

18 de diciembre de 2012
Bogotá, Cundinamarca, Colombia

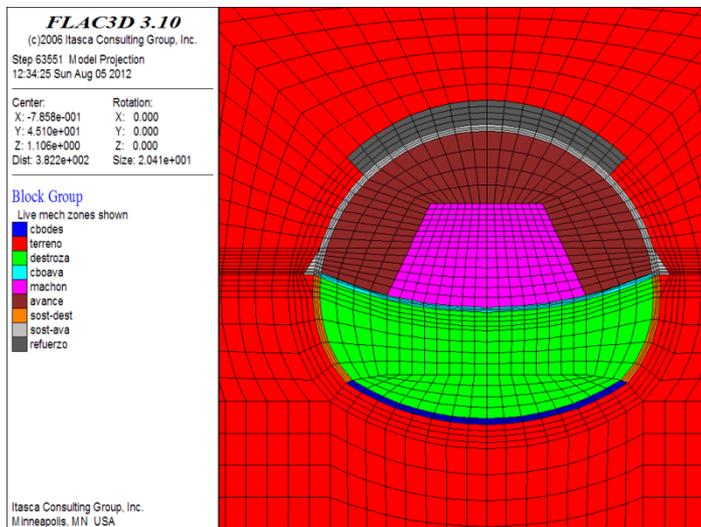
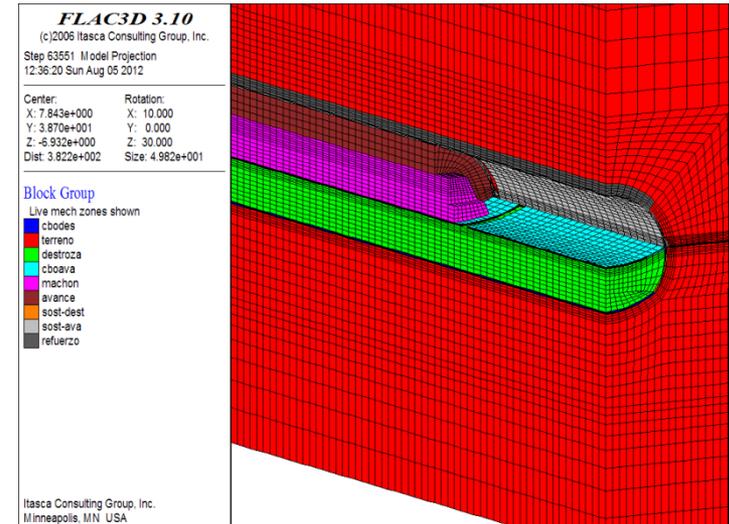
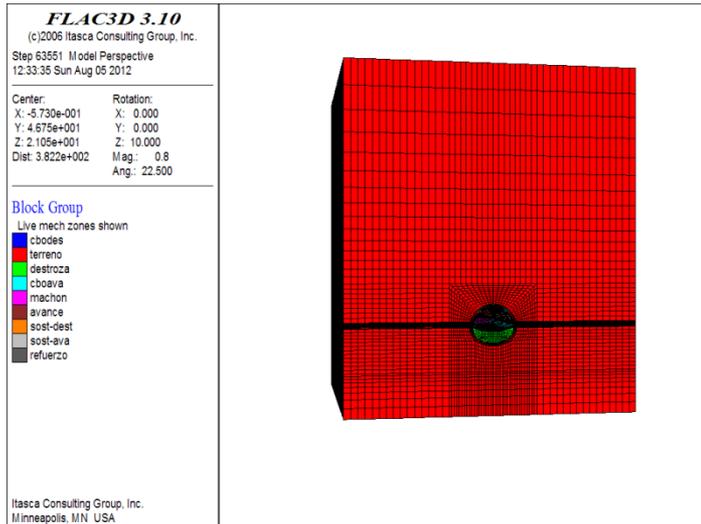
JORNADA ACADÉMICA SOBRE TÚNELES.



TÚNELES EN SUELOS. MODELOS AVANZADOS DE DISEÑO.

TÚNELES EN SUELOS.MODELOS AVANZADOS DE DISEÑO.

- 1. CASO SINGULAR. TÚNEL EN SUELOS. REVESTIMIENTOS ESTANCOS.**
- 2. CASO SINGULAR. TÚNEL EN RELLENOS. MODELO PREDICTIVO.**
- 3. CASO SINGULAR. TÚNEL EN ACUÍFEROS. SIMULACIÓN DE INYECCIONES DE ESTANQUEIDAD.**

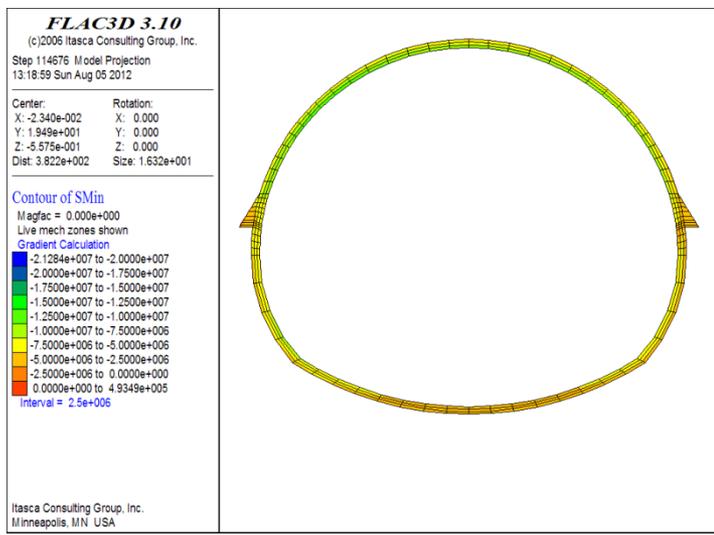
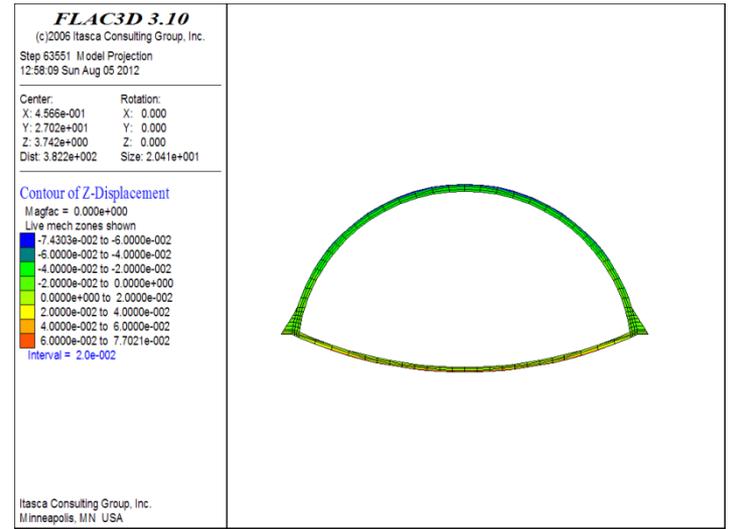
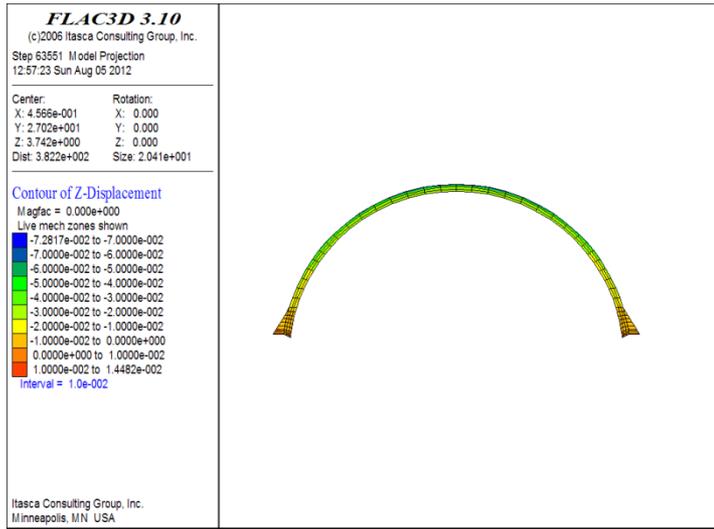


- El túnel se desarrolla en terrenos muy blandos saturados, con niveles freáticos de hasta 65 m.

-Para evitar roturas del frente se ha avanzado al amparo de un paraguas de micropilotes y con machón central.

-Para evitar fallos del apoyo se ha avanzado con contrabóveda muy cercana al frente y con pata de elefante,

- No se han ejecutado bulones para no deteriorar el terreno .



- Estabilidad del apoyo → Pata de elefante y contrabóveda con importante curvatura.

- Importante → continuación estructural pata de elefante y contrabóveda .

EL TÚNEL SE EXCAVA CORRECTAMENTE

DISEÑO DE REVESTIMIENTOS ESTANCOS

El estado tensional sobre el revestimiento dependerá de dos grupos de acciones:

- Terreno:

- Empuje del terreno sobre el sostenimiento.
- Coacción del terreno frente a deformaciones del túnel .

- Agua:

- Empuje del agua sobre el revestimiento.

Los principales factores a tener en cuenta para diseñar el revestimiento son:

- Módulo de deformación del macizo.
- Empuje al reposo.
- Relajación del terreno.
- Contribución del sostenimiento

Se considera fundamental estudiar la envolvente de situaciones más desfavorables al combinarla con los efectos del empuje del agua.

Se recomienda estudiar dos situaciones:

- **Hipótesis 1:** Valores altos de empuje al reposo (k_0), bajos coeficientes de relajación, y empeoramiento del sostenimiento. Se estudia el estado tensional que genera las mayores compresiones en las zonas más débiles del revestimiento, centro de contrabóveda y clave de la bóveda; al relajar poco el terreno y reducir la rigidez del sostenimiento, se carga más el revestimiento, provocando un mayor axil en las zonas antes indicadas. Análogamente se estudian las máximas tracciones en los hastiales.
- **Hipótesis 2:** Valores bajos del k_0 , altos coeficientes de relajación y no empeoramiento del sostenimiento. Se minimiza el empuje del terreno sobre el revestimiento, reduciendo el axil, por lo que el cálculo tensodeformacional de esta hipótesis tiene en cuenta prácticamente solo el empuje del agua sobre el revestimiento.

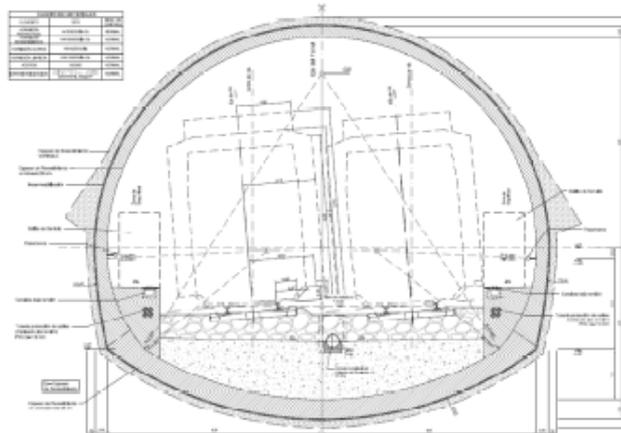


Ilustración 2. Sección tipo I

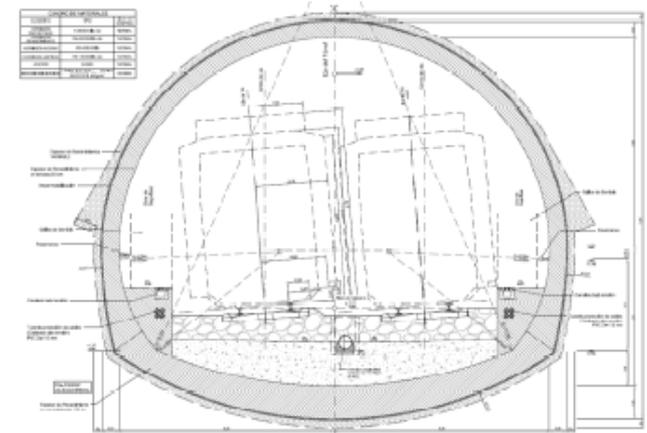


Ilustración 4. Sección tipo III

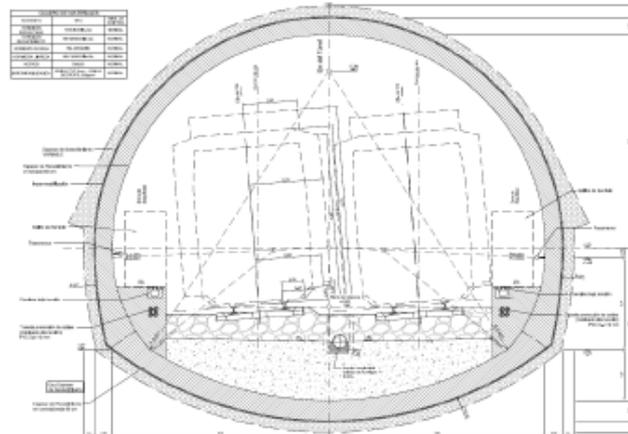


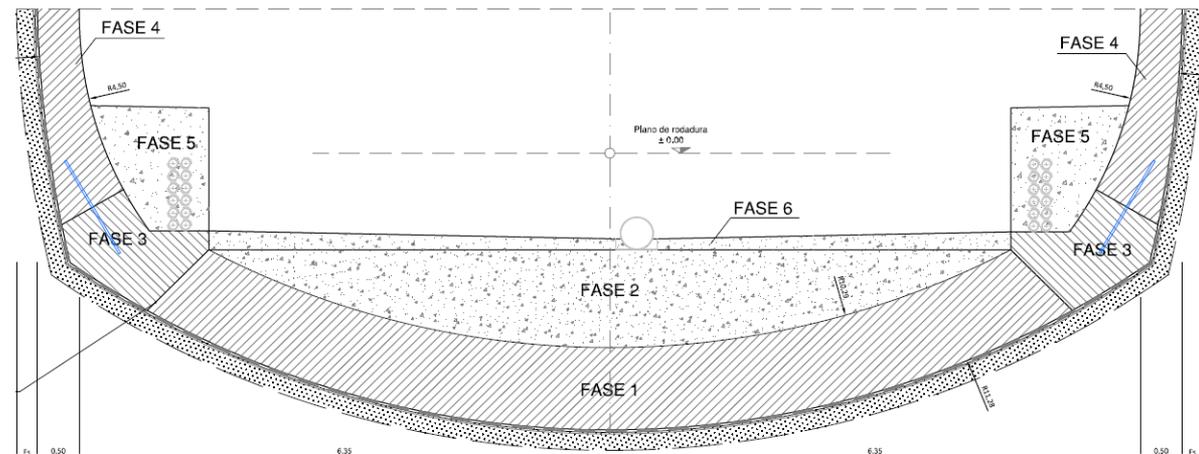
Ilustración 3. Sección tipo II

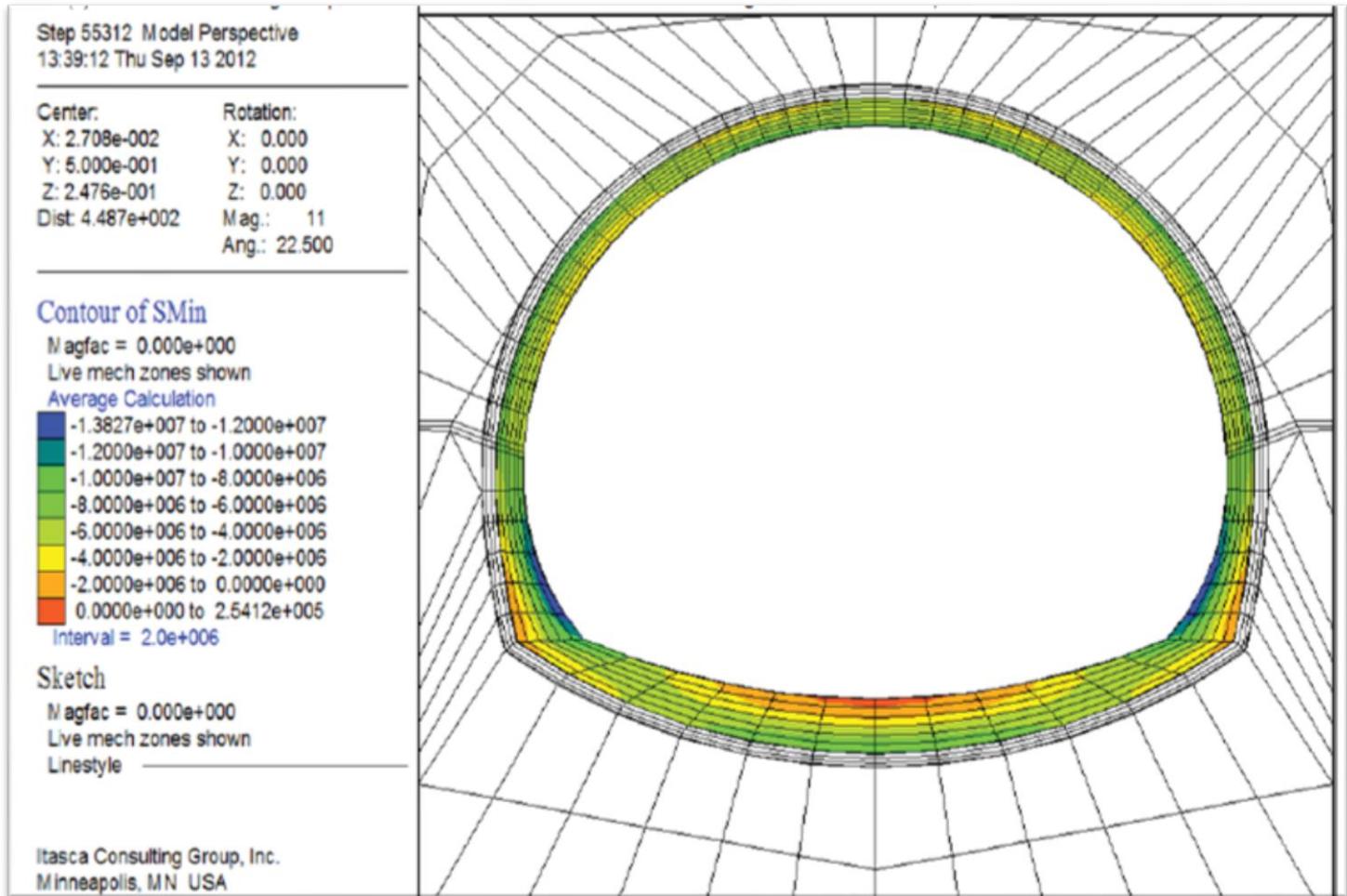
A continuación, se presenta un cuadro en el que se indica la tramitación realizada para el diseño del revestimiento del túnel.

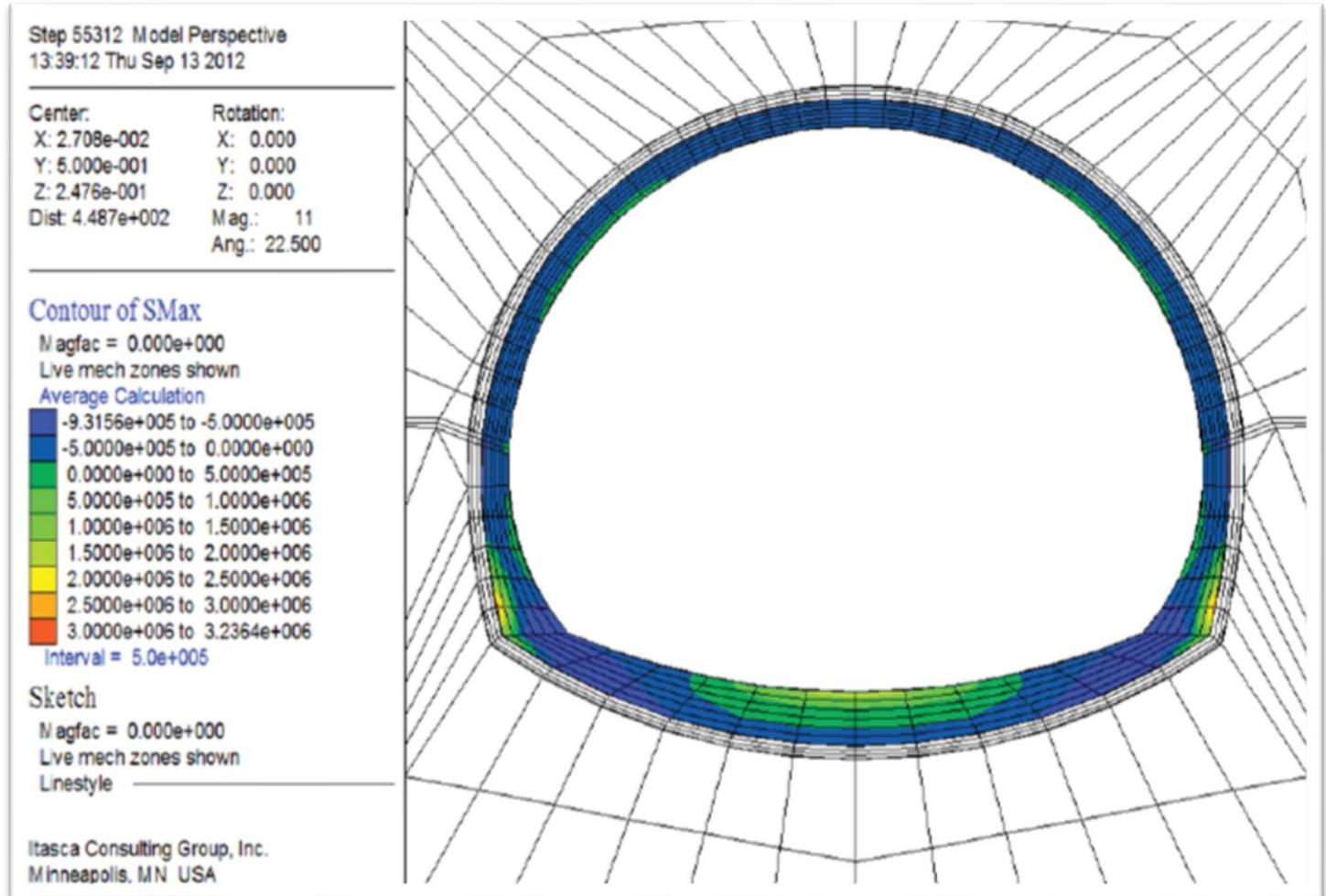
PK INICIAL	PK FINAL	LITOLOGÍA	ALTURA DE TIERRAS DE CÁLCULO (m)	ALTURA DEL NIVEL FREÁTICO DE CÁLCULO (m)	TIPO DE SECCIÓN
1+360	1+496	Ceg-met	23	16	SECCIÓN I
1+496	2+145	Tog	52.5	20	SECCIÓN I
2+145	2+413	Tog	53	33	SECCIÓN II
2+413	2+734	Tog	84	64.5	SECCIÓN III

Tabla 2. Tramitación del túnel

- * Los modelos volumétricos representan con mayor rigor que los modelos de barras el reparto tensional a lo largo de la sección estructural.
- * Es recomendable representar el antifunicular de cargas para estudiar el reparto tensional con minuciosidad.
- * Se deberá estudiar el esfuerzo rasante entre los hormigones dispuestos en diferentes etapas, contrabóveda/bóveda. Pueden ser requeridos armados para favorecer el rasante.
- * Se deberá estudiar la validez de la sección a esfuerzos cortantes.

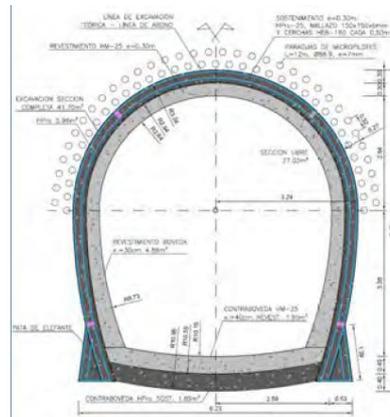
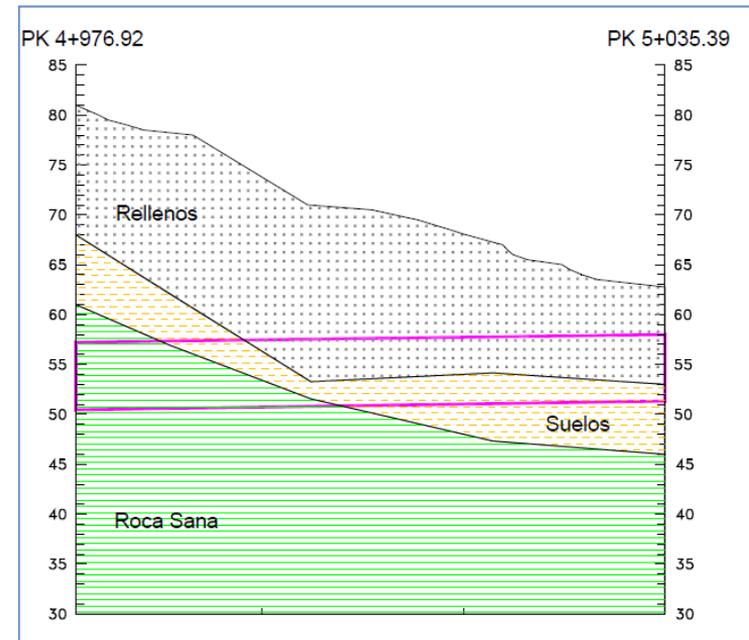






3. MODELOS AVANZADOS DE CÁLCULO. Túnel en rellenos. Modelo predictivo

- Túnel ferroviario de 1.036 m excavado en rellenos en 50 m de su emboquille.
- Cobertera máxima en rellenos: 35 m.
- Propiedades geomecánicas del terreno atravesado:
 - Densidad saturada = 2,30 g/cm³.
 - Cohesión = 0,05 kg/cm².
 - Ángulo de rozamiento = 30°.
 - Módulo de deformación = 300 kg/cm².



- El túnel se desarrolla por debajo de la carretera AP 8, que es una de las principales entradas a Bilbao .
- El desconfinamiento del frente junto con el bajo módulo de deformación de los rellenos obliga a realizar una exhaustiva auscultación de la ladera.
- Los parámetros resistentes deben ajustarse en el modelo mediante el estudio del comportamiento de la ladera según se procede a la excavación del túnel.

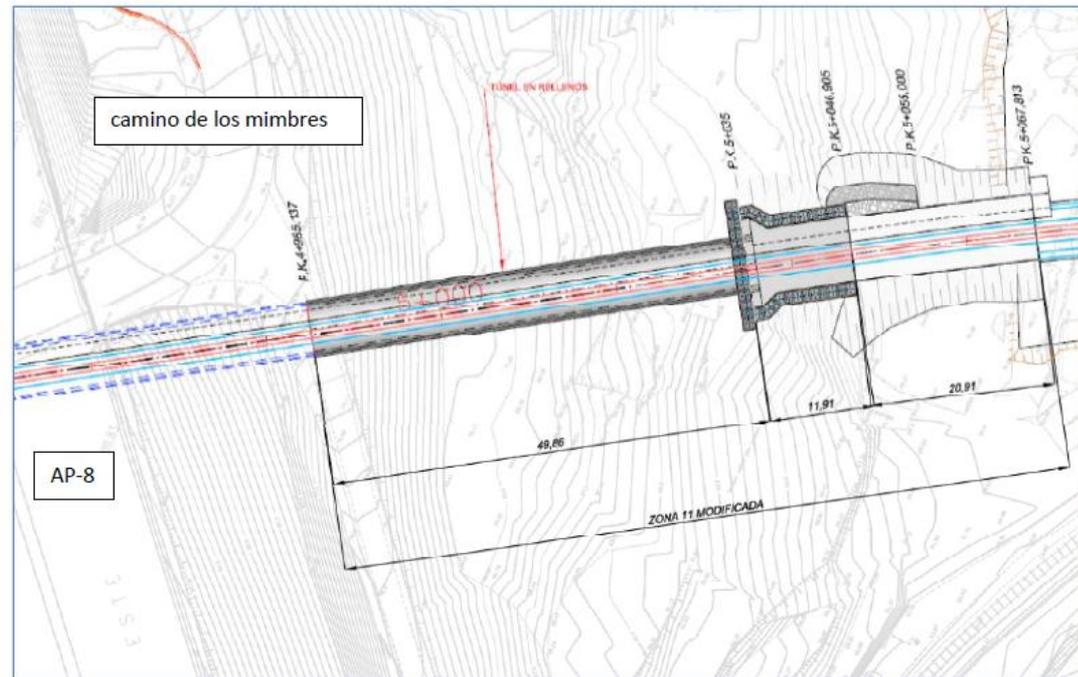
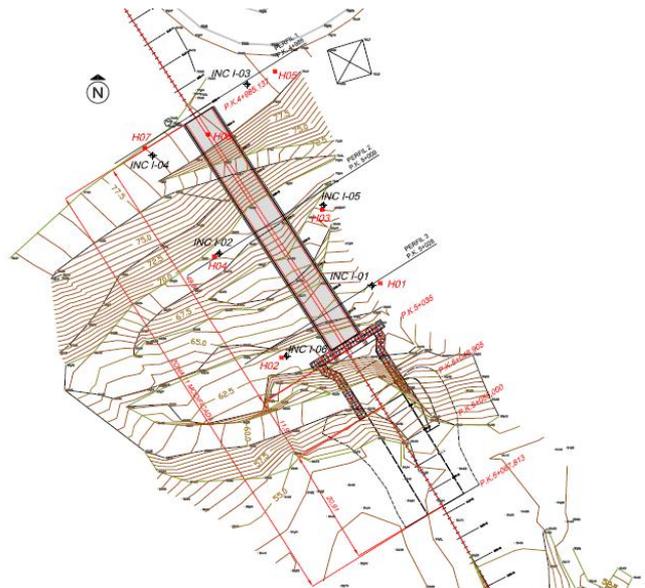
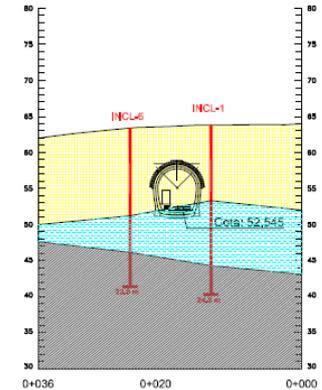
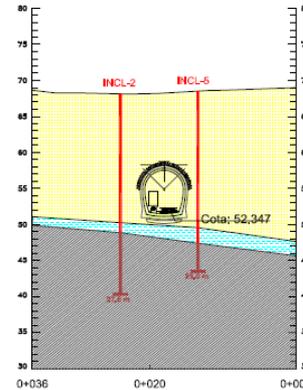
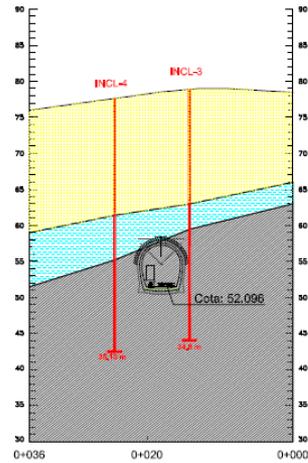
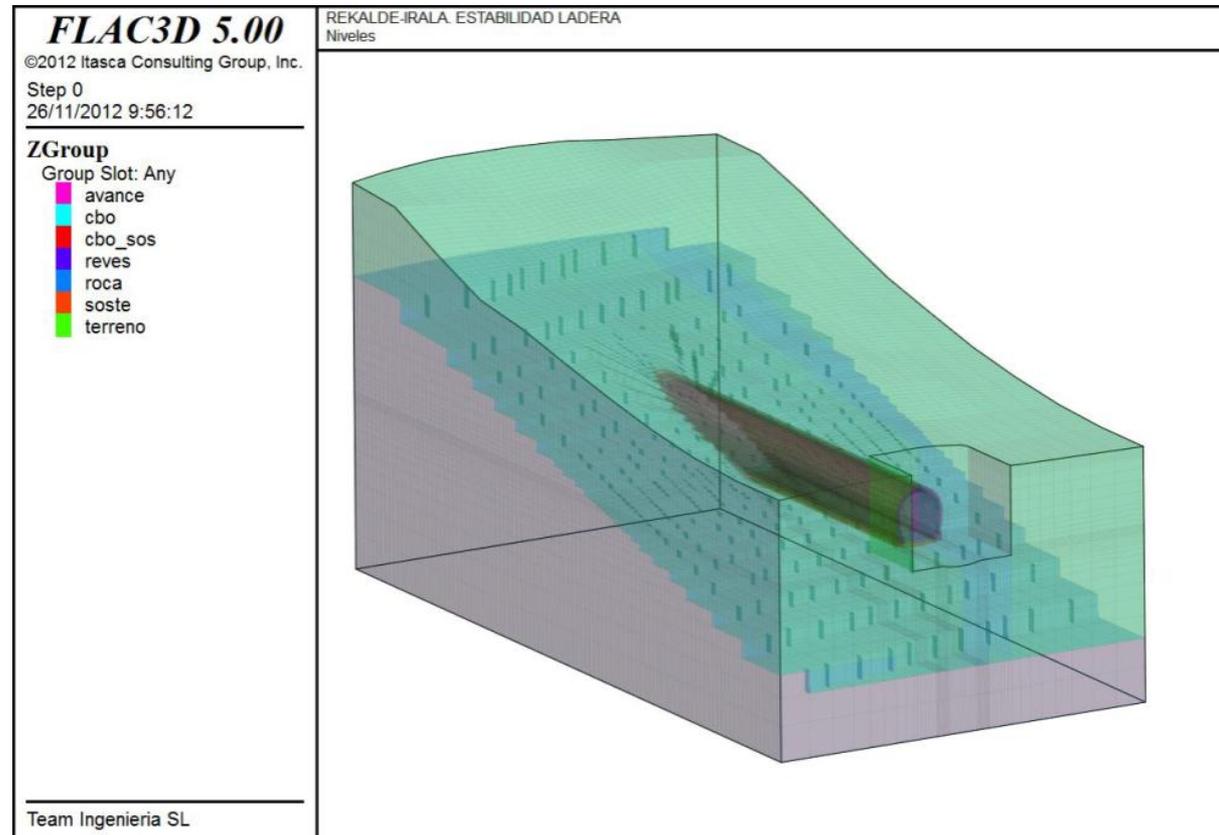


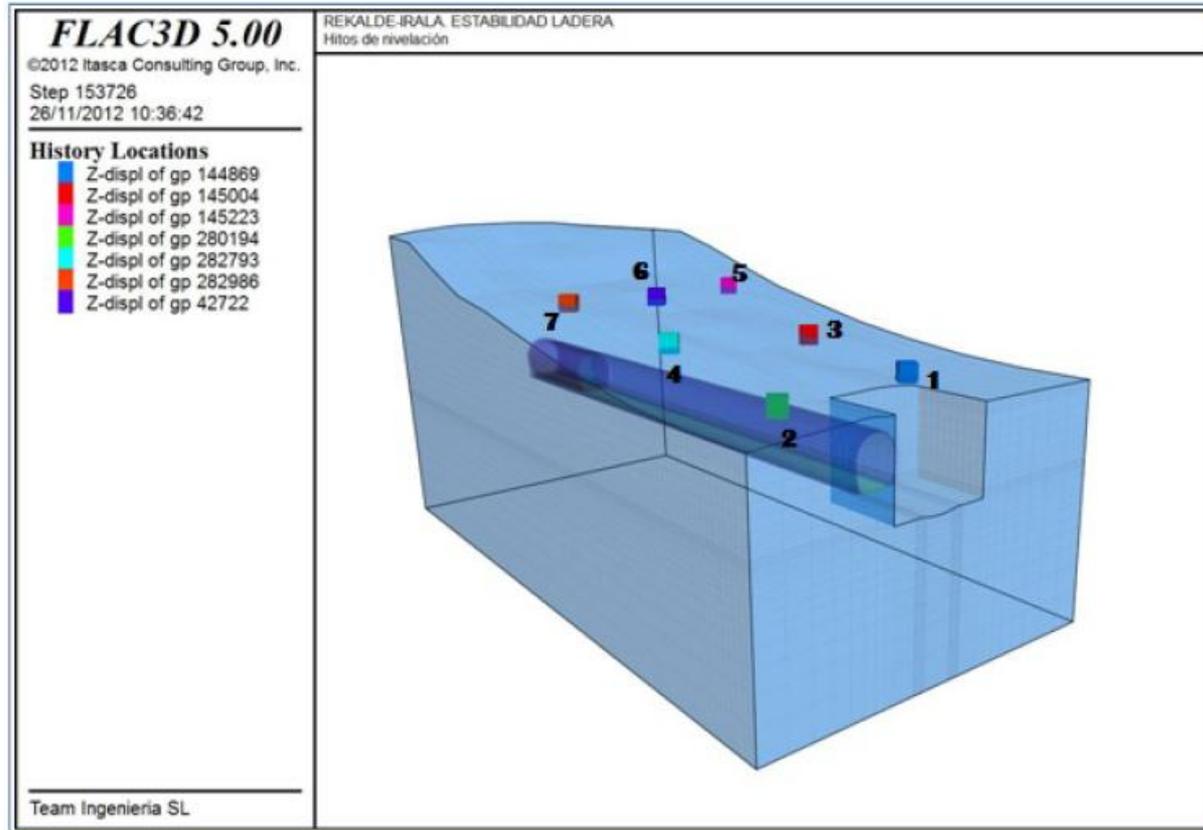
Ilustración 1. Zona afectada



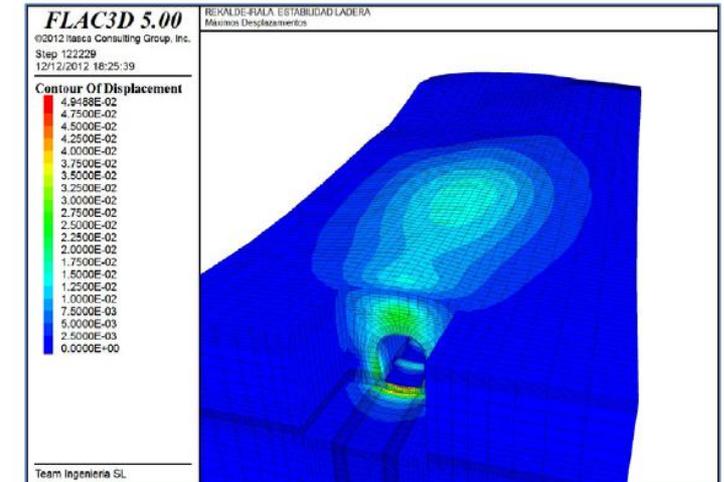
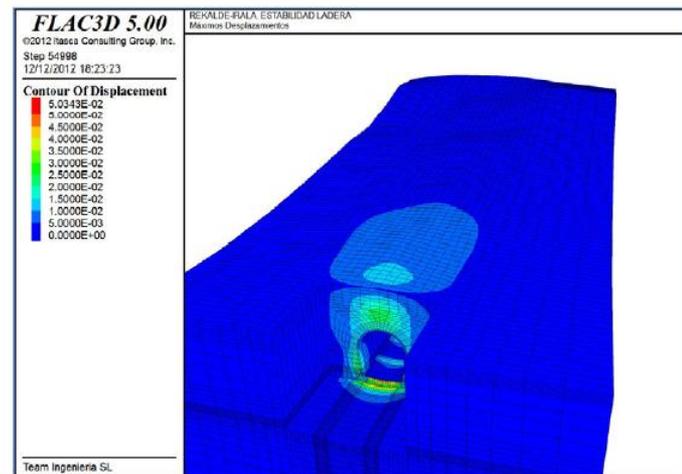
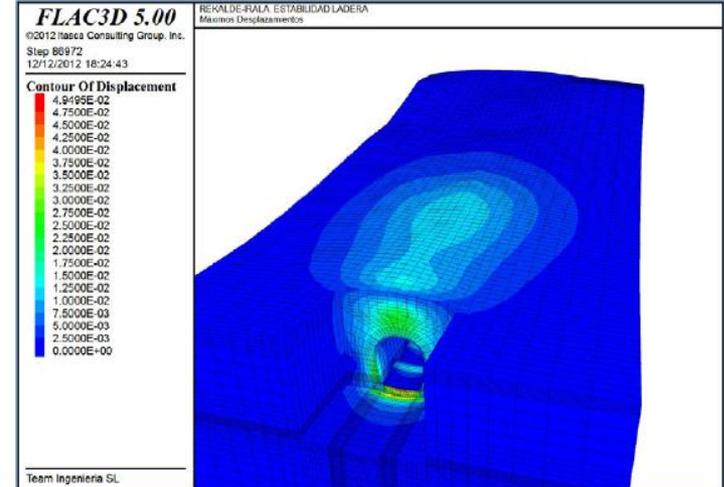
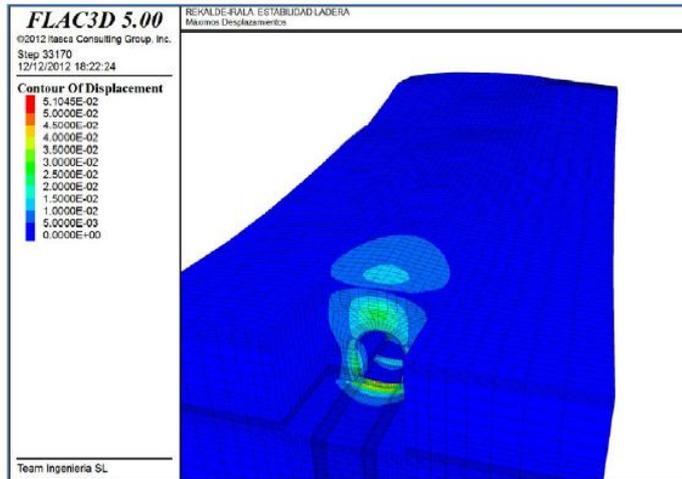
- Para controlar la respuesta del terreno durante las fases de excavación del túnel se han dispuesto en la ladera 6 inclinómetros y 8 hitos topográficos.
- La perforación para la ejecución de los inclinómetros ha permitido reubicar las litologías y testificar el terreno .
- Se han instalado piezómetros para controlar la variación de los niveles freáticos.

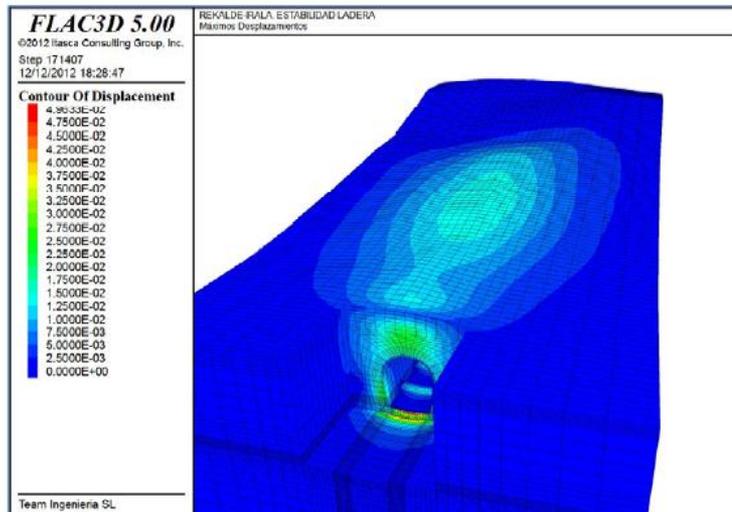
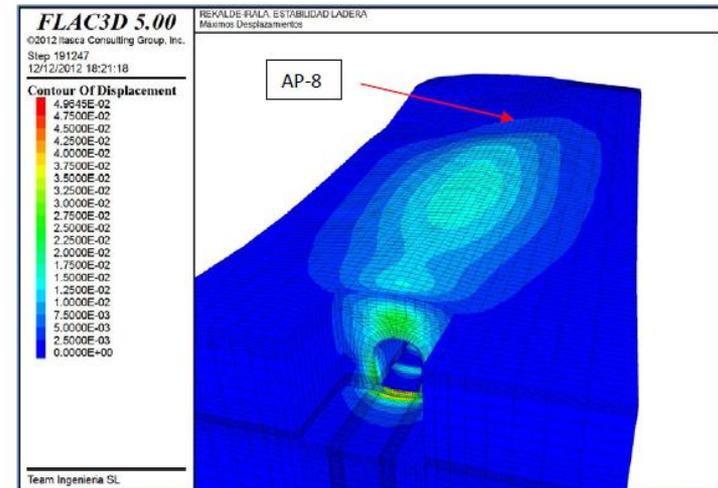
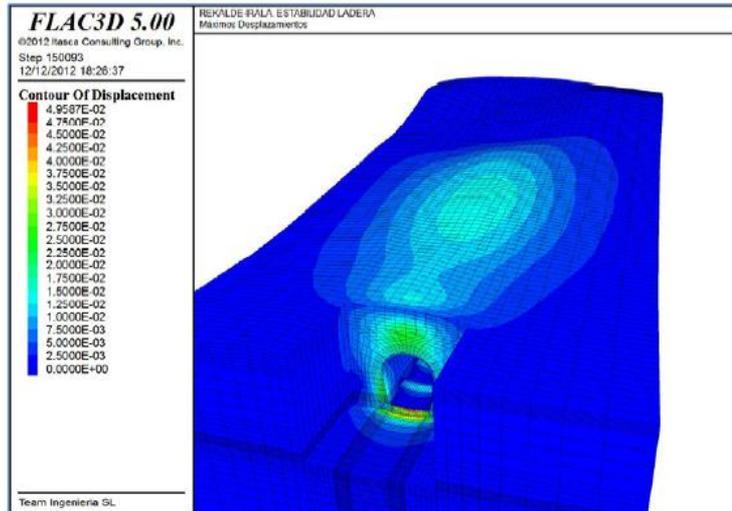


- Se ha reproducido en el programa Flac 3D la orografía real de la ladera con las litologías que la conforman.
- Se ha reproducido también la geometría del emboquille de ataque.

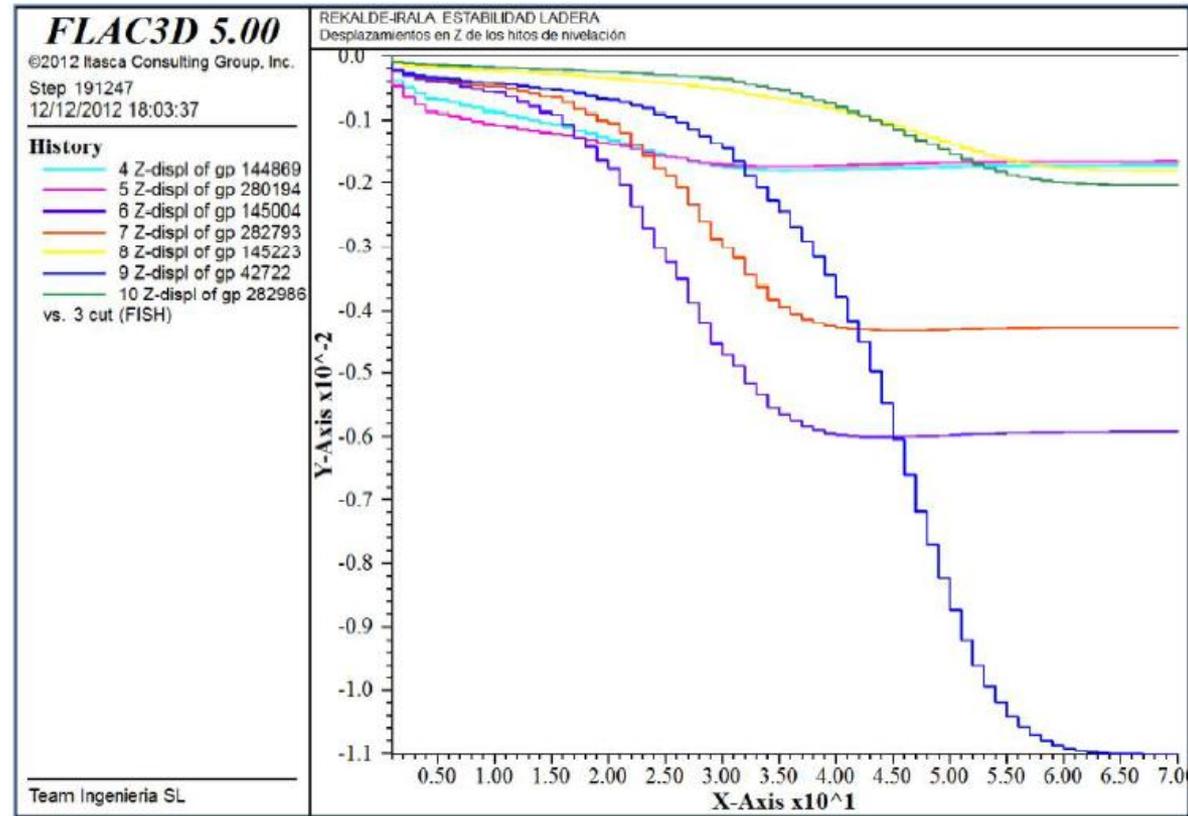


- Se han fijado en el modelo los puntos de control topográfico y los inclinómetros en la posición exacta en la que se encuentran emplazados en la ladera.

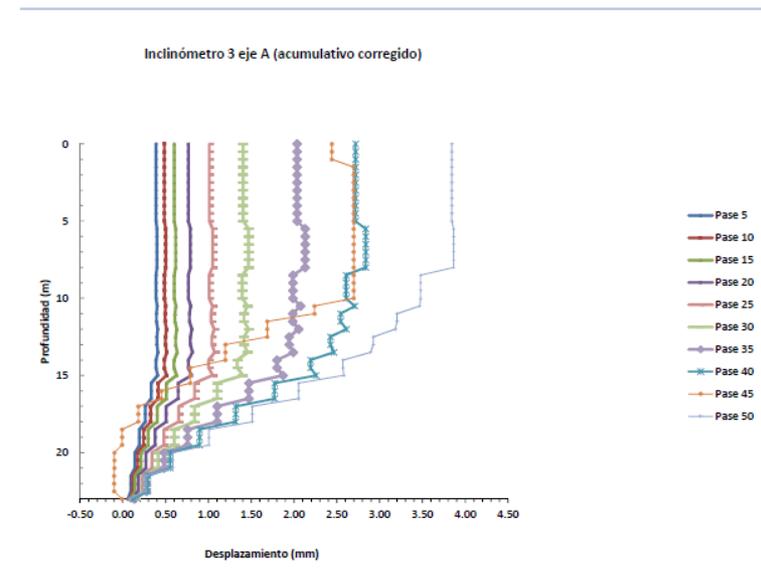
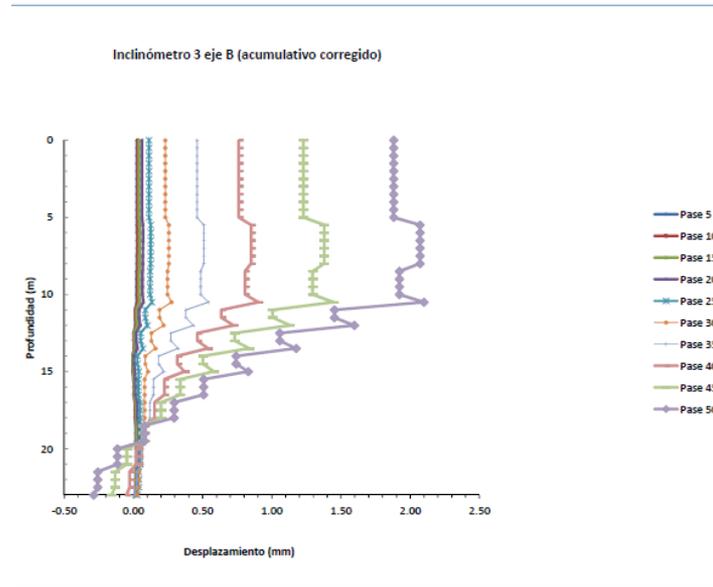




- Se ha simulado la excavación del túnel, tal y como se ha previsto en el Proyecto.
- Se ha estudiado la evolución de los puntos de control cada 10 pases, que equivalen a 10 m de avance. Validándose la solución.
- En función de la respuesta real del terreno durante las fases de excavación, se ajustarán los parámetros resistentes de la ladera y se validará en su caso de nuevo el proceso constructivo.



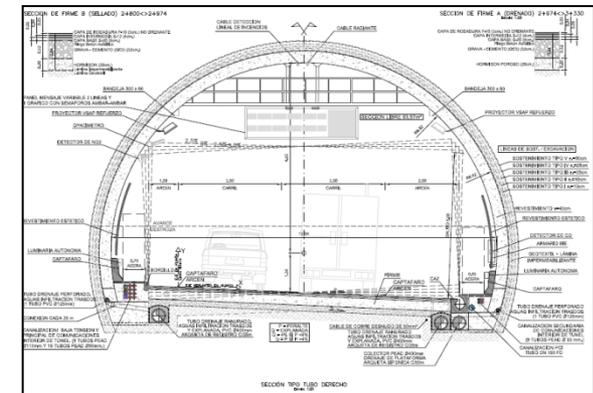
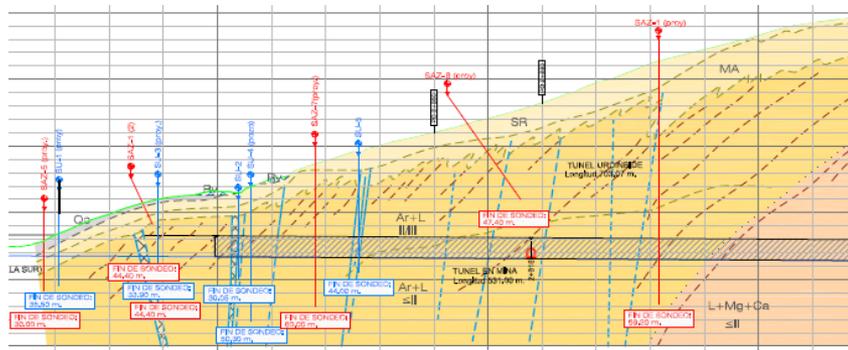
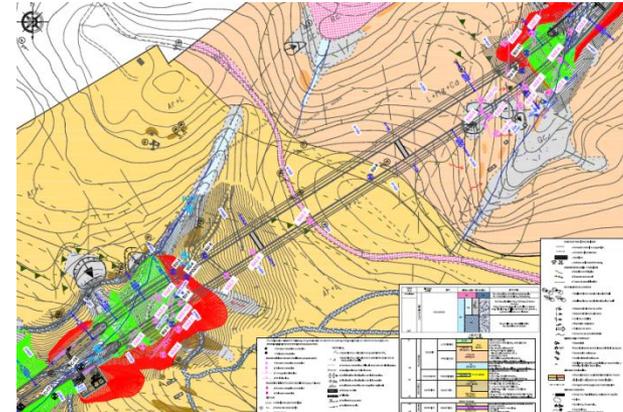
- En la tabla se muestra la previsión de movimientos verticales de los hitos topográficos. Se observa que se estabilizan una vez ha pasado la sección estructural por su vertical.



- En la tabla se muestra la previsión de movimientos horizontales en ambas direcciones de un inclinómetro de control, durante las correspondientes fases de excavación.
- Diariamente se realizará un control de que los inclinómetros reales no superen estos desplazamientos.
- En el caso de que se superen los desplazamientos previstos se reajustará el modelo y/o se realizarán actuaciones de refuerzo.

3. MODELOS AVANZADOS DE CÁLCULO. Túnel en acuíferos. Simulación de inyecciones de estanqueidad.

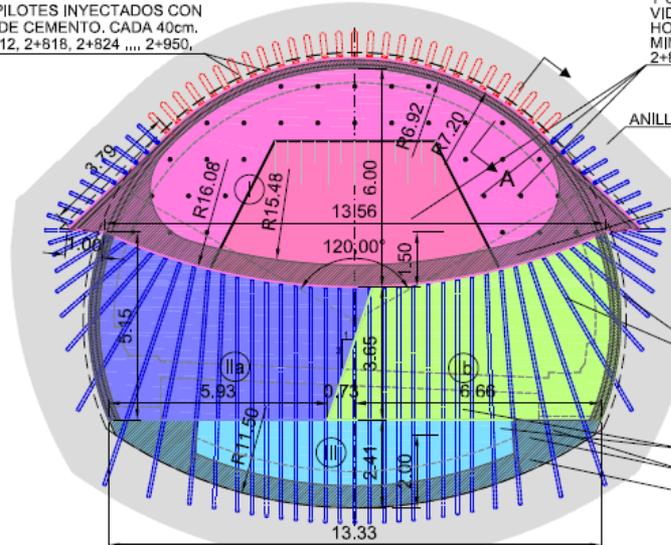
- Túnel carretero de 600 m excavado en acuíferos colgados en 100 m de su boca Norte.
- El túnel atraviesa unas areniscas muy duras intercaladas con unas areniscas muy fracturadas saturadas de agua.
- De este acuífero se abastece a una casas colindantes y puede estar conectado con otro de mayor entidad que afecta a una gran región.



SECCIONES TRANSVERSALES

Escala 1:100

ESTACION C (25Uds.) TUNEL IZQUIERDO
ESTACION C (29Uds.) TUNEL DERECHO
PARAGUAS DE MICROPILOTES
Ø150/88,9mm e=8mm LONG. 12,00m
SOLAPE MINIMO 6.00m INCLINADO 3°
29 MICROPILOTES INYECTADOS CON
LECHADA DE CEMENTO. CADA 40cm.
2+806, 2+812, 2+818, 2+824 2+950.



REFUERZOS DEL FRENTE;
CON CONTRABOVEDA,
CON MACHON CENTRAL. CADA PASE
Y CON BULONES DE FIBRA DE
VIDRIO DE LONGITUD 15,00m
HORIZONTALES, SOLAPE
MINIMO 5m, 32Uds. (14 SECCIONES)
2+810, 2+820, 2+830... 2+940

ANILLO DE INYECCION

HM-30 e=60cm PROVISIONAL EN FASE DE
SOSTENIMIENTO, DISTANCIA MAX. AL FRENTE 15m

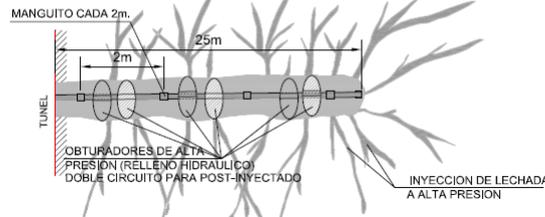
ESTACION C (24Uds.) TUNEL IZQUIERDO
ESTACION C (28Uds.) TUNEL DERECHO
INYECCIONES DE IMPERMEABILIZACION
DE LECHADA DE CEMENTO MEDIANTE
MANGUITOS LONGITUD 25,00m
SOLAPE MINIMO 6.00m INCLINADO 15°
59 TALADROS Ø80mm. CADA 40cm.
2+806, 2+812, 2+818, 2+824 2+944.

MATERIAL SELECCIONADO

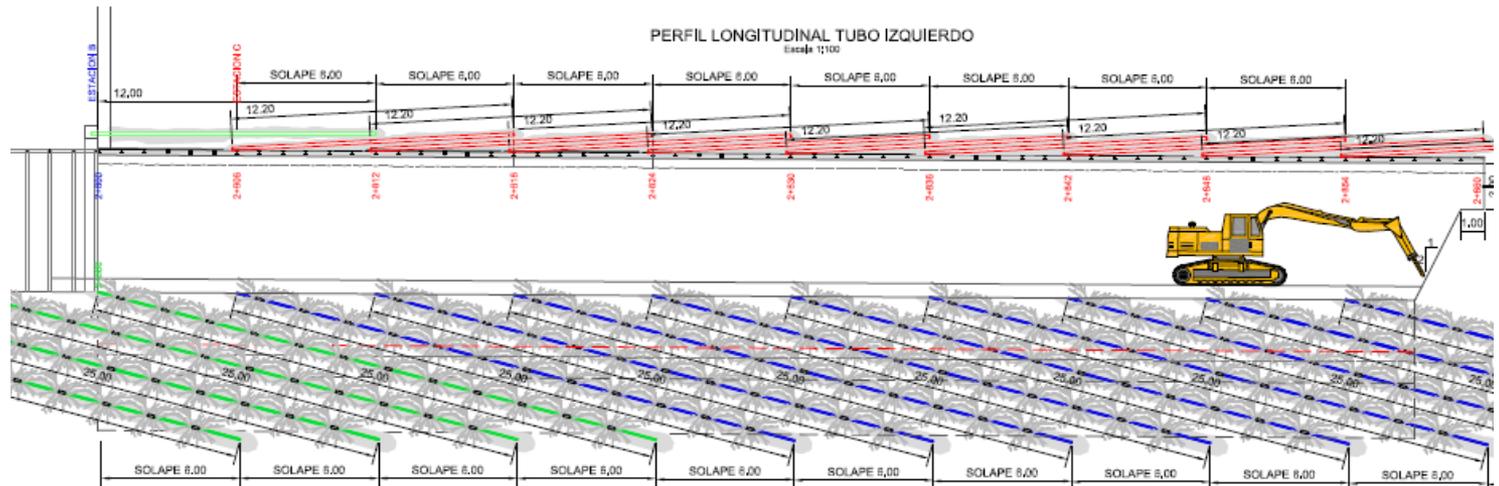
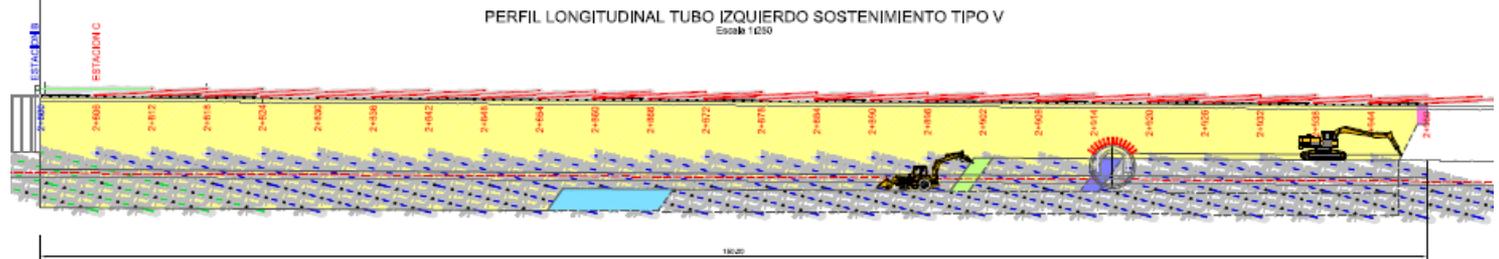
HM-30 e=40cm EN FASE DE REVESTIMIENTO
HM-30 e=60cm EN FASE DE SOSTENIMIENTO

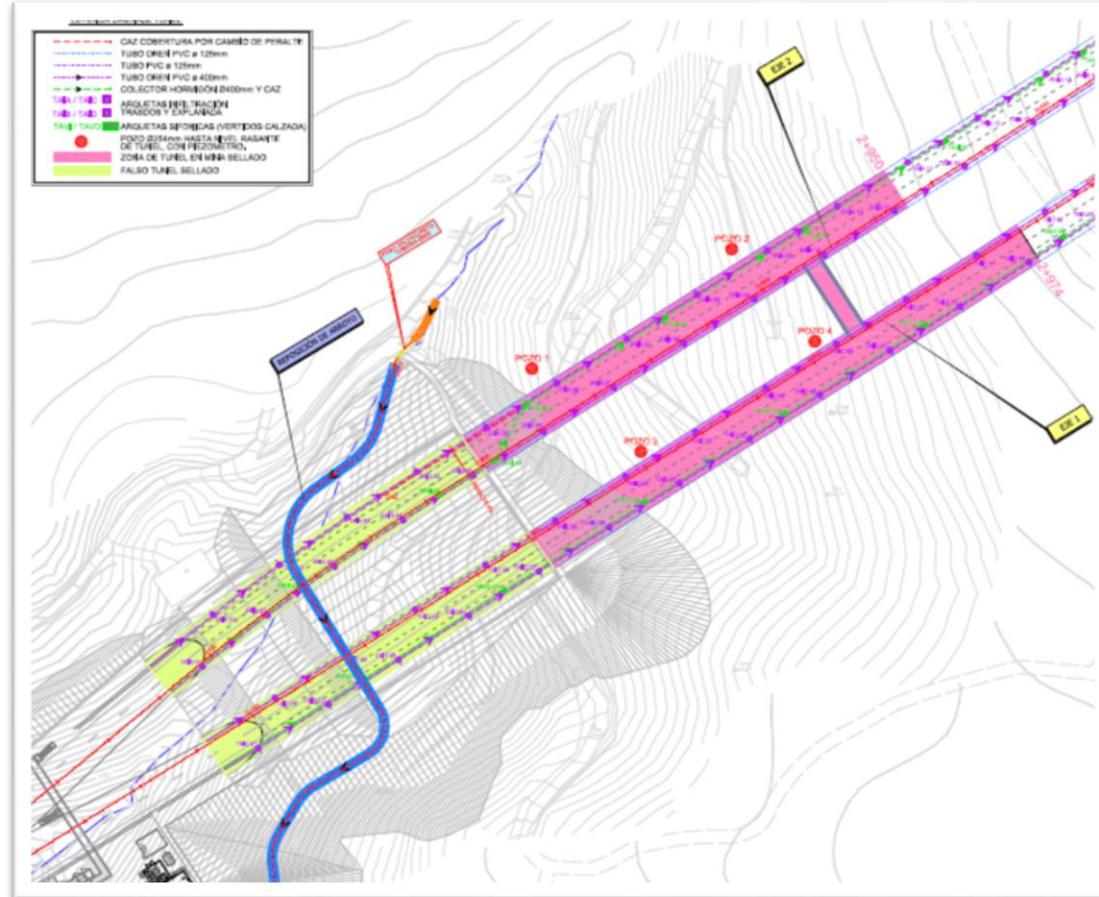
INYECCIONES DE IMPERMEABILIZACION

Sin Escala

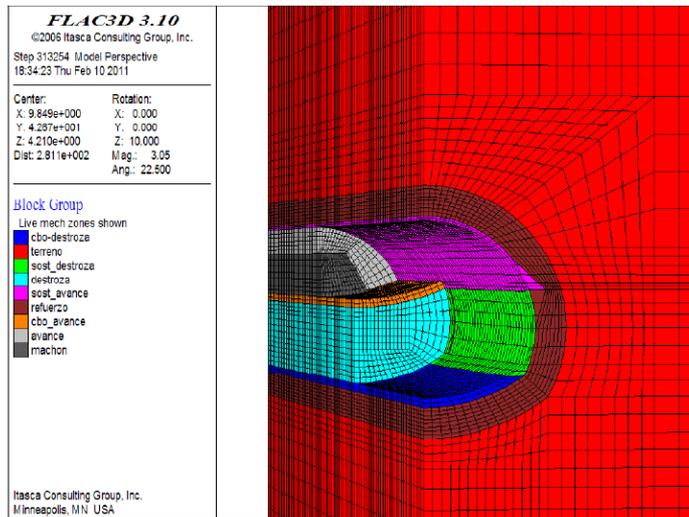
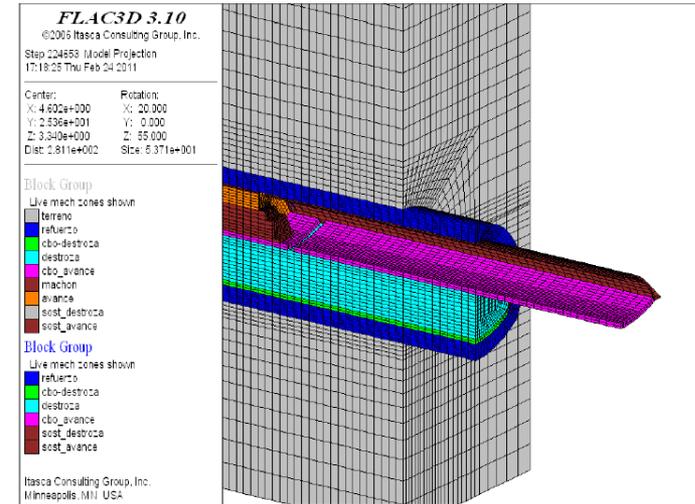
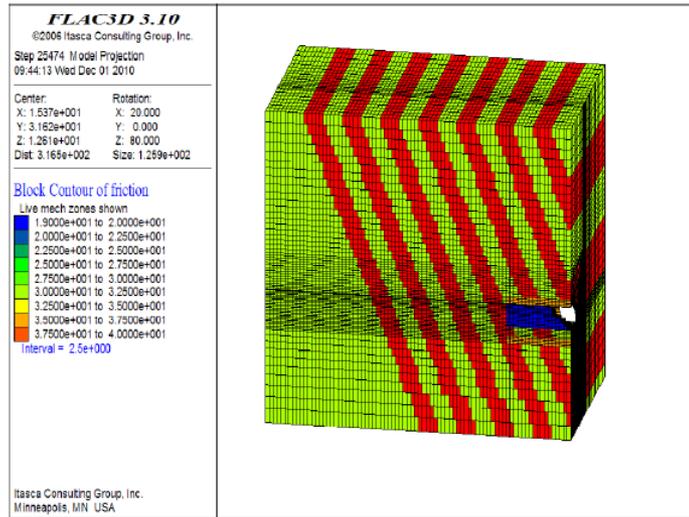


- **La Autoridad Medioambiental obliga a hacer estanco el túnel tanto durante su excavación cómo a largo plazo.**
- **Se obliga a limitar el caudal de drenaje por el túnel a 4 l/s.**
- **Consecuentemente se diseñan inyecciones de lechada por delante del frente. En el caso de que se superen estos caudales se parará la producción y se reinyectará.**





- Para el control de la depreciación de los niveles se instalarán piezómetros.
- Si se observa afección importante se bombeará el agua para seguir manteniendo el abastecimiento.



- Para reproducir el estado tensional del túnel y validar el proceso de construcción se realiza un modelo en FLAC 3D, que se ajusta fielmente a la realidad y que deberá reajustarse durante la excavación del túnel.
- En el modelo se reproduce también la mejora del terreno como consecuencia de las inyecciones perimetrales y el comportamiento hidrogeológico del macizo.
- También se reproducen los elementos de estabilidad del frente y del apoyo.

CONCLUSIONES

- **LOS MODELOS AVANZADOS QUE SE EMPLEAN EN EL DISEÑO DE TÚNELES SON UNA HERRAMIENTA INDISPENSABLE PARA EL CORRECTO DIMENSIONAMIENTO DE UN TÚNEL SINGULAR.**
- **ESTOS MODELOS REPRESENTAN CON GRAN FIDELIDAD LAS DEFORMACIONES, ESTADOS TENSIONALES Y COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL TERRENO.**
- **ESTOS MODELOS SE DISEÑAN Y SE TRABAJAN A PARTIR DE DATOS DEL TERRENO QUE DEBEN SER REAJUSTADOS PARA PREDECIR CORRECTAMENTE EL COMPORTAMIENTO DEL TÚNEL .**
- **LA AUSCULTACIÓN DISEÑADA DEBE AJUSTARSE LO MÁS FIELMENTE A LOS REQUISITOS DE CONTROL DEL TÚNEL.**
- **SU SEGUIMIENTO ES DETERMINANTE PARA AJUSTAR LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS , EN ESPECIAL LOS VINCULADOS A LA PERMEABILIDAD DEL TERRENO Y A SU MÓDULO DE DEFORMACIÓN.**