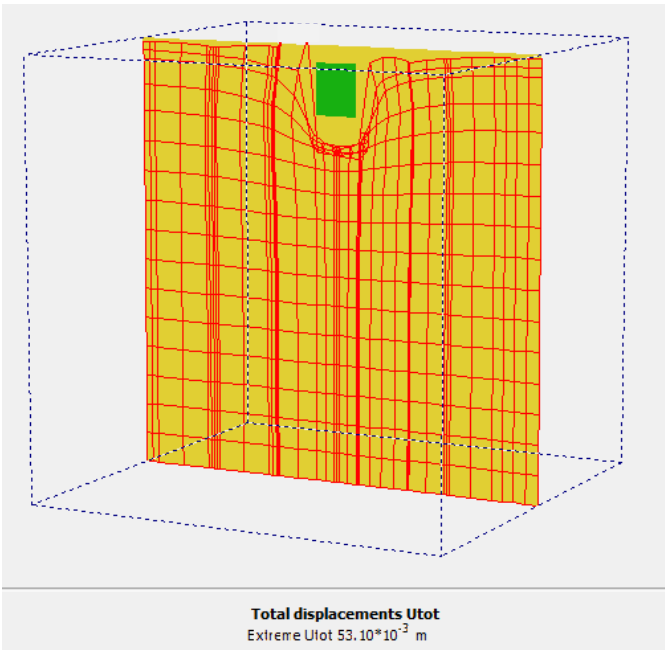
2.1.5 *Espesor de estrato de remplazo de 1.2m*



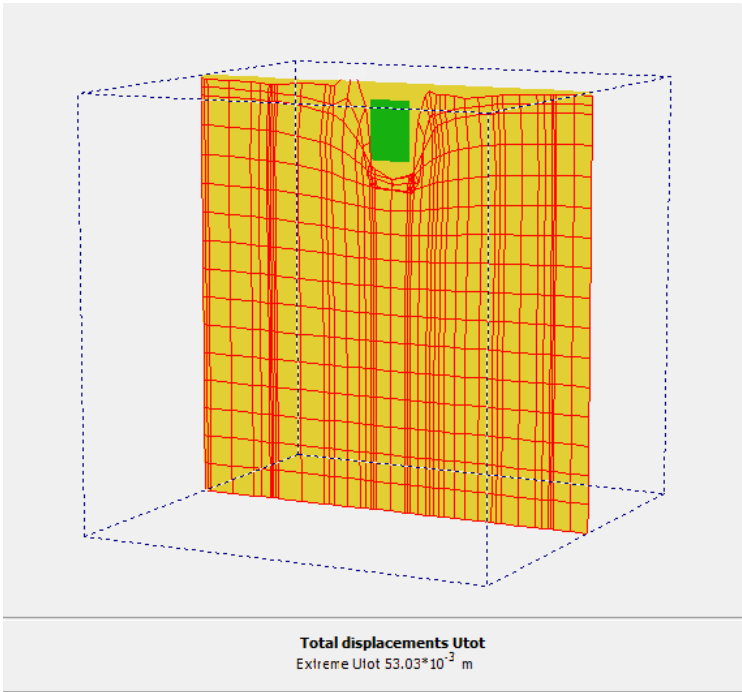
2.1.6 *Espesor de estrato de remplazo de 1.4m*



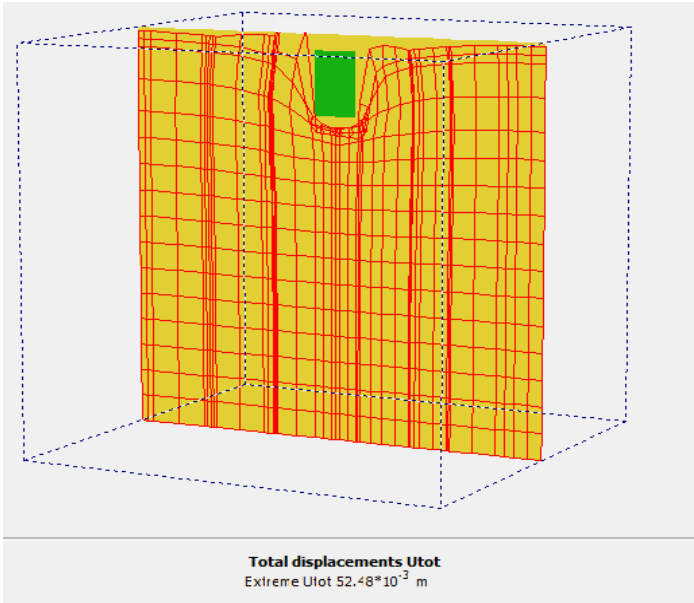
2.1.7 *Espesor de estrato de remplazo de 1.6m*



2.1.8 *Espesor de estrato de remplazo de 1.8 m*

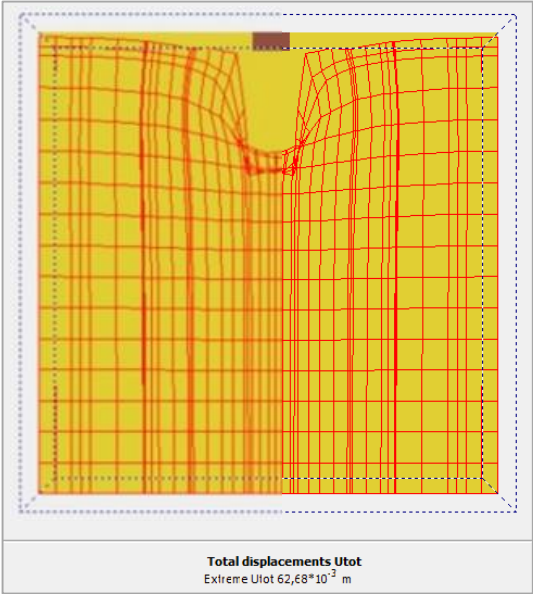


2.1.9 *Espesor de estrato de remplazo de 2.0 m*

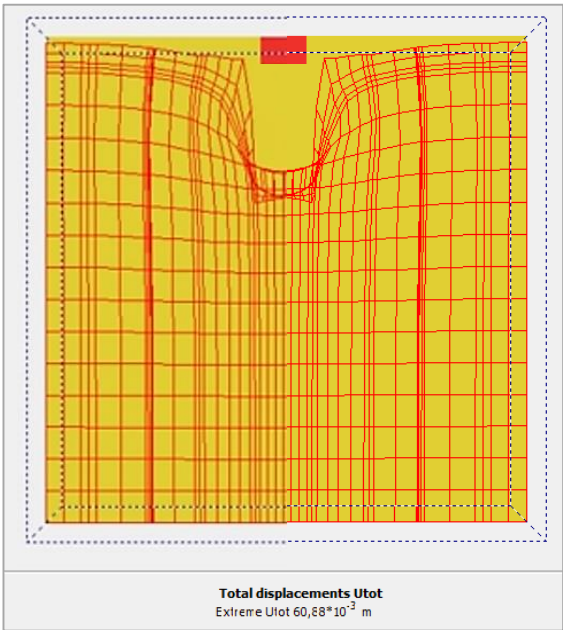


2.2 Modelos con mezcla de suelo-cemento del 7% de contenido de cemento

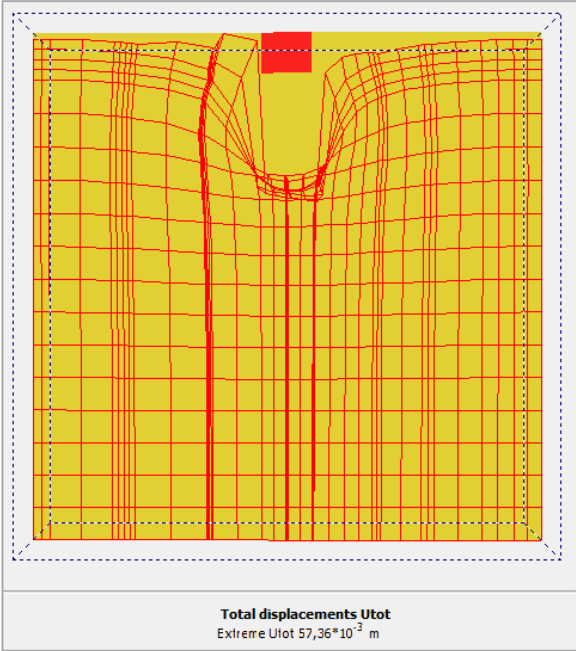
2.2.1 *Espesor de estrato de remplazo de 0.4m*



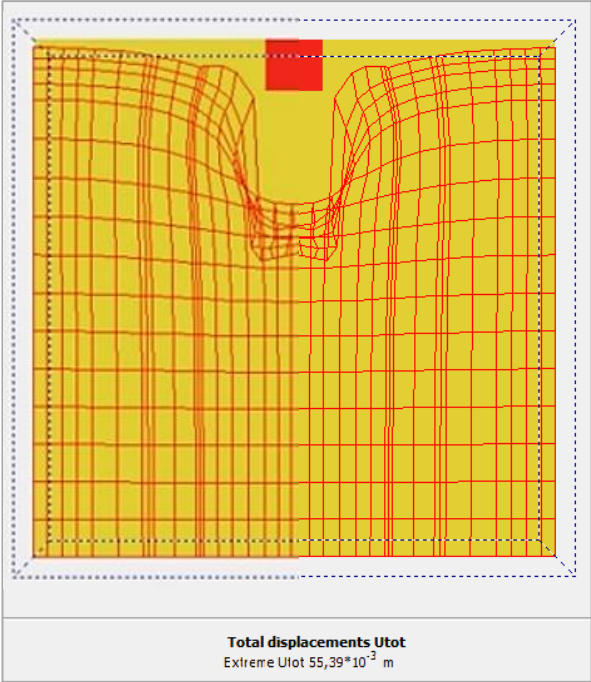
2.2.2 *Espesor de estrato de remplazo de 0.6m*



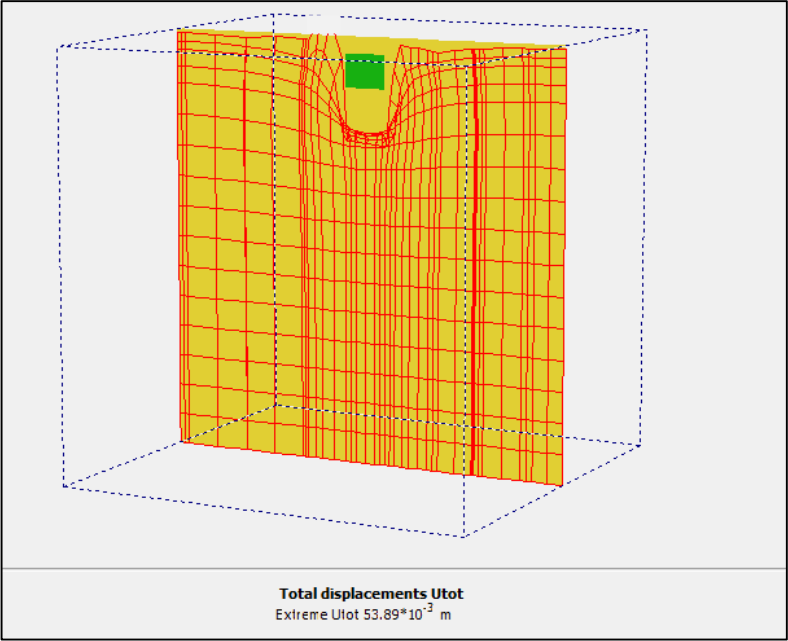
2.2.3 *Espesor de estrato de remplazo de 0.8m*



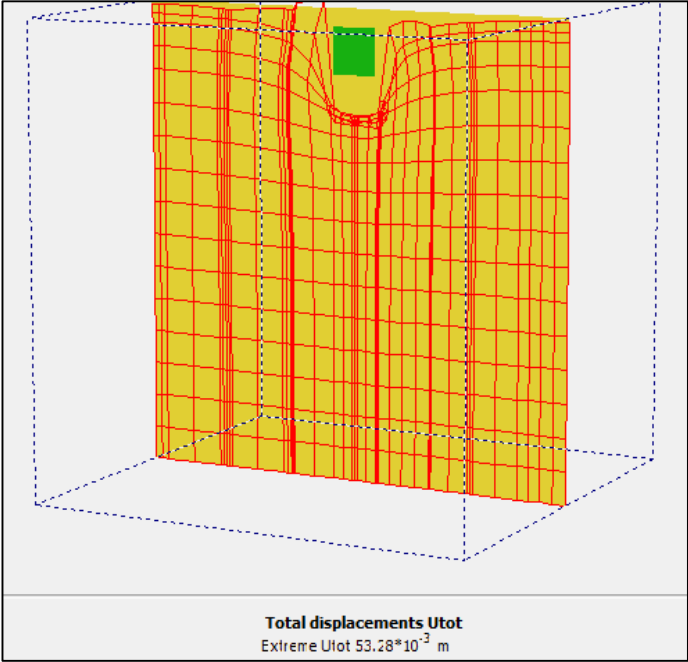
2.2.4 *Espesor de estrato de remplazo de 1.0m*



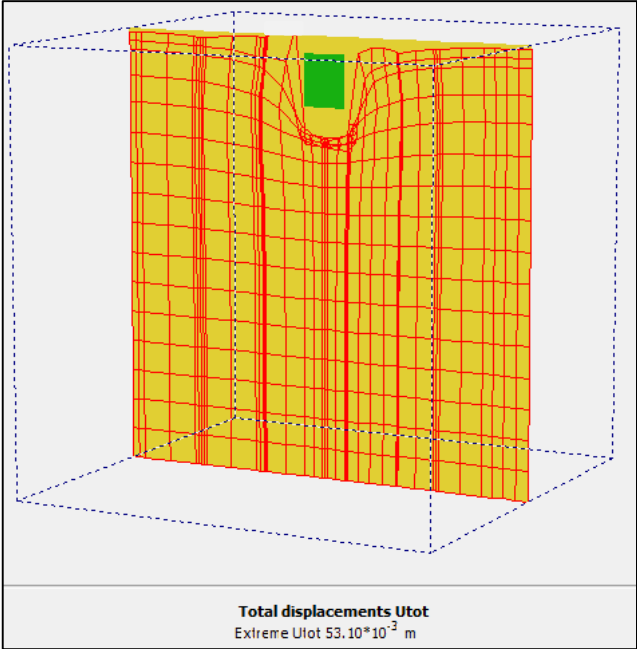
2.2.5 *Espesor de estrato de remplazo de 1.2m*



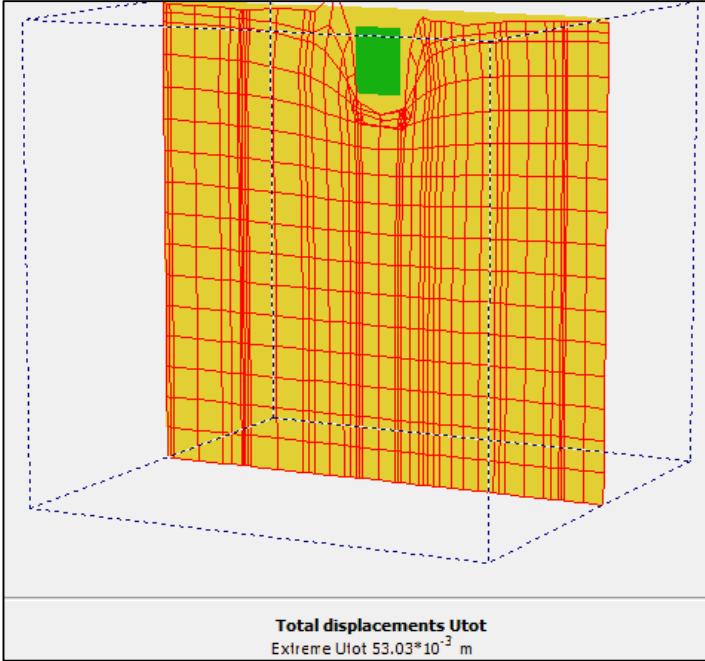
2.2.6 *Espesor de estrato de remplazo de 1.4m*



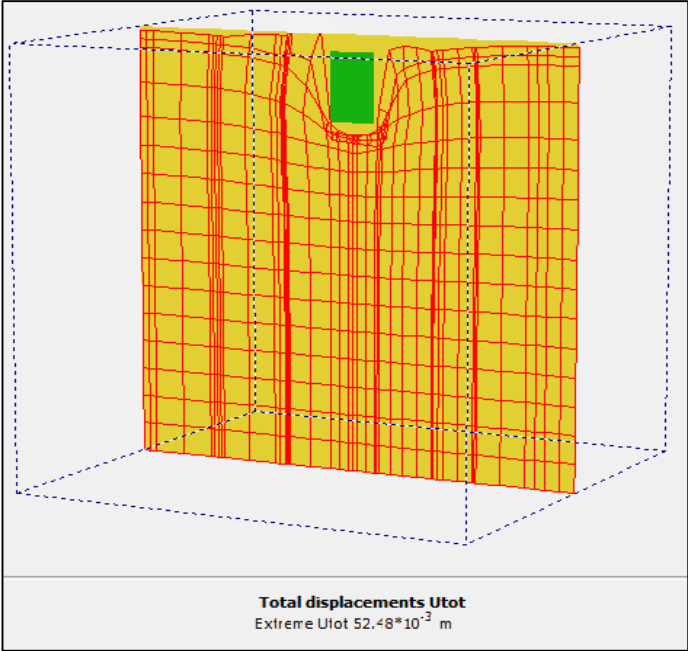
2.2.7 *Espesor de estrato de remplazo de 1.6m*



2.2.8 *Espesor de estrato de remplazo de 1.8m*

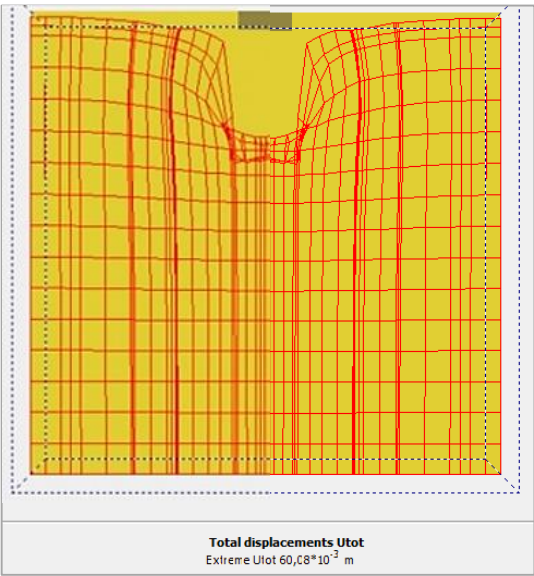


2.2.9 *Espesor de estrato de remplazo de 2.0 m*

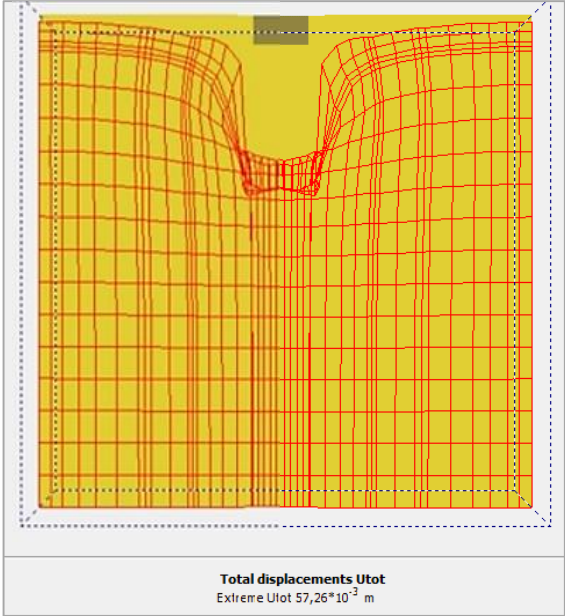


2.3 Modelos con mezcla de suelo-cemento del 10 % de contenido de cemento

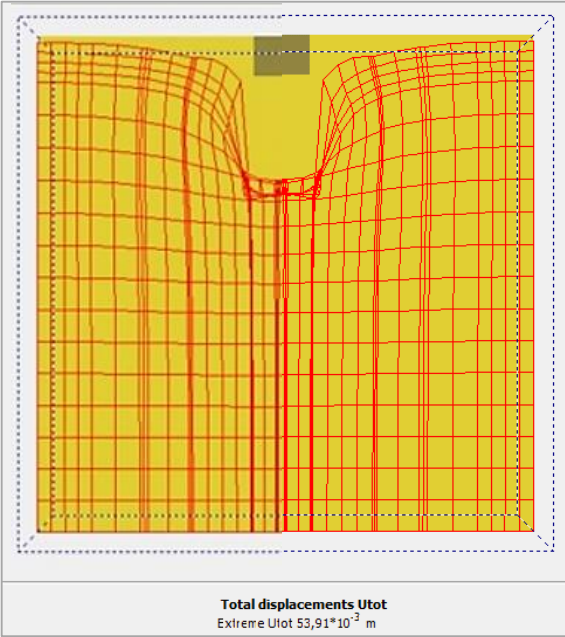
2.3.1 *Espesor de estrato de remplazo de 0.4m*



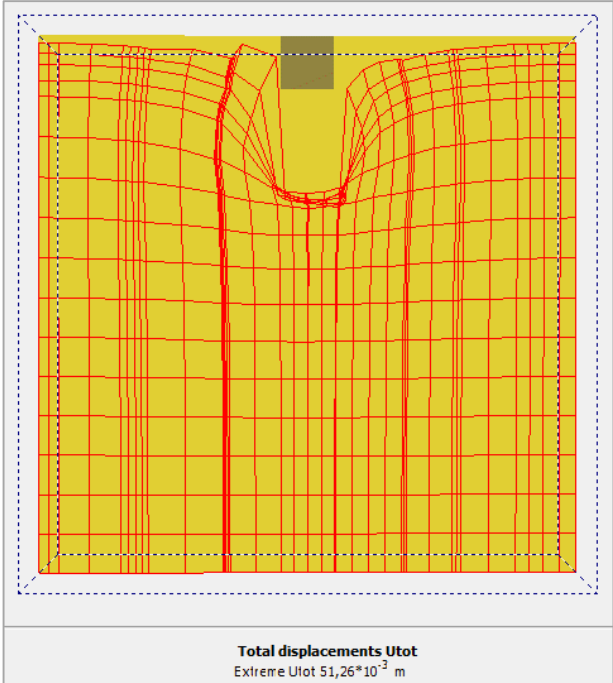
2.3.2 *Espesor de estrato de remplazo de 0.6m*



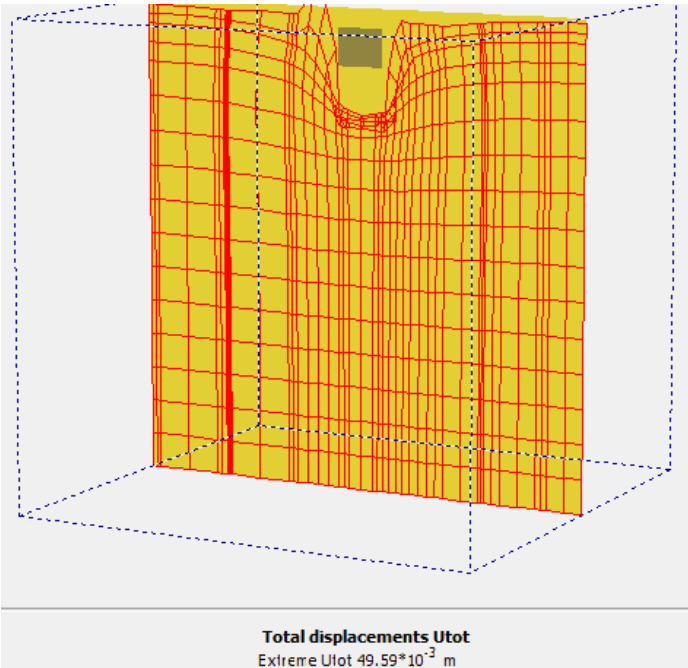
2.3.3 *Espesor de estrato de remplazo de 0.8m*



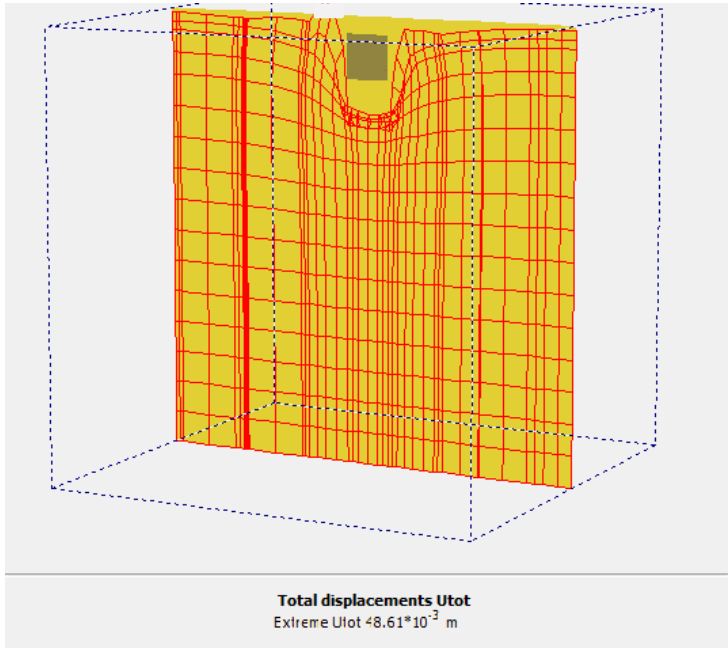
2.3.4 *Espesor de estrato de remplazo de 1.0m*



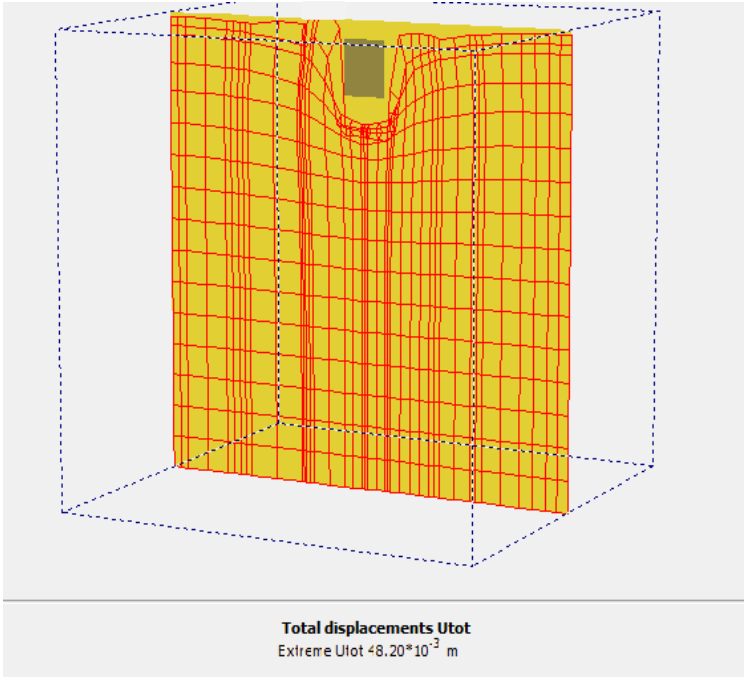
2.3.5 *Espesor de estrato de remplazo de 1.2 m*



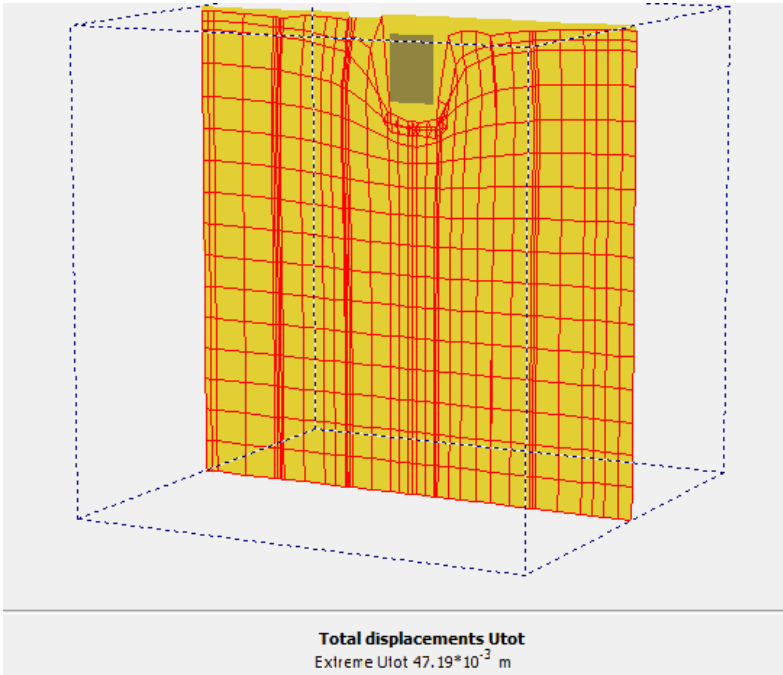
2.3.6 *Espesor de estrato de remplazo de 1.4 m*



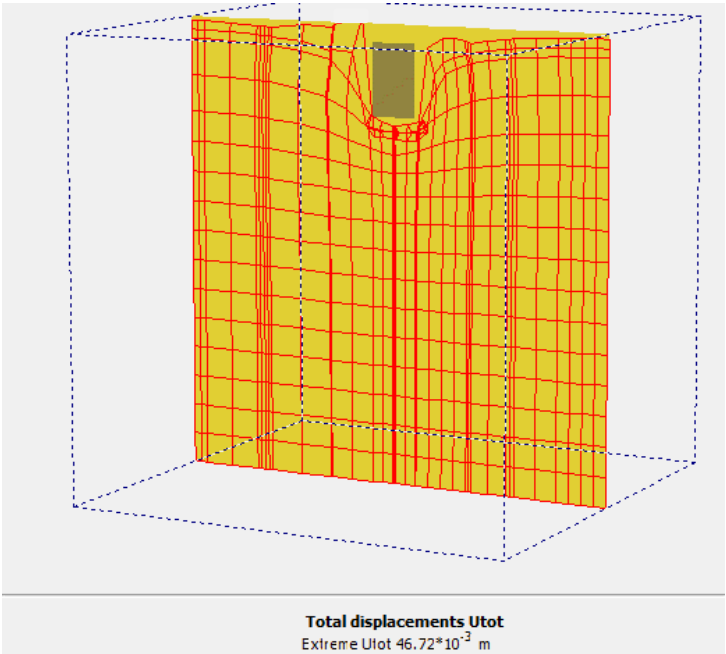
2.3.7 *Espesor de estrato de remplazo de 1.6 m*



2.3.8 *Espesor de estrato de remplazo de 1.8 m*

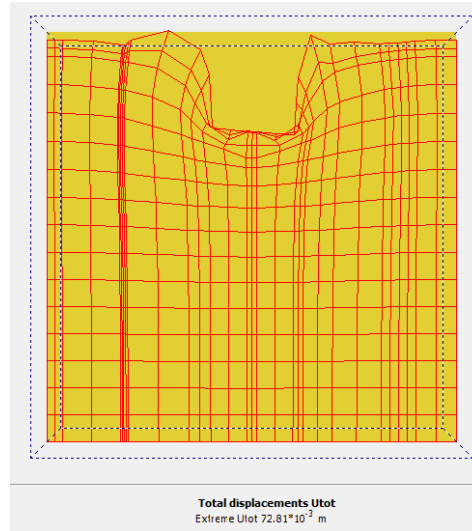


2.3.9 *Espesor de estrato de remplazo de 2.0 m*



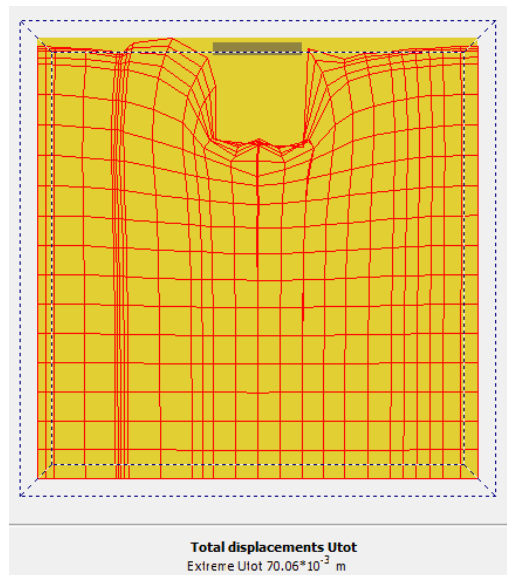
3. Modelos Plaxis 3D Foundation para zapatas con sección (2 m x 2 m)

3.1 Modelo sin incluir reemplazo

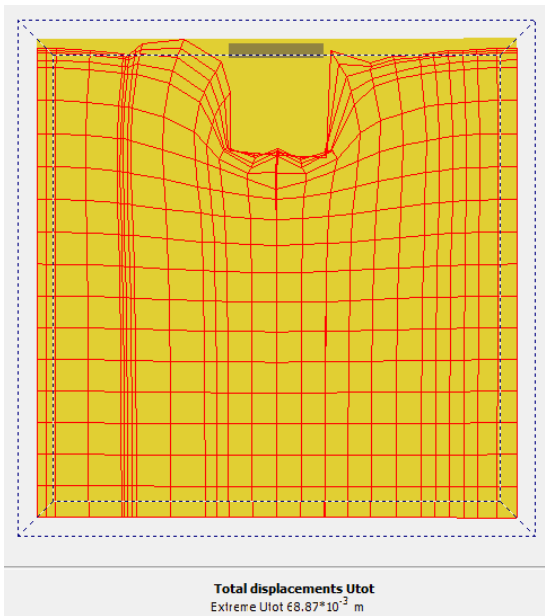


3.2 Modelos con mezcla de suelo-cemento del 5% de contenido de cemento

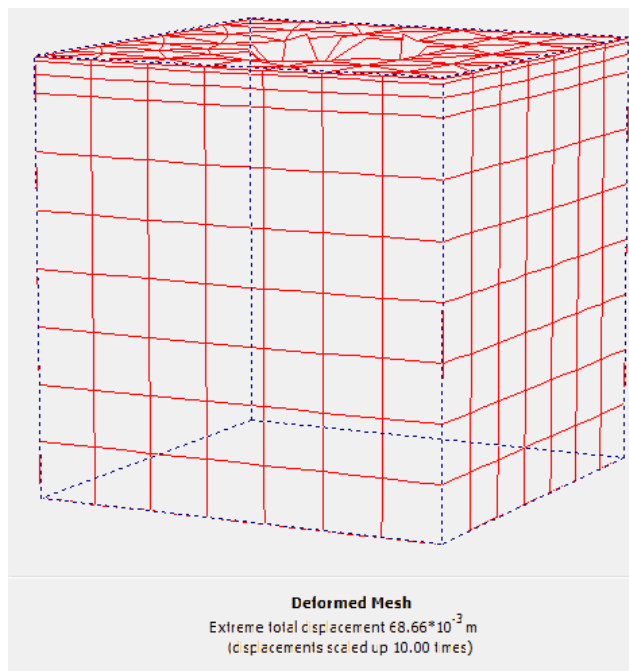
3.2.1 *Espesor de estrato de remplazo de 0.4 m*



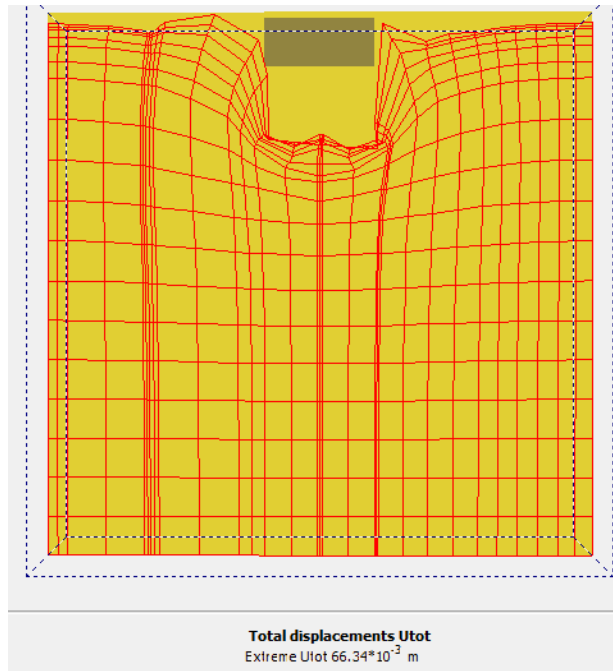
3.2.2 *Espesor de estrato de remplazo de 0.6 m*



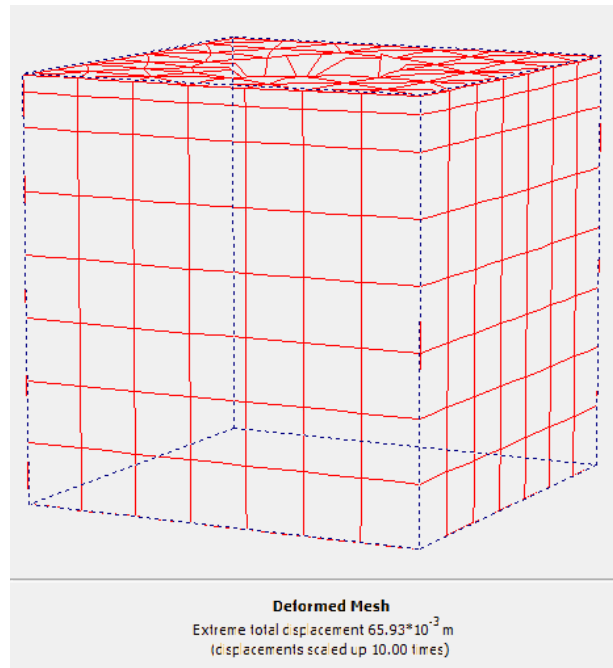
3.2.3 *Espesor de estrato de remplazo de 0.8 m*



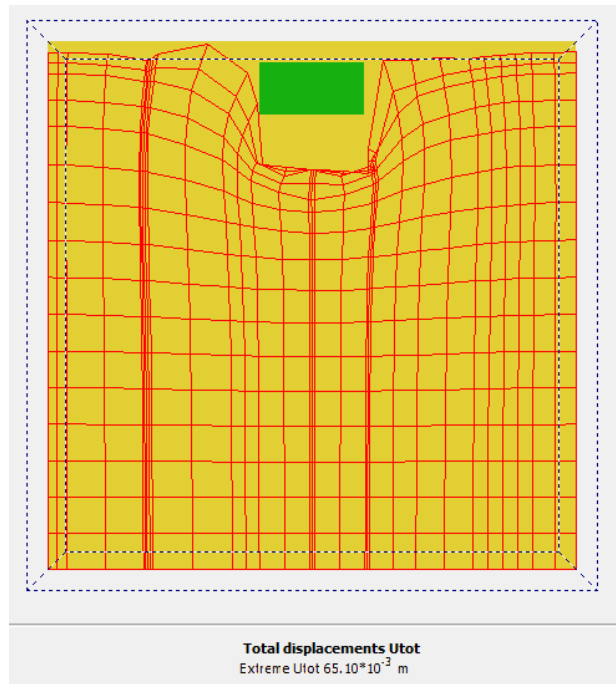
3.2.4 *Espesor de estrato de remplazo de 1.0 m*



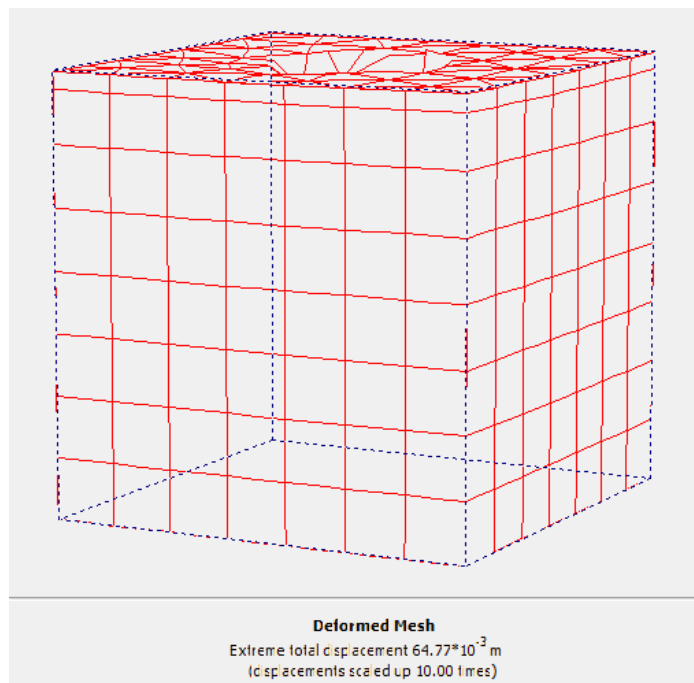
3.2.5 *Espesor de estrato de remplazo de 1.2 m*



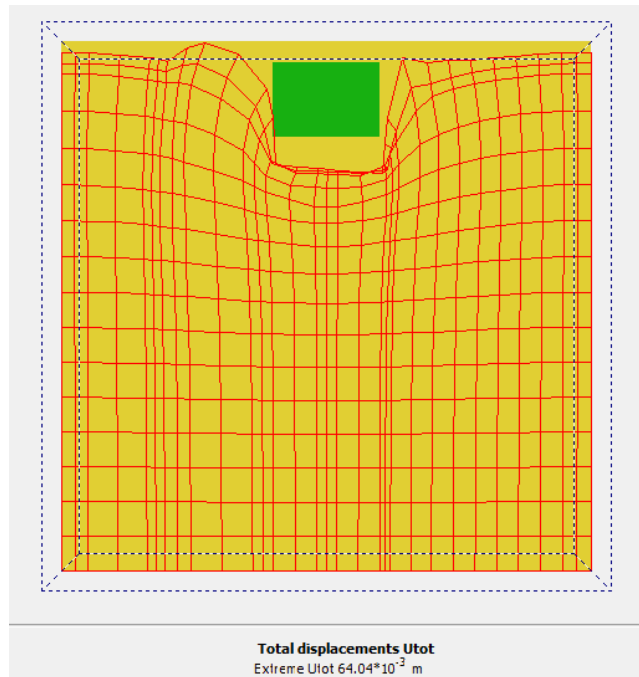
3.2.6 *Espesor de estrato de remplazo de 1.4 m*



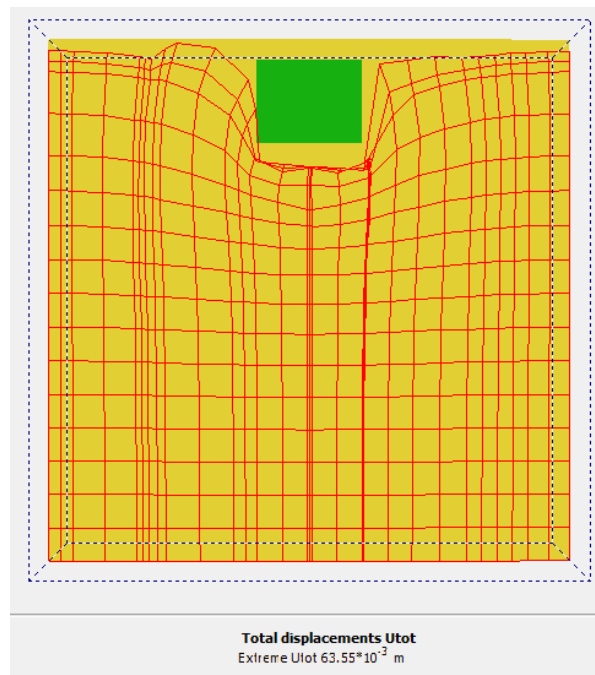
3.2.7 *Espesor de estrato de remplazo de 1.6 m*



3.2.8 *Espesor de estrato de remplazo de 1.8 m*

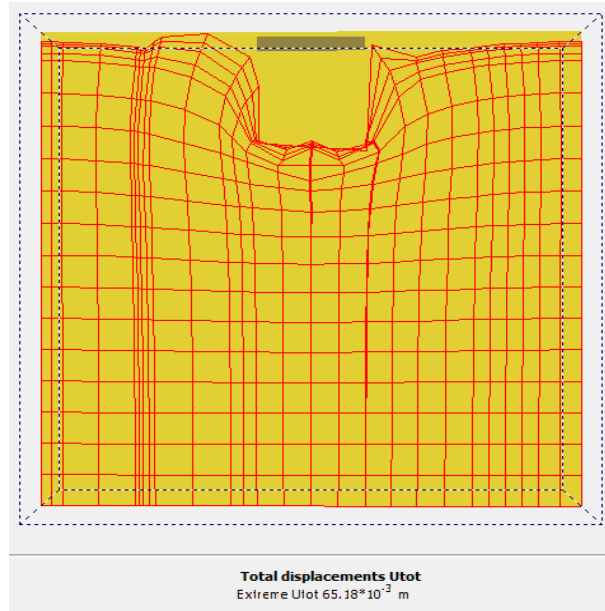


3.2.9 *Espesor de estrato de remplazo de 2.0 m*

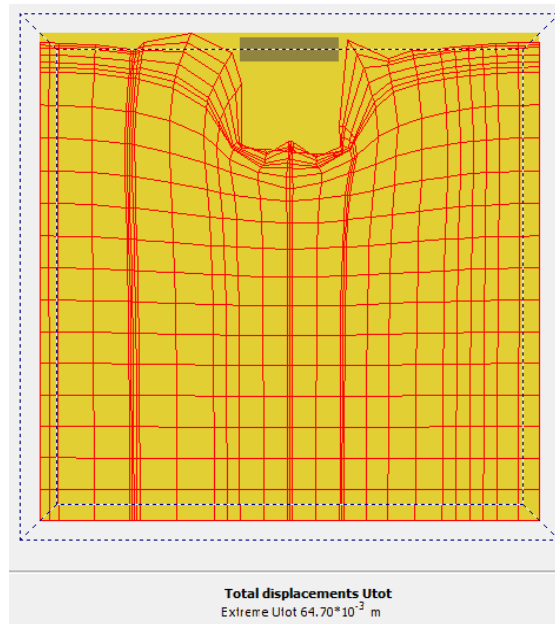


3.3 Modelos con mezcla de suelo-cemento del 7% de contenido de cemento

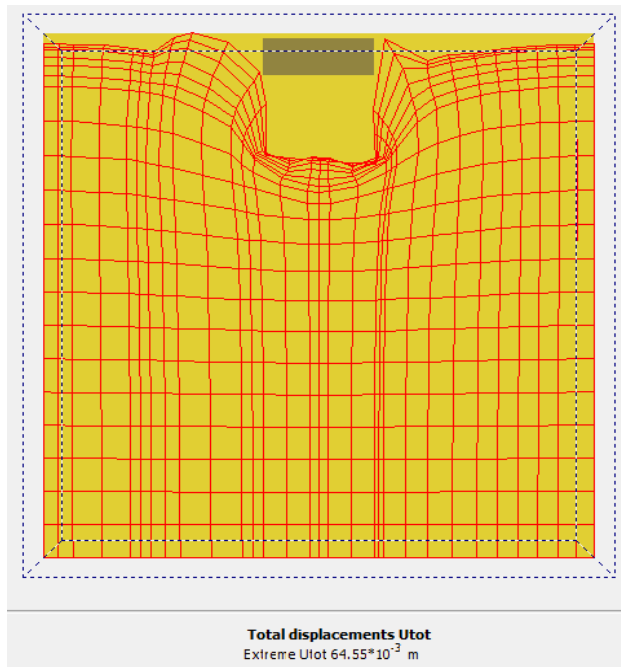
3.3.1 *Espesor de estrato de remplazo de 0.4 m*



3.3.2 *Espesor de estrato de remplazo de 0.6 m*



3.3.3 *Espesor de estrato de remplazo de 0.8 m*



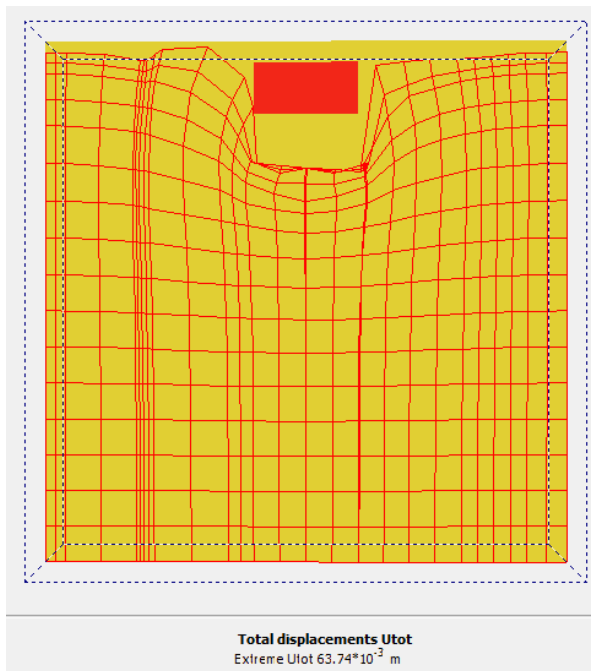
3.3.4 *Espesor de estrato de remplazo de 1.0 m*



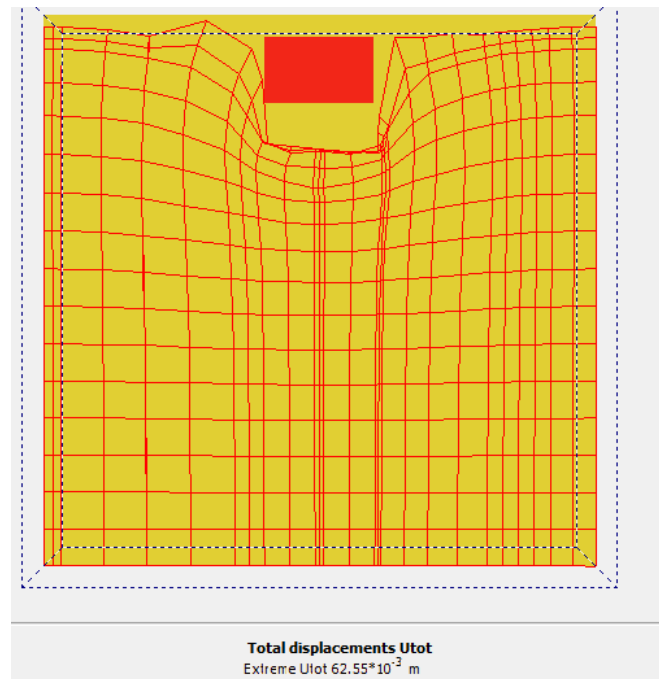
3.3.5 *Espesor de estrato de remplazo de 1.2 m*



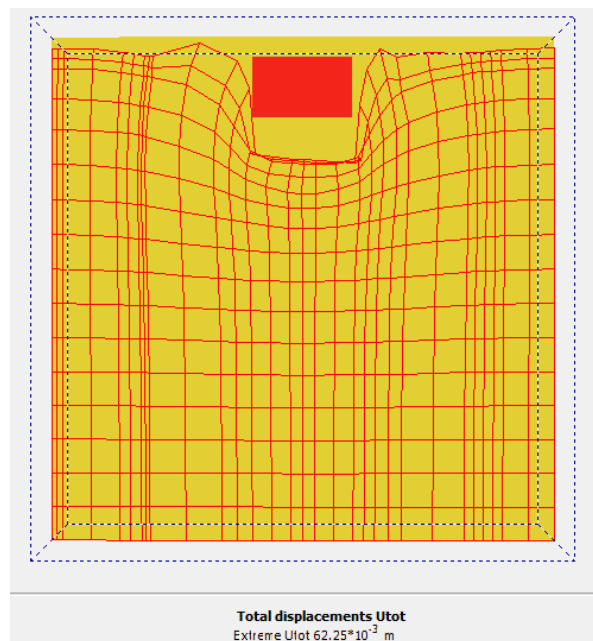
3.3.6 *Espesor de estrato de remplazo de 1.4 m*



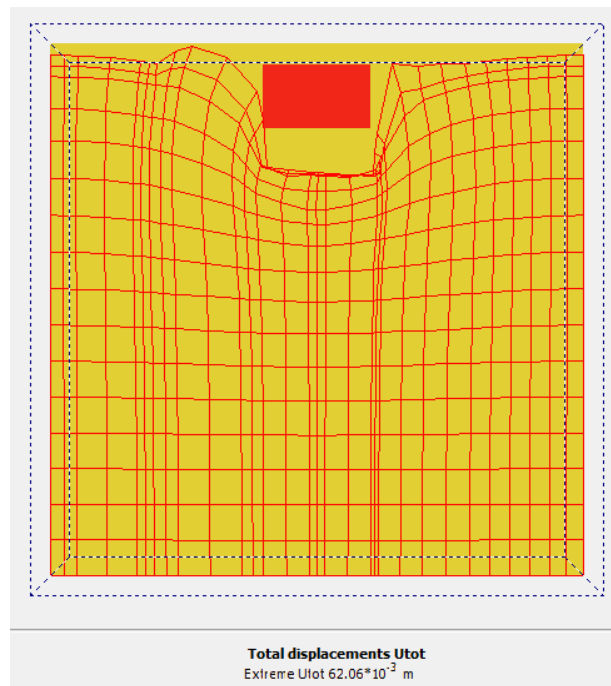
3.3.7 *Espesor de estrato de remplazo de 1.6 m*



3.3.8 *Espesor de estrato de remplazo de 1.8 m*

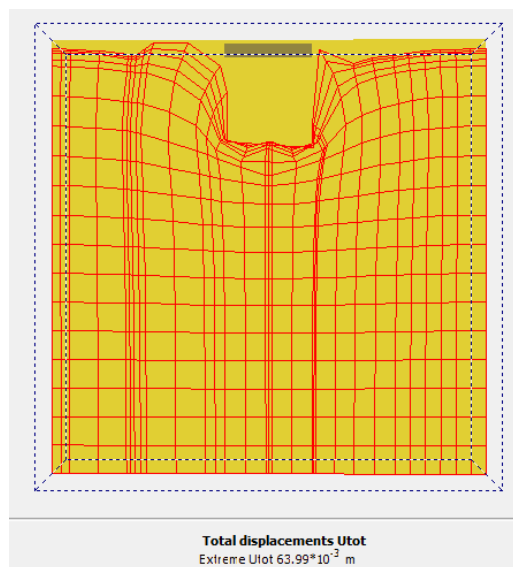


3.3.9 *Espesor de estrato de remplazo de 2.0 m*

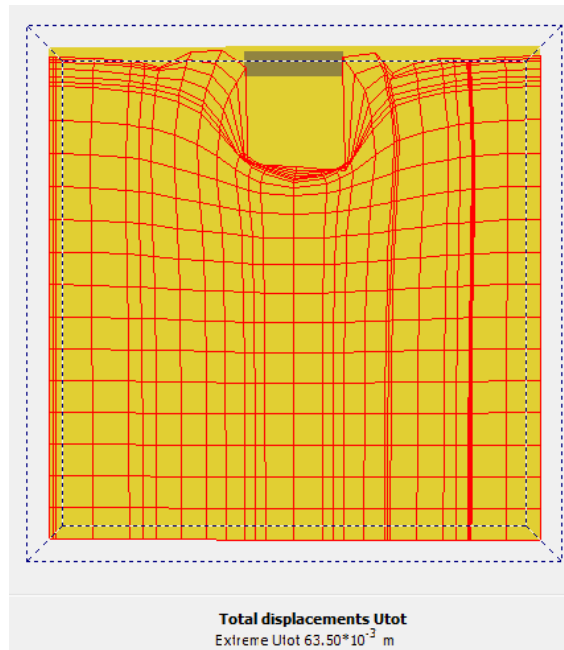


3.4 Modelos con mezcla de suelo-cemento del 10% de contenido de cemento

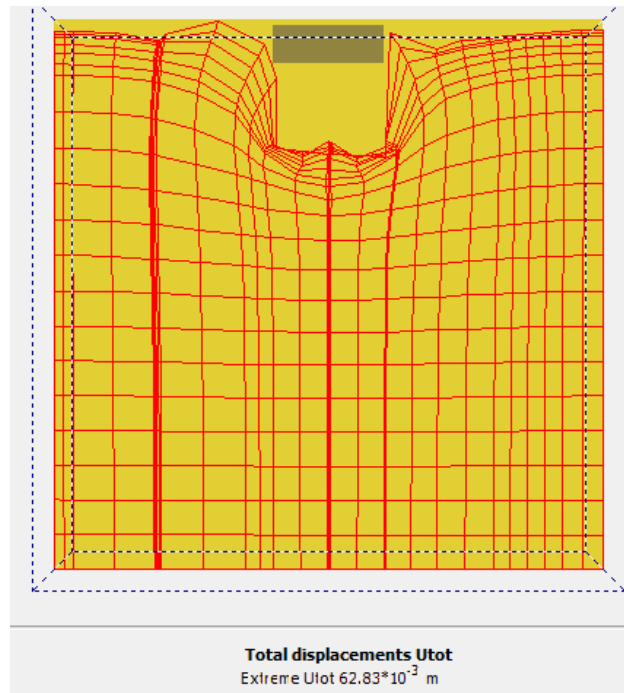
3.4.1 *Espesor de estrato de remplazo de 0.4 m*



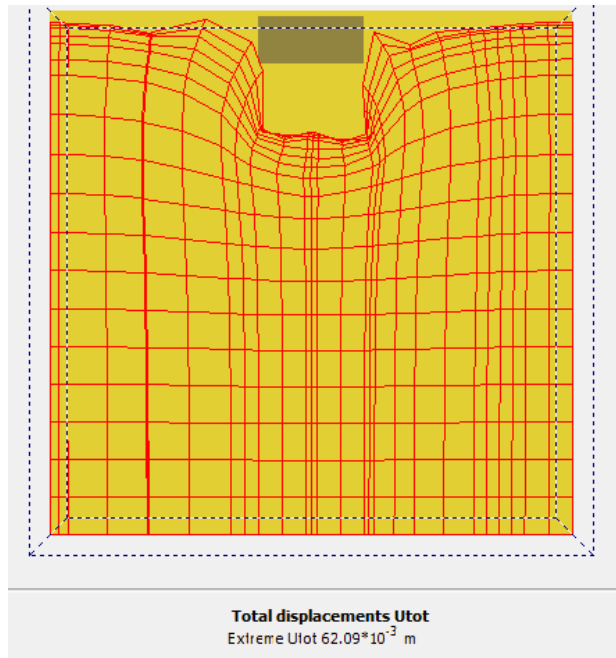
3.4.2 *Espesor de estrato de remplazo de 0.6 m*



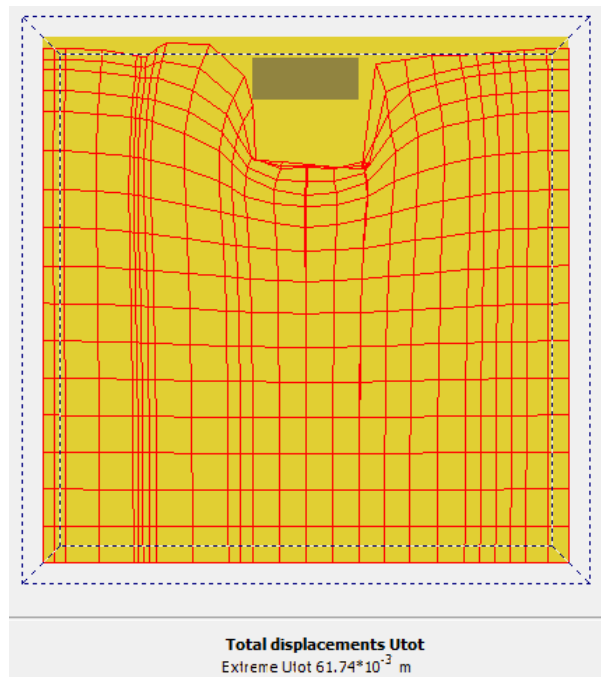
3.4.3 *Espesor de estrato de remplazo de 0.8 m*



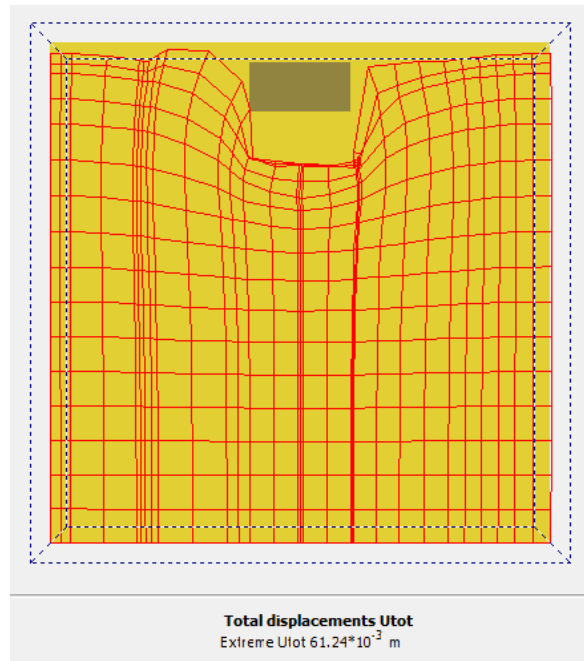
3.4.4 *Espesor de estrato de remplazo de 1.0 m*



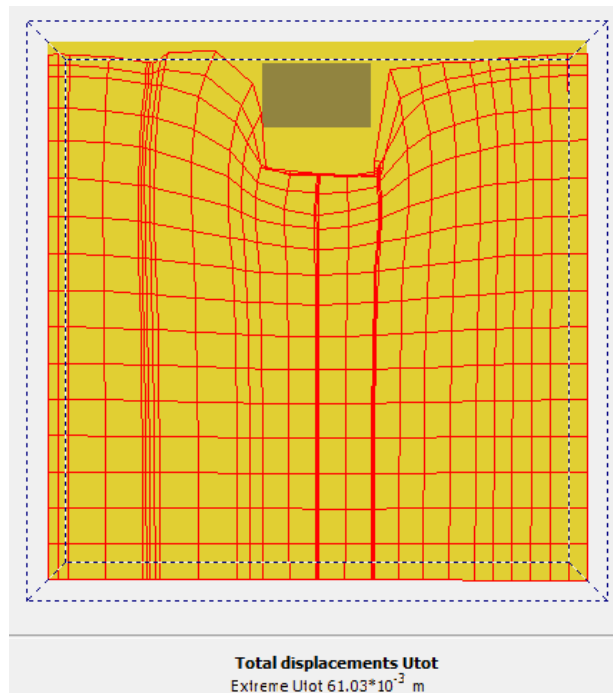
3.4.5 *Espesor de estrato de remplazo de 1.2 m*



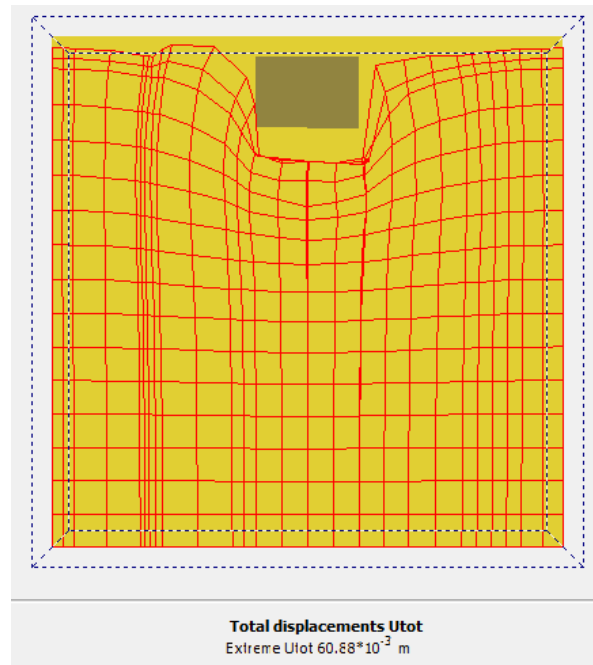
3.4.6 *Espesor de estrato de remplazo de 1.4 m*



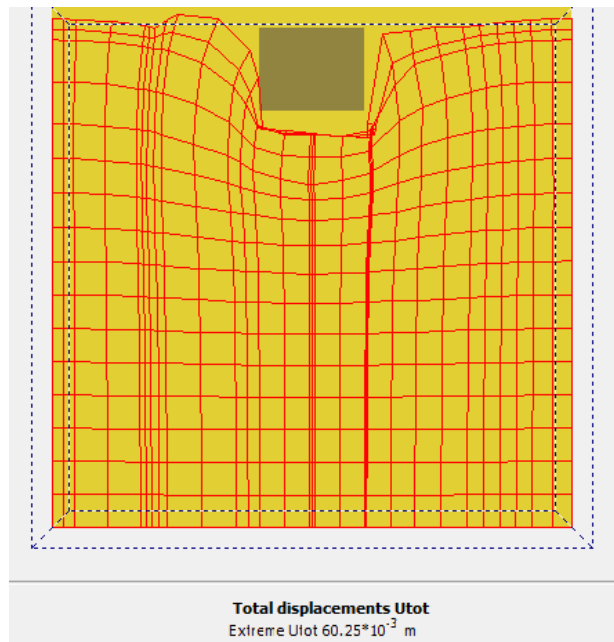
3.4.7 *Espesor de estrato de remplazo de 1.6 m*



3.4.8 *Espesor de estrato de remplazo de 1.8 m*

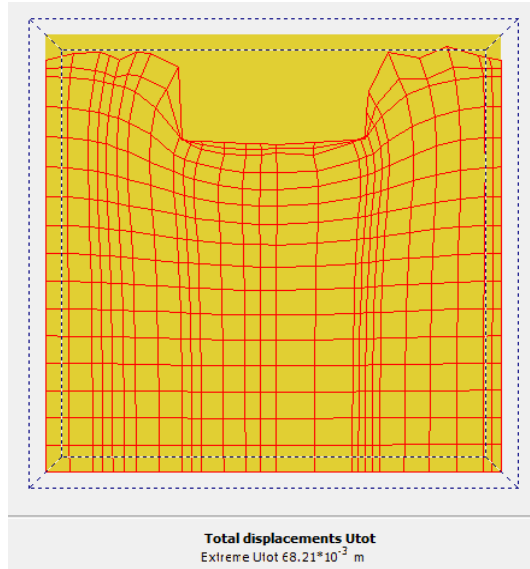


3.4.9 *Espesor de estrato de remplazo de 2.0 m*



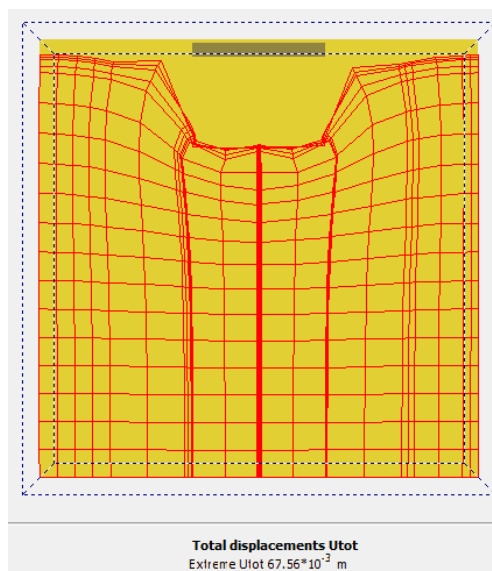
4. Modelos Plaxis 3D Foundation para zapatas con sección (3 m x 3 m)

4.1 Modelo sin incluir reemplazo

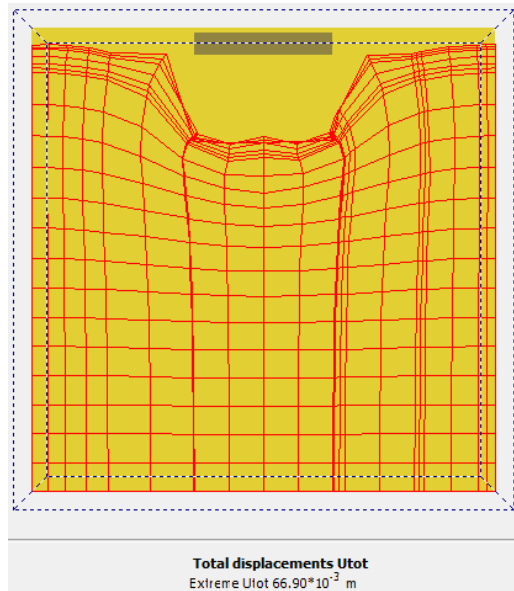


4.2 Modelos con mezcla de suelo-cemento del 5% de contenido de cemento

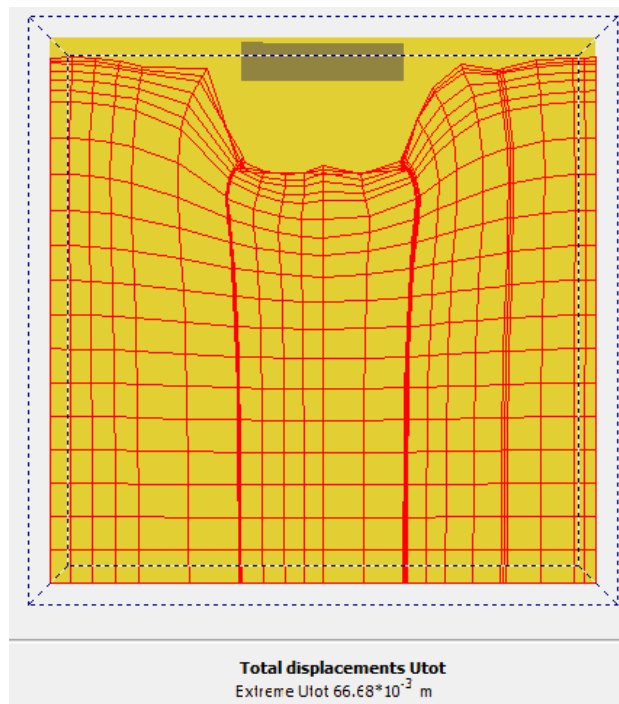
4.2.1 *Espesor de estrato de remplazo de 0.4 m*



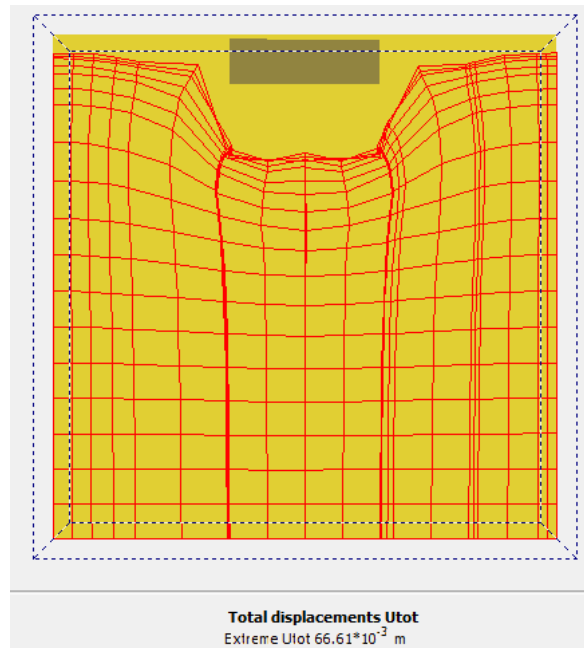
4.2.2 *Espesor de estrato de remplazo de 0.6 m*



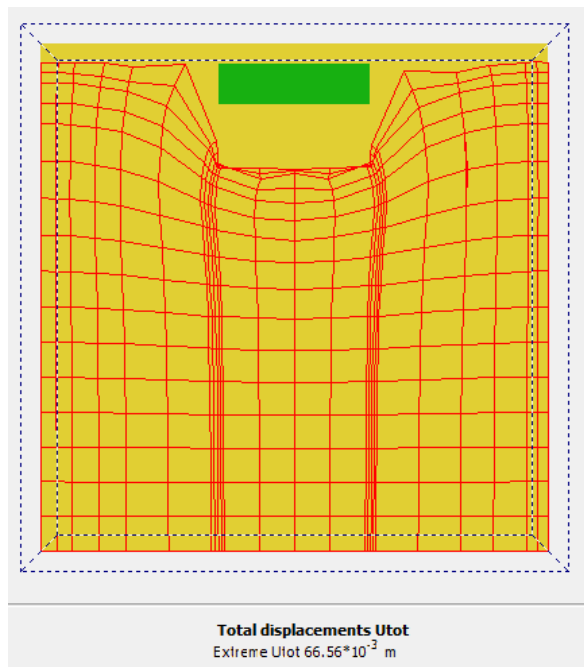
4.2.3 *Espesor de estrato de remplazo de 0.8 m*



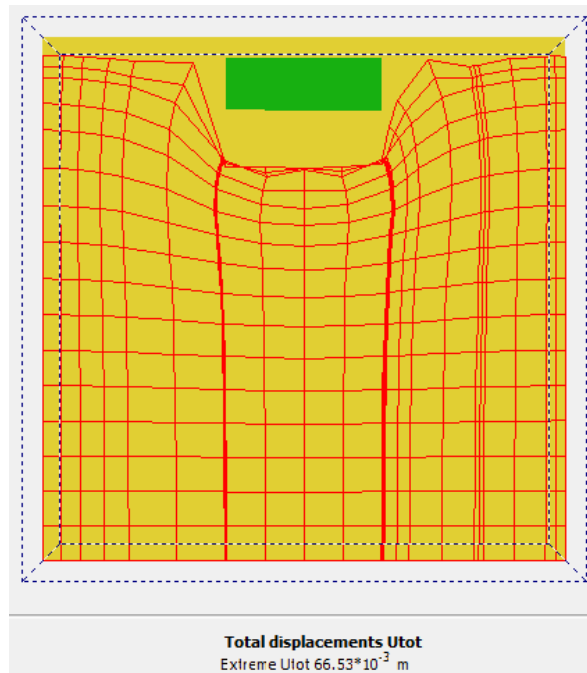
4.2.4 *Espesor de estrato de remplazo de 1.0 m*



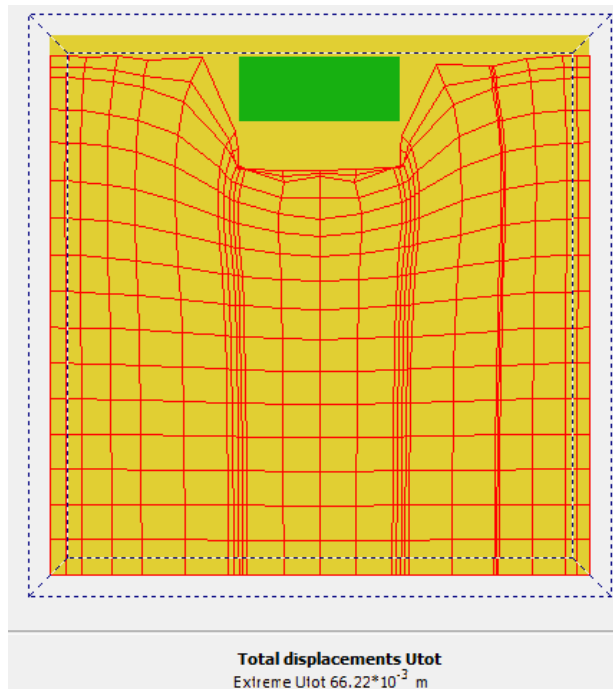
4.2.5 *Espesor de estrato de remplazo de 1.2 m*



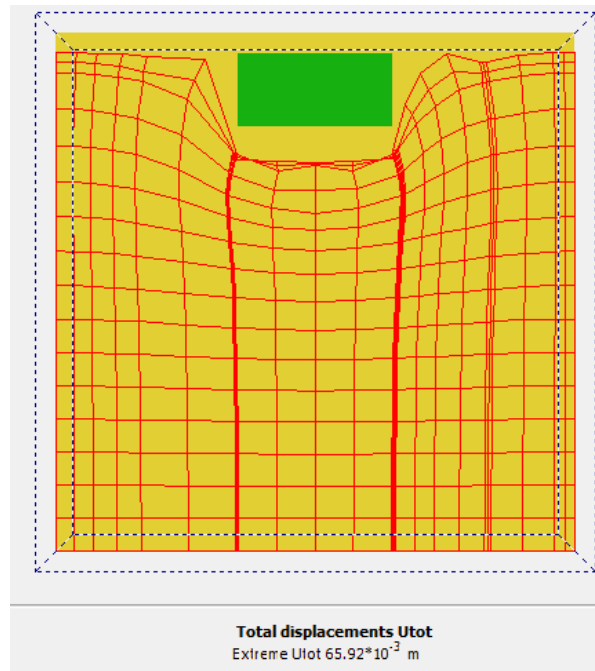
4.2.6 *Espesor de estrato de remplazo de 1.4 m*



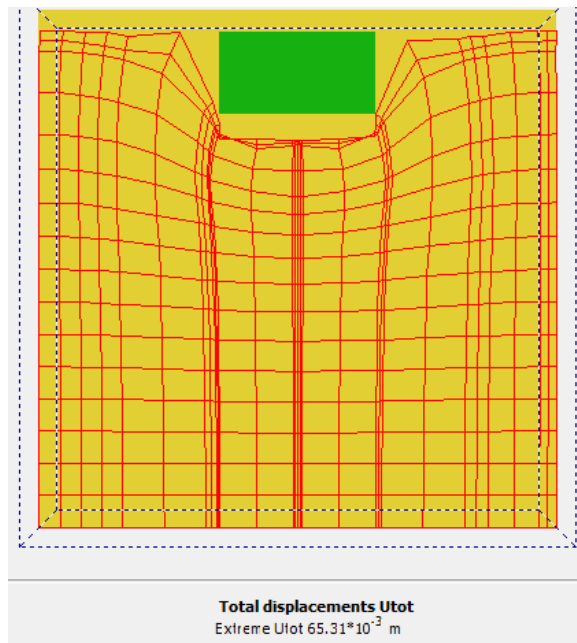
4.2.7 *Espesor de estrato de remplazo de 1.6 m*



4.2.8 *Espesor de estrato de remplazo de 1.8 m*

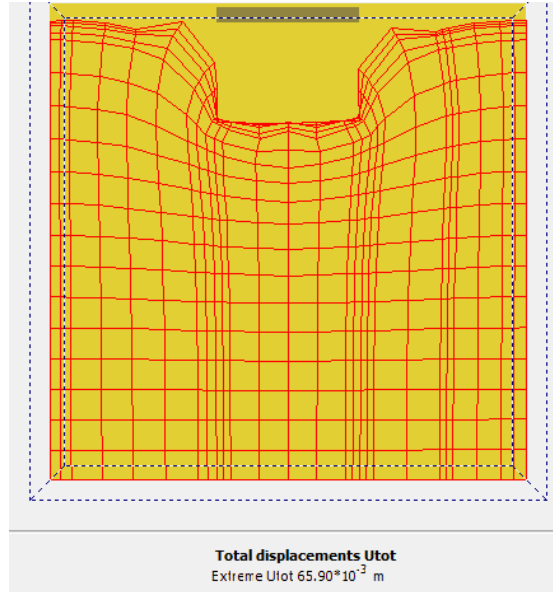


4.2.9 *Espesor de estrato de remplazo de 2.0 m*

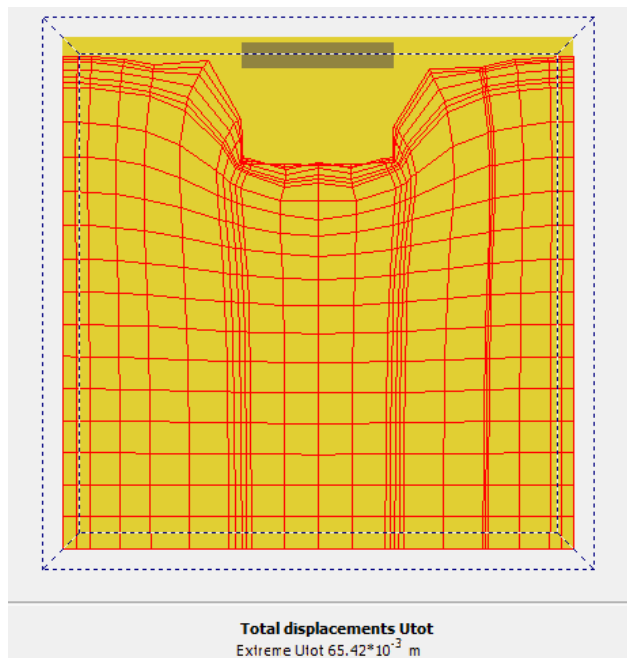


4.3 Modelos con mezcla de suelo-cemento del 7% de contenido de cemento

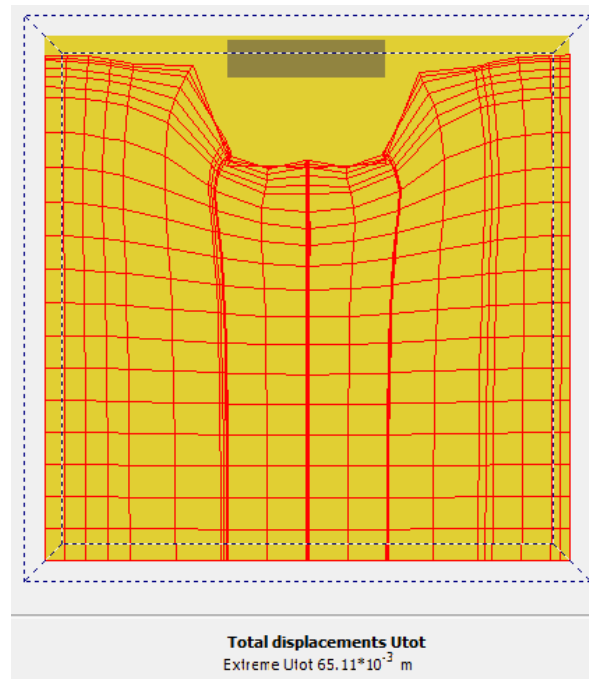
4.3.1 *Espesor de estrato de remplazo de 0.4 m*



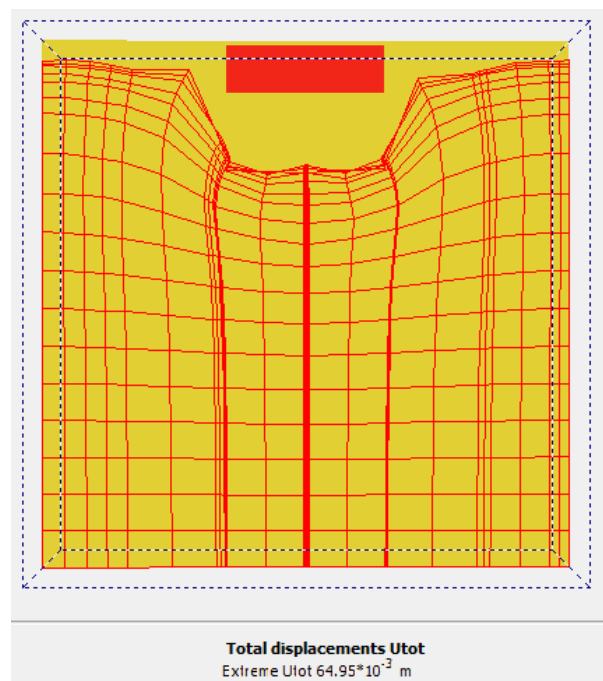
4.3.2 *Espesor de estrato de remplazo de 0.6 m*



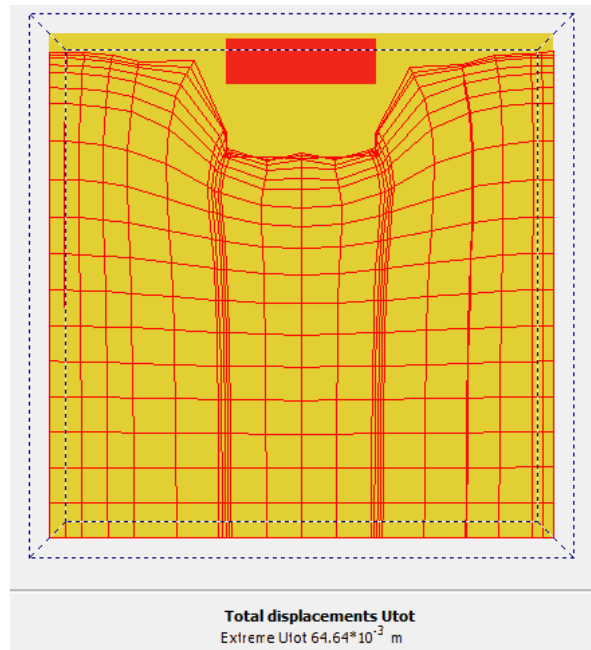
4.3.3 *Espesor de estrato de remplazo de 0.8 m*



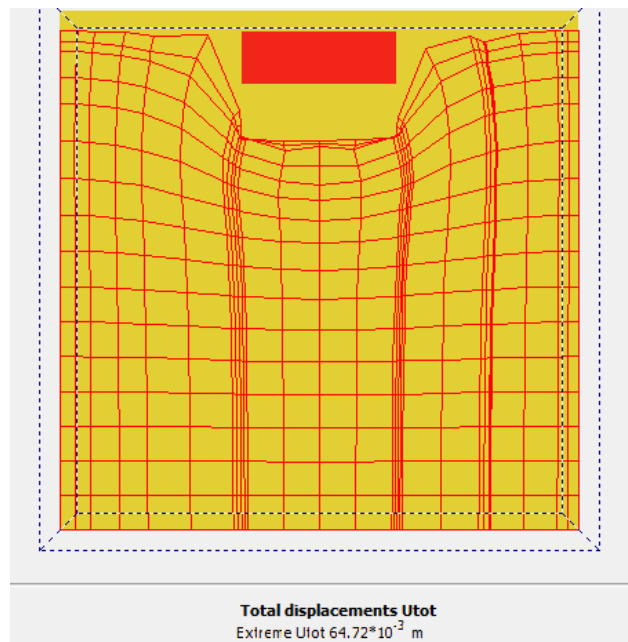
4.3.4 *Espesor de estrato de remplazo de 1.0 m*



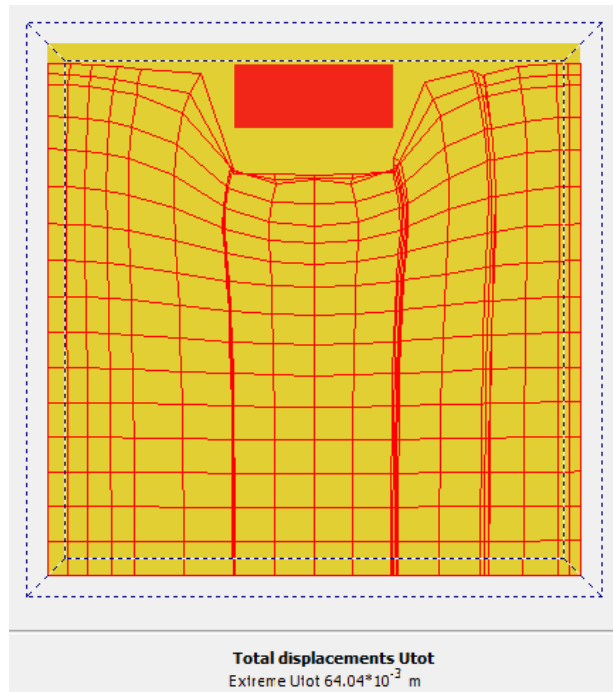
4.3.5 *Espesor de estrato de remplazo de 1.2 m*



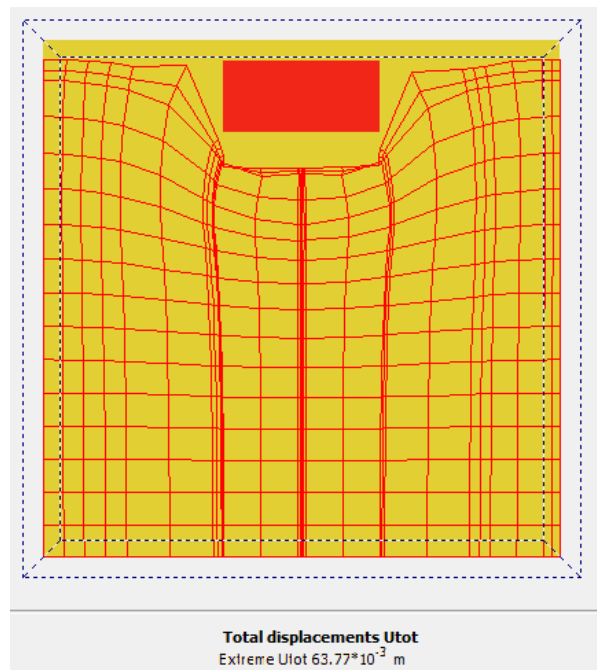
4.3.6 *Espesor de estrato de remplazo de 1.4 m*



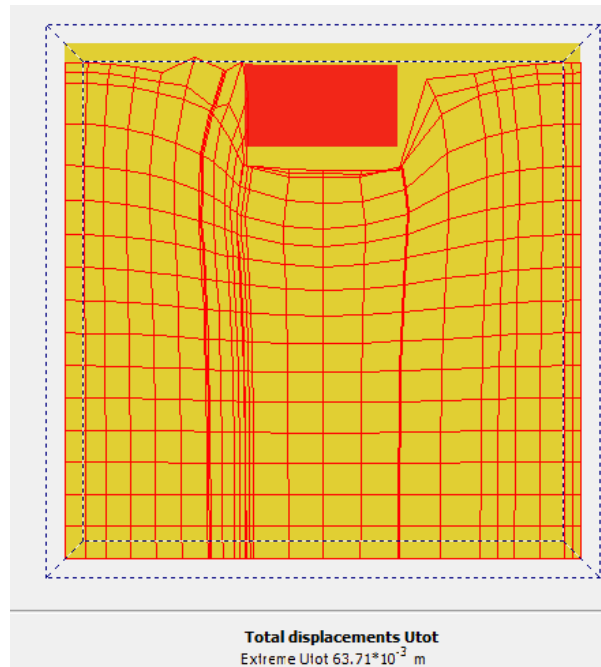
4.3.7 *Espesor de estrato de remplazo de 1.6 m*



4.3.8 *Espesor de estrato de remplazo de 1.8 m*

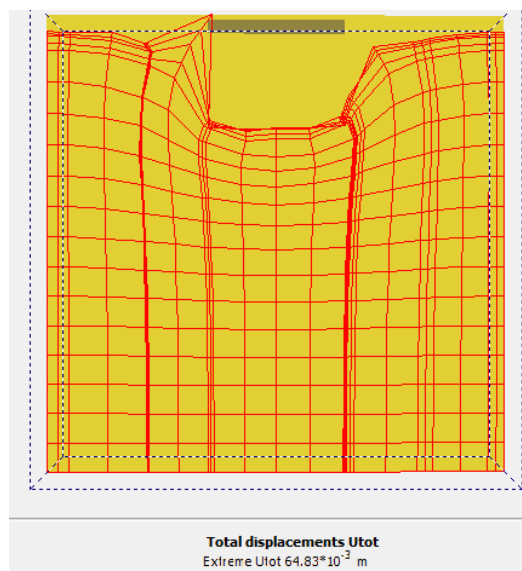


4.3.9 Espesor de estrato de remplazo de 2.0 m

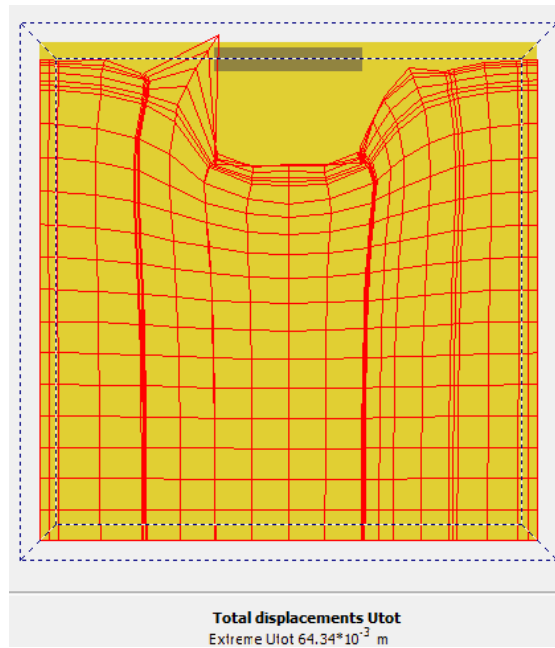


4.4 Modelos con mezcla de suelo-cemento del 10% de contenido de cemento

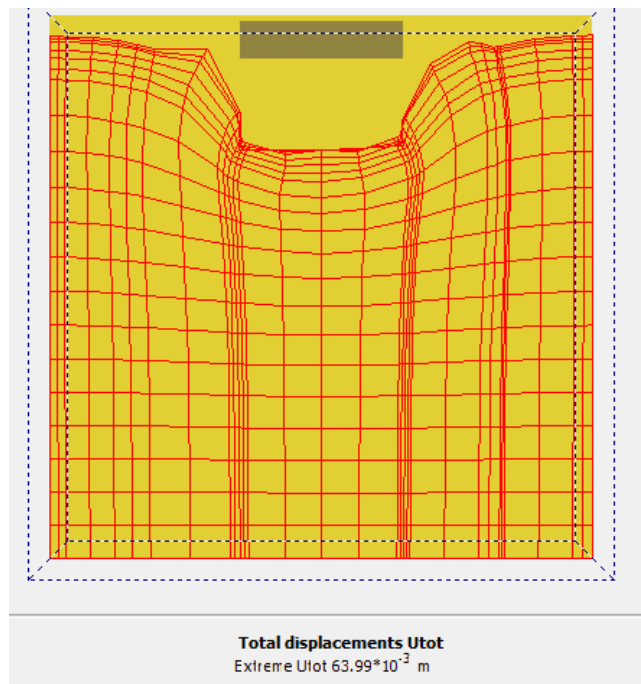
4.4.1 Espesor de estrato de remplazo de 0.4 m



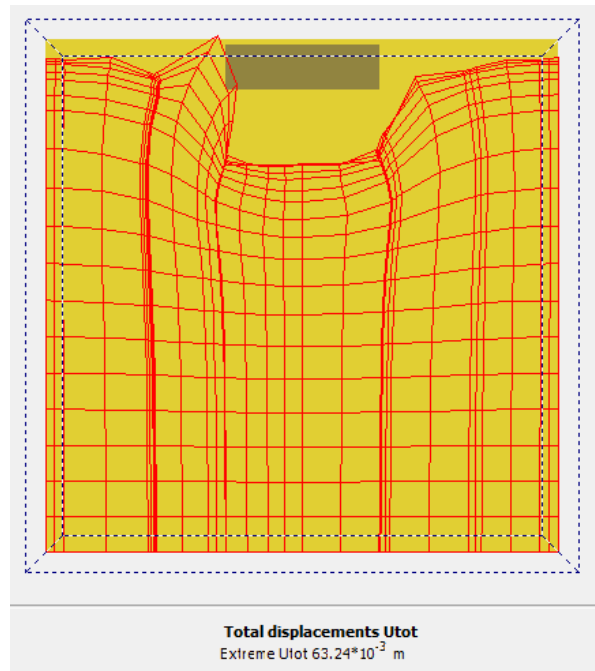
4.4.2 *Espesor de estrato de remplazo de 0.6 m*



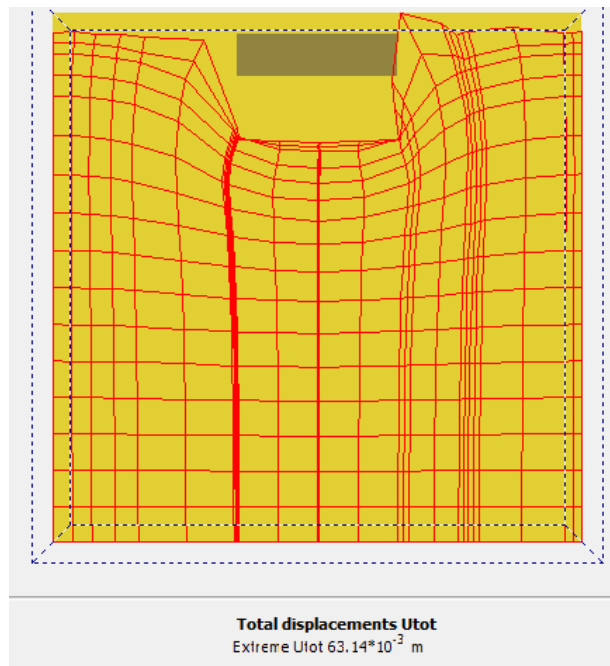
4.4.3 *Espesor de estrato de remplazo de 0.8 m*



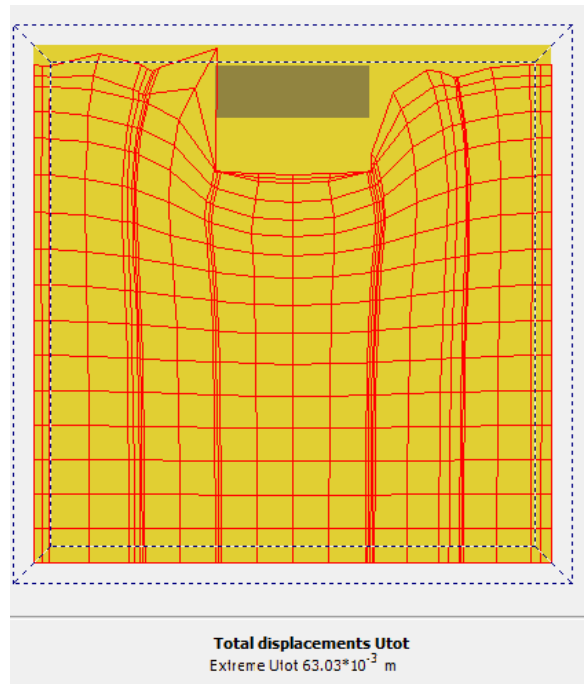
4.4.4 *Espesor de estrato de remplazo de 1.0 m*



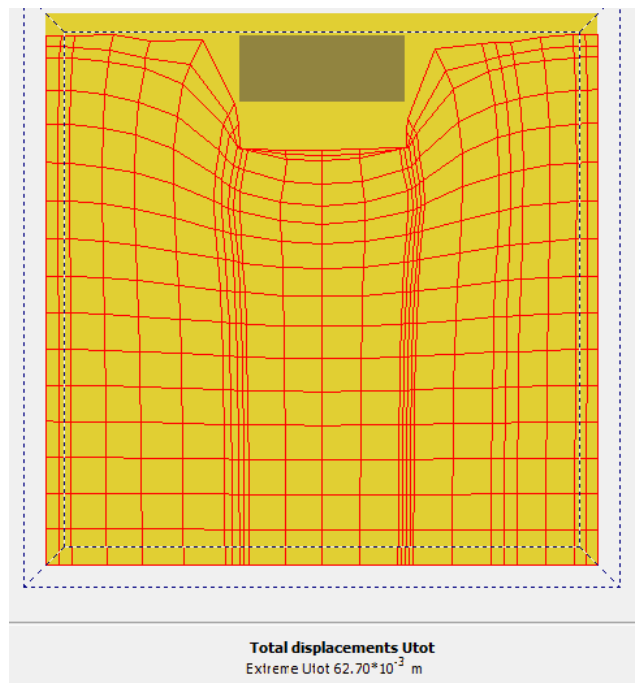
4.4.5 *Espesor de estrato de remplazo de 1.2 m*



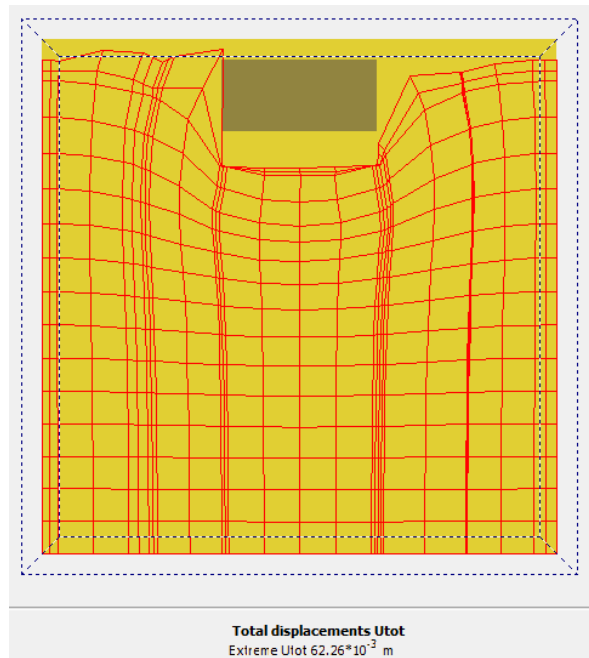
4.4.6 *Espesor de estrato de remplazo de 1.4 m*



4.4.7 *Espesor de estrato de remplazo de 1.6 m*



4.4.8 *Espesor de estrato de remplazo de 1.8 m*



4.4.9 *Espesor de estrato de remplazo de 2.0 m*

