



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH



PROBLEMA DP6

INGENIERÍA DE ESTRUCTURAS

MARC SALSÉS HUERTA

PROBLEMA DP6

INGENIERÍA DE ESTRUCTURAS



ÍNDICE

1. ENUNCIADO	2
2. PREPROCESO	3
2.1. TIPO DE PROBLEMA	3
2.2. GEOMETRIA	4
2.3. CONDICIONES DE CONTORNO	5
2.4. CARGAS	6
2.5. MATERIALES	6
2.6. MALLADO. TIPO DE ELEMENTO	7
3. CÁLCULO	8
3.1. PRINCIPIO DE LOS TRABAJOS VIRTUALES	8
3.2. ECUACIÓN MATRICIAL GLOBAL	8
3.3. OBTENCIÓN DE K Y f	8
4. POSTPROCESO	10
4.1. RESULTADOS CASO SIN TÚNEL	10
4.2. RESULTADOS CASO CON TÚNEL. ESPESOR DE 0,08M	13
4.3. RESULTADOS CASO CON TÚNEL. ESPESOR DE 0,15M	18
4.4. RESULTADOS CASO CON TÚNEL. ESPESOR DE 0,30M	21
4.5. RESULTADOS CASO CON TÚNEL. ESPESOR DE 0,60M	25
5. CONCLUSIONES	29

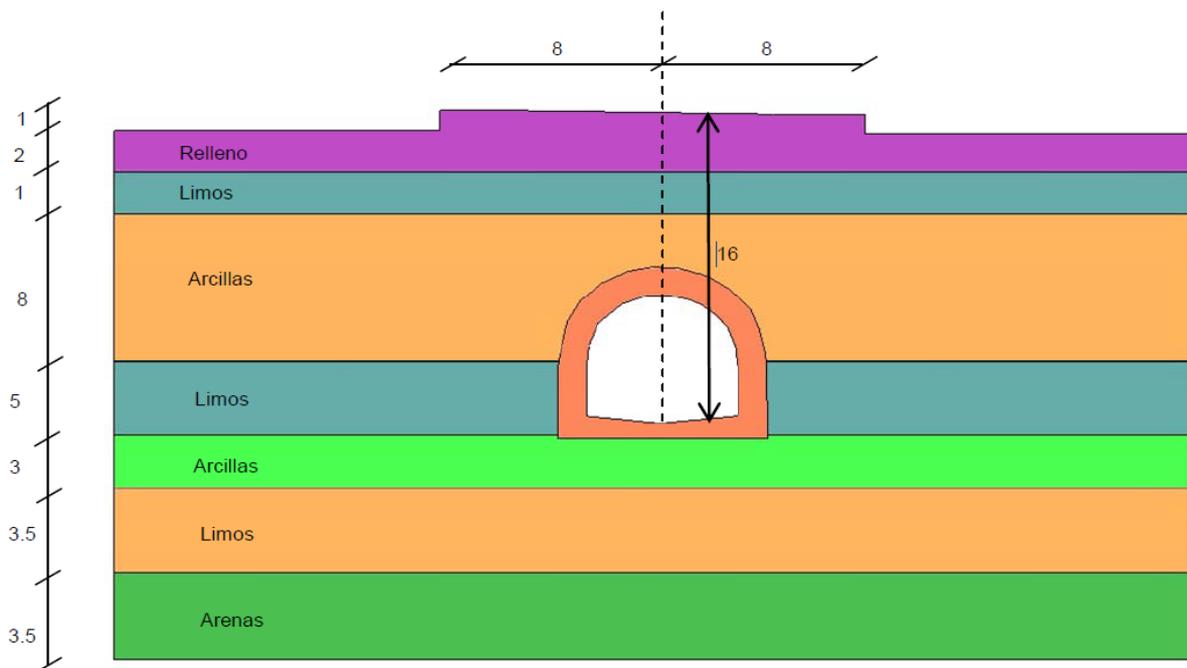


1. ENUNCIADO

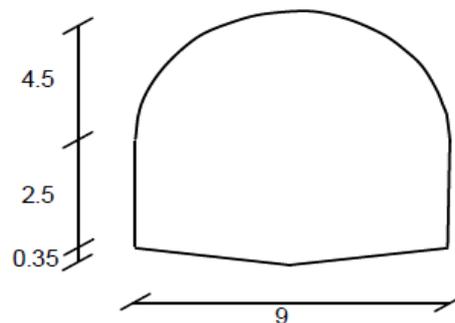
Dimensionar el espesor del refuerzo de hormigón del túnel para limitar los asentamientos en superficie por efecto del túnel a 1 cm.

El espesor de refuerzo debe ser mayor de 8 cm y las tensiones máximas a compresión/tracción no deben superar los 30/25 Mpa.

Geometría:



(Todas las cotas en metros)



Relleno: $E = 5 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$; $\nu = 0.2$; $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
 Arcillas: $E = 5 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$; $\nu = 0.2$; $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
 Limos: $E = 4.5 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$; $\nu = 0.25$; $\gamma = 20.5 \text{ kN/m}^3$
 Arenas: $E = 4 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$; $\nu = 0.3$; $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
 Hormigón: $E = 2 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$; $\nu = 0.2$; $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$

2. PREPROCESO

En el análisis por método de elementos finitos, todos los pasos referentes a la definición del modelo (previos a la solución de las ecuaciones algebraico-diferenciales) constituyen el preproceso. Así, en este apartado se expone la definición de la geometría, las condiciones de contorno, las cargas, los materiales y la malla. Esta última es una parte clave del proyecto pues la precisión de los resultados dependerá de la calidad de la malla.

2.1. TIPO DE PROBLEMA

El primer punto es decidir qué modelo es el que se debe realizar. Existe una gran variedad de estructuras de interés práctico dentro de la ingeniería en las que se puede hacer uso de las hipótesis de la elasticidad bidimensional. Dichas estructuras se caracterizan por tener una forma aproximada de prisma recto. No obstante, según la proporción que guarden las dimensiones de dicho prisma, y la disposición de las cargas, pueden clasificarse en uno de los dos tipos siguientes:

Problema de tensión plana: Se dice de una estructura prismática está en estado de tensión plana si una de sus dimensiones (espesor) es mucho menor que las otras dos, y sobre ella actúan únicamente cargas contenidas en su plano medio. Entre los problemas de estructuras que se incluyen dentro de esta categoría podemos citar los de análisis de vigas de gran canto, placas con cargas en el plano, presas de contrafuertes, etc.

Problema de deformación plana: una estructura prismática está en estado de deformación plana si una de sus dimensiones (longitud) es mucho mayor que las otras dos, y sobre ella actúan únicamente cargas uniformemente distribuidas a lo largo de toda su longitud y contenidas en planos ortogonales al eje que une los centros de gravedad de sus distintas secciones transversales. Dentro de esta clasificación se pueden incluir entre otros, los problemas de muros de contención, presas de gravedad, tuberías bajo presión interior y diversos problemas de ingeniería del terreno (túneles, análisis de tensiones bajo zapata, etc...)

En este caso, se ha realizado un modelado en dos dimensiones bajo las hipótesis de **deformación plana** ya que la longitud del túnel (dirección “z”) es mucho mayor que las dimensiones en el plano “xy”, además que todas las cargas actúan de manera uniforme en toda la longitud y están contenidas en el plano ortogonal al túnel. Esto permite llegar a soluciones altamente precisas disminuyendo en gran medida los recursos computacionales necesarios.

A continuación se detallan algunos aspectos importantes referentes a deformación plana:

- *Campo de desplazamientos*

Las características geométricas y de cargas de una estructura en estado de deformación plana permiten establecerla hipótesis de que todas las secciones perpendiculares al eje prismático z se deforman en su plano y de manera idéntica. Por consiguiente, basta con conocer el comportamiento de cualquiera de dichas secciones. Así consideremos una sección genérica contenida en el plano xy, El campo de desplazamientos de la sección está perfectamente definido si se conocen los desplazamientos en las direcciones x e y de todos sus puntos. El vector desplazamientos de un punto se define, por tanto, como:

$$u(x,y) = \begin{cases} u(x,y) \\ v(x,y) \end{cases} \quad (1)$$

- *Campo de deformaciones*

Del campo de desplazamientos se puede deducir fácilmente las deformaciones haciendo uso de la teoría general de la elasticidad. Así

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (4)$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0 \quad (5)$$

Con respecto a la deformación longitudinal ε_z hay que señalar que en el caso de deformación plana se hace la hipótesis de que es nula.

$$\varepsilon = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \tau_{xy}]^T \quad (6)$$

- *Campo de tensiones*

Se deduce de las ecuaciones anteriores que las tensiones tangenciales τ_{xz} y τ_{yz} son nulas. La deformación ε_z y la tensión σ_z no trabajan y por tanto el vector de tensiones significativas:

$$\sigma = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau_{xy}]^T \quad (7)$$

2.2. GEOMETRIA

La geometría se ha modelado según los datos del enunciado. Así, en primer lugar se han creado las líneas que contornean el dominio, para posteriormente crear el túnel y la pantalla.

Estas líneas forman superficies cerradas donde se crearán las diferentes mallas. Es importante destacar que el dominio se ha tomado suficientemente grande para asegurar que los contornos rígidos no alteren los resultados en la zona de estudio. Este es 200 metros de ancho. Un dominio demasiado grande puede provocar que no se consigan mallas muy refinadas debido al elevado coste computacional.

Tal como se ha dicho en los objetivos, es necesaria la modelización de dos geometrías distintas: Terreno antes de la construcción del túnel y después de su construcción.

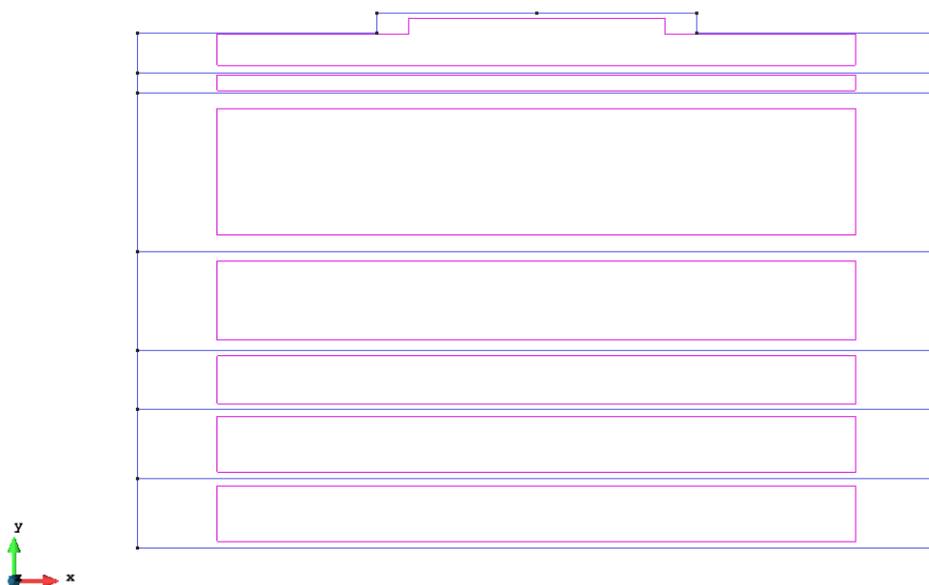


ILUSTRACIÓN 1. GEOMETRÍA DEL TERRENO PREVIO A LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL

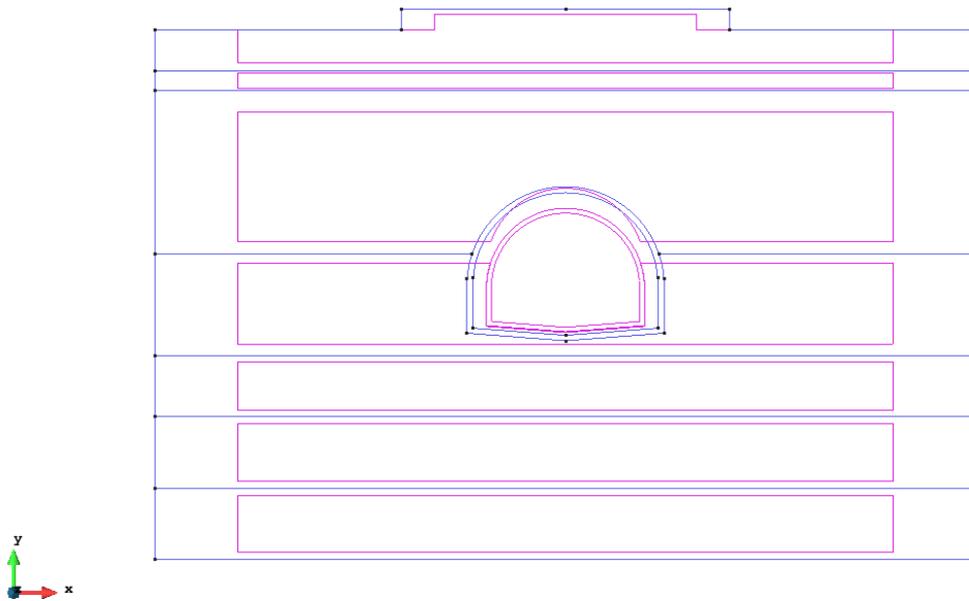


ILUSTRACIÓN 2. GEOMETRÍA DEL TERRENO DESPUÉS DE LA CONSTRUCCIÓN

La geometría varía en función del espesor del refuerzo de hormigón que se considere. Se optará por considerar diferentes espesores, los cuales son:

0,08 m ; 0,15 m ; 0,30 m ; 0,6 m

2.3. CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones de contorno impuestas en el dominio consisten en un empotramiento de la zona inferior y el impedimento de los desplazamientos en dirección “x” en los laterales. Dichas condiciones son comunes en los tres modelos mencionados anteriormente.

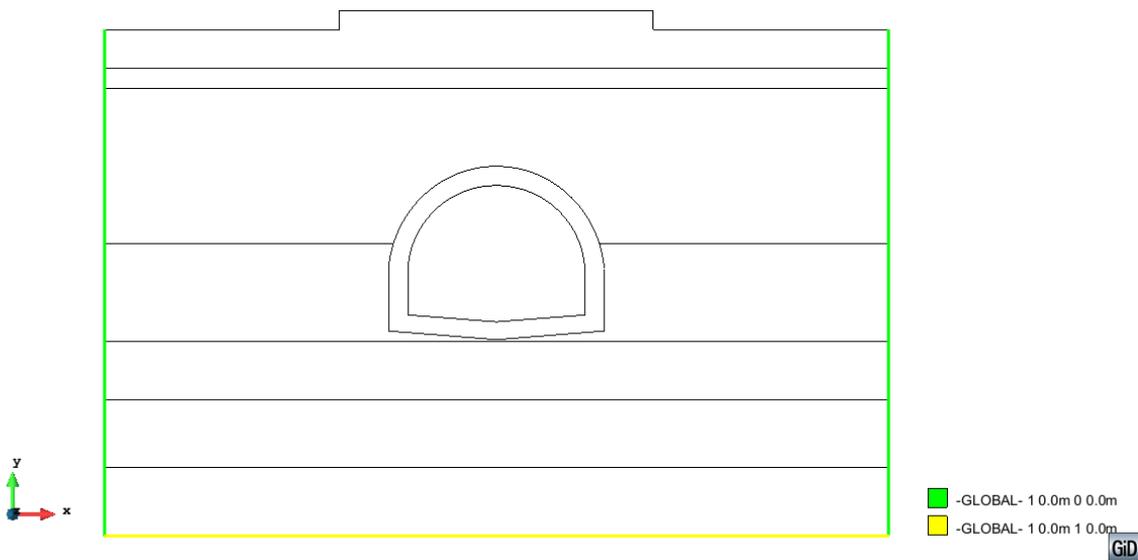


ILUSTRACIÓN 3. CONDICIONES DE CONTORNO

2.4. CARGAS

Las cargas consideradas son el peso propio del terreno y del refuerzo de hormigón. No se consideran cargas externas.

2.5. MATERIALES

La definición de los materiales ha consistido en la asignación a cada superficie el tipo de material que corresponde tal como se observa a continuación:

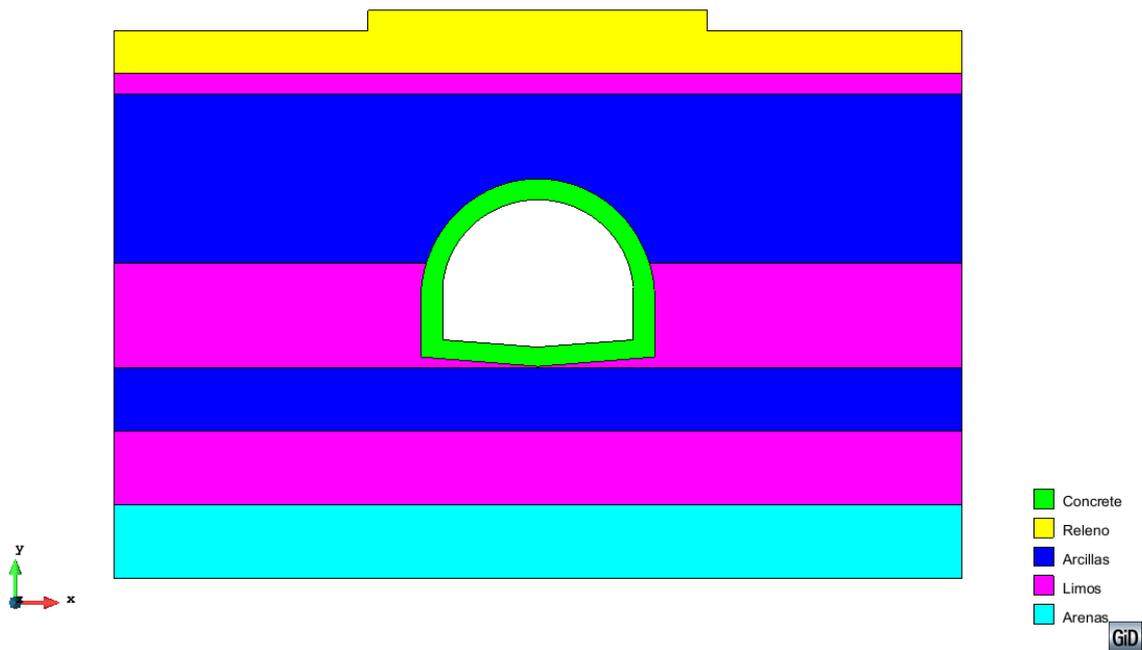


ILUSTRACIÓN 4. ASIGNACIÓN DE LOS MATERIALES

Siendo las características de los materiales las siguientes:

MATERIAL	MÓDULO DE YOUNG	POISSON	Y
RELLENO	$5 \cdot 10^3$	0.2	18 kN/m^3
ARCILLAS	$5 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$	0.2	20 kN/m^3
LIMOS	$4.5 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$	0.25	20.5 kN/m^3
ARENAS	$4 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$	0.3	20 kN/m^3
HORMIGÓN	$2 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$	0.2	25 kN/m^3

TABLA 1. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES

2.6. MALLADO. TIPO DE ELEMENTO

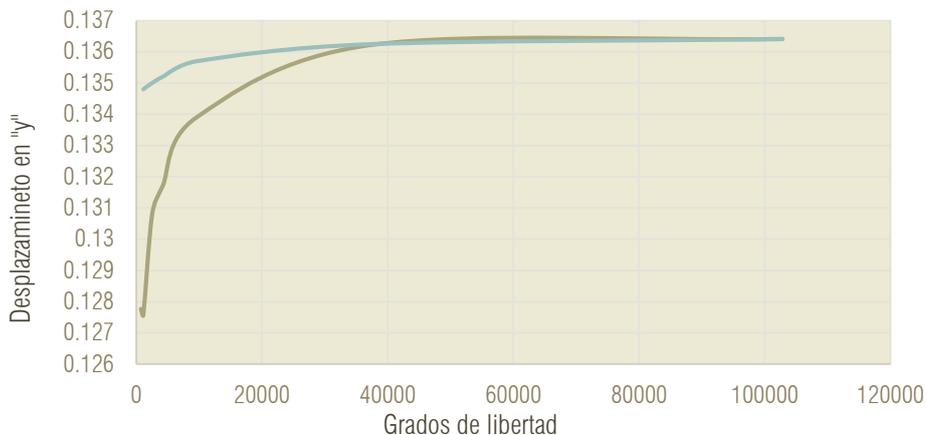
Este es un paso fundamental del preproceso pues de la calidad del mallado depende el grado de fiabilidad de la solución. En este proyecto se ha utilizado un mallado desestructurado en todos los casos dada la geometría singular del túnel. El terreno es un fantástico candidato a ser mallado de manera estructurada, si bien se ha desestimado para poder realizar el mismo tipo de malla en el modelo completo. Dicha decisión está muy lejos de afectar a la calidad de la solución.

Así, se ha mallado y calculado de manera sucesiva disminuyendo progresivamente el tamaño del elemento. Además, se han estudiado diferentes tipos de elementos para poder observar el comportamiento de cada uno en cuanto a la convergencia tanto de tensiones principales como de desplazamientos en dirección "y" (asientos). Se ha estudiado convergencia de los elementos para el caso de cargas con peso propio. Por otro lado, el punto de control elegido ha sido el punto superior del terreno pues se debe evaluar siempre el mismo punto.

Además, se han tomado los valores de tensión principal máxima a tracción y desplazamiento máximo en dirección "y" adicionalmente, que puede servir para reafirmar la idea del comportamiento de cada elemento pero en ningún caso se puede utilizar este tipo de convergencia para arrojar un resultado de algún punto en concreto.

La convergencia se hace entre elementos triangulares de 3 nodos y triangulares de 6 nodos. No se ha contemplado los cuadriláteros porque la geometría del túnel es circular y los cuadriláteros no se aproximan suficientemente bien, aunque el terreno sí que aceptaría cuadriláteros.

Los resultados obtenidos son los siguientes:



De la convergencia se concluye que el elemento que mejor converge, es decir, antes converge, es el triángulo de 6 nodos. Pero el resultado obtenido durante las convergencias es parecido cuando se usan tamaños de malla un poco refinados, como el análisis se realizará con tamaños de malla no superiores a 2, no importa qué tipo de elemento usar. Entonces los triángulos de 3 nodos nos permitirán ahorrar tiempo computacional. Así pues, se hará el análisis de resultados con mallas de **elementos triangulares de 3 nodos**.

3. CÁLCULO

En este apartado se mencionan las principales ecuaciones y rutinas de cálculo para la obtención de los resultados. Es preciso decir que dichas ecuaciones se encuentran implementadas en el programario RamSeries_2D de GiD utilizado para el modelado del presente estudio. De esta forma, la función y responsabilidad del estudiante en el papel de ingeniero es interpretar y discutir los resultados.

3.1. MALLADO. TIPO DE ELEMENTO

Una de las etapas fundamentales del cálculo matricial es la obtención de la ecuación de equilibrio del elemento aislado que relaciona las fuerzas actuantes en los nodos con los desplazamientos de dichos nodos. El procedimiento más habitual se basa en la aplicación del Principio de Trabajos Virtuales (PTV) que se enuncia como sigue: “Una estructura está en equilibrio bajo la acción de un sistema de fuerzas exteriores si a imponer a la misma unos desplazamientos arbitrarios por las fuerzas exteriores sobre los desplazamientos virtuales es igual a l trabajo que realizan las tensiones en la barra sobre las deformaciones producidas por los desplazamientos virtuales”.

En el caso de deformación plana, el PTV tiene la siguiente forma:

$$\iint_A \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} t dA = \iint_A \delta \mathbf{u}^T \mathbf{b} t dA + \oint_l \delta \mathbf{u}^T \mathbf{t} t ds + \sum_i \delta \mathbf{u}_i^T \mathbf{q}_i$$

Donde,

$$\begin{aligned} \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T &= [\delta \varepsilon_x \quad \delta \varepsilon_y \quad \gamma_{xy}]^T & \delta \mathbf{u} &= [\delta u \quad \delta v]^T & \mathbf{b} &= [b_x \quad b_y]^T \\ \mathbf{t} &= [t_x \quad t_y]^T & \delta \mathbf{u}_i &= [\delta u_i \quad \delta v_i]^T & \mathbf{q}_i &= [U_i \quad V_i]^T \end{aligned}$$

Debido a que en el PTV aparecen únicamente primeras derivadas, se exigirá únicamente continuidad de clase C_0 a la aproximación de elementos finitos.

3.2. Ecuación matricial global

La ecuación matricial global se obtiene tras la desratización en elementos del dominio, y sustituyendo en la expresión del PTV.

$$K \mathbf{a} = \mathbf{f}$$

Donde K es la matriz de rigidez global, a el vector de desplazamientos nodales y f el vector de fuerzas.

3.3. Obtención de K y f.

A continuación se muestran la subrutina para el cálculo de la matriz de rigidez $K^{(e)}$ y del cálculo de $f^{(e)}$ para fuerzas másicas.

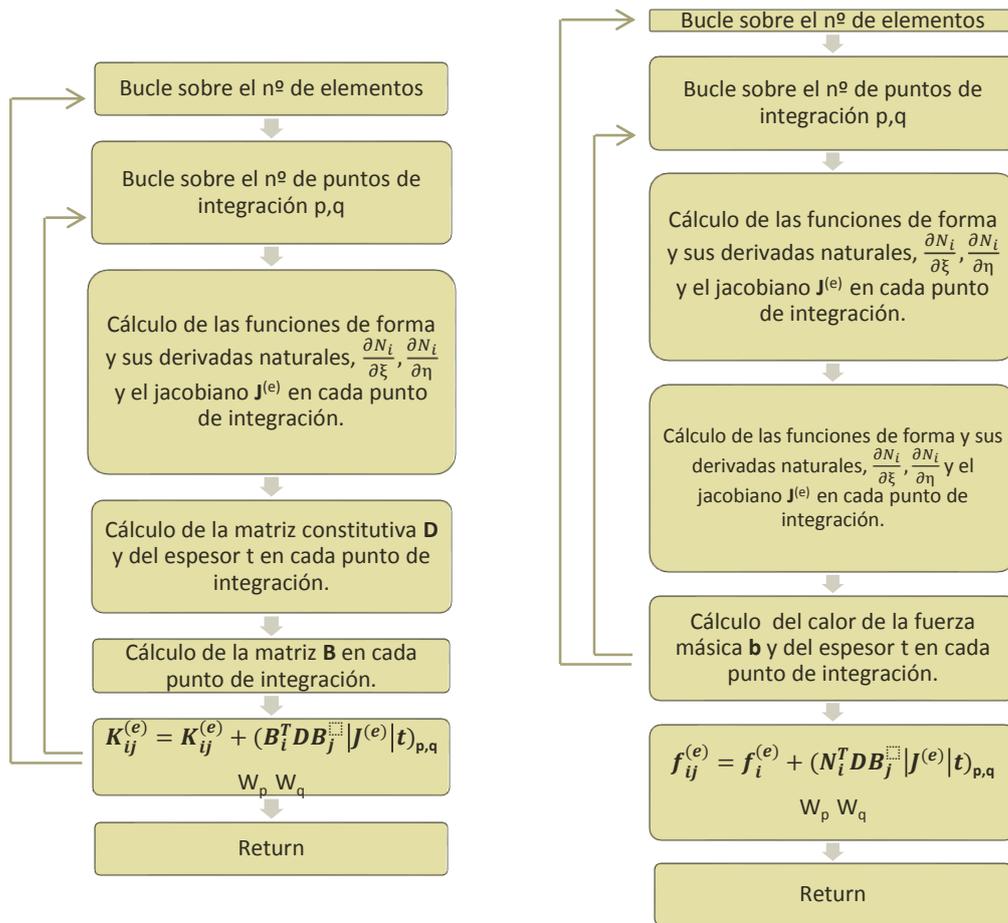


ILUSTRACIÓN 5. SUBROUTINA PARA EL CÁLCULO DE LA MATRIZ DE RIGIDEZ K Y DEL CÁLCULO DE F

Donde **B** es la matriz de deformación del elemento y **D** es la matriz de deformaciones del elemento.

4. POSTPROCESO

El enunciado solicita el dimensionamiento del refuerzo del túnel para reducir los asentamientos en la superficie del terreno a 1 cm como máximo. Viendo que los asentamientos existentes en el terreno inicialmente (sin túnel) son de aproximadamente 15 cm, resulta imposible realizar un dimensionamiento razonable del refuerzo del mismo que obtenga el asiento deseado de 1 cm. En lugar de esto se ha optado por el criterio de que el asiento inicial sufrido en la superficie del terreno no variara por más de 1 cm cuando se construyera el túnel.

4.1. RESULTADOS CASO SIN TÚNEL

Se empezará en analizar el caso sin que el túnel se haya construido para ver el asiento que se produce debido al peso propio del terreno, obteniendo un valor que será el valor a comparar.

A continuación se muestra la geometría y los materiales para este caso:

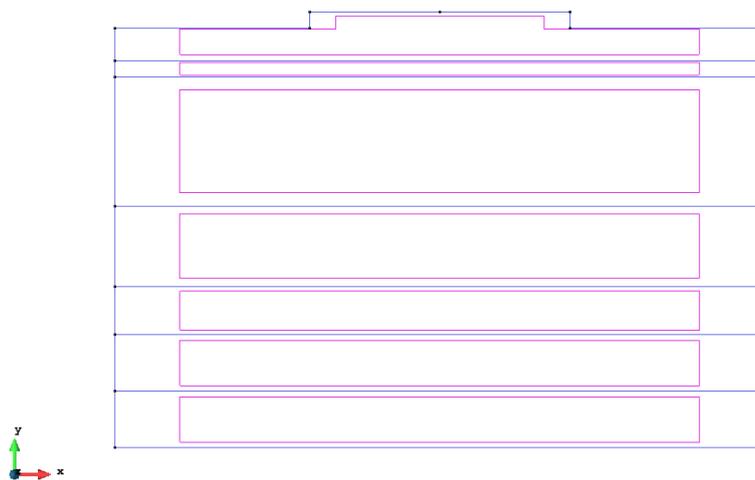


ILUSTRACIÓN 6. GEOMETRÍA DEL CASO SIN TÚNEL



ILUSTRACIÓN 7. MAPA DE LOS MATERIALES

En primer lugar se realiza un análisis de convergencia para determinar cuál debería ser el tamaño de malla más adecuado a la hora de realizar los cálculos y cuál es el tipo de elemento más indicado en función del error cometido, los datos son computados en un Excel para obtener las **gráficas de convergencia** en función de la flecha máxima y los grados de libertad de la estructura.

Convergencia del asiento. Caso sin túnel				
Tamaño elemento	Nº elementos	Nº nodos	Nº GDL	Desplazamiento en "y"
2	620	347	694	0.14236
1.5	971	530	1060	0.14383
1	2302	1220	2440	0.14296
0.75	3979	2081	4162	0.14281
0.5	9364	4817	9634	0.14290
0.25	38284	19411	38822	0.14287

TABLA 2. TABLA DE RESULTADOS PARA LA CONVERGENCIA DEL ASIENTO



GRÁFICA 1. CONVERGENCIA DE LOS ASIENTOS

Aproximadamente a partir de los 5000 grados de libertad el resultado es más que aceptable, ha convergido. Por lo tanto se aceptarán como buenos los resultados obtenidos con el tamaño de malla de 0.75 o menor.

Las ilustraciones mostradas a continuación son capturas realizadas con el GiD para el caso más refinado.

4.1.1. Asiento

Se empezará en analizar el caso sin que el túnel se haya construido para ver el asiento que se produce debido al peso propio del terreno, obteniendo un valor que será el valor a comparar.

Se muestra a continuación el mapa de colores de los desplazamientos en dirección al eje "y" junto con la deformada multiplicado por un valor de 20 veces el valor de desplazamiento.

Como se observa el asiento producido por el terreno debido a su peso propio es de **14,29 cm**.

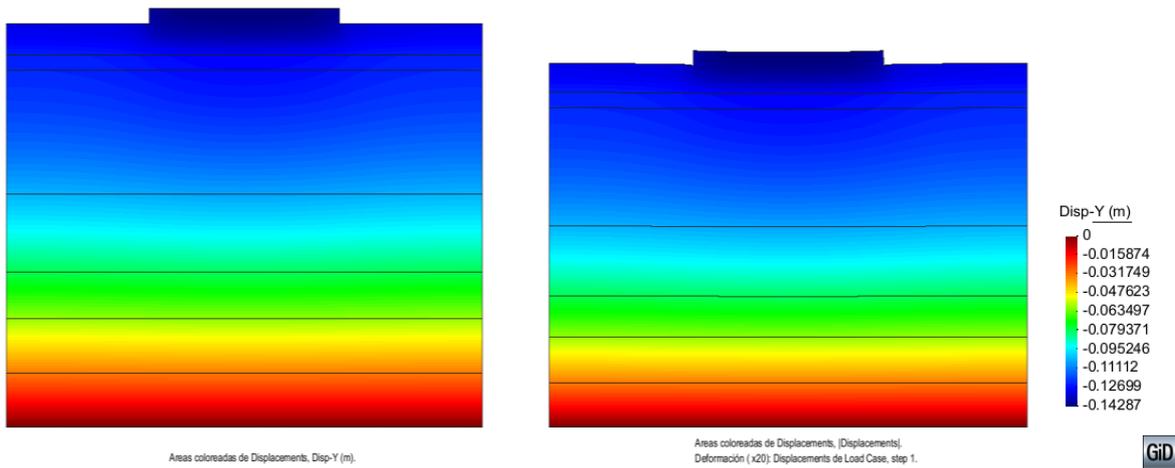


ILUSTRACIÓN 8. DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE "Y" Y DEFORMADA DEL TERRENO

4.1.2. Tensiones

Se muestran las tensiones del terreno, las máximas de tracción y las máximas de compresión.

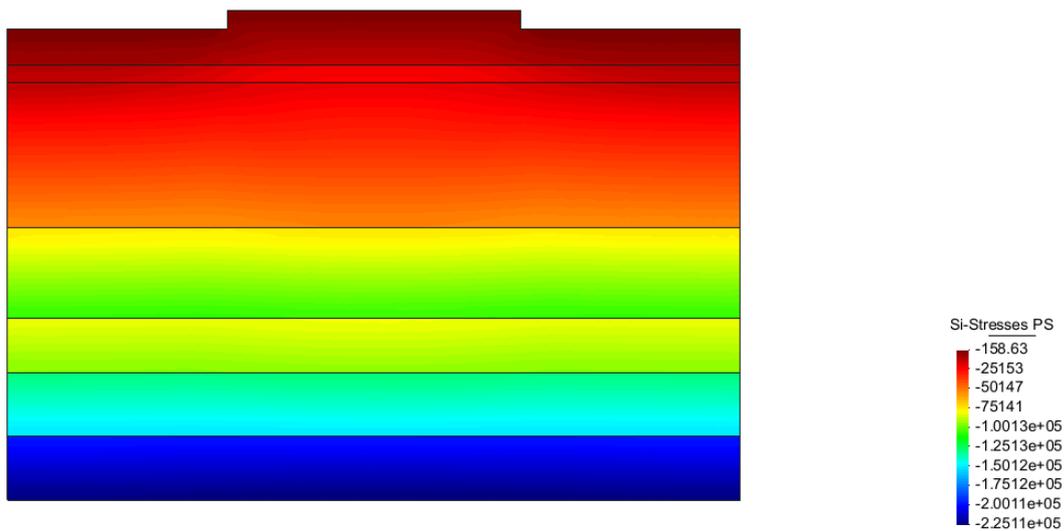


ILUSTRACIÓN 9. TENSIONES MÁXIMAS DE TRACCIÓN

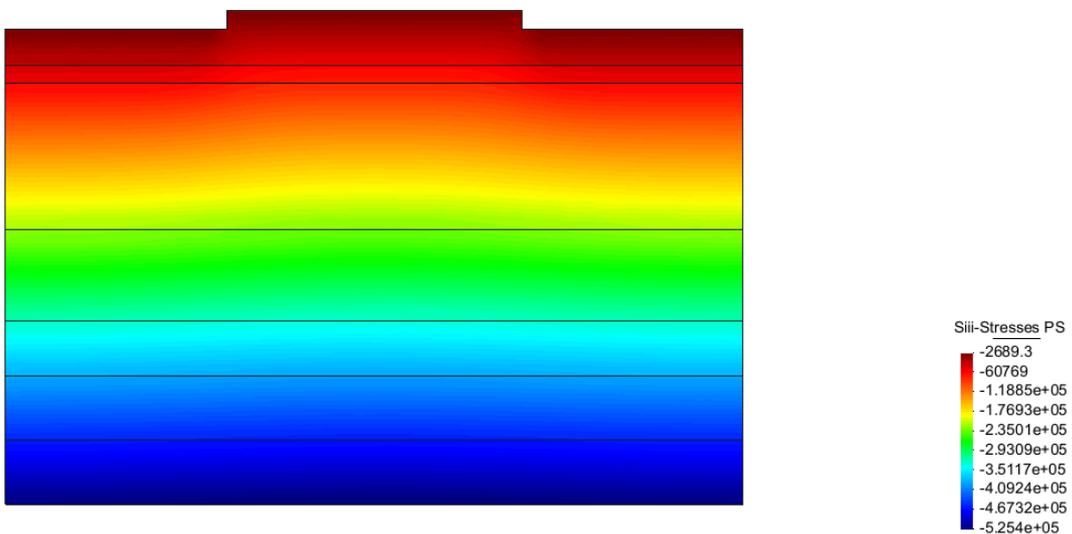


ILUSTRACIÓN 10. TENSIONES MÁXIMAS DE COMPRESIÓN

Efectivamente se comprueba que no hay tracciones ya que el terreno es comprimido por su propio peso. Como el enunciado solo nos limita las tensiones del hormigón no nos fijaremos en el comportamiento tensional del terreno.

4.2. RESULTADOS CASO CON TÚNEL. ESPESOR DE 0,08 m

Se considera el valor de espesor de 0,08m para el refuerzo del túnel como el primer tanteo por ser el mínimo exigido según el enunciado.

A continuación se muestra la geometría y los materiales para este caso:

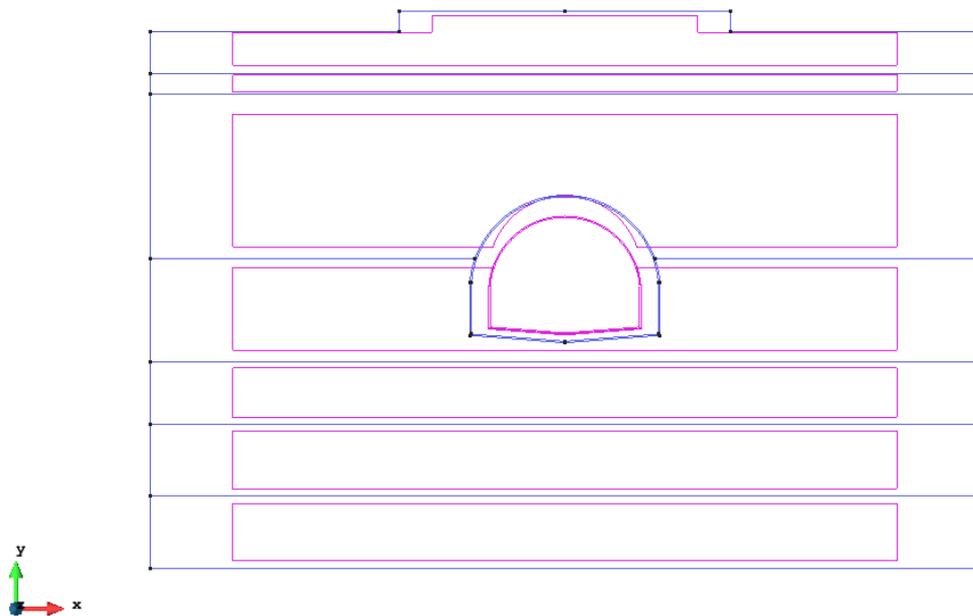


ILUSTRACIÓN 11. GEOMETRÍA DEL CASO CON TÚNEL, $E = 0,08m$

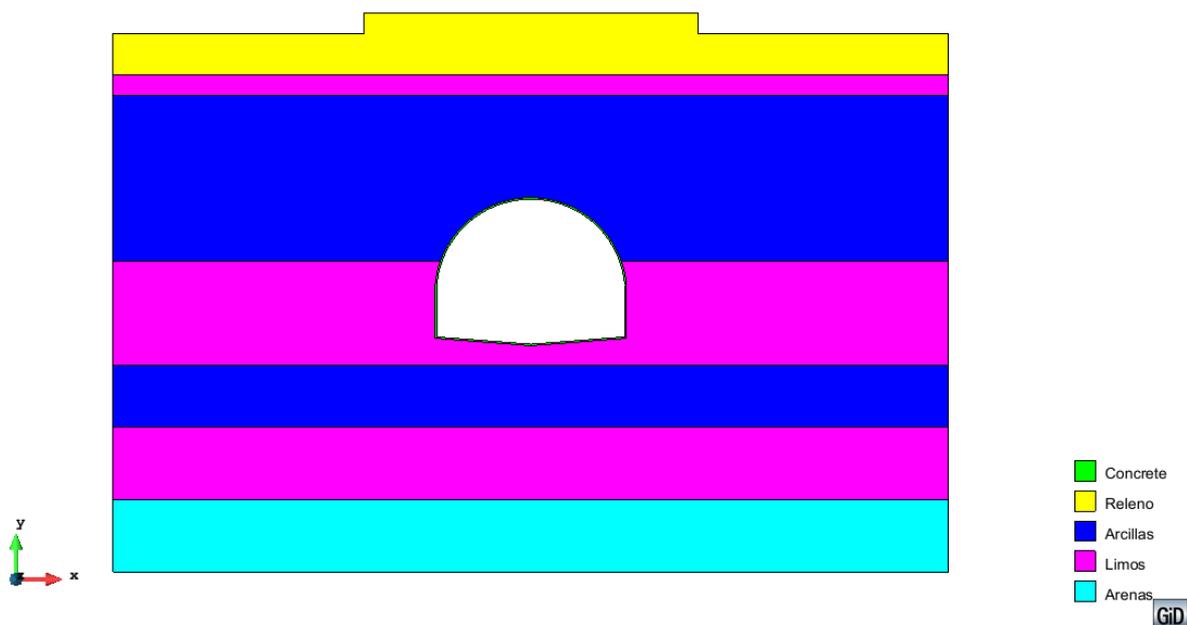


ILUSTRACIÓN 12. MAPA DE MATERIALES

En primer lugar se realiza un análisis de convergencia para determinar cuál debería ser el tamaño de malla más adecuado a la hora de realizar los cálculos y cuál es el tipo de elemento más indicado en función del error cometido, los datos son computados en un Excel para obtener las **gráficas de convergencia** en función de la flecha máxima y los grados de libertad de la estructura.

Convergencia del asiento. Caso con túnel. $e = 0,08$ m				
Tamaño elemento	Nº elementos	Nº nodos	Nº GDL	Desplazamiento en "y"
2	672	383	766	0.12777
1.5	1010	563	1126	0.12757
1	2340	1260	2520	0.13078
0.75	3964	2100	4200	0.13170
0.5	9246	4798	9596	0.13390
0.25	36782	18742	37484	0.13622

TABLA 3. TABLA DE RESULTADOS PARA LA CONVERGENCIA DEL ASIENTO



GRÁFICA 2. CONVERGENCIA DE LOS ASIENTOS

Aproximadamente a partir de los 40000 grados de libertad el resultado es más que aceptable, ha convergido. Por lo tanto se aceptarán como buenos los resultados obtenidos con el tamaño de malla de 0.25 o menor.

Las ilustraciones mostradas a continuación son capturas realizadas con el GiD para el caso más refinado.

4.2.1. Asiento

Se muestra a continuación el mapa de colores de los desplazamientos en dirección al eje "y" junto con la deformada multiplicado por un valor de 35 veces el valor de desplazamiento.

Como se observa el asiento producido por el terreno debido a su peso propio es de **13,62 cm**. En comparación con el caso anterior se reduce pero ahora aparecen unos desplazamientos en el refuerzo de hormigón que desde el punto de vista estructural son preocupantes.

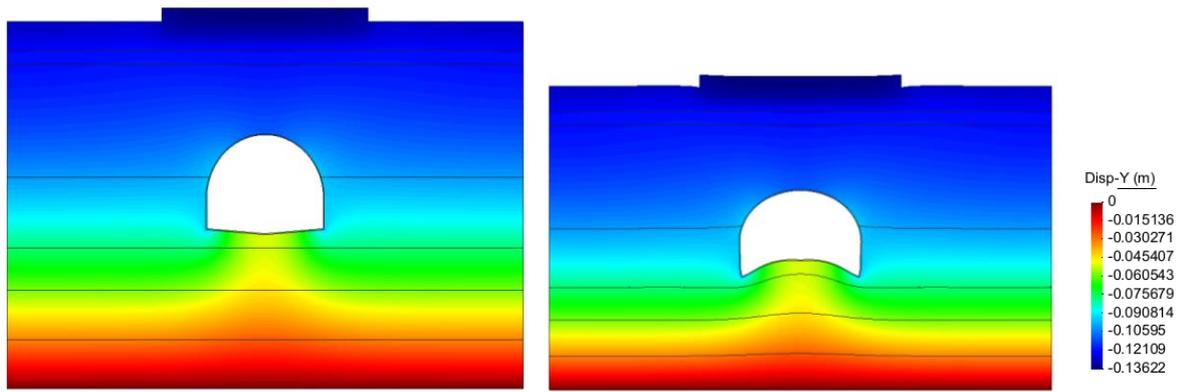


ILUSTRACIÓN 13. DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE "Y" Y DEFORMADA DEL TERRENO

4.2.2. Tensiones

Se muestran las tensiones del terreno, las máximas de tracción y las máximas de compresión.

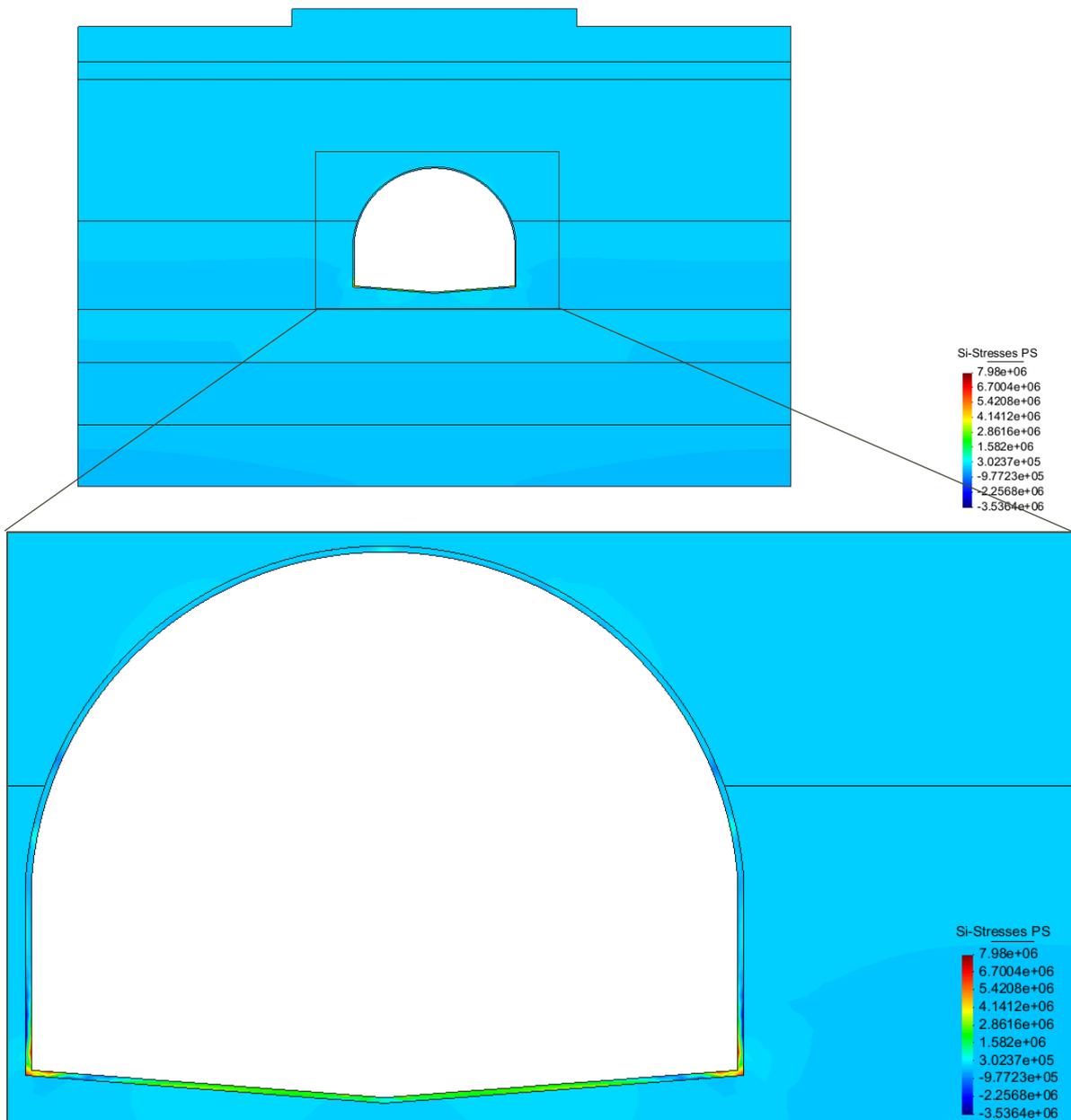


ILUSTRACIÓN 14. TENSIONES MÁXIMAS DE TRACCIÓN. ZONA AMPLIADA

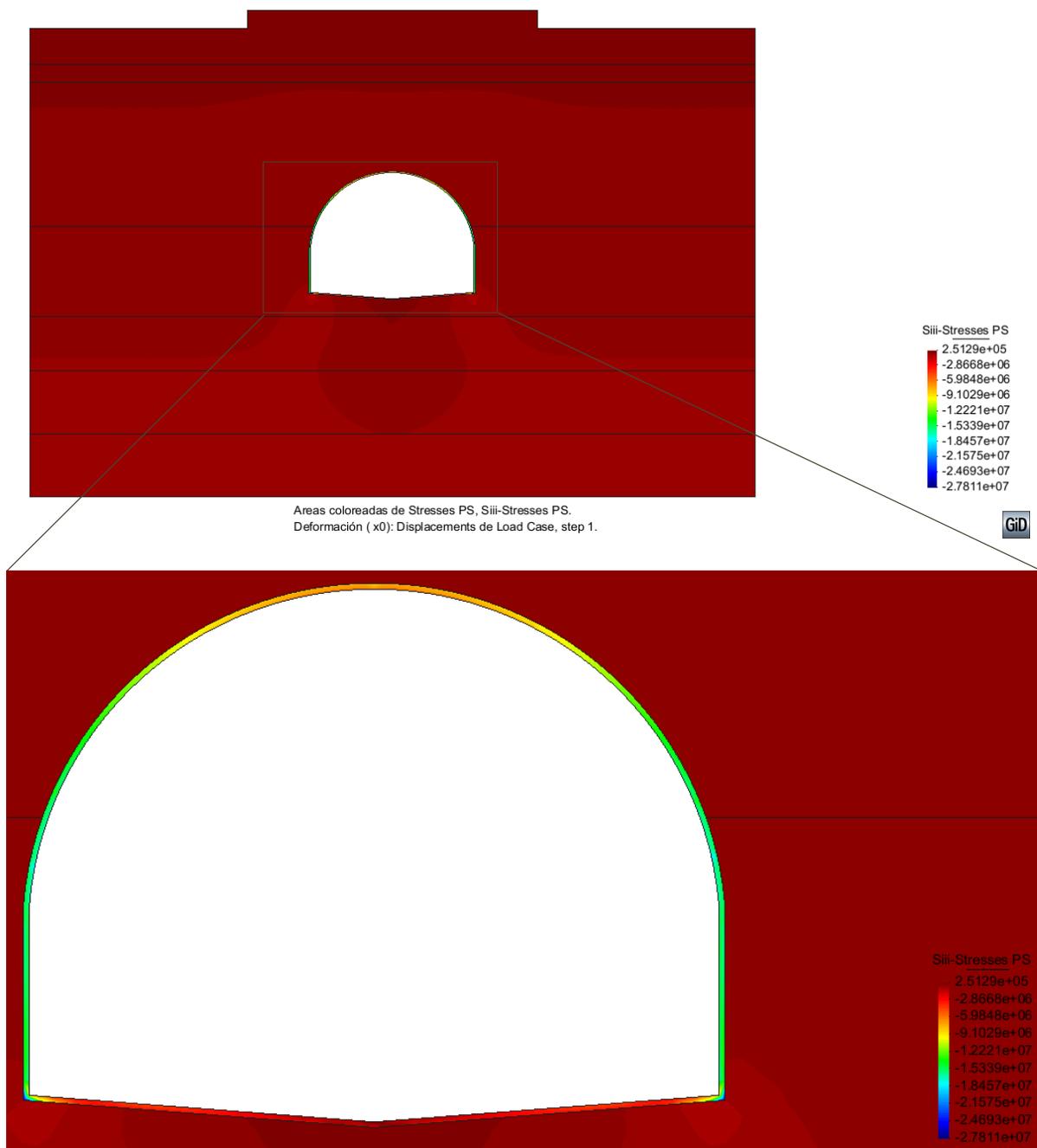


ILUSTRACIÓN 15. TENSIONES MÁXIMAS DE COMPRESIÓN. ZONA AMPLIADA

Según el enunciado tenemos una limitación en que las tensiones máximas a compresión/tracción no deben superar los 30/25 Mpa.

A priori las tensiones en el refuerzo no superan las tensiones máximas admisibles pero si nos fijamos bien encontramos puntos conflictivos donde se producen concentración de tensiones que hay que analizar para ver si esos resultados son reales o ficticios. Para ello se realiza una gráfica de las tensiones del refuerzo a lo largo de la longitud inferior del túnel. Se obtienen diferentes curvas que corresponden a las tensiones según los diferentes mallados, los cuales son cada vez más refinados (se refina con un tamaño mucho menor en las zonas críticas).

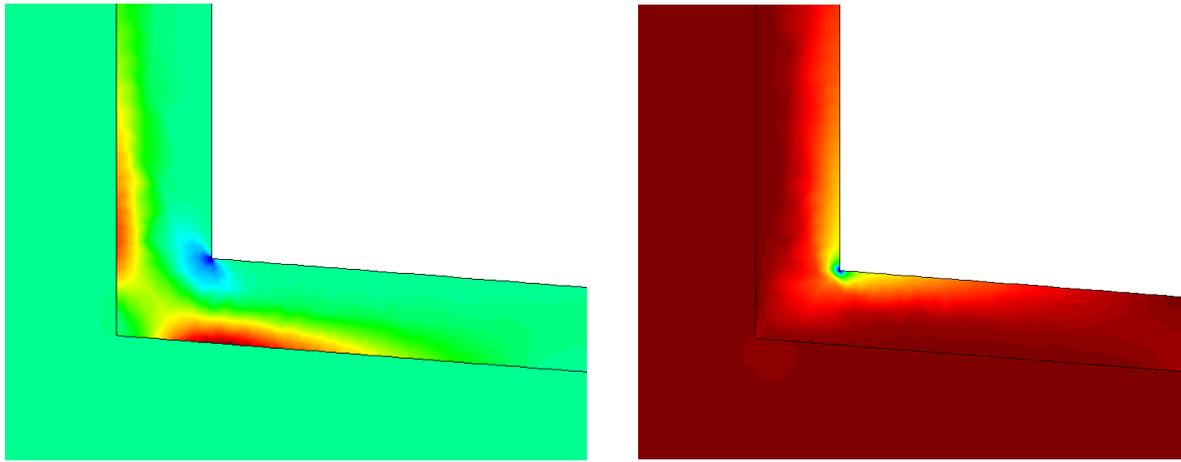
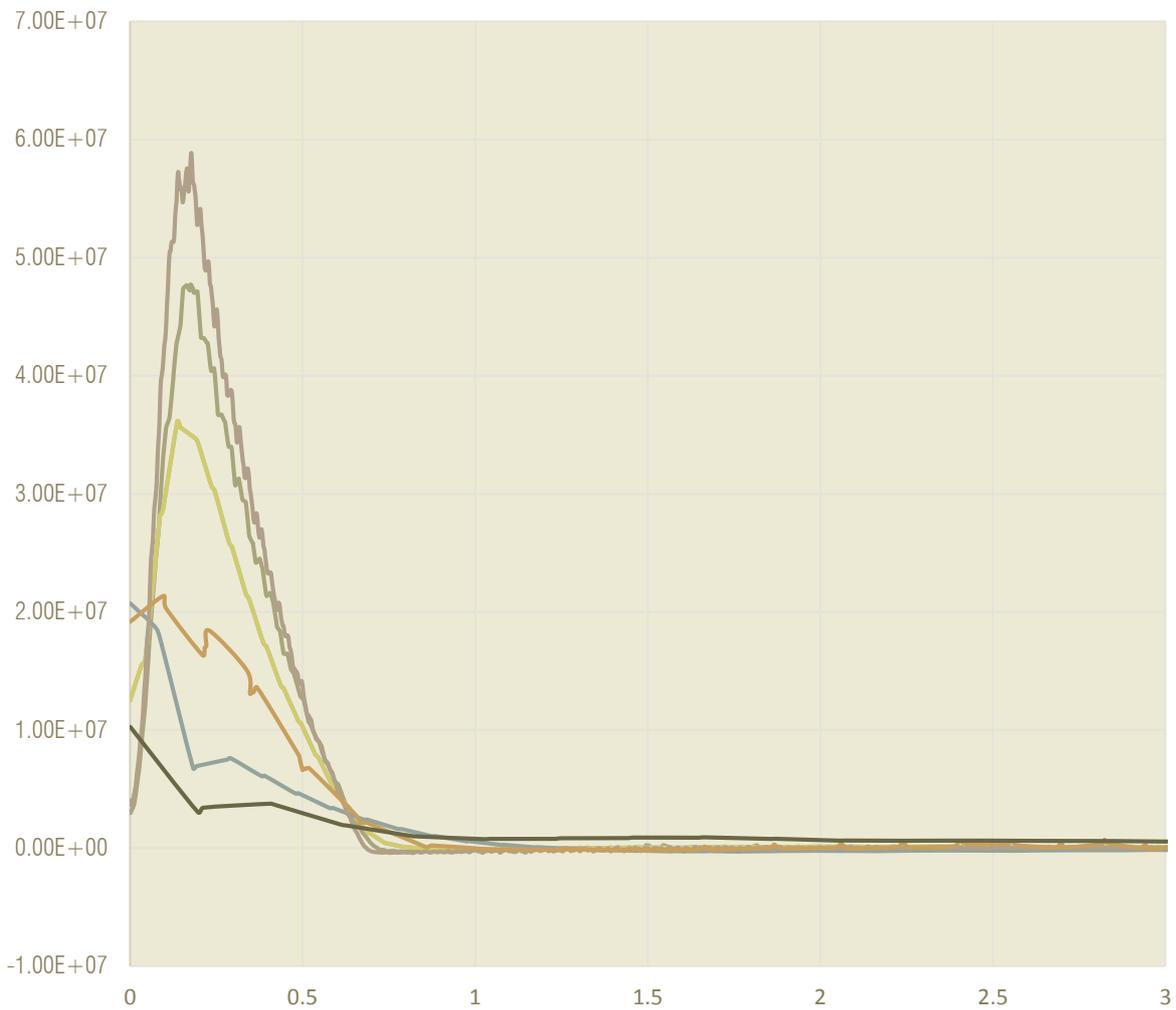


ILUSTRACIÓN 16. AMPLIACIÓN DE LA ZONA DE CONCENTRACIÓN DE TENSIONES (TRACCIÓN Y COMPRESIÓN)



GRÁFICA 3. CONVERGENCIA DE LOS ASIENTOS

Vemos que alrededor de la concentración de tensiones el valor converge, lo contrario pasa en el punto crítico, donde las tensiones crecen sin estabilizarse. Por lo tanto, se deduce que tenemos una concentración de tensiones ficticia que implica que el valor máximo proporciona por el programa no es real. Se obviarán los valores que no convergen, es decir, aquellos valores a un foco de medio metro de la concentración de tensiones.

4.3. RESULTADOS CASO CON TÚNEL. ESPESOR DE 0,15 m

Al igual que al apartado anterior se analizarán los resultados del asentamiento y tensiones pero esta vez aumentando el espesor del refuerzo a 0,15 m.

A continuación se muestra la geometría y los materiales para este caso:

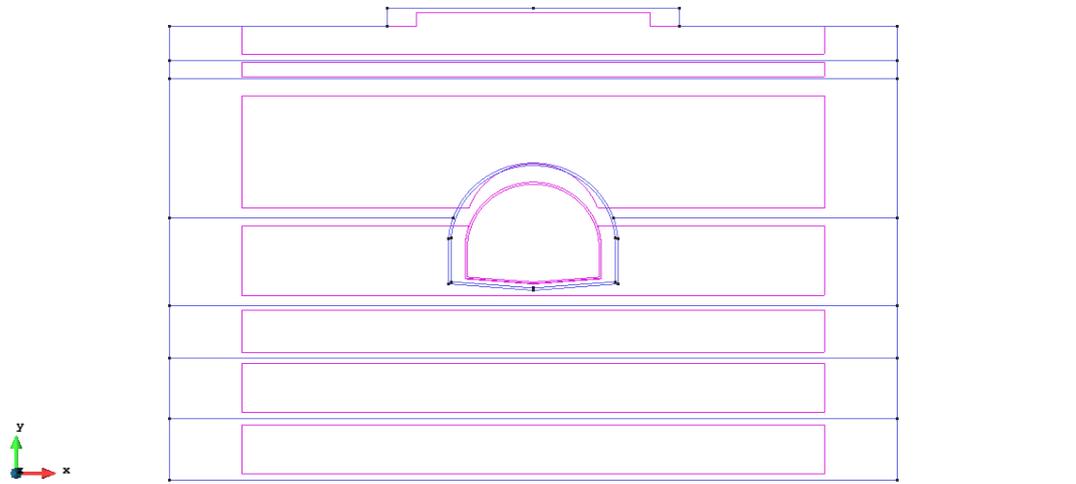


ILUSTRACIÓN 17. GEOMETRÍA DEL CASO CON TÚNEL, $e = 0,15\text{m}$

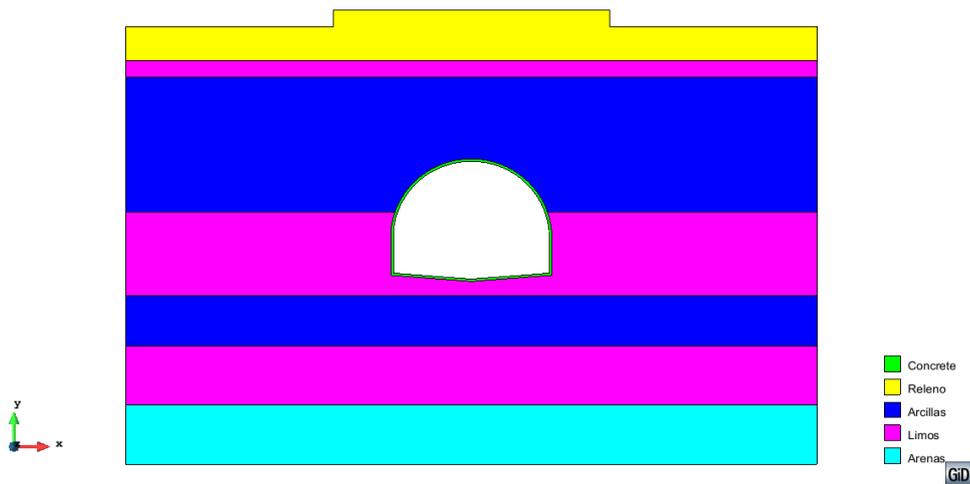
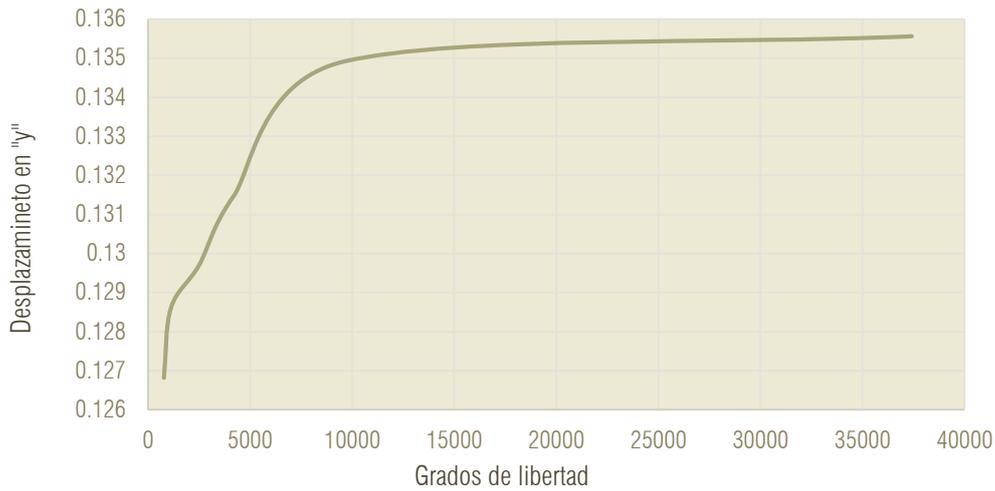


ILUSTRACIÓN 18. MAPA DE MATERIALES

En primer lugar se realiza un análisis de convergencia para determinar cuál debería ser el tamaño de malla más adecuado a la hora de realizar los cálculos y cuál es el tipo de elemento más indicado en función del error cometido, los datos son computados en un Excel para obtener las **gráficas de convergencia** en función de la flecha máxima y los grados de libertad de la estructura.

Convergencia del asiento. Caso con túnel. $e = 0,15\text{ m}$				
Tamaño elemento	Nº elementos	Nº nodos	Nº GDL	Desplazamiento en "y"
2	684	389	778	0.12708
1.5	1009	562	1124	0.12861
1	2328	1254	2508	0.12971
0.75	3959	2097	4194	0.13147
0.5	9221	4786	9572	0.13491
0.25	36718	18710	37420	0.13556

TABLA 4. TABLA DE RESULTADOS PARA LA CONVERGENCIA DEL ASIENTO



GRÁFICA 4. CONVERGENCIA DE LOS ASIENTOS

Aproximadamente a partir de los 40000 grados de libertad el resultado es más que aceptable, ha convergido. Por lo tanto se aceptarán como buenos los resultados obtenidos con el tamaño de malla de 0.25 o menor.

Las ilustraciones mostradas a continuación son capturas realizadas con el GiD para el caso más refinado.

4.3.1. Asiento

Se muestra a continuación el mapa de colores de los desplazamientos en dirección al eje "y" junto con la deformada multiplicado por un valor de 35 veces el valor de desplazamiento.

Como se observa el asiento producido por el terreno debido a su peso propio es de **13,55 cm**. En comparación con el caso anterior se reduce pero ahora aparecen unos desplazamientos en el refuerzo de hormigón que des del punto de vista estructural son preocupantes.

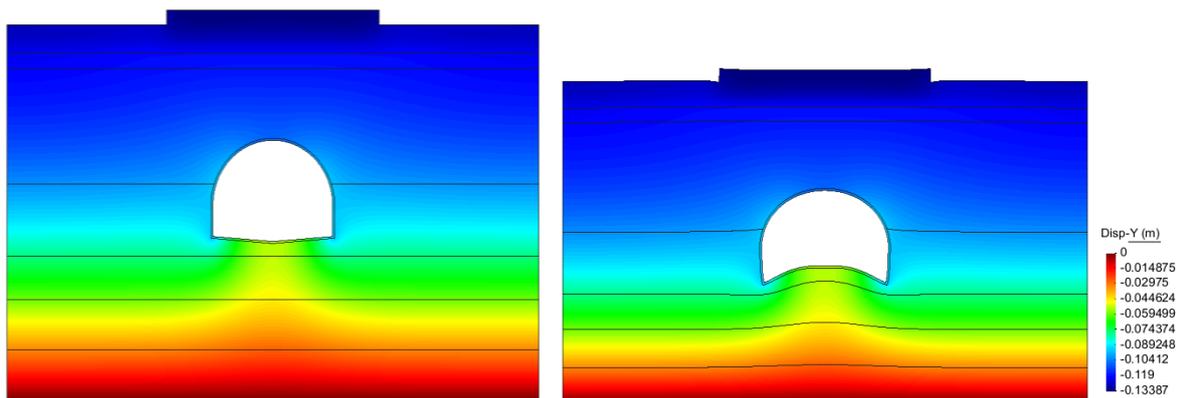


ILUSTRACIÓN 19. DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE "Y" Y DEFORMADA DEL TERRENO

4.3.2. Tensiones

Se muestran las tensiones del terreno, las máximas de tracción y las máximas de compresión.

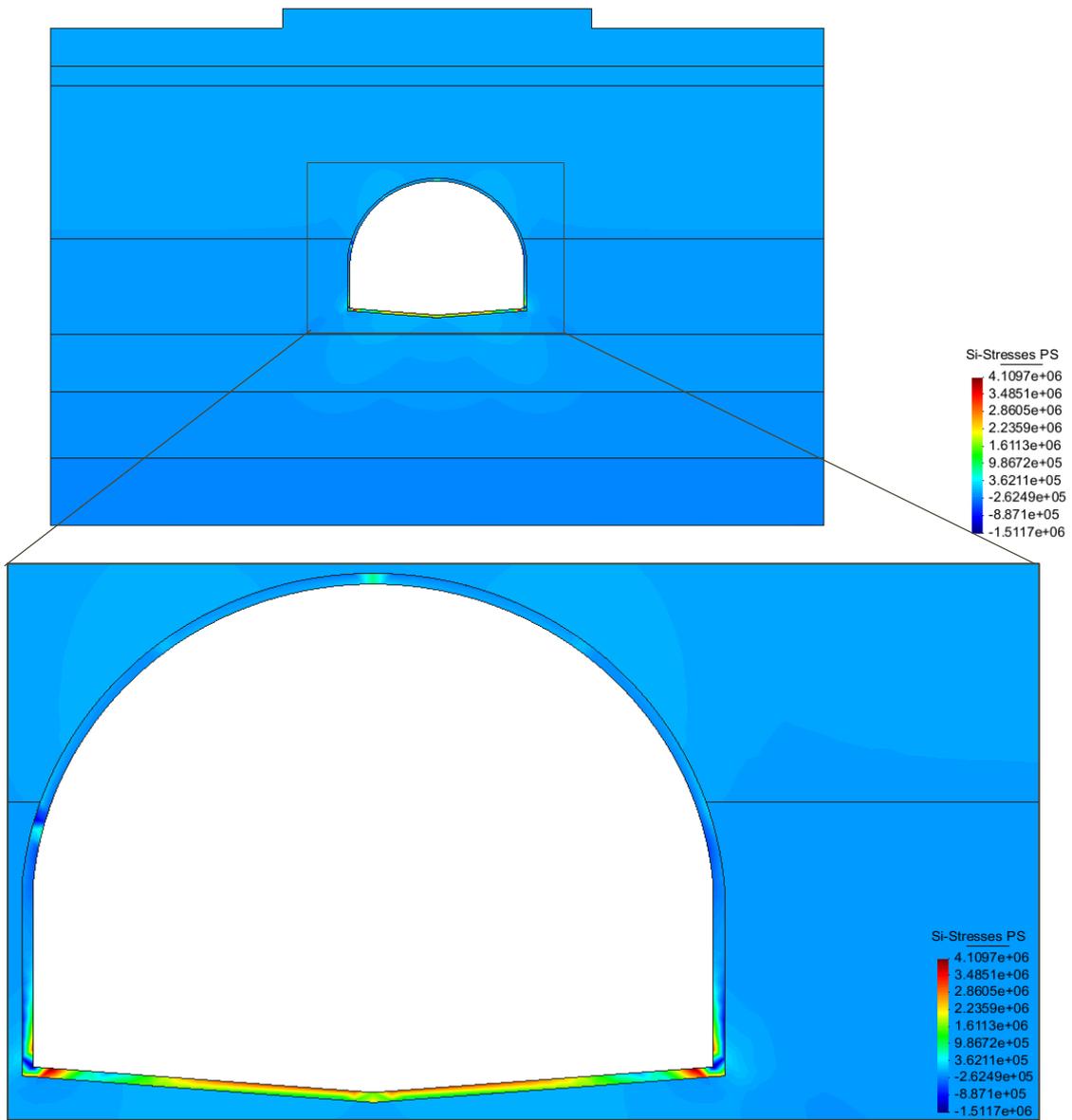
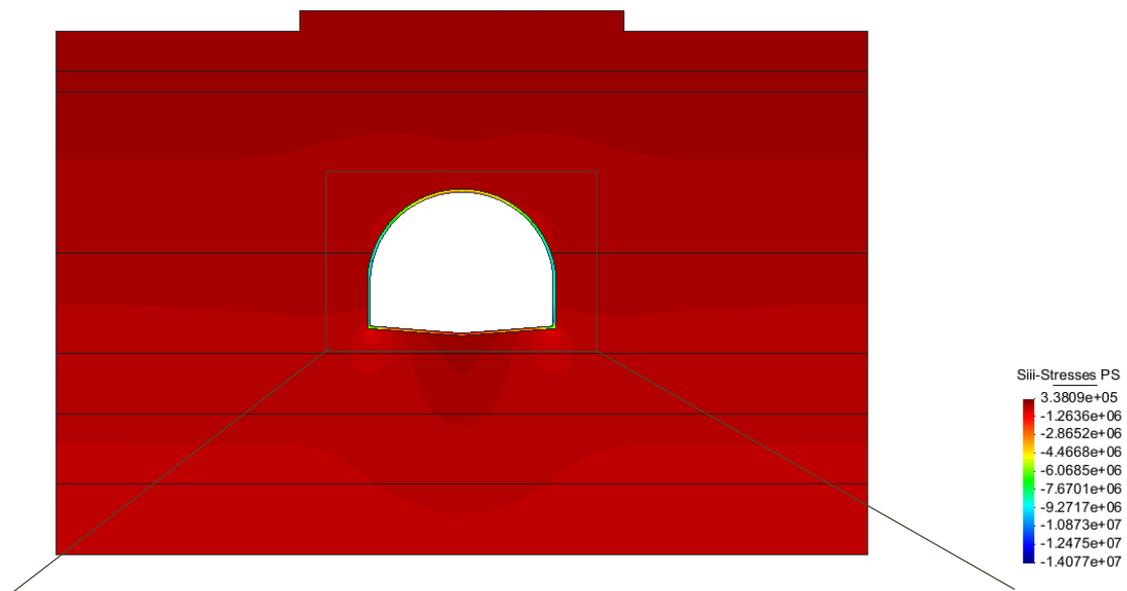


ILUSTRACIÓN 20. TENSIONES MÁXIMAS DE TRACCIÓN. ZONA AMPLIADA



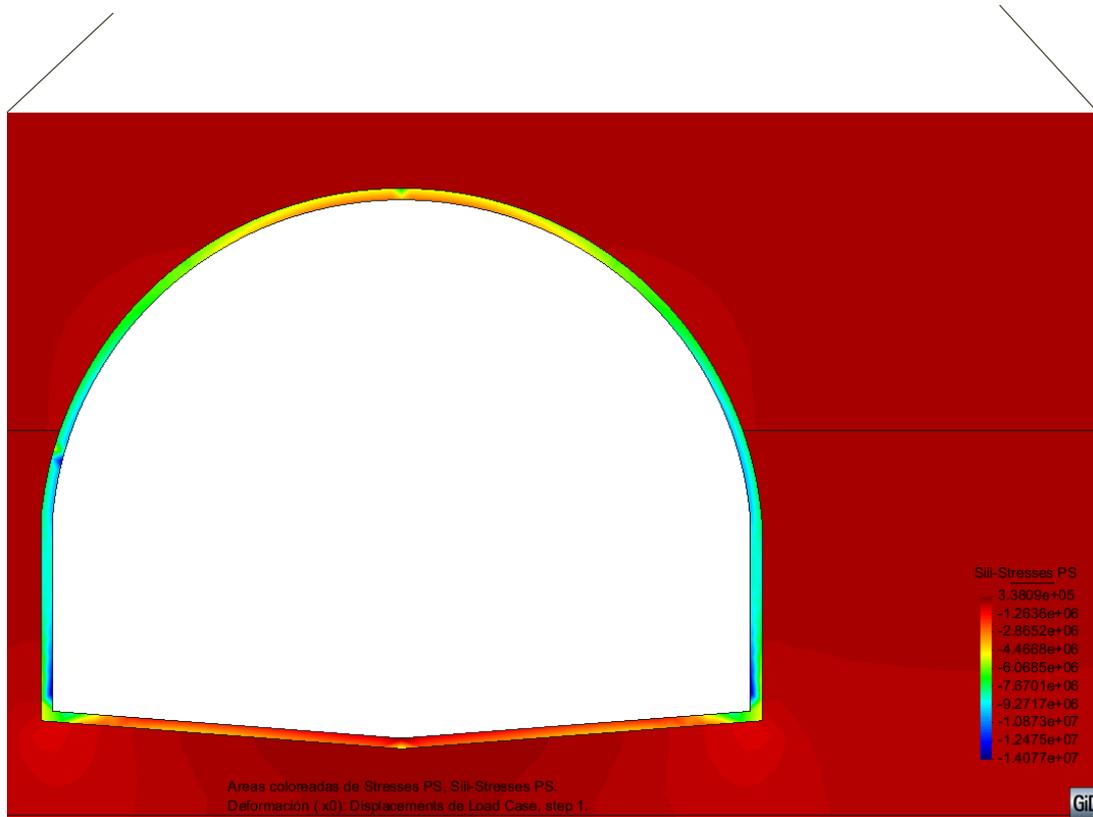


ILUSTRACIÓN 21. TENSIONES MÁXIMAS DE COMPRESIÓN. ZONA AMPLIADA

Al igual que el apartado anterior alrededor de la concentración de tensiones el valor converge, lo contrario pasa en el punto crítico, dónde las tensiones crecen sin estabilizarse. Por lo tanto, se obvian los valores ficticios debido a la concentración de tensiones.

4.4. RESULTADOS CASO CON TÚNEL. ESPESOR DE 0,30 m

Dado que no se superan las tensiones ni el asiento máximo permitido seguimos aumentando el espesor, que para este caso será de 0,30m.

A continuación se muestra la geometría y los materiales para este caso:

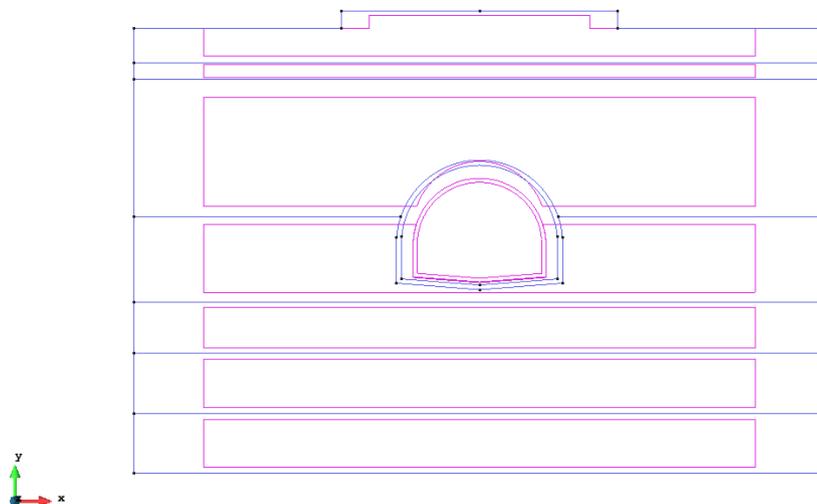


ILUSTRACIÓN 22. GEOMETRÍA DEL CASO CON TÚNEL, $e = 0,30m$

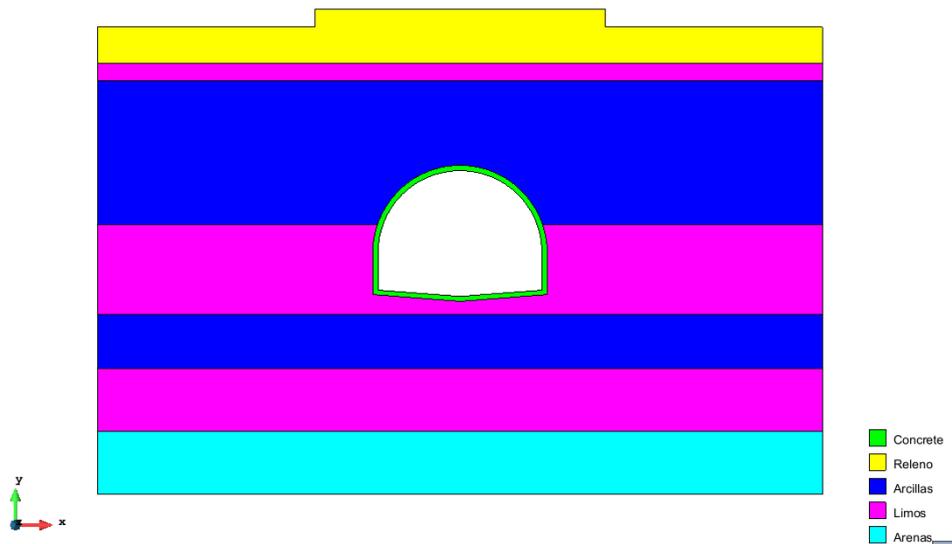
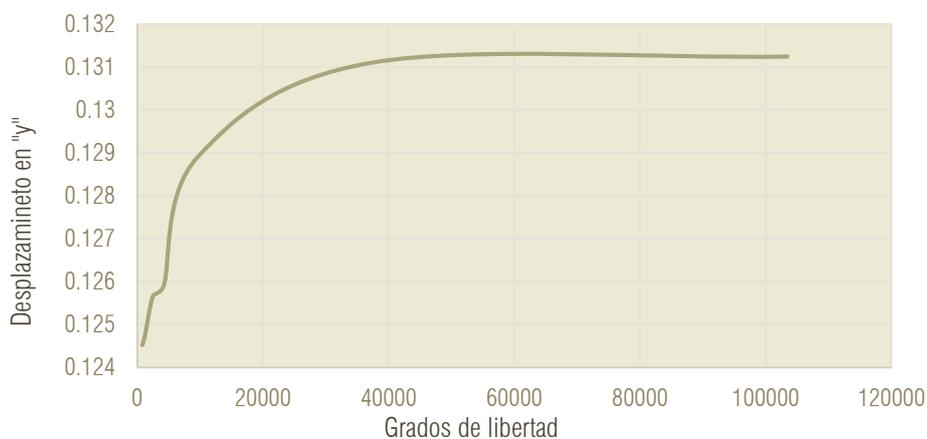


ILUSTRACIÓN 23. MAPA DE MATERIALES

En primer lugar se realiza un análisis de convergencia para determinar cuál debería ser el tamaño de malla más adecuado a la hora de realizar los cálculos y cuál es el tipo de elemento más indicado en función del error cometido, los datos son computados en un Excel para obtener las **gráficas de convergencia** en función de la flecha máxima y los grados de libertad de la estructura.

Convergencia del asiento. Caso con túnel. $e = 0,30$ m				
Tamaño elemento	Nº elementos	Nº nodos	Nº GDL	Desplazamiento en "y"
2	697	397	794	0.12452
1.5	1041	579	1158	0.12470
1	2306	1243	2486	0.12566
0.75	3944	2090	4180	0.12589
0.5	9246	4798	9596	0.12890
0.25	36672	18687	37374	0.13112

TABLA 5. TABLA DE RESULTADOS PARA LA CONVERGENCIA DEL ASIENTO



GRÁFICA 5. CONVERGENCIA DE LOS ASIENTOS

Aproximadamente a partir de los 40000 grados de libertad el resultado es más que aceptable, ha convergido. Por lo tanto se aceptarán como buenos los resultados obtenidos con el tamaño de malla de 0.25 o menor.

Las ilustraciones mostradas a continuación son capturas realizadas con el GiD para el caso más refinado.

4.4.1. Asiento

Se muestra a continuación el mapa de colores de los desplazamientos en dirección al eje "y" junto con la deformada multiplicado por un valor de 36 veces el valor de desplazamiento.

Como se observa el asiento producido por el terreno debido a su peso propio es de **13,11 cm**. En comparación con el caso anterior se reduce pero ya no cumple la restricción de desplazamientos impuesta.

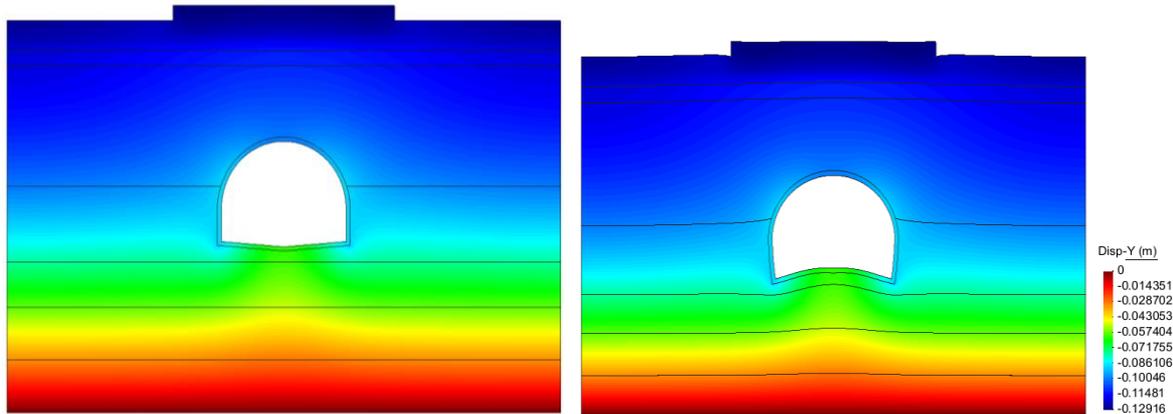
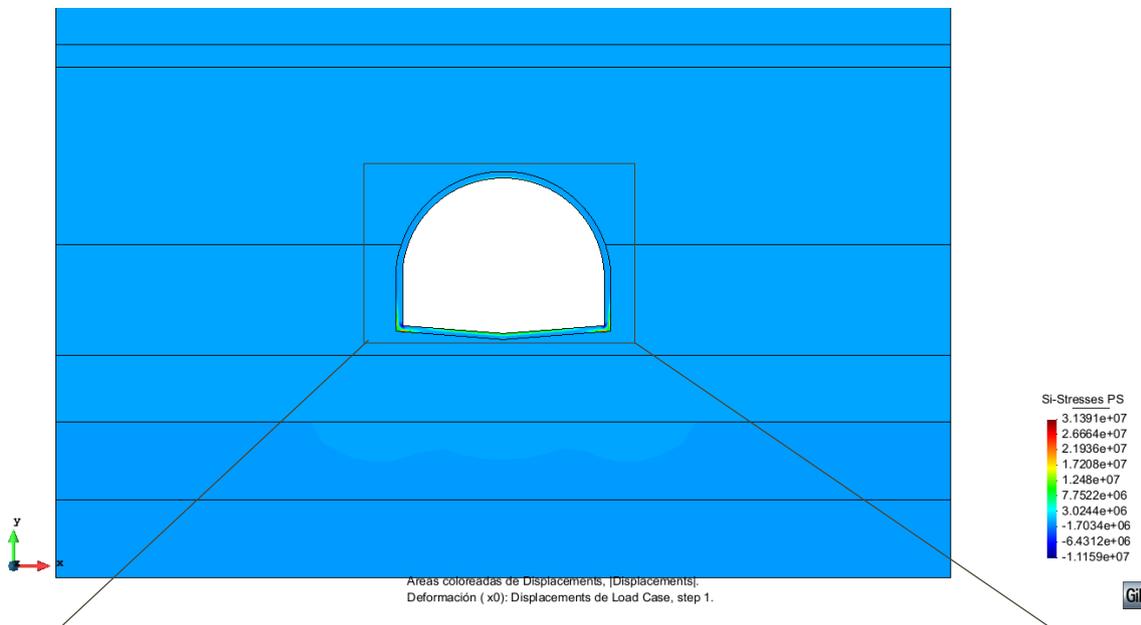


ILUSTRACIÓN 24. DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE "Y" Y DEFORMADA DEL TERRENO

4.4.2. Tensiones

Se muestran las tensiones del terreno, las máximas de tracción y las máximas de compresión.



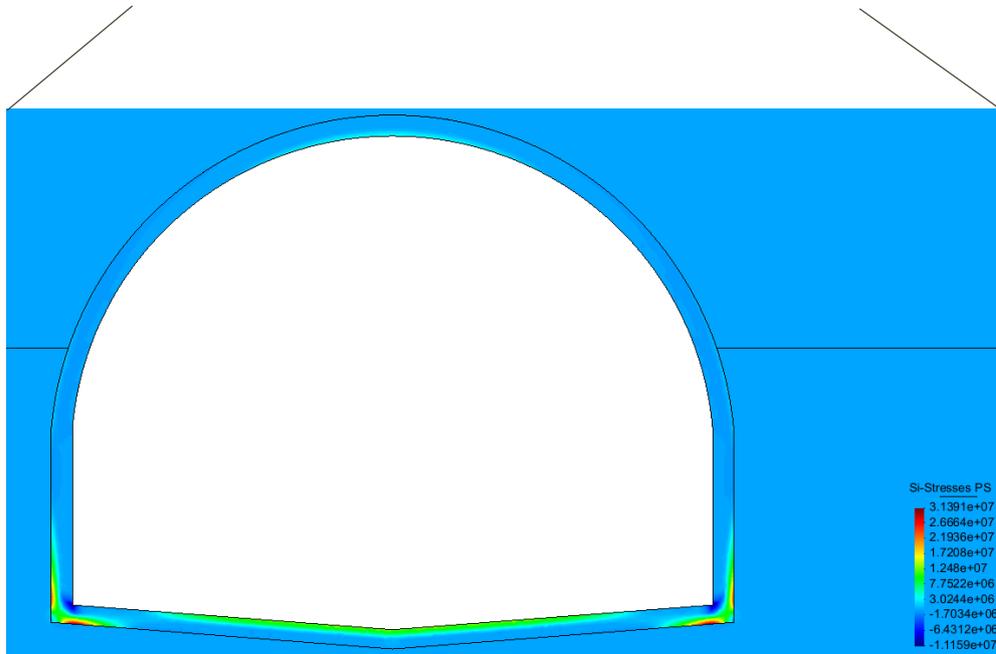


ILUSTRACIÓN 25. TENSIONES MÁXIMAS DE TRACCIÓN. ZONA AMPLIADA

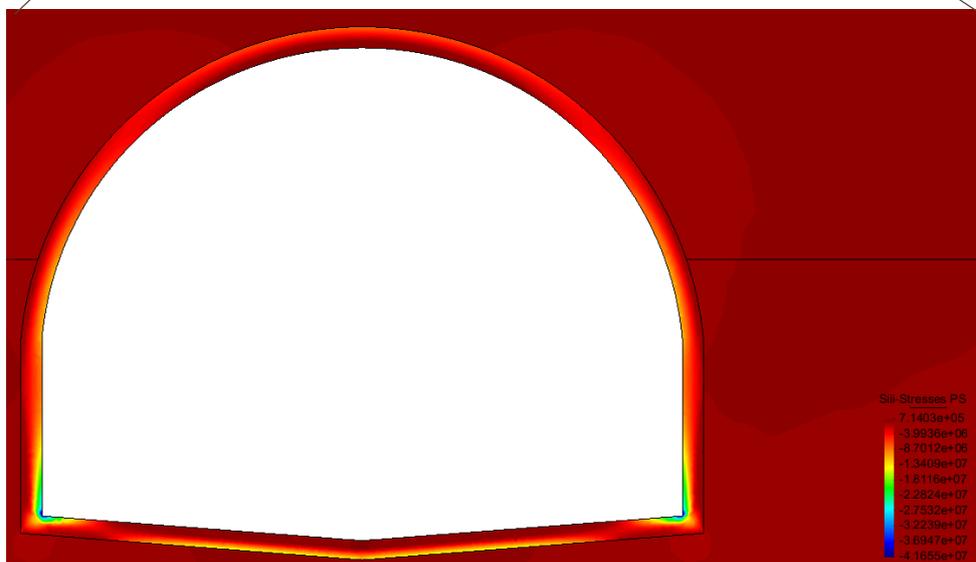
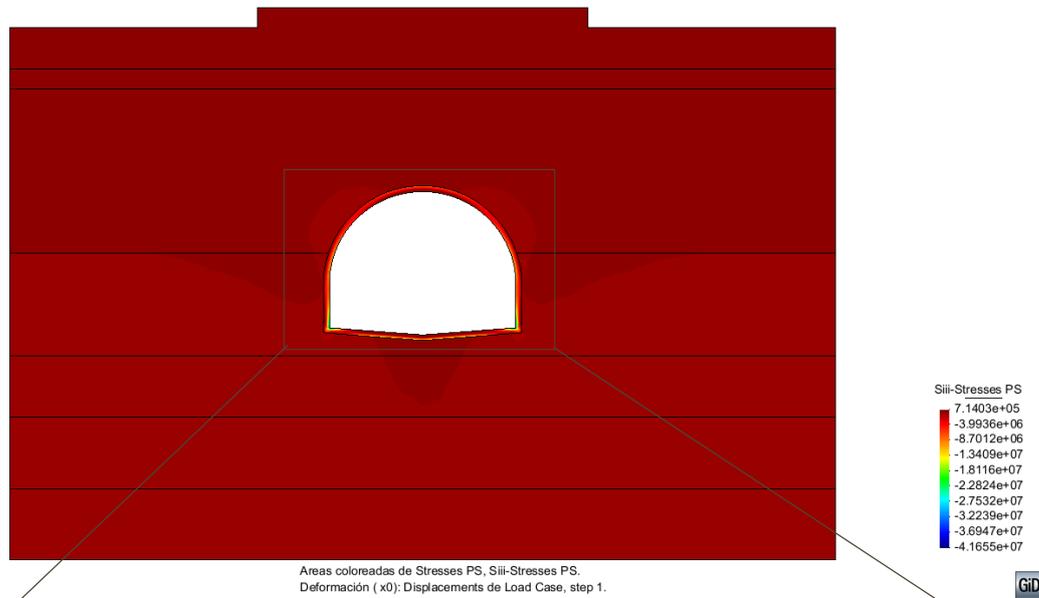


ILUSTRACIÓN 26. TENSIONES MÁXIMAS DE COMPRESIÓN. ZONA AMPLIADA

Al igual que el apartado anterior alrededor de la concentración de tensiones el valor converge, lo contrario pasa en el punto crítico, dónde las tensiones crecen sin estabilizarse. Por lo tanto, se obvian los valores ficticios debido a la concentración de tensiones.

4.5. RESULTADOS CASO CON TÚNEL. ESPESOR DE 0,60 m

Al igual que al apartado anterior se analizarán los resultados del asentamiento y tensiones pero esta vez aumentando el espesor del refuerzo a 0,60 m.

A continuación se muestra la geometría y los materiales para este caso:

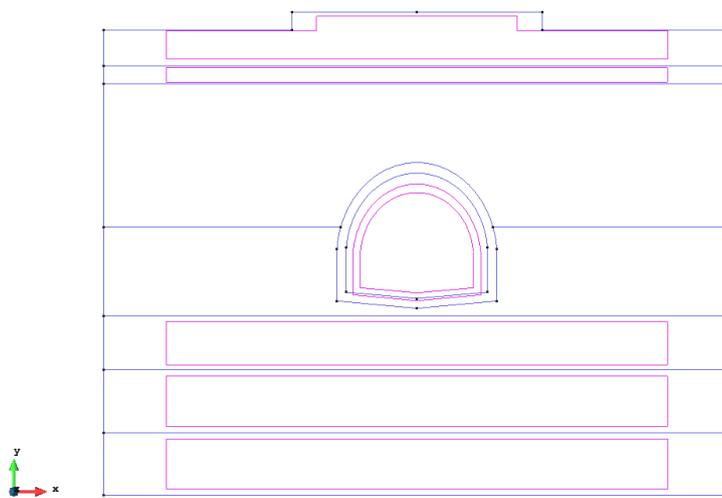


ILUSTRACIÓN 27. GEOMETRÍA DEL CASO CON TÚNEL, E = 0,60M

GID

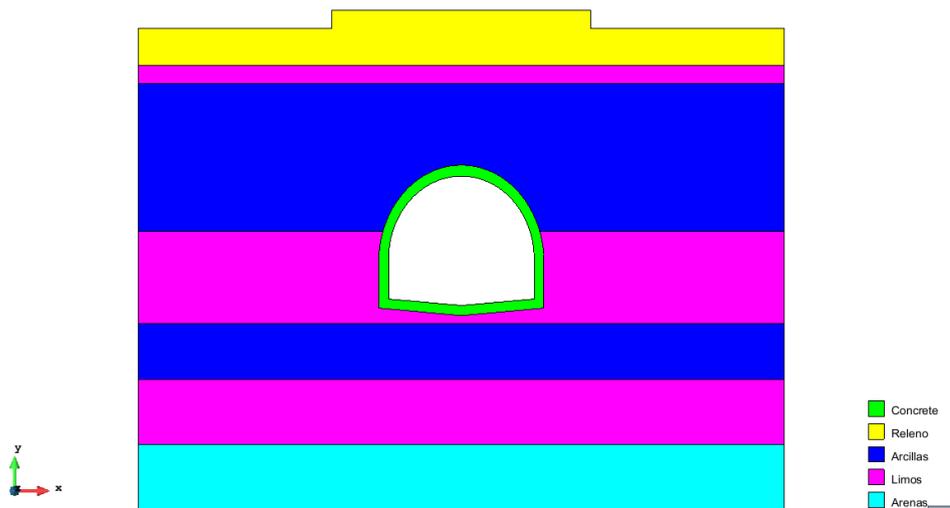


ILUSTRACIÓN 28. MAPA DE MATERIALES

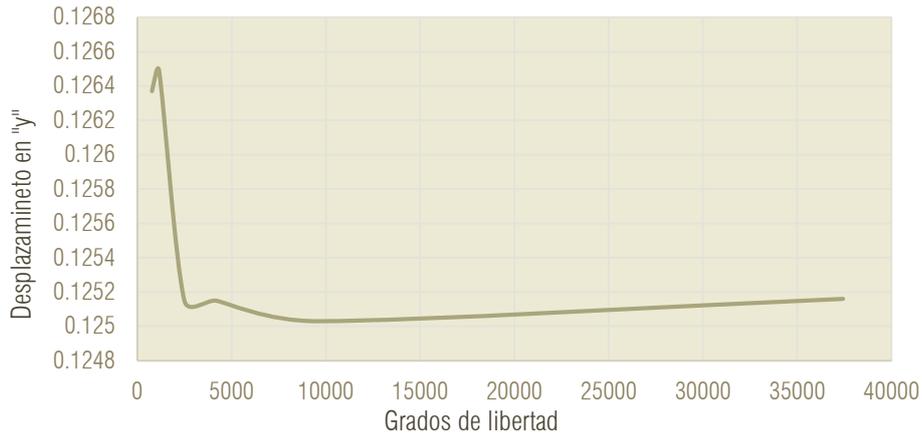
Concrete
Relleno
Arcillas
Limos
Arenas

GID

En primer lugar se realiza un análisis de convergencia para determinar cuál debería ser el tamaño de malla más adecuado a la hora de realizar los cálculos y cuál es el tipo de elemento más indicado en función del error cometido, los datos son computados en un Excel para obtener las **gráficas de convergencia** en función de la flecha máxima y los grados de libertad de la estructura.

Convergencia del asiento. Caso con túnel. $e = 0,60$ m				
Tamaño elemento	Nº elementos	Nº nodos	Nº GDL	Desplazamiento en "y"
2	692	394	788	0.12637
1.5	1044	581	1162	0.12649
1	2328	1254	2508	0.12515
0.75	3933	2084	4168	0.12515
0.5	9236	4793	9586	0.12503
0.25	36742	18722	37444	0.12516

TABLA 6. TABLA DE RESULTADOS PARA LA CONVERGENCIA DEL ASIENTO



GRÁFICA 6. CONVERGENCIA DE LOS ASIENTOS

Aproximadamente a partir de los 40000 grados de libertad el resultado es más que aceptable, ha convergido. Por lo tanto se aceptarán como buenos los resultados obtenidos con el tamaño de malla de 0.25 o menor.

Las ilustraciones mostradas a continuación son capturas realizadas con el GiD para el caso más refinado.

4.5.1. Asiento

Se muestra a continuación el mapa de colores de los desplazamientos en dirección al eje "y" junto con la deformada multiplicado por un valor de 36 veces el valor de desplazamiento.

Como se observa el asiento producido por el terreno debido a su peso propio es de **12,52 cm**. En comparación con el caso anterior se reduce pero ya no cumple la restricción de desplazamientos impuesta.

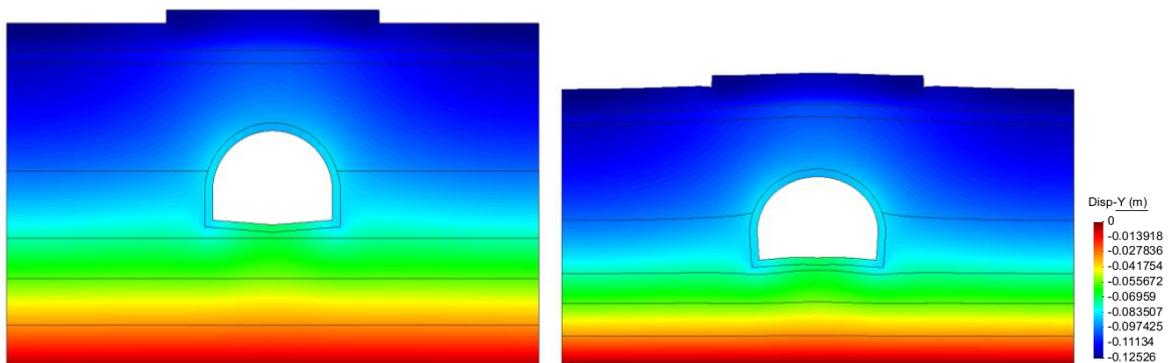


ILUSTRACIÓN 29. DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE "Y" Y DEFORMADA DEL TERRENO

4.5.2. Tensiones

Se muestran las tensiones del terreno, las máximas de tracción y las máximas de compresión.

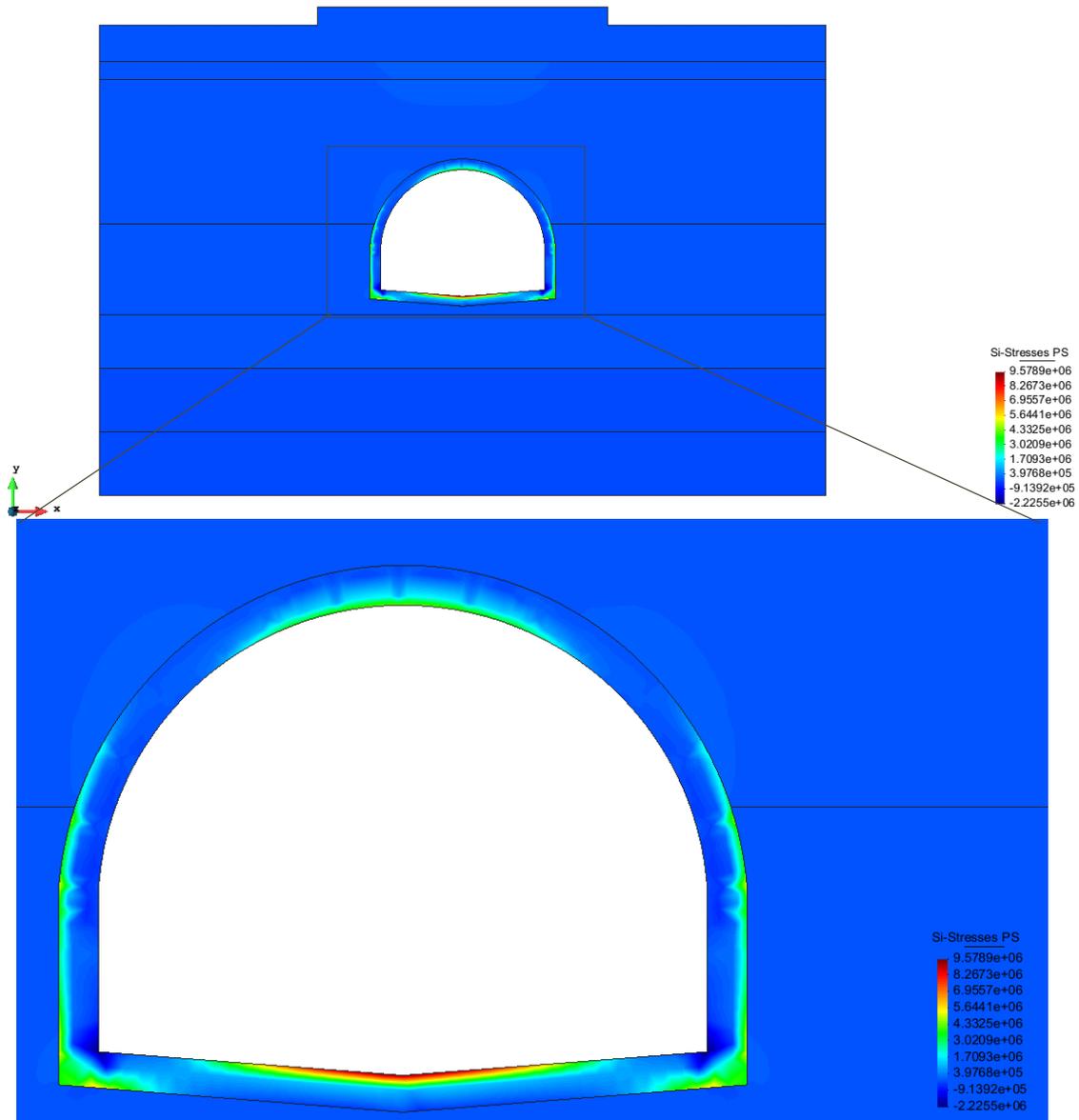
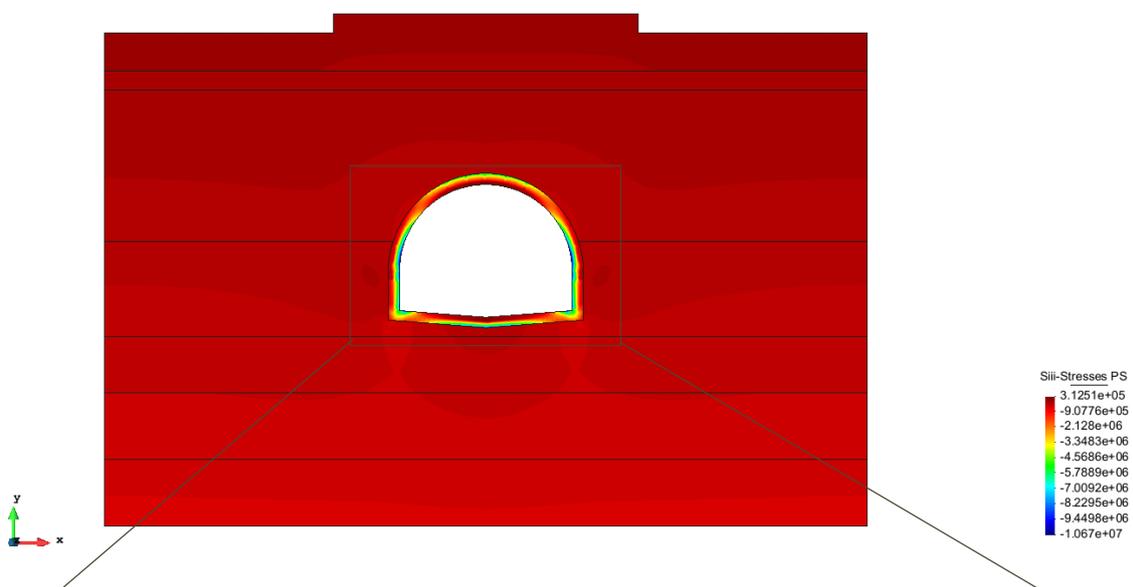


ILUSTRACIÓN 30. TENSIONES MÁXIMAS DE TRACCIÓN. ZONA AMPLIADA



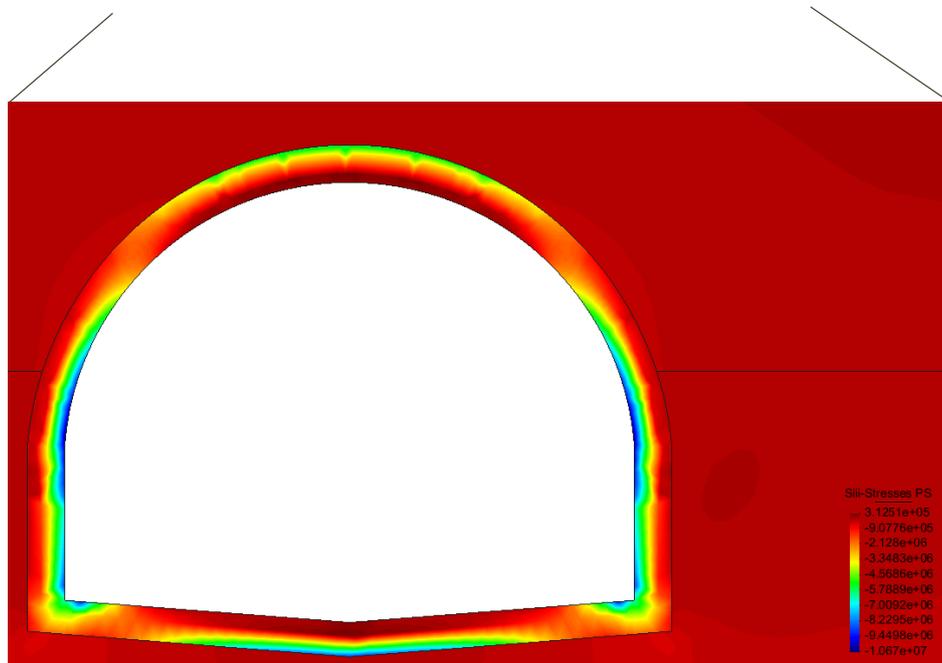


ILUSTRACIÓN 31. TENSIONES MÁXIMAS DE COMPRESIÓN. ZONA AMPLIADA

Al igual que el apartado anterior alrededor de la concentración de tensiones el valor converge, lo contrario pasa en el punto crítico, dónde las tensiones crecen sin estabilizarse. Por lo tanto, se obvian los valores ficticios debido a la concentración de tensiones.

5. CONCLUSIONES

Como podemos observar, dependiendo del tamaño y el tipo del elemento a usar en la malla tendremos una convergencia más rápida, lo que nos dará unos resultados más exactos. Cuanto menor es el tamaño de elemento utilizado, es decir, más grados de libertad tiene la estructura, mejores son los resultados obtenidos. No obstante, cabe destacar que el tiempo de cálculo aumenta muy considerablemente. No se ha contemplado los cuadriláteros porque la geometría del túnel es circular y los cuadriláteros no se aproximan suficientemente bien, aunque el terreno sí que aceptaría cuadriláteros. Se ha probado la convergencia entre elementos triangulares de 3 nodos y triangulares de 6 nodos. Dando lugar a la elección del elemento de 3 nodos como primera opción ya que el resultado obtenido durante las convergencias es parecido cuando se usan tamaños de malla un poco refinados, como el análisis se realizará con tamaños de malla no superiores a 2 hasta 0.25, no importa qué tipo de elemento usar. Entonces los triángulos de 3 nodos nos permitirán ahorrar tiempo computacional.

Una vez considerados diferentes casos de espesor del refuerzo del túnel (0,08 m, 0,15 m, 0,30 m y 0,6 m) observamos que en las tensiones nos encontramos una concentración de tensiones, la cual, como se ha demostrado, nos muestra valores ficticios que implica que el valor máximo proporciona por el programa no es real. Vemos que alrededor de la concentración de tensiones el valor converge, lo contrario pasa en el punto crítico, dónde las tensiones crecen sin estabilizarse. Por lo tanto se obvian los valores que no convergen. Así pues, en ningún caso de los planteados las tensiones superan el valor máximo permitido según el enunciado (30 Mpa para compresión y 25 MPa para tracción).

Nos fijaremos en los desplazamientos para determinar que espesor de refuerzo escoger. Obtenemos los diferentes resultados de desplazamiento que comparamos con el caso del terreno sin túnel:

Espesor	Desplazamiento	Diferencia
Sin túnel	14.29	-
0.08	0.13622	0.00665
0.15	0.13556	0.00731
0.3	0.1311	0.01177
0.6	0.12516	0.01771

Sólo se cumple el criterio de desplazamiento para los dos primeros espesores y si pensamos en un criterio económico escogeríamos el espesor de 0,08m. Sin embargo hay que fijarse que la deformación que se produce en el refuerzo de dicho caso es elevada, lo que no nos daría una buena respuesta estructural, el enunciado no nos limita ese aspecto pero si se considerase entonces se escogería la opción de un espesor de 0.15m o incluso de plantearía un espesor más ajustado al máximo desplazamiento permitido.

Como última conclusión se puede evidenciar la potencialidad del Método de elementos finitos (MEF), que consigue aproximarse a una la solución exacta del problema planteado.