

**ESTUDIO DE LOS ASENTAMIENTOS PRODUCIDOS POR CARGAS
EXTERNAS EN UN DEPÓSITO DE SUELO ARCILLOSO NORMALMENTE
CONSOLIDADO.**

DAVID FERNANDO SILVA ARCHILA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2019

**ESTUDIO DE LOS ASENTAMIENTOS PRODUCIDOS POR CARGAS
EXTERNAS EN UN DEPÓSITO DE SUELO ARCILLOSO NORMALMENTE
CONSOLIDADO.**

DAVID FERNANDO SILVA ARCHILA

Proyecto de grado para optar al titulo de Ingeniero Civil

Director:

JORGE ALEJANDRO MENDOZA RIZO

Dr. En Ingeniería Civil

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2019

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. METODOLOGÍA	16
3. DESARROLLO DE LOS MODELOS.	17
3.1 GEOMETRÍA	18
3.2 DATOS DEL PROBLEMA	18
3.3 DEFINICIÓN DE MATERIALES	19
3.4 CONDICIONES DE CONTORNO	20
3.4.1 Condiciones Mecánicas.	20
3.4.2 Condiciones Hidráulicas	21
3.4.3 Incógnitas Iniciales y estrés inicial.	22
3.4.4 Porosidad inicial	22
3.5 INTERVALOS DE TIEMPO	23
3.6 GENERACIÓN DE LA MALLA	24
3.6.1 Densidad de malla.	25
3.7 PROCESO PARA EL CÁLCULO DEL POSTPROCESO Y RESULTADOS	27
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	30
4.1 INFLUENCIA DE LA PERMEABILIDAD INTRÍNSECA	30
4.2 INFLUENCIA DE LA SEGUNDA CARGA EN LOS ASENTAMIENTOS E INCREMENTO DE PRESIÓN DE LÍQUIDO	31
4.3 INFLUENCIA DEL MOMENTO APLICACIÓN DE LA SEGUNDA CARGA EN LOS ASENTAMIENTOS E INCREMENTO DE PRESIÓN DE LÍQUIDO.	34
4.3.1 $q_2 > q_1$	34

4.3.1.1 Condición de estratos #1	35
4.3.1.2 Condición de estratos #2	36
4.3.2 $q_2 < q_1$	37
4.3.2.1 Condición de estratos #1	37
4.3.2.2 Condición de estratos #2	38
5. CONCLUSIONES	39
6. RECOMENDACIONES	40
BIBLIOGRAFÍA	41
ANEXOS	43

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Geometría	18
Figura 2. Ventana de datos.....	19
Figura 3. Propiedades mecánicas.....	20
Figura 4. Propiedades hidráulicas.....	20
Figura 5. Condiciones de contorno mecánicas.	21
Figura 6. Condiciones de contorno Hidráulicas.	21
Figura 7. Incógnitas iniciales.....	22
Figura 8. Tensiones iniciales.....	22
Figura 9. Porosidad inicial.....	23
Figura 10. Ventana de intervalo de tiempo.	24
Figura 11. Preferencias de una malla no estructurada.	25
Figura 12. Evolución del mallado.....	25
Figura 13. Malla utilizada.	26
Figura 14. Características de la malla.....	26
Figura 15. Desplazamientos verticales.	27
Figura 16. Esfuerzos verticales.....	27
Figura 17. Desplazamientos en el tiempo.....	28
Figura 18. Presión de líquido en el tiempo.....	28
Figura 19. Influencia de la permeabilidad en la condición de estratos #1.....	30
Figura 20. Influencia de la permeabilidad en la condición de estratos #2.....	31
Figura 21. Asentamientos producidos por la segunda carga en la condición de estratos #1.....	31
Figura 22. Variación de la presión de líquido debido a la segunda carga en la condición de estratos #1.....	32

Figura 23. Asentamientos producidos por la segunda carga en la condición de estratos #2.	33
Figura 24. Variación de la presión de líquido debido a la segunda carga en la condición de estratos #2.	33
Figura 25. Asentamientos producidos por una carga de 0.3 MPa en diferentes tiempos.	35
Figura 26. Variación de la presión por una carga de 0.3 MPa en diferentes tiempos.	35
Figura 27. Asentamientos producidos por una carga de 0.3 MPa en diferentes tiempos.	36
Figura 28. Variación de la presión por una carga de 0.3 MPa en diferentes tiempos.	36
Figura 29. Asentamientos producidos por una carga de 0.15 MPa en diferentes tiempos.	37
Figura 30. Variación de la presión por una carga de 0.15 MPa en diferentes tiempos.	37
Figura 31. Asentamientos producidos por una carga de 0.15 MPa en diferentes tiempos.	38
Figura 32. Variación de la presión por una carga de 0.15 MPa en diferentes tiempos.	38

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Materiales.	17
Tabla 2. Asentamientos finales condición #1.	32
Tabla 3. Asentamientos finales condición #2	33

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Condiciones de estratos.....	43
Anexo B. Resumen de modelamientos.....	44
Anexo C. Resultados Modelo #1.....	45
Anexo D. Resultados Modelo #2.....	47
Anexo E. Resultados Modelo #3.....	49
Anexo F. Resultados Modelo #4.....	51
Anexo G. Resultados Modelo #5.....	53
Anexo H. Resultados Modelo #6.....	55
Anexo I. Resultados Modelo #7.....	57
Anexo J. Resultados Modelo #8.....	59
Anexo K. Resultados Modelo #9.....	61
Anexo L. Resultados Modelo #10.....	63
Anexo M. Resultados Modelo #11.....	65
Anexo N. Resultados Modelo #12.....	67
Anexo O. Resultados Modelo #13.....	69
Anexo P. Resultados Modelo #14.....	71
Anexo Q. Resultados Modelo #15.....	73
Anexo R. Resultados Modelo #16.....	75
Anexo S. Resultados Modelo #17.....	77
Anexo T. Resultados Modelo #18.....	79

RESUMEN

TÍTULO: Estudio de los asentamientos producidos por cargas externas en un depósito de suelo arcilloso normalmente consolidado.*

AUTORES: David Fernando Silva Archila**

PALABRAS CLAVE: Asentamientos, cimentación, deposito arcilloso, elástico-lineal.

Al diseñar una estructura es necesario un análisis detallado de los asentamientos producidos en el suelo a cimentar, y es de gran importancia cuando se producen en depósitos arcillosos, ya que en estos suelos se provocan los asentamientos por consolidación. En este trabajo de investigación se realizan una serie de simulaciones bidimensionales en las cuales se analizan los asentamientos producidos por una cimentación en un suelo arcilloso, y los cambios provocados por una carga adyacente a la estructura de interés. Se utilizó como modelos constitutivos del sistema de cimentación y de los estratos de soporte un modelo elástico-lineal trabajando en condiciones no drenadas. Se analiza el efecto de la variación de esfuerzos producidos por la cimentación, el cambio de relación de vacíos, la disminución del contenido de agua en los estratos cargados y la influencia de las propiedades del suelo en los asentamientos producidos por la consolidación del suelo debido al efecto de colocar dos condiciones de carga diferidas en el tiempo. Estos análisis se realizaron mediante simulaciones numéricas en condiciones planas de deformación, mediante el software GiD y su código de computador de investigación Code_Bright, el cual permite analizar el suelo como un material multifase, y, por tanto, realizar un acoplamiento hidro-mecánico.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil Director Jorge Alejandro Mendoza Rizo

ABSTRACT

TÍTULO: Diagnosis for the cicloruta implementation planned big door Girón-toll Lebrija *

AUTHORS: David Fernando Silva Archila**

KEY WORDS: Settlements, Foundation, clay deposit, elastic-linear

When designing a structure is necessary a detailed analysis of the settlements produced in the ground to be cemented, and it is of great importance when they are produced in clay deposits, since in these soils settlements are caused by consolidation. In this research work a series of two-dimensional simulations are carried out in which the settlements produced by a foundation in a clay soil are analyzed, and the changes caused by a load adjacent to the structure of interest. A linear elastic model working under undrained conditions was used as constitutive models of the foundation system and the support strata. The effect of the variation of stresses produced by the foundation, the change in the ratio of voids, the decrease in the water content in the strata loaded and the influence of the properties of the soil in the settlements produced by the consolidation of the soil due to the effect of placing two load conditions deferred in time. These analyzes were carried out by means of numerical simulations in flat conditions of deformation, by means of the software GiD and it's computer code of investigation Code_Bright, which allows to analyze the soil as a multiphase material, and, therefore, perform a hydro-mechanical coupling.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil Director Jorge Alejandro Mendoza Rizo

INTRODUCCIÓN

Todos los materiales experimentan deformación cuando se les sujeta a un cambio en sus condiciones de esfuerzo. Las características de esfuerzo-deformación de los materiales estructurales tales como el acero y el concreto son hoy suficientemente bien comprendidas para la mayoría de las aplicaciones prácticas y pueden determinarse en el laboratorio con razonable grado de confianza¹.

La deformación de la mayoría de los suelos, aun bajo cargas pequeñas, es mucho mayor que la de los materiales estructurales; además esa deformación no se produce, usualmente de forma simultánea a la aplicación de la carga, sino que se desarrolla en el transcurso del tiempo. Así, cuando un estrato de arcilla soporta un edificio, pueden ser necesarios muchos años para que la deformación final del suelo se complete.²

Normalmente, se estudia el efecto que se produce al colocar la estructura de interés sobre el depósito, pero no los asentamientos adicionales por efectos de cargas adyacentes una vez construida la estructura principal. Un claro ejemplo de este problema se puede explicar cuando algunas edificaciones sufren agrietamientos debido a construcciones aledañas. Estos casos son más frecuentes, cuando la construcción se realiza en suelos arcillosos saturados, debido a que en estos depósitos se presentan los asentamientos por consolidación, que se ven reflejados a lo largo del tiempo.

¹ JUAREZ, Badillo; RODRIGUEZ, Rico. Mecánica de suelos, fundamentos de la mecánica de suelo. Tomo 1. México. Limusa, 1975.

² Ibíd.

Gracias a los avances realizados en la forma de analizar los problemas ingenieriles, nos apoyaremos en los software GiD y Code_Bright, para realizar las simulaciones necesarias para nuestro estudio.

Code_Bright es un programa de método de elementos finitos (FEM) capaz de realizar análisis acoplados termo-hidro-mecánicos (THM) en medios geológicos. Se ha desarrollado en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), y se combina con el GiD de preprocesador/postprocesador, desarrollado por el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). ³

En este trabajo, se estudia la influencia de estas cargas adyacentes en la variación del incremento de presión de poros en el tiempo, y los cambios en la consolidación del depósito analizado.

³ UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA. Departamento de ingeniería del terreno, cartográfica y geofísica MANUAL CODE_BRIGHT. Disponible en internet: https://deca.upc.edu/en/projects/code_bright/downloads [Ultimo acceso: 15 marzo 2019]

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la influencia de diferentes variables geotécnicas en el comportamiento hidromecánico de un depósito arcilloso.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir la influencia de las condiciones de carga en la variación del incremento de la presión de agua en el tiempo.
- Definir la influencia de las condiciones de carga en el tiempo de consolidación del depósito analizado.
- Establecer el efecto de las condiciones de carga en la distribución del incremento de presión de agua en el depósito de suelo arcilloso.

2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en el desarrollo del proyecto, en su primera fase se basó en la recopilación y organización de la información referente a esfuerzos efectivos, presión de poros, asentamientos y consolidación que permitió entender el problema con más claridad, para así poder ver con mayor perspectiva y enfoque el problema analizado.

En la segunda fase se ganó competencias en el manejo del software, realizando tutoriales referentes a los problemas de asentamientos y presión de poros, logrando entender el proceso que se debe llevar al modelar estos problemas y como obtener los resultados de cada uno de los modelamientos.

En la tercera fase se realizaron 18 simulaciones numéricas en un programa de elementos finitos, en los cuales se crearon 2 tipos de condiciones de estratos: (1) una primera condición donde un estrato arcilloso estará limitado en la parte superior e inferior de su geometría por un estrato arenoso, y (2) una segunda condición donde solo estará presente un estrato arcilloso (**Anexo 1**).

En la cuarta fase se realizó la interpretación y análisis de los resultados obtenidos en cada modelamiento, observando los cambios más notorios en cada variación de datos.

3. DESARROLLO DE LOS MODELOS.

En estas simulaciones inicialmente se buscó las propiedades de los estratos necesarias para producir asentamientos debidos a la primera carga en lapsos de tiempo de más de 10 años. Dándonos como resultados los valores mencionados en la Tabla 1.

Posteriormente se procede a realizar los distintos modelamientos para las dos condiciones de estratos, variando la magnitud de la segunda carga y el tiempo de aplicación de la misma (**Anexo 2**).

Tabla 1. Materiales.

Materiales	Modulo de Young (MPa)	Relación de Poisson	Permeabilidad Intrínseca (m^2)
Arena densa	50	0.3	$1 * 10^{-12}$
Arcilla media	30	0.4	$1 * 10^{-14} - 1 * 10^{-17}$

NOTA: $1 \times 10^{-14} m^2 = 1 \text{ Darcy} = 1.15 \times 10^{-3} \text{ cm/sg}$

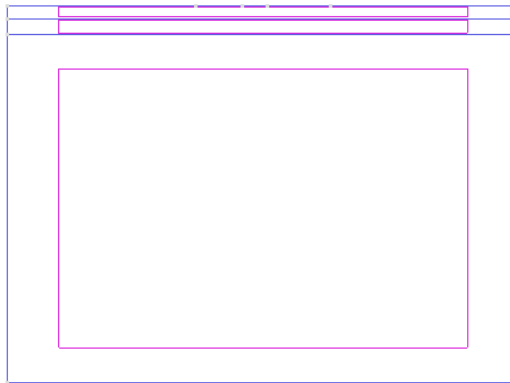
El planteamiento de la geometría de los modelos se realizó en el software para elementos finitos GID.13.0.4. El cual nos permite generar datos de pre-proceso y postproceso. Es decir, permite crear la geometría, asignar propiedades, condiciones de contorno y desde su plataforma conectar al programa de cálculo Code_Bright. Por otra parte, una vez finalizada esta fase, GID permite visualizar los resultados y exportar datos como desplazamientos, esfuerzos, presión de agua entre otras variables, para el tipo de problema en modo Code_Bright versión 4.04.⁴

⁴ Code_bright Tutorial_II_Shallow_Foundation, Universitat politécnica de catalunya (upc) august 2010.

3.1 GEOMETRÍA

Inicialmente se define la geometría (puntos, líneas y superficies), ya que el programa funciona esencialmente como un sistema simple de CAD (Computer Aided Design), con la diferencia de que GID construye la geometría en un modo jerárquico, esto quiere decir que una entidad de nivel más alto (es decir, volúmen) se construye sobre las entidades de nivel menor (es decir, superficies). ⁵

Figura 1. Geometría.



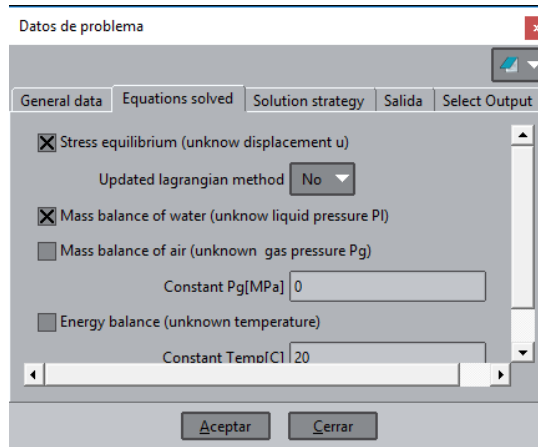
Se decidió usar una geometría de 120 m de profundidad y 60 m a cada lado de las cargas, debido a la influencia de los bulbos de incremento de presión, que para nuestro caso es 6 veces la base de la segunda carga en profundidad y 3 veces a los lados.

3.2 DATOS DEL PROBLEMA

El software Code_Bright requiere introducir los datos generales del problema para llevar acabo la simulación. Estos datos influyen en todos los datos no relacionados con una entidad geométrica o en un intervalo de tiempo.

⁵ Ibíd.

Figura 2. Ventana de datos.



En la pestaña “Equations solved” permite definir las ecuaciones a resolver. Nuestra simulación implica un problema mecánico e hidráulico, teniendo en cuenta el flujo de líquido y los asentamientos producidos por las cargas.

“Solution strategy” contiene los parámetros con los cuales definimos la estrategia utilizada para la solución de la simulación.

La pestaña “Salida” solo es necesaria cuando se trabaja con problemas complejos en que se separan archivos de salida para facilitar el postproceso, por consiguiente, se deja por defecto.

3.3 DEFINICIÓN DE MATERIALES

En esta etapa se definieron las propiedades de cada material a utilizar en la simulación. Estos materiales pueden ser asignados sobre entidades geométricas, en estos modelos se asignaron los valores sobre las superficies creadas.

Figura 3. Propiedades mecánicas.

Materiales				
Arena				
Mechanical data 1	Mechanical data 2	Mechanical data 3	Mechanical data 4	Hydr
Linear Elasticity	ITYCL	P1	P2	P3
	1	40000	0	0.3
Linear Elasticity - Temp and Suction	1	50	0	0.3
Nonlinear Elasticity				

Las propiedades mecánicas de los materiales mencionadas en la Tabla 2 fueron asignadas a cada tipo de suelo.

Figura 4. Propiedades hidráulicas.

Materiales				
Arena				
Mechanical data 1	Mechanical data 2	Mechanical data 3	Mechanical data 4	Hydraulic a
Retention Curve	ITYCL	P1	P2	P3
Intrinsic Permeability	ITYCL	P1	P2	P3
	1	1e-3	1e-3	1e-3
Liquid Phase Relative Permeability	1	1e-12	1e-12	1e-12
Gas Phase Relative Permeability				

Como deseamos observar las condiciones de flujo de líquido en los materiales, se asignaron los parámetros hidráulicos necesarios para la simulación.

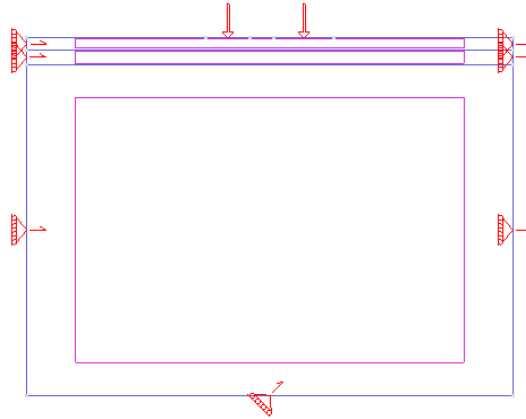
3.4 CONDICIONES DE CONTORNO.

GID permite incluir las condiciones de contorno que pueden ser asignadas sobre entidades geométricas. Estas condiciones pueden ser fuerzas, condiciones en desplazamientos, condiciones de contorno de flujo, incógnitas iniciales, porosidad inicial, tensiones iniciales.

3.4.1 Condiciones Mecánicas. Para estas simulaciones hay 4 condiciones de contorno mecánicas, las cargas distribuidas q_1 y q_2 , una restricción de

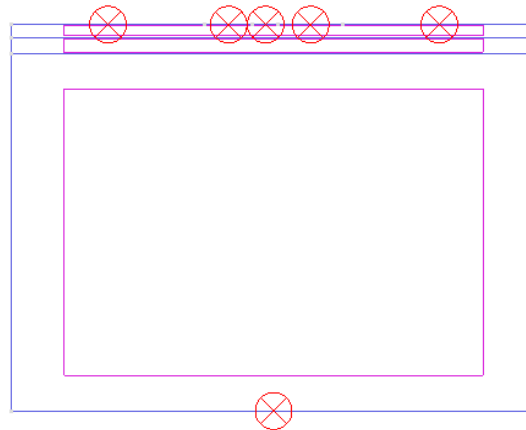
desplazamiento horizontal $U_x=0$ y la restricción de desplazamiento vertical $U_y=0$ en los bordes de su geometría.

Figura 5. Condiciones de contorno mecánicas.



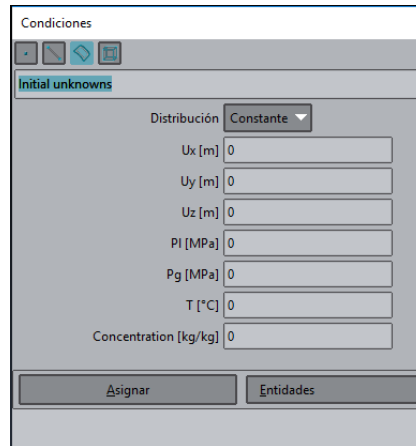
3.4.2 Condiciones Hidráulicas. En estas simulaciones se planteó un suelo completamente saturado, por esta razón, se debe incluir la presión de líquido en los límites de su geometría. En nuestro caso será de 0 MPa en la parte superior y 1.177 MPa en la inferior, que se ha calculado multiplicando la profundidad del suelo saturado (120 m) por la unidad del peso específico del agua (9.81 KN/m²).

Figura 6. Condiciones de contorno Hidráulicas.



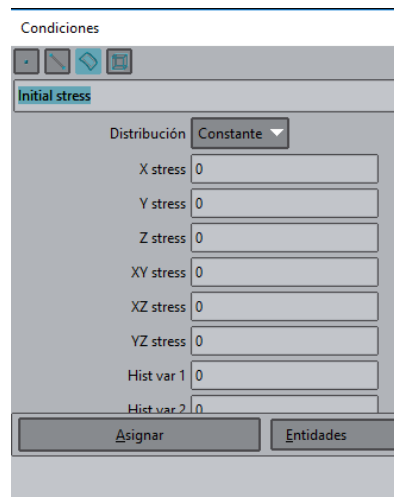
3.4.3 Incógnitas Iniciales y estrés inicial. En estas simulaciones las incógnitas iniciales de desplazamientos o deformaciones deben ser 0 en todas las superficies, por otra parte, las tensiones iniciales se deben considerar constantes sobre toda la geometría e igual a 0 MPa.

Figura 7. Incógnitas iniciales.



The screenshot shows a software window titled 'Condiciones' with a sub-tab 'Initial unknowns'. It features a 'Distribución' dropdown menu set to 'Constante'. Below this, there are input fields for various parameters, all set to '0': Ux [m], Uy [m], Uz [m], P1 [MPa], Pg [MPa], T [°C], and Concentration [kg/kg]. At the bottom, there are two buttons: 'Asignar' and 'Entidades'.

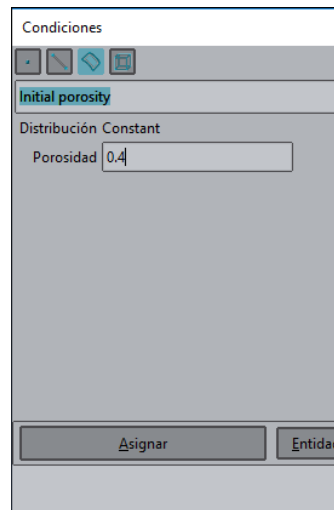
Figura 8. Tensiones iniciales.



The screenshot shows a software window titled 'Condiciones' with a sub-tab 'Initial stress'. It features a 'Distribución' dropdown menu set to 'Constante'. Below this, there are input fields for various stress components, all set to '0': X stress, Y stress, Z stress, XY stress, XZ stress, YZ stress, Hist var 1, and Hist var 2. At the bottom, there are two buttons: 'Asignar' and 'Entidades'.

3.4.4 Porosidad inicial. En este paso se debe establecer el valor de porosidad para cada tipo de estrato, lo cual varía, dependiendo de los estratos utilizados en cada simulación.

Figura 9. Porosidad inicial.



3.5 INTERVALOS DE TIEMPO.

En las simulaciones puede ocurrir problemas transitorios y / o cambios de las condiciones de contorno en el tiempo, debido a esto es necesario definir varios intervalos de tiempo.

En nuestro caso, se ha definido un primer intervalo donde no se tiene en cuenta ninguna carga sobre el suelo, en esta etapa se busca un equilibrio geo-estático del modelo.

Figura 10. Ventana de intervalo de tiempo.

Datos de intervalo

1

Units of time discretization: Years

Initial Time(start period): 0.0

Initial Time Step: 1

Final Time(end period): 1

Partial Time(see manual): 1

Partial Time Step(see manual): 1

☐ Put displacements to 0

Un segundo intervalo de tiempo en el cual se observarán los cambios producidos al ubicar la carga q_1 sobre el suelo analizado; y un tercer intervalo donde analizaremos la variación causada por la carga q_2 en los asentamientos y presión de poros del depósito arcilloso.

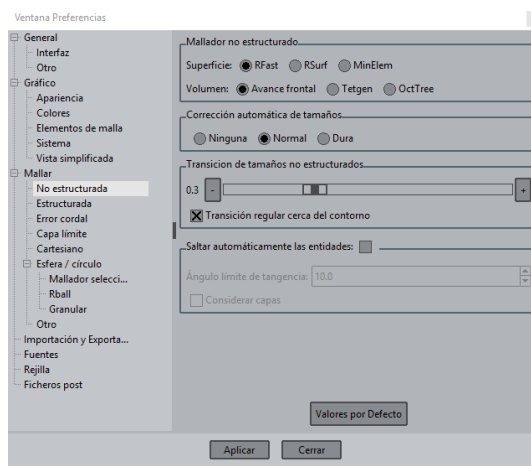
3.6 GENERACIÓN DE LA MALLA

La generación de la malla consiste en discretizar la geometría en nodos y elementos. Las condiciones y materiales asignados a las entidades geométricas se transfieren durante este proceso a los nodos y elementos.⁶

En este ejemplo se utilizó una malla no estructurada la cual está compuesta por elementos lineales triangulares.

⁶ Ibíd.

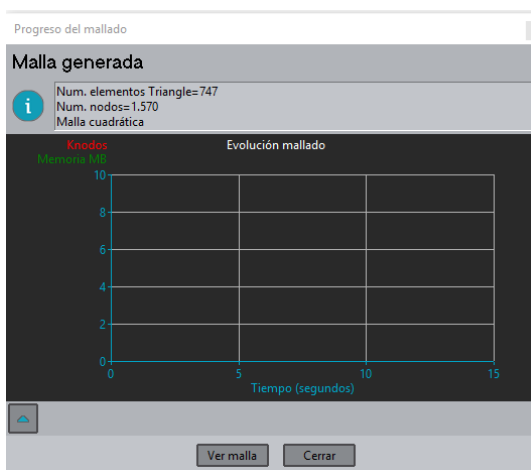
Figura 11. Preferencias de una malla no estructurada.



3.6.1 Densidad de malla. Densidad de la malla se puede ajustar mediante el control del tamaño del elemento en diferentes partes de la geometría. El parámetro que controla el tamaño elementos triangulares es la longitud media de sus lados. Este parámetro se puede definir más de cada entidad geométrica del problema.⁷

Para los modelos analizados, se utilizó un tamaño de elementos de 8 m y su configuración se muestra en la figura 13.

Figura 12. Evolución del mallado.

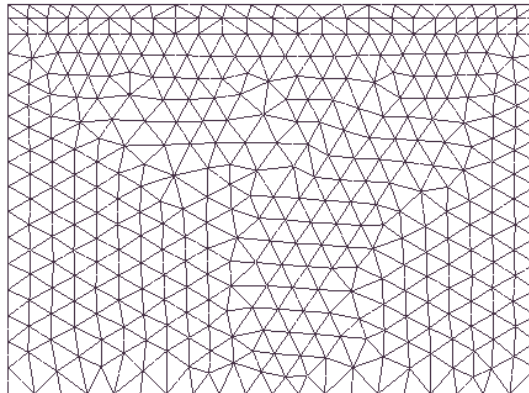


⁷ Ibíd.

Con todos los parámetros previamente definidos, la malla generada tiene las siguientes propiedades:

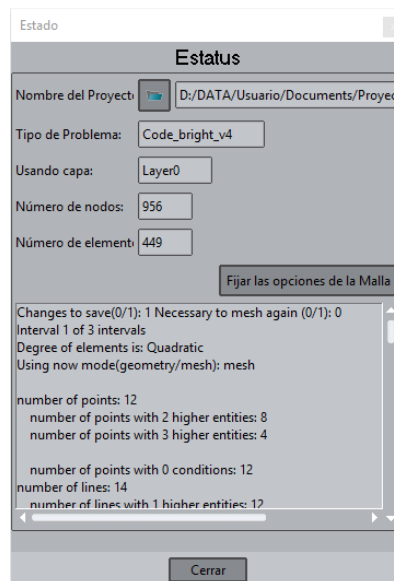
- La longitud del lado de los triángulos en las superficies es de 8m.
- La transición desde los límites de la parte superior se hará con elementos de aumento de tamaño, en una proporción de 0.3.

Figura 13. Malla utilizada.



Las propiedades de malla se presentan en la figura 14.

Figura 14. Características de la malla.



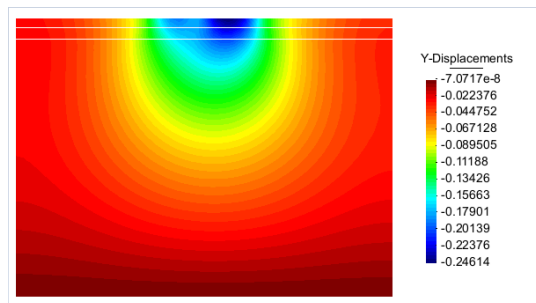
3.7 PROCESO PARA EL CÁLCULO DEL POSTPROCESO Y RESULTADOS

Para el cálculo del postproceso se utilizó el software Code_Bright, el cual evidencia los resultados obtenidos en los distintos modelamientos.

Para el desarrollo del análisis de resultados se revisó la metodología utilizada para el cálculo de asentamientos y la variación en la presión de poros del suelo analizado.

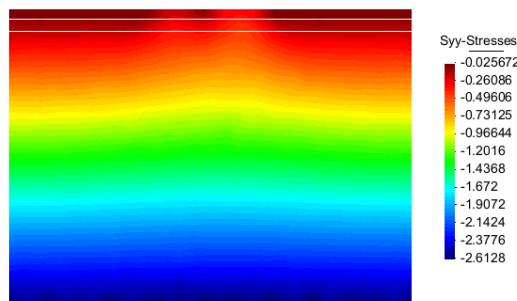
A continuación, presentamos algunos de los resultados obtenidos (post-proceso). Un ejemplo es la variación de los desplazamientos verticales en el modelo.

Figura 15. Desplazamientos verticales.



Code-Bright nos permite también observar los esfuerzos verticales en toda su geometría, dándonos una imagen de lo que ocurre en el modelo.

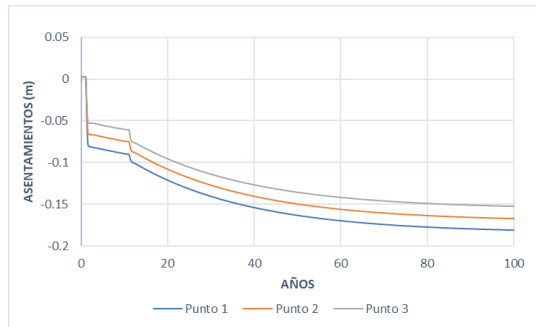
Figura 16. Esfuerzos verticales.



Lo primordial en el proyecto es el análisis de los asentamientos producidos debajo de la base de la primera carga, este software nos permite observar la evolución de los asentamientos en diferentes puntos de la geometría.

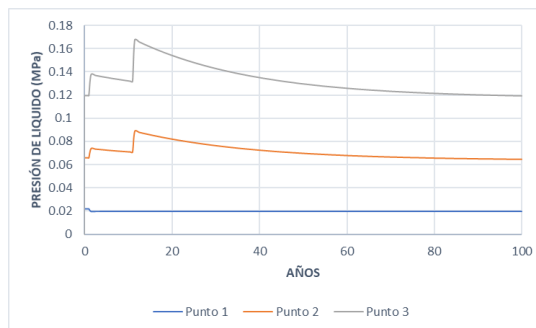
En nuestro caso se decidió analizar 3 puntos que se encuentran en la mitad donde es aplicada la primera carga a una profundidad de 2 m (Punto 1), 6.5 m (Punto 2) y finalmente a 12 m (Punto 3).

Figura 17. Desplazamientos en el tiempo.



Otro resultado que podemos obtener es la variación de presión de líquido en los 3 puntos donde analizamos los asentamientos.

Figura 18. Presión de líquido en el tiempo.



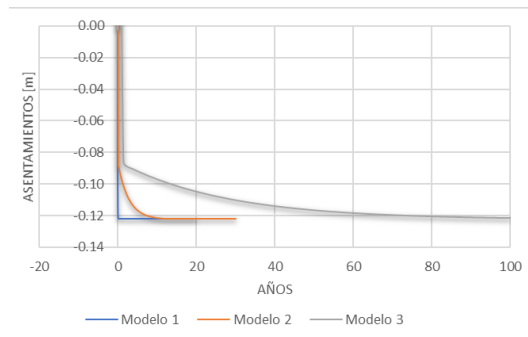
Gracias a la versatilidad de Code-Bright, se obtuvo todos los resultados necesarios para realizar un análisis detallado en cada modelamiento y así observar las variaciones más importantes.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4.1 INFLUENCIA DE LA PERMEABILIDAD INTRÍNSECA

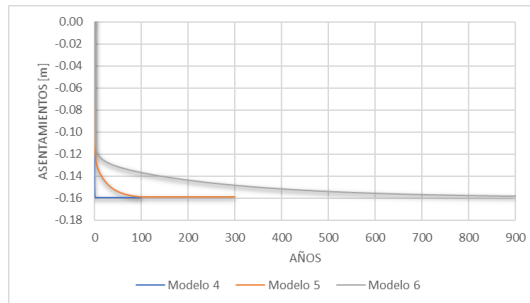
Como se puede observar en la figura 19 y 20, se realizaron 3 simulaciones numéricas para cada condición de estratos en las cuales se vario solo la permeabilidad intrínseca del estrato arcilloso, inicialmente se uso un valor de $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ en el primer modelo, en el segundo modelo se uso un valor de $1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ y finalmente en el tercer modelo una permeabilidad de $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$.

Figura 19. Influencia de la permeabilidad en la condición de estratos #1.



Esta gráfica nos indica que para la condición de estrato #1, lo más recomendable es utilizar una permeabilidad intrínseca de $1 \cdot 10^{-17}$, ya que su consolidación finaliza en un lapso de 100 años.

Figura 20. Influencia de la permeabilidad en la condición de estratos #2.



En la condición de estrato #2, se observó que una permeabilidad intrínseca de $1 \cdot 10^{-16}$ se comporta de una mejor manera, ya que su consolidación también se encuentra en un rango de 100 años.

4.2 INFLUENCIA DE LA SEGUNDA CARGA EN LOS ASENTAMIENTOS E INCREMENTO DE PRESIÓN DE LÍQUIDO

Una vez analizada la influencia de la permeabilidad intrínseca en las dos condiciones, se procede a analizar los cambios debidos a la segunda carga en un lapso de 10 años de diferencia, con unas magnitudes de 0.3 MPa y 0.15 MPa.

Figura 21. Asentamientos producidos por la segunda carga en la condición de estratos #1.

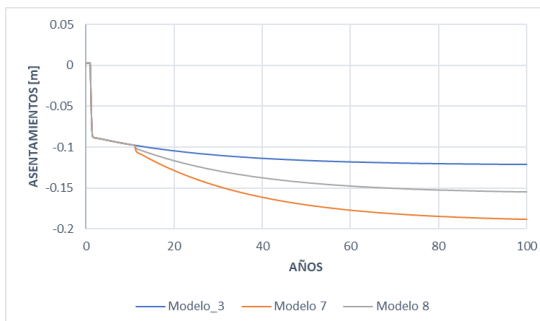
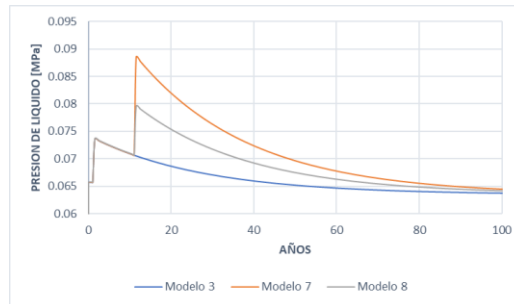


Figura 22. Variación de la presión de líquido debido a la segunda carga en la condición de estratos #1.



Con los resultados obtenidos de estos modelamientos, podemos observar el incremento porcentual del asentamiento final debido a la consolidación del suelo.

Tabla 2. Asentamientos finales condición #1.

MODELO	ASENTAMIENTO (m)
3	-0.121268
7	-0.18785
8	-0.154559

La carga de 0.3 MPa provocó un incremento del 54.9% del asentamiento final en el centro de la base de la primera carga, y un incremento del 27.45% con una carga de 0.15 MPa. Observando la variación de la presión de líquido en la mitad del estrato arcilloso, podemos deducir que, aunque la magnitud de la carga varia para estos dos casos, el tiempo en el cual se disipa el exceso de presión es aproximadamente el mismo. Para las simulaciones con la condición de estrato #2, se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 23. Asentamientos producidos por la segunda carga en la condición de estratos #2.

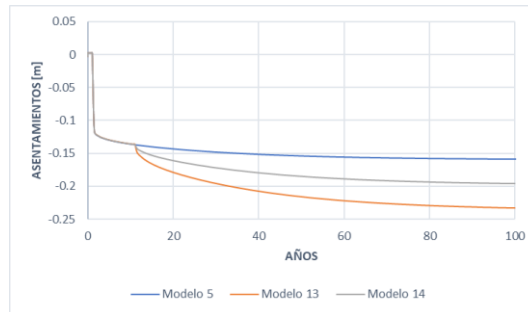
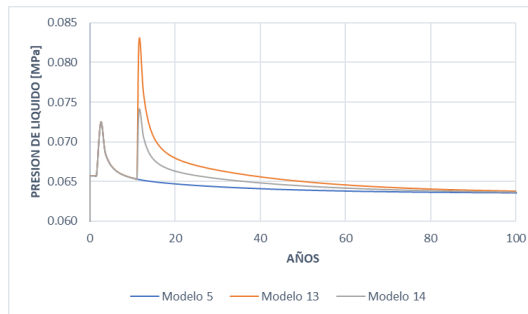


Figura 24. Variación de la presión de líquido debido a la segunda carga en la condición de estratos #2.



En el caso de la condición de estrato #2 los asentamientos finales producidos por la segunda carga son los siguientes:

Tabla 3. Asentamientos finales condición #2

MODELO	ASENTAMIENTO (m)
5	-0.158586
13	-0.233335
14	-0.19596

Se observa que, para este caso, el asentamiento final aumento un 47.13% debido a la carga de 0.3 MPa, y un incremento del 23.56% por la carga de 0.15 MPa, esto nos permite ver que el comportamiento de la deformación fue menor cuando el suelo

es completamente arcilloso. Un análisis mas detallado nos indica que la influencia fue menor debido a que en la condición #2 se encuentra un estrato arcilloso en toda su geometría y su módulo de Young es de 50 MPa, en comparación con la arena que tiene un modulo de 30MPa.

Respecto a la presión del líquido, se observa que, al aplicar las cargas en los modelos, hay un incremento de presión mas grande en la condición #1, y la disipación de energía ocurre en un menor tiempo en la condición #2, ya que su permeabilidad intrínseca es mayor a la condición #1.

Debido a las gráficas obtenidas en las simulaciones 3,7 y 8 que contienen la condición #1 (Figura 21) , y las de las simulaciones 5,13 y 14 (Figura 23) que contienen la condición #2, se deduce que la variación del tiempo de consolidación es directamente proporcional a la magnitud de la segunda carga.

4.3 INFLUENCIA DEL MOMENTO APLICACIÓN DE LA SEGUNDA CARGA EN LOS ASENTAMIENTOS E INCREMENTO DE PRESIÓN DE LÍQUIDO.

4.3.1 $q_2 > q_1$. Ya analizada la influencia de la magnitud de la carga en los asentamientos, se procedió a analizar lo que ocurre con los asentamientos, si la segunda carga es aplicada en diferentes lapsos de tiempo. Los resultados obtenidos debido a una carga de 0.3 MPa en lapsos de 10,15 y 20 años son los siguientes:

4.3.1.1 Condición de estratos #1

Figura 25. Asentamientos producidos por una carga de 0.3 MPa en diferentes tiempos.

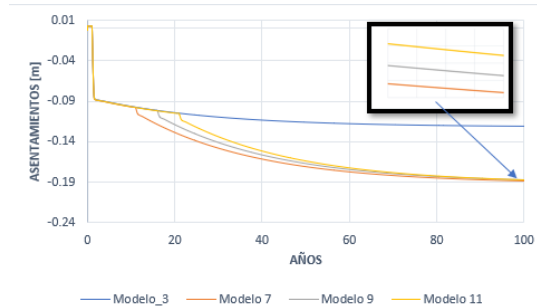
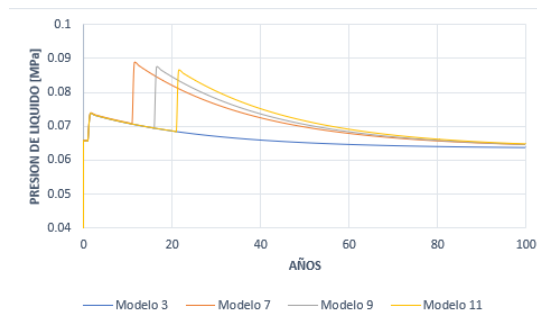


Figura 26. Variación de la presión por una carga de 0.3 MPa en diferentes tiempos.



La figura 25 nos muestra claramente que al ser aplicada la segunda carga los asentamientos varían en un rango muy pequeño, para estos casos el asentamiento mas grande se produce al ser aplicada q_2 en un menor tiempo y la diferencia entre ellos no excede el rango de 1 mm.

En el caso de la variación de presión del líquido, se disipa aproximadamente en el mismo tiempo en los 3 modelos, porque al aplicar q_2 , se observa que aun no se ha disipado completamente la presión ejercida por la primera carga.

4.3.1.2 Condición de estratos #2

Figura 27. Asentamientos producidos por una carga de 0.3 MPa en diferentes tiempos.

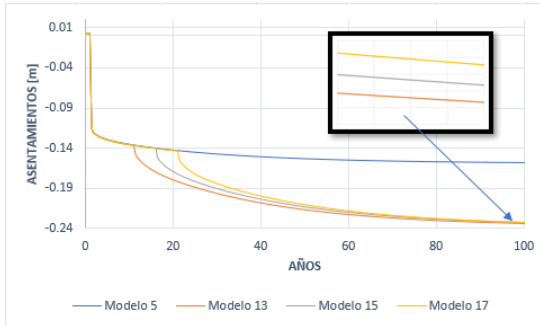
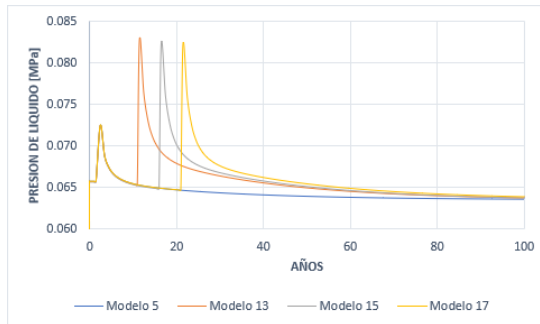


Figura 28. Variación de la presión por una carga de 0.3 MPa en diferentes tiempos.



En esta condición de estratos, se puede observar que sigue con la misma tendencia de la condición #1, la variación en sus asentamientos finales es solo de 1 mm, sin embargo, la gráfica de variación de la presión nos muestra claramente que se disipa aproximadamente en el mismo tiempo, pero la forma en la cual se disipa es diferente, una de las causas es por contar con una permeabilidad mayor y su consolidación primaria se genera en un menor tiempo, esto quiere decir que la expulsión de agua ocupada en los espacios vacíos es más rápida.

4.3.2 $q_2 < q_1$. Por último, se desea observar si los cambios observados anteriormente ocurren de la misma forma, si la segunda carga es menor a la carga uno, por este motivo se observará que ocurre al aplicar una carga de 0.15 MPa en 10,15 y 20 años para las dos condiciones.

4.3.2.1 Condición de estratos #1

Figura 29. Asentamientos producidos por una carga de 0.15 MPa en diferentes tiempos.

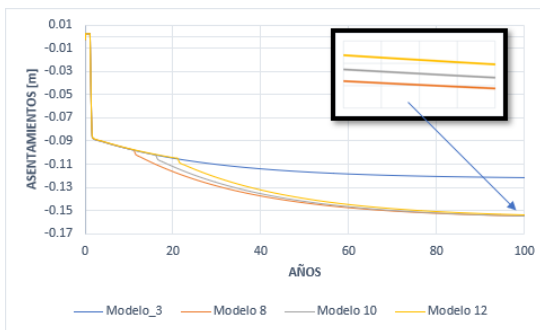
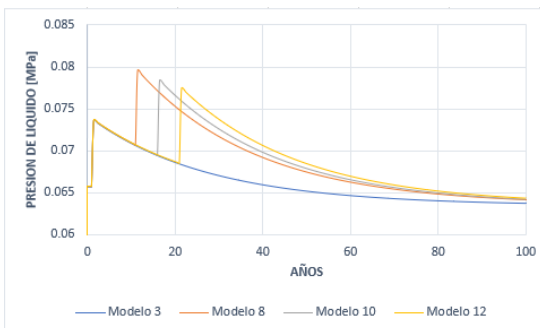


Figura 30. Variación de la presión por una carga de 0.15 MPa en diferentes tiempos.



Como se esperaba, los asentamientos producidos por la carga de 0.15 MPa varían en una pequeña magnitud, para estos 3 casos su diferencia no excede los 0.54 mm, en el caso de la variación de presión de líquido no se observan cambios notorios a los resultados obtenidos con la carga de 0.3 MPa.

4.3.2.2 Condición de estratos #2

Figura 31. Asentamientos producidos por una carga de 0.15 MPa en diferentes tiempos.

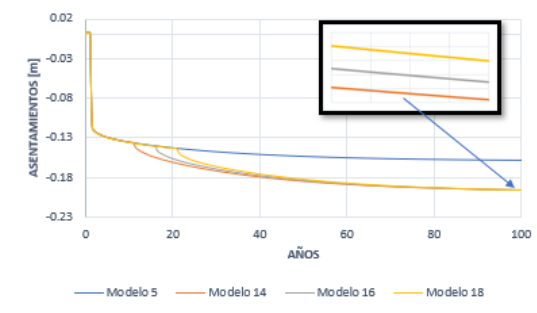
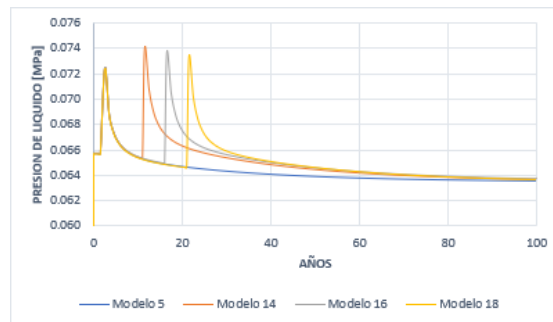


Figura 32. Variación de la presión por una carga de 0.15 MPa en diferentes tiempos.



En el caso de la segunda condición, los asentamientos varían en solo 0.56 mm, esto nos indica que, aunque la carga sea aplicada en diferentes tiempos, los cambios que se generan no son de gran importancia y no se necesitara un estudio detallado de estos.

5. CONCLUSIONES

- Según las pruebas realizadas con los distintos modelamientos se observa con claridad que la influencia de las condiciones de carga, generan un aumento de presión en el suelo, y aunque su magnitud sea diferente, el tiempo en el que se disipa, es aproximadamente el mismo. Esto nos indica que la carga no tiene mayor relevancia en el análisis hidráulico, pero si son importantes en las deformaciones verticales del suelo.
- La permeabilidad intrínseca tiene una influencia directa en el tiempo de consolidación primaria del suelo y los factores como la magnitud o el tiempo de aplicación de la carga adyacente, no tiene gran importancia en la variación del tiempo de consolidación.
- Tal como esta investigación lo ha demostrado, la distribución del incremento de presión en el deposito de suelo arcilloso depende en gran medida de los estratos que se encuentren en su geometría. Es interesante notar que, aunque la magnitud de la segunda carga es diferente, mantienen una forma casi homogénea hasta el momento en que llegan al final de la disipación de la presión generada por las cargas.
- En relación con lo antes expuesto, podemos deducir que las cargas de gran magnitud no son recomendables en estos depósitos arcillosos, ya que tienden a generar deformaciones importantes a lo largo del tiempo que podrían causar fisuras o agrietamientos en las estructuras aledañas.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar programas computacionales en el análisis de los distintos problemas geotécnicos que se puedan generar en la actualidad, ya que estos permiten observar y explicar de mejor manera los cambios que se generan al utilizar diferentes variables geotécnicas y así dar una mejor solución al problema.
- Se recomienda realizar mejoramientos en los suelos arcillosos, para así disminuir los problemas que se pueden generar después de ser construida las estructuras de interés.

BIBLIOGRAFÍA

BRAJA M. Das. Fundamentos de ingeniería de cimentaciones. 7 ed. California State University Sacramento.

CODE_BRIGHT Tutorial_II_Shallow_Foundation, Universitat politècnica de catalunya (upc) august 2010.

GID HOME [en línea] Disponible en internet: <http://www.gidhome.com/> [Ultimo acceso: 12 diciembre 2018]

JUAREZ, Badillo; RODRIGUEZ, Rico. Mecánica de suelos, fundamentos de la mecánica de suelo. Tomo 1. México. Limusa, 1975.

KARL TERZAGHI y REALPH B. Peck. Mecánica de suelos en la ingeniería practica - Segunda edición.

MERCHAN, V, "Small Stran Stiffness and Residual Strength of Unsaturated Boom Clay" PhD Thesis, Universat Politecnica de Catalunya, Barcelona, Spain. 2011

TAYLOR, Donald. Principios fundamentales de la mecánica de suelos. México, Continental, 1961.

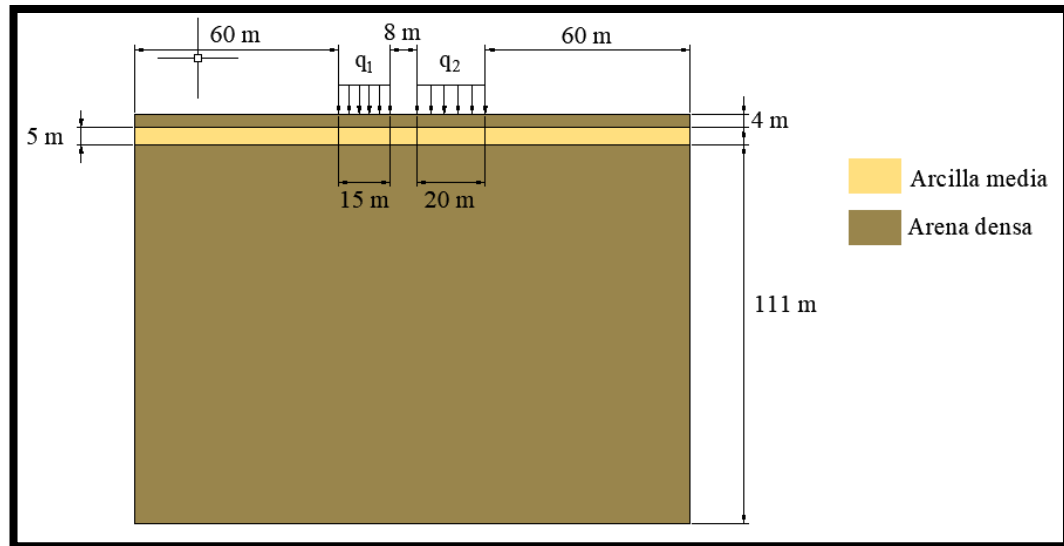
UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA. Departamento de ingeniería del terreno, cartográfica y geofísica MANUAL CODE_BRIGHT. Disponible en internet: https://deca.upc.edu/en/projects/code_bright/downloads [Ultimo acceso: 15 marzo 2019]

VAUNAT, J., MERCHAN, V., ROMERO E. Y PINEDA, J., "Residual strenght of clays at high suctions" 2nd Int. Conf. On Mechanics of Unsaturated Soils, Weinar;Germany, Vol. 2 2007 pp. 151-162

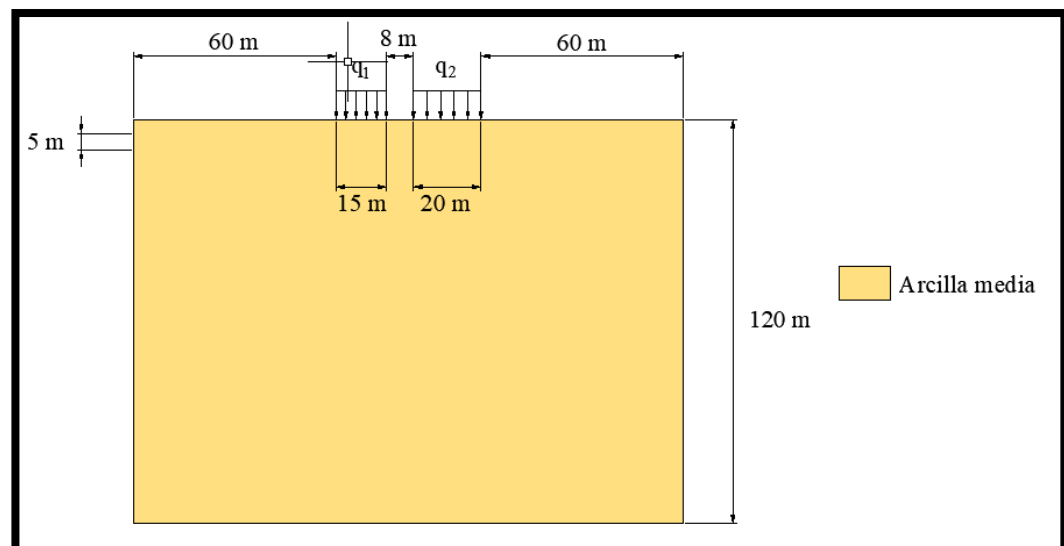
ANEXOS

Anexo A. Condiciones de estratos.

- **CONDICIÓN #1**



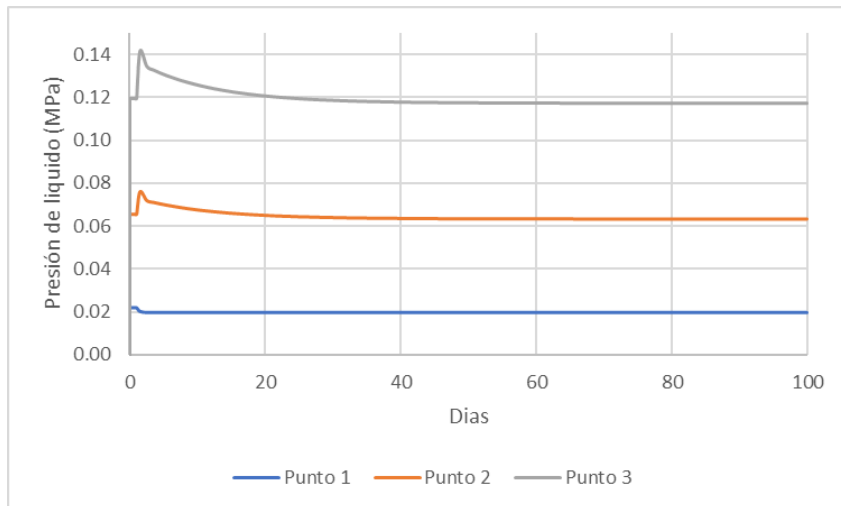
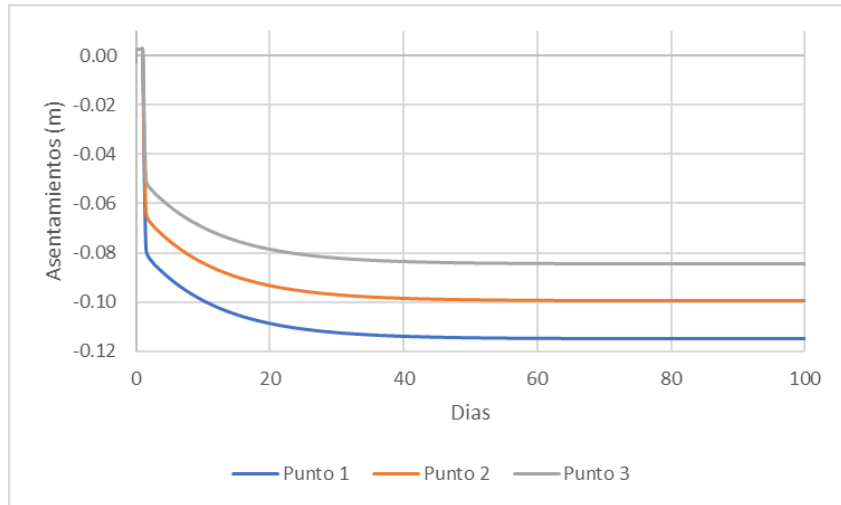
- **CONDICIÓN #2**

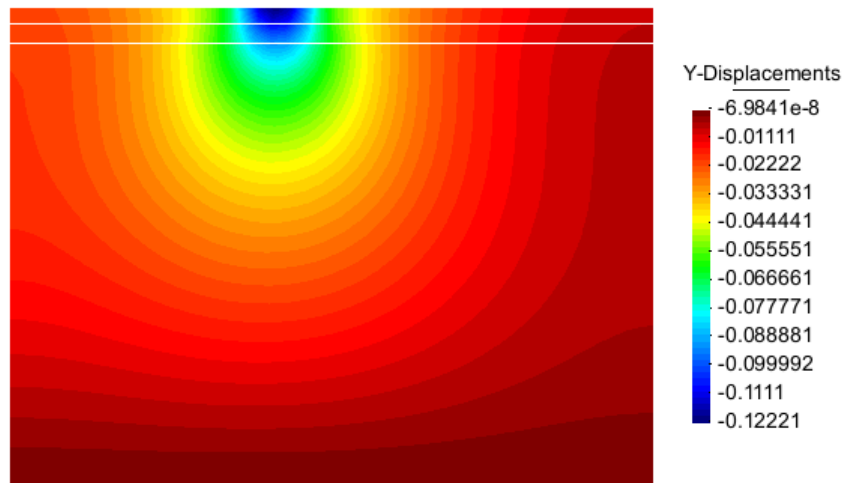


Anexo B. Resumen de modelamientos.

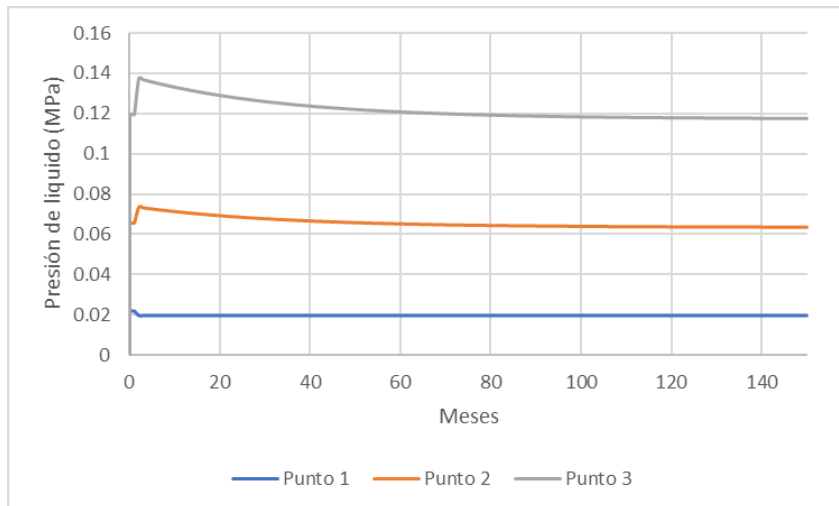
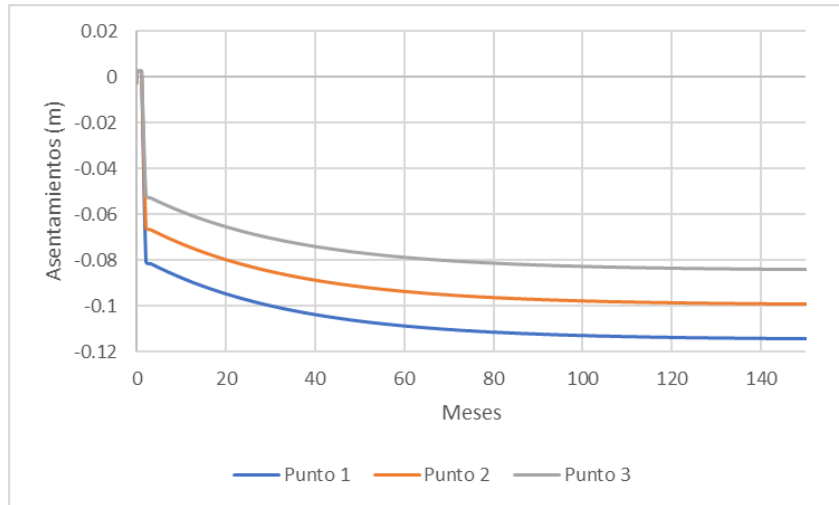
Modelo	Cargas Aplicadas		Condición de estrato	Tiempo de aplicación q_2	Permeabilidad intrínseca de la arcilla (m^2)
	q_1 (MPa)	q_2 (MPa)			
1	-0.2	-	1	-	$1*10^{-14}$
2	-0.2	-	1	-	$1*10^{-16}$
3	-0.2	-	1	-	$1*10^{-17}$
4	-0.2	-	2	-	$1*10^{-14}$
5	-0.2	-	2	-	$1*10^{-16}$
6	-0.2	-	2	-	$1*10^{-17}$
7	-0.2	-0.3	1	10 años	$1*10^{-17}$
8	-0.2	-0.15	1	10 años	$1*10^{-17}$
9	-0.2	-0.3	1	15 años	$1*10^{-17}$
10	-0.2	-0.15	1	15 años	$1*10^{-17}$
11	-0.2	-0.3	1	20 años	$1*10^{-17}$
12	-0.2	-0.15	1	20 años	$1*10^{-17}$
13	-0.2	-0.3	2	10 años	$1*10^{-16}$
14	-0.2	-0.15	2	10 años	$1*10^{-16}$
15	-0.2	-0.3	2	15 años	$1*10^{-16}$
16	-0.2	-0.15	2	15 años	$1*10^{-16}$
17	-0.2	-0.3	2	20 años	$1*10^{-16}$
18	-0.2	-0.15	2	20 años	$1*10^{-16}$

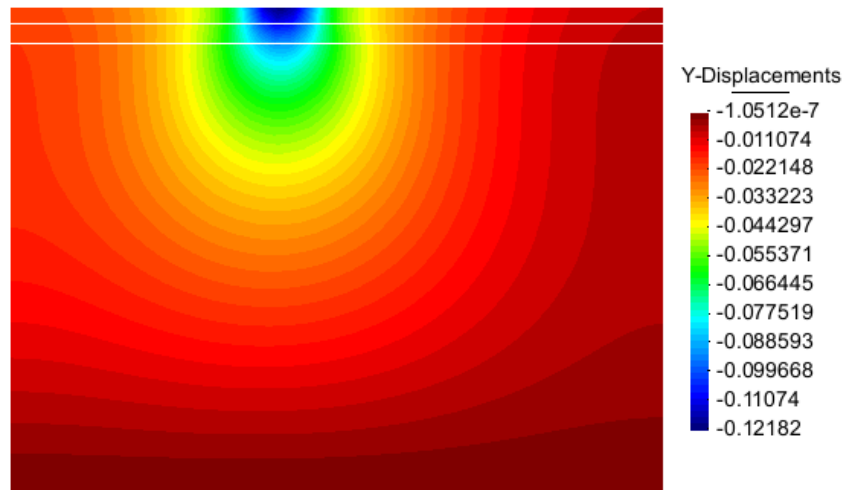
Anexo C. Resultados Modelo #1



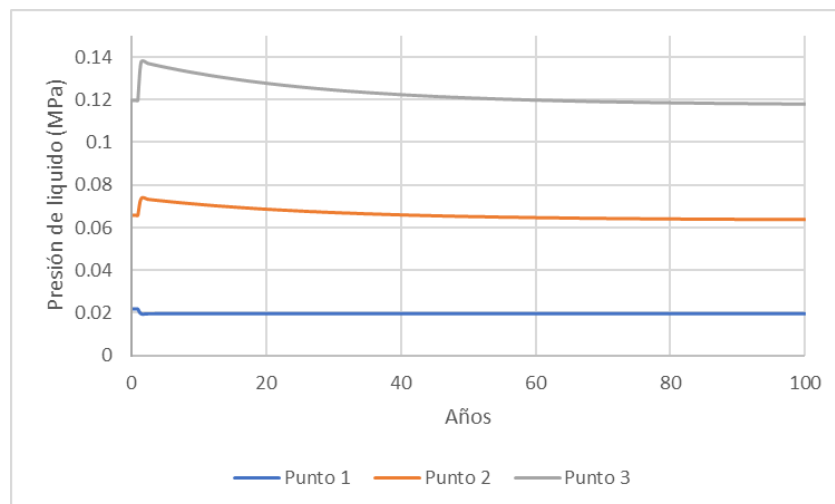
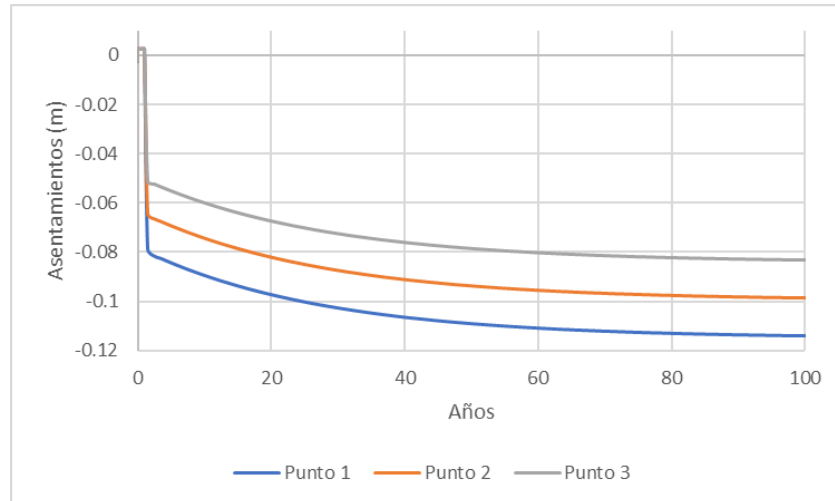


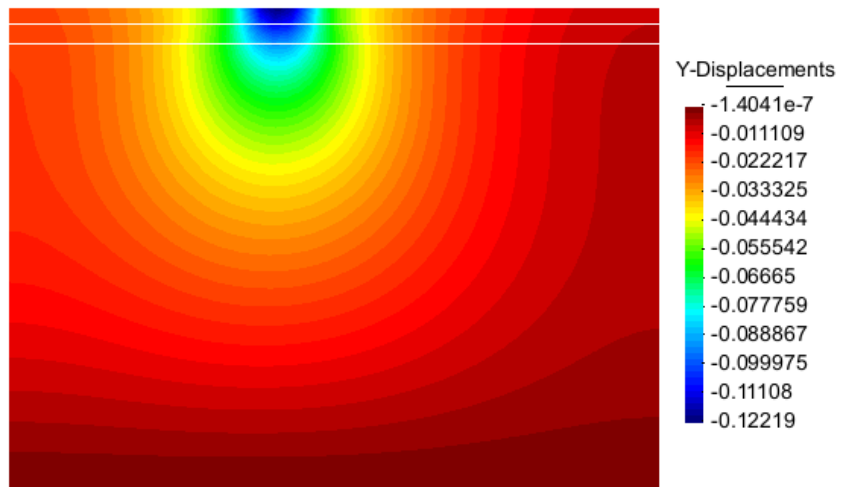
Anexo D. Resultados Modelo #2



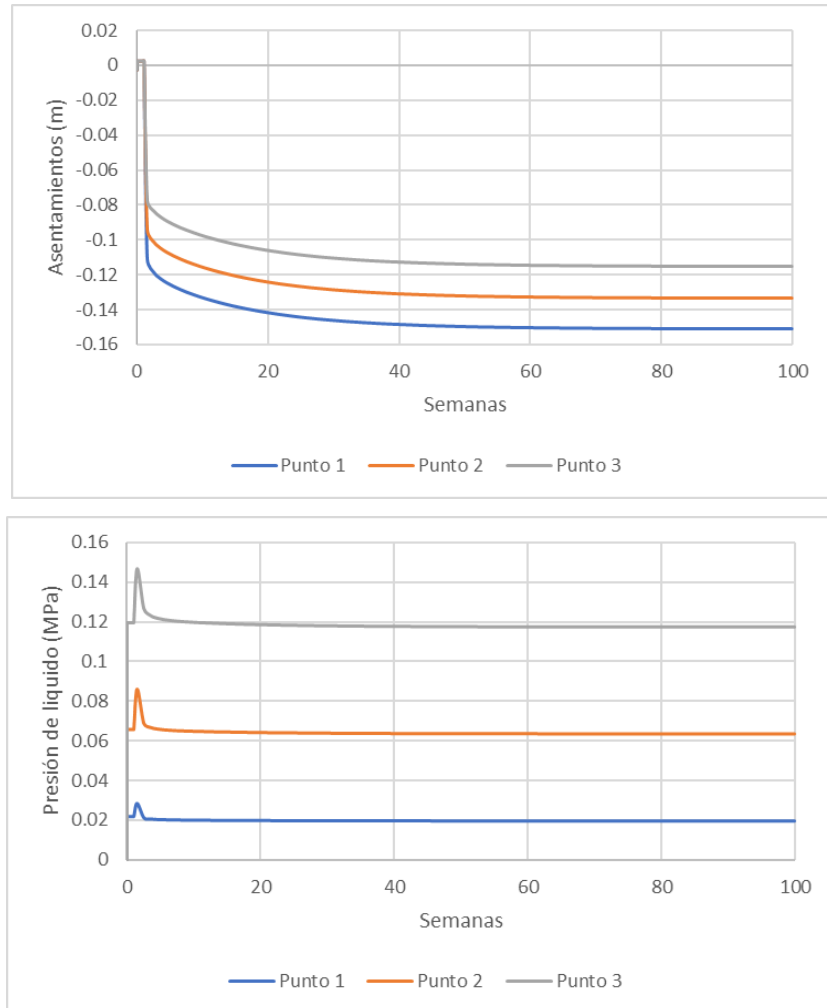


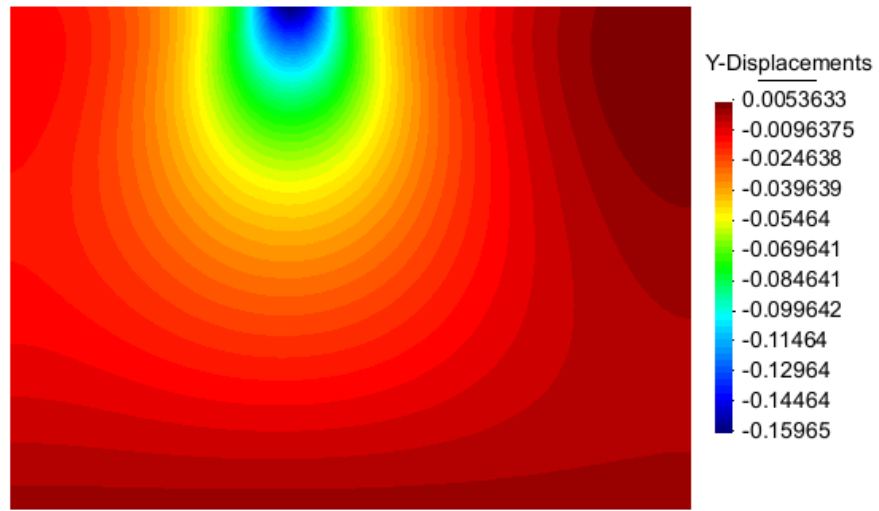
Anexo E. Resultados Modelo #3



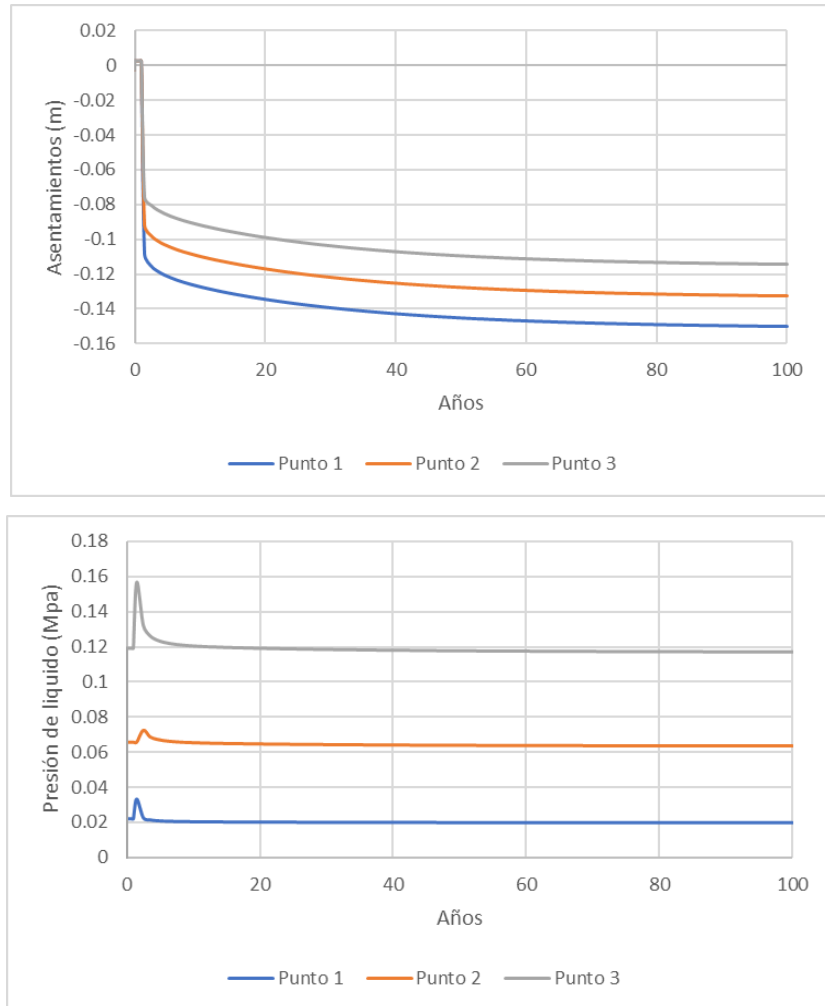


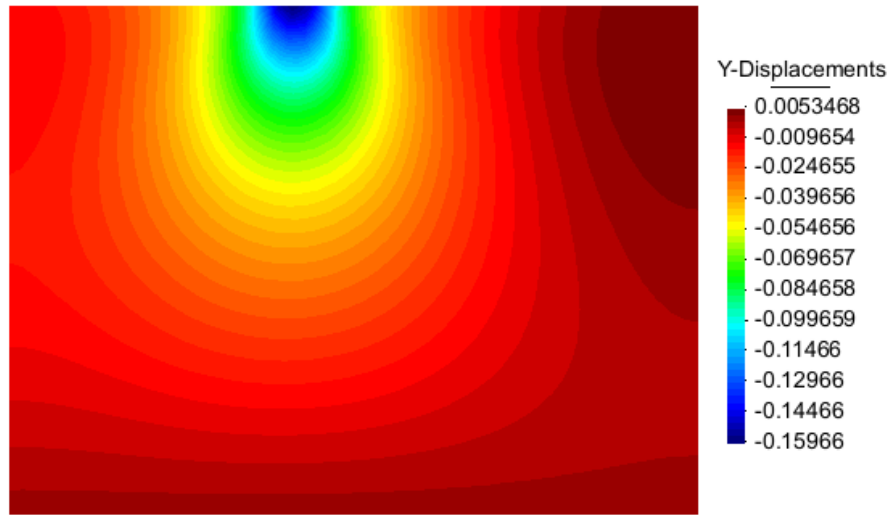
Anexo F. Resultados Modelo #4



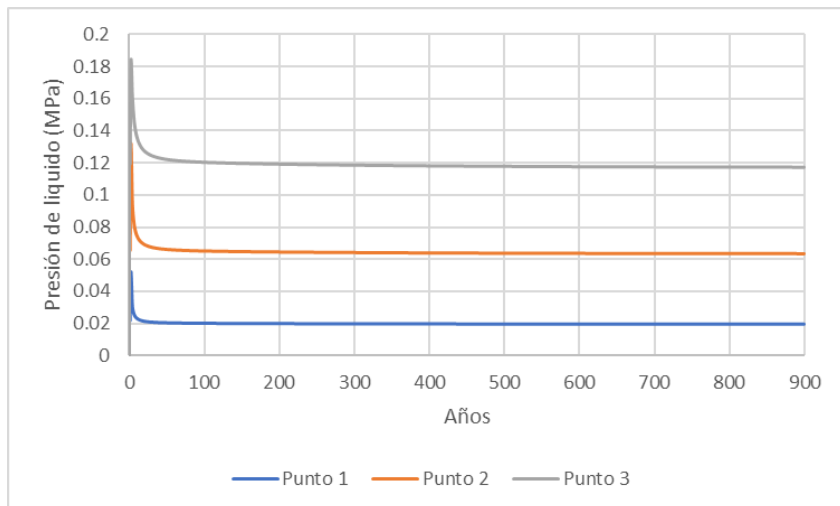
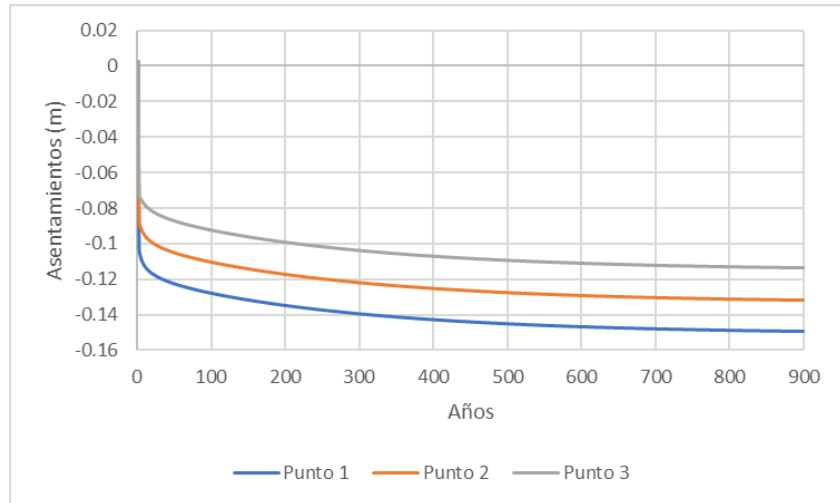


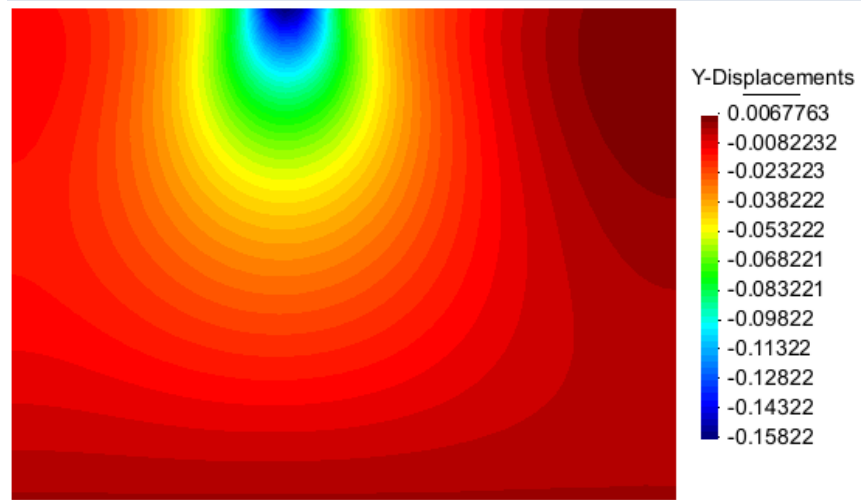
Anexo G. Resultados Modelo #5



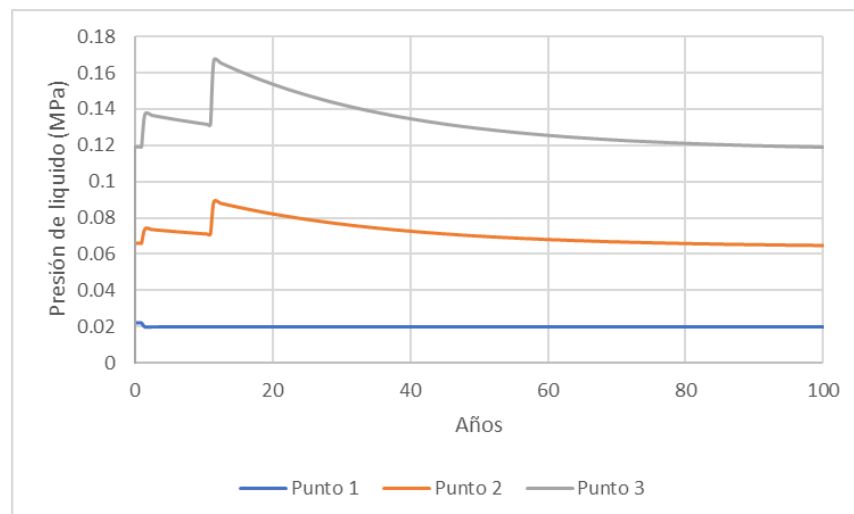
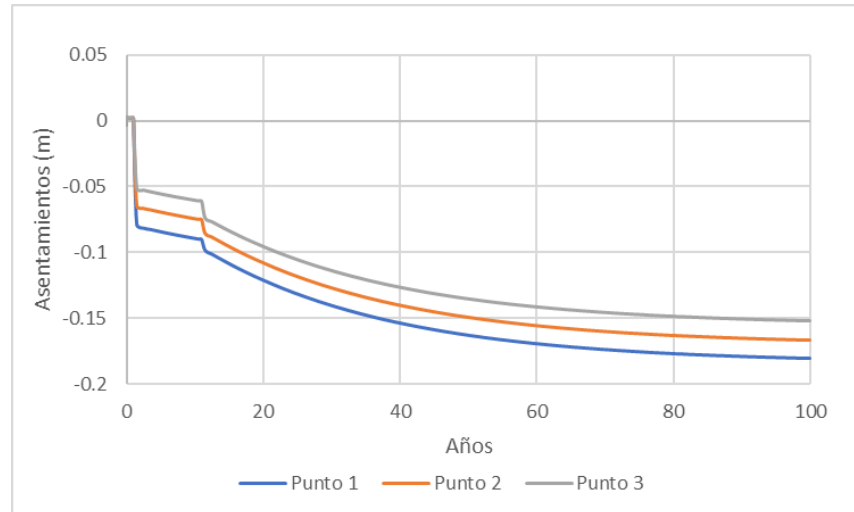


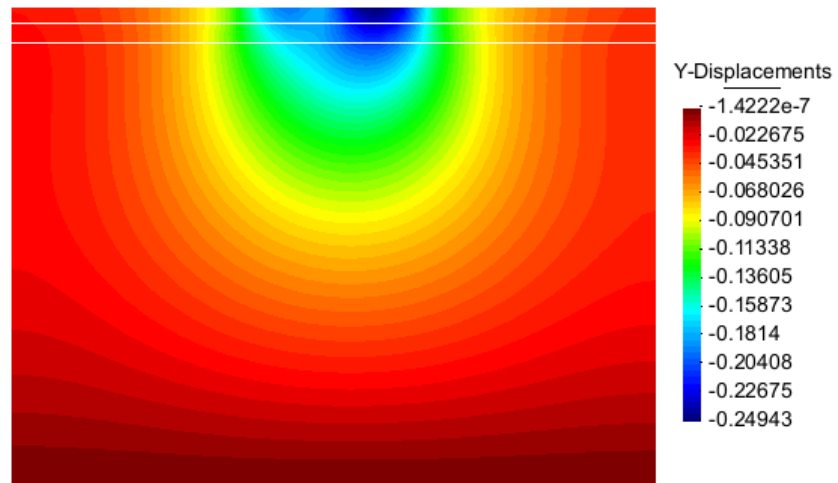
Anexo H. Resultados Modelo #6



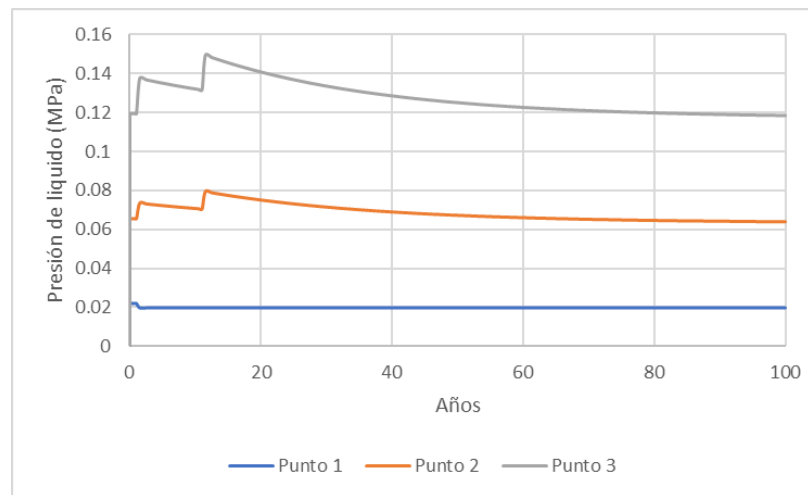
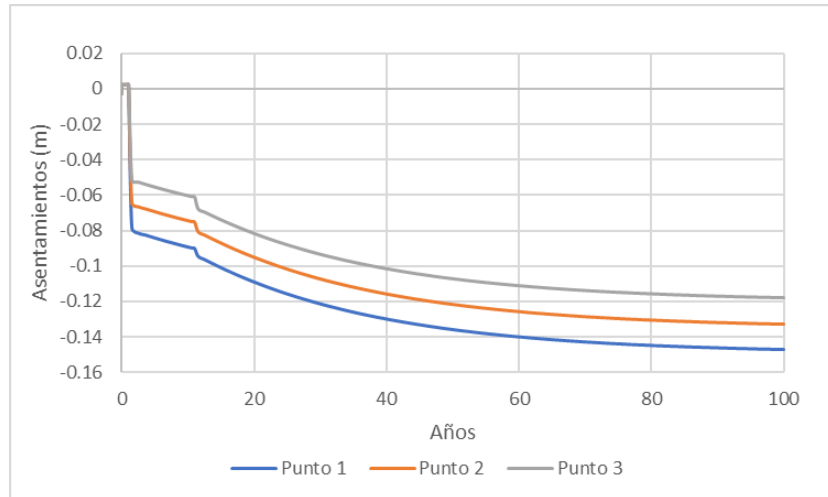


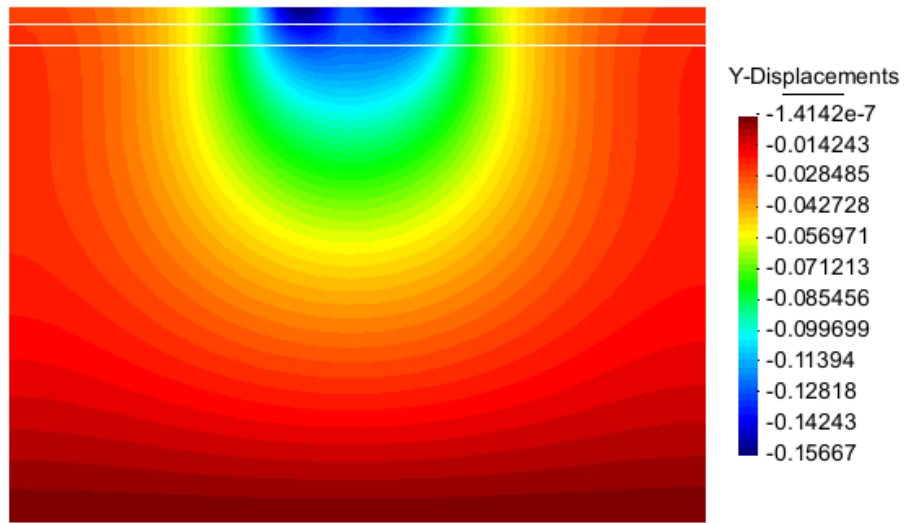
Anexo I. Resultados Modelo #7



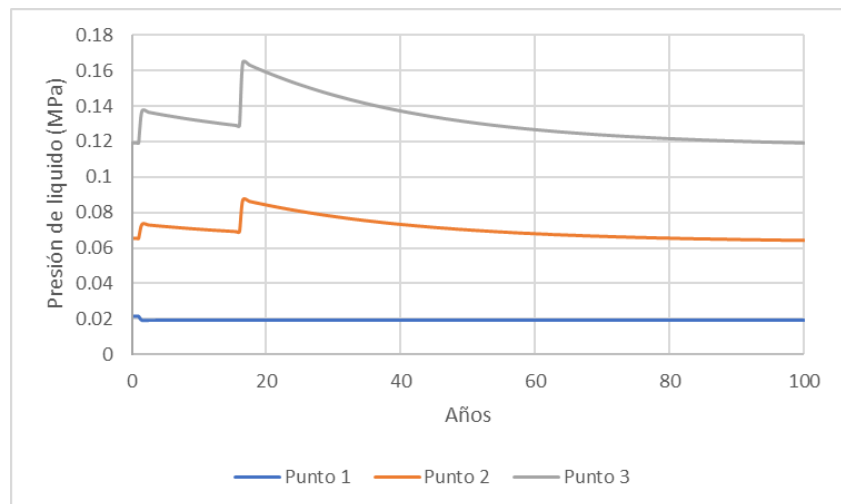
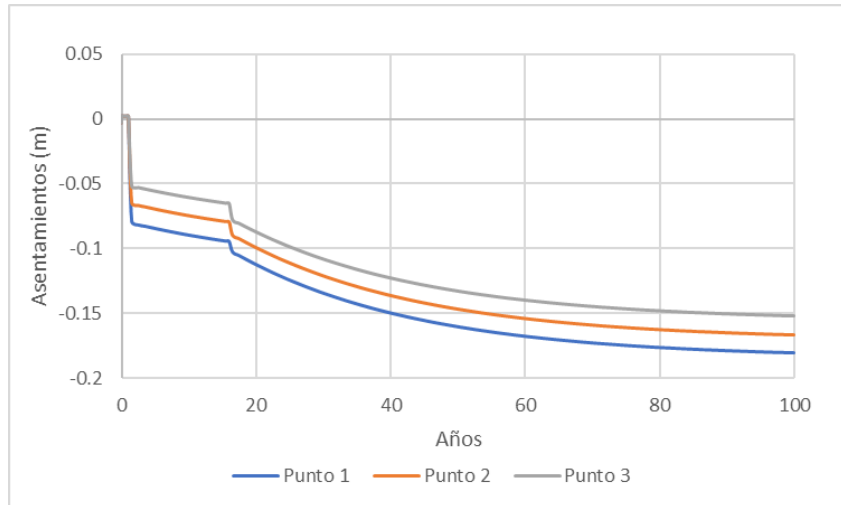


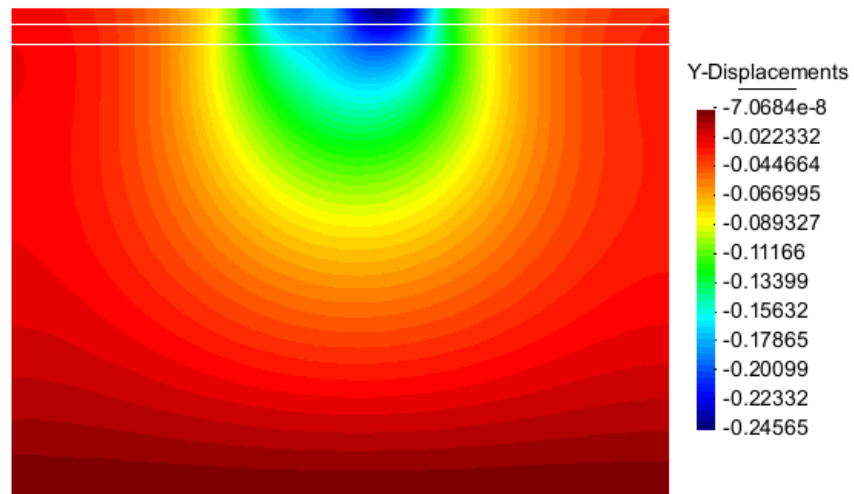
Anexo J. Resultados Modelo #8



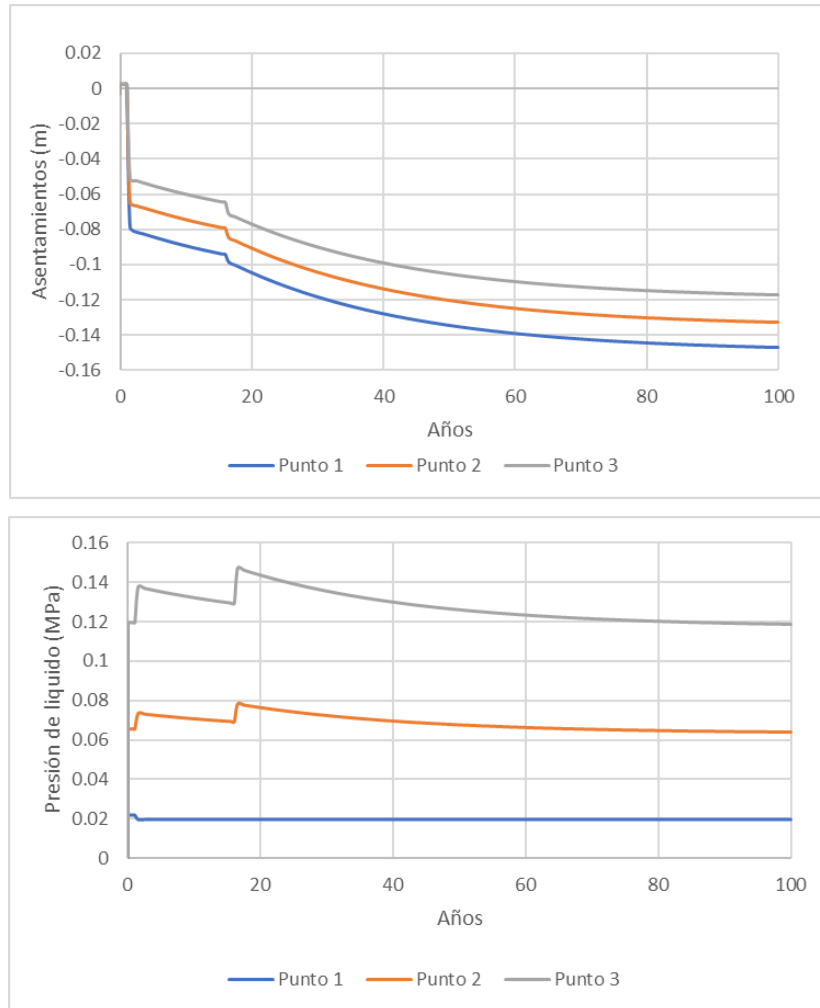


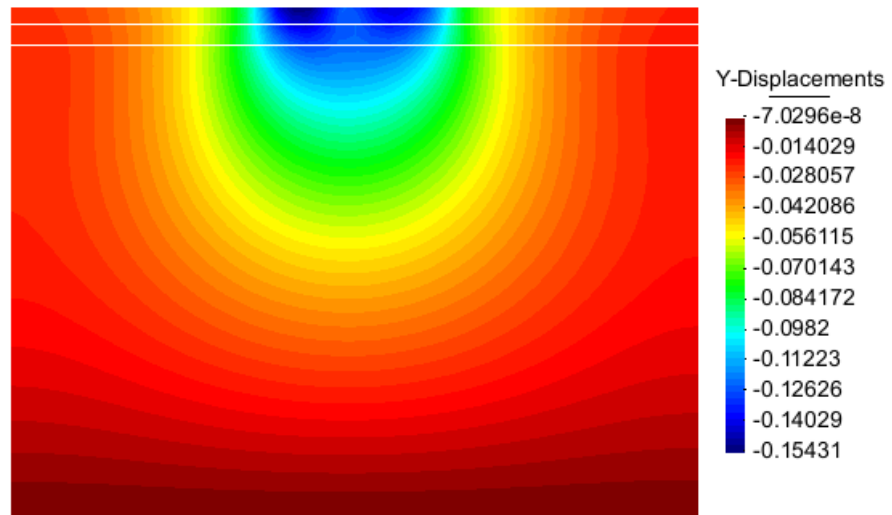
Anexo K. Resultados Modelo #9



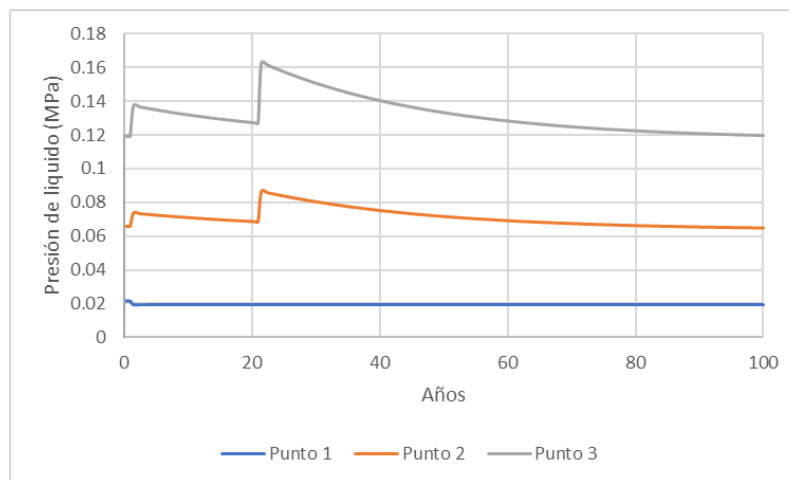
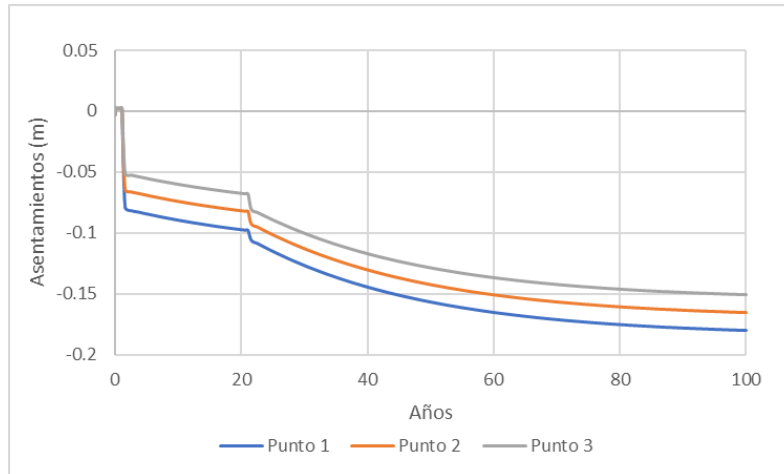


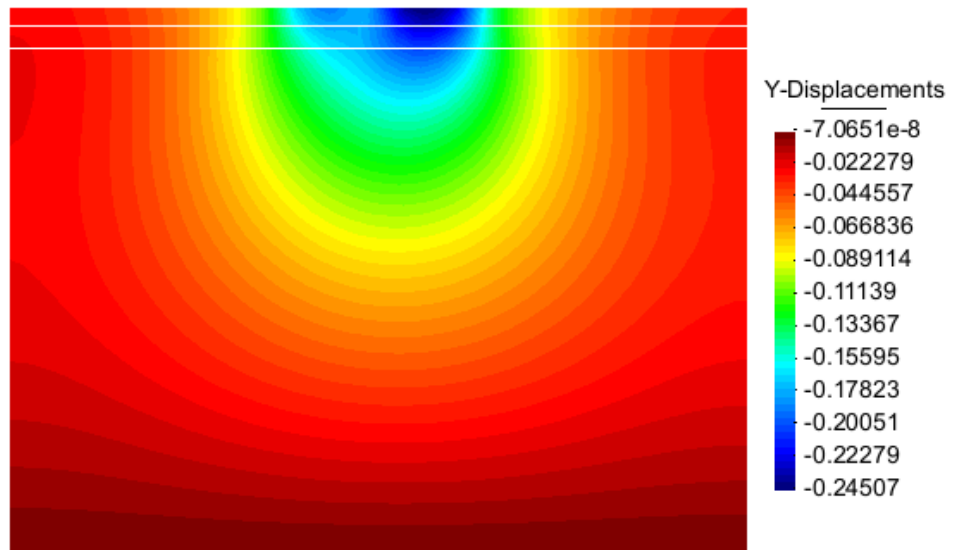
Anexo L. Resultados Modelo #10



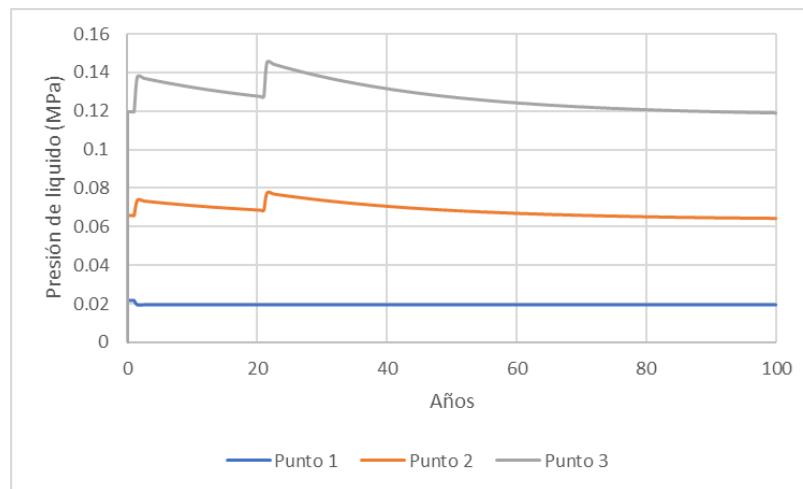
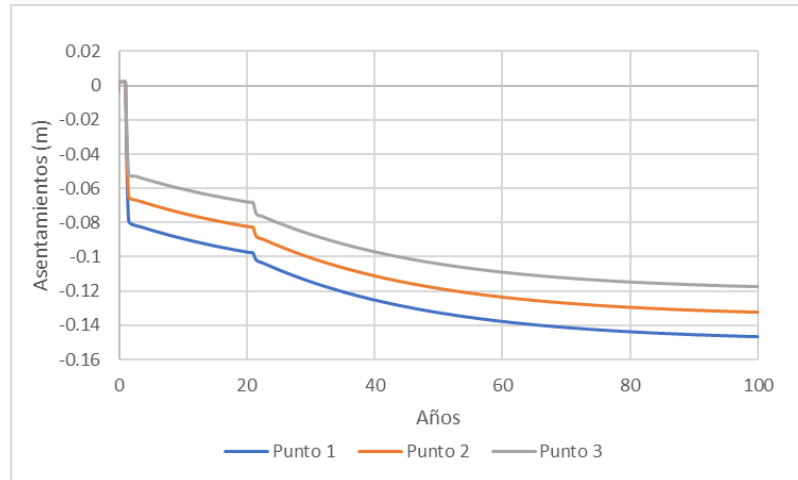


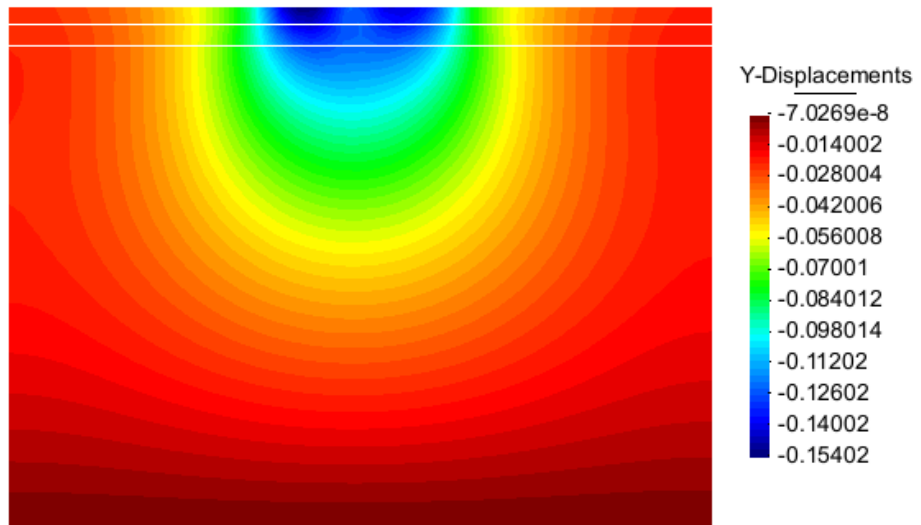
Anexo M. Resultados Modelo #11



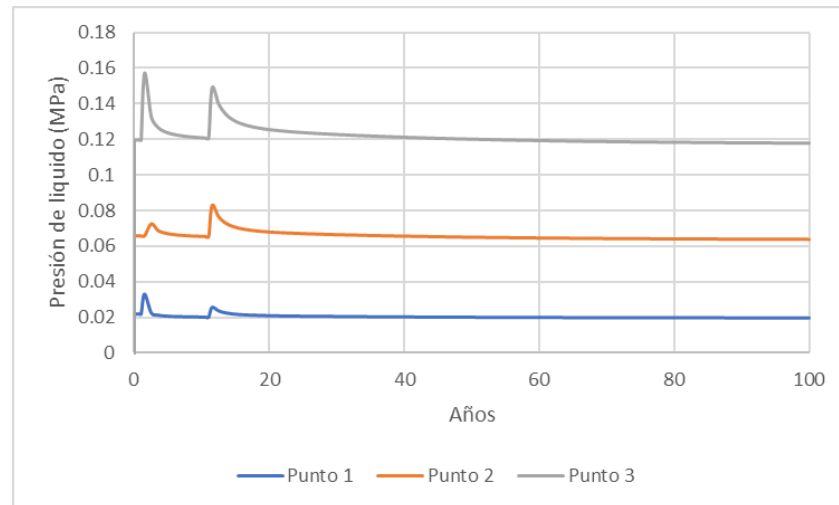
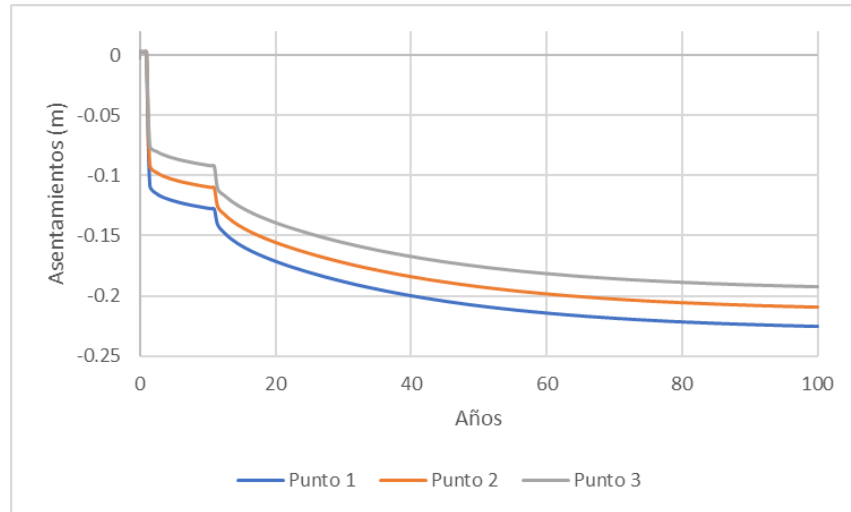


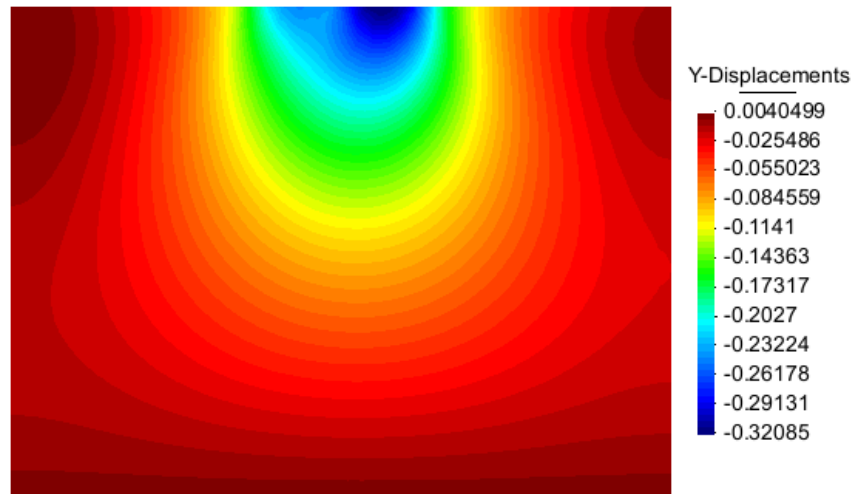
Anexo N. Resultados Modelo #12



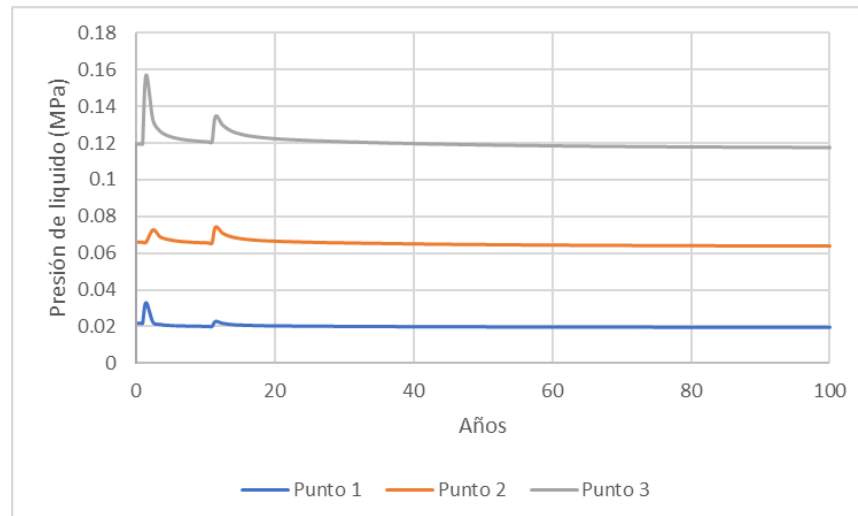
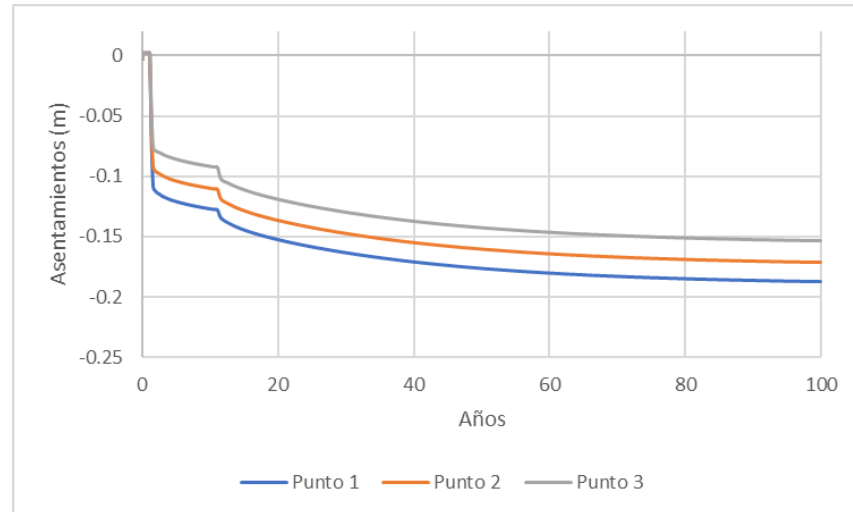


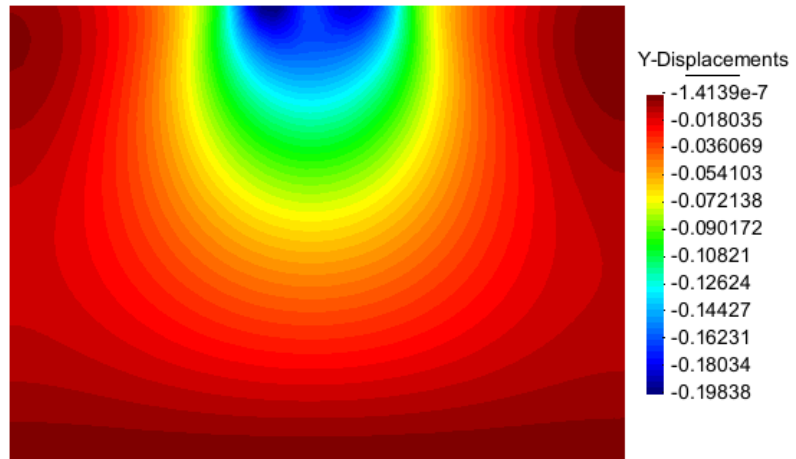
Anexo O. Resultados Modelo #13



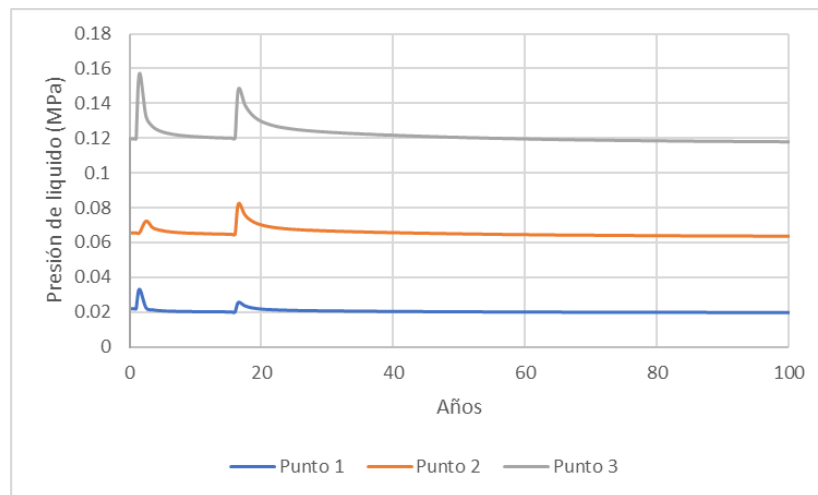
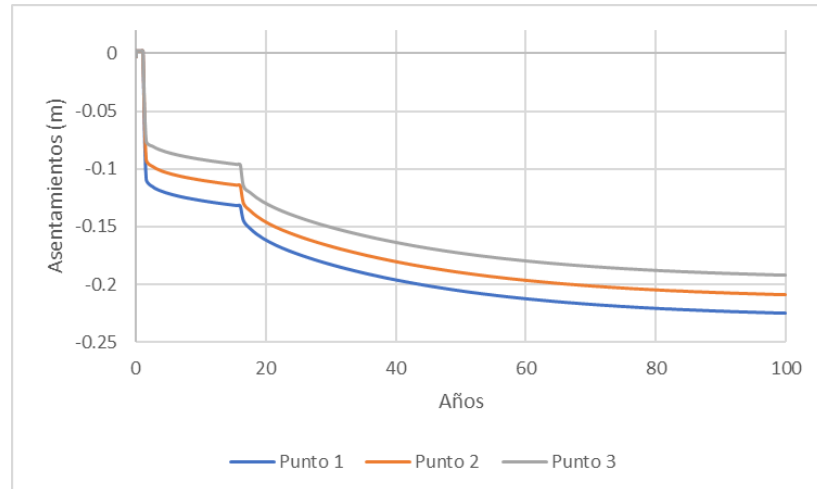


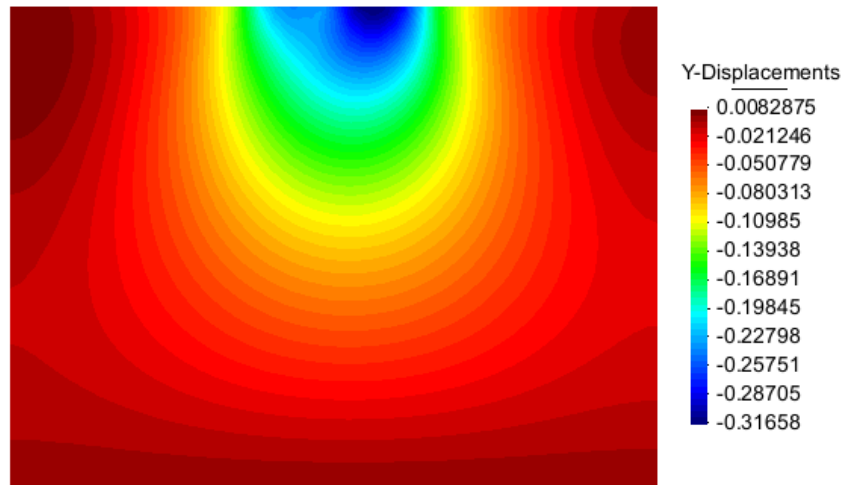
Anexo P. Resultados Modelo #14



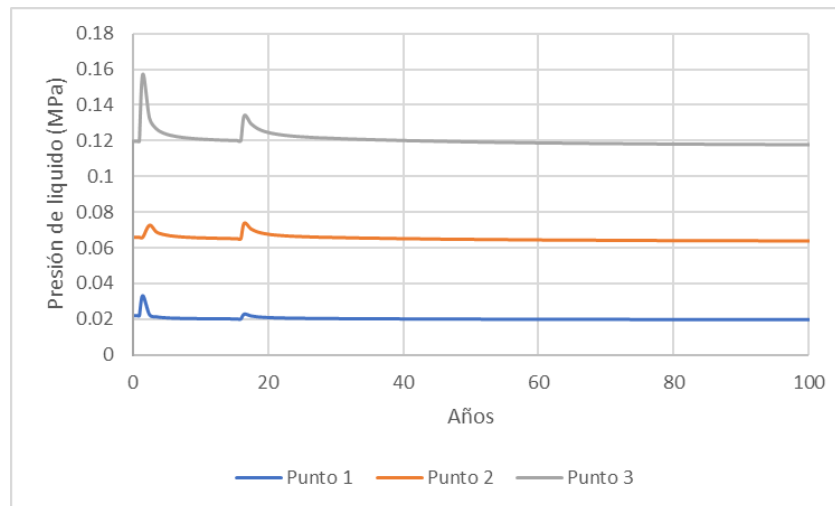
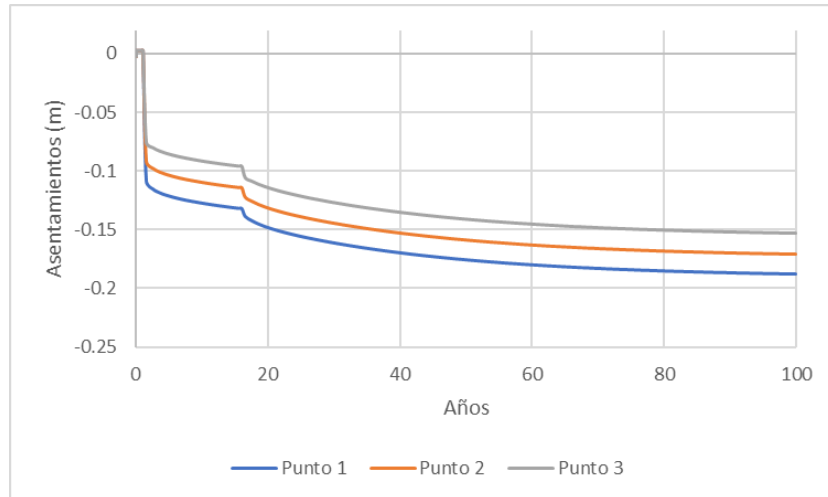


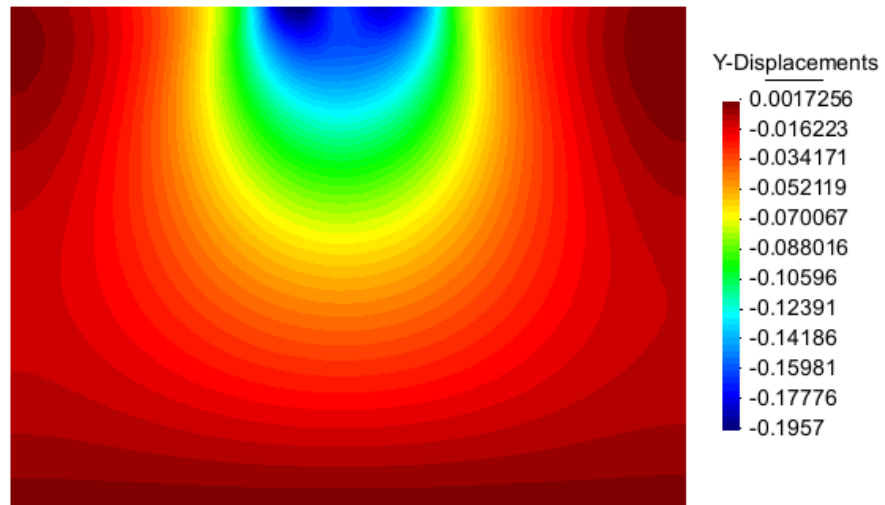
Anexo Q. Resultados Modelo #15



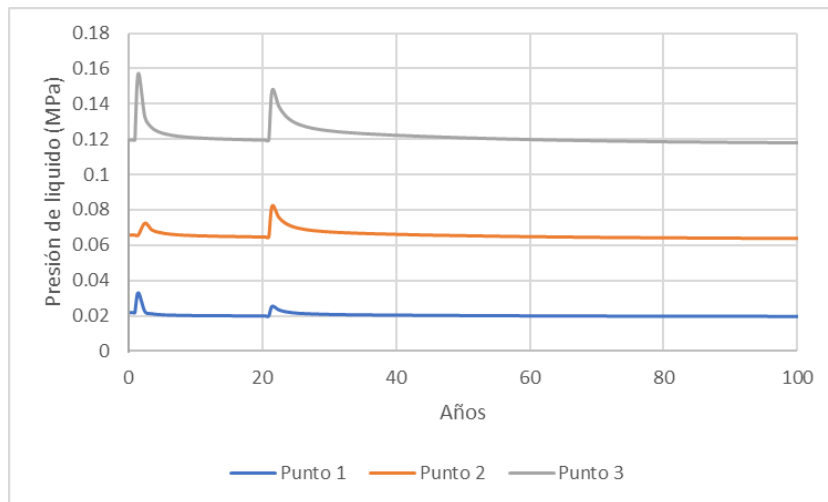
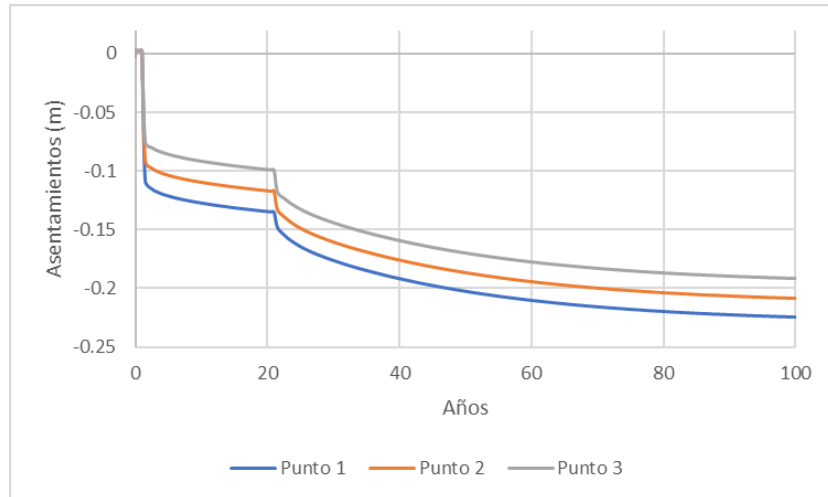


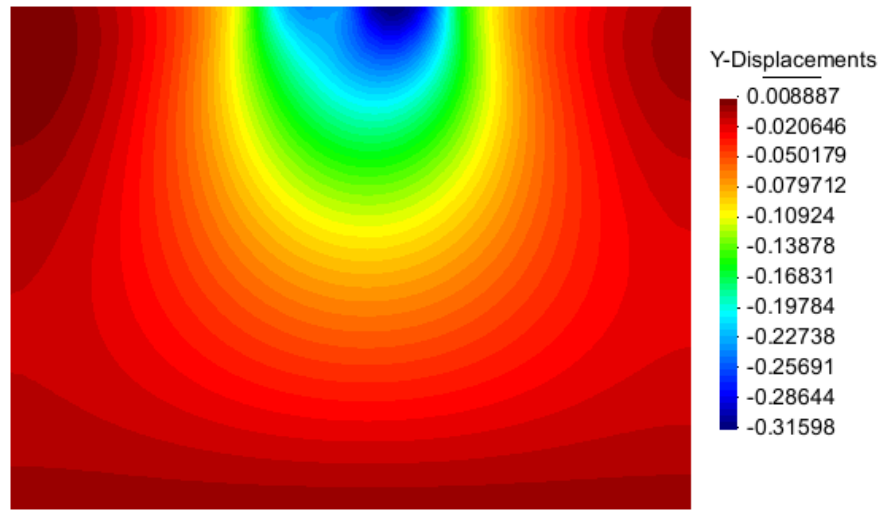
Anexo R. Resultados Modelo #16





Anexo S. Resultados Modelo #17





Anexo T. Resultados Modelo #18

