

UPC-ETSECCPB

Trabajo práctico 2-DP14

Ingeniería de Estructuras

Santiago Acebes Díaz

09/06/2015

Se va a excavar un túnel bajo la calle Mallorca de Barcelona. Los vecinos están preocupados por la integridad de sus casas y de la propia Sagrada Familia.

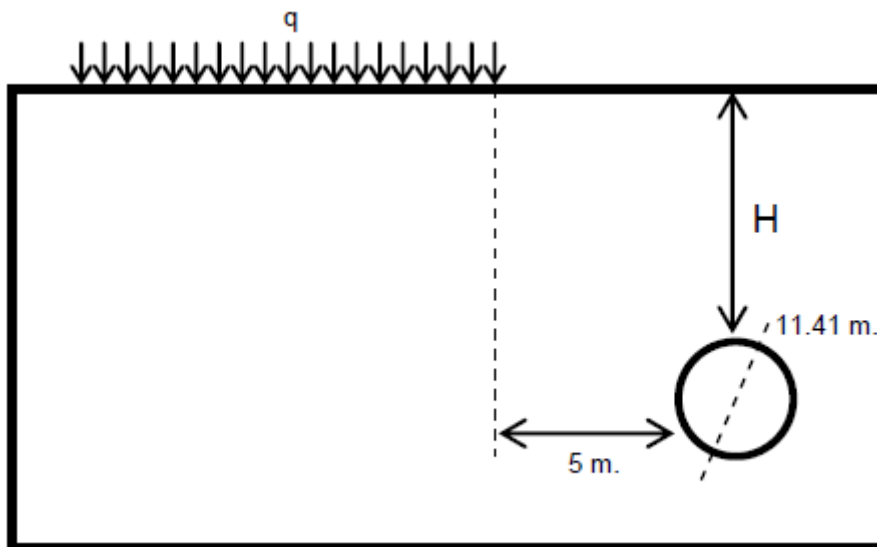
Calcular los asientos diferenciales que se producen en el suelo bajo la Sagrada Familia considerando los datos proporcionados en el plano de la figura (sin pantalla de hormigón) para 5 distintas profundidades (H) del túnel entre 5 y 50 m. y discutir el efecto de la profundidad en los asientos diferenciales provocados por el túnel.

Considerar al menos 4 puntos de monitorización de asientos en cada caso para medir las diferencias entre ellos.

Escoger razonadamente entre un estudio de Tensión Plana, Deformación plana o Tridimensional.

Para el cálculo se harán las siguientes simplificaciones:

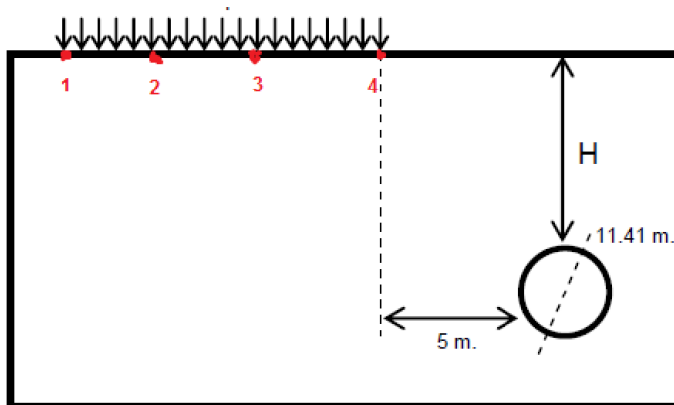
- Se considerará el peso de la Sagrada Familia como una carga de $q=50 \text{ KN/m}^2$ sobre el terreno. No se considerará la presencia de cimentaciones.
- Las dimensiones de la Sagrada Familia son de 100 m. (perp. al túnel) por 75 m. (paralelo al túnel).
- El túnel será un agujero en el terreno de 11.41 m. sin revestimiento resistente.
- Se obviará la presencia de otros túneles, pantallas o elementos subterráneos urbanos.
- La distancia en horizontal desde el lateral del túnel hasta la fachada del templo es de 5 m.
- Todo el terreno está saturado.



Datos mecánicos:

Limos y arenas: $E = 4.5 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$; $\nu = 0.25$; $\gamma = 20,5 \text{ kN/m}^3$

El problema se ha calculado con la teoría de deformación plana. Esta se ha podido aplicar por la gran longitud (en dirección del túnel) de la sección mostrada anteriormente (75m), tendiendo siempre la misma geometría y la misma carga, es decir geometría y carga prismáticas. Los asientos bajo la sagrada familia se han medido con 4 puntos de monitorización separados uniformemente bajo dicho edificio. Considerando el origen de coordenadas en el punto de la Sagrada Familia más alejado del túnel, éstos se han colocado en 0, 32, 64 y 100 metros (este último punto colocado a 5 metros del túnel). Para considerar los asientos causados por el túnel, se han calculado los asientos en cada punto existentes considerando la construcción del túnel a una profundidad de 5, 10, 20, 35 y 50 metros.



Lo más importante a tener en cuenta en este ejercicio es saber escoger los límites del terreno de forma que las condiciones de contorno no influyeran en el resultado obtenido. Es decir, escoger una profundidad tal que los asientos causados tanto por el túnel como por la Sagrada Familia se hayan estabilizado. Lo mismo sucede con la anchura del terreno. Para encontrar las dimensiones correctas se ha ido iterando y observando las deformaciones para distintos casos hasta encontrar uno, que no sea excesivamente grande, que cumpla las explicaciones anteriormente mencionadas. Todo ello se ha realizado para deformación plana.

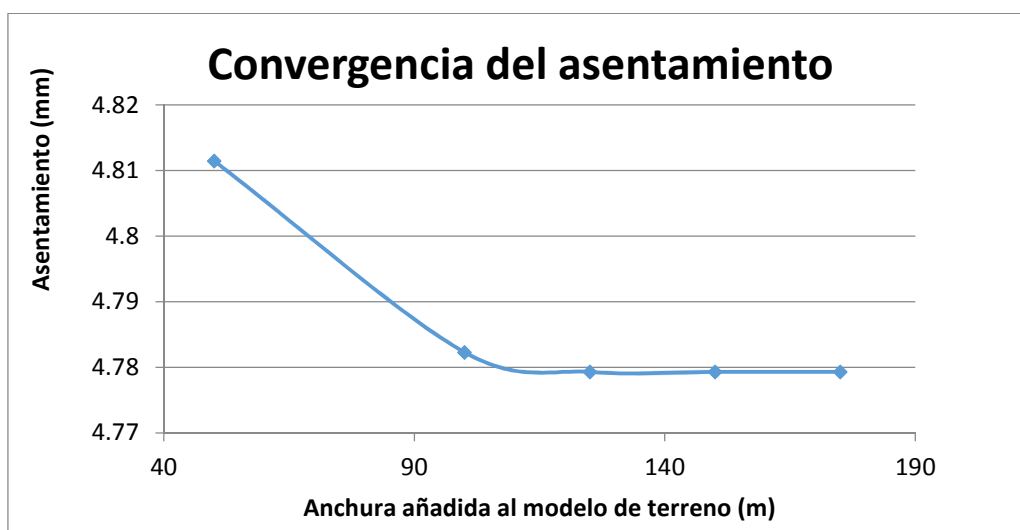
Deformación plana

Se ha utilizado un elemento un elemento triangular de tres nodos para realizar los cálculos. La forma triangular se debe a la presencia de geometrías circulares (el túnel), ya que este elemento se adapta a ellas mucho mejor que los cuadriláteros y, además, se ha comprobado que tiene un buen comportamiento para dichas mallas.

La elección de las dimensiones del terreno se ha realizado con un mallado muy grosero para calcular rápidamente, una vez elegido se ha procedido a la observación al refinamiento de malla para realizar el análisis de convergencia del elemento.

En primer lugar se han iterado distintas anchuras para una profundidad dada, incrementándolas a ambos lados (desde el inicio de la Sagrada Familia y el final del túnel) y se ha ido comprobando que no hubiera asiento en los extremos del terreno debido a la carga de la Sagrada Familia. Así pues, se han considerado 5 casos, desde 50 metros por cada lado y 175 metros, como se puede observar en la siguiente gráfica.

El punto de monitorización usado para siguiente grafica corresponde al extremo del terreno más cercano a la carga de la Sagrada Familia a una profundidad en la que se observa que existe mayor variación de asentamiento por metro, es decir, mayor variación de colores rojos-amarillo-verde en menos metros.



Se ve que a partir de poco más de 100 metros el asentamiento se estabiliza bastante. Se acaba escogiendo una anchura de 100 metros ya que el cambio es del orden de la centésima de milímetro y cuanto más pequeño sea el terreno menor será el coste computacional.

Ahora pasaremos a fijar la profundidad del modelo. Debido a que la máxima profundidad de estudio del túnel es de 50 metros, analizaremos como varían las diferentes capas de tensiones con la profundidad y escogeremos aquella profundidad que nos proporcione una mayor uniformidad de las capas de esta forma estaremos seguros que las condiciones de contorno verticales no suponen un confinamiento del terreno y, de ese modo, causar errores en nuestros cálculos de asentamientos.

Después de realizar diferentes iteraciones cambiando la geometría del modelo para las una profundidad de 100, 125 y 150 metros. He llegado a la conclusión que la de 150 metros es la más fiable ya que es evidente que no existe ninguna variación en el eje “y” de las capas de tensiones.

A continuación se muestra la figura de la geometría del modelo que optimiza el error el número de grados de libertad del modelo en función del error de los asientos diferenciales.

100m agregados a los extremos de Sagrada familia y túnel (316.41 metros de anchura en total), 150 metros de profundidad y malla de 1.5 metros de tamaño del elemento triangular lineal de ensayo.

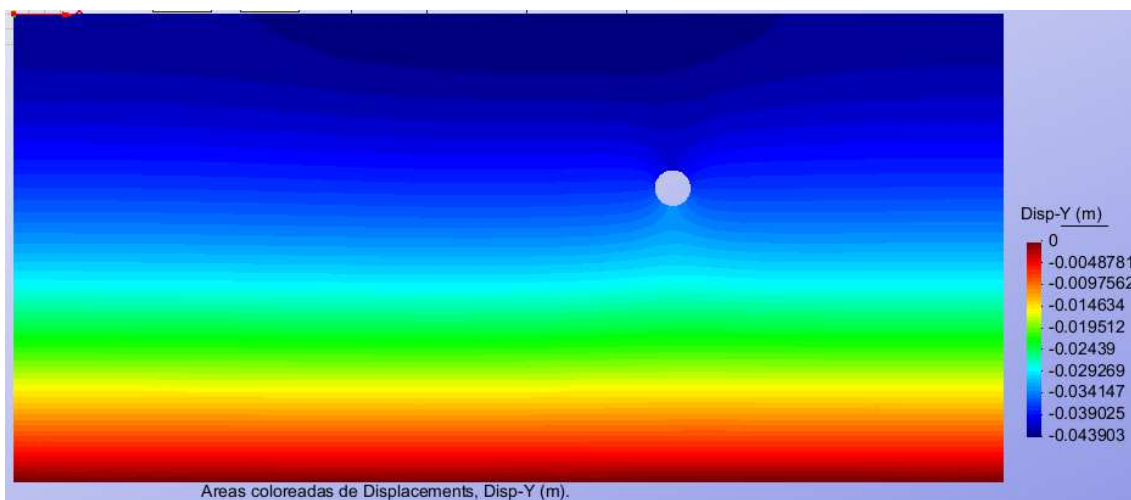


Figura 1: Geometría final del modelo con túnel en H=50metros

Una vez escogida la geometría del modelo, pasamos describir las características del material, condiciones de carga, y condiciones de desplazamientos en los contornos.

Este procedimiento lo describiremos con el túnel a una profundidad de 5 metros, no siendo necesario explicarlo para cada una de las 5 profundidades del túnel ya que lo único que cambia es la posición de este, manteniéndose las cargas y condiciones de contorno igual.

En primer lugar, después de definir la geometría extrayendo de la superficie total del terreno la correspondiente a la superficie del túnel, dispondremos el material del terreno del problema que se trata de limos y arcillas con las características mecánicas definidas en el enunciado.



Figura 2: Material limo-arcilla del terreno

Ahora pasamos a definir las condiciones de carga que supone el peso propio de la estructura de la Sagrada familia:

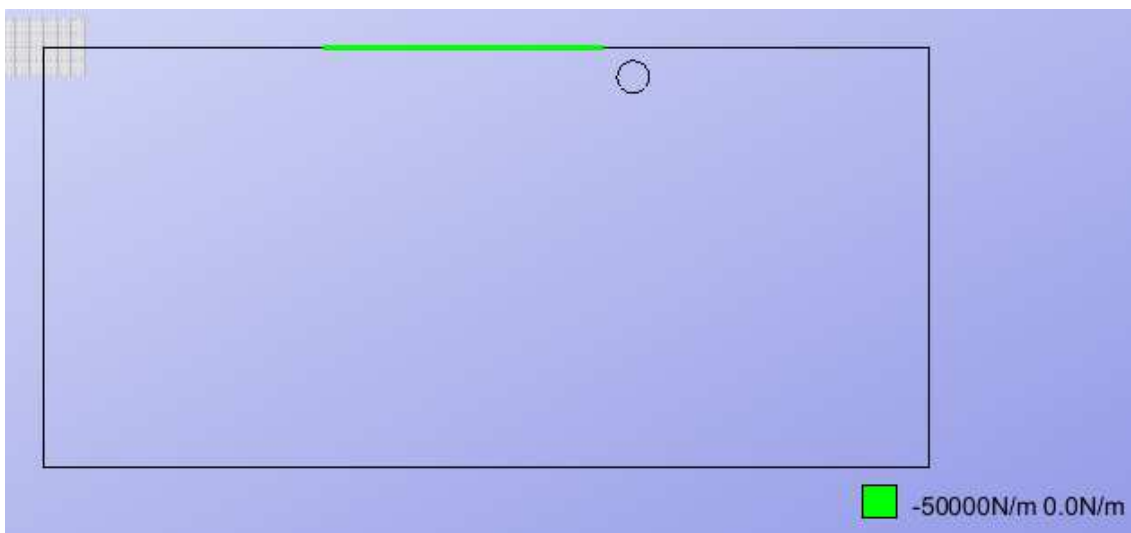


Figura 3: Condiciones de carga

Las condiciones en desplazamientos se impondrán en el modelo teniendo en cuenta los principios mencionados anteriormente para el cálculo de la geometría del modelo. Es decir, esta geometría ha sido escogida con el fin que sus extremos horizontales y verticales queden libres de las tensiones provocadas tanto por la sagrada familia como por el túnel. Por lo tanto, se podrá afirmar que en los extremos laterales no existirá movimiento horizontal, y en el extremo a mayor profundidad no existirá movimiento vertical, ya que el terreno sin ninguna estimulación permanece quieto en confinamiento.

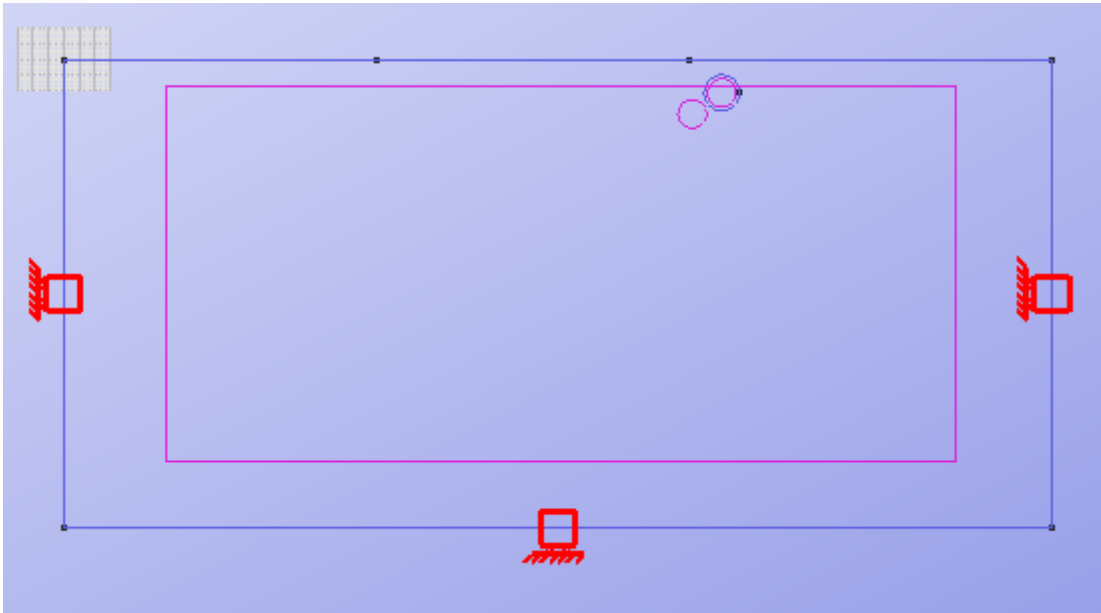
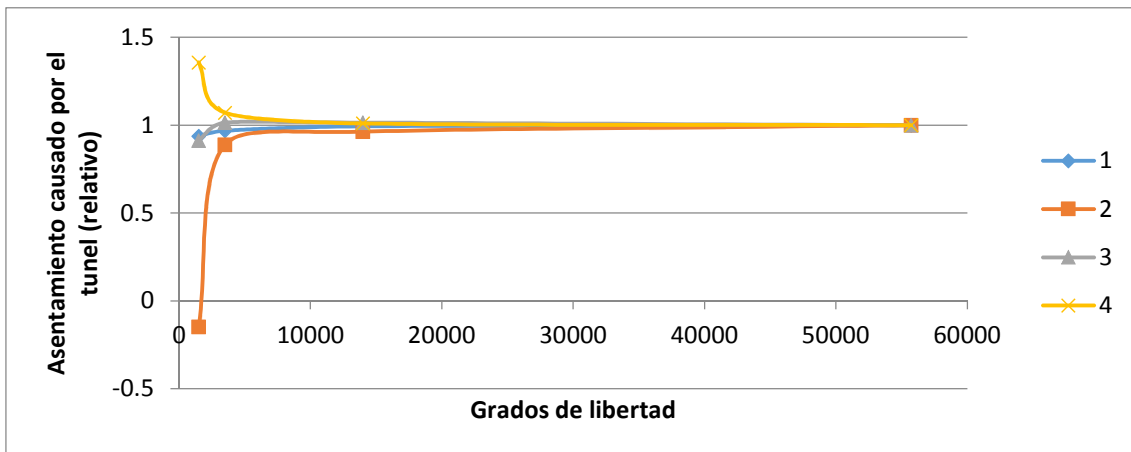


Figura 4: Condiciones de desplazamientos

Es importante recordar que se debe activar el peso propio y el cálculo a través de deformación plana en el programa.

A continuación se procede al estudio de los asientos bajo la Sagrada Familia a través de distintas mallas para observar si estos desplazamientos convergen conforme se refina ésta. Dicha convergencia se ha analizado para los 4 puntos de monitorización y con la diferencia de asiento entre la geometría con y sin el túnel, es decir el asiento causado por el túnel. Se ha calculado para una profundidad mínima del túnel (5 metros de profundidad) ya que es ahí cuando el comportamiento de los esfuerzos del terreno presenta mayor irregularidad y se prevé que se requiera mayor refinamiento de malla.

Esto se muestra en la siguiente gráfica:



Los números del 1-4 corresponden con los puntos de monitorización del asentamiento de la superficie de 100 metros de la Sagrada Familia colocados a 0, 33,66 y 100 metros respectivamente del extremo izquierdo de la estructura como se ha definido anteriormente.

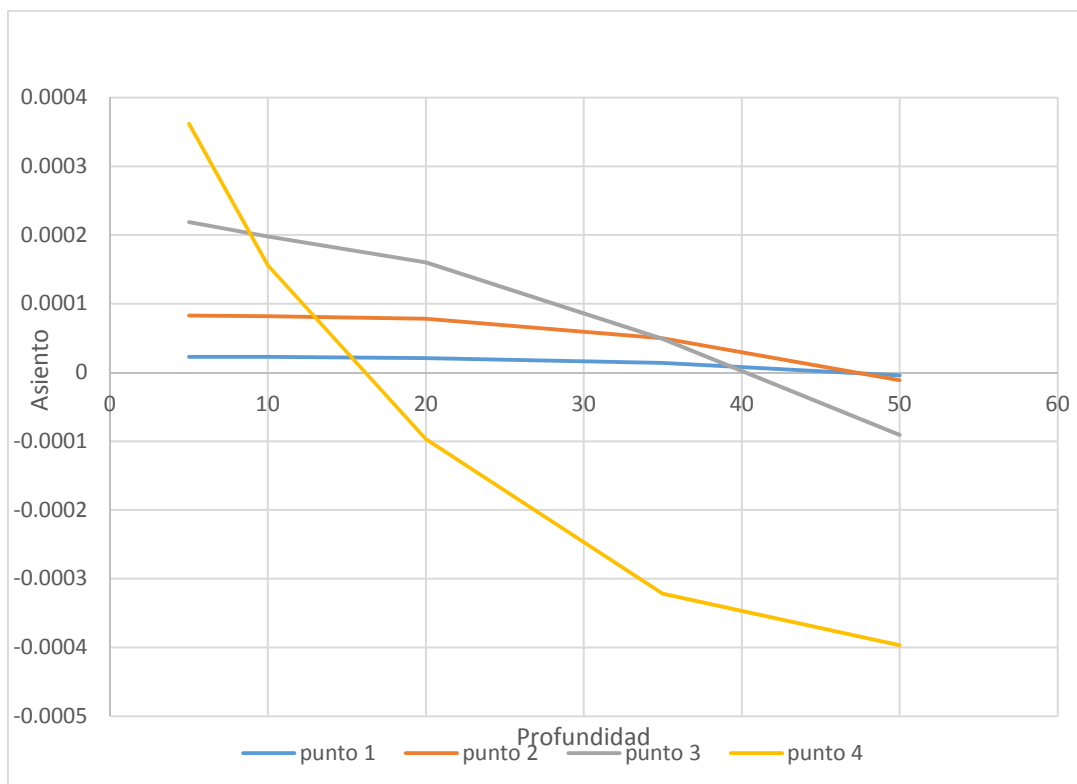
Se ha calculado la convergencia para tamaños de elemento triangular lineal de 7.5, 5, 2.5 y 1.5 metros y he elegido los resultados de este último tamaño de malla como los exactos con el fin de calcular la evolución de asentamiento relativo en función de los grados de libertad del modelo.

Como se puede observar, se produce una convergencia bastante rápida de los asentamientos relativos, siendo el punto 2 el que tarda más en converger. Como vemos, para la malla de 1.5 metros todos los puntos muestran una convergencia óptima y el coste computacional es asumible.

A continuación veremos los resultados de los asentamientos con la malla de 1.5 metros de tamaño de elemento calculando los asientos diferenciales para las diferentes profundidades del túnel 5,10,20,35 y 50 metros.

$$\text{Asiento diferencial} = \text{Asiento sin tunel} - \text{Asiento con tunel}$$

Primero analizaremos los efectos de hinchamiento o asiento diferencial del terreno para cada punto de monitorización en función de la profundidad del túnel.



Como vemos para profundidades bajas de construcción de túnel, obtenemos mayor hinchamiento del terreno, en cambio, cuando la profundidad aumenta, en general a más de 45 metros, obtenemos asiento del terreno. Es interesante observar como el punto 4 que está más cercano a construcción del túnel, sufre de la mayor variación de asientos.

Veamos con detalle el hinchamiento del terreno con construcción a profundidad 5 metros en todo el ancho de la superficie de la Sagrada Familia donde esta aplicada la carga repartida:

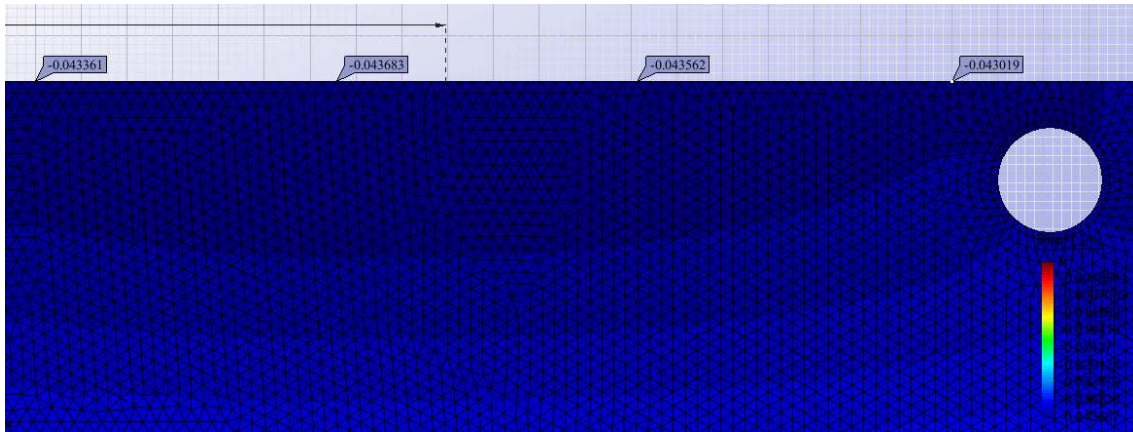


Figura 5: Asientos con H=5 metros

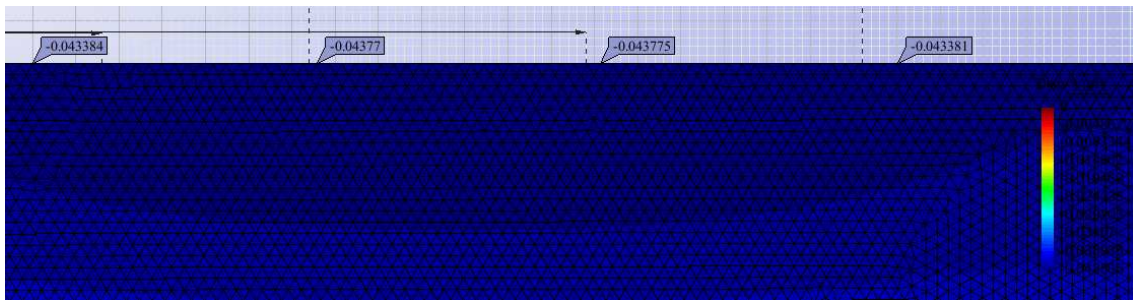


Figura 7: Asientos sin túnel

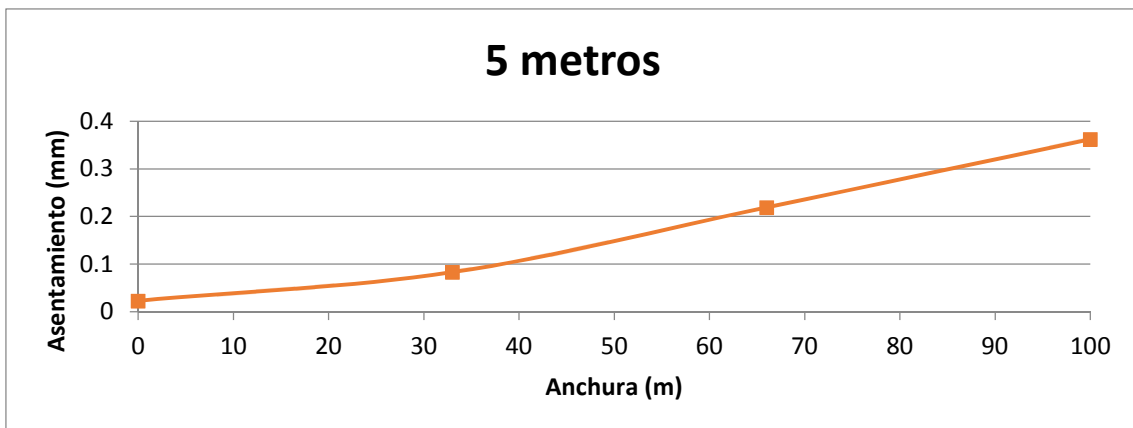


Figura 6: Evolución de la capa superficial de Sagrada Familia

Como vemos en los diferentes gráficos, la construcción del túnel supone un hinchamiento de la superficie de la Sagrada Familia ya que en los resultados nos aparece un menor asentamiento en superficie, siendo las condiciones de cargas iguales. Este hinchamiento es mayor cuanto más nos acercamos al punto de monitorización 4, el más cercano al túnel.

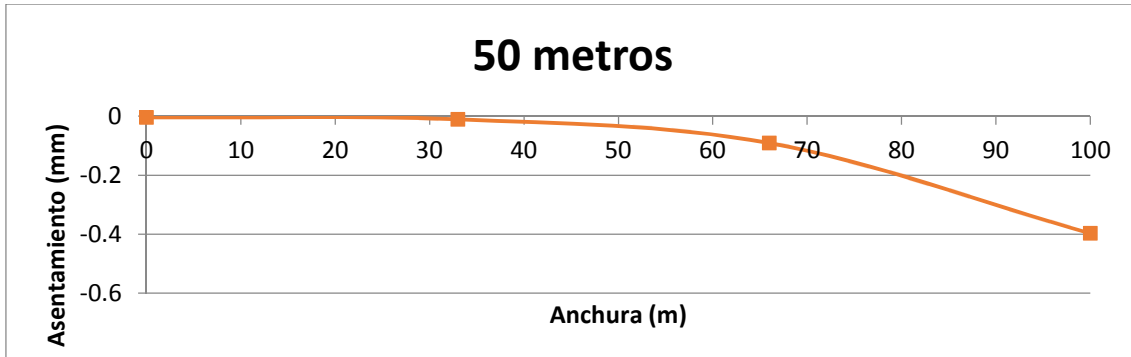


Figura 8: Evolución de la capa superficial de Sagrada Familia

A medida que aumentamos la profundidad de construcción del túnel, menor es el hinchamiento generado en la superficie de la Sagrada Familia. Tan es así, que para la profundidad de 50 metros, los resultados de asentamiento diferencial en la superficie es prácticamente nulo en extremos de la superficie de Sagrada Familia alejados del túnel, siendo el asentamiento originado casi el mismo que el asentamiento que se obtendría del cálculo sin la construcción del túnel. Sin embargo, acercándonos al punto 4 se observa el asentamiento diferencial provocado por el túnel a grandes profundidades.

Conclusiones

Los asentamientos que tenemos son muy pequeños en magnitud, de decimas de milímetro, lo que se traduce en una buena seguridad de la estructura frente a la construcción de un túnel. Hay que tener en cuenta que éste programa no considera la consolidación del suelo, ni el estado inicial del suelo cuando se construye el túnel, sino que se ha intentado simular a través del cálculo de los asentamientos sin el túnel y la posterior comparación con el cálculo con el túnel. Se podría obtener un resultado más real comparando los resultados con el cálculo en un programa de perfil más geotécnico que tenga en cuenta el estado del suelo y sus condiciones de consolidación.

Cabe destacar la importancia de utilizar una malla lo suficientemente refinada y unas distancias a los contornos suficientes para que no afecte a la solución.