

### **III MÁSTER UNIVERSITARIO EN TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS**

#### **Área B. Diseño y proyecto de túneles**

#### **CAVERNAS. DISEÑO ESTRUCTURAL**

### **ÍNDICE**

- 1) INTRODUCCIÓN
- 2) CAVERNAS Y TÚNELES. SIMILITUDES Y DIFERENCIAS
- 3) EJEMPLO DEL DISEÑO ESTRUCTURAL DE UNA CAVERNA
- 4) CONCLUSIONES

## 1) INTRODUCCIÓN

En la clase del viernes 29 de febrero de 2008 de este Máster “Tipología de cavernas” tuve ocasión de mostrar los usos y tipos de estas construcciones subterráneas. Y se citaron también las características que diferencian a las cavernas de los túneles.

En esta clase se hablará de los pasos a seguir en el cálculo estructural de una caverna y se mostrará algún ejemplo.



### 1. Caverna en construcción para la central hidroeléctrica de Beles (Etiopía)

## 2) CAVERNAS Y TÚNELES. SIMILITUDES Y DIFERENCIAS

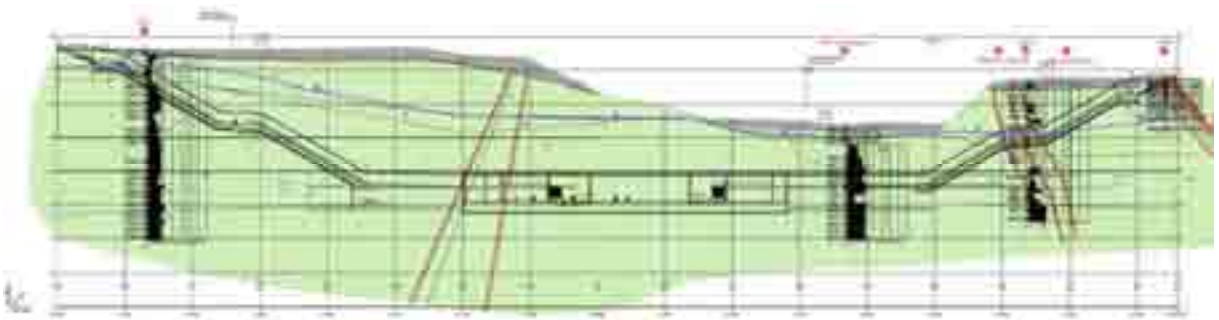
Tanto las cavernas como los túneles se construyen en el interior del terreno y, por tanto, tienen como factor común el que, para su diseño, es básico determinar la composición, estructura, características y comportamiento del terreno en el que se sitúan.

Los reconocimientos geológico-geotécnicos, en consecuencia, son esenciales en ambos tipos de obras, pero quizá con mayor densidad de análisis y detalle en el caso de las cavernas, por sus mayores dimensiones.



## 2. Planta geológica y de reconocimientos

Es también común a cavernas y túneles la realización de un perfil longitudinal geológico-geotécnico en el que se indique, no solo la litología y estratigrafía del terreno, sino también su estructura y tectónica (en el caso de macizos rocosos), sus características resistentes, sus clasificaciones geomecánicas, etc.



## 3. Perfil geológico-geotécnico de una caverna de estación

Un dato importante que hay que tratar de conseguir siempre, pero que en el caso de las cavernas tiene más trascendencia, es el de la continuidad de las litoclasas de los macizos rocosos. Este dato es difícil de obtener por mediciones directas, pues no es

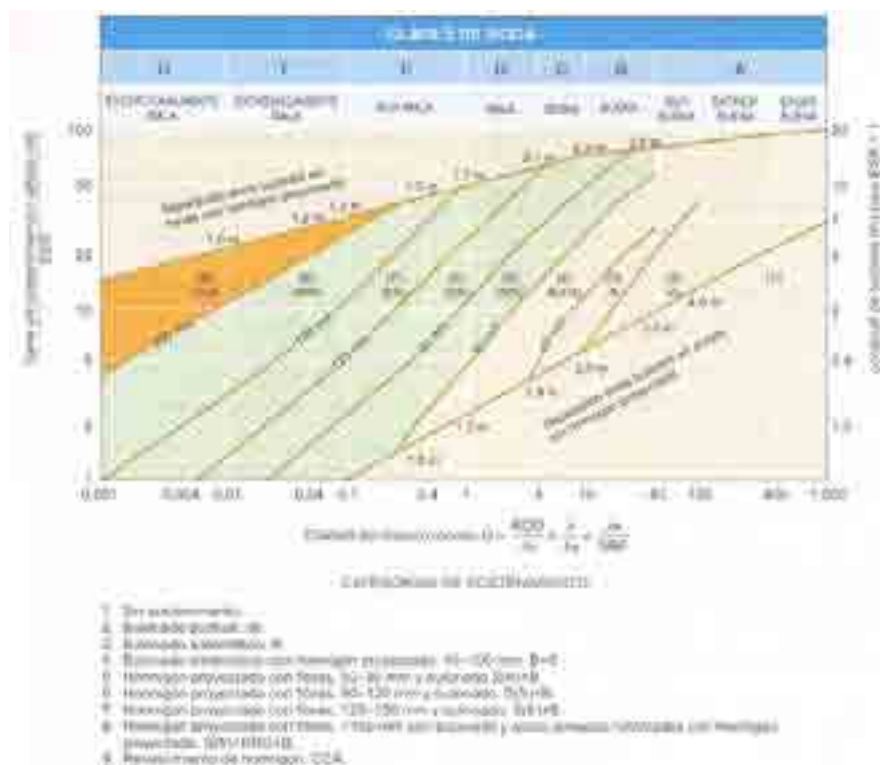
frecuente encontrar afloramientos rocosos de suficiente magnitud y calidad como para poder determinar, con cierta garantía, esta característica que, en definitiva y junto con la frecuencia de la fracturación (más fácil de obtener), puede indicar la dimensión de los bloques del macizo que pueden quedar descalzados por la excavación de la caverna.

Hablando de clasificaciones geomecánicas, hay que señalar que es preciso actuar con prudencia en el caso del diseño de las cavernas.

De entrada, se puede decir que la clasificación de Bieniawsky (el conocido índice RMR) no está pensada para excavaciones de más de 10 m de diámetro equivalente, dimensión que es superada siempre por una caverna propiamente dicha.

Por otra parte, Barton recomienda (cosa que no es muy aplicada) multiplicar por 3 el valor del índice de diaclasado,  $J_n$ , que se usa en su fórmula para la obtención del índice Q, en la zona de entronques de galerías en las cavernas. Esto supone dividir por dicho factor el índice y rebajar en, al menos, un grado la categoría del sostenimiento, haciéndolo más pesado.

Para la obtención del índice Q de Barton no se tiene en cuenta la dimensión de la excavación a realizar.



**Fig. 4. Cuadro de sostenimientos en función del índice Q**

Pero para la definición preliminar del sostenimiento, sí se tiene en cuenta esa dimensión y, además, el uso que se va a dar a la excavación, a través del factor ESR.

**Valores del índice ESR de la Clasificación Q**

	Tipo de excavación	ESR
A	Labores mineras de carácter temporal, etc.	2-5
B	Galerías mineras permanentes, túneles de centrales hidroeléctricas (excluyendo las galerías de alta presión), túneles piloto, galerías de avance en grandes excavaciones, cámaras de compensación hidroeléctrica.	1,6-2,0
C	Cavernas de almacenamiento, plantas de tratamiento de aguas, túneles de carreteras secundarias y de ferrocarril, túneles de acceso.	1,2-1,3
D	Centrales eléctricas subterráneas, túneles de carreteras primarias y de ferrocarril, refugios subterráneos para defensa civil, emboquilles e intersecciones de túneles.	0,9-1,1
E	Centrales nucleares subterráneas, estaciones de ferrocarril, instalaciones públicas y deportivas, fábricas, túneles para tuberías principales de gas.	0,5-0,8

(Barton, 2000).

**Fig. 5. Cuadro de definición de ESR**

La combinación de los dos factores, dimensión y uso, puede dar lugar a que, con el mismo terreno, la categoría del sostenimiento de una caverna sea un grado (o incluso dos) superior a la del túnel que llega a ella.



**Fig. 6. Variación del sostenimiento en función de la dimensión de la excavación**

De todas maneras, las clasificaciones geomecánicas son una herramienta muy útil para hacer una primera estimación de los parámetros resistentes de un macizo rocoso y de los sostenimientos primarios necesarios al hacer una excavación subterránea, pero no son (no deben ser) la única herramienta usada en su definición, sino que es preciso realizar comprobaciones de detalle mediante los oportunos cálculos.

El factor que marca la gran diferencia entre el diseño estructural de los túneles y el de las cavernas es la importancia de los efectos tridimensionales en estas últimas. Prácticamente todas las cavernas están conectadas con túneles o galerías en testeros y en sus hastiales para poder construir las y para acceder a ellas durante su explotación.



**Fig. 7. Galerías laterales en una caverna de estación del Metro de Bilbao**

También es frecuente que estén conectadas con pozos verticales (o inclinados) en su bóveda o muy próximo a sus hastiales.



**Fig. 8. Inserción de un pozo en una caverna de almacenamiento de hidrocarburos**

Todo ello da lugar a efectos tensionales en tres dimensiones que, o se estudian mediante herramientas adecuadas o, si no, pueden dar lugar a resultados muy alejados de la realidad.

Es verdad que el proceso de excavación de un túnel tiene una componente tridimensional importante: Existe un efecto de confinamiento del terreno aún no perforado e inmediato al frente de excavación, que colabora a la estabilidad del pase recién excavado en el túnel, antes de la colocación del sostenimiento.

Este efecto se suele tener en cuenta en los cálculos bidimensionales de los túneles mediante la conocida ley analítica de Panet sobre el efecto frente.

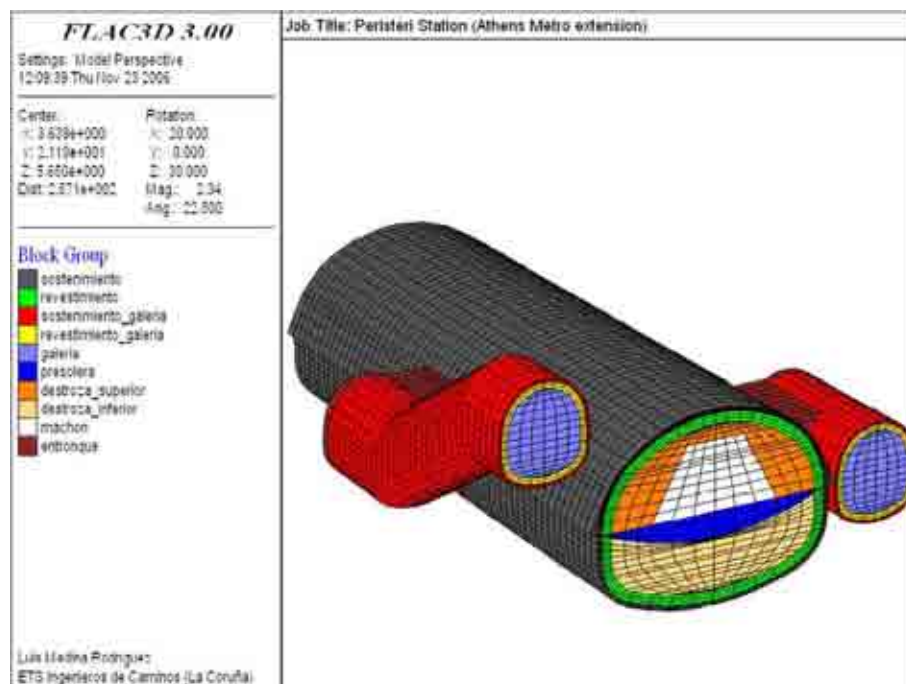
Pero, en general, los túneles se pueden estudiar mediante modelos bidimensionales, con resultados suficientemente precisos, utilizando herramientas adecuadas y ayudas como la citada de Panet.

Para algunas secciones de cavernas se pueden emplear también modelos bidimensionales pero, en muchos casos, es preciso recurrir a modelos 3D para reproducir la compleja geometría de intersecciones entre la obra principal y los túneles y galerías que a ella llegan.

El problema es que la generación de la malla de cálculo en 3D, el propio cálculo y la interpretación de los resultados son operaciones que consumen mucho tiempo y recursos y, por tanto, son muy costosas.

Por ello, siempre que es posible, se recurre a modelos bidimensionales, “extrusionándolos” en profundidad y simulando las inserciones de galerías laterales o pozos por eliminación de elementos de la malla creada, en las secciones en que eso sucede.

Otras veces se recurre a verdaderos modelos 3D como el de la figura siguiente, obtenida de un análisis realizado por el Prof. Luis Medina para una estación de Metro en Atenas y que, con toda probabilidad, él explicará con mucho más detalle en las clases correspondientes de Modelos numéricos continuos que se darán más adelante.



**Fig. 9. Malla 3D de una caverna y galerías de acceso en una estación del Metro de Atenas**

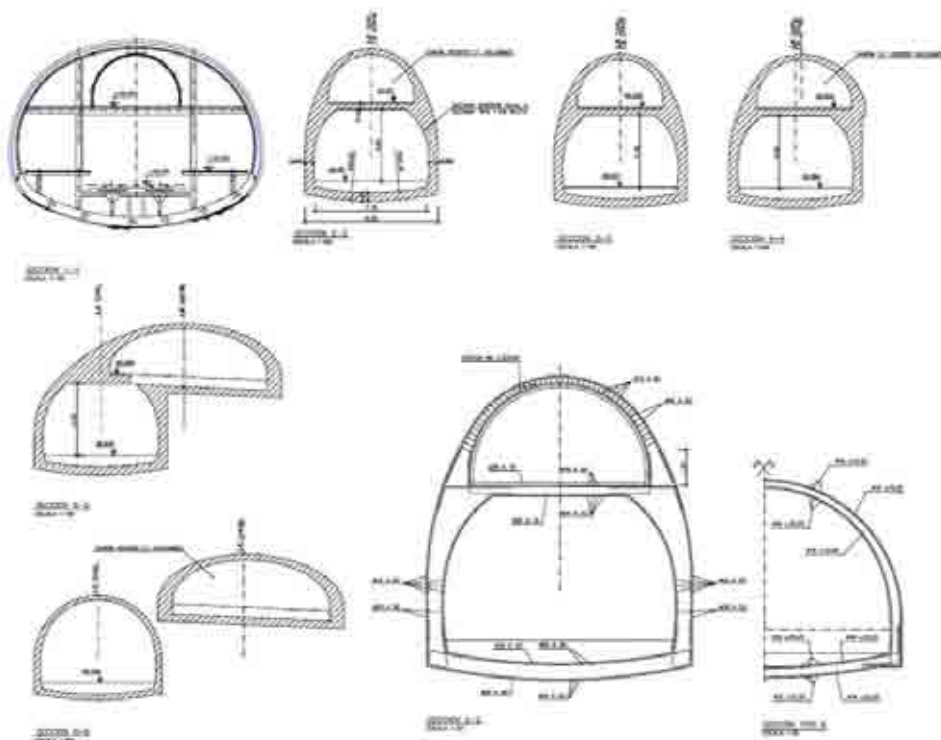


Hay que prestar mucha atención a las formas que se obtienen en las intersecciones de galerías y cavernas. En ocasiones, y por condicionantes arquitectónicos o de otro tipo, aparecen secciones muy poco adecuadas desde el punto de vista resistente. No hay que olvidar que una caverna es una obra subterránea y que hay que buscar formas en arco o en bóveda para que el terreno pueda acomodar sus tensiones principales, durante y después de la excavación, siguiendo arcos de descarga.

Las inserciones en los testeros de las cavernas no suelen plantear problemas, pues el pasar de un túnel o una galería a una caverna o viceversa no supone más que un cambio de sección transversal.

Siguiendo con las conexiones en testeros, el problema se empieza a complicar cuando en una caverna se inserta un túnel y una galería sobre él. Este caso se ha presentado, en muchas ocasiones, en las cavernas de las estaciones subterráneas perforadas del Metro de Bilbao y, como se ha resuelto con éxito, se está extendiendo a otros sistemas ferroviarios competencia de ETS (Euskal Trenbide Sarea).

La figura que sigue corresponde a un plano del testero de una estación de la línea 2 del Metro de Bilbao, en el que se inserta, no solo el túnel de línea, sino también un cañón de acceso de usuarios al vestíbulo sobre vías, característico de este sistema.

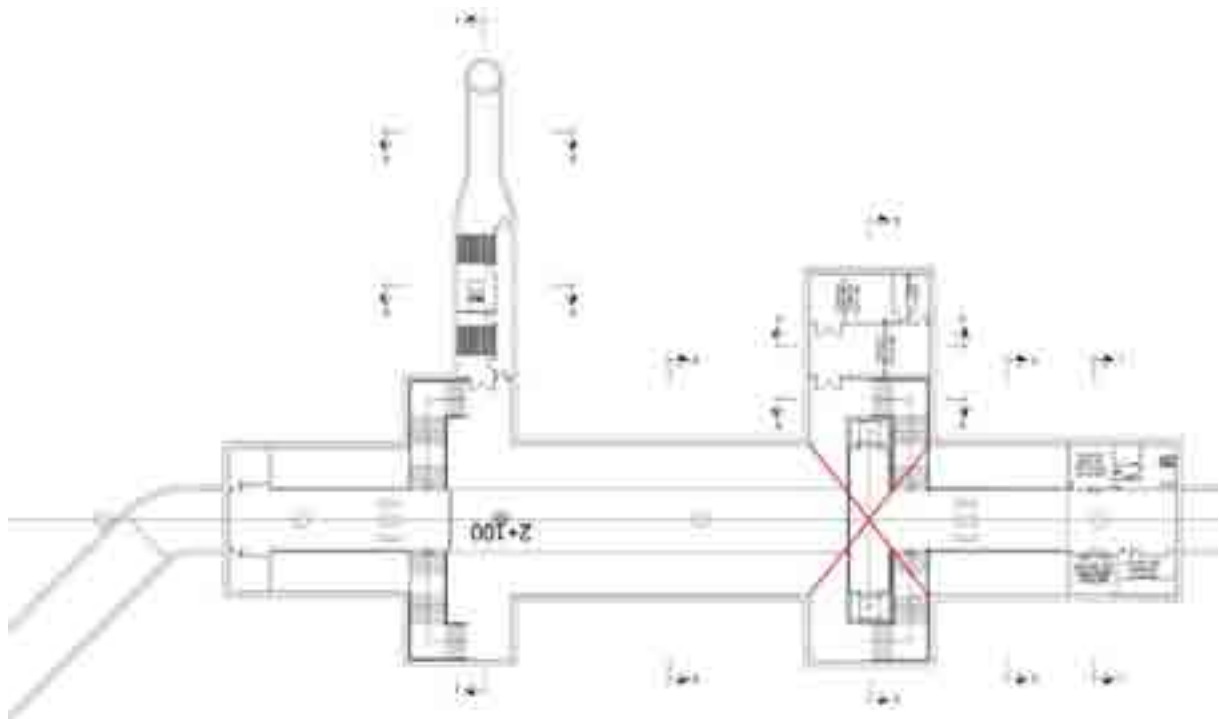


**Fig. 10. Túnel y galería en testero de una estación**

La forma da lugar a una excavación muy alta, que combina los dos elementos, cuyo revestimiento final tiene la forma adecuada para separar el túnel y el acceso. Como este último gira en planta al alejarse de la caverna, se generan algunas secciones poco habituales y que ha habido que realizar por fases, reforzando el revestimiento del túnel de línea (que se construía primero en las secciones complicadas) y excavando después el cañón.

En las inserciones laterales en hastiales se pueden producir problemas geométricos más difíciles de resolver.

En la figura que sigue se puede apreciar la planta de una estación en caverna de un ferrocarril en San Sebastián, recientemente proyectado.



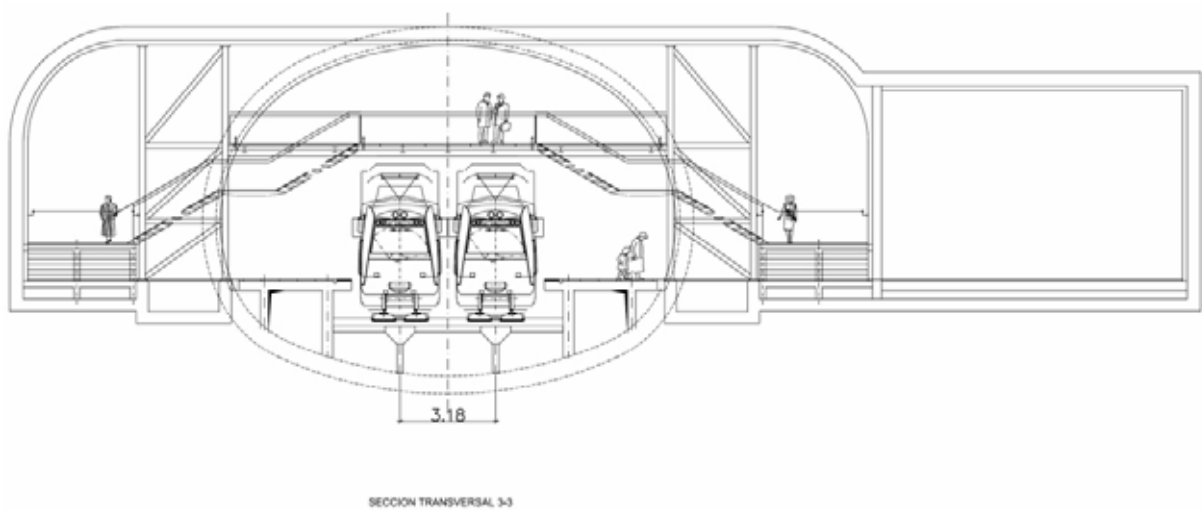
**Fig. 11. Planta de una estación en caverna**

Se puede apreciar un acceso por testero (sobre el túnel de línea) con formas muy similares a las de la figura anterior y dos ensanchamientos (“orejas”) a cada lado de la caverna para albergar las escaleras de bajada desde el vestíbulo sobre vías hasta los andenes, además de cuartos técnicos, etc.

La intersección de estas “orejas”, de forma abovedada como corresponde a una construcción en subterráneo, con la caverna principal da lugar a una bóveda de crucería, como la de las iglesias románicas. La diferencia es que estas últimas se

construían a cielo abierto sobre grandes cimbras y, una vez acabadas, funcionaban como una estructura conjunta y estable y no tenían que soportar más que su peso propio y algunas cargas accidentales (viento, nieve, etc.). En el caso de una construcción en subterráneo, sin embargo, durante la perforación y sostenimiento del macizo hay que permitir la formación de arcos de descarga del terreno, mediante las correspondientes formas abovedadas en la excavación. Y además, una vez terminada la obra, su geometría debe permitir soportar adecuadamente la carga del terreno.

Pues bien, en este caso las primeras propuestas arquitectónicas daban lugar a un techo plano de una importante dimensión (casi 25 m) en una determinada sección.

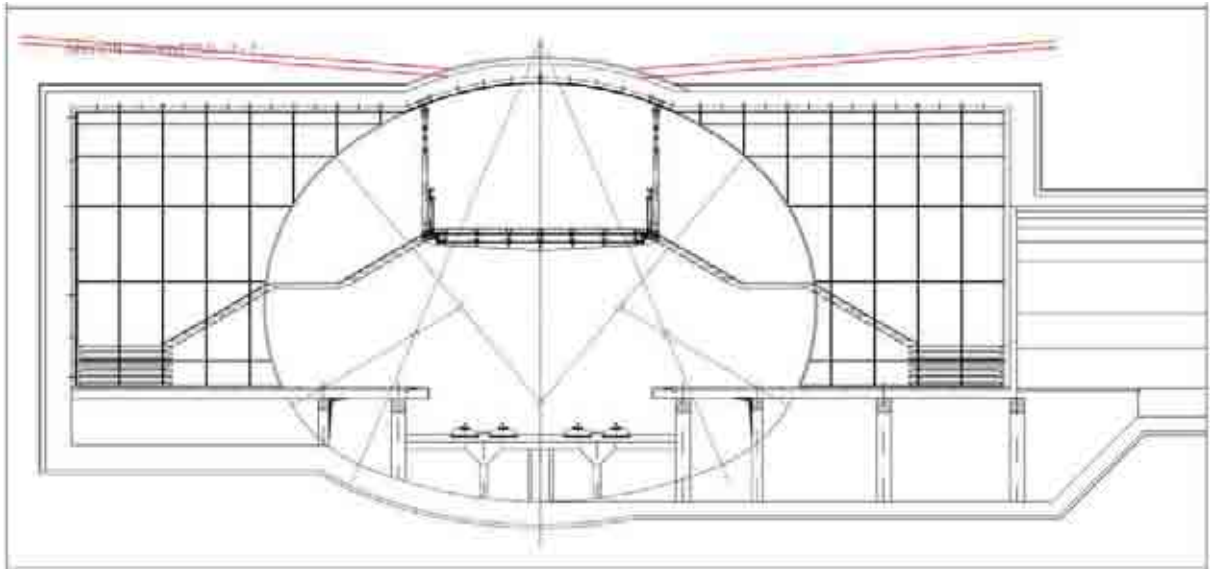


**Fig. 12. Techo plano en la sección transversal de la inserción de galerías laterales en una caverna**

Esta geometría, poco favorable para una obra subterránea, era particularmente inadecuada en este caso, con un macizo rocoso de mala calidad y con una cobertera escasa sobre la clave de la estación, que dificultaba la creación del arco de descarga.

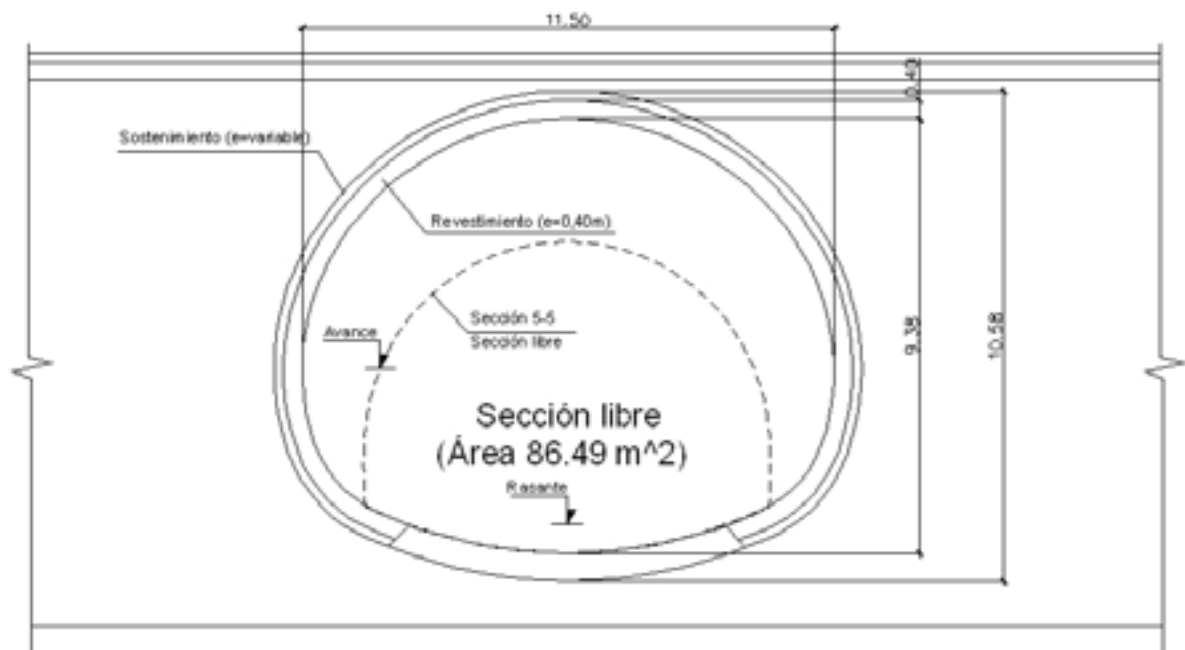
Como por razones funcionales (altura libre sobre escaleras, equipos de ascensores, etc.) no se podía reducir la altura de las galerías transversales, se decidió darle una curvatura mayor a la bóveda de la caverna, para levantar más su clave (a pesar de que con ello se reducía la cobertera de terreno sobre ella) de forma que siempre hubiera una geometría curva en la intersección de la caverna y las galerías.

El resultado, en sección transversal a la caverna, se muestra en la figura siguiente:



**Fig. 13. Sección transversal corregida**

En sección longitudinal, el resultado es el siguiente:



**Fig. 13 bis. Sección longitudinal**

Con esta forma se puede, además, ejecutar un “paraguas” de micropilotes sobre las galerías laterales, para reducir los riesgos de rotura durante su perforación, a partir de la caverna, una vez perforada y con sostenimiento, pero antes de su revestimiento final

Se ha previsto colocar unos potentes perfiles metálicos HEB siguiendo las aristas de intersección caverna-galerías, de forma que a ellos se puedan soldar las cerchas metálicas que componen parte del sostenimiento de la caverna y de las galerías transversales. Con esta retícula estructural se pueden conducir las cargas hacia el pie.

Los sostenimientos previstos son potentes, debido a la difícil geometría, sobre todo en las zonas en que se prevé terreno de peor calidad, tanto en la caverna....

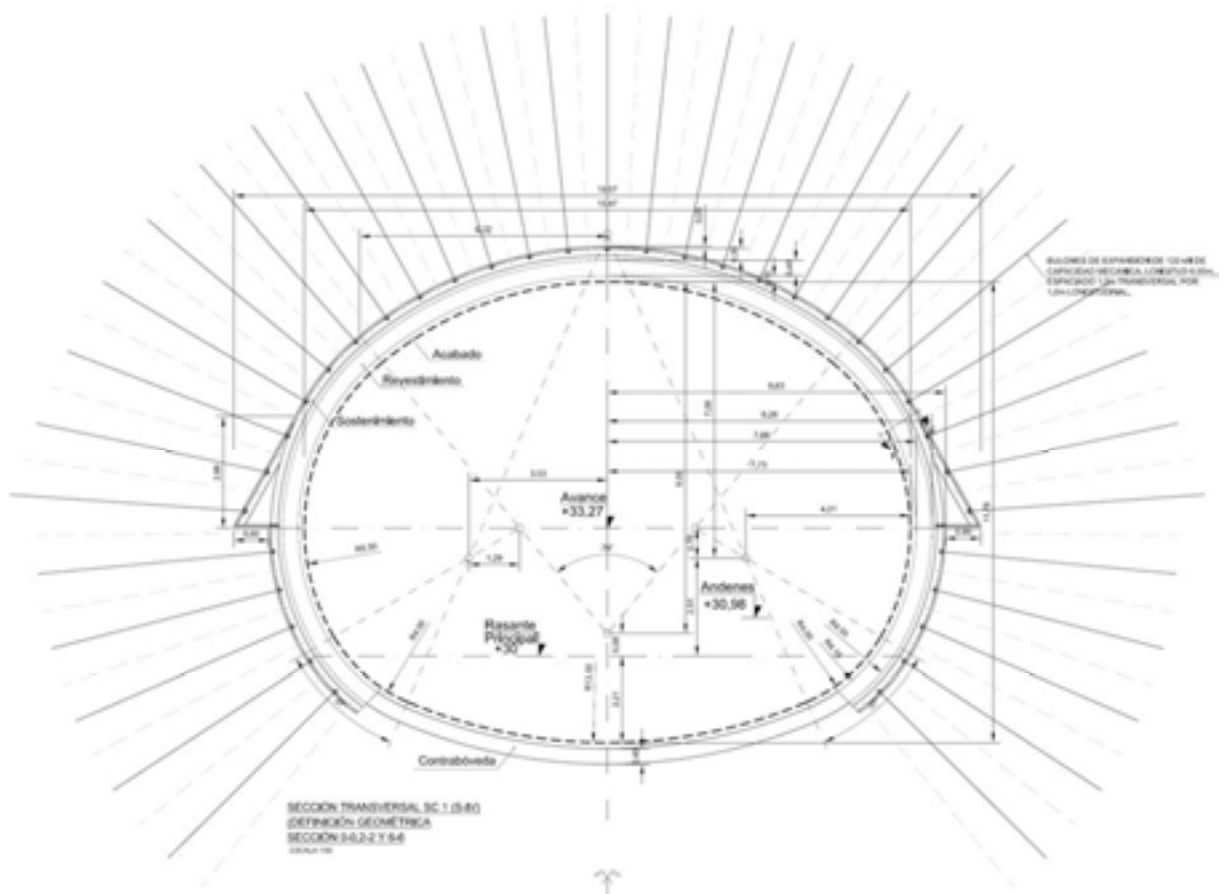
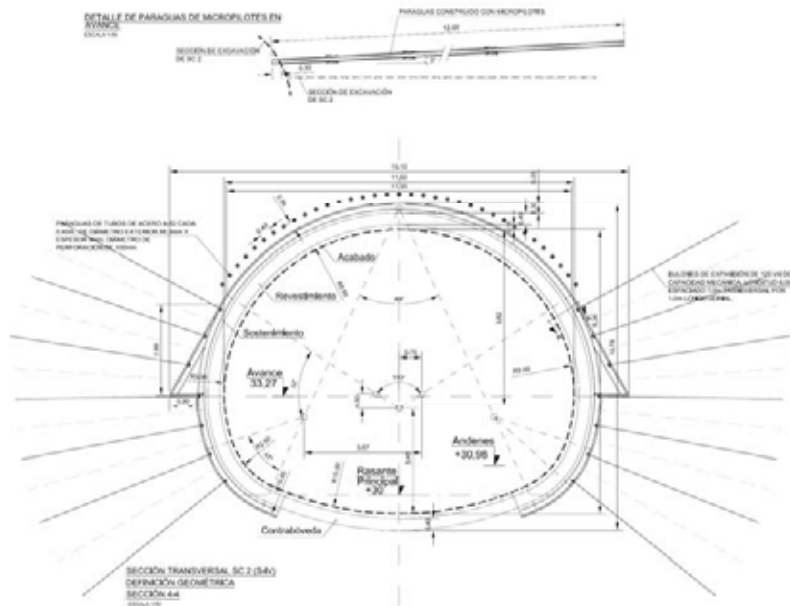


Fig. 14. Sostenimiento primario de una caverna

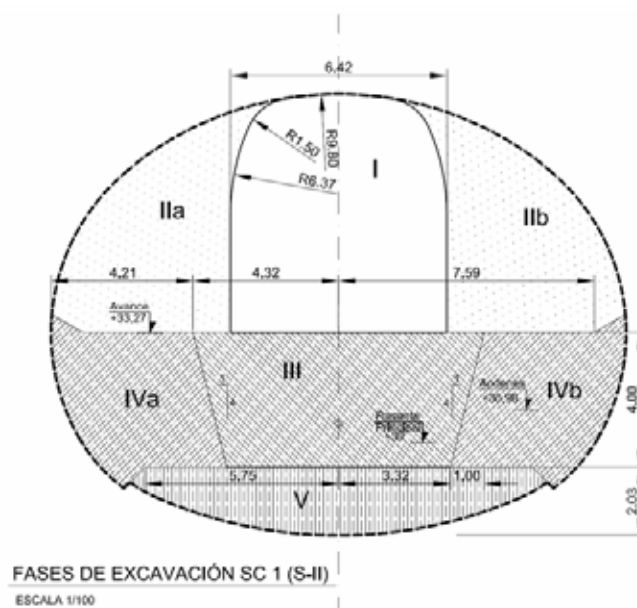
Como en las galerías transversales



**Fig. 15. Sostenimiento primario y “paraguas” en una galería transversal**

Naturalmente, la excavación de esta caverna, de dimensiones importantes en un terreno no muy favorable, se debe hacer por fases para no tener abiertos grandes frentes de excavación, sin sostenimiento de la cavidad, que pueden dar problemas de inestabilidad.

Este hecho constituye también una diferencia respecto de la forma de realizar un túnel, que salvo que el terreno sea muy malo (o en suelos), se excava en dos fases (avance y destroza) o incluso a plena sección si el terreno es favorable.



**Fig. 16. Fases de excavación de una caverna de estación de ferrocarril**

### 3) EJEMPLO DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE UNA CAVERNA

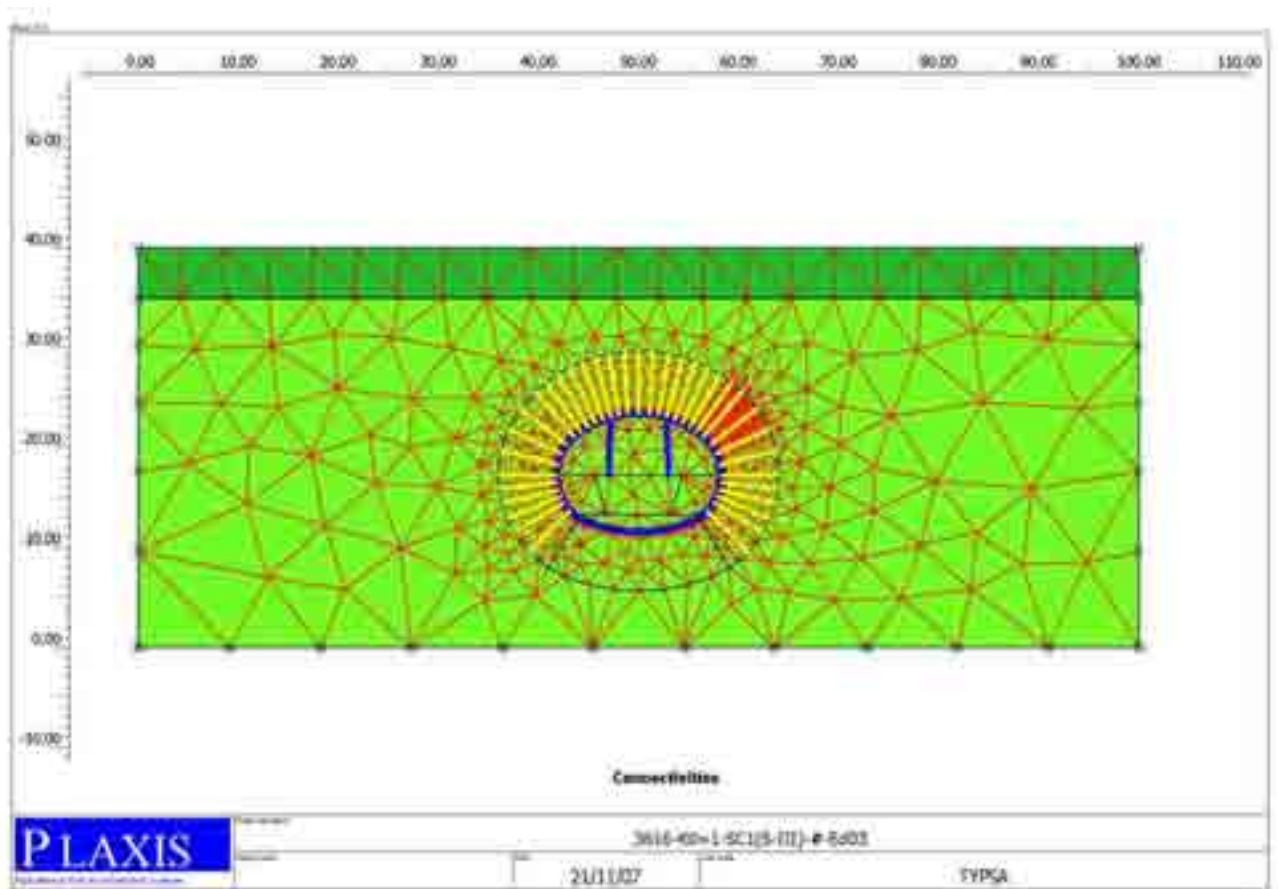
Sin entrar en detalles de los cálculos, que serán objeto de varias de las clases de este Máster, se describen a continuación, y de forma muy sintética, las fases que normalmente se siguen en la definición de la obra de una caverna:

- a) Hechos los estudios geológicos, campaña de investigación geotécnica y geofísica y ensayos de laboratorio, se tramifica la obra y se hacen las clasificaciones geomecánicas del terreno en cada tramo, según las fórmulas de Bieniawski, Barton, Romana, etc.
- b) A partir de estas clasificaciones y teniendo en cuenta las dimensiones y peculiaridades de la obra y de la zona, se predimensionan los elementos de sostenimiento de la excavación, las fases de ejecución, longitud de pases, etc.
- c) Se elabora un modelo de cálculo a partir de códigos ampliamente utilizados en el diseño de obras subterráneas (FLAC, PLAXIS, UDEC, MIDAS....). Cada modelo tiene sus ventajas y sus inconvenientes y su campo de aplicación en los que son más útiles.

Si la geometría lo permite se usan modelos bidimensionales o, si no, modelos 3D.

- d) Algunos códigos (por ejemplo PLAXIS) generan automáticamente la malla de elementos, a partir de las condiciones marcadas por el proyectista, como son:
  - . Geometría y estratigrafía del terreno.
  - . Geometría de la caverna.
  - . Zonas en donde la malla debe ser más cerrada (contorno de la caverna, sostenimiento y revestimiento, zonas entre excavaciones, zonas bajo edificios, etc.).

Esta generación automática tiene grandes ventajas, como son un ahorro muy sustancial de tiempo, si la geometría es complicada, y el uso de controles internos para evitar una geometría inadecuada para los elementos (ángulo demasiado pequeños, lados muy desiguales, etc.). Presenta, por el contrario, algunos inconvenientes más aparentes que reales. Por ejemplo la malla obtenida no es totalmente simétrica, pero la experiencia demuestra que esto apenas tiene trascendencia a la hora de obtener los resultados.

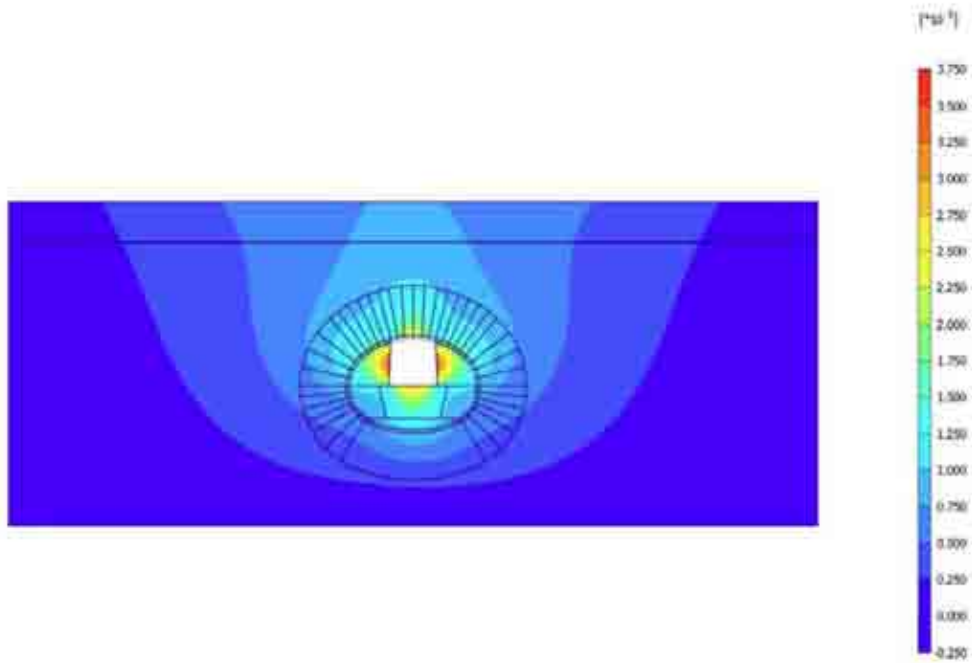


**Figura 17. Malla generada por un programa de cálculo**

- e) Se introducen las propiedades de las diferentes capas de terreno, de los elementos estructurales del sostenimiento y revestimiento y las condiciones de contorno.
- f) Se inicia el proceso de cálculo con la fase que se suele denominar “pasada de la gravedad”, reacomodándose el modelo hasta alcanzar el equilibrio.
- g) Se simula la excavación de la galería piloto inicial y la colocación del sostenimiento definido para ella.

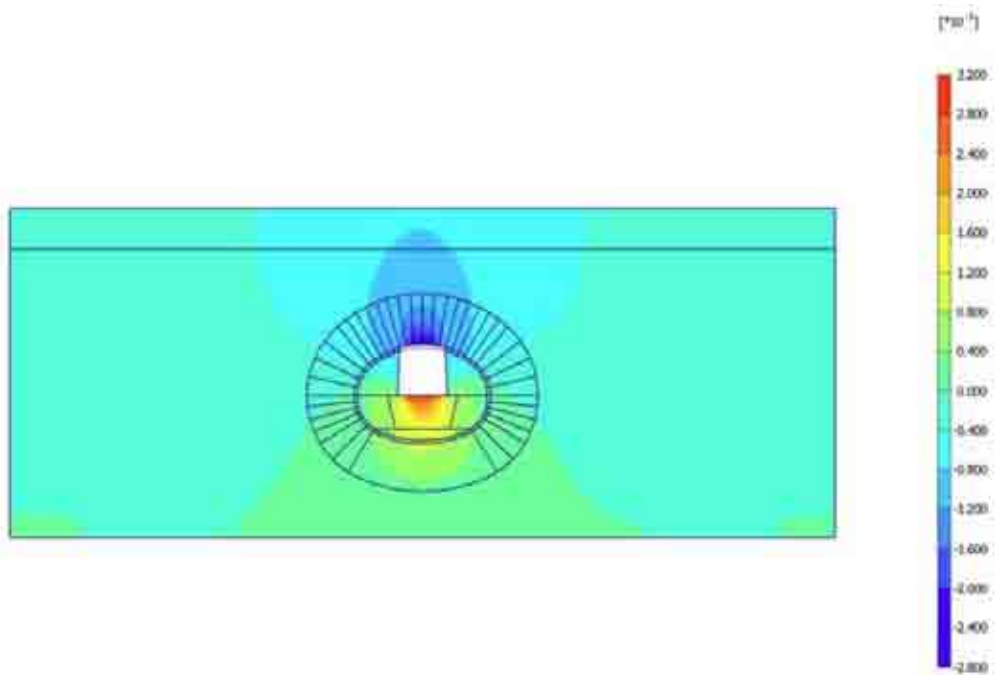


h) El código determina las deformaciones totales .....



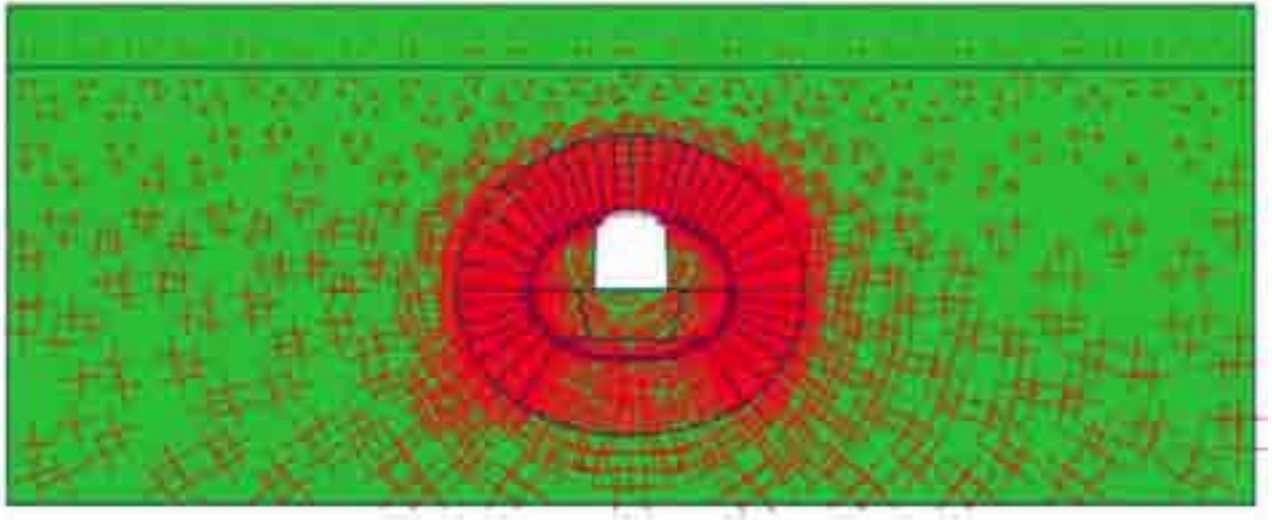
**Figura 18. Deformaciones totales**

.... las verticales....



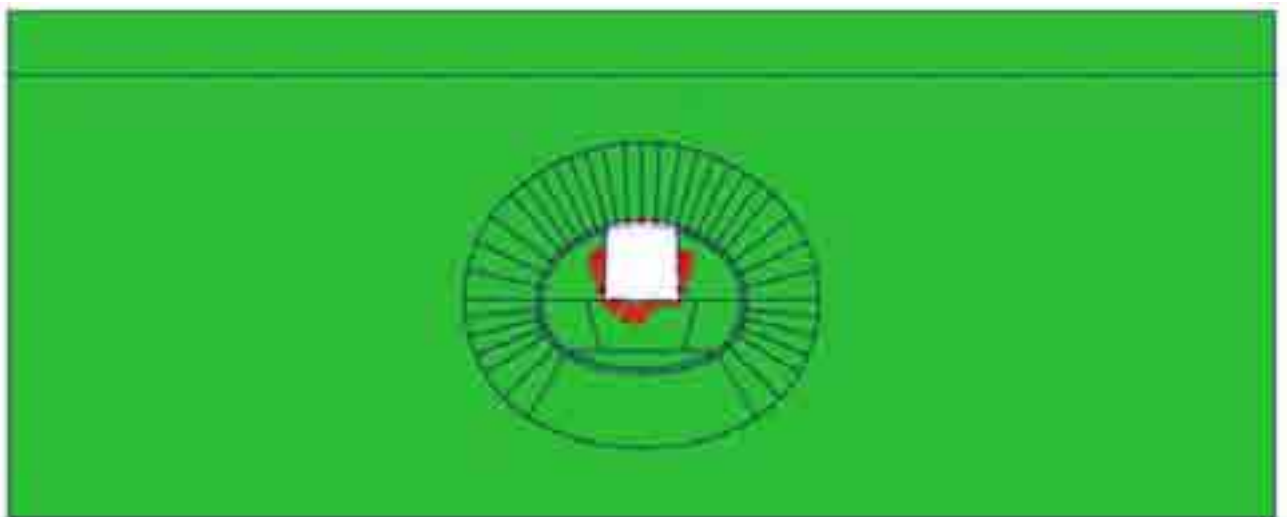
**Figura 19. Deformaciones verticales**

.... las tensiones principales efectivas.....



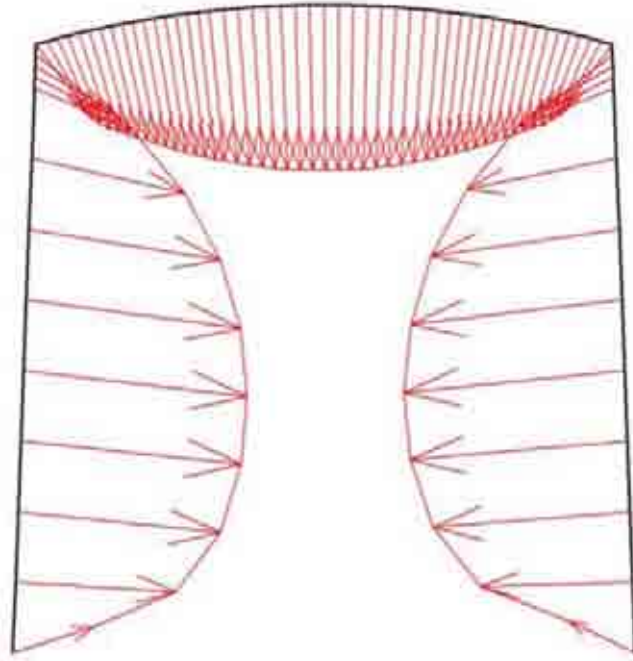
**Figura 20. Tensiones principales (arco de descarga)**

.... los puntos de plastificación.....



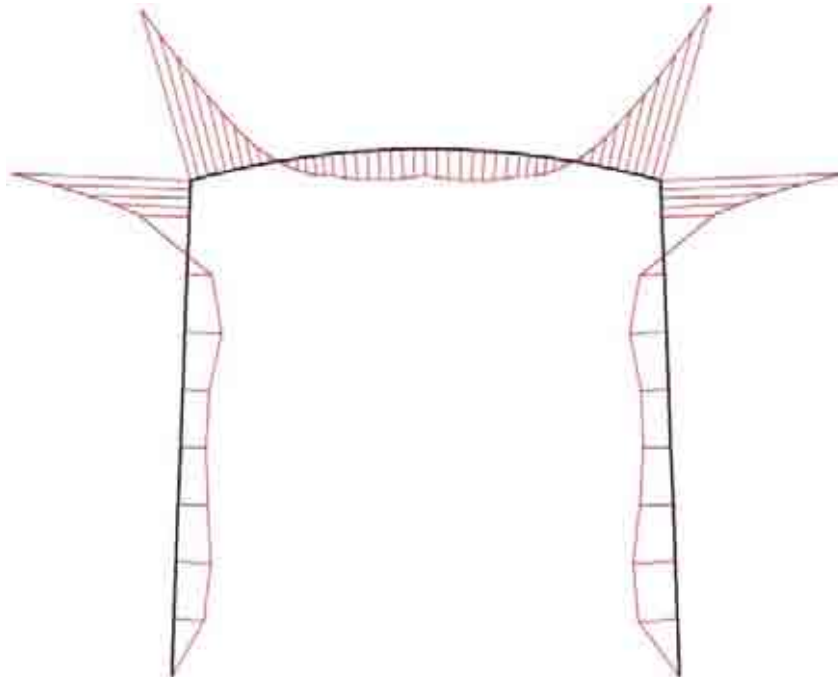
**Figura 21. Zonas plastificadas**

... los desplazamientos del sostenimiento.....



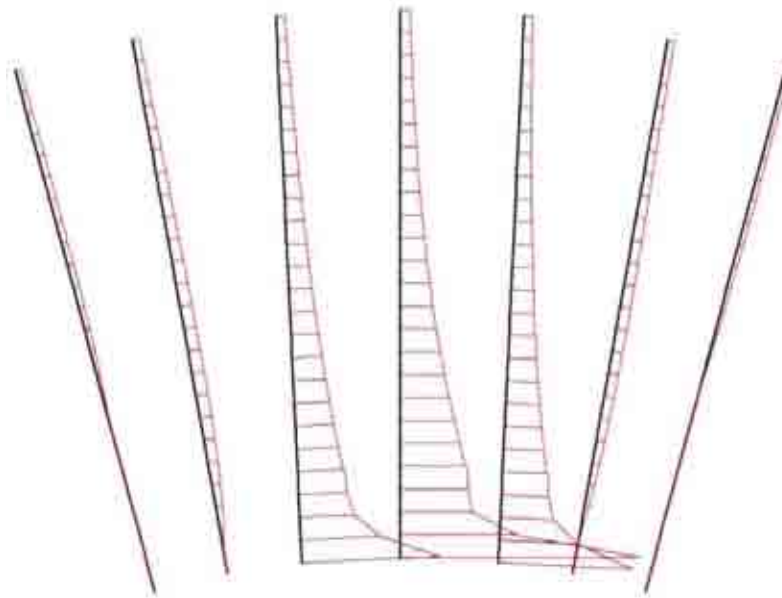
**Figura 22. Desplazamientos del sostenimiento**

... sus flexiones.....



**Figura 23. Flexiones en el sostenimiento**

... los esfuerzos axiales en los bulones.....

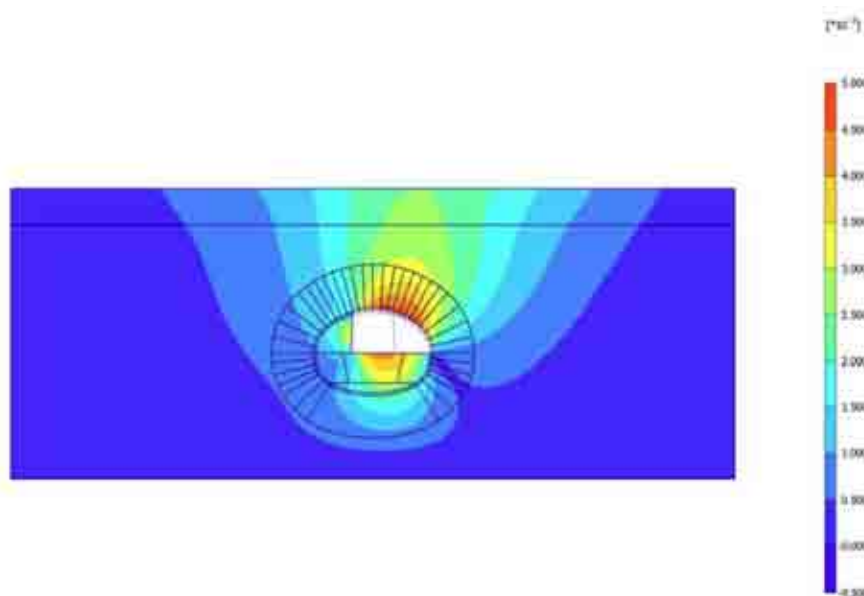


**Figura 24. Esfuerzos de tracción en bulones**

y muchos más datos de los aquí mostrados.

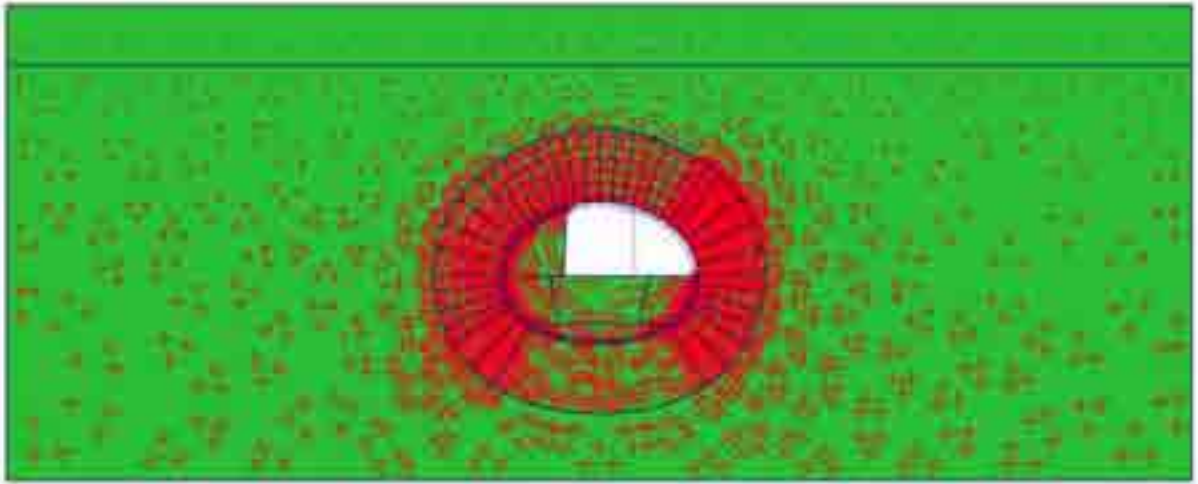
- i) Se inicia un nuevo cálculo, con la excavación de uno de los ensanches superiores de la caverna, obteniéndose los mismos parámetros en la nueva situación:

Desplazamientos totales ....



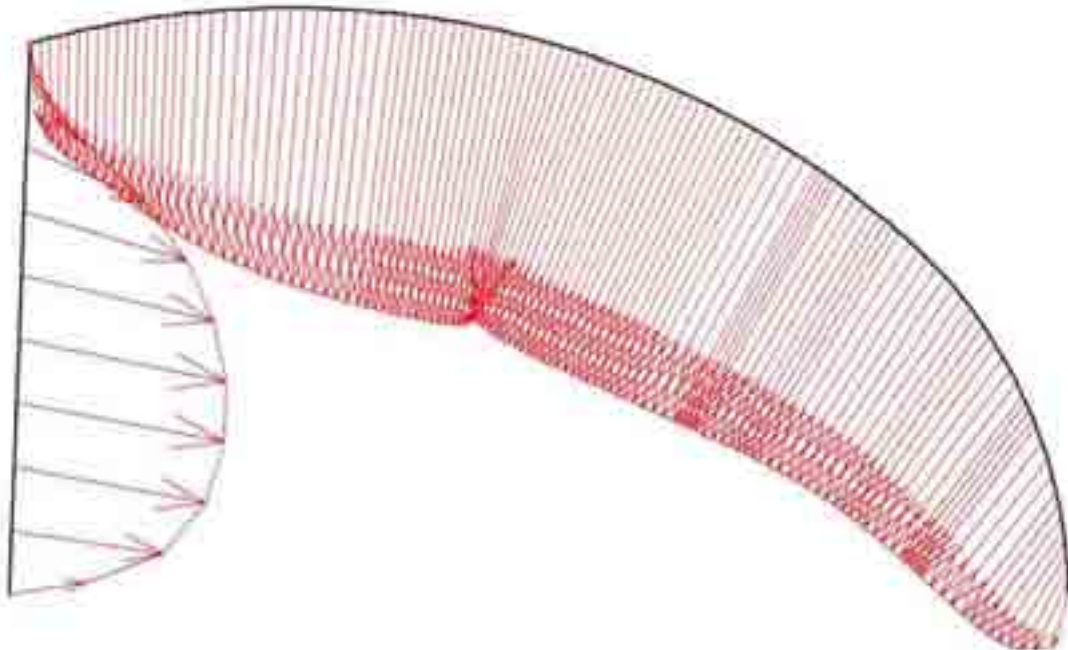
**Figura 25. Desplazamientos del sostenimiento**

.... tensiones principales.....



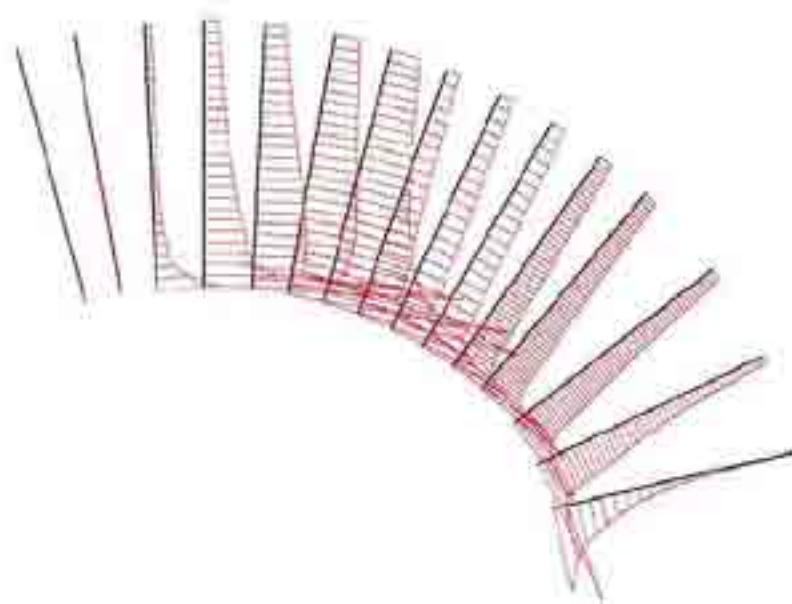
**Figura 26. Tensiones principales**

.... flexiones.....



**Figura 27. Flexiones en el sostenimiento**

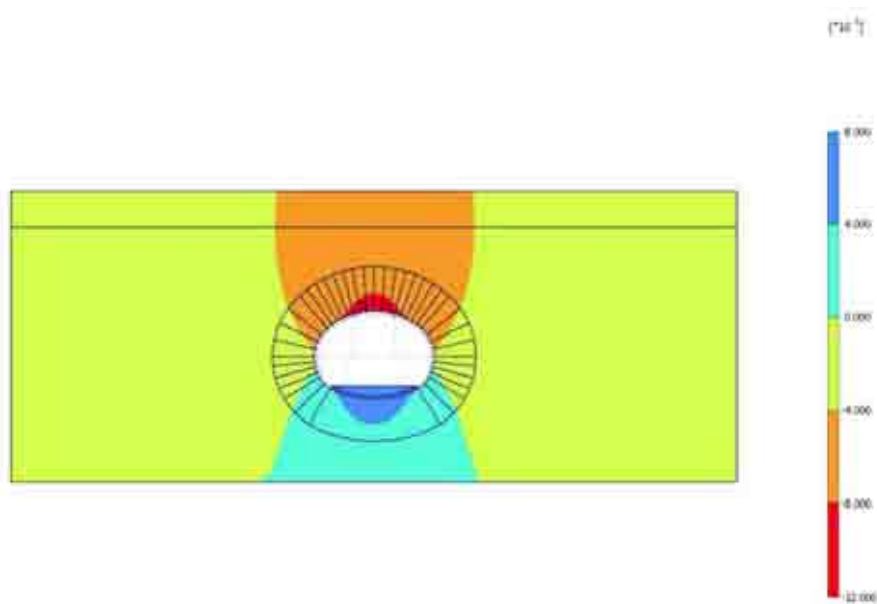
.... esfuerzos axiales en bulones ....



**Figura 28. Esfuerzos de tracción en bulones**

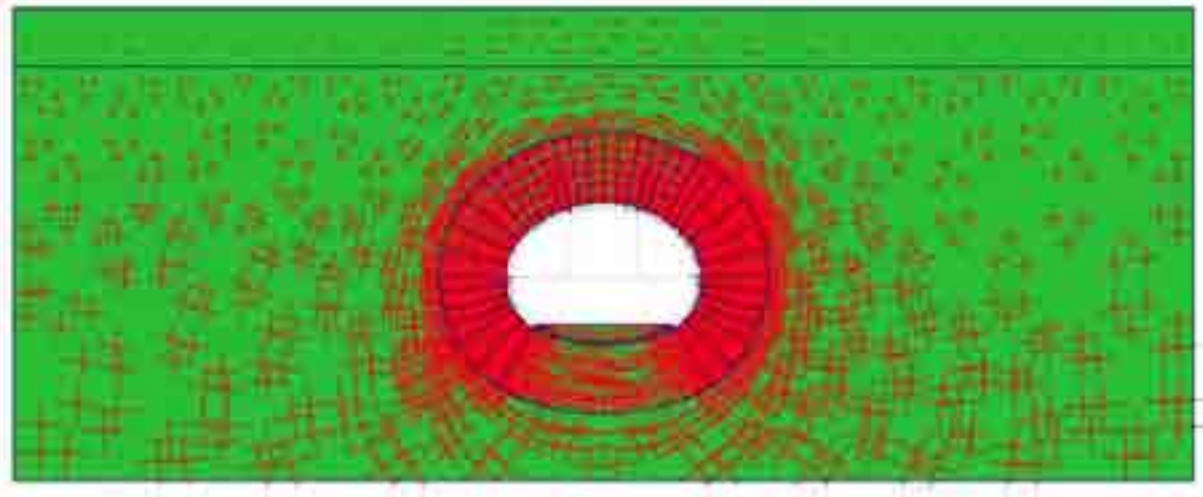
etc.

- j) Se suceden los cálculos en las diferentes fases de excavación hasta llegar a la fase final de perforación de la caverna, obteniéndose los valores de los diferentes parámetros, como desplazamientos verticales (y horizontales y totales) .....



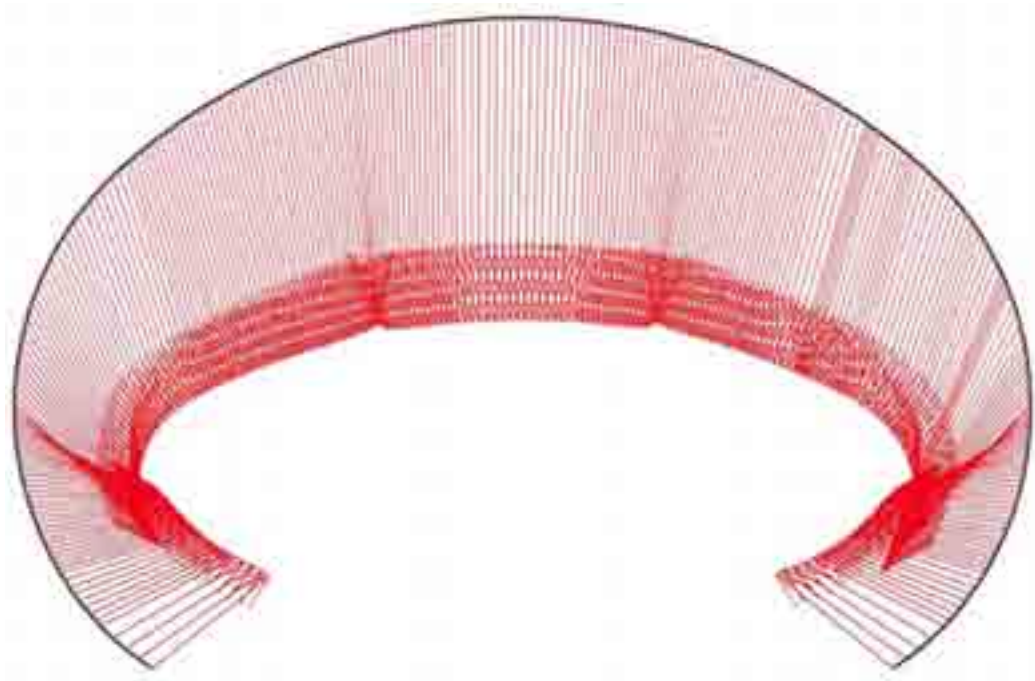
**Figura 29. Desplazamientos en la caverna totalmente excavada**

.... tensiones principales .....



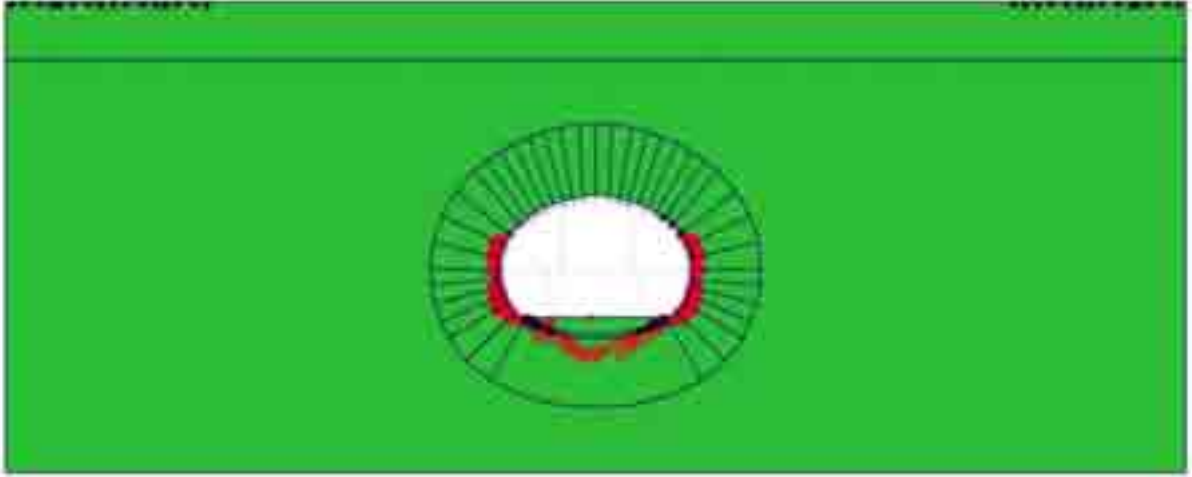
**Figura 30. Tensiones totales**

.... desplazamientos en el revestimiento ....



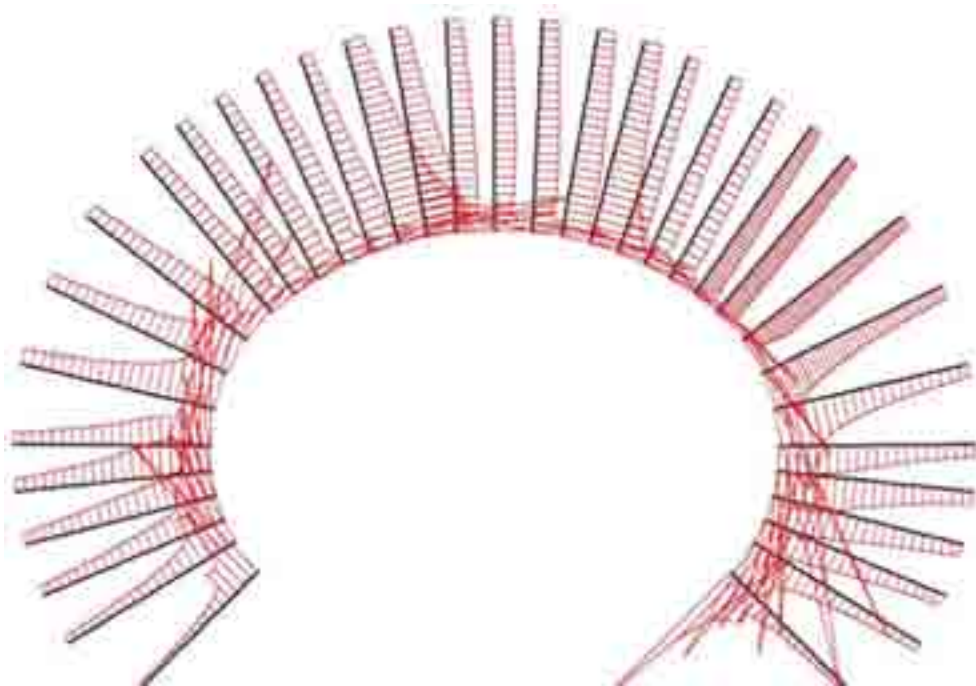
**Figura 31. Desplazamientos**

.... zonas de plastificación ....



**Figura 32. Zonas plastificadas**

.... esfuerzos axiales en bulones ....



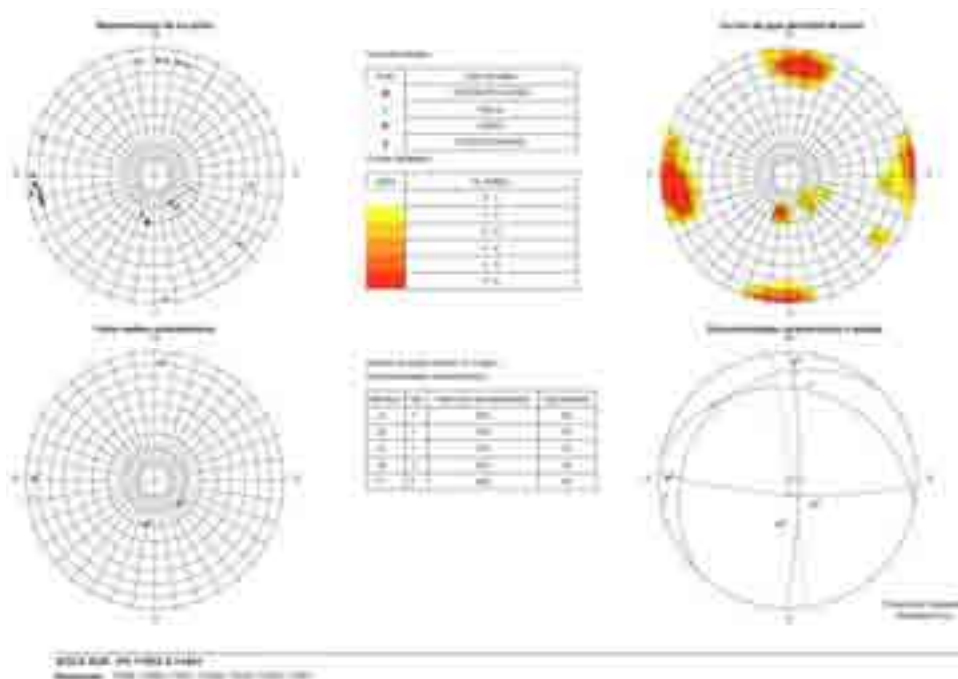
**Figura 33. Tracciones en bulones**

etc.



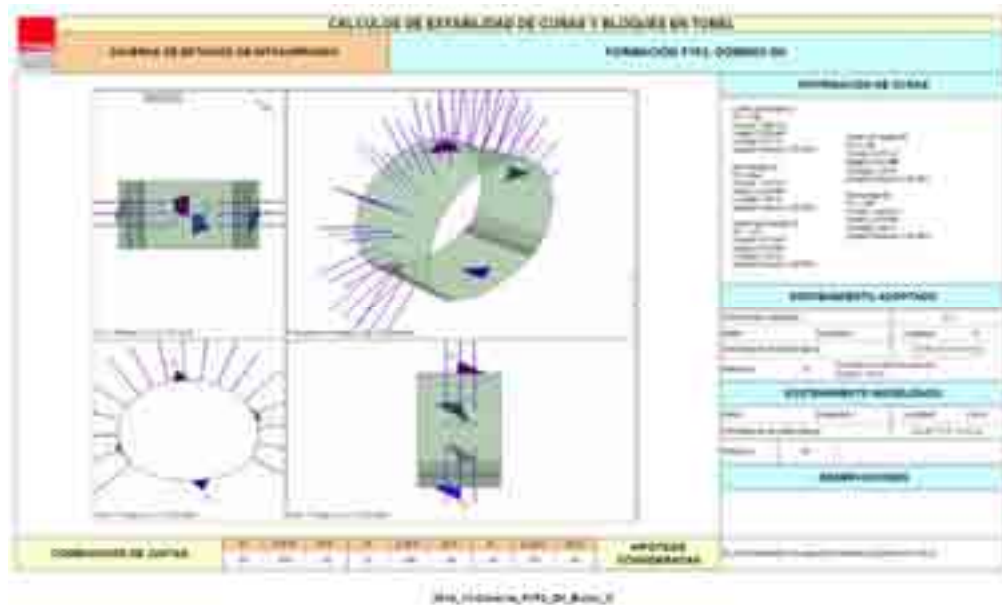
- k) En algunos casos en los que la geometría del modelo o de las diferentes etapas constructivas pueden dar lugar a concentraciones locales de tensiones, de carácter más numérico que real, puede ser conveniente sustituir las zonas afectadas por rótulas para obtener una respuesta más realista del modelo. Y se repiten los cálculos.
- l) Se obtienen los factores de seguridad de los distintos elementos del sostenimiento (hormigón proyectado, bulones, cerchas) y se refuerzan si no son suficientes.
- m) Se realiza el cálculo final con la colocación del revestimiento definitivo, suponiendo, en la hipótesis más conservadora, que el sostenimiento colocado no colabora en nada a la resistencia del conjunto. Se obtienen las tensiones y factores de seguridad del revestimiento, retocándolo si es preciso.
- n) Y este proceso se repite para cada sección tipo geométrica y para cada sección tipo de sostenimiento, ligado a las clases de terreno en que se ha dividido la longitud total de la obra.
- ñ) Queda una comprobación adicional y es la de la capacidad de los bulones dispuestos en el sostenimiento para soportar el peso de las cuñas que se pueden producir, para distintas combinaciones de las litoclasas del macizo rocoso.

A partir de los conocidos diagramas estereográficos obtenidos por medición de la estructura del macizo rocoso en estaciones geomecánicas....



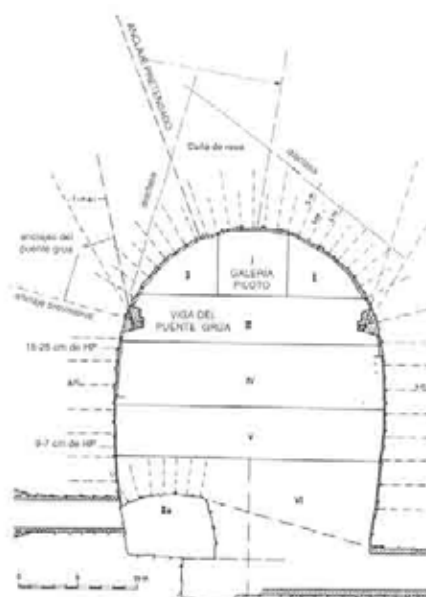
**Figura 34. Diagrama estereográfico. Litoclasas del macizo rocoso**

.... se determinan, mediante un programa informático (en este caso el UNWEDGE), los bloques cuyo movimiento es cinemáticamente posible hacia el interior de la excavación y que no tienen el suficiente coeficiente de seguridad, teniendo en cuenta la resistencia al corte previsible en las diferentes diaclasas.



**Figura 35. Resultado del cálculo de cuñas inestables en la perforación de una caverna**

Dado el tamaño de las cavernas, en muchas ocasiones, es preciso disponer bulones mucho más largos de lo habitual en túneles, e incluso anclajes para soportar las grandes cuñas que se pueden formar, sobre todo si las litoclasas son muy continuas.



**Figura 36. Bulones y anclajes de gran longitud en el sostenimiento de una caverna**

#### 4) CONCLUSIONES

- El diseño de las cavernas sigue los mismos pasos que el de los túneles, pero sus grandes dimensiones y el hecho de que se trata de obras en la que son comparables sus tres dimensiones, introduce la necesidad de analizar más detalladamente los efectos tridimensionales.
- Los cálculos son bastante más laboriosos, no sólo por tenerse que realizar en tres dimensiones (o con sistemas seudotridimensionales), sino también porque su excavación por varias fases (casi siempre muchas más que en los túneles) obliga a dar muchos más pasos.
- Hay que prestar especial atención a la inserción de túneles, galerías de acceso, pozos, etc., en las cavernas, que pueden generar problemas geométricos importantes, con el resultado de la pérdida de las formas adecuadas para una construcción subterránea.
- También es importante analizar detalladamente el comportamiento cinemático de las cuñas de grandes dimensiones que se pueden formar por la combinación de litoclasas del macizo, si tienen mucha continuidad.

No quiero terminar sin agradecer a D. Julián Ferraz (Euskal Trenbide Sarea) y D. Luis Medina (ETS ICCP La Coruña) su autorización para utilizar algunas de las figuras que he mostrado y a mis compañeros de TYPESA, Pedro Ramírez, Alejandro Cantarero, José Luis Arévalo, Jesús Munguira y Cristina Ezquerro, por su valiosa colaboración.

Madrid, 14 de marzo de 2008

Ángel Fernández-Aller