

Determinación de asentamientos en el relleno sanitario “El Carrasco” de la ciudad de
Bucaramanga

Henry Fabian Becerra Agudelo y Oriol Leal Casanova

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Álvaro Viviescas Jaimes

Doctor en Estructuras

Codirector

Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

Doctor en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mi familia que siempre estuvo ahí apoyándome, a mis padres: Henry Becerra Patiño y Sandra María Agudelo Abaunza, a mi hermana: María Fernanda Becerra Agudelo.

Henry Fabian Becerra Agudelo

Dedico especialmente a mis padres Oriol Leal Lemus y Adriana Casanova Pabón, a mi hermano Santiago Leal Casanova, a mi abuela Leonor Pabón Guerrero, a Marina Almeida Esparza, a Santiago Covilla Almeida y a mi familia por confiar en mí y por siempre estar presentes en los momentos más importantes, así como en los más difíciles de mi vida.

Oriol Leal Casanova

Agradecimientos

Queremos agradecer a los directores de Proyecto de grado el Ing. Vladimir Ernesto Merchán Jaimes Ph.D. y Álvaro Viviescas Jaimes Ph.D. por su orientación durante la elaboración de este proyecto. A la Universidad Industrial de Santander por nuestra formación académica de calidad. Finalmente, agradecemos a la empresa EMAB, por la colaboración al ingreso del lugar y a los profesionales que nos guiaron durante nuestro tiempo de trabajo.

Tabla de Contenido

| | Pág. |
|---|-------------|
| Introducción | 13 |
| 1. Objetivo general..... | 15 |
| 1.1 Objetivos Especificos..... | 15 |
| 2. Generalidades..... | 15 |
| 2.1 Relleno sanitario “El Carrasco” | 15 |
| 2.2 Cárcava 1 | 16 |
| 2.3 Zona de estudio | 16 |
| 3. Marco Teórico..... | 18 |
| 3.1 Composición de un relleno sanitario | 18 |
| 3.2 Mecanismos de asentamiento..... | 21 |
| 3.2.1 Compresión primaria o mecánica | 21 |
| 3.2.2 Biodegradación | 22 |
| 3.2.3 Compresión por flujo plástico..... | 22 |
| 3.2.4 Fenómeno físico-químico | 22 |
| 3.2.5 Interacción..... | 22 |
| 3.2.2 Consolidación | 23 |
| 3.3 Mecanismos de asentamiento..... | 23 |
| 4. Metodología | 24 |
| 4.1 Diseño de pruebas de campo..... | 24 |
| 4.1.1 Construcción de sobrecarga | 24 |
| 4.1.2 Ubicación de puntos de medición y de georreferencia | 25 |

| | |
|--|----|
| 4.1.3 Aplicación de sobrecarga y medición de asentamientos | 27 |
| 4.2 Resultados de mediciones en campo | 31 |
| 4.3 Análisis de asentamientos en Software GiD-Code Bright | 34 |
| 4.3.1 Definición del modelo: Geometría | 34 |
| 4.3.2 Definición del modelo: Propiedades mecánicas e hidráulicas | 35 |
| 4.3.3 Definición de intervalos de tiempo y simulación de proceso de cargas | 36 |
| 4.3.4 Calibración de los modelos elástico y viscoelástico | 39 |
| 4.3.5 Modelo Elástico | 39 |
| 4.3.6 Modelo Viscoelástico | 39 |
| 5. Resultados | 43 |
| 5.1 Modelo Elástico | 43 |
| 5.1.1 Porosidad | 45 |
| 5.1.2 Perfil de porosidades | 46 |
| 5.1.3 Presión de agua | 48 |
| 5.1.4 Perfil de incremento de presión poral de agua | 48 |
| 5.2 Modelo Viscoelástico | 50 |
| 5.2.1 Porosidad | 52 |
| 5.2.2 Perfil de porosidades | 52 |
| 5.2.3 Presión de agua | 54 |
| 5.2.4 Perfil de incremento de presión poral de agua | 54 |
| 6. Conclusiones | 56 |
| Referencias Bibliográficas | 58 |
| Apéndices | 62 |

Lista de Tablas

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Coordenadas de los puntos | 27 |
| Tabla 2. Espesores de capa y propiedades del suelo | 35 |
| Tabla 3. Intervalos de tiempo y asentamientos para el punto 1 | 37 |
| Tabla 4. Intervalos de tiempo y asentamientos para el punto 2 | 38 |

Lista de Figuras

| | pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Antigua celda 1 del relleno sanitario El Carrasco | 17 |
| Figura 2. Alineamiento del estudio geofísico | 18 |
| Figura 3. Composición general de los rellenos sanitarios | 19 |
| Figura 4. Caracterización de residuos sólidos en Bucaramanga | 20 |
| Figura 5. Caracterización de residuos sólidos orgánicos en Bucaramanga | 21 |
| Figura 6. Etapas de asentamientos en el tiempo | 24 |
| Figura 7. Placas de concreto para el proceso de carga | 25 |
| Figura 8. Punto de georreferencia trabajado | 26 |
| Figura 9. Nivel de precisión | 28 |
| Figura 10. Configuración de la regla topográfica | 28 |
| Figura 11. Medición de asentamiento | 29 |
| Figura 12. Configuración de medición de asentamiento | 30 |
| Figura 13. Vista de perfil (izquierda) y planta (derecha) de la conexión entre la madera y la placa de concreto inferior | 31 |
| Figura 14. Asentamientos del punto 1 medidos en el día 1 | 32 |
| Figura 15. Asentamientos del punto 2 medidos en el día 1 | 32 |
| Figura 16. Asentamientos totales medidos del punto 1 | 33 |
| Figura 17. Asentamientos totales medidos del punto 2 | 34 |
| Figura 18. Geometría y superficies para el punto 2 en el software GiD-Code Bright..... | 36 |
| Figura 19. Modelo elástico de asentamientos para el primer día de medición del punto 1 | 43 |
| Figura 20. Modelo elástico de asentamiento para el primer día de medición del punto 2 | 44 |

| | |
|--|----|
| Figura 21. Modelo elástico de asentamientos totales del punto 1 | 45 |
| Figura 22. Modelo elástico de asentamientos totales del punto 2..... | 45 |
| Figura 23. Variación de la porosidad en el tiempo en el modelo elástico | 46 |
| Figura 24. Perfil de porosidad en el modelo elástico del punto 1 | 47 |
| Figura 25. Perfil de porosidad en el modelo elástico del punto 2 | 47 |
| Figura 26. Variación de la presión de agua en el tiempo en el modelo elástico | 48 |
| Figura 27. Perfil de incremento de presión poral en el modelo elástico del punto 1 | 49 |
| Figura 28. Perfil de incremento de presión poral en el modelo elástico del punto 2 | 49 |
| Figura 29. Modelo viscoelástico de asentamientos para el primer día de medición del punto 1 .. | 50 |
| Figura 30. Modelo viscoelástico de asentamientos para el primer día de medición del punto 2.. | 50 |
| Figura 31. Modelo viscoelástico de asentamientos totales del punto 1 | 51 |
| Figura 32. Modelo viscoelástico de asentamientos totales del punto 2 | 51 |
| Figura 33. Variación de la porosidad en el tiempo en el modelo viscoelástico | 52 |
| Figura 34. Perfil de porosidad en el modelo viscoelástico del punto 1 | 53 |
| Figura 35. Perfil de porosidad en el modelo viscoelástico del punto 2 | 53 |
| Figura 36. Variación de la presión de agua en el tiempo en el modelo viscoelástico | 54 |
| Figura 37. Perfil de incremento de presión poral en el modelo viscoelástico del punto 1 | 55 |
| Figura 38. Perfil de incremento de presión poral en el modelo viscoelástico del punto 2 | 55 |

Lista de Apéndices

| | pág. |
|--|-------------|
| Apéndice A. Espesores de capa y propiedades del suelo utilizados | 62 |
| Apéndice B. Geometría y superficies realizadas en el software | 63 |
| Apéndice C. Creación de las superficies..... | 63 |
| Apéndice D. Creación de capas de suelo | 64 |
| Apéndice E. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 1 del punto 1 de los modelos elástico y viscoelástico | 65 |
| Apéndice F. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 2 del punto 1 de los modelos elástico y viscoelástico | 65 |
| Apéndice G. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 3 del punto 1 de los modelos elástico y viscoelástico | 66 |
| Apéndice H. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 4 del punto 1 de los modelos elástico y viscoelástico | 66 |
| Apéndice I. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 5 del punto 1 de los modelos elástico y viscoelástico | 67 |
| Apéndice J. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 6 del punto 1 de los modelos elástico y viscoelástico | 67 |
| Apéndice K. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 1 del punto 2 de los modelos elástico y viscoelástico | 68 |
| Apéndice L. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 2 del punto 2 de los modelos elástico y viscoelástico | 68 |

| | |
|--|----|
| Apéndice M. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 3 del punto 2 de los modelos elástico y viscoelástico | 69 |
| Apéndice N. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 4 del punto 2 de los modelos elástico y viscoelástico | 69 |
| Apéndice O. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 5 del punto 2 de los modelos elástico y viscoelástico | 70 |
| Apéndice P. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 6 del punto 2 de los modelos elástico y viscoelástico | 70 |
| Apéndice Q. Porosidad inicial para todos los estratos | 71 |
| Apéndice R. Permeabilidad intrínseca para la capa 1. | 71 |
| Apéndice S. Condiciones de flujo | 72 |
| Apéndice T. Restricción de desplazamientos para los bordes del modelo y aplicación de carga | 72 |
| Apéndice U. Condición de flujo en las fronteras del modelo | 73 |
| Apéndice V. Intervalo de tiempo de acondicionamiento | 73 |
| Apéndice W. Ejemplo de configuración de los intervalos de tiempo para aplicación sucesiva de carga | 74 |
| Apéndice X. Ejemplo de configuración de los intervalos de tiempo después de aplicada la carga | 74 |
| Apéndice Y. Densidad de la fase sólida en el modelo viscoelástico en la capa 1 | 75 |
| Apéndice Z. Propiedades de viscosidad para el modelo viscoelástico en la capa 1 | 75 |

Resumen

Título: Determinación de asentamientos en el relleno sanitario “El Carrasco” de la ciudad de Bucaramanga*

Autor: Henry Fabian Becerra Agudelo y Oriol Leal Casanova**

Palabras Clave: Asentamientos, Relleno Sanitario, Mecánica de Suelos, Residuos Sólidos Urbanos.

Descripción: Este proyecto tiene como finalidad la medición de asentamientos en la celda 1, ubicada en la cárcava 1 del relleno sanitario “El Carrasco” de la ciudad de Bucaramanga, y posterior elaboración de dos modelos de análisis unidimensional que sean representativos del fenómeno en cuestión. Para cumplir con los objetivos planteados, fue necesario diseñar pruebas de aplicación de cargas incrementales superficiales, para inducir los desplazamientos del suelo, los cuales fueron posteriormente medidos en campo mediante la utilización de un nivel de precisión. Finalmente, teniendo en cuenta las propiedades mecánicas, hidráulicas y viscosas de los materiales de relleno, se realizó un ajuste de datos y se elaboraron dos simulaciones de modelos elásticos y viscoelásticos que representaran los valores de asentamientos esperados. Se espera que estos modelos sirvan como medio para evaluar el comportamiento futuro de los desplazamientos que puedan presentar en al menos un mes después de aplicada una carga, dado que este corresponde al tiempo aproximado de las mediciones en campo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes. Doctor en Estructuras. Codirector: Vladimir Ernesto Merchán. Doctor en Ingeniería.

Abstract

Title: Determination of settlements in “El Carrasco” landfill in the city of Bucaramanga *

Author(s): Henry Fabian Becerra Agudelo and Oriol Leal Casanova **

Key Words: Settlements, Landfill, Soil Mechanics, Municipal Solid Waste.

Description: The purpose of this project is the measurement of settlements in “cell 1”, located in “gully 1” of the "El Carrasco" sanitary landfill in the city of Bucaramanga, and the subsequent development of two one-dimensional analysis models that are representative of this phenomenon. In order to achieve the stated objectives, it was necessary to design tests for the application of incremental surface loads, to induce the soil deformations, which were later measured in the field by using a precision level. Finally, taking into account the mechanical, hydraulic, and viscous properties of the fill materials, a data adjustment was made and two simulations of elastic and viscoelastic models were developed to represent the expected settlement values. These models are expected to serve as a means to evaluate the future behavior of displacements that may occur in at least one month after the load is applied, since this corresponds to the approximate time of the measurements in the field.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. Civil Engineering School. Director: Alvaro Viviescas Jaimes. PhD in Structures. Co-director: Vladimir Ernesto Merchán. PhD in Engineering.

Introducción

El aprovechamiento de las zonas clausuradas de los vertederos resulta una gran oportunidad para la contribución al cambio climático y el aporte al logro de los objetivos de desarrollo sostenible. Por esta razón, la instalación de un parque de energía renovable en el relleno sanitario El Carrasco resulta una propuesta de interés para cumplir con esta finalidad. La disposición de los residuos sólidos genera una gran variabilidad en la composición de este tipo de rellenos y por lo tanto se esperan condiciones heterogéneas en términos de su comportamiento. Esto último, genera dificultades para cumplir los intereses previamente mencionados, por lo que se hace necesario de su intervención y estudio.

Entre varios factores que se considerarían en el aprovechamiento de vertederos clausurados, el asentamiento de la superficie puede ser uno de los factores de mayor reto desde la perspectiva de los ingenieros estructurales y geotécnicos (Tahmoorian y Khabbaz, 2020).

En general se observa un consenso en atribuir las deformaciones en rellenos sanitarios a una sumatoria de los asentamientos instantáneos, asentamientos por consolidación primaria (disipación del exceso de presión del fluido en el tiempo), y asentamientos por descomposición de la materia orgánica (Yepes y Villarraga, 2018).

El presente proyecto, tiene como finalidad la medición en campo de asentamientos en el relleno sanitario El Carrasco. Para ello se seleccionarán dos puntos dentro de la zona clausurada del relleno, sobre los cuales se realizaron un proceso de aplicación de cargas incrementales de manera vertical mediante la colocación de placas de concreto y posterior medición de asentamientos a lo largo del tiempo utilizando un nivel de precisión. Finalmente se seleccionaron

dos modelos constitutivos representativos del fenómeno analizado y se compararon con los datos obtenidos en campo.

1. Objetivo general

Evaluar los asentamientos en la zona de la cárcava 1 del relleno sanitario El Carrasco.

1.1 Objetivos Especificos

Diseñar la prueba de campo para la medición de asentamientos

Medir los desplazamientos en los puntos de carga establecidos en el diseño

Seleccionar, a partir de la literatura científica, al menos dos modelos constitutivos que sean representativos del fenómeno analizado

Comparar la respuesta de los modelos seleccionados con los datos obtenidos en campo

2. Generalidades

2.1 Relleno sanitario “El Carrasco”

El sitio de disposición final el carrasco se encuentra ubicado en el kilómetro 6 vía Girón del municipio de Bucaramanga. Este cuenta con una extensión de 93 hectáreas aproximadamente, en el cual existen adecuadas 3 cárcavas y 4 celdas (Mora, 2019). Además de los sitios de disposición, este posee una planta de tratamiento de lixiviados, un parque contemplativo y una estación de clasificación y aprovechamiento de residuos (Así opera El Carrasco actualmente, 2022).

El carrasco dispone de los residuos provenientes de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta, Rionegro, Playón y Matanza. Sin embargo, debido a decisiones judiciales que ordenan su cierre, se han limitados las intervenciones e inversiones del relleno sanitario a corto plazo (Así opera El Carrasco actualmente, 2022).

2.2 Cárcava 1

Después de haber sido clausurada la Cárcava 2 la cual fue un vertedero a cielo abierto y que no tenía ningún tipo de manejo técnico o norma para procesos de disposición de residuos sólidos, en 1985 se iniciaron actividades en una nueva zona nombrada Cárcava 1, en la cual se buscaba una mejor forma de controlar los residuos sólidos. Esta zona fue constituida por las celdas 1 y 2, que después de la disposición de 1.300.000 toneladas de residuos (basura proveniente de 15 municipios) en un área de 17 hectáreas, por medio de la Resolución 1328 del 10 de noviembre de 2010, la CDMB ordenó el cierre y clausura definitiva de la celda transitoria a partir del 16 de marzo de 2011. Entre los años 2011 a 2016, se retomó el uso de esta cárcava (Díaz y Peñarada, 2021; Torrado y Rondón, s.f.).

2.3 Zona de estudio

La zona analizada es la antigua celda 1, ubicada en la Cárcava 1 del relleno sanitario El Carrasco. En este sitio se depositaban diariamente capas de 0,5 metros de forma escalonada por medio de la formación de terrazas y celdas. En el año 2011, por medio del Decreto 234, se declaró la emergencia sanitaria, con el fin de hacer uso de la capacidad instalada remanente de la celda adyacente al sitio actual de disposición dentro de El Carrasco. Posteriormente se prorrogó la emergencia sanitaria en los años 2012 (Decreto 0056), y 2013 (Decreto 190) (Torrado y Rondón, s.f.). En 2015 (Decreto 158) la Alcaldía de Bucaramanga prorrogó la declaratoria de emergencia de calamidad pública por 24 meses, en lo que respecta a la prestación de servicios de disposición final de residuos, en lo relacionado con las celdas 1, 2 y 4 de la cárcava 1 (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, Auto 07715, 2018). La celda 1 con 2.2 hectáreas de extensión y una altura en promedio de 5 metros ya está clausurada (Franco et al., 2018). Actualmente, la celda se

encuentra en proceso de revegetalización, y donde su material está conformado por capas de 0.3 a 0.5 metros con cobertura de geomembranas y una capa más superficial de material arcilloso con cubierta vegetal separado por bermas, esto evita la emisión de gases tóxicos y protege al relleno de la infiltración del agua (Díaz y Peñarada, 2021; Torrado y Rondón, s.f.).

En la figura 1 se observa una imagen satelital de la antigua celda 1 localizada en el relleno. Sin embargo, para el caso específico de este proyecto se trabajó en un área pequeña que forma parte de esta celda, en la cual se tiene información de un alineamiento perteneciente a un estudio de geofísica. Se proporcionará mayor información del alineamiento en apartados posteriores dentro de la metodología. En la figura 2 se aprecia el alineamiento mencionado anteriormente, sobre el cual se trabajó.

Figura 1

Antigua celda 1 del relleno sanitario El Carrasco



Nota. Imagen satelital. Tomado de *Google Earth* (Google, 2023).

Figura 2

Alineamiento del estudio geofísico



Nota. Imagen satelital. Tomado de *Google Earth* (Google, 2023).

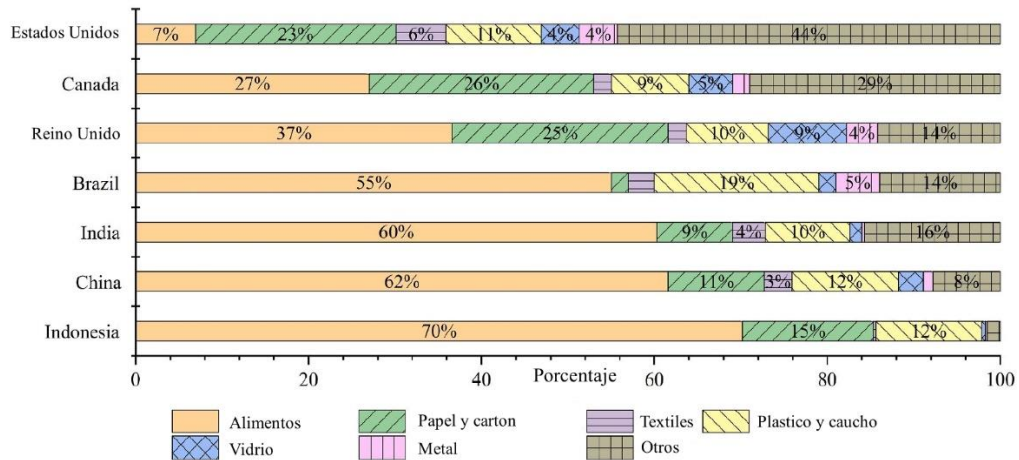
3. Marco Teórico

3.1 Composición de un relleno sanitario

La composición de un relleno sanitario puede ser bastante variada, pudiendo incluir elementos como desechos de jardín, comida, metales, productos de papel, caucho, cuero, textiles, vidrio, plástico, madera, entre otros. Las proporciones de estos desechos pueden variar dependiendo de la región, pues existe ciertas tendencias como mayores cantidades de residuos de comida y menos desechos reciclables por parte de los países en vía de desarrollo (Ren et al., 2022). En la figura 3 se observa la composición de los residuos sólidos y sus variaciones para algunos países de referencia.

Figura 3

Composición general de los rellenos sanitarios



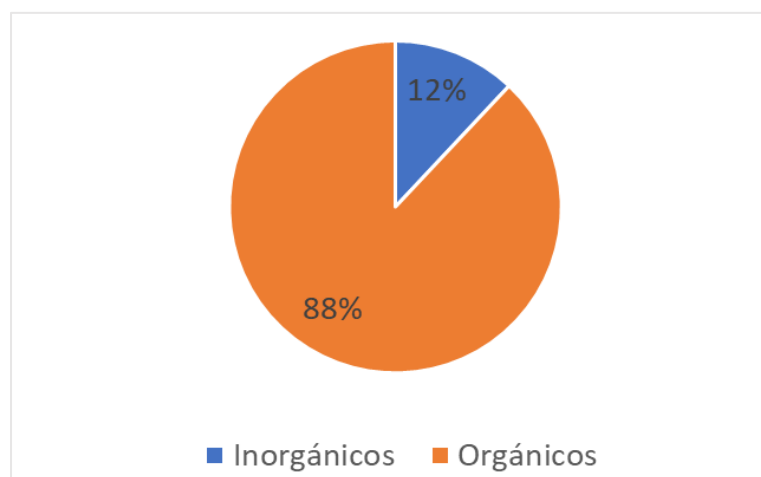
Nota. Composición de rellenos sanitarios para algunos países de referencia. Adaptado de *A review on settlement models of municipal solid waste landfills (Ren et al., 2022)*.

Los rellenos sanitarios al igual que los suelos, son materiales porosos compuestos por partículas, además de contar con el mismo sistema de fases sólida, líquida y gaseosa. Sin embargo, estos resultan más complejos, debido a las diferentes propiedades, formas y tamaños de sus partículas además de su distribución no uniforme, dando como resultados un medio heterogéneo y anisotrópico, además de estar sometido a fenómenos físicos, químicos y procesos de biodegradación que conllevan a la generación de lixiviados, gases, liberación de calor y a la variación de su volumen. Los vertederos, a lo largo de su vida experimentan una fase de cambios debido a la biodegradación donde los desechos sólidos son transformados en fases líquidas y gaseosas, generando incrementos en los volúmenes de poros, alterando los esfuerzos efectivos en el esqueleto sólido que a su vez afecta las deformaciones del relleno sanitario (Ren et al., 2022).

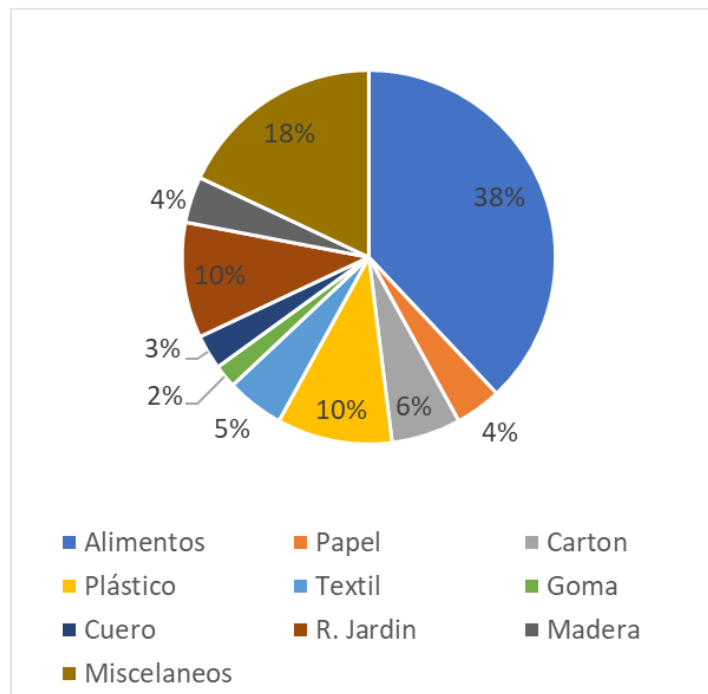
Para el caso específico del área metropolitana de Bucaramanga, en su mayoría y con un 88% de los residuos sólidos corresponden a materiales de tipo orgánico. A su vez, estos últimos están compuestos en gran parte de residuos de alimentos y misceláneos, representando un 38% y 18% respectivamente del total de los residuos orgánicos. En las figuras 4 y 5 se aprecian las proporciones de los residuos mencionadas.

Figura 4

Caracterización de residuos sólidos en Bucaramanga



Nota. Adaptado de *Plan de gestión integral de residuos sólidos 2016-2027* (EMAB, 2016).

Figura 5*Caracterización de residuos sólidos orgánicos en Bucaramanga*

Nota. Adaptado de *Plan de gestión integral de residuos sólidos 2016-2027* (EMAB, 2016).

3.2 Mecanismos de asentamiento

3.2.1 Compresión primaria o mecánica

Este mecanismo de compresión, también conocido como asentamientos primarios, es producido por la reorientación de partículas, movimiento y la reorientación de los materiales, así como el colapso de los espacios vacíos provocada por el peso propio de los desechos (Sivakumar et al., 2010). Diversos autores (Rivera, 2012) coinciden en que el proceso de compresión ocurre poco tiempo después a partir del momento en que el llenado termina, con una variación de entre diez a noventa días. Además, esta dependerá de factores como el tipo de desechos, la geometría de llenado, la densidad del relleno y su método de operación (Rivera, 2012).

3.2.2 Biodegradación

Es el resultado de los procesos tanto aerobios como anaerobios de degradación del material por las bacterias, donde la descomposición de la celulosa en ausencia de oxígeno corresponde al principal responsable de este mecanismo de degradación. Las bacterias convierten los materiales sólidos hechos a base de carbón y el agua en dióxido de carbono y metano (Rivera, 2012).

3.2.3 Compresión por flujo plástico

Este mecanismo se genera por diferentes causas, primero por la erosión y transporte de partículas finas a los vacíos que se encuentran entre las partículas grandes, segundo por las partículas finas que llenan los vacíos causado por la biodegradación, y por último por los procesos posteriores a la compresión elástica. El debilitamiento en la capacidad de soporte del material de relleno se presenta parcialmente por el llenado de vacíos, y esto se genera por fenómenos como la corrosión y la biodegradación (Rivera, 2012).

3.2.4 Fenómeno físico-químico

Dada la degradación de productos orgánicos, la corrosión, oxidación y degradación de materiales inorgánicos, ocurre este tipo de mecanismo de asentamiento (Rivera, 2012).

3.2.5 Interacción

Este mecanismo es dependiente de la presencia de oxígeno y de otros mecanismos de asentamiento, dado que este por sí mismo no produce asentamientos significativos. Sin embargo, puede ocurrir en asentamientos grandes, pero en zonas localizadas. En este ocurre la interacción entre el metano y la combustión, los ácidos orgánicos y la combustión espontánea lo cual genera corrosión (Rivera, 2012).

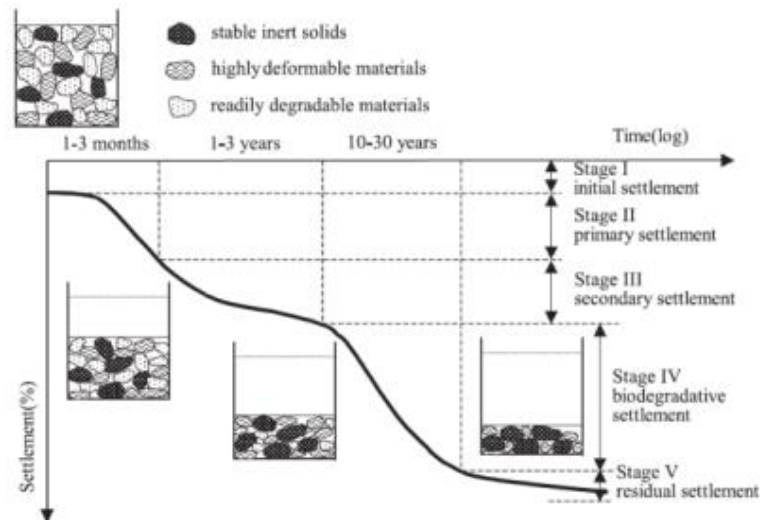
3.2.2 Consolidación

Por la salida de líquido en el suelo se genera el asentamiento por consolidación. Al presentarse un aumento de la presión de poros parte del líquido que está en el suelo se reduce, generando una reducción del volumen y la densificación del relleno (Rivera, 2012).

3.3 Etapas de asentamiento

Los asentamientos en los rellenos sanitarios presentan 5 etapas en el tiempo, como se puede observar en la figura 6, estas etapas se describen a continuación:

1. Asentamiento inicial: suele deberse a la compresión física, es decir, la aplicación de una carga externa o también a un reajuste inicial de partículas, en el cual se produce una reducción de vacíos en el interior del relleno sanitario esto debido al peso propio (Yepes y Villarraga, 2018).
2. Asentamiento primario: se presenta un asentamiento no uniforme dado que las partículas más pequeñas ocupan los vacíos entre las partículas más grandes (Rivera, 2012).
3. Asentamiento secundario: hace referencia a los asentamientos tipo creep por la presencia de cargas constantes (Yepes, 2015).
4. Asentamiento por biodegradación: asentamiento por la descomposición de los componentes orgánicos del relleno (Rivera, 2012).
5. Asentamiento residual: por procesos físico-químicos (degradación de componentes no orgánicos, corrosión y oxidación) (Rivera, 2012).

Figura 6*Etapas de asentamientos en el tiempo*

Nota. Tomado de *Determinación de Asentamientos Teóricos en Rellenos Sanitarios* (Rivera, 2012).

4. Metodología

4.1 Diseño de pruebas de campo

4.1.1 Construcción de sobrecarga

Primero que todo, se realizó el diseño de las cargas a utilizar en las pruebas de campo. Para ello se llevó a cabo la construcción de placas de concreto con una resistencia de 22 MPa, considerando unas dimensiones de 40x40x15 cm. Las placas tienen una densidad de 2400 kg/m³, por tanto, cada placa tiene un peso de 57,6 kg. En la figura 7 se observan las placas utilizadas en este proyecto.

Figura 7

Placas de concreto para el proceso de carga

**4.1.2 Ubicación de puntos de medición y de georreferencia**

Para la realización de las mediciones, primero fue necesario ubicar un punto de georreferencia, el cual no presentara asentamientos y estuviera fuera del relleno. Las coordenadas de este punto se encuentran en la tabla 1 y está en el sistema coordinado Magna Sirgas 3116. Este se pudo localizar gracias a un mojón ya establecido previamente en la zona, mediante el uso de una estación y un prisma. En la figura 8 se muestra la marcación de este punto.

Figura 8

Punto de georreferencia trabajado



Los puntos en donde se aplicó la sobrecarga y se midieron los asentamientos fueron seleccionados a partir de un estudio geofísico, que hace parte de la tesis de maestría en geofísica (en desarrollo) del estudiante de la UIS Jesús Alberto Álvarez Rincón (Álvarez, 2023). A partir del alineamiento realizado y la información dada por este estudio, se localizó el denominado “Punto 1” en donde se presentaron las menores velocidades de propagación de ondas P y S, lo cual es indicativo del punto de menor rigidez y por lo tanto se espera que presente mayores asentamientos. Además, se escogió otro punto cualquiera presente dentro del alineamiento, denominado como “Punto 2”. Esto se hizo con el fin de tener una aproximación de las propiedades mecánicas del suelo en las cuales se hicieron las mediciones. Las coordenadas de estos puntos se encuentran en la tabla 1.

Tabla 1*Coordenadas de los puntos*

| Coordenadas en Magna Sirgas 3116 | | |
|---|-------------|-------------|
| Punto | N | E |
| Georreferencia | 1274600.675 | 1103044.689 |
| Punto 1 | 1274627.155 | 1103215.356 |
| Punto 2 | 1274635.561 | 1103203.236 |

4.1.3 Aplicación de sobrecarga y medición de asentamientos

Después de localizar todos los puntos de interés, se inició el proceso de medición de asentamientos. Para ello, primero se debe armar el nivel de presión mostrado en la figura 9, y se registra como primer dato el punto de georreferencia. Posteriormente, es posible tomar mediciones en los puntos de estudio y por medio de las diferencias de altura será posible la determinación de los valores de asentamiento. Adicionalmente, para tener mayor precisión en la toma de datos, se apoyó la regla topográfica con un bípode como se muestra en la figura 10. El equipo de medición utilizado corresponde a un nivel digital EL302A el cual cuenta con una precisión de $\pm 0.7\text{mm}$.

Figura 9

Nivel de precisión

**Figura 10**

Configuración de la regla topográfica



Una vez tomado el punto de georreferencia, se empieza el proceso de aplicación sucesiva de carga y medición simultánea de asentamientos. Para los dos puntos seleccionados se utilizaron

un total de 9 placas o incrementos de carga. De manera más detallada, en cada punto se planteó el siguiente proceso: primero se ajusta el asentamiento a cero antes de aplicar carga, luego se realizó un primer incremento de carga y durante los primeros 10 minutos se midieron cada 2 minutos los asentamientos, seguidamente se realizó un segundo incremento de carga y durante 10 minutos se midieron cada 2 minutos los asentamientos. Se llevó este mismo proceso para los siguientes incrementos de carga hasta lograr los 9 incrementos de carga. Estos corresponden a un total de 518.4 kg y por lo tanto a un esfuerzo de contacto de 3240 kg/m². A partir de este punto, se midieron los asentamientos durante 4 horas cada 20 minutos. Dependiendo de los datos y el comportamiento observado en los desplazamientos, se ajustaron los tiempos de medición, de modo que se aumentaron progresivamente los intervalos de medición de datos. En la figura 11 se observa la carga total aplicada y la medición del asentamiento.

Figura 11

Medición de asentamiento



Para medir los asentamientos en los puntos seleccionados se utilizó una tabla de madera, la cual se conectó a la placa inferior de cada punto de medición por medio de dos varillas de acero, se marcó un punto central en la tabla de tal forma que siempre se realizaran las mediciones en el mismo punto. En la figura 12 se muestra la configuración de los equipos necesarios para realizar la medición.

Figura 12

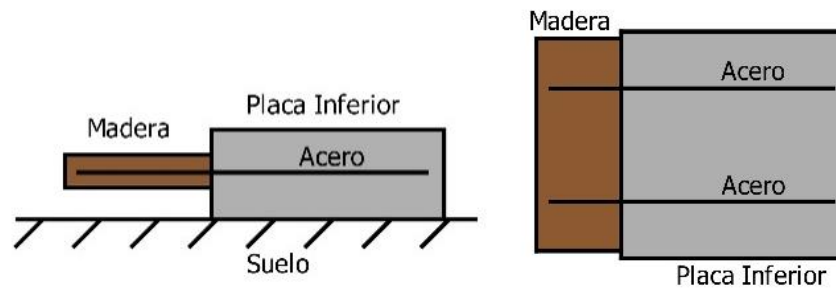
Configuración de medición de asentamiento



En la figura 13 se observa la conexión realizada entre la tabla de madera y la placa inferior, empleados para facilitar la medición de asentamientos.

Figura 13

Vista de perfil (izquierda) y planta (derecha) de la conexión entre la madera y la placa de concreto inferior

**4.2 Resultados de mediciones en campo**

Con la información resultante del proceso de medición, se exportaron los datos del nivel a un archivo Excel. A partir de las diferencias de alturas, se realiza una gráfica de Asentamientos Vs. Tiempo.

En la figura 14 y 15 se observa el asentamiento en el tiempo de los puntos de medición realizados para el primer día, nótese que también se graficó el esfuerzo de contacto que corresponde a la aplicación sucesiva de carga en el tiempo.

Figura 14

Asentamientos del punto 1 medidos en el día 1

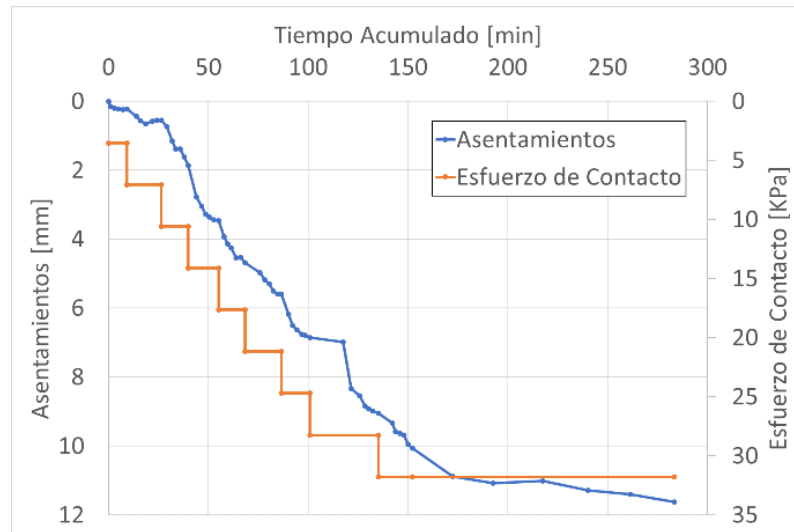
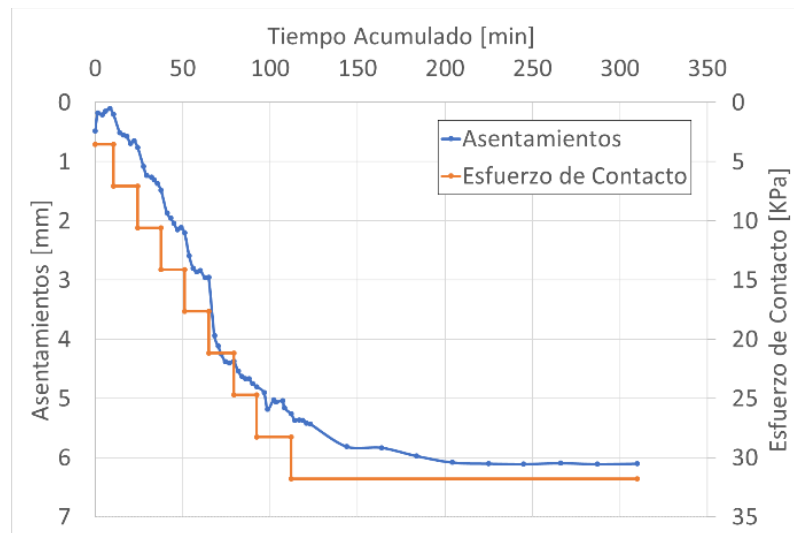


Figura 15

Asentamientos del punto 2 medidos en el día 1



Según las gráficas obtenidas se puede observar los asentamientos inmediatos producto de la aplicación de las cargas, los cuales, disminuyen paulatinamente hasta la aplicación de un nuevo incremento de carga y por lo tanto la aparición de un nuevo asentamiento inmediato. En ambos

puntos de medición se presenta el mismo comportamiento, sin embargo, el “Punto 1” presenta mayores asentamientos. Esto se debe a que este punto a partir del estudio geofísico realizado presenta menores velocidad de onda P y S, por tanto, corresponde a un suelo con menor rigidez y se ve reflejado en los asentamientos elásticos obtenidos.

En la figura 16 y 17 se aprecia el asentamiento durante el tiempo total de medición. Según los últimos datos obtenidos para los dos puntos de medición, se observa cierta tendencia a la reducción de la tasa de desplazamientos.

Figura 16

Asentamientos totales medidos del punto 1

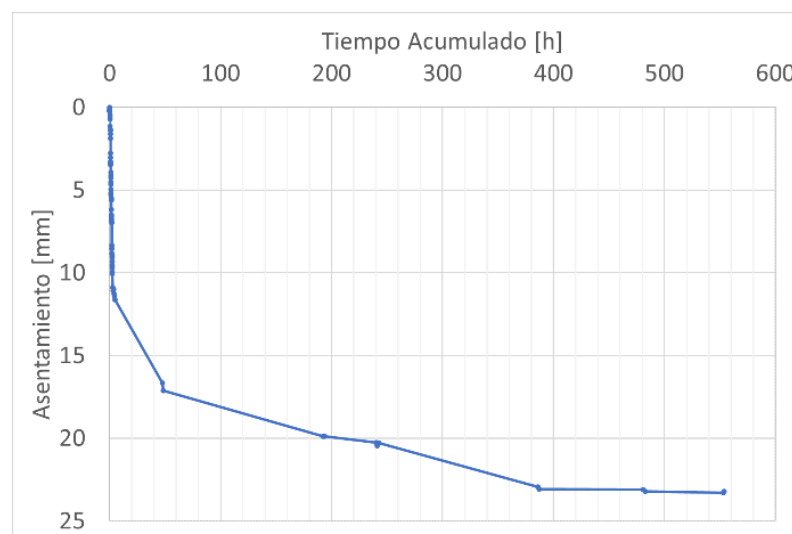
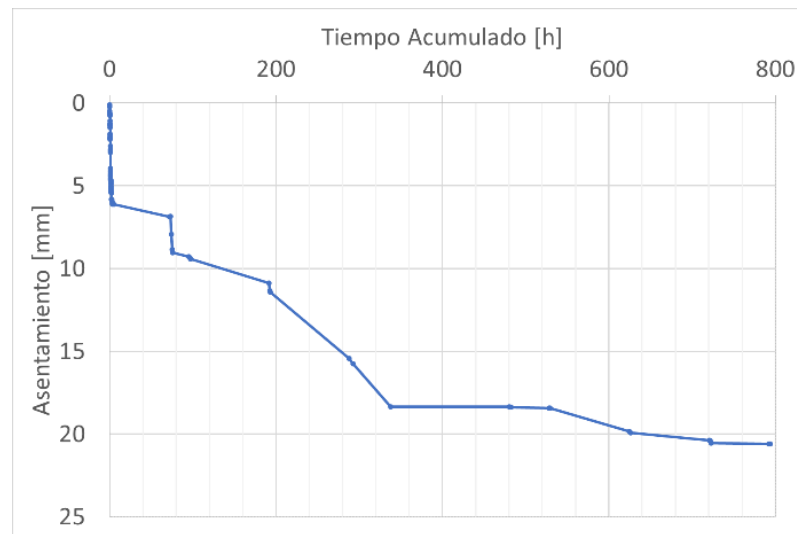


Figura 17

Asentamientos totales medidos del punto 2



4.3 Análisis de asentamientos en Software GiD-Code Bright

Para realizar la simulación de la evolución de los asentamientos observados durante la prueba de carga se utilizó el software GiD-Code Bright (Code Bright, 2023), la cual tiene como objetivo calibrar algunos modelos constitutivos básicos que permiten estimar los asentamientos de estructuras de soporte de paneles solares durante el tiempo de uso de estos dispositivos. Se plantearon dos modelos, uno elástico y otro viscoelástico, para los cuales se realizó una simulación de la geometría, superficie y del proceso de carga como primer paso. Posteriormente se realizaron los ajustes de datos correspondientes a cada uno de los modelos y para cada punto de medición.

4.3.1 Definición del modelo: Geometría

Se dibujó el perfil estratigráfico y se definieron para cada uno de los estratos los espesores. La tabla 2 contiene información de referencia obtenida del estudio de geofísica (Álvarez, 2023).

Tabla 2*Espesores de capa y propiedades del suelo*

| Capa | Espesores | | E [MPa] | Porosidad |
|------|-------------|-------------|---------|-----------|
| | Punto 1 [m] | Punto 2 [m] | | |
| 1 | 0.503 | 0.503 | 37.117 | 0.600 |
| 2 | 0.410 | 0.624 | 37.464 | 0.520 |
| 3 | 1.000 | 1.278 | 37.842 | 0.450 |
| 4 | 1.000 | 2.223 | 36.308 | 0.400 |
| 5 | 4.000 | 2.500 | 37.925 | 0.350 |
| 6 | 3.500 | 3.500 | 44.721 | 0.300 |

Nota. Información tomada de *Evaluación de las condiciones de estabilidad del terreno para la instalación de un parque solar fotovoltaico en una zona clausurada del relleno sanitario el Carrasco de Bucaramanga [en desarrollo]* (Álvarez, 2023).

Para la elaboración del modelo se emplearon los espesores de capa o estrato mostrados y posteriormente se calibraron las propiedades mecánicas, hidráulicas y viscosas según fuera requerido en el modelo hasta obtener los desplazamientos deseados. Este procedimiento es iterativo y se explicará de manera más detallada en el apartado de *calibración de modelos* de este informe.

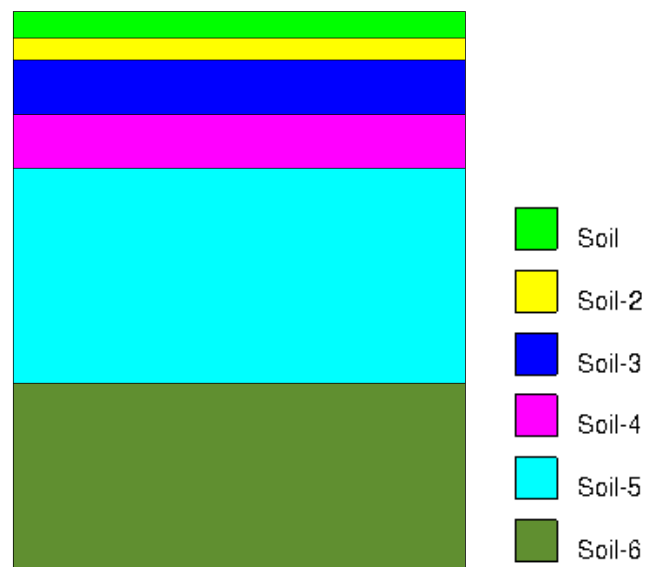
4.3.2 Definición del modelo: Propiedades mecánicas e hidráulicas

Se generó una superficie para cada estrato con el fin de definir las diferentes propiedades mecánicas del suelo, como módulo de Young, relación de Poisson y porosidad. También se agregaron las propiedades hidráulicas del suelo, tales como la permeabilidad intrínseca considerando los valores máximos y mínimos de porosidad para cada estrato según el estudio geofísico (Álvarez, 2023). Además, se tuvo en cuenta las condiciones de flujo de líquido para el

análisis hidráulico del modelo. La modelación hidráulica se realizó en condición saturada, ya que esta corresponde a la condición más crítica. Para la determinación de la presión de líquido, se referirá a esta como “presión de agua”, sin embargo, la fase líquida en análisis corresponde a una mezcla entre agua y lixiviado. En la figura 18 se observa la creación de la geometría y superficies para el modelamiento.

Figura 18

Geometría y superficies para el punto 2 en el software GiD-Code Bright



4.3.3 Definición de intervalos de tiempo y simulación de proceso de cargas

A partir de la información del proceso de carga realizado en campo, se determinaron los tiempos acumulados para los cuales se midieron los asentamientos y se aplicaron los incrementos de carga. Con estos datos, se pudo realizar una simulación de dicho proceso en el software y obtener así los valores de asentamientos teóricos.

En las tablas 3 y 4 se observa los intervalos de tiempo utilizados con sus respectivos valores de tiempo y asentamientos los cuales se emplearon para el proceso de ajuste de datos.

Tabla 3

Intervalos de tiempo y asentamientos para el punto 1

| PUNTO 1 | | | | |
|---------|----------------------------|---------------------------|---------|-------------------|
| No. | Esfuerzo de Contacto [MPa] | Intervalo de Tiempo [min] | | Asentamiento [mm] |
| | | Inicia | Termina | |
| 0 | 0.0000 | -1440000.0 | 0.0 | ----- |
| 1 | 0.0035 | 0.0 | 9.2 | 0.23 |
| 2 | 0.0071 | 9.2 | 26.5 | 0.55 |
| 3 | 0.0106 | 26.5 | 39.9 | 1.87 |
| 4 | 0.0141 | 39.9 | 55.0 | 3.47 |
| 5 | 0.0177 | 55.0 | 68.3 | 4.68 |
| 6 | 0.0212 | 68.3 | 86.5 | 5.59 |
| 7 | 0.0247 | 86.5 | 100.8 | 6.86 |
| 8 | 0.0282 | 100.8 | 135.1 | 9.05 |
| 9 | 0.0318 | 135.1 | 152.1 | 10.06 |
| 10 | 0.0318 | 152.1 | 283.3 | 11.63 |
| 11 | 0.0318 | 283.3 | 2903.5 | 17.12 |
| 12 | 0.0318 | 2903.5 | 14557.2 | 20.28 |
| 13 | 0.0318 | 14557.2 | 23223.4 | 23.07 |
| 14 | 0.0318 | 23223.4 | 33217.8 | 23.22 |

Tabla 4*Intervalos de tiempo y asentamientos para el punto 2*

| PUNTO 2 | | | | |
|----------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------|--------------------------|
| No. | Esfuerzo de Contacto [MPa] | Intervalo de Tiempo [min] | | Asentamiento [mm] |
| | | Inicia | Termina | |
| 0 | 0.0000 | -1440000.0 | 0.0 | ----- |
| 1 | 0.0035 | 0.0 | 10.5 | 0.20 |
| 2 | 0.0071 | 10.5 | 24.4 | 0.76 |
| 3 | 0.0106 | 24.4 | 37.7 | 1.48 |
| 4 | 0.0141 | 37.7 | 51.2 | 2.20 |
| 5 | 0.0177 | 51.2 | 64.8 | 2.95 |
| 6 | 0.0212 | 64.8 | 79.2 | 4.37 |
| 7 | 0.0247 | 79.2 | 92.4 | 4.80 |
| 8 | 0.0282 | 92.4 | 112.1 | 5.26 |
| 9 | 0.0318 | 112.1 | 123.0 | 5.43 |
| 10 | 0.0318 | 123.0 | 309.9 | 6.10 |
| 11 | 0.0318 | 309.9 | 4443.6 | 7.94 |
| 12 | 0.0318 | 4443.6 | 11600.7 | 11.42 |
| 13 | 0.0318 | 11600.7 | 20265.4 | 18.34 |
| 14 | 0.0318 | 20265.4 | 31761.5 | 18.44 |

Para la simulación del proceso de carga en el software fue necesario realizar un intervalo inicial de acondicionamiento de 1000 días, el cual es necesario para replicar el estado inicial de esfuerzos en condición geostática y tiene un tiempo menor a cero, ya que corresponde a un intervalo anterior al proceso de colocación de cargas. Los asentamientos producidos por esta etapa se normalizan a cero, porque se parte del principio que la condición de depositación del relleno, compactación gravitacional y consolidación por peso propio y flujo que se ha llevado a cabo durante el tiempo de vida y clausura de la celda de carga. Después de dicho intervalo, se realizó la calibración de asentamientos por acción de la aplicación de cargas superficiales tal y como se planteó en apartados previos de este documento.

4.3.4 Calibración de los modelos elástico y viscoelástico

Para la adecuación de los modelos previamente mencionados, se realizaron los ajustes de datos de las propiedades del suelo teniendo en cuenta los estratos de suelo junto con sus espesores y características, además de las particularidades de cada modelo de análisis, con la finalidad de obtener valores de asentamiento representativos de los datos obtenidos en campo.

Es importante tener en cuenta que, a pesar de utilizar modelos constitutivos simples, el análisis se realizó teniendo en cuenta un marco de referencia hidro-mecánico acoplado a temperatura constante en el tiempo. Es decir, el análisis se realiza en términos de esfuerzos efectivos y por tanto, dependiendo de las condiciones de permeabilidad y de las condiciones de contorno del modelo, se pueden presentar variaciones en la presión de agua, flujo, cambios de porosidad, que a su vez generan cambios en los esfuerzos efectivos y por tanto, incrementos de deformación diferidos en el tiempo, sumados al proceso viscoelástico del material.

4.3.5 Modelo Elástico

Para el ajuste de este modelo se modificaron exclusivamente los módulos de elasticidad. Inicialmente, para cada estrato y para cada uno de los intervalos planteados en las tablas 3 y 4 se trabajó con los módulos proporcionados por el estudio geofísico. Dichos módulos se ajustaron manualmente en el software, es decir, fueron modificados iterativamente hasta obtener los valores de asentamientos medidos en campo, mientras que los coeficientes de Poisson se mantuvieron invariables. Los módulos elásticos empleados en la calibración del modelo se presentan en el apartado de apéndices (E-P, pag.66-71)

4.3.6 Modelo Viscoelástico

A partir del ajuste realizado en el modelo elástico se introdujeron variables adicionales para el análisis viscoelástico, entre esas se definió una densidad de 2450 kg/m³ que resulta

representativa de este tipo de suelos para cada estrato. Además, se agregaron propiedades de viscosidad en el software, se consideró el tamaño de la partícula, la energía de activación y el parámetro pre-exponencial. La energía de activación corresponde a la energía mínima para que el material se comporte de manera viscosa y se asumió un valor de referencia de 2700 J/mol para suelos arenosos, esto debido a que los desechos mezclados con suelos naturales de esta zona, normalmente tienen un componente arenoso-limoso (Quirós, 2019). Para el ajuste de este modelo, se configuró el valor de viscosidad hasta obtener los valores de asentamientos deseados.

La deformación en función del tiempo se establece como una función de dos componentes de viscosidad; volumétrica y desviadora (cortante) y sus respectivos incrementos de esfuerzos efectivos (Code Bright 2022 User’s guide, 2022), como se presenta en la ecuación (1).

$$\frac{d\boldsymbol{\varepsilon}^{FADT}}{dt} = \frac{1}{2\boldsymbol{\eta}_{FADT}^d}(\boldsymbol{\sigma}' - p'I) + \frac{1}{3\boldsymbol{\eta}_{FADT}^v}p'I \quad (1)$$

Donde:

$\boldsymbol{\varepsilon}^{FADT}$ – Deformación

$\boldsymbol{\sigma}'$ – Esfuerzo tensor efectivo

p' – Esfuerzo efectivo medio

I – Tensor identidad

$\boldsymbol{\eta}_{FADT}^d$ – Viscosidad volumétrica

$\boldsymbol{\eta}_{FADT}^v$ – Viscosidad desviadora

La viscosidad volumétrica y desviadora son definidas en las ecuaciones (2) y (3) respectivamente.

$$\frac{1}{\eta_{FADT}^v} = \frac{16 B(T) \sqrt{S_l}}{d_0^3} g_{FADT}^v(e) \quad (2)$$

$$\frac{1}{2\eta_{FADT}^v} = \frac{16 B(T) \sqrt{S_l}}{d_0^3} g_{FADT}^d(e) \quad (3)$$

Donde:

d_0 – Tamaño de partícula

S_l – Grado de saturación

$B(T)$ – Parámetro de viscosidad desviadora.

Además $g_{FADT}^v(e)$ y $g_{FADT}^d(e)$ corresponden a funciones internas no lineales cuyo cálculo es presentado posteriormente en las ecuaciones (5) y (6).

Como se puede observar, la viscosidad volumétrica y desviadora son función del índice de poros, el grado de saturación, la energía de activación y la energía de activación y la temperatura. Por tanto, estos valores se van actualizando en cada paso de tiempo para el cálculo de las deformaciones.

La ecuación (4) es utilizada para el cálculo del parámetro pre-exponencial A_b .

$$B(T) = \frac{A_b}{RT} \exp\left(\frac{-Q_b}{RT}\right) \quad (4)$$

Donde:

Q_b – Energía de activación

R – Capacidad calorífica molar

T – Temperatura

A_b - Parámetro pre-exponencial

El cálculo de $g_{FADT}^v(e)$ y $g_{FADT}^d(e)$ se obtiene a partir de la ecuación (5) y (6) respectivamente.

$$g_{FADT}^v(e) = \frac{3g^2 e^{3/2}}{(1+e)} \quad (5)$$

$$g_{FADT}^d(e) = \frac{g^2}{(1+e)} \quad (6)$$

Donde:

e – Relación de vacíos

Las ecuaciones (7) y (8) permiten determinar g y f respectivamente y son función de la relación de vacíos.

$$g = \frac{1}{(1-f)^2} \quad (7)$$

$$f = \sqrt{\frac{2e}{3(1-e^{3/2})(1+e)}} \quad (8)$$

La ecuación (9) presenta el cálculo de la relación de vacíos, a partir de la porosidad obtenida por los ensayos de geofísica.

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (9)$$

Donde:

n – Porosidad

Para este modelo de análisis es necesario aclarar que se combina con el modelo elástico. La calibración de los asentamientos para la fase de carga se realiza con el modelo elástico. Los intervalos de tiempo posteriores se ajustan con el modelo viscoelástico para describir el comportamiento hidromecánico.

5. Resultados

5.1 Modelo Elástico

En las figuras 19 y 20 se puede ver el ajuste del modelo elástico para el primer día de mediciones en comparación con los valores obtenidos en campo. Además, se logra apreciar la simulación de la aplicación sucesiva de carga en el tiempo en los modelos.

Figura 19

Modelo elástico de asentamientos para el primer día de medición del punto 1

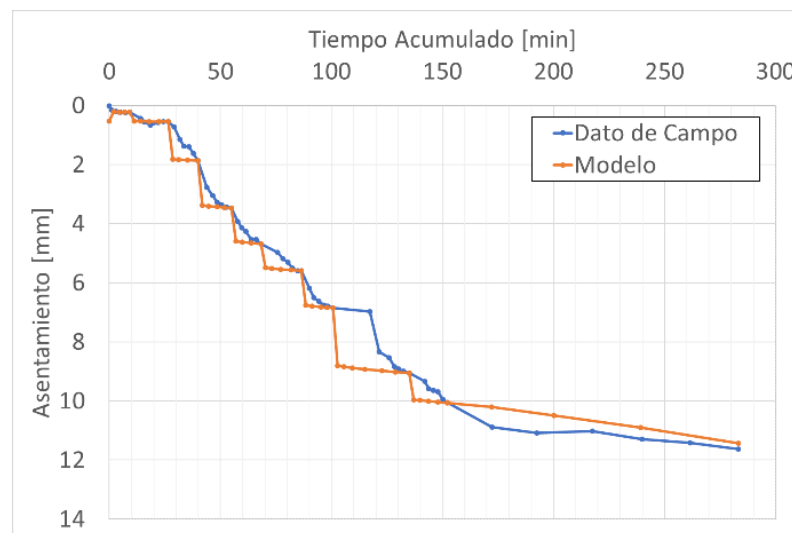
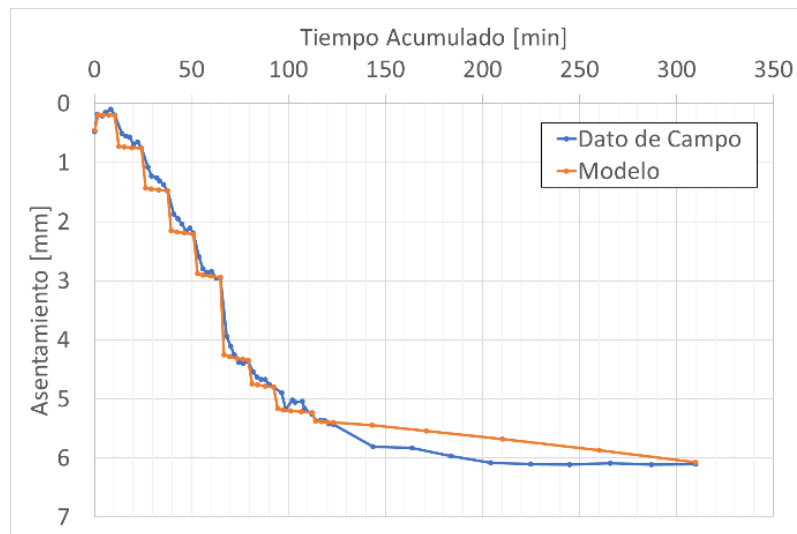


Figura 20

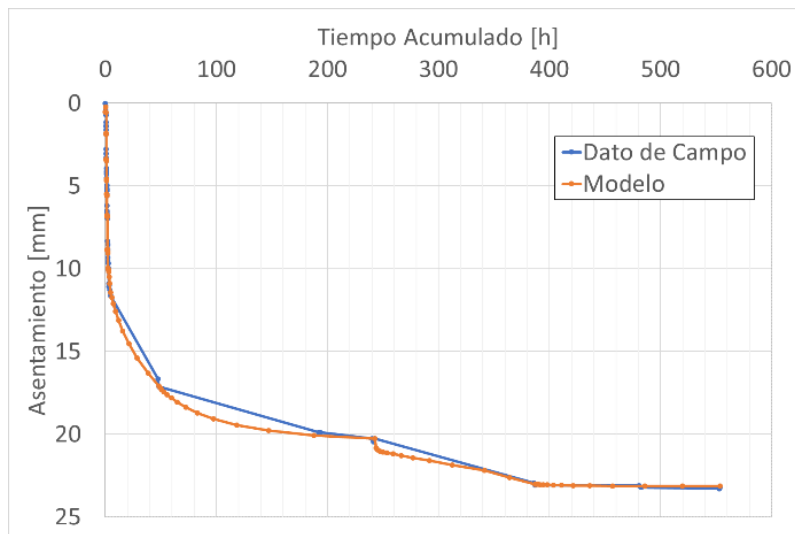
Modelo elástico de asentamiento para el primer día de medición del punto 2



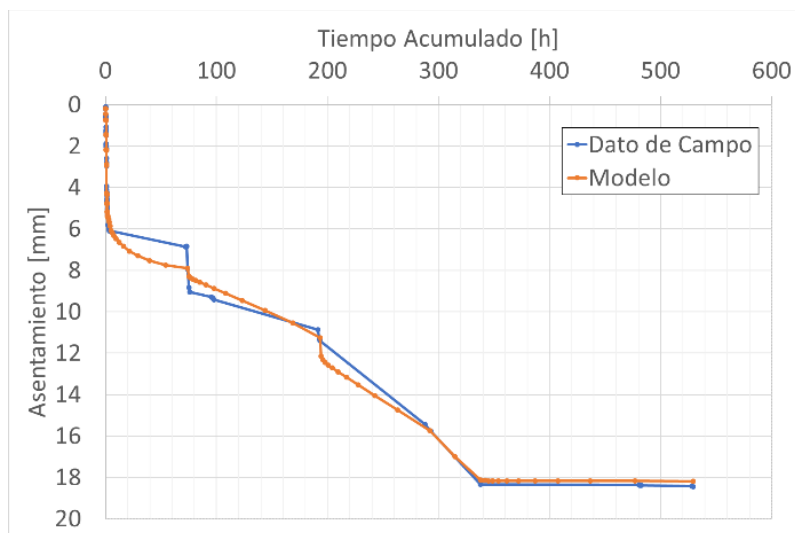
En las figuras 21 y 22 se observa la calibración del modelo elástico para el tiempo total de mediciones. Se observa que el comportamiento de la simulación resulta similar a los datos presentados en la realidad. En este modelo se consideraron solo las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo.

Figura 21

Modelo elástico de asentamientos totales del punto 1

**Figura 22**

Modelo elástico de asentamientos totales del punto 2

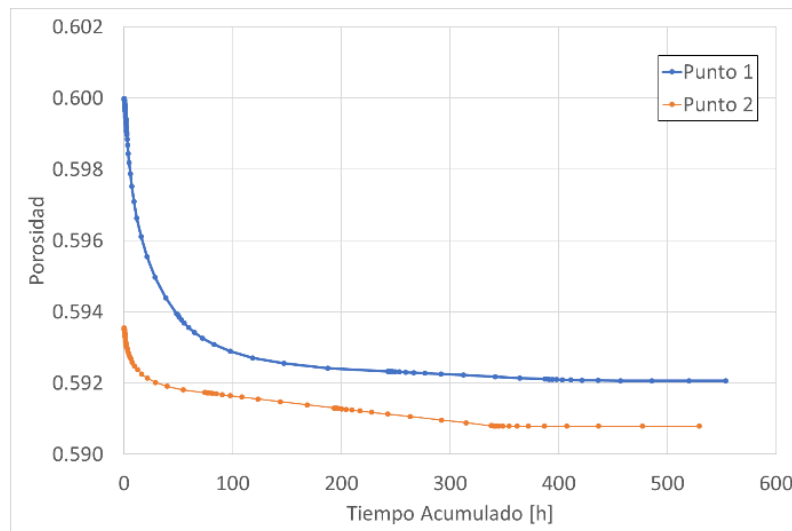


5.1.1 Porosidad

En la figura 23 se observa la variación de la porosidad del modelo elástico en el tiempo.

Figura 23

Variación de la porosidad en el tiempo en el modelo elástico



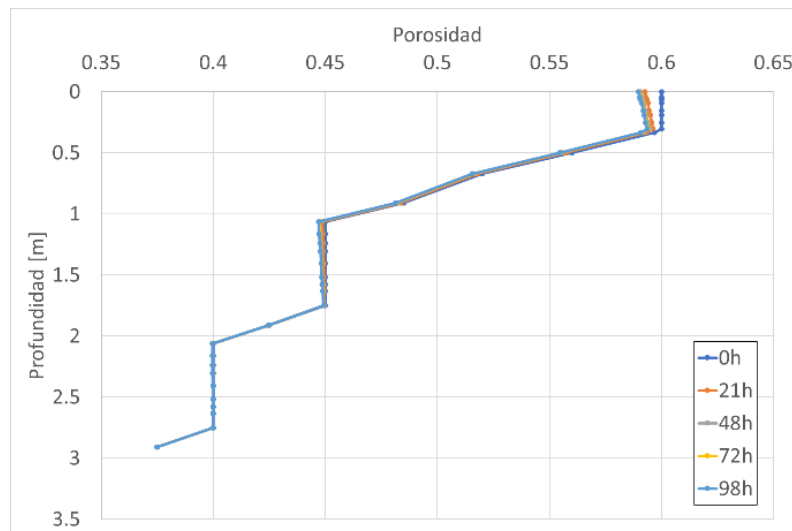
Debido a la aplicación de carga, se observa que la porosidad disminuye con el tiempo hasta que se reduce la tasa de cambio de la porosidad, es decir, hubo una reducción de los espacios vacíos sobre el volumen total de suelo. Por tanto, se puede decir que se está aumentando la densidad del suelo.

5.1.2 Perfil de porosidades

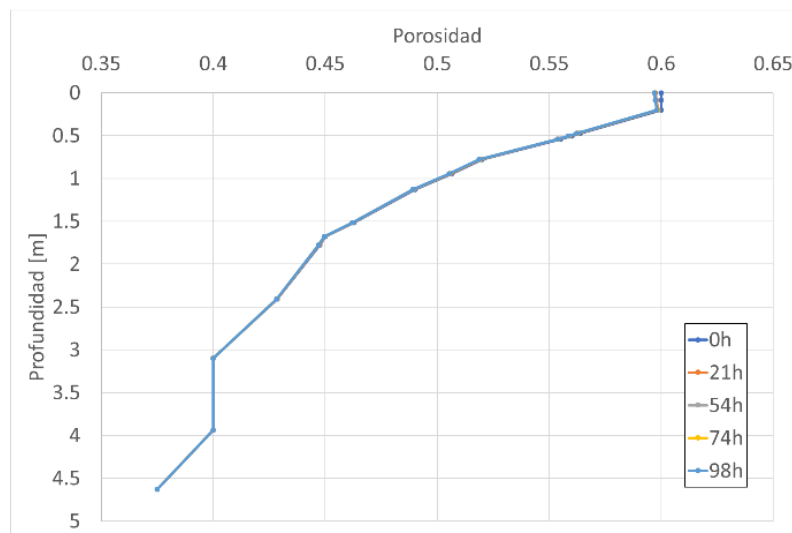
En las figuras 24 y 25 se aprecian los perfiles de porosidad para las primeras 4 capas de suelo, para diferentes instantes de tiempo, del modelo elástico.

Figura 24

Perfil de porosidad en el modelo elástico del punto 1

**Figura 25**

Perfil de porosidad en el modelo elástico del punto 2



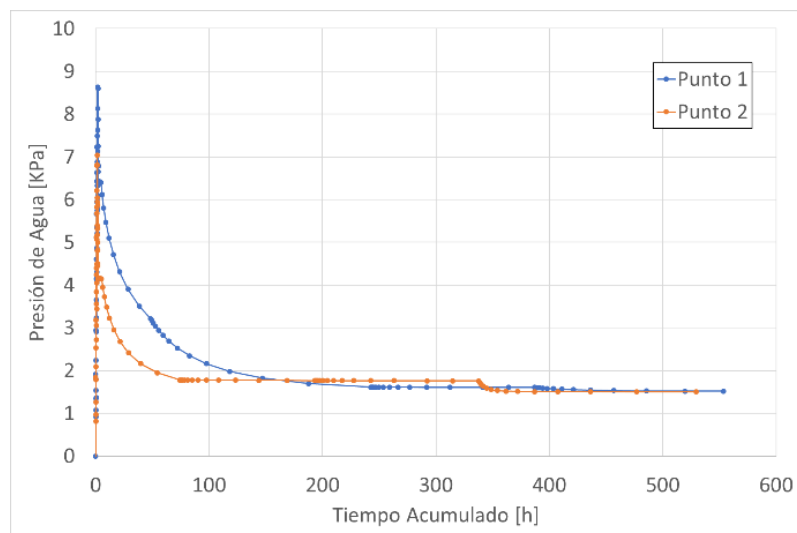
La mayor variación de las porosidades en el tiempo, ocurre para los primeros 0.4 metros de profundidad. A partir de dicho punto no se presentan cambios significativos.

5.1.3 Presión de agua

En la figura 26 se aprecia el cambio de la presión de agua en el tiempo para el modelo elástico. Se puede observar que se obtiene un grado de disipación cercano al 80% del incremento inicial de la presión poral a 100h después de aplicada la carga. Seguidamente la tasa de disipación se reduce. Sin embargo, aún se presentan desplazamientos después de las 100h, con lo cual se plantea evaluar un modelo viscoelástico que pueda representar mejor el fenómeno.

Figura 26

Variación de la presión de agua en el tiempo en el modelo elástico



5.1.4 Perfil de incremento de presión poral de agua

En las figuras 27 y 28 se observan los perfiles de incremento de presión poral medidos en el eje central de aplicación de carga, para las primeras 4 capas de suelo en diferentes instantes de tiempo.

Figura 27

Perfil de incremento de presión poral en el modelo elástico del punto 1

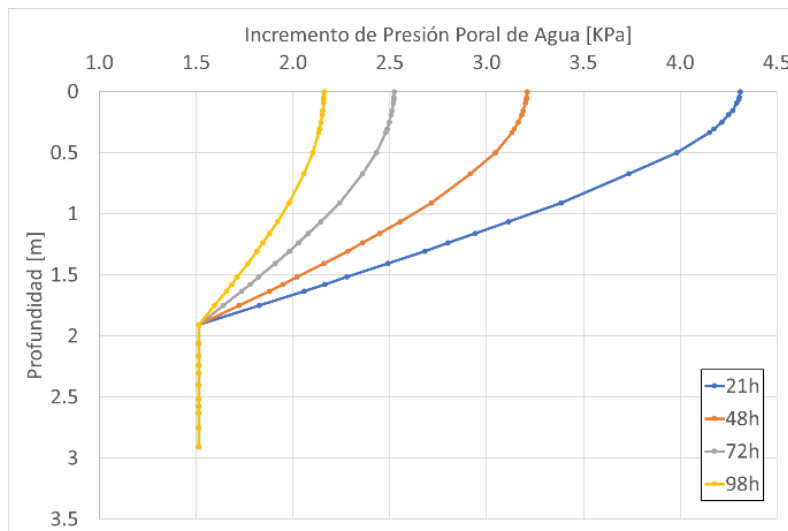


Figura 28

Perfil de incremento de presión poral en el modelo elástico del punto 2



Para el caso del punto 2, los incrementos de presión poral cuentan con valores similares, de modo que se superponen en la gráfica.

5.2 Modelo Viscoelástico

En las figuras 29 y 30 se observa el ajuste del modelo viscoelástico para el primer día de mediciones en comparación con los valores obtenidos en campo.

Figura 29

Modelo viscoelástico de asentamientos para el primer día de medición del punto 1

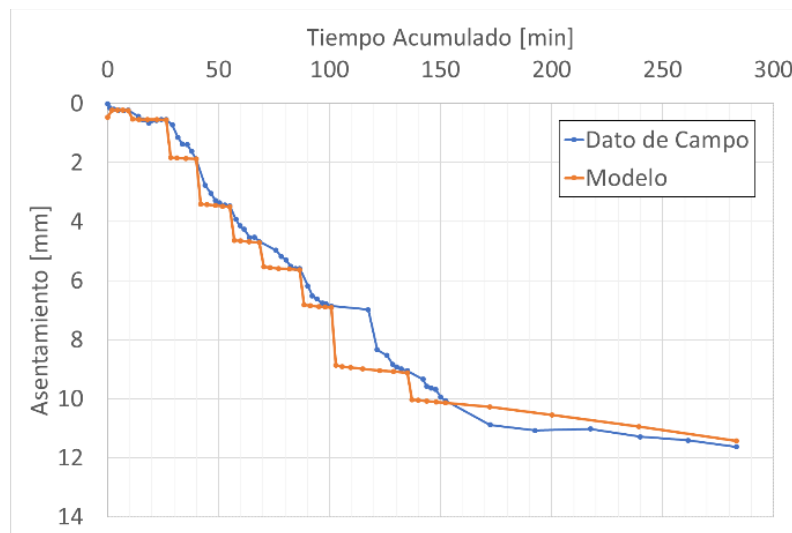
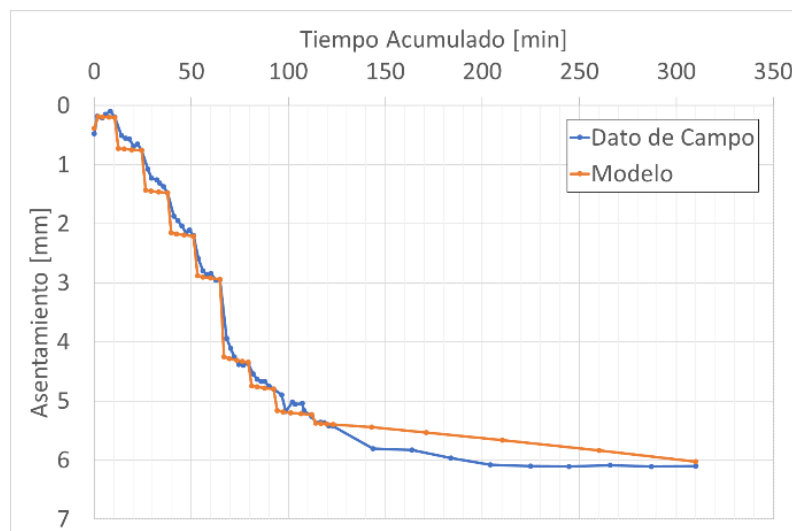


Figura 30

Modelo viscoelástico de asentamientos para el primer día de medición del punto 2



En las figuras 31 y 32 al igual que en el modelo elástico se presenta el ajuste realizado para el modelo viscoelástico en el tiempo total de mediciones, teniendo en cuenta las consideraciones respectivas en las propiedades mecánicas, hidráulicas y de viscosidad del suelo.

Figura 31

Modelo viscoelástico de asentamientos totales del punto 1

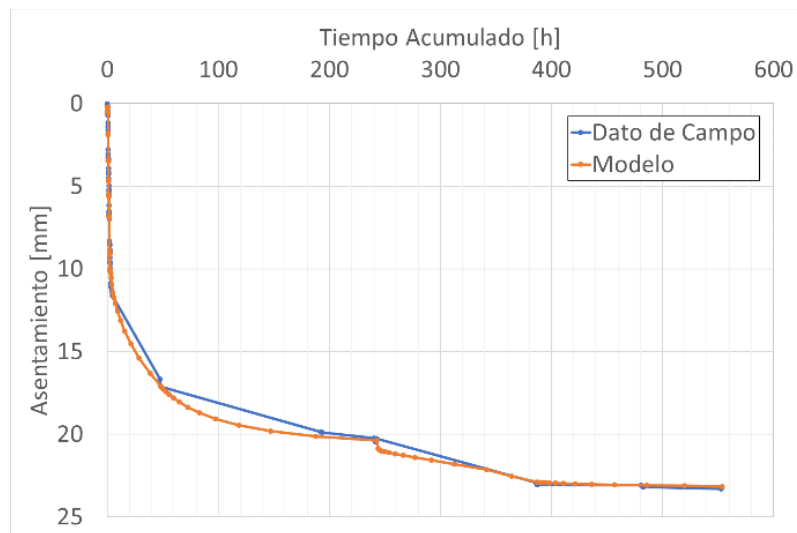
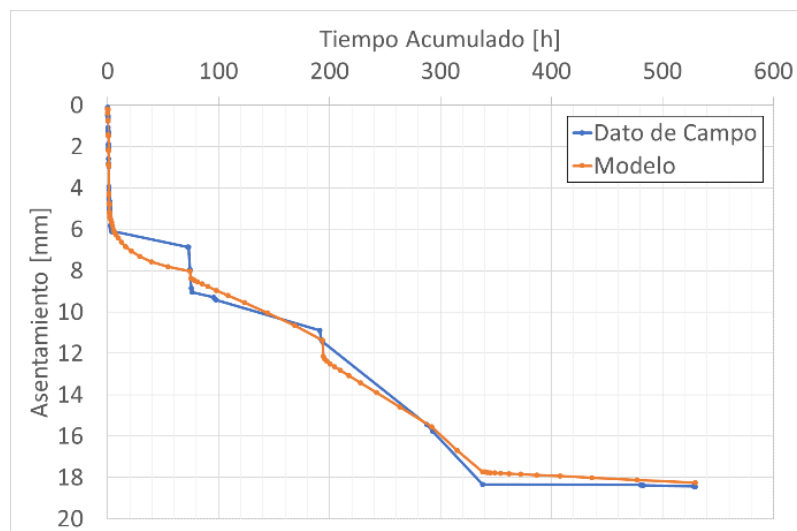


Figura 32

Modelo viscoelástico de asentamientos totales del punto 2

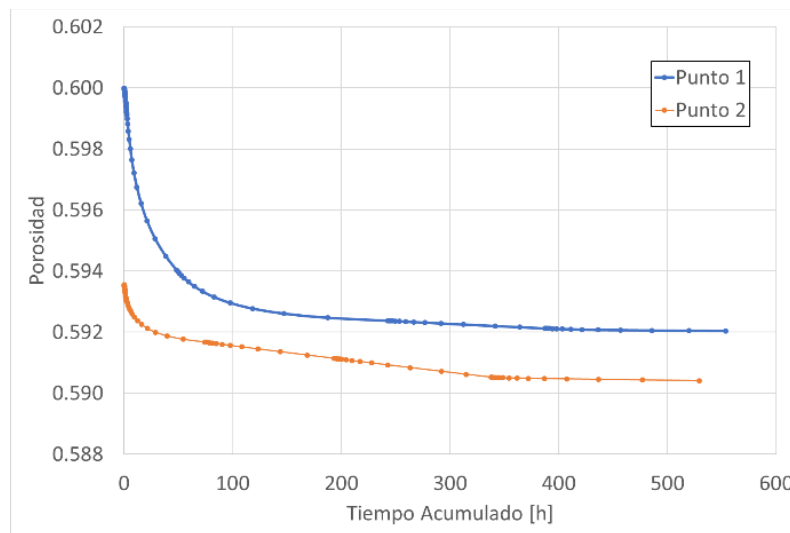


5.2.1 Porosidad

En la figura 33 se observa la variación de la porosidad del modelo viscoelástico en el tiempo.

Figura 33

Variación de la porosidad en el tiempo en el modelo viscoelástico



La porosidad en el modelo viscoelástico tiene un comportamiento similar al modelo anterior, esta disminuye considerablemente en el momento que es aplicada la carga por la reducción de espacios vacíos, pero con el tiempo hay una reducción de la tasa de cambio de porosidad.

5.2.2 Perfil de porosidades

En las figuras 34 y 35 se aprecian los perfiles de porosidad para las primeras 4 capas de suelo, para diferentes instantes de tiempo, del modelo viscoelástico.

Figura 34

Perfil de porosidad en el modelo viscoelástico del punto 1

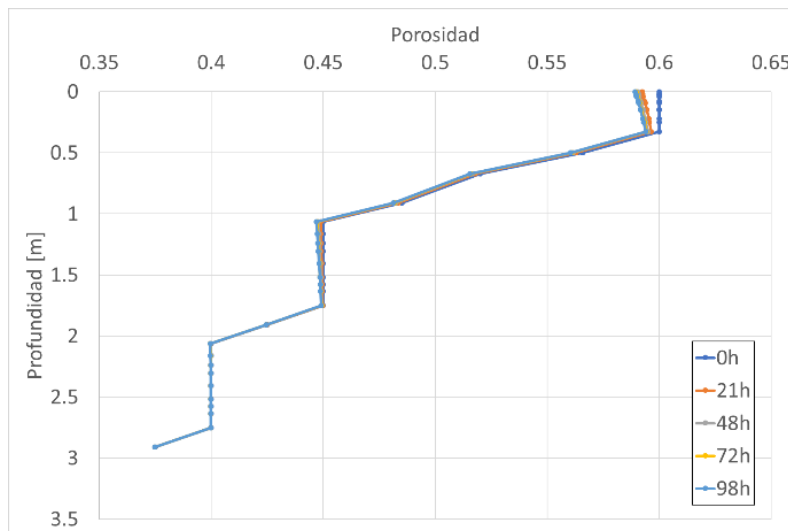
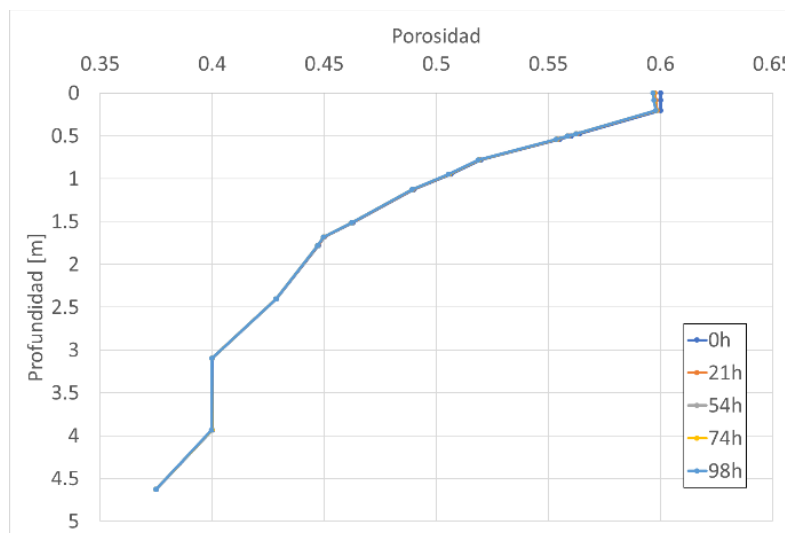


Figura 35

Perfil de porosidad en el modelo viscoelástico del punto 2



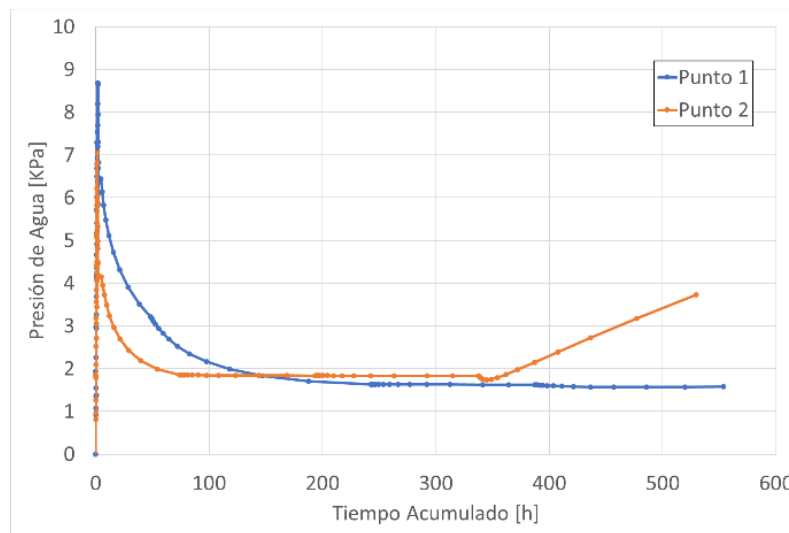
Del mismo modo que en el modelo anterior, las mayores variaciones de las porosidades ocurren superficialmente, tratándose de los primeros 0.3 metros de profundidad, punto a partir del cual no existen cambios apreciables.

5.2.3 Presión de agua

En la figura 36 se aprecia el cambio de la presión de agua en el tiempo para el modelo viscoelástico.

Figura 36

Variación de la presión de agua en el tiempo en el modelo viscoelástico



Al igual que en el modelo elástico se ve un comportamiento similar en los primeros intervalos de tiempo hasta el punto que empieza a reducir la tasa de cambio de presión de agua. Sin embargo, en el punto 2, se observa un ligero incremento en la presión el cual se debe a la reducción de la porosidad, esto por el efecto puramente viscoso del modelo.

5.2.4 Perfil de incremento de presión poral de agua

En las figuras 37 y 38 se observan los perfiles de incremento de presión poral medidos en el eje central de aplicación de carga, para las primeras capas de suelo en diferentes instantes de tiempo.

Figura 37

Perfil de incremento de presión poral en el modelo viscoelástico del punto 1

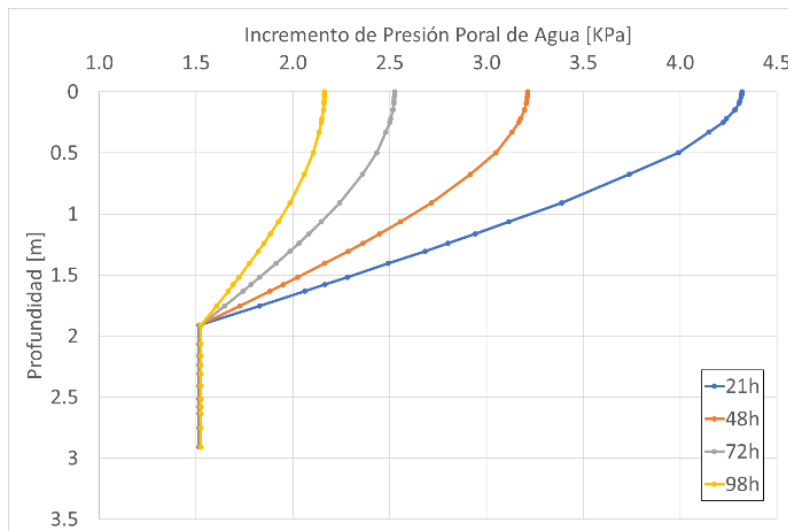
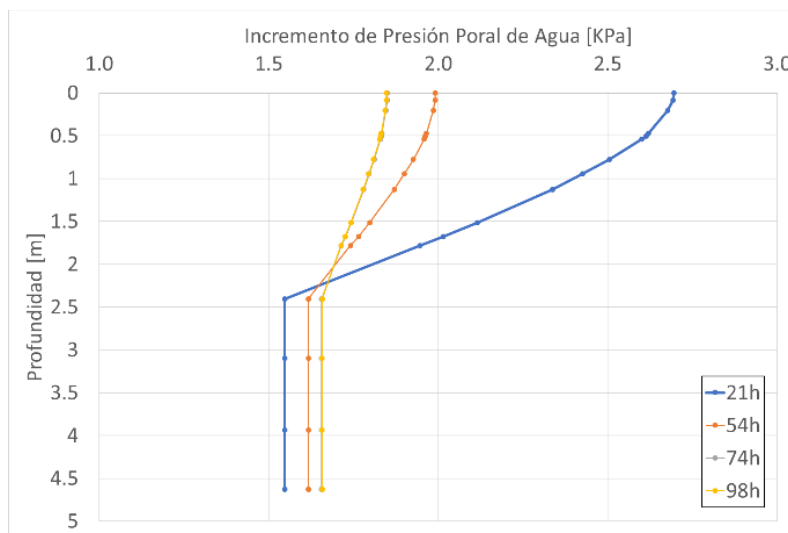


Figura 38

Perfil de incremento de presión poral en el modelo viscoelástico del punto 2



Para el caso del punto 2, se puede apreciar una diferencia en los valores de incremento de presión poral después de los 2.5 metros de profundidad, para las primeras horas de medición. Del

mismo modo como sucedió en el modelo elástico, los incrementos para las mediciones en 74 y 98 horas, presentan valores similares, de modo que se superponen en la gráfica.

6. Conclusiones

Este proyecto, logro su objetivo de realizar una primera calibración de los asentamientos, generados por dos pruebas de carga sobre una zona clausurada de la celda 1 del relleno sanitario "El Carrasco". Para ello se utilizaron dos modelos constitutivos implementados en el software de elementos finitos Code-Bright, en los cuales las propiedades del suelo se ajustaron iterativamente hasta obtener una concordancia aceptable de la evolución de los asentamientos en el tiempo.

A partir de las mediciones en campo, fue posible graficar los desplazamientos del suelo del relleno sanitario tras la aplicación de cargas sucesivas. El comportamiento de los asentamientos en los dos puntos de medición es el esperado y resulta congruente con el estudio de geofísica, pues, aquellos puntos con menores velocidades de onda, presentaron mayores valores de asentamiento a lo largo del tiempo. Esta es una característica propia de materiales más blandos, es decir, de aquellos que presentan una menor rigidez.

Se evaluaron dos modelos constitutivos y se calibraron los valores de asentamiento. Cabe mencionar, que los valores de módulo de elasticidad empleados, los cuales se encuentran disponibles en el apartado de apéndices (E-P, pag.66-71), resultaron ser considerablemente menores a los valores de referencia iniciales obtenidos del estudio de geofísica (Álvarez, 2023). En promedio, estos valores equivalen al 5% de los iniciales. Esto, posiblemente se debe a que los ensayos geofísicos dan como resultado la lectura de velocidades de propagación de ondas S y P, que posteriormente, por medio de correlaciones se pueden determinar los módulos de elasticidad

del suelo. Estos módulos corresponden a valores máximos a muy pequeñas deformaciones. También se debe tener en cuenta que estos materiales de relleno por su naturaleza se degradan fácilmente en sus parámetros de rigidez.

En cuanto al modelo elástico y viscoelástico, no hubo una variación en el tiempo notoria de los valores de porosidad y de presión de agua comparando ambos puntos de medición, a excepción del “Punto 2” del modelo viscoelástico, el cual presenta un ligero incremento en la presión de agua, posiblemente, debido a las propiedades viscosas asociadas y a la reducción de la porosidad presentada.

Para proyectos posteriores, se recomienda prolongar la medición de los desplazamientos en campo, de modo que se cuente con una mayor cantidad de datos. Esto, para continuar la calibración del modelo y mejorar su representación de la evolución de los asentamientos en el tiempo.

Referencias Bibliográficas

Álvarez, J. A. (2023). *Evaluación de las condiciones de estabilidad del terreno para la instalación de un parque solar fotovoltaico en una zona clausurada del relleno sanitario el Carrasco de Bucaramanga [en desarrollo]* (tesis de maestría). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Así opera El Carrasco actualmente. (2022). Alcaldía de Bucaramanga.
<https://www.bucaramanga.gov.co/noticias/asi-opera-el-carrasco-actualmente/>

Auto 07715 de 2018 [Autoridad Nacional De Licencias Ambientales]. Por medio del cual se ordena el inicio de un procedimiento sancionatorio ambiental y se adoptan otras determinaciones. Diciembre 06 de 2018.

Code Bright. (2023). Universitat Politècnica de Catalunya.
https://deca.upc.edu/en/projects/code_bright

Code Bright 2022 User's guide. (2022), Universitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTech.

Díaz, L. y Peñarada, L. (2021). *Evaluación de metodologías disponibles para el cálculo de capacidad portante y asentamientos en rellenos sanitarios: Caso de estudio para el proyecto de un parque solar en la cárcava 1 del relleno sanitario El Carrasco de la ciudad*

de Bucaramanga (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Franco, L. J., Meza, M. A. y Almeira, J. E. (2018). Situación de la disposición final de residuos sólidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga: caso relleno sanitario El Carrasco (revisión). *Avances Investigación En Ingenierías*, 15(01), 180-193. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.4735>

Google Earth. (2023). Google. <https://earth.google.com/web/>

Mora, J. (2019). *Aproximación a los problemas ambientales que se presentan en el relleno sanitario “El Carrasco, en Bucaramanga”* (tesis de pregrado). Universidad Pontificia Javeriana, Bogotá, Colombia.

Plan de gestión integral de residuos sólidos 2016-2027. (2016). EMAB. <https://emab.gov.co/pgirs-municipal/>

Quirós, M. F. (2019). *Análisis geofísico para determinar la posible existencia de lixiviados en el costado occidental del relleno sanitario El Carrasco, Bucaramanga* (tesis de maestría). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Ren, Y., Zhang, Z. y Huang, M. (2022). A review on settlement models of municipal solid waste landfills. *Waste Management*, 149, 79-95. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.019>

Rivera, I. (2012). *Determinación de Asentamientos Teóricos en Rellenos Sanitarios* (tesis de pregrado). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

Sivakumar, G. L., Reddy, K. R., Chouskey, S. K. y Kulkarni, H. S. (2010). Prediction of Long-Term Municipal Solid Waste Landfill Settlement Using Constitutive Model. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 14(2), 139-150.
10.1061/(ASCE)HZ.1944-8376.0000024

Tahmoorian, F. y Khabbaz, H. (2020). Performance comparison of a MSW settlement prediction model in Tehran landfill, *Journal on Environmental Management*, 254.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109809>

Torrado, L. M y Rondón, J. A. (s.f.). *Diseño de vertederos y rellenos sanitarios*. Ingeas.
<https://www.ingeassas.com/diapositivas/RELLENOS-SANITARIOS-CASO-CARRASCO.pdf>

Yepes, J. (2015). *Ajuste de un modelo para estimar asentamientos en el relleno sanitario La Pradera* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Yepes, J. y Villarraga, M. (2018). Análisis de los asentamientos en los rellenos sanitarios La Pradera y Curva de Rodas. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 43, 24-33.
<https://doi.org/10.15446/rbct.n43.61433>

Apéndices

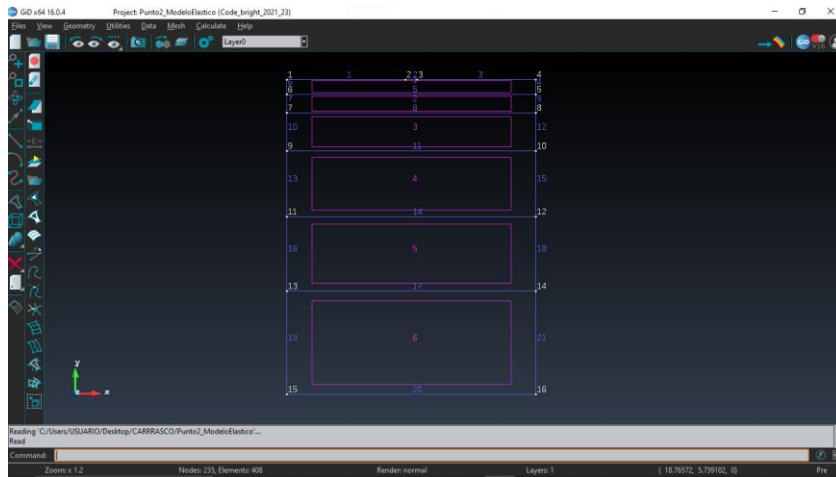
En los siguientes apéndices se mostrará toda la información relevante en cuanto a los datos y evidencia de los procesos utilizados en el software GiD-Code Bright para el modelamiento del punto 2. Este mismo procedimiento fue realizado por el punto 1.

Apéndice A. Espesores de capa y propiedades del suelo utilizados

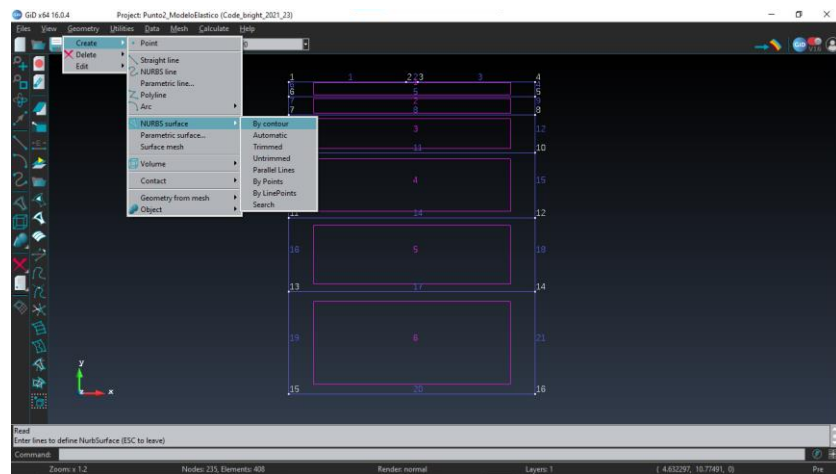
| Capa | Espesores | | E [MPa] | Porosidad |
|------|-------------|-------------|---------|-----------|
| | Punto 1 [m] | Punto 2 [m] | | |
| 1 | 0.503 | 0.503 | 37.117 | 0.600 |
| 2 | 0.410 | 0.624 | 37.464 | 0.520 |
| 3 | 1.000 | 1.278 | 37.842 | 0.450 |
| 4 | 1.000 | 2.223 | 36.308 | 0.400 |
| 5 | 4.000 | 2.500 | 37.925 | 0.350 |
| 6 | 3.500 | 3.500 | 44.721 | 0.300 |

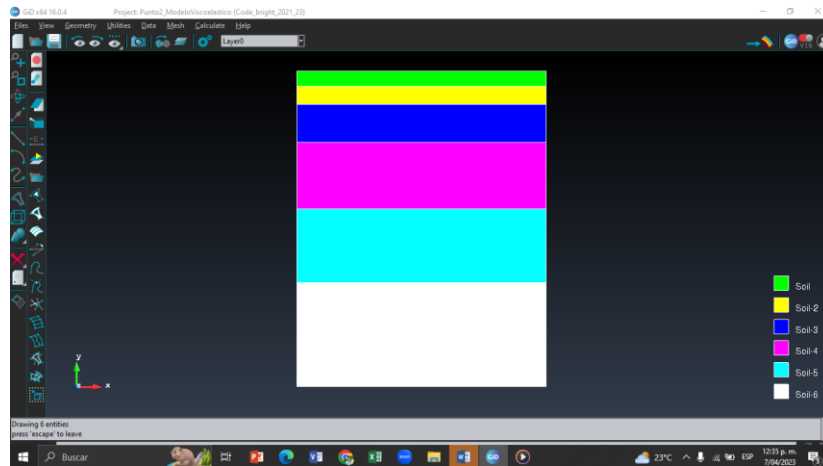
Nota. Información tomada de *Evaluación de las condiciones de estabilidad del terreno para la instalación de un parque solar fotovoltaico en una zona clausurada del relleno sanitario el Carrasco de Bucaramanga [en desarrollo]* (Álvarez, 2023).

Apéndice B. Geometría y superficies realizadas en el software



Apéndice C. Creación de las superficies



Apéndice D. Creación de capas de suelo

En los apéndices del E al P se observa la asignación de las propiedades mecánicas del suelo para las diferentes capas del punto 1 y 2, se añade el módulo de elasticidad referenciado en el software como P1, su valor varía según el intervalo de tiempo en el cual se esté trabajando. Esto se debe al ajuste realizado para el modelo elástico. También se ingresó el valor de P3 el cual corresponde al coeficiente de poisson que es constante en todos los intervalos de tiempo.

Apéndice G. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 3 del punto 1 de los modelos elástico y viscoelástico

| Material data 1 | Material data 2 | Material data 3 | Material data 4 | Hydraulic and thermal data | Phase properties | Constitutive Equations |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------|------------------|------------------------|
| ν | E | ν | E | ν | E | ν |
| Linear Elasticity | 1 | 1.967 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| Linear Elasticity 2 | 1 | 8.25 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| Nonlinear Elasticity | 1 | 1.483 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| Viscoelasticity - comp | 1 | 1.027 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| Viscoelasticity - comp | 1 | 1.222 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| VF08 | 1 | 1.045 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| VF08 | 1 | 1.058 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| VF08 | 1 | 1.104 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| VF08 | 1 | 1.046 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| VF08 | 1 | 1.050 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| VF08 | 1 | 1.039 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| VF08 | 1 | 1.111 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| VF08 | 1 | 1.223 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| VF08 | 1 | 1.036 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| VF08 | 1 | 1.179 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |

Apéndice H. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 4 del punto 1 de los modelos elástico y viscoelástico

| Material data 1 | Material data 2 | Material data 3 | Material data 4 | Hydraulic and thermal data | Phase properties | Constitutive Equations |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------|------------------|------------------------|
| ν | E | ν | E | ν | E | ν |
| Linear Elasticity | 1 | 1.967 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| Linear Elasticity 2 | 1 | 8.19 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| Nonlinear Elasticity | 1 | 1.421 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| Viscoelasticity - comp | 1 | 1.389 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| Viscoelasticity - comp | 1 | 1.171 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| VF08 | 1 | 1.181 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| VF08 | 1 | 1.215 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| VF08 | 1 | 1.115 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| VF08 | 1 | 1.055 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| VF08 | 1 | 1.066 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| VF08 | 1 | 1.037 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| VF08 | 1 | 1.142 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| VF08 | 1 | 1.214 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| VF08 | 1 | 1.062 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |
| VF08 | 1 | 1.361 | 0 | 0.49 | 0 | 0 |

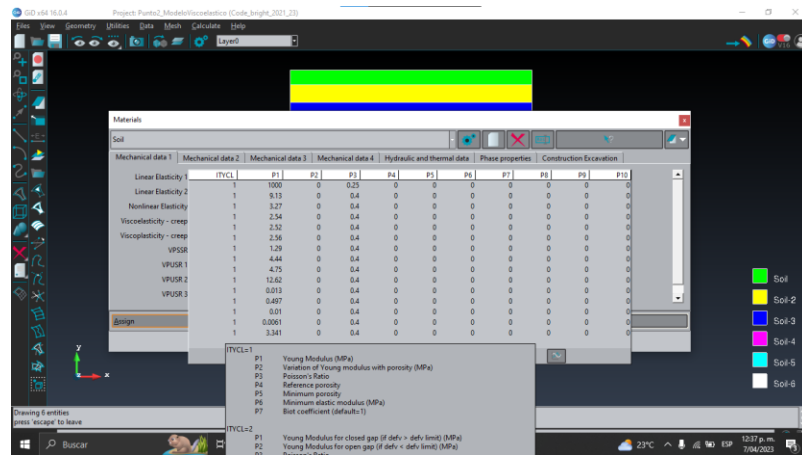
Apéndice I. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 5 del punto 1 de los modelos elástico y viscoelástico

| Model | Material data 1 | Material data 2 | Material data 3 | Hydraulic and thermal data | Phase properties | Construction Evaluation | | | |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------|------------------|-------------------------|------------|------------|------------|
| | E_{11} | ν_{12} | ν_{13} | ν_{21} | ν_{22} | ν_{23} | ν_{31} | ν_{32} | ν_{33} |
| Linear Elasticity 1 | 9000 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Linear Elasticity 2 | 833 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nonlinear Elasticity | 833 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Viscoelasticity - omeg | 1.201 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Viscoelasticity - omeg | 1.202 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VP00 | 2.203 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VP01 | 1.578 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VP02 | 0.680 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VP03 | 2.280 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VP04 | 0.680 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VP05 | 0.352 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VP06 | 0.264 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VP07 | 0.008 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VP08 | 0.278 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

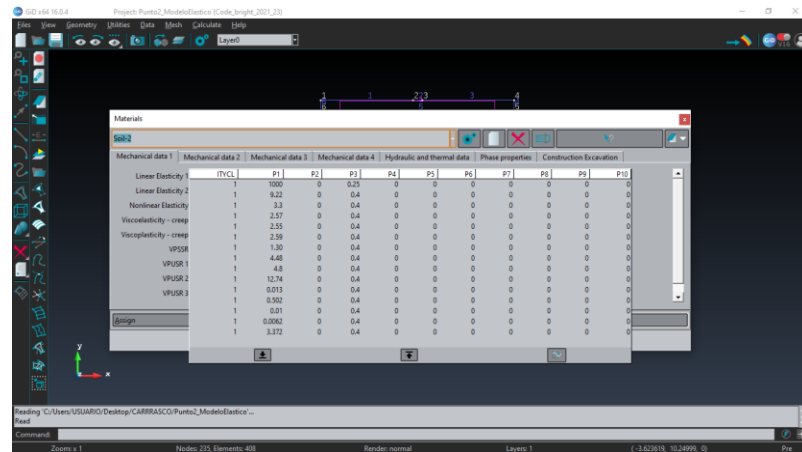
Apéndice J. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 6 del punto 1 de los modelos elástico y viscoelástico

| Model | Material data 1 | Material data 2 | Material data 3 | Hydraulic and thermal data | Phase properties | Construction Evaluation | | | |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------|------------------|-------------------------|------------|------------|------------|
| | E_{11} | ν_{12} | ν_{13} | ν_{21} | ν_{22} | ν_{23} | ν_{31} | ν_{32} | ν_{33} |
| Linear Elasticity 1 | 9000 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Linear Elasticity 2 | 747 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nonlinear Elasticity | 747 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Viscoelasticity - omeg | 1.522 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Viscoelasticity - omeg | 1.444 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VP00 | 2.203 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VP01 | 1.480 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VP02 | 1.118 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VP03 | 2.480 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VP04 | 0.008 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VP05 | 0.378 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VP06 | 0.264 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VP07 | 0.008 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VP08 | 0.447 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Apéndice K. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 1 del punto 2 de los modelos elástico y viscoelástico



Apéndice L. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 2 del punto 2 de los modelos elástico y viscoelástico



Apéndice M. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 3 del punto 2 de los modelos elástico y viscoelástico

| | (T/C/L) | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 |
|-------------------------|---------|-------|----|------|----|----|----|----|----|----|-----|
| Linear Elasticity 1 | 1 | 1000 | 0 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Linear Elasticity 2 | 1 | 9.31 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nonlinear Elasticity | 1 | 3.33 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Viscoelasticity - creep | 1 | 2.59 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Viscoplasticity - creep | 1 | 2.61 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR | 1 | 1.32 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 1 | 1 | 4.32 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 2 | 1 | 4.34 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 3 | 1 | 12.87 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 1 | 4.013 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 1 | 0.507 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 1 | 0.011 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 1 | 0.092 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 1 | 3.408 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Apéndice N. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 4 del punto 2 de los modelos elástico y viscoelástico

| | (T/C/L) | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 |
|-------------------------|---------|-------|----|------|----|----|----|----|----|----|-----|
| Linear Elasticity 1 | 1 | 1000 | 0 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Linear Elasticity 2 | 1 | 8.93 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nonlinear Elasticity | 1 | 3.2 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Viscoelasticity - creep | 1 | 2.49 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Viscoplasticity - creep | 1 | 2.47 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR | 1 | 2.31 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 1 | 1 | 1.26 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 2 | 1 | 4.34 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 3 | 1 | 4.85 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 1 | 12.34 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 1 | 0.013 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 1 | 0.487 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 1 | 0.010 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 1 | 0.096 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 1 | 3.268 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Apéndice O. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 5 del punto 2 de los modelos elástico y viscoelástico

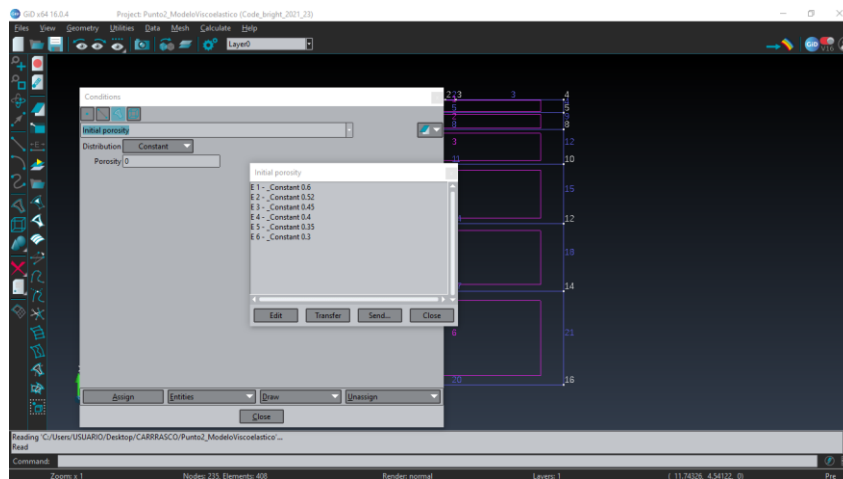
| Material Model | ITVCL | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 |
|-------------------------|-------|--------|----|------|----|----|----|----|----|----|-----|
| Linear Elasticity 1 | 1 | 1900 | 0 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Linear Elasticity 2 | 1 | 9.33 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nonlinear Elasticity | 1 | 3.34 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Viscoelasticity - creep | 1 | 2.6 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Viscoplasticity - creep | 1 | 2.62 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPSSR | 1 | 1.32 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 1 | 1 | 4.53 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 2 | 1 | 4.85 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 3 | 1 | 12.89 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 4 | 1 | 0.013 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 5 | 1 | 0.508 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 6 | 1 | 0.011 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 7 | 1 | 0.0063 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 8 | 1 | 3.413 | 0 | 0.40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Apéndice P. Módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson para la capa 6 del punto 2 de los modelos elástico y viscoelástico

| Material Model | ITVCL | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 |
|-------------------------|-------|--------|----|------|----|----|----|----|----|----|-----|
| Linear Elasticity 1 | 1 | 1000 | 0 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Linear Elasticity 2 | 1 | 11 | 0 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nonlinear Elasticity | 1 | 3.84 | 0 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Viscoelasticity - creep | 1 | 3.06 | 0 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Viscoplasticity - creep | 1 | 3.04 | 0 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPSSR | 1 | 3.09 | 0 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 1 | 1 | 1.56 | 0 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 2 | 1 | 5.34 | 0 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 3 | 1 | 5.72 | 0 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 4 | 1 | 15.21 | 0 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 5 | 1 | 0.016 | 0 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 6 | 1 | 0.599 | 0 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 7 | 1 | 0.013 | 0 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 8 | 1 | 0.0074 | 0 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VPUSR 9 | 1 | 4.025 | 0 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

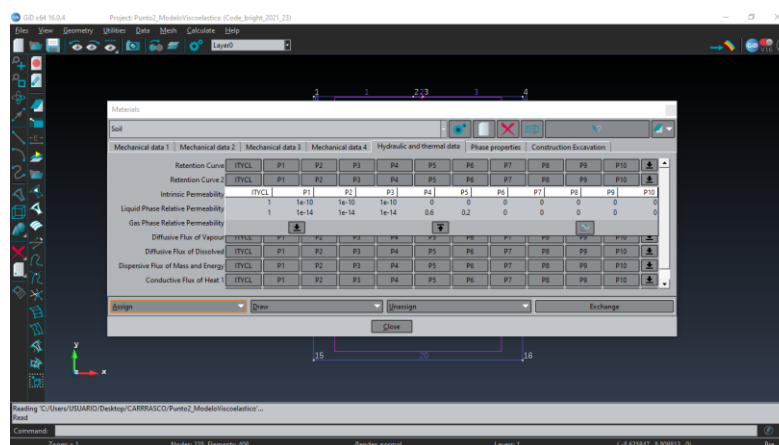
En el apéndice Q se observa asignada la porosidad inicial para cada una de las capas de suelo.

Apéndice Q. Porosidad inicial para todos los estratos

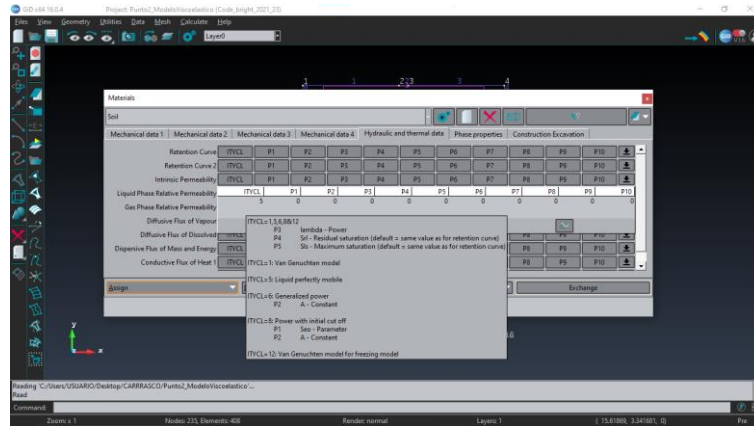


En el apéndice R se observa la introducción de la permeabilidad intrínseca en los valores de P1, P2 y P3, también se tuvo en cuenta los valores máximos y mínimos de porosidad para la capa 1, esto se asignó hasta la capa 3. Cabe mencionar que la primera fila no tiene valores representativos del modelo, dado el primer intervalo de tiempo es una fase de acondicionamiento en la que solo se produce asentamiento por el peso propio, a partir de esto se analizaron las deformaciones considerando solo la aplicación de carga sucesiva y demás propiedades del suelo.

Apéndice R. Permeabilidad intrínseca para la capa 1.

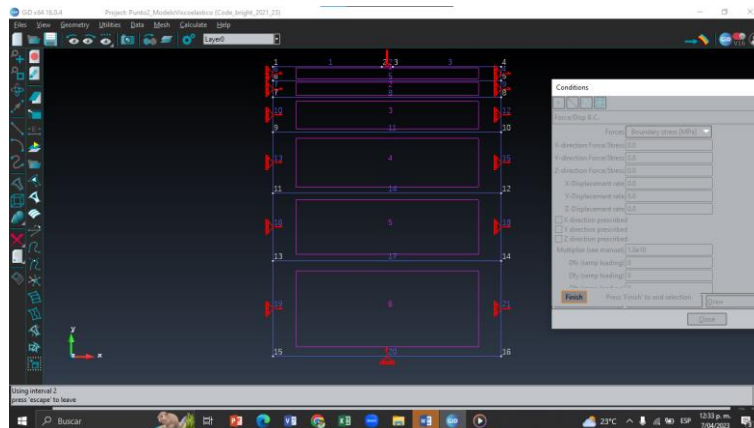


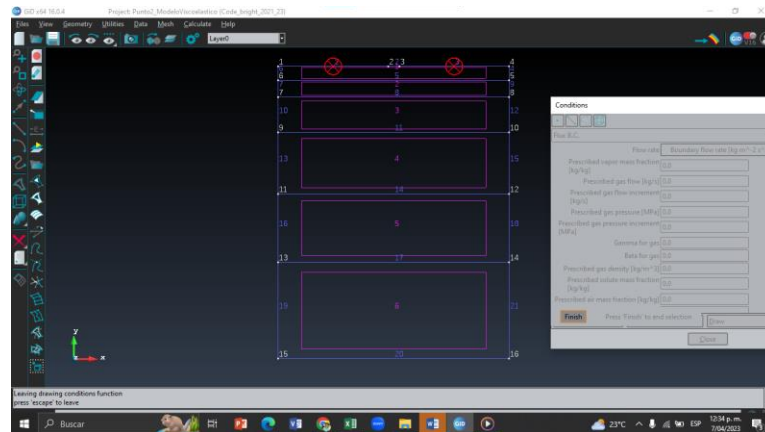
Apéndice S. Condiciones de flujo



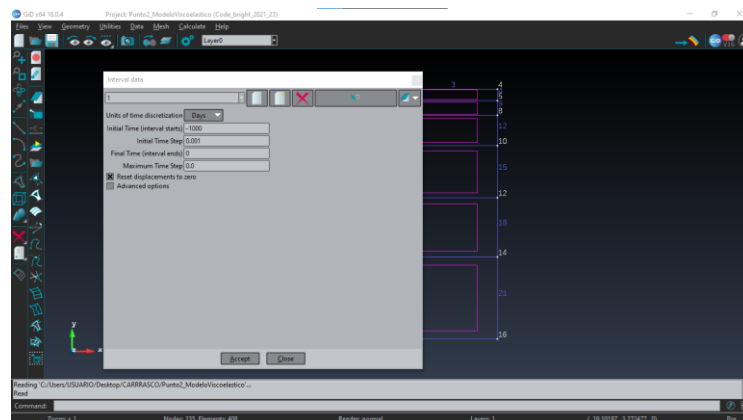
En los apéndices T y U se observa las restricciones de movimiento y de flujo utilizados, las cuales fueron aplicadas para todos de los intervalos de tiempo trabajados.

Apéndice T. Restricción de desplazamientos para los bordes del modelo y aplicación de carga



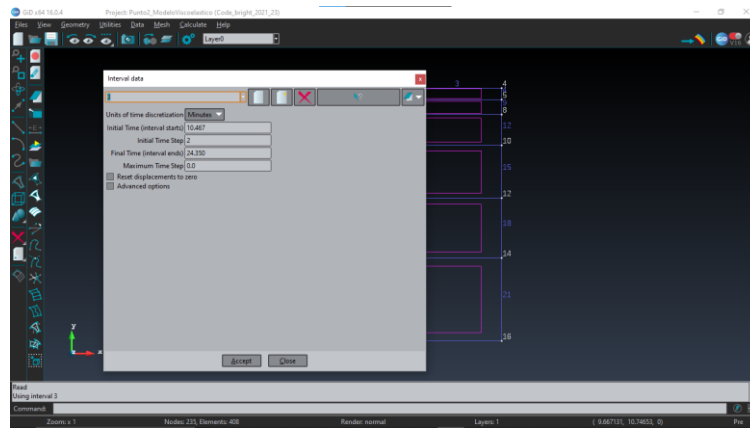
Apéndice U. Condición de flujo en las fronteras del modelo

En el apéndice V se ve la configuración del intervalo de tiempo de acondicionamiento mencionado anteriormente.

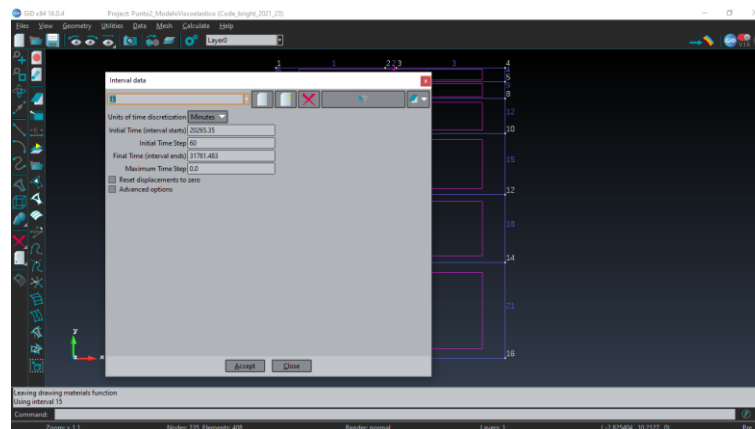
Apéndice V. Intervalo de tiempo de acondicionamiento

En el apéndice W se observa uno de los intervalos de tiempo trabajados para la aplicación sucesiva de carga, este tiene el mismo rango de tiempo trabajado en campo, además se configuro para que se realizaran calculos cada 2min (Initial Time Step en el software), esto se debe a que en la realidad se midió en ese mismo rango tiempo después de haber sido aplicada una carga.

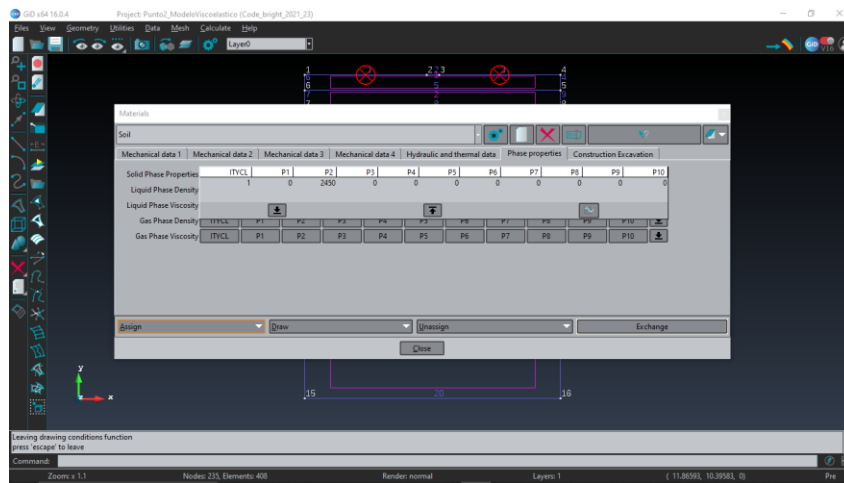
Apéndice W. Ejemplo de configuración de los intervalos de tiempo para aplicación sucesiva de carga



Apéndice X. Ejemplo de configuración de los intervalos de tiempo después de aplicada la carga



Apéndice Y. Densidad de la fase sólida en el modelo viscoelástico en la capa 1



Apéndice Z. Propiedades de viscosidad para el modelo viscoelástico en la capa 1

