

INGENIERÍA DE ESTRUCTURAS: TRABAJO PRÁCTICO (DP-12)

Víctor Folqué Ceballos
47879470W

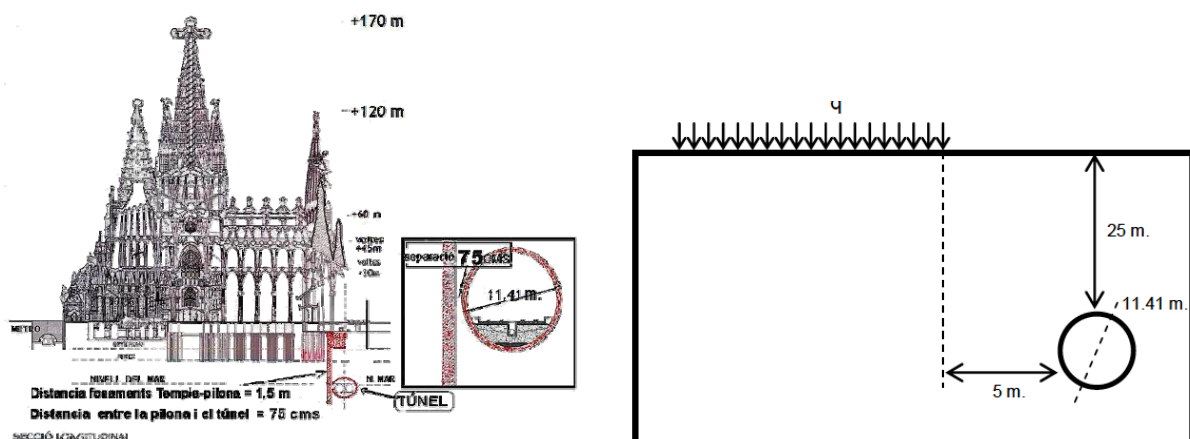
ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
2. DEFORMACIÓN PLANA.....	4
2.1 GEOMETRÍA	4
2.2 DEFINICIÓN DE MATERIALES Y CONDICIONES DE CONTORNO	6
2.3 CARGAS APLICADAS.....	7
2.4 GENERACIÓN DE MALLA.....	7
2.5 POST-PROCESO	8
3. SÓLIDO TRIDIMENSIONAL.....	8
3.1 GEOMETRÍA	8
3.2 DEFINICIÓN DE MATERIALES Y CONDICIONES DE CONTORNO	9
3.3 CARGAS APLICADAS.....	10
3.4 GENERACIÓN DE MALLA.....	10
3.5 POST-PROCESO	11
4. CONCEPTOS TEÓRICOS	12
5. CONCLUSIONES	13

La presente práctica requiere el análisis estructural de un túnel bajo la calle Mallorca de Barcelona. Los vecinos están preocupados por la integridad de sus casas y de la propia Sagrada Familia por lo que se calcularán los asientos diferenciales que se producen en el suelo bajo la Sagrada Familia considerando los datos proporcionados en el plano de la figura. Se considerarán al menos 4 puntos de monitorización de asientos para medir las diferencias entre ellos comparando los resultados obtenidos con Deformación Plana y con 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 entre el techo del túnel y la superficie es de 25 m. y 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: $E = 4.5 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$; $\nu = 0.25$; $\gamma = 20,5 \text{ kN/m}^3$

1. INTRODUCCIÓN

Lo primero que tendremos que hacer en esta práctica será determinar qué hipótesis imponemos y por lo tanto con qué tipo de problema nos encontramos. En el típico caso de túnel en el que nos encontramos se puede suponer un estado de deformación plana debido que la dimensión de los elementos de la estructura en una dirección es mucho mayor que en las otras dos direcciones. Sabiendo esto podemos suponer que bastaría pero el enunciado nos exige el cálculo mediante la

teoría del sólido tridimensional con el objetivo de comprobar que los resultados son correctos.

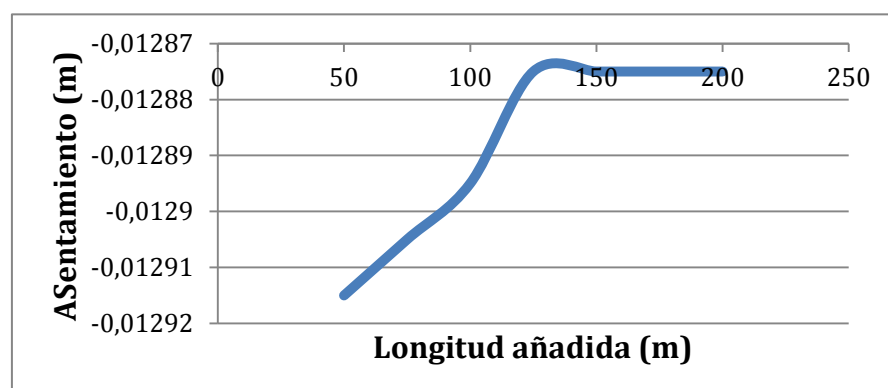
Otro aspecto importante será la colocación de 6 puntos de monitorización para medir los asientos que produce tanto la Sagrada Familia como el túnel. Estos 6 puntos serán equidistantes (cada 20 m) y se colocarán de izquierda a derecha, desde el inicio hasta el final de la sagrada familia.

2. DEFORMACIÓN PLANA

2.1 GEOMETRÍA

Cabe destacar que la geometría del problema no viene dada en su totalidad, por lo que la complejidad radicaré en determinar las dimensiones del terreno las cuales obtendremos mediante un proceso iterativo. En este proceso iterativo tendremos que implementar desde un principio: cargas, condiciones de contorno, materiales que definen el terreno y malla utilizada. Los tres primeros parámetros no cambiarán en ningún momento del proceso por lo que se definirán en los siguientes apartados, pero el tamaño de la malla utilizada será diferente para determinar la geometría. Se hará uso de un tamaño de malla más bien grande a la vez que se utilizarán elementos triangulares lineales. Esto tendrá un doble beneficio ya que por una parte buscamos un cálculo rápido que nos diga grosso modo cuál es la anchura y profundidad adecuadas por lo que la simplicidad de los elementos y el tamaño nos proporcionará una gran celeridad en el post-proceso; por otra parte los elementos triangulares tienen mejor adaptabilidad que los rectangulares a la forma circular que presenta el túnel de manera que tendrán mayor precisión.

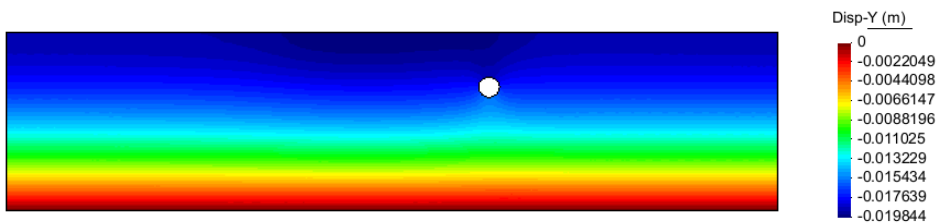
Sabiendo el tipo de elemento a utilizar iteraremos primero el ancho del terreno en función de una profundidad fija elegida arbitrariamente, que en este caso será de 80 m (este proceso lo realizaremos sin el túnel ya que se trata de simplificar el cálculo). Una vez obtenido el ancho iremos probando diferentes profundidades hasta hallar una en la que los asientos se estabilicen al final. De esta manera iremos añadiendo una determinada distancia de terreno (la misma para facilitar el cálculo) tanto a la izquierda de la Sagrada Familia como a la derecha del túnel. En la siguiente gráfica se puede observar la evolución del asiento en función de los metros que se han ido añadiendo.



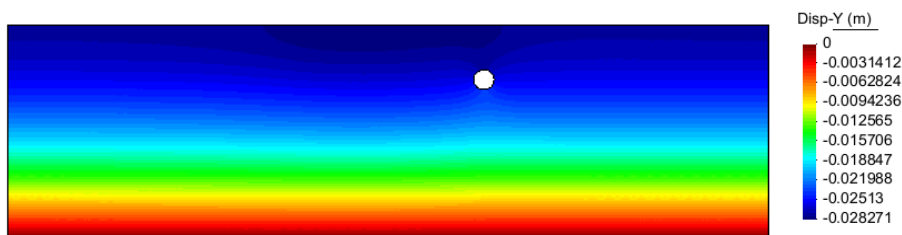
En la gráfica se observa claramente como el asiento se estabiliza más o menos a partir de los 150 m por lo que se utilizará este valor para proceder al cálculo de la profundidad.

Como se ha comentado anteriormente ahora el objetivo será hallar la profundidad para la que los asientos se estabilizan, esta vez con la presencia del túnel. Mediante un proceso iterativo mallando aún con elementos más bien grandes llegaremos a la solución. Las siguientes figuras son algunas de las más representativas para observar la evolución de los asientos:

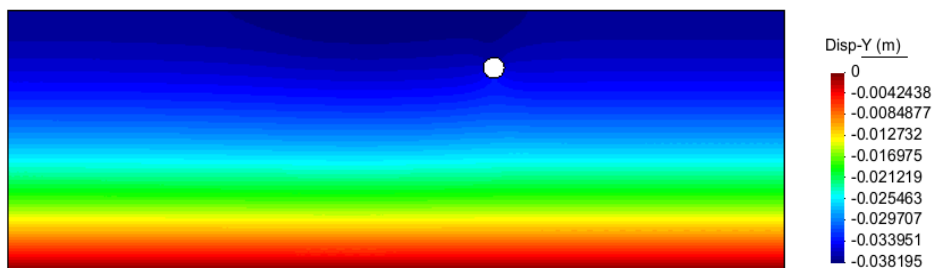
Profundidad a 100 m



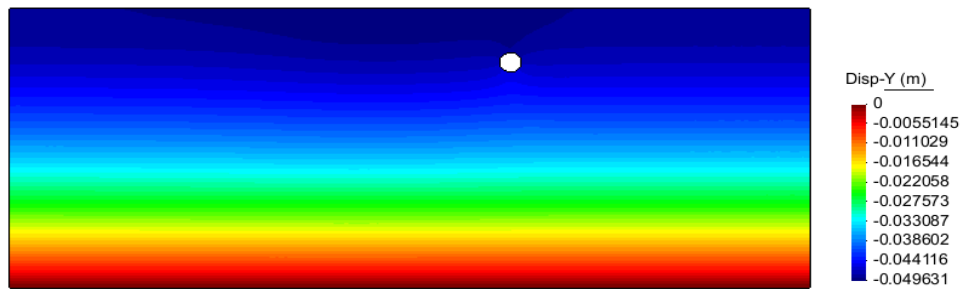
Profundidad a 120 m



Profundidad a 140 m



Profundidad a 160 m



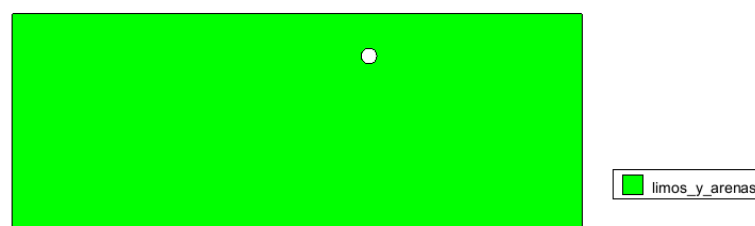
Las figuras muestran con claridad la evolución de los asientos con la profundidad. A partir de los 140 metros el valor de los asientos es prácticamente el mismo para líneas paralelas al fondo, pese a ello utilizaremos una profundidad de 160 m para estar del lado de la seguridad.

Por lo tanto tal y como requería el apartado hemos alcanzado la geometría óptima de cara a afrontar el problema:

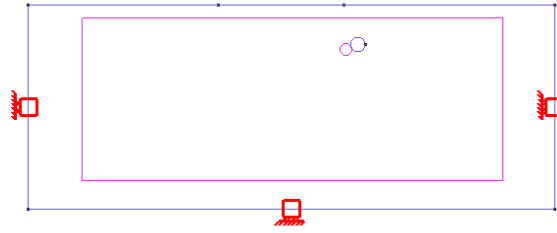
- En dirección x: 150 m. (a la izquierda de la Sagrada Familia) + 100 m (los que ocupa la Sagrada Familia) + 5m (espacio hasta el túnel) + 11,41 (diámetro del túnel) +150 m (a la derecha de la Sagrada Familia).
- En dirección y: una profundidad total de 160 m.

2.2 DEFINICIÓN DE MATERIALES Y CONDICIONES DE CONTORNO

Para este problema únicamente contaremos con un estrato de terreno que en este caso corresponderá a limos arenas.

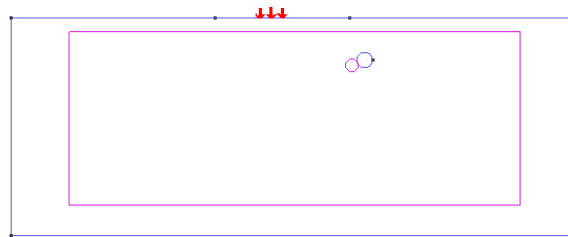


En cuanto a las condiciones de contorno, por una parte impediremos el movimiento vertical del fondo ya que el estrato finaliza ahí y por otra parte impediremos el movimiento horizontal para los límites verticales ya que se supone que el terreno continua.



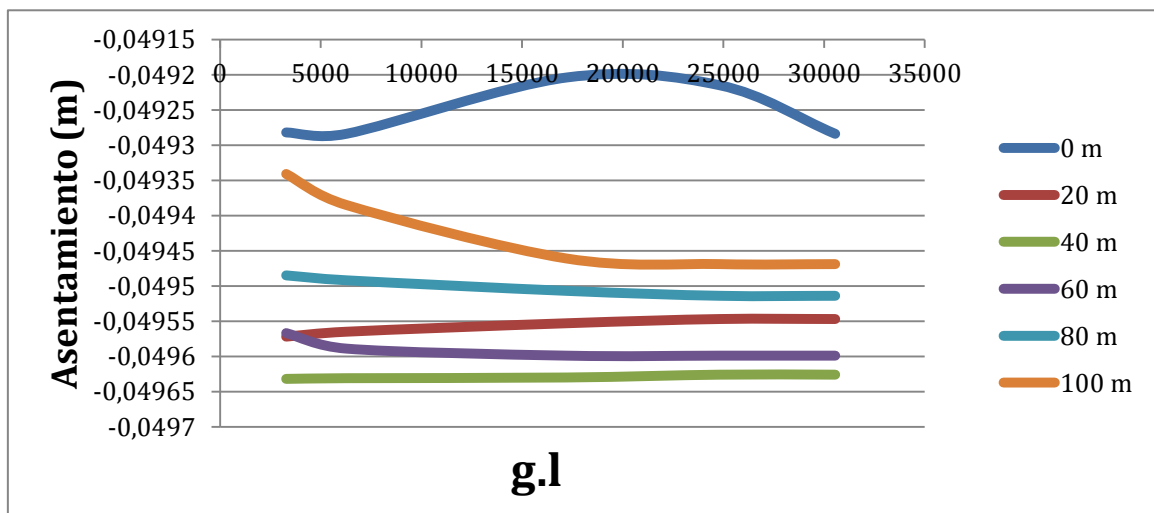
2.3 CARGAS APLICADAS

Como cargas actuantes tendremos una carga exterior de 50 KN/m² correspondiente al peso de la Sagrada Familia y la carga que incluye considerar el peso propio del terreno.



2.4 GENERACIÓN DE MALLA

A continuación se realizará un estudio de convergencia para determinar a partir de qué tamaño de malla se minimiza al máximo el error. Para ello primeramente hemos intentado hacer uso de una malla de tamaño igual a 10 pero no se ajustaba bien ya que el túnel pasaba a tener forma triangular por lo que hemos reducido la malla haciendo uso de los siguientes tamaños: 7,5,3,2,5,2. Con las dimensiones mencionadas anteriormente y con los extensómetros en los puntos correspondientes la gráfica de convergencia en cuanto al asentamiento queda de la siguiente manera:

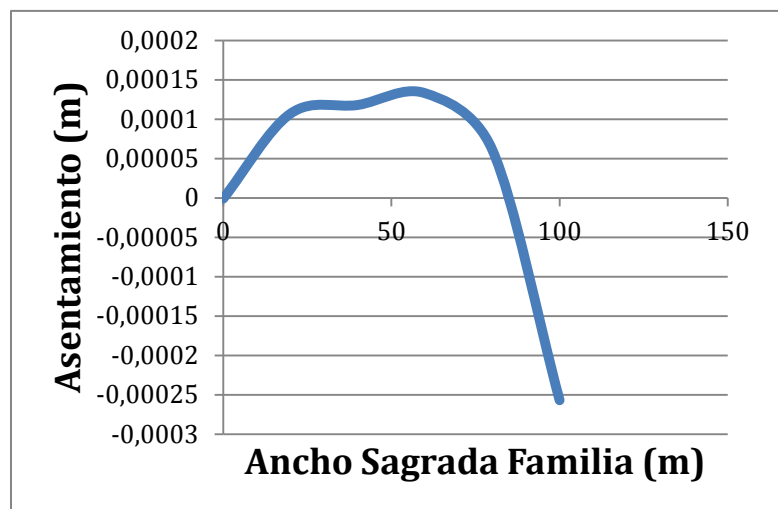


Vemos que todos los puntos monitorizados acaban convergiendo excepto el punto situado al inicio de la Sagrada Familia empezando por la izquierda. A excepción del mencionado punto todos ellos convergen para una malla de 2,5 con lo que será ésta con la que nos quedaremos para realizar los posteriores cálculos ya que una malla de tamaño menor (2 en este caso) nos comportará un coste computacional demasiado alto.

2.5 POST-PROCESO

Sabiendo esto último a continuación se calculará la contribución del túnel para asentar el terreno a lo largo del ancho que ocupa la Sagrada Familia, es decir, la diferencia entre el asentamiento sin la presencia del túnel y con la presencia del túnel.

Asentamiento con túnel (m)	Asentamiento sin túnel (m)
-0,049215	-0,049214
-0,049547	-0,049654
-0,049626	-0,049744
-0,049599	-0,049732
-0,049514	-0,049575
-0,049469	-0,049212



Observando los resultados vemos como la presencia del túnel prácticamente no afecta al punto donde se inicia la Sagrada Familia (el más alejado del túnel) mientras que a medida que nos acercamos a este se produce un desplazamiento positivo en dirección z (hinchamiento). Finalmente, a los 60-70 m el túnel empieza a tener su influencia más directa generando un asiento mayor al que se generaría sin túnel llegando así a valor negativos.

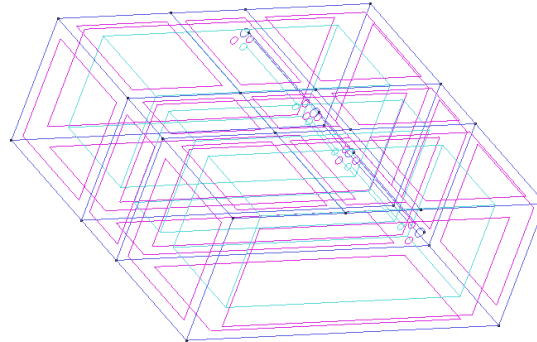
Podemos decir entonces, que despreciando la presencia de otros túneles, pantallas o elementos subterráneos urbanos además de todos los problemas estudiados en mecánica de suelos que conlleva la evolución de un terreno, la presencia del túnel no comportará ningún tipo de afectación que pueda preocupar a los vecinos de la Sagrada Familia siendo el mayor asiento provocado por éste del orden de los 0,25 mm aproximadamente (un valor muy pequeño para las dimensiones del problema).

3. SÓLIDO TRIDIMENSIONAL

3.1 GEOMETRÍA

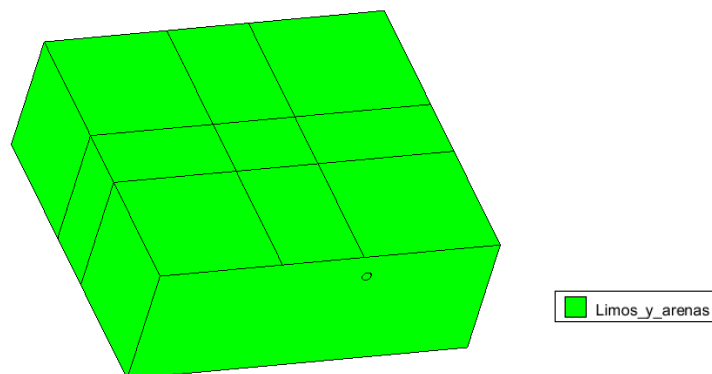
En este caso contamos con una dimensión adicional por lo que tendremos que darle una profundidad a la geometría hallada mediante la deformación plana. El

enunciado nos proporciona la longitud de la Sagrada Familia en la dirección paralela al túnel que en este caso es de 75 m. Además de estos 75 m dispondremos de 150 m a banda y banda tal y como hemos hecho en deformación plana por una cuestión de proporcionalidad. Así pues, no requeriremos de un proceso iterativo como en el caso anterior.



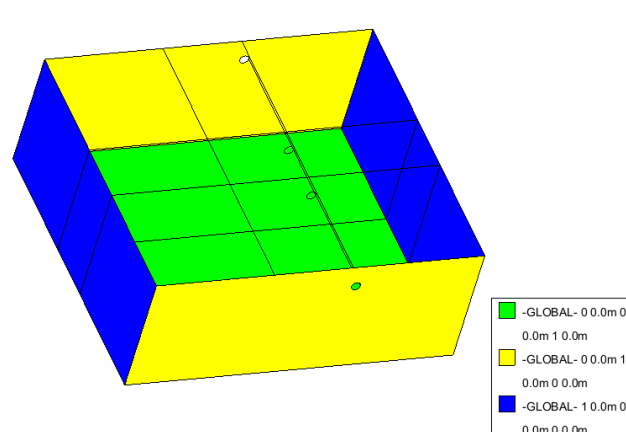
3.2 DEFINICIÓN DE MATERIALES Y CONDICIONES DE CONTORNO

Se procederá como en el caso 2D por lo que tendremos todo el terreno caracterizado por limos y arenas.



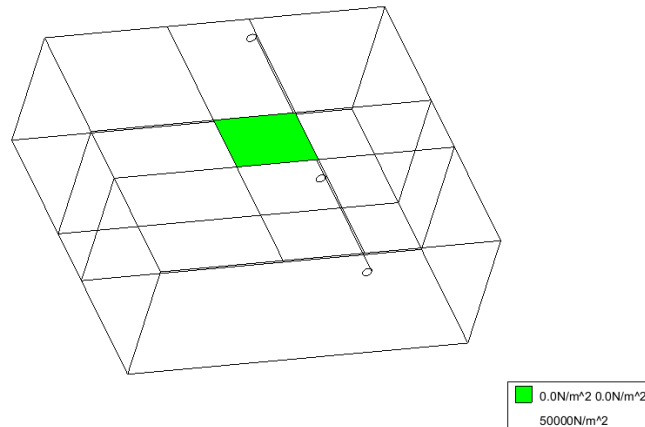
El ángulo proyectado en la imagen probablemente no sea el mejor ya que no se aprecia con seguridad si el túnel está tapado o no. Si colocásemos el túnel simplemente viéndolo en el plano xy veríamos como está vacío.

En cuanto a las condiciones de contorno el impedimento de los movimientos que teníamos en 2D persiste. La diferencia es que ahora al tener una dimensión más el desplazamiento en esa dirección también queda impedido.



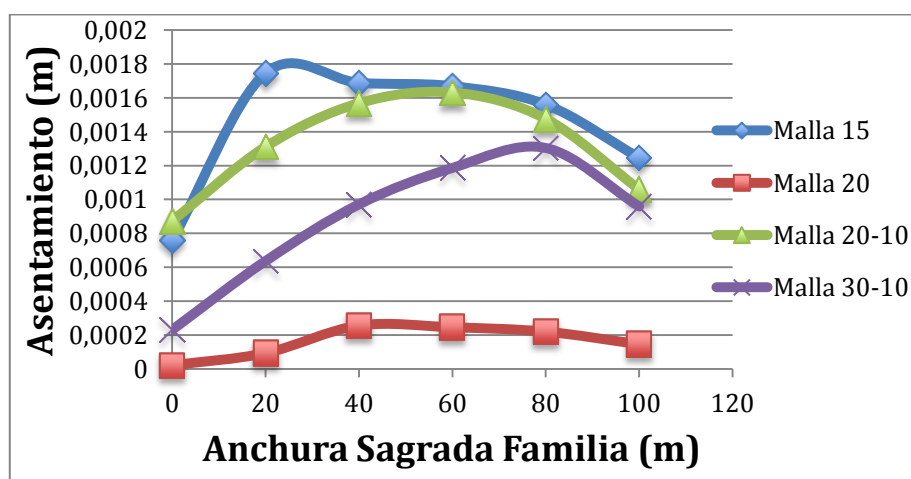
3.3 CARGAS APLICADAS

La única carga aplicada será como antes la de la Sagrada Familia, sientido de 50 KN/m² ocupando una superficie de 100x75 m².



3.4 GENERACIÓN DE MALLA

El alto coste computacional en la generación de mallas más bien pequeñas conlleva que el GiD no permita la generación de algunas. En algunos casos, con mallas gruesas, el GiD no llegará al post- proceso por errores realmente inesperados. Debido a esto, no podremos llegar a un análisis de convergencia y lo único que podremos hacer será generar unas cuantas mallas y ver como estas evolucionan. De esta manera, procediendo de la misma manera que en el caso bidimensional se medirá la diferencia entre los asentamientos producidos por el túnel y aquellos producidos sin el túnel. Se escogerán 4 tamaños diferentes de malla: 20, 15, 30-10, 20-10. Estos dos últimos serán mallas no estructuradas con un tamaño (el más pequeño) para la superficie ocupada por la Sagrada Familia y otro para el resto de las superficies. De esta manera obtenemos los siguientes resultados:



Viendo los asentamientos diferenciales generados vemos en la gráfica como aparece un hinchamiento para todos los casos tal y como pasaba en el problema bidimensional. Pese a esto vemos como la malla de 15 tiene un comportamiento no uniforme mientras que en la de 20 apenas tenemos variación. Por otra parte las

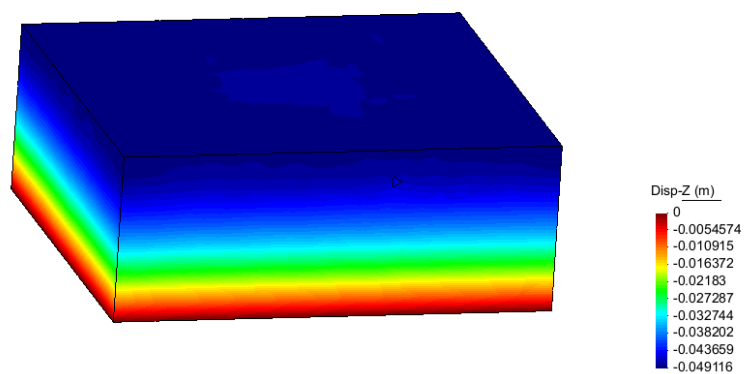
mallas no estructuradas tienen un comportamiento más ajustado al caso de deformación plana y seguramente con mallas más tupidas llegaríamos prácticamente a los mismos resultados que los del caso 2D en los que los asientos diferenciales pasarían a ser negativos.

De esta manera haremos uso de los resultados obtenidos con la malla 20-10.

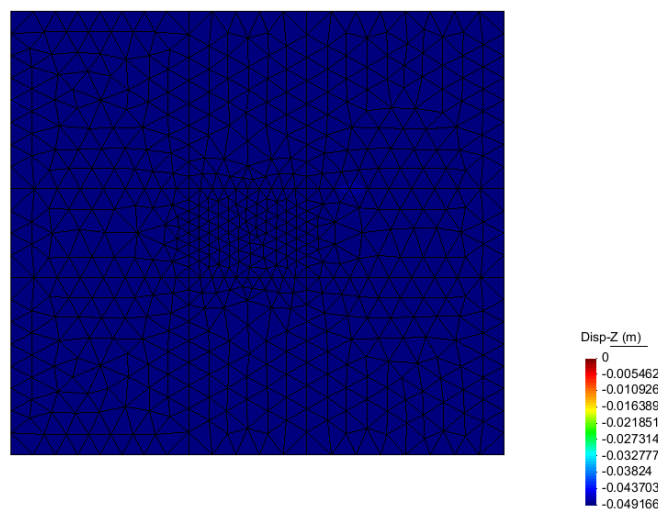
3.5 POST-PROCESO

Sabiendo que utilizaremos la malla 20-10 a continuación se presentan los resultados en cuanto a la flecha tanto para el caso con túnel como sin túnel:

- Sin túnel:



- Con túnel:



Finalmente, procederemos a mostrar una tabla comparativo entre los diferentes asientos producidos por el túnel en los 6 puntos monitorizados bajo la Sagrada Familia.

Tamaño malla (m)	Asentamiento (m)				
	Sin túnel				
	malla 2,5 (2D)	malla 15 (3D)	malla 20 (3D)	malla 20-10 (3D)	malla 30-10 (3D)
0	-0,049215	-0,048989	-0,048016	-0,048791	-0,048115
20	-0,049547	-0,049508	-0,047936	-0,048976	-0,048324
40	-0,049626	-0,049351	-0,04788824	-0,049139	-0,048627
60	-0,049599	-0,049273	-0,047916	-0,049099	-0,048748
80	-0,049514	-0,049208	-0,0479807	-0,049024	-0,048901
100	-0,049469	-0,049192	-0,048057	-0,048854	-0,048725

Viendo los resultados podemos concluir que la diferencia entre los asientos producidos por la malla de tamaño igual a 2,5 y los de la malla 20-10 difieren en aproximadamente 0,5 mm por lo que los resultados obtenidos mediante el análisis bidimensional se podrían considerar más que aceptables.

4. CONCEPTOS TEÓRICOS

Se presentarán los conceptos que hay que conocer de la teoría de la elasticidad bidimensional para la utilización del método de los elementos finitos.

a) Campo de desplazamientos

Las características geométricas y de cargas de una estructura en estado de deformación plana permiten establecer a hipótesis de que todas las secciones perpendiculares al eje prismático z se deforman en su plano y de manera idéntica. Por tanto, el vector de desplazamientos de un punto se define como

$$u(x, y) = [u(x, y), v(x, y)]$$

b) Campo de deformaciones

En el caso de deformación plana se hace la hipótesis que la deformación longitudinal ε_z es nula. Así pues, el vector de desplazamientos significativos de un punto para tensión y deformación se define como:

$$\varepsilon = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z]^T$$

c) Campo de tensiones

Se deduce que las tensiones tangenciales τ_{xz} y τ_{yz} son nulas. Por otra parte, la tensión σ_z no trabaja y el vector de tensiones significativas es

$$\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z]^T$$

d) Expresión del Principio de los Trabajos Virtuales

Teniendo en cuenta las tensiones y deformaciones que contribuyen al trabajo virtual de la estructura, la expresión del PTV puede escribirse por

$$\iint_A \delta \varepsilon^T \sigma t dA = \iint_A \delta u^T b t dA + \oint_l \delta u^T t t ds + \sum_i \delta u_i^T q_i$$

En cuanto al problema de sólidos tridimensionales, éstos representan un mayor esfuerzo de cálculo por elementos finitos en comparación con los problemas de la teoría bidimensional. Dicha dificultad es inherente al tamaño del problema, que pasa de dos a tres dimensiones. Este aumento en una dimensión se refleja no únicamente en un considerable incremento del tiempo de cálculo, sino también en un esfuerzo mucho mayor en la preparación de datos e interpretación de resultados. Con todo esto desafortunadamente no se pueden hacer simplificaciones en cuanto al análisis por lo que tendremos: los 3 vectores de desplazamientos existentes, las 6 deformaciones y las 6 tensiones. Además el principio de trabajos virtuales se escribirá de la misma forma pero con integrales de volumen.

5. CONCLUSIONES

Los resultados vistos los podemos enfocar en diferentes direcciones. Por una parte, los vecinos de la Sagrada Familia no tendrían por qué tener ningún tipo de preocupación ya que las deformaciones producidas se podrían considerar prácticamente despreciables. Por otra parte, hay que tener en cuenta que tanto las condiciones del entorno como del terreno se dan de manera muy simplificada por lo que los resultados son más bien orientativos.

Desde un punto de vista más bien computacional, el programa tiene muchos problemas para encarar mallas muy tupidas llegando incluso a colapsarse. Las dimensiones del problema son la causa del problema así como también la capacidad del ordenador. Pese a ello podemos concluir que hemos llegado a mallas lo suficientemente pequeñas para asegurarnos un mínimo de calidad en los resultados.