

Master Universitario en Túneles y Obras Subterráneas



ÁREA: C6
MÓDULO: CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

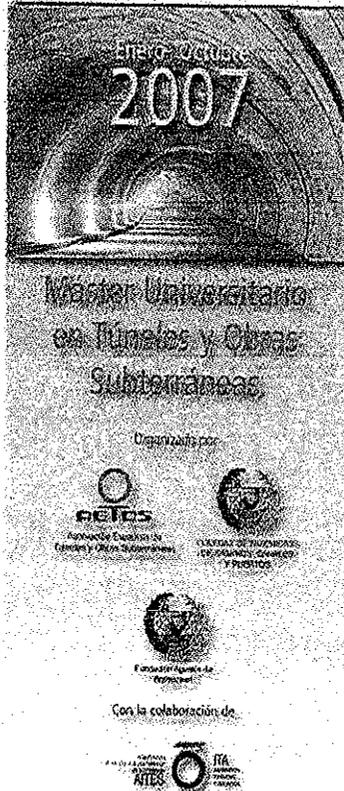
TERRENOS KARSTIFICADOS Y TÚNELES

PONENTES: Davor Simić

DR. I.C.C.P.
FERROVIAL

Día: 28/05/07

Hora: 16:00 a 18:00



Area C : construcción

TÚNELES EN MACIZOS KÁRSTICOS

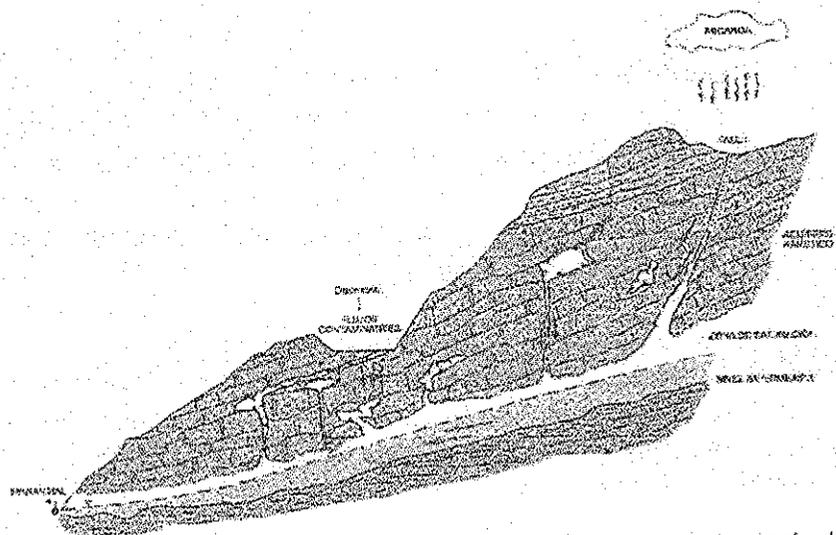
Davor Simic



FENÓMENO KÁRSTICO

- Proceso geológico de disolución de rocas solubles.
- La intensidad de la disolución depende de:
 - Roca matriz: rocas carbonatadas (calizas) o yesíferas.
 - Discontinuidades del macizo: existencia de fallas o diaclasas de alta permeabilidad.
 - Hidrología: nivel piezométrico y condiciones de contorno (estratos impermeables) que favorezcan la circulación de agua.

MEDIO ACUÍFERO KÁRSTICO HETEROGÉNEO. CIRCULACIÓN DEL AGUA SEGÚN FRACTURACIÓN Y DESARROLLO DE KARST



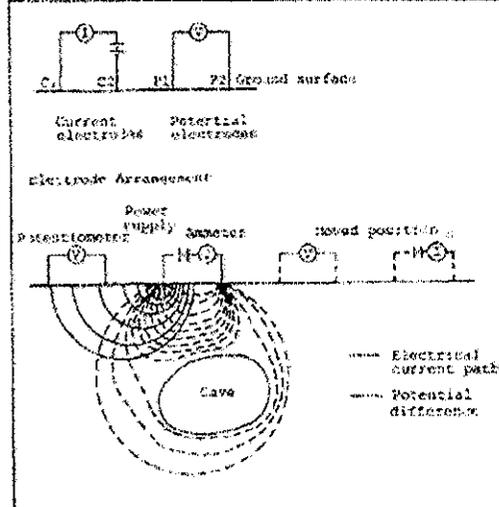
DETECCIÓN GEOFÍSICA DEL KARST

MÉTODO	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES
GEORRADAR	Emisión de ondas de radar contra el terreno mediante antenas. Detecta muy bien los huecos vacíos.	Sólo funciona bien a profundidades someras. Alta resolución. Genera planos en planta o perfiles.
TOMOGRFIA ELÉCTRICA	Inyección de corriente continua en el terreno mediante electrodos. Se mide la resistencia eléctrica del terreno, pudiendo detectar cuevas vacías (alta resistencia) o llenas de agua o arcillas (baja resistencia).	Funciona adecuadamente tanto a poca como a gran profundidad. Genera perfiles longitudinales y es capaz de distinguir el tipo de relleno de la cueva.
MICROGRAVIMETRÍA	Medición del campo gravitatorio local. En las zonas con cuevas la gravedad es menor.	Funciona bien tanto en zonas profundas como someras, pero la topografía de la zona debe ser suave. Sólo detecta cuevas vacías.
POTENCIAL ESPONTÁNEO	Medición del potencial eléctrico del terreno. La circulación de agua subterránea genera potenciales eléctricos detectables.	Funciona tanto para grandes profundidades como someras, pero sólo detecta el karst que está absorbiendo agua.
RESONANCIA ACÚSTICA	Se introducen altavoces dentro de la cueva y se detecta en superficie el sonido con la ayuda de geófonos.	Funciona a profundidades someras. Requiere que la cueva tenga acceso para introducir los altavoces. Alta resolución. Proporciona planos en planta.
DIAGRAFÍA CROSS-HOLE	Se emiten ondas sísmicas en un sondeo, y son recogidas en otro cercano. Si aparece una cueva se detecta una disminución de la velocidad sísmica medida.	Funciona muy bien a cualquier profundidad, pero requiere que los sondeos estén muy próximos el uno al otro. Alta resolución. Proporciona perfiles verticales.

DETECCIÓN GEOFÍSICA DEL KARST

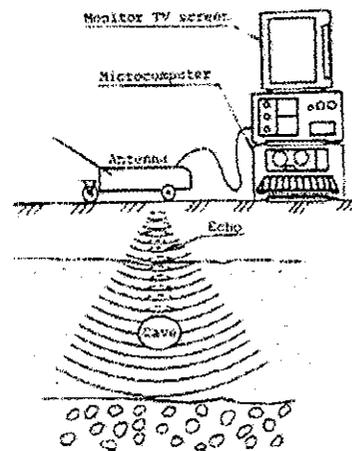
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

All ground strata possess a characteristic value of specific electrical resistivity. The approximate depth and scale of a cave is inferred by finding the distribution of specific electrical resistivity in the ground by measurement from the surface and detecting the area of anomaly in this distribution of specific electrical resistivity resulting from the effect of the cave.



GEORRADAR

Utilizing the property that a radio wave will generate a reflected wave at the boundary between materials in the ground (cave or buried object) with differing electrical properties, a cave below the tunnel floor is located from the horizontal position where the reflected wave was generated and the time required for the reflected wave to reach the antenna.



TÚNELES EN TERRENOS KÁRSTICOS

Aspectos de estabilidad y seguridad

- Control del agua subterránea.
- Cruce de cavidades: vacías, rellenas de arcilla, con carga de agua

PARTICULARIDADES DE LOS MACIZOS KÁRSTICOS

- Alto coeficiente de infiltración de las aguas exteriores.
- Flujo filtrante no lineal por la alta permeabilidad.
- Mantenimiento de la alta permeabilidad a grandes profundidades.
- Posibilidad del desarrollo de extensas cuencas de almacenamiento.
- Caminos de filtración irregulares y heterogéneos a favor de conductos kársticos de gran transmisividad que actúan de colectores de la roca adyacente menos fracturada de menor permeabilidad

POSIBLES MODELOS HIDROGEOLÓGICOS DE TÚNELES EN MACIZOS KARSTICOS (I)

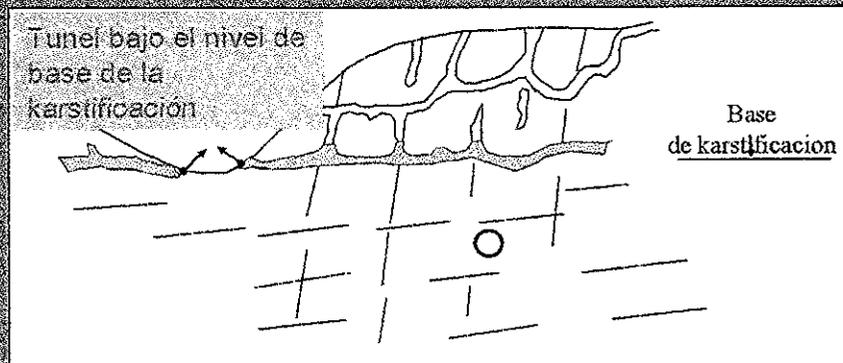
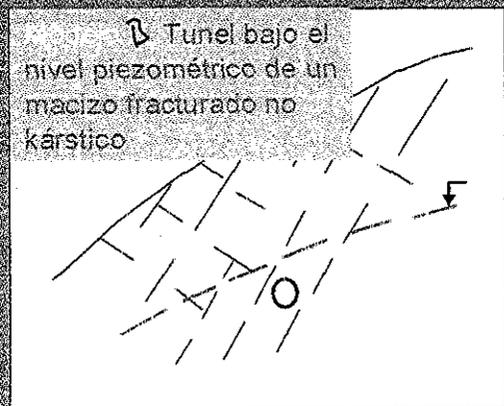
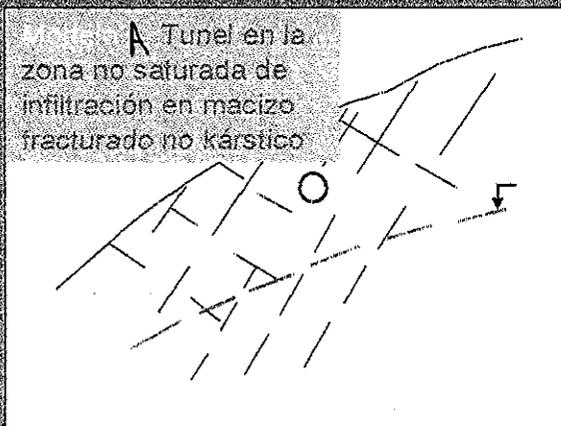
Necesidad de investigar la estructura geológica del macizo kárstico y su funcionamiento hidrogeológico para responder a:

- ¿Está el túnel en la zona de infiltración o en la zona inundada?
- ¿cabe esperar flujos concentrados (tubos kársticos) o difuso (por las diaclasas)?

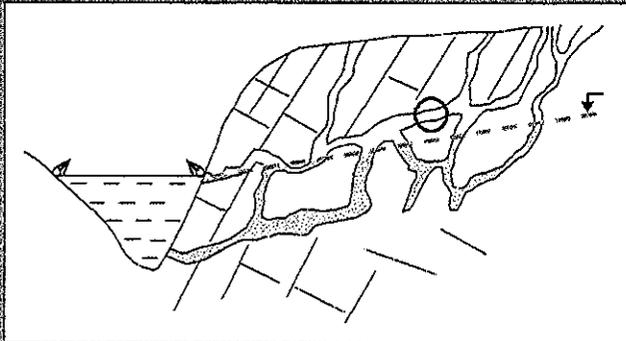
POSIBLES MODELOS HIDROGEOLÓGICOS DE TÚNELES EN MACIZOS KARSTICOS (II)

- Estudio geomorfológico y tectónico para evaluar variaciones ascensionales del nivel base.
→ geometría del nivel de base kárstico.
- Utilización de trazadores (tintes o isótopos)
 - Medición del retraso del flujo.
 - Interconexión de conductos kársticos.
 - Dispersión del flujo filtrante.
- Distribución geográfica de manantiales
→ refleja la intersección de tubos kársticos con la superficie del terreno
- Evolución de niveles de piezómetros profundos
→ refleja la transmisividad y capacidad drenante general difusa (pero no de los conductos kársticos)

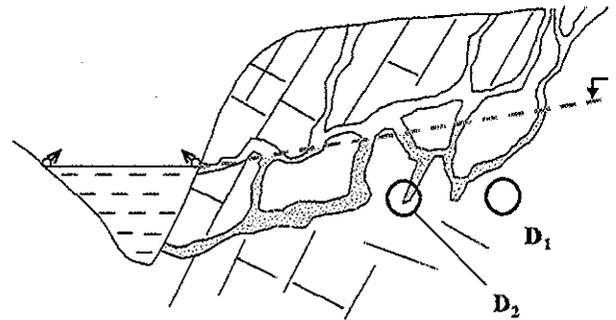
Modelos hidrogeológicos de túneles en macizos kársticos



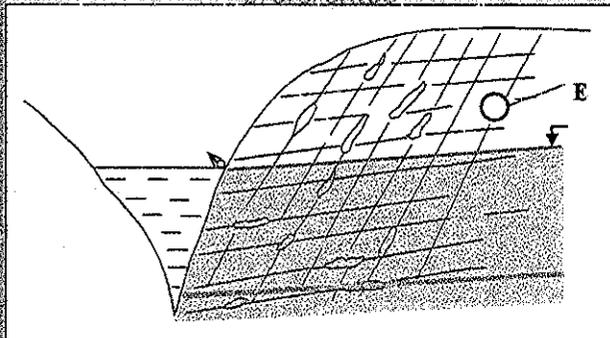
Modelos hidrogeológicos de túneles en macizos kársticos



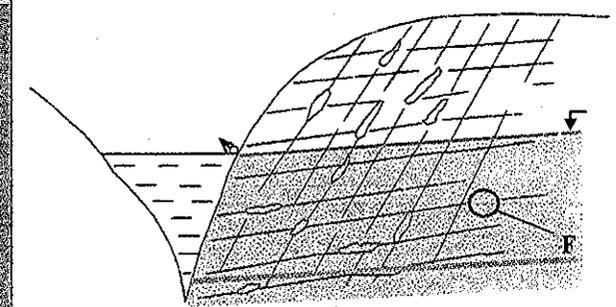
C Túnel en la zona de infiltración de un macizo kárstico con conductos preferentes



D Túnel en la zona de inundación de un acuífero kárstico con conductos preferentes



E Túnel en la zona de infiltración en macizo de juntas abiertas y cavidades

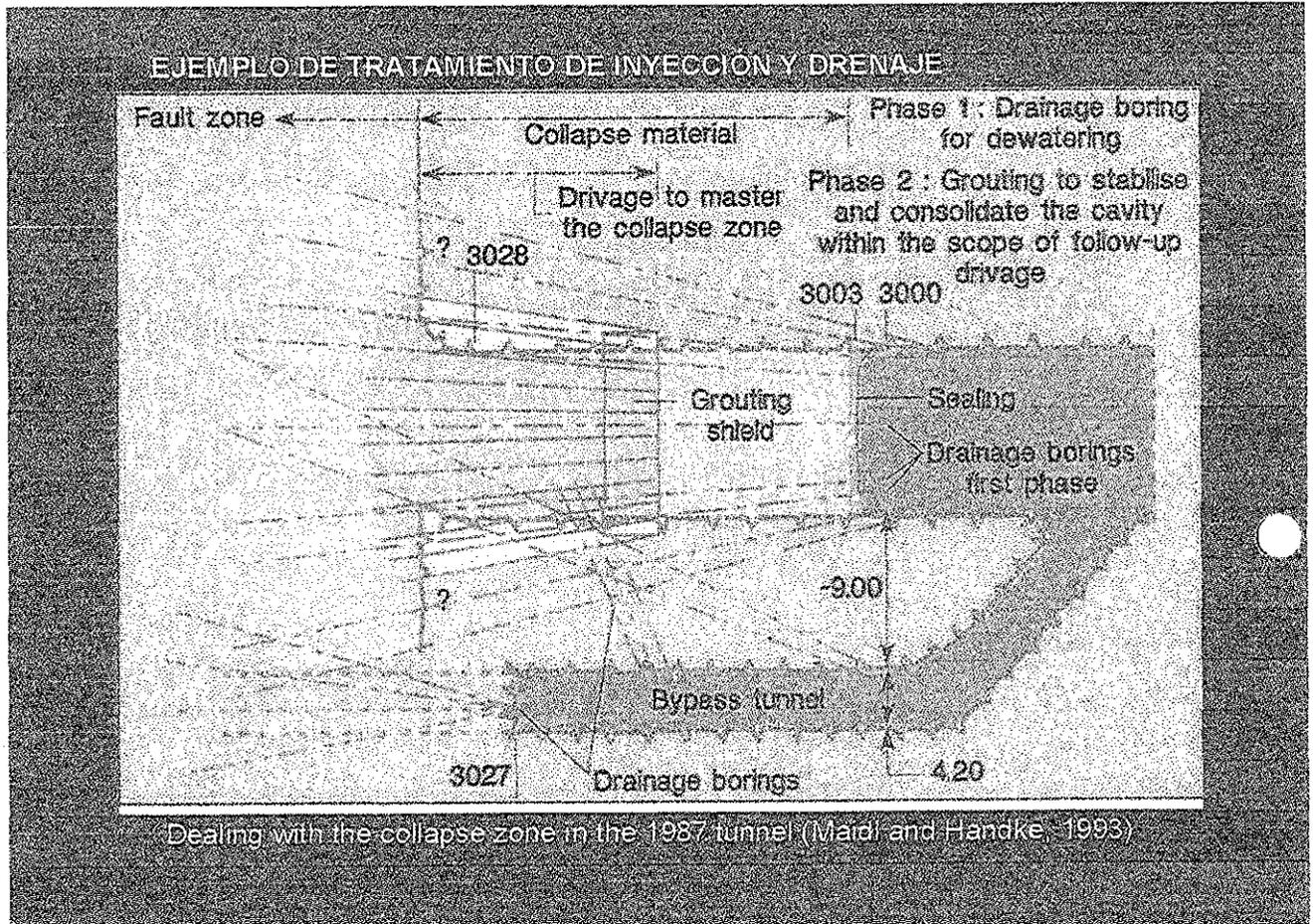


F Túnel en la zona de inundación de un macizo de juntas abiertas y cavidades

ENFRENTÁNDOSE AL AGUA DEL TERRENO

Necesidad absoluta de sondeos en el frente en los casos de los modelos C y D.

- Drenaje
 - Reducir la carga y caudal hacia el túnel.
- Aislamiento
 - Principalmente inyección
 - Otras técnicas (TBM presurizadas, congelación)
 - No es factible en calizas kársticas con conductos



CONSTRUCCIÓN TÚNELES EN MACIZOS KÁRSTICOS

1.- DESCRIPCIÓN DEL TÚNEL DE TRASVASE DE OUED BARBARA (TÚNEZ)

La obra de construcción del Túnel de trasvase del Río Barbara se sitúa geográficamente en el gobernadorado de Jendouba (Túnez), provincia limítrofe entre Túnez y Argelia, al NO del país, a unos 50 Km de la costa mediterránea y a una altitud sobre el nivel del mar de 305 m.

Forma parte de las obras denominadas Projet de Aménagement de Oued Barbara que incluyen, además, una presa de almacenamiento, una conducción de toma de 3 Km en el vaso del embalse y una estación de impulsión, que eleva el agua hasta la boca de entrada del túnel.

El túnel, que trasvasa el agua hasta la cuenca del río Zafar, consiste en una galería de sección circular, de 3.2 m de diámetro interior, 6.864 m de longitud, trazado en planta rectilíneo salvo dos curvas de hacia la parte final del trazado, según el sentido de la excavación. con un desnivel entre las bocas de entrada y salida de 2 m, lo que equivale a una pendiente uniforme en toda la longitud de la galería de 0,029%.

El revestimiento definitivo consiste en anillos de dovelas prefabricadas de hormigón, de 1,3 m de longitud y 30 cm de espesor, a razón de 6 dovelas por anillo : Una de base, dos de riñones, dos de espalda y una dovela de clave que permite el cierre del anillo, unidas entre sí mediante bulones.

En la superficie de contacto entre las dovelas se disponen juntas de goma pegadas con adhesivo, como impermeabilización, y Apackers de refuerzo, para favorecer el reparto de los esfuerzos transmitidos entre dovelas.

Como tratamientos del terreno en torno al túnel se realizan inyecciones de cosido, que consisten en la perforación de taladros de 48 mm a través de las dovelas en la parte superior del anillo y en una longitud variable entre 1 y 4 metros (según el tipo de terreno), y en la inyección de lechada de cemento a presiones variables entre 1 y 8 bares.

La excavación de la galería se ejecuta por medio de una TBM de doble escudo, marca LOVAT, que ejecuta una excavación de 3,98 metros de diámetro, quedando un espacio anular teórico entre trasdós de dovela y borde de excavación de 10 cm. Este trasdós se inyecta con mortero de cemento a una distancia de 3-4 dovelas de la última colocada, a fin de asegurar el apoyo de los anillos de dovelas y uniformizar las futuras cargas del terreno.

Las principales características de la tuneladora desde el punto de vista constructivo son (Foto 1):

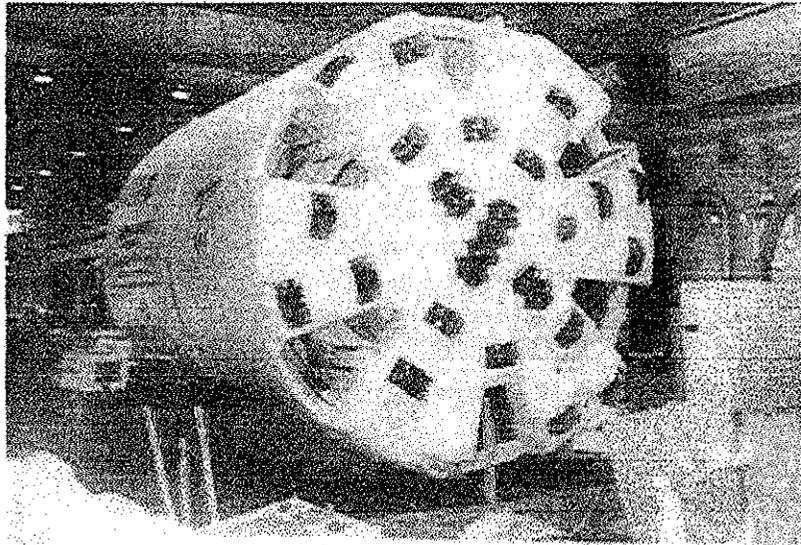


Foto 1. Tuneladora EPB para la construcción del túnel

- Cabeza de corte: 27 útiles de corte (discos cutters o dientes rippers indistintamente).
- Empuje: máximo de 2.400 T, proporcionado por 12 gatos de 1,6 metros de recorrido máximo (avance normal 1,30 metros) que apoyan sobre el último anillo colocado.
- Rotación: 8 motores reductores hidráulicos que proporcionan un par máximo de 2.140 kNm.
- Velocidad de giro de la cabeza de corte variable.
- El cuerpo de la máquina está dividido en dos partes, conectadas mediante una articulación que permite giros de hasta 2 en cualquier dirección.
- Evacuación de escombros: Compuertas hidráulicas sobre cinta transportadora que descarga sobre vagones. Dichas compuertas están dimensionadas para permitir cerrar a presiones de 5 bares.
- Escudo de protección para la colocación de dovelas.
- Colocación de las dovelas mediante brazo erector con enganche mecánico.

2.- DESCRIPCIÓN DEL TERRENO KÁRSTICO

Los estudios del terreno para el proyecto del túnel, facilitados por la administración tunecina, se basaban en dos campañas de reconocimiento constituidas por un total de 22 sondeos (3033 m de perforación), 3 galerías de exploración, 4110 m de perfiles de sísmica de refracción y 10070 m de perfiles de sísmica de reflexión, de los cuales, únicamente 9 sondeos y aproximadamente la mitad de la prospección sísmica se encuentran sobre la traza del túnel.

En fase de obra, se completaron estos estudios con reconocimientos geológicos de superficie.

Desde el punto de vista geológico, los terrenos afectados por la obra forman parte de la prolongación oriental de las unidades del Magreb, más concretamente, de la denominada Azona de los mantos, que se extiende por toda la región comprendida entre Tabarca y Bizerta, constituida por las siguientes formaciones:

- Unidad Djebels Ed Diss (Cretácico Inferior-Oligoceno Inferior): argilitas laminadas con ocasionales bancos intercalados de limolitas, calizas arcillosas y areniscas.
- Complejo Triásico: constituido por dos formaciones: una superior, de naturaleza brechoide (argilitas, limolitas, arenas, areniscas, dolomías), y otra inferior, de naturaleza yesífera (yesos cristalinos y brechíferos).
- Conjunto Medjerda (Mioceno Superior-Plioceno): constituido por una facies margosa de edad Mioceno, y otras dos de naturaleza arcillosa: arcillas grises del Plioceno y arcillas rojizas con niveles de arenas y conglomerados, del Mioceno.

Estructuralmente, hay que destacar el contacto por cabalgamiento de los materiales del Complejo Triásico sobre las otras dos formaciones, de geometría poco conocida al no haber sido atravesado por los sondeos, y el contacto entre las arcillas pliocenas del Conjunto Medjerda y las brechas del Complejo Triásico, en las proximidades de la boquilla este del túnel, mediante una discordancia erosiva o una falla sensiblemente vertical y normal a la traza.

En las figuras 1 y 2 se refleja en perfil la distribución a lo largo del túnel de las unidades descritas en los párrafos precedentes, de acuerdo con las previsiones del Proyecto... y como resultó en la realidad, dado que, debido a un menor buzamiento del plano de cabalgamiento, interpretado a partir de datos de superficie y de los perfiles de sísmica de reflexión, el túnel discurre a lo largo del mismo, pasando varias veces de los yesos triásicos a las argilitas cretácicas, en una zona intensamente fracturada y alterada, con presencia de agua a presión, cavidades y bolsas de gas.

En síntesis, de Oeste a Este, las formaciones atravesadas y las características de sus materiales son las siguientes:

- Desde la boca oeste y hasta aproximadamente el p.k.1+300: Argilitas laminadas, gris oscuro a negras, con intercalaciones ocasionales de limolitas, areniscas y calizas arcillosas, de la unidad Djebels Ed Diss.

Las argilitas y limolitas constituyen un conjunto de rocas blandas (resistencias a la compresión simple que oscilan entre 25 Kp/cm², para las argilitas, y 75 Kp/cm², para las limolitas), con fracturación media a alta, distribuidas en estratos normales a la traza, con buzamientos superiores a 45° hacia el Este y el Oeste debido a que se encuentran afectadas por frecuentes pliegues.

En conjunto constituyen una formación esencialmente impermeable, incluso en zonas relativamente fracturadas.

- Entre los p.k. 1+300 y 1+900: margas grises o beigeas con intercalaciones de yeso y paquetes de arenisca, del conjunto Medjerda

Las margas son rocas de resistencia baja (20 a 25 Kp/cm² de resistencia a compresión simple), poco cementadas y masivas, aunque pueden estar afectadas por la proximidad del cabalgamiento, de muy baja permeabilidad.

Las areniscas, que se presentan en dos paquetes decamétricos, son rocas duras y poco fracturadas, con una cierta permeabilidad, susceptibles de constituir acuíferos confinados.

- Entre los p.k. 1+900 y 4+800: yesos cristalinos, masivos o brechificados, con brechas arcillo-yesíferas, calizas, dolomías, argilitas y limolitas, de la formación yesífera del complejo triásico.

Los yesos cristalinos son rocas de color blanco a blanco grisáceo, en forma de yeso y anhidrita, masivas, con RQD próximo a 100% y resistencia a compresión simple muy variable, con valores extremos de 51 y 900 Kp/cm².

Las brechas arcillo-yesíferas son rocas de color gris claro a gris oscuro, constituidas por cantos de calizas, dolomías, argilitas y limolitas, cementadas por una matriz de yeso y arcillas, que constituyen una roca de aspecto masivo, dureza media a baja (resistencia a compresión simple de 31 a 225 Kp/cm²), con RQD de 60% a 80%.

La formación cuenta con una permeabilidad primaria baja pero puede presentar localmente una permeabilidad secundaria elevada a favor de fracturas o cavidades de disolución.

- Entre los p.k. 4+800 y 6+000: cantos y bloques de dolomías, calizas, limolitas o areniscas en matriz arcillosa, de la formación de brechas del complejo triásico.

Es una formación de color gris claro a verdoso o marrón, de aspecto masivo y con clastos, de tamaño grava predominantemente, sin cementar. Su resistencia es baja a muy baja y RQD prácticamente nulo.

Su permeabilidad está también asociada a zonas de fractura, como la discordancia erosiva con los materiales de la formación Medjerda.

- Entre el p.k. 6+000 y la boca este: arcillas rojizas, de plasticidad media, duras, con intercalaciones de arenas y gravas, del conjunto Medjerda.

Es importante hacer aquí un inciso para describir el sistema de reconocimiento del terreno en avance, consistente en:

- Cada cierto número de avances, antes de iniciar un nuevo ciclo se realiza un taladro piloto a destroza de unos 80 metros de longitud y 76 mm de diámetro, a fin de detectar en avance las posibles anomalías existentes (agua a presión, gas, cavidades, cambios geológicos).
- En la formación yesífera, cuando las condiciones del terreno detectadas en los avances previos o en el sondeo piloto indicaban una alta posibilidad de encontrar cavidades en el entorno del túnel (material muy fracturado, afluencia de agua), se perforaba un sondeo a través de la primera dovela de base fuera del escudo, inclinado unos 15° hacia abajo, de hasta 40 m de longitud, con el fin de detectar posibles cavidades bajo el trazado del túnel.

Además, en un tramo de prueba de 500 m, se introducía el georradar tanto en el sondeo piloto como en el inclinado, lo que permitía aumentar el diámetro del reconocimiento y minimizar el riesgo de que la tuneladora se encontrase dentro o sobre una cavidad.

La técnica de auscultación mediante georradar consiste en la emisión de un impulso electromagnético, que se transmite a través del terreno, de manera que cualquier cambio en las propiedades dieléctricas de éste provoca una reflexión parcial de estas ondas, que son registradas como una anomalía en el medio.

Estas anomalías pueden deberse a fracturas, cambios litológicos, cavidades vacías o llenas de agua, etc.

El georradar detecta de una forma cualitativa estas anomalías y las sitúa en el espacio, pero no permite cuantificar el volumen de las fracturas o cavidades.

Para su utilización en sondeos, el emisor-receptor se encuentra en una antena (de 42 mm de diámetro en el caso del utilizado en Barbara) que se

introduce en la perforación, preferiblemente protegida con un tubo de PVC.

La antena se introduce hasta el fondo y, en retroceso, va realizando la emisión de las señales electromagnéticas y el registro de las posibles reflexiones.

La antena permite ser orientada en el espacio, de tal manera que en cuatro pasadas por el taladro proporciona dos secciones planas, horizontal y vertical, respectivamente, del entorno del sondeo.

En la figura 3 se recoge un dibujo explicativo del principio de funcionamiento y en las figuras 4 y 5, sendos ejemplos de registros obtenidos en el túnel de Barbara.

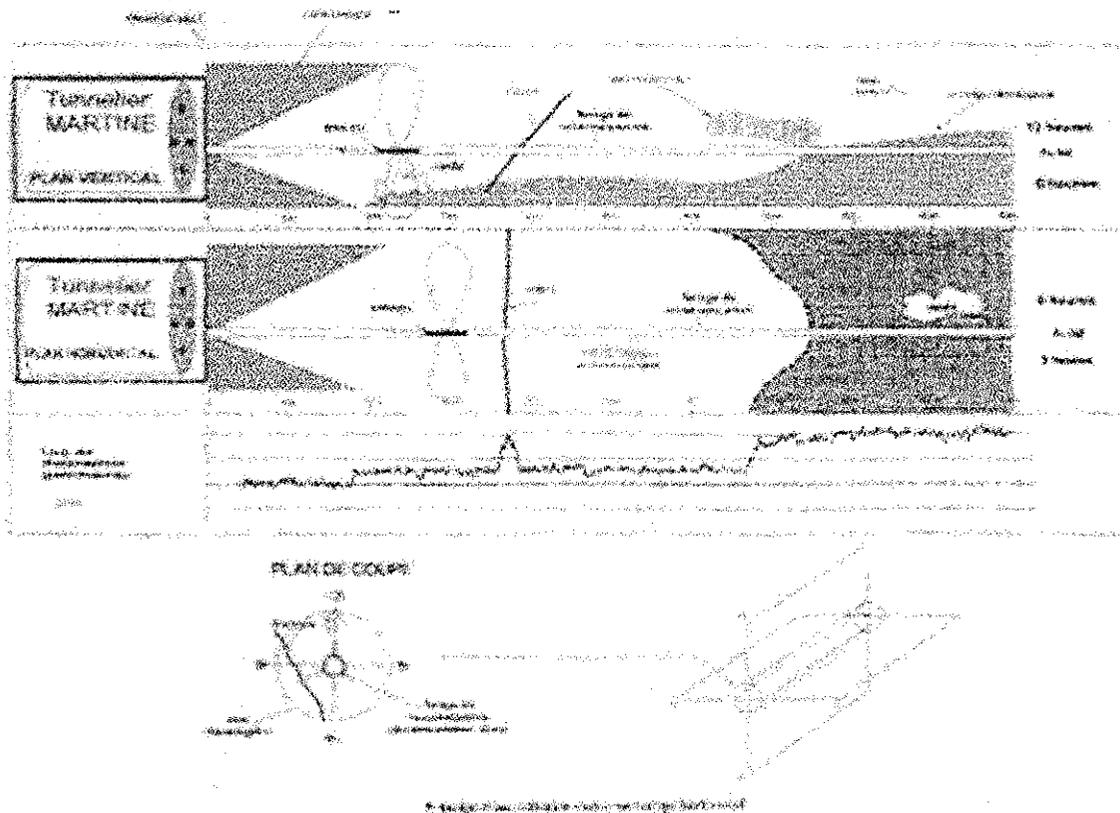


Figura 3. Principio de funcionamiento del georradar en sondeo

El radio de auscultación efectivo, que depende del tipo de terreno y de la frecuencia de las ondas emitidas (las ondas de longitud de onda mayor permiten una mayor penetración, pero con menor resolución, y viceversa), oscila de 2 a 5 m.

De la experiencia obtenida en el tramo de prueba se puede concluir que el georradar, efectivamente, es capaz de detectar anomalías en el terreno, aumentando de esta forma el diámetro del sondeo, pero resulta muy difícil interpretar estas anomalías y asociarlas a un determinado fenómeno (cambio litológico, cavidad, agua, etc.).

EXTRAIT de SECTION RADAR
Galerie de transfert
Aménagement de l'osed BARBARA
Figure 1

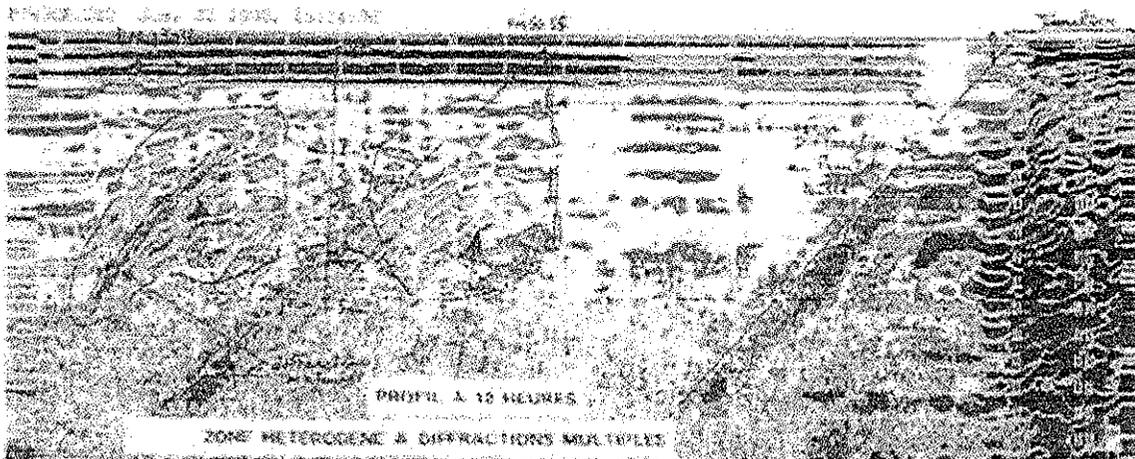


Figura 4. Sección interpretada de georradar con indicación de anomalías10

EXTRAIT de SECTION RADAR
Galerie de transfert
Aménagement de l'osed BARBARA
Figure 2

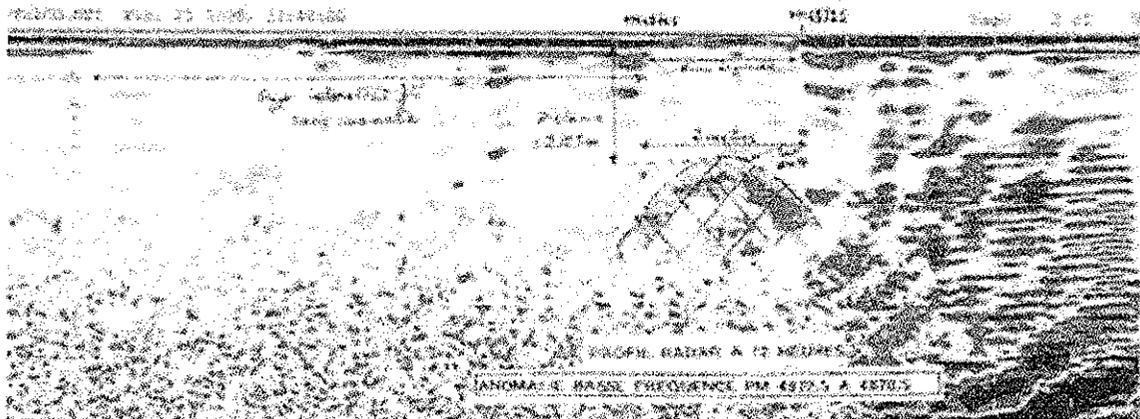


Figura 5. Sección interpretada de georradar con indicación de anomalías

3.- INCIDENCIAS DURANTE LA EJECUCIÓN

Al tratar las incidencias en esta obra, si se mantiene el significado usual de esta palabra, el tema quedaría agotado con un único caso: la excavación con avances sostenidos y sin complicaciones de un corto tramo entre los p.k. alguno debe haber, aunque sería complicado concretarlo.

En realidad, las vicisitudes de todo tipo sufridas por esta obra hacen que lo singular, la ocurrencia de circunstancias no previstas, haya sido la tónica general, pues prácticamente cada formación atravesada tenía su trampa preparada... y como muestra, unos cuantos botones:

– **Excavación en arcillas**

El inicio de la excavación a partir de la boquilla este, en un tramo de aproximadamente 900 m, atravesó una formación de arcillas rojas y grises, que se pegaban a las palas y los laterales de la cámara de recogida de la cabeza de la máquina, obligando a detener la excavación para limpiar la cabeza y liberar la salida del material, circunstancia que se redujo con la utilización de espumas especiales, con intercalaciones de arenas y gravas, en las que se producían afluencias de agua con caudales puntuales importantes.

– **Aparición de cavidades de disolución en los yesos**

En Octubre de 1997, en el contacto entre las brechas y la formación yesífera en la que se preveía excavar todo el tramo central del túnel, la máquina entró en una cavidad de grandes dimensiones, afortunadamente coincidiendo sensiblemente el fondo de la excavación con el fondo de la caverna, provocando el detenimiento de la excavación.

En las fotografías 2 y 3 se aprecia la cavidad.

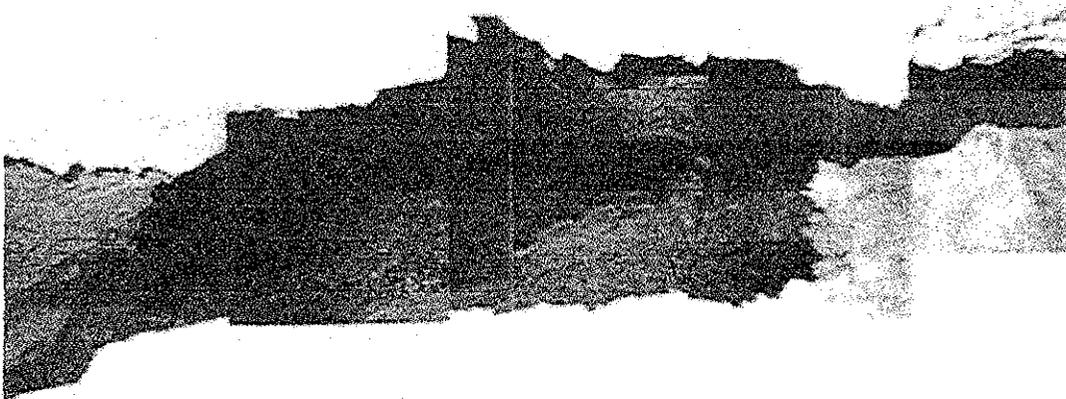


Foto 2. Aspecto general de la caverna encontrada con la perforación del túnel

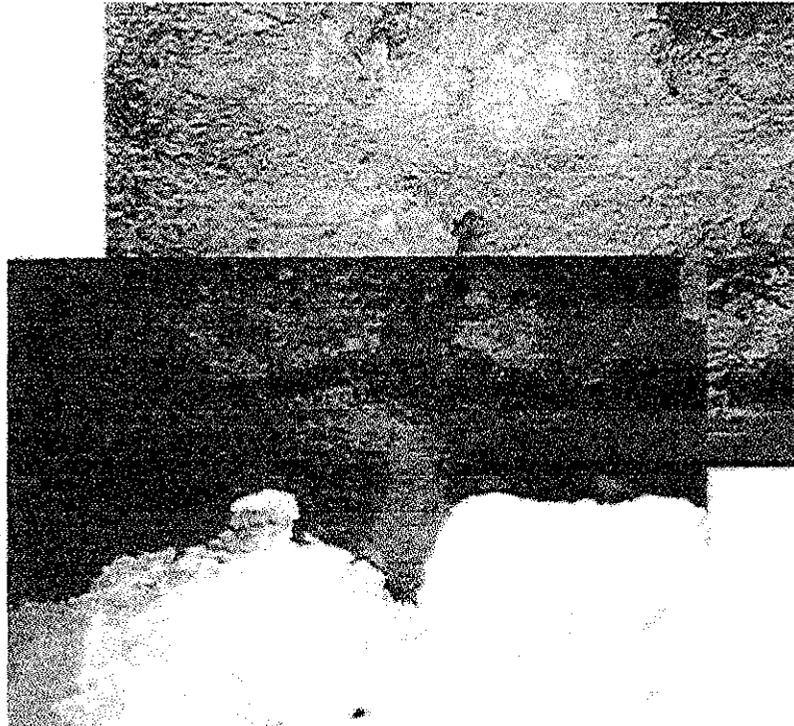


Foto 3. Aspecto del techo de la caverna por encima de la cabeza de la perforación

Como indicios de la cavidad, se produjo en primer lugar una gran venida de agua, con un caudal punta de hasta 100 litros/segundo, que rápidamente se estabilizó en valores de 15 a 20 litros/segundo; y, posteriormente, el taladro piloto detectó un vacío de 2,2 metros de largo, encajado en un material compacto, y, tras un nuevo avance hasta las inmediaciones del vacío, volvió a detectar el vacío, por lo que se procedió a avanzar hasta llegar a éste, encontrándose la cavidad de las dimensiones aproximadas que se reflejan en las figuras.

El procedimiento seguido para atravesarla consistió en la ejecución de taladros inclinados por delante de la máquina y registro de los mismos con georradar, con el fin de descartar la existencia de otras cavidades importantes en torno de la máquina, y especialmente debajo, y avances bajo control estricto, comprobando en cada medio avance, por la ventana de la cabeza, que la tuneladora contaba con una solera firme de apoyo, hasta abandonar la cavidad y empotrar la tuneladora en los yesos macizos.

La inyección posterior efectuada una vez rebasada por completo la cavidad por la máquina dio como resultado volúmenes de inyección del orden de 240 m³.

– **Emanaciones de gas a presión**

En Abril de 1998, habiendo avanzado del orden de 600 metros en la formación yesífera, el taladro piloto perforó una bolsa de gas asociada al contacto entre los yesos y las argilitas, de naturaleza sulfurosa, altamente

tóxico, aunque sin riesgo de explosión, que obligó a una evacuación de emergencia del túnel y a reforzar las medidas de ventilación.

Tras 22 días con la ventilación funcionando, se comprobó que se había drenado por completo la bolsa de gas y se reanudaron los trabajos.

- Irrupción de agua a presión en la galería

En Julio de 1998, el taladro piloto detectó agua a presión, que alcanzaba presiones de 21 bares en 12 horas, que se disipaban hasta 3 bares en otras 12 horas, manteniéndose un caudal de 5 l/seg.

Estos datos indicaban que se trataba de una discontinuidad (fractura o conducto kárstico) rellena de agua, que se recargaba lentamente, y en la que, teniendo en cuenta la experiencia en la cueva detectada en el contacto entre las brechas y los yesos, era previsible un drenaje rápido y una disminución casi inmediata del caudal inicial.

Estas previsiones se confirmaron y este tramo se atravesó en 2 ó 3 avances con presencia de agua a presión y caudal moderados (1 a 3,5 bares y 17 a 25 l/seg, respectivamente).

Una vez rebasada por la máquina, se procedió a la inyección del trasdós de las dovelas.

- Inundación de la galería

En Agosto de 1998, en pleno estío y con el río Zafar prácticamente seco, se produjo una lluvia torrencial, de unas 5 horas de duración, que provocó una avenida superior en 1,5 metros a la cota considerada en el Proyecto como causa de fuerza mayor para detener las obras.

Afortunadamente, y aunque la cota de fondo del río era superior a la cota de entrada de la galería, el dique de protección levantado en la obra permitió la contención de la avenida evitando la inundación total de la galería y los consiguiente daños a la máquina, aunque, dada la intensidad de las lluvias, el agua de escorrentía de la ladera fue suficiente para sobrepasar la capacidad de bombeo instalada y provocar la inundación parcial de la galería en una longitud de 3 Km, alcanzando 90 centímetros de altura en el portal de entrada.

- Atrape de la máquina por convergencia del terreno

En Septiembre de 1998, encontrándose la tuneladora en un tramo de máxima cobertura (300 m), en el que las ondulaciones del plano de contacto por cabalgamiento entre los yesos y las argilitas hacían que ésta pasase en repetidas ocasiones de un material a otro (p.k. 2+795), se produjo un aumento brusco en el empuje necesario para mantener el avance, pasando en tres anillos de 400 toneladas (empuje normal en los yesos) hasta 1800 toneladas.

La inyección de bentonita y el aumento provisional del empuje de la máquina con cuatro gatos auxiliares de 200 toneladas cada uno, lo que permitió contar con un empuje total de 3200 T, no consiguieron hacer avanzar la tuneladora, por lo que se optó finalmente por excavar en mina alrededor de ésta, desde la parte de atrás del escudo hacia delante, para lo cual se procedió al desmontaje de las dos últimas dovelas para iniciar desde allí las excavaciones.

Esta operación permitió liberar la máquina con 1900 toneladas de empuje e inyección de bentonita en la cabeza y laterales del escudo.

A partir de este punto, las argilitas convergían de forma extraordinariamente rápida, agotando la holgura entre el diámetro de la excavación y el de la máquina (31.5 mm en la cola del escudo y 15.8 mm en el tramo central) por lo que se trató de acelerar la ejecución del ciclo y se eliminó el sondeo piloto, con el fin de dar prioridad al avance de la máquina hasta salir de este tramo de fuertes convergencias.

A pesar de estas medidas, fue necesario proceder a la excavación manual para liberar la máquina en 4 ocasiones más, y la necesidad de elevados empujes para avanzar se prolongó hasta que empezaron a desaparecer las argilitas por la parte inferior de la excavación, hasta ser sustituidas por brechas yesíferas.

La travesía de este tramo, obligando a la máquina a trabajar al límite de sus posibilidades, produjo la rotura de los bulones de unión entre la cola y el escudo intermedio y la apertura de la junta en torno a 17 mm, así como la ovalización de la cola, con deformaciones de hasta 5 cm en algunos puntos.

- Pérdida de alineación de la máquina

En el tramo de argilitas con fuertes convergencias, la imposibilidad de corregir la trayectoria de la máquina, pues todos los gatos de empuje trabajaban a su máxima potencia y no era posible aplicar empujes diferenciales de corrección, dio lugar a una desviación en cota de 1,00 m hacia arriba y hasta 1,70 metros en planta, en apenas 20 metros lineales de avance.

Para corregir la alineación, se procedió a hacer bascular la máquina sobre su cola excavando por debajo de la misma hasta volver a ponerla con la pendiente prevista, aunque 1,0 metro por encima de la cota de Proyecto.

4.- RENDIMIENTOS

Las incidencias descritas dan una idea de las dificultades de ejecución de este túnel, tanto por el número y variedad de las mismas como por la complejidad de las operaciones que fue necesario llevar a cabo para superarlas, ocasionando en conjunto una reducción importante en la velocidad de avance.

La excavación se concluyó en Junio de 1999, resultando un plazo de ejecución de 30 meses, que equivale a un rendimiento medio de 228 m por mes. Sin embargo, este rendimiento se ve afectado por las incidencias descritas.

A continuación se muestra claramente la importancia de los períodos de parada y la enorme oscilación del rendimiento obtenido:

- 156 m/mes, en las argilitas de la boca este.
- 360 m/mes, en las brechas arcillosas.
- 483 m/mes, en las argilitas negras de la boca oeste (no figuran en el gráfico).
- Del orden de 500 m/mes, en los tramos libres de incidencias.

Máster Universitario
en Túneles y Obras
Subterráneas

ÁREA C
MÓDULO 6

MODELOS DE EXPANSIVIDAD.
SIMULACIÓN NUMÉRICA

Ponente: Pablo de la Fuente
08/06/06



Enero- Octubre

2007

Máster Universitario en Túneles y Obras Subterráneas

Organizado por



Asociación Española de
Túneles y Obras Subterráneas



COLEGIO DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES
Y PUERTOS



Fundación Agustín de
Beracoetxe

Con la colaboración de



Area C : construcción

TÚNELES EN MACIZOS KÁRSTICOS

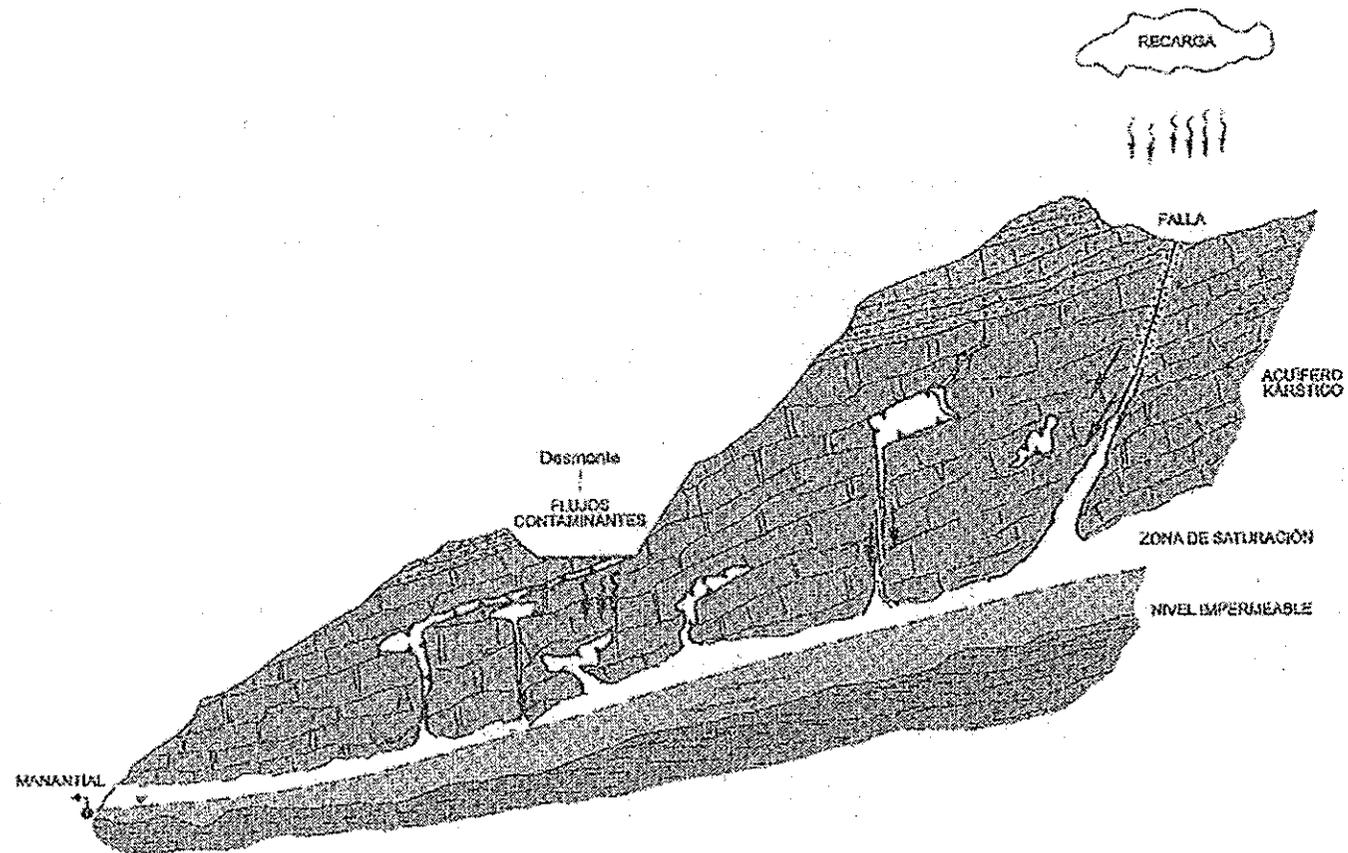
Davor Simic



FENÓMENO KÁRSTICO

- Proceso geológico de disolución de rocas solubles.
- La intensidad de la disolución depende de:
 - Roca matriz: rocas carbonatadas (calizas) o yesíferas.
 - Discontinuidades del macizo: existencia de fallas o diaclasas de alta permeabilidad.
 - Hidrología: nivel piezométrico y condiciones de contorno (estratos impermeables) que favorezcan la circulación de agua.

MEDIO ACUÍFERO KÁRSTICO HETEROGÉNEO. CIRCULACIÓN DEL AGUA SEGÚN FRACTURACIÓN Y DESARROLLO DE KARST

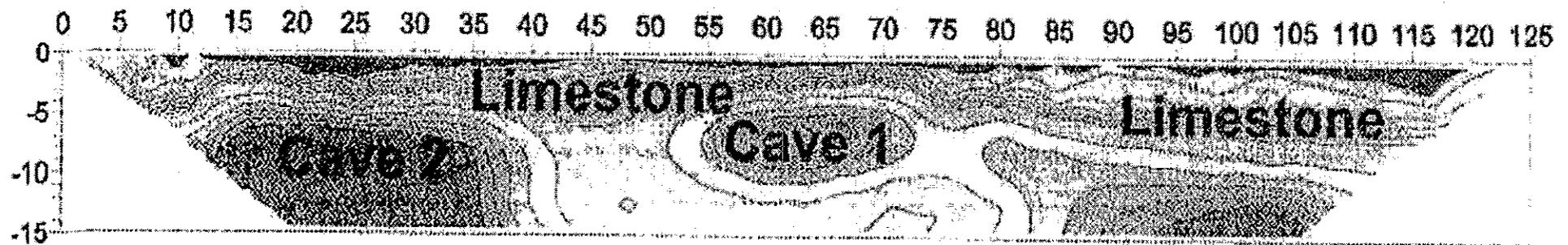


DETECCIÓN GEOFÍSICA DEL KARST

MÉTODO	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES
GEORRADAR	Emisión de ondas de radar contra el terreno, mediante antenas. Detecta muy bien los huecos vacíos.	Sólo funciona bien a profundidades someras. Alta resolución. Genera planos en planta o perfiles
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA	Inyección de corriente continua en el terreno mediante electrodos. Se mide la resistencia eléctrica del terreno, pudiendo detectar cuevas vacías (alta resistencia) o llenas de agua o arcillas (baja resistencia).	Funciona adecuadamente tanto a poca como a gran profundidad. Genera perfiles longitudinales y es capaz de distinguir el tipo de relleno de la cueva
MICROGRAVIMETRÍA	Medición del campo gravitatorio local. En las zonas con cuevas la gravedad es menor.	Funciona bien tanto en zonas profundas como someras, pero la topografía de la zona debe ser suave. Sólo detecta cuevas vacías.
POTENCIAL ESPONTÁNEO	Medición del potencial eléctrico del terreno. La circulación de agua subterránea genera potenciales eléctricos detectables	Funciona tanto para grandes profundidades como someras, pero sólo detecta el karst que está absorbiendo agua.
RESONANCIA ACÚSTICA	Se introducen altavoces dentro de la cueva y se detecta en superficie el sonido con la ayuda de geófonos.	Funciona a profundidades someras. Requiere que la cueva tenga acceso para introducir los altavoces. Alta resolución. Proporciona planos en planta.
DIAGRAFÍA CROSS-HOLE	Se emiten ondas sísmicas en un sondeo, y son recogidas en otro cercano. Si aparece una cueva se detecta una disminución de la velocidad sísmica medida.	Funciona muy bien a cualquier profundidad, pero requiere que los sondeos estén muy próximos el uno al otro. Alta resolución. Proporciona perfiles verticales.

TOMOGRFÍA ELÉCTRICA PARA LA DETECCIÓN DE CUEVAS

PERFIL DE RESISTIVIDADES

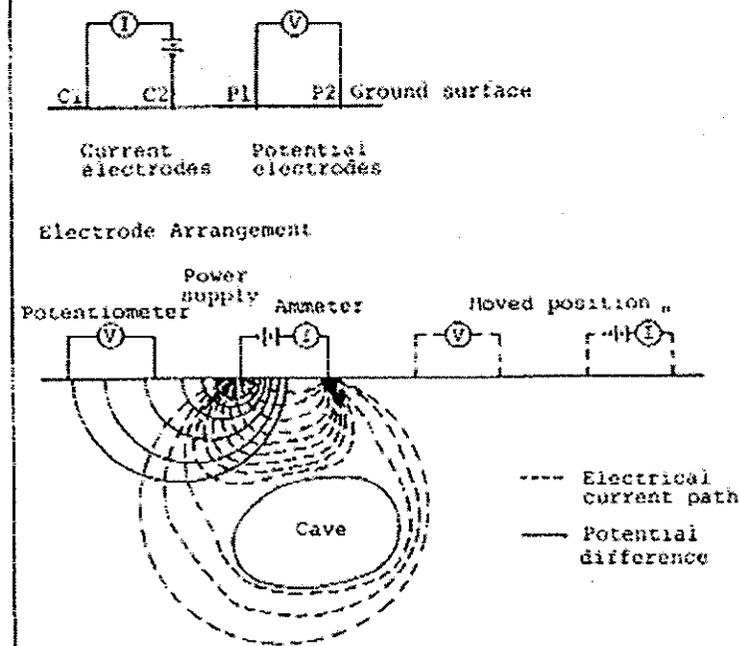


- CUEVAS VACÍAS: EL AIRE ES DIELECTRICO → ALTA RESISTIVIDAD
- CUEVAS RELLENAS DE ARCILLA O AGUA: EL RELLENO ES BUEN CONDUCTOR → BAJA RESISTIVIDAD

DETECCIÓN GEOFÍSICA DEL KARST

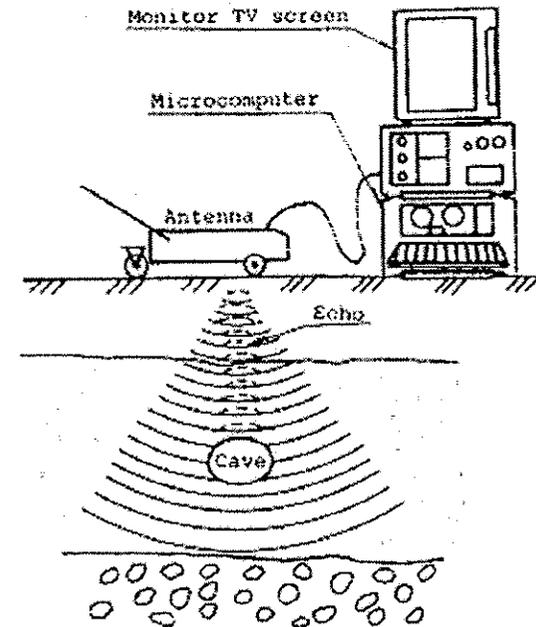
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

All ground strata possess a characteristic value of specific electrical resistivity. The approximate depth and scale of a cave is inferred by finding the distribution of specific electrical resistivity in the ground by measurement from the surface and detecting the area of anomaly in this distribution of specific electrical resistivity resulting from the effect of the cave.

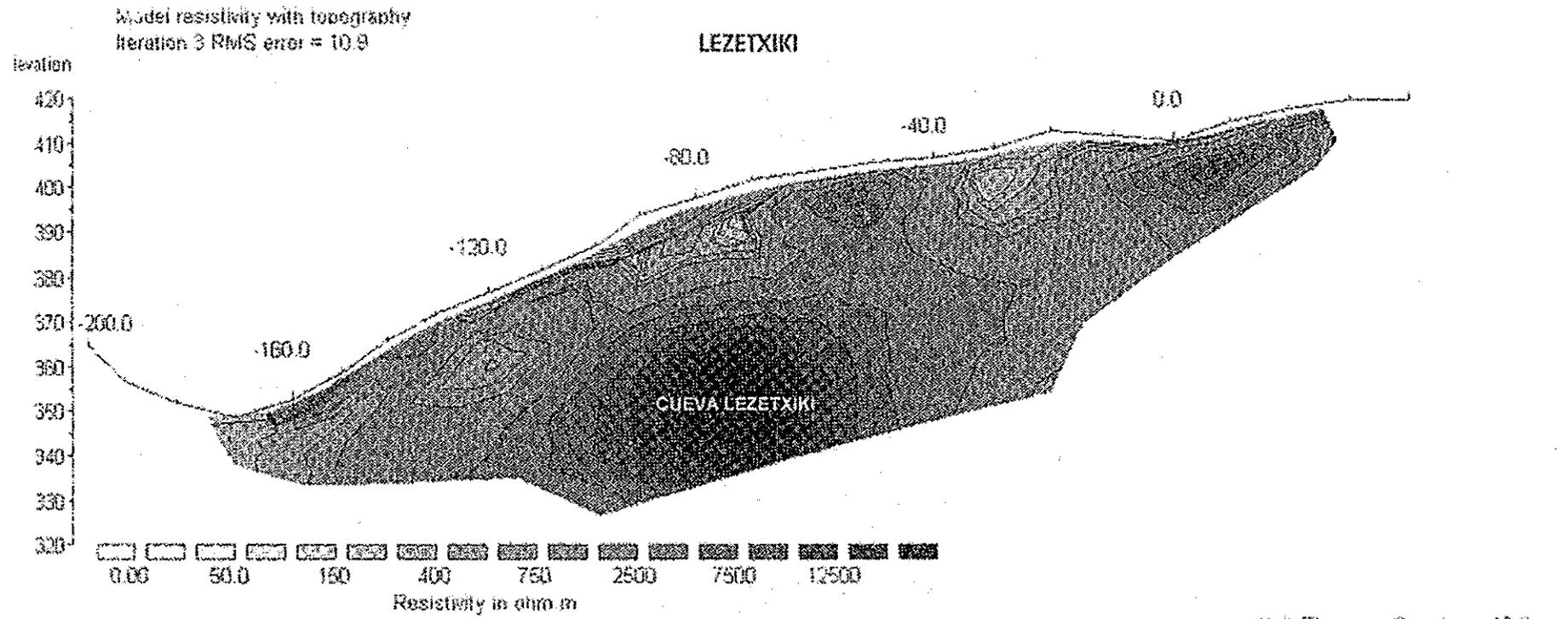


GEORRADAR

Utilizing the property that a radio wave will generate a reflected wave at the boundary between materials in the ground (cave or buried object) with differing electrical properties, a cave below the tunnel floor is located from the horizontal position where the reflected wave was generated and the time required for the reflected wave to reach the antenna.



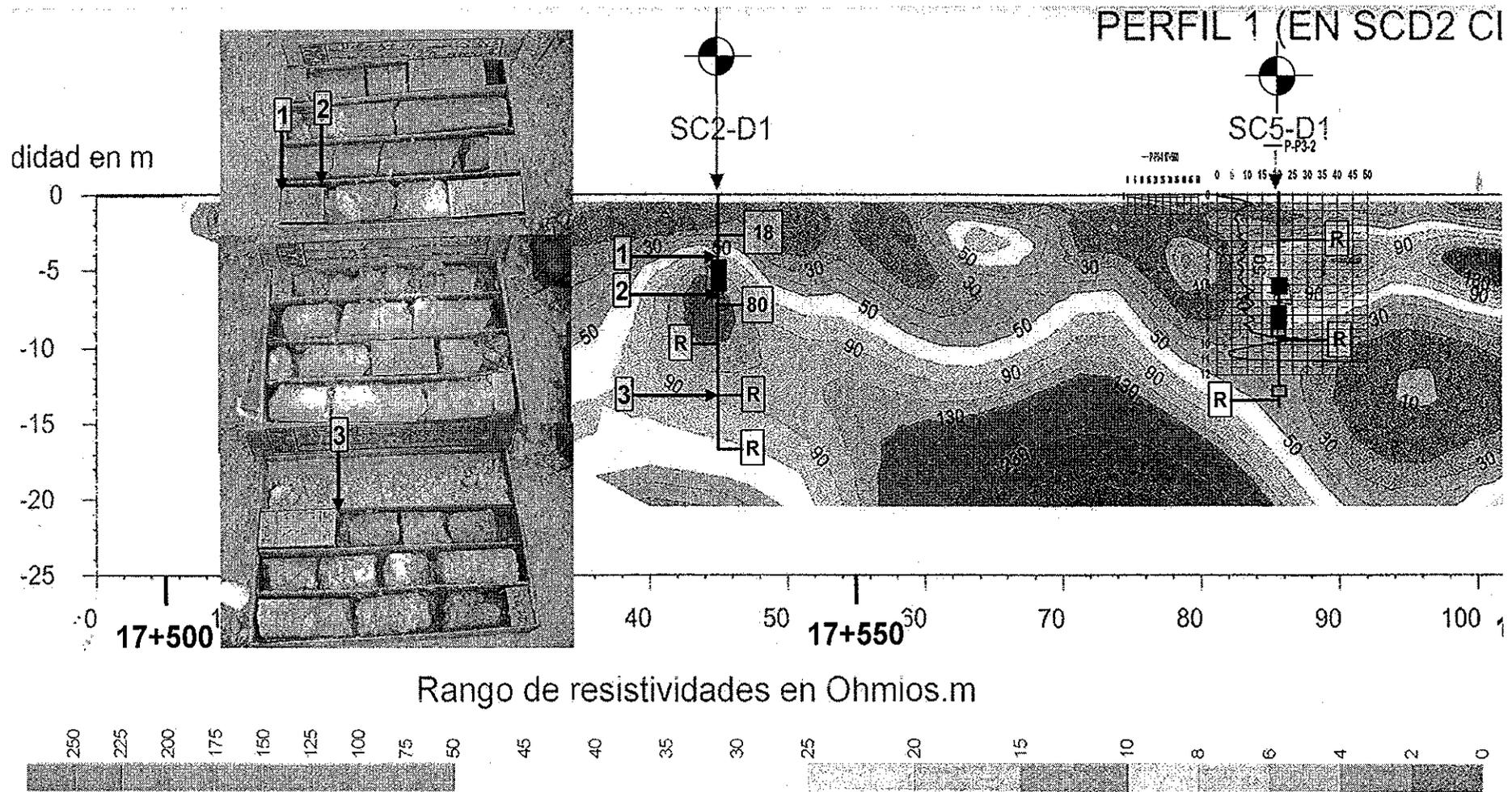
EJEMPLO DE LA APLICACIÓN DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA EN LA DETECCIÓN DE UNA CUEVA. LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD “Y VASCA”



Horizontal scale is 39.39 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 0.73
First electrode is located at -200.0 m
Last electrode is located at 40.0 m

KARST YESÍFERO

PROBLEMÁTICA DE LA DETECCIÓN POR MÉTODOS GEOFÍSICOS (1)

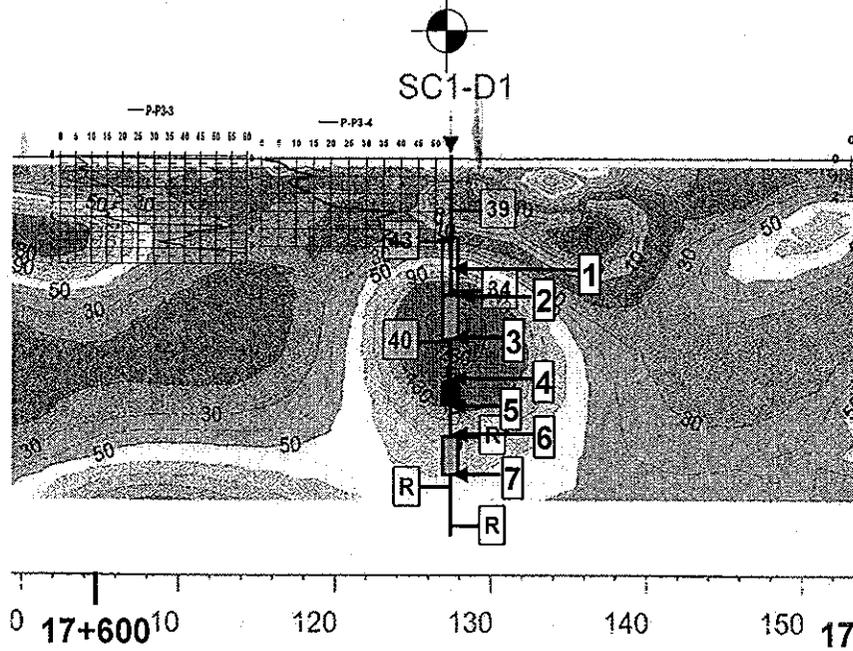


- Entre 1 y 2 hay una cueva
- Por debajo, hay yeso masivo

KARST YESÍFERO

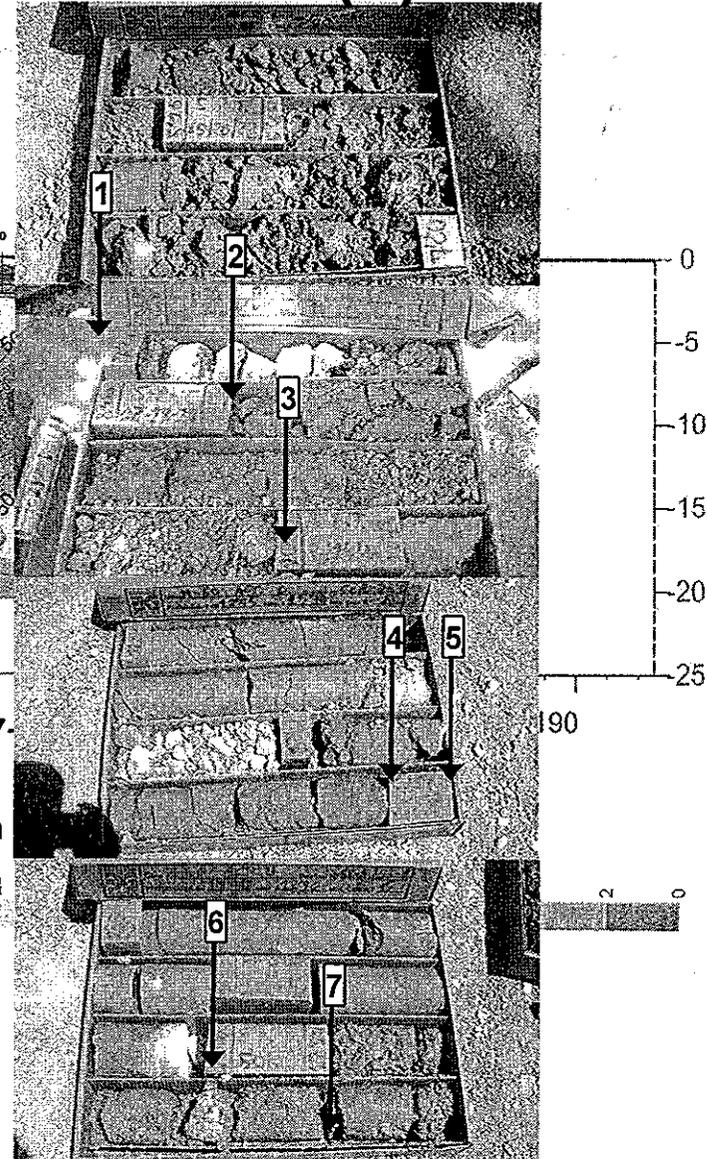
PROBLEMÁTICA DE LA DETECCIÓN POR MÉTODOS GEOFÍSICOS (2)

CLAVO 1 Y CENTRO EXTO 1)



0 17+600 10 120 130 140 150 17+700

Rango de resistividades en



- La cueva sólo aparece entre 4 y 5

RIESGO PARA LA ESTABILIDAD LAS ESTRUCTURAS EN LOS MACIZOS KÁRSTICOS

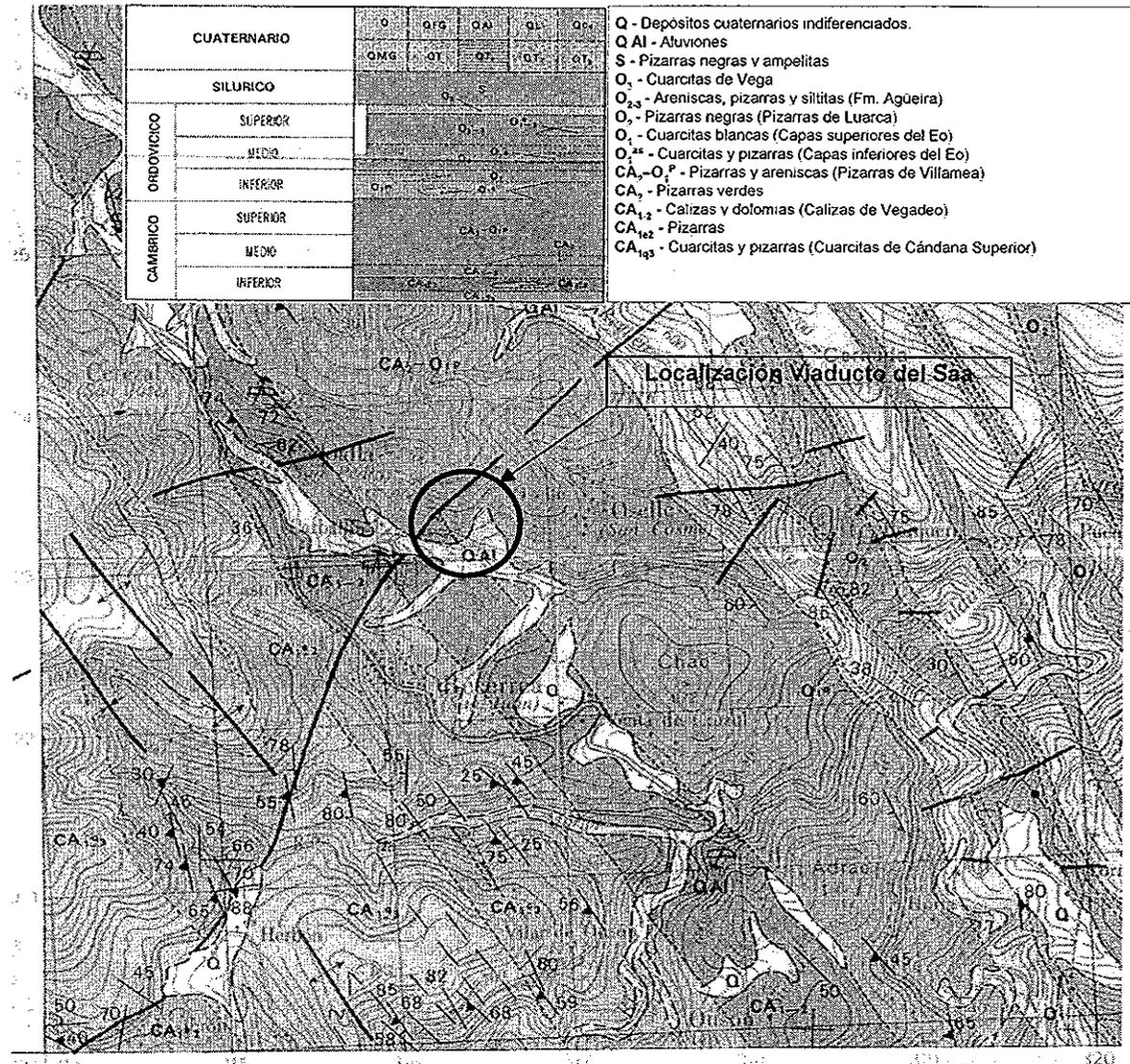
- **Presencia de cavidades bajo el plano de apoyo de la cimentación: riesgo de fallo por colapso.**
- **En caso de estructuras enterradas: riesgo de discontinuidades en la estructura por fugas de hormigonado.**

REMEDIACIÓN DE PATOLOGÍAS

- **Inyecciones de relleno de cavidades: precauciones con la dispersión del material inyectado**
- **Recalce mediante micropilotes inyectados: estudio de la interacción estructural cimentación existente-recalce**

VALLE DEL SAA

CONTACTO ENTRE: PIZARRAS VILLAMEA Y CALIZAS DE VEGADEO DISLOCADO POR LA FALLA DE BECERREÁ



VALLE DEL SAA
CALIZAS DE VEGADEO: ESTRUCTURA MASIVA
Calizas y dolomías con intercalaciones de calcoesquisto, pizarras y areniscas
 $Q_u = 60-90 \text{ MPa} - \text{RQD} > 40$

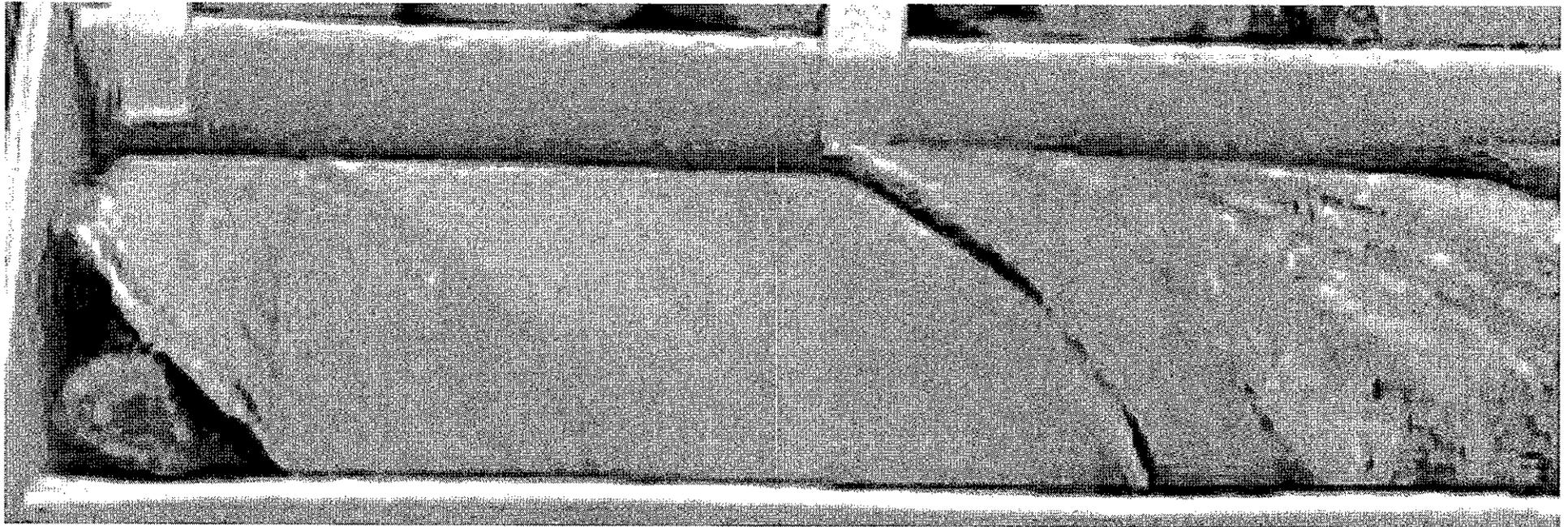


VALLE DEL SAA

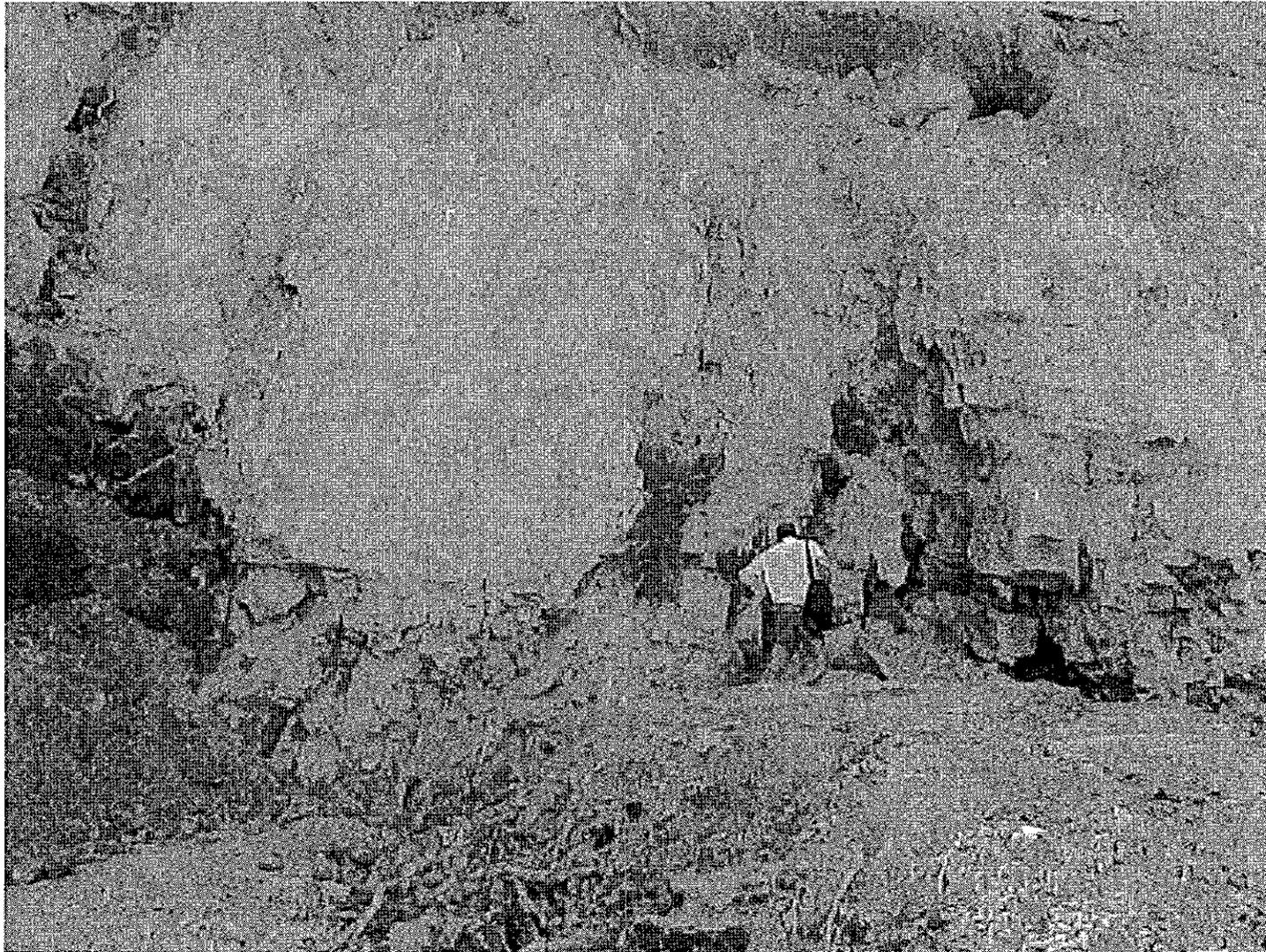
CALIZAS DE VEGADEO: ESTRUCTURA LAMINAR

Fracturas abiertas (1 a 5 mm) Bordes meteorizados. A veces con relleno

$Q_u < 35 \text{ MPa}$ - RQD < 40



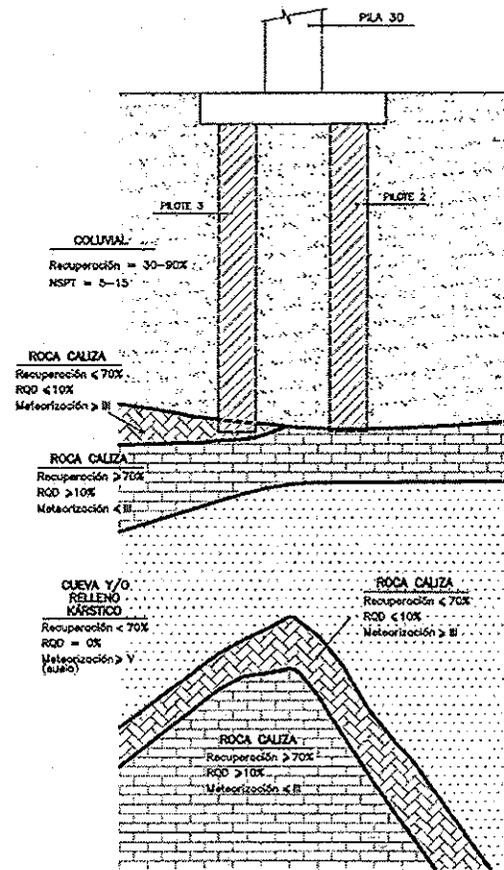
VALLE DEL SAA
CALIZAS DE VEGADEO. AFLORAMIENTO ZONA KARSTIFICADA



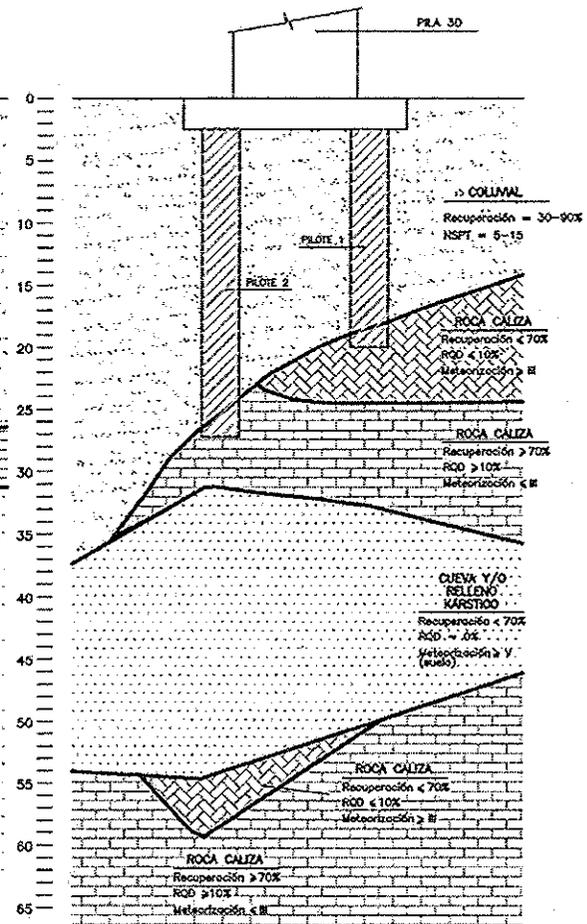
VALLE DEL SAA

CUEVA EN EL EMPLAZAMIENTO DE LA PILA 3 D

PERFIL LONGITUDINAL

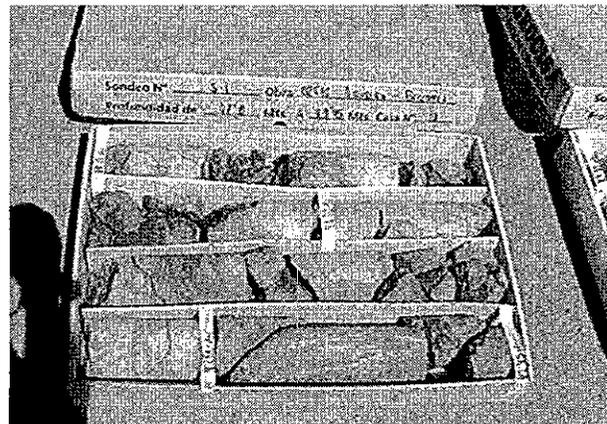
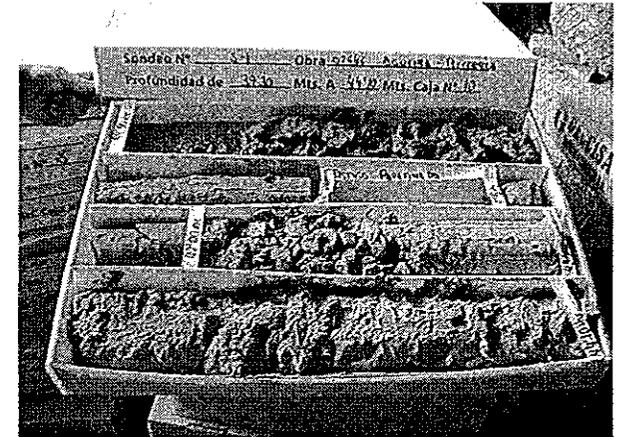
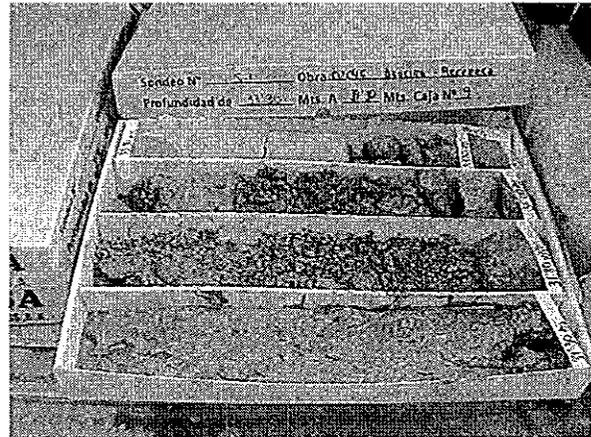


PERFIL TRANSVERSAL



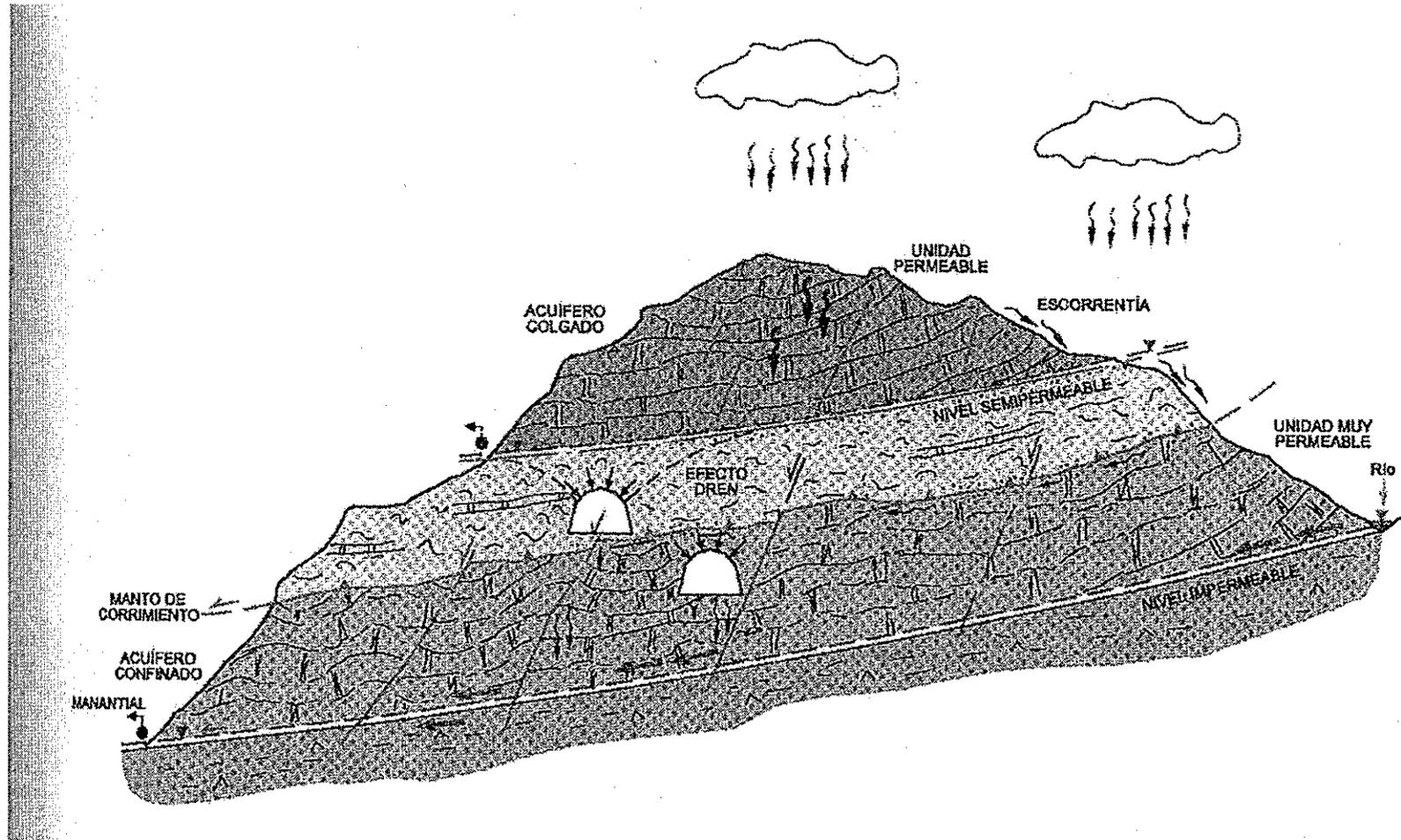
VALLE DEL SAA - PILA 3D

TESTIGO SONDEO CALIZAS – RELLENO KÁRSTICO - CALIZAS

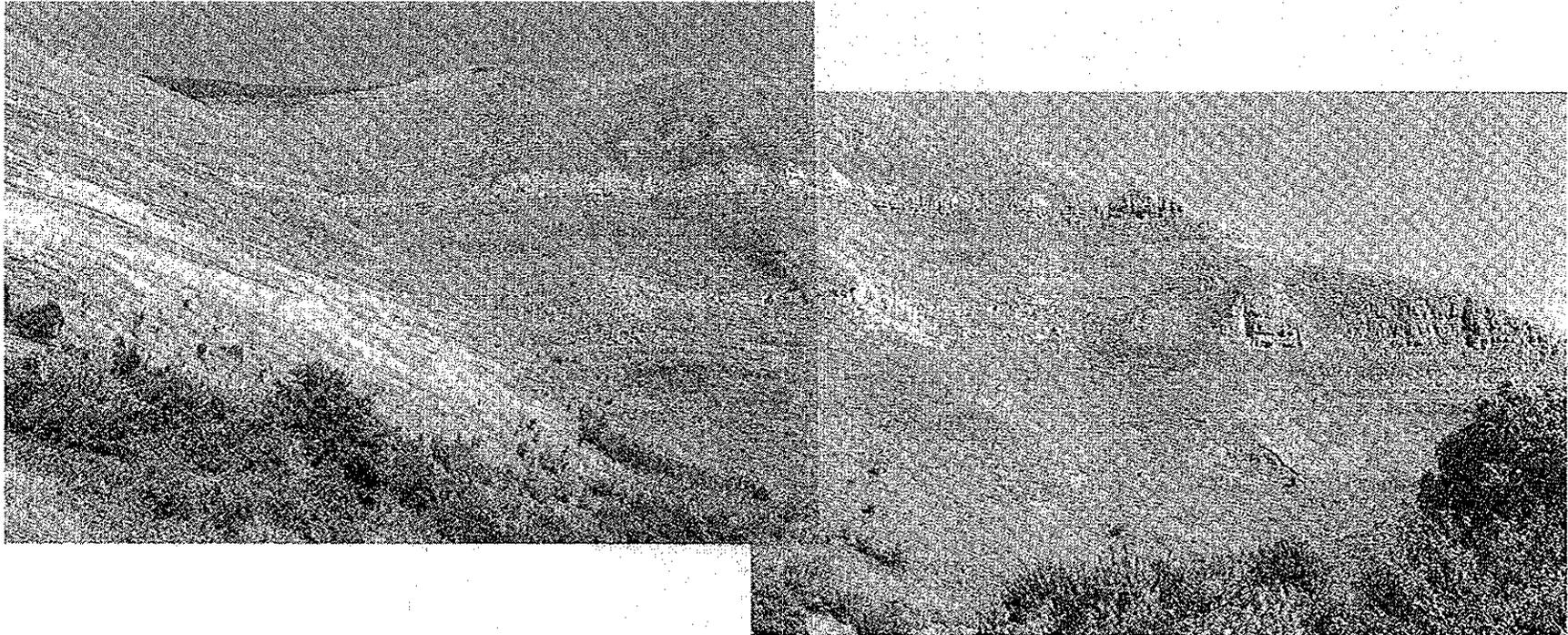


TÚNEL DE LANTUENO

ACUÍFERO KÁRSTICO FORMADO POR ALTERNANCIA DE CALIZAS Y MARGAS



TÚNEL DE LANTUENO. BOQUILLA SUR.



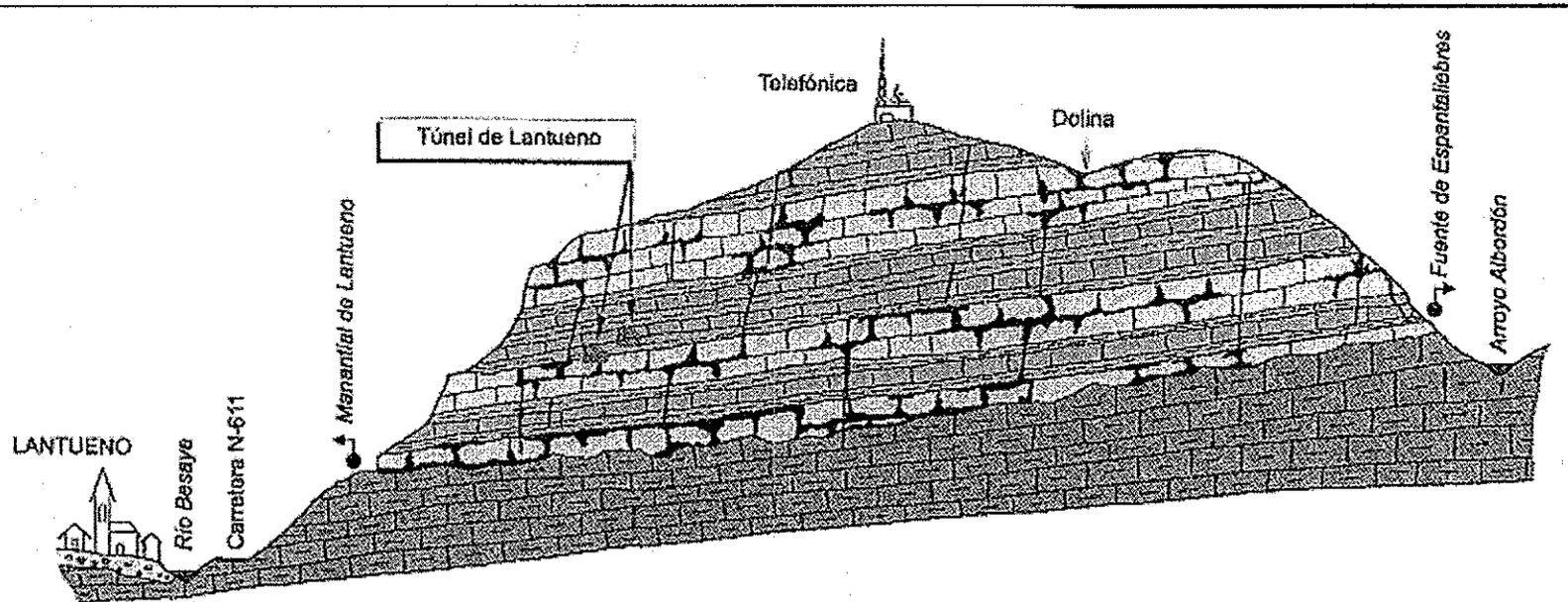
MEDIO SATURADO Y KÁRSTICO. TÚNEL DE LANTUENO



MANANTIAL DE ABASTECIMIENTO DE LANTUENO. SANTIURDE DE REINOSA (CANTABRIA)



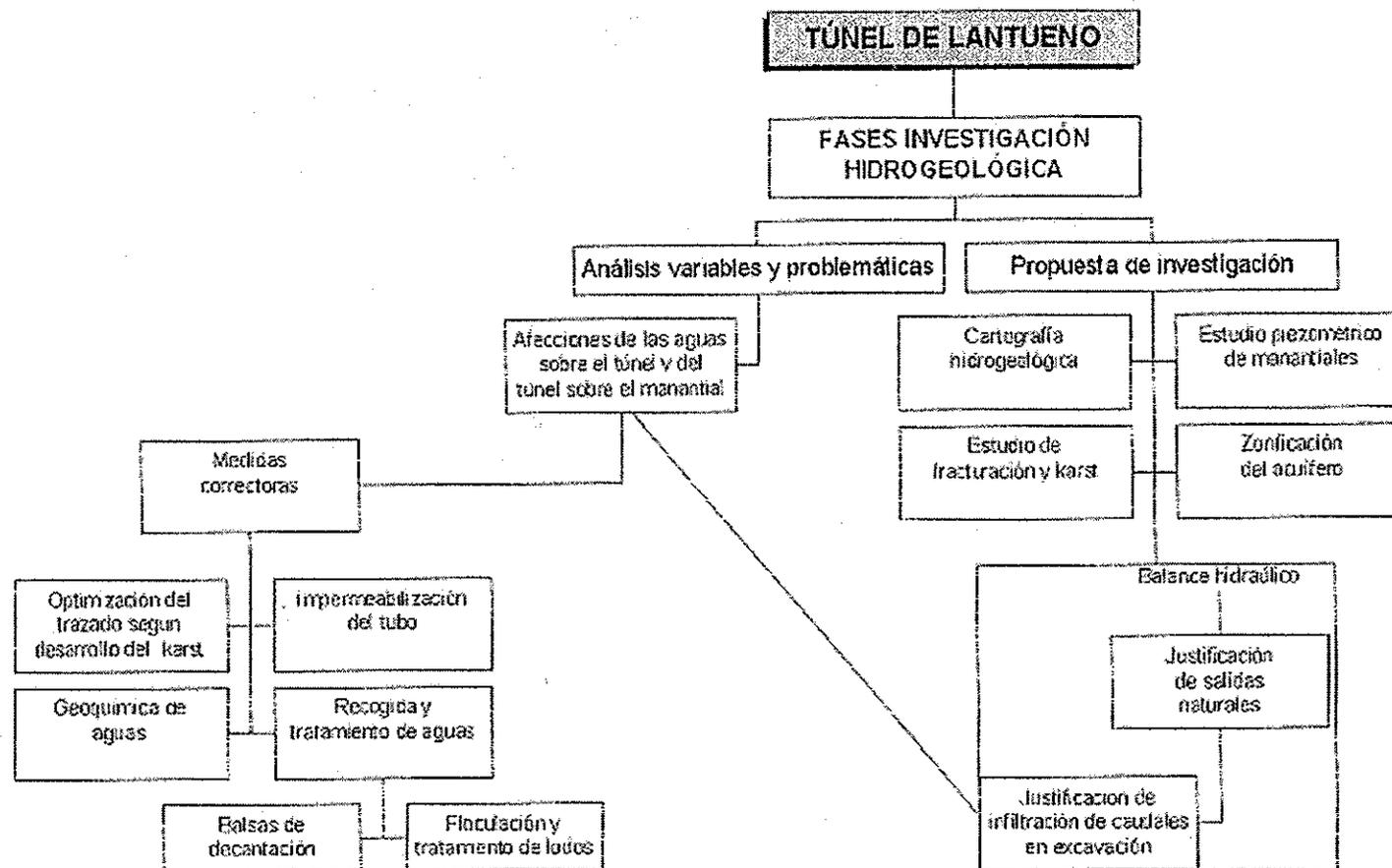
PERFIL TRANSVERSAL ESQUEMÁTICO



TÚNEL DE LANTUENO

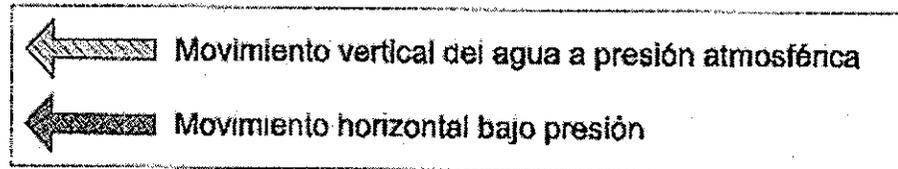
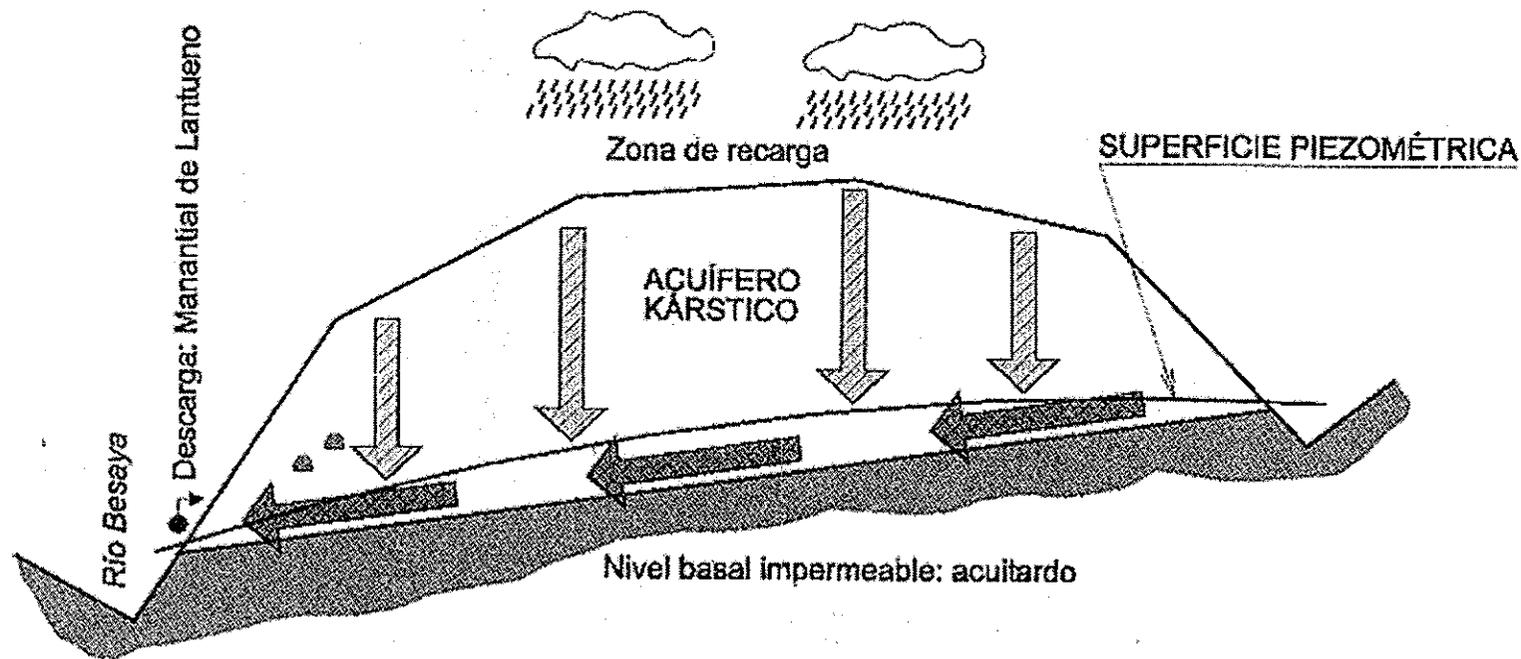
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO KÁRSTICO

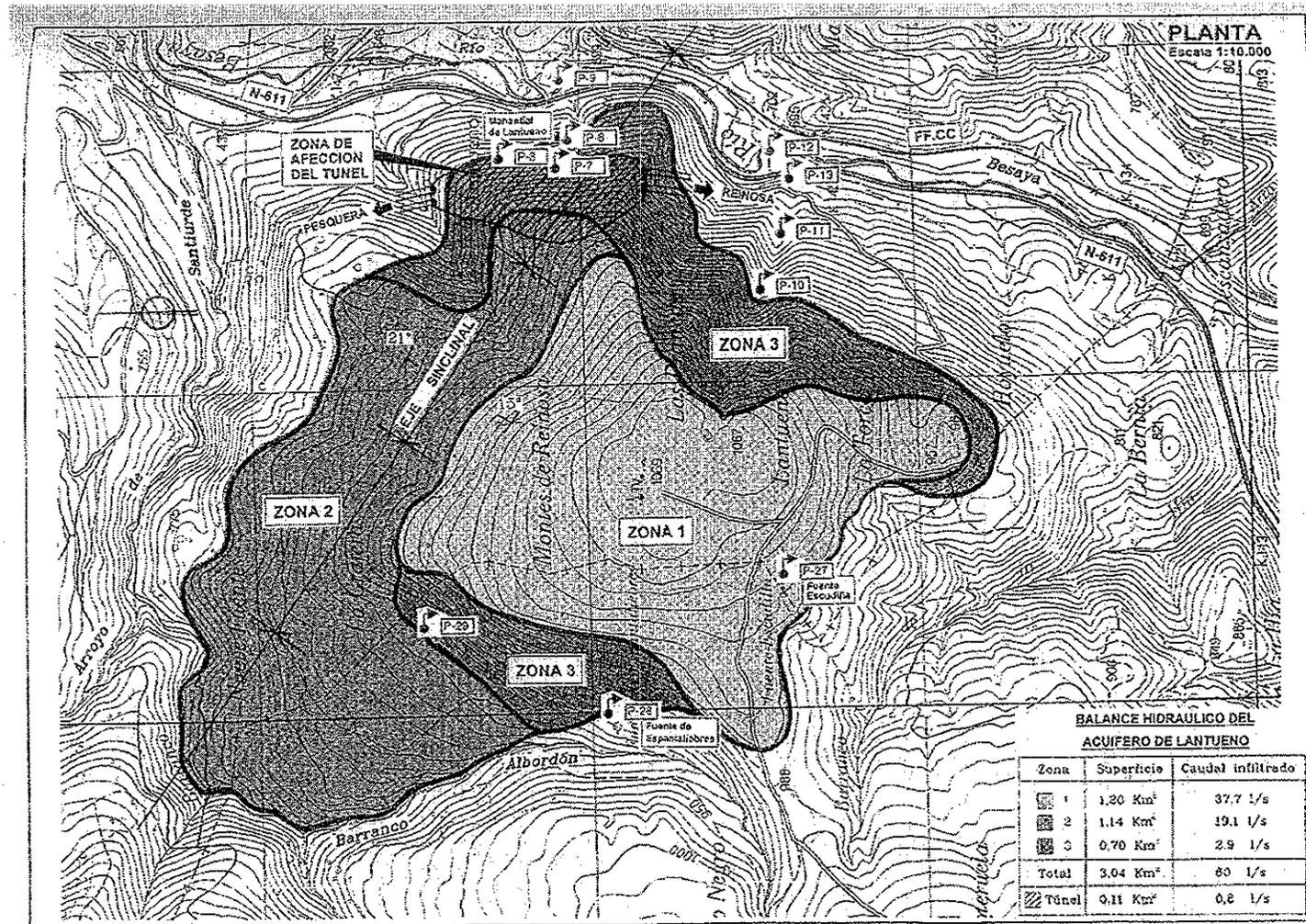


ACUÍFERO DE LANTUENO

DETERMINACIÓN DE LAS ZONAS DE INFILTRACIÓN Y DE SATURACIÓN



BALANCE HIDRÁULICO DEL ACUÍFERO DE LANTUENO



CARACTERÍSTICAS DE LAS ZONAS DEL ACUÍFERO DE LANTUENO

ZONA	1	2	3
Superficie	1,20 km ²	1,14 km ²	0,70 km ²
Altitud	950-1070 m	750-950 m	750-1000 m
Pendiente media	7-11 %	25-30 %	>50 %
Temperatura media anual	7°	9°	10°
Precipitación media anual	1800 mm	1600 mm	1300mm
Coefficiente de Evapotranspiración	25 %	33 %	40 %
Coefficiente de Escorrentía Cs	20 %	33 %	50 %
Coefficiente de infiltración Ci	55 %	33 %	10 %
Caudal medio anual de infiltración	37,67 l/s (63 %)	19,09 l/s (32 %)	2,89 l/s (5 %)

DATOS DE PARTIDA DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO

TÚNELES EN TERRENOS KÁRSTICOS

Aspectos de estabilidad y seguridad.

- Control del agua subterránea.
- Cruce de cavidades: vacías, rellenas de arcilla, con o sin carga de agua

PARTICULARIDADES HIDROGEOLÓGICAS DE LOS MACIZOS KÁRSTICOS

- Alto coeficiente de infiltración de las aguas exteriores.
- Flujo filtrante no lineal por la alta permeabilidad.
- Mantenimiento de la alta permeabilidad a grandes profundidades.
- Posibilidad del desarrollo de extensas cuencas de almacenamiento.
- Caminos de filtración irregulares y heterogéneos a favor de conductos kársticos de gran transmisividad que actúan de colectores de la roca adyacente menos fracturada de menor permeabilidad

POSIBLES MODELOS HIDROGEOLÓGICOS DE TÚNELES EN MACIZOS KARSTICOS (I)

Necesidad de investigar la estructura geológica del macizo kárstico y su funcionamiento hidrogeológico para responder a:

- ¿Está el túnel en la zona de infiltración o en la zona inundada?
- ¿cabe esperar flujos concentrados (tubos kársticos) o difuso (por las diaclasas)?

POSIBLES MODELOS HIDROGEOLÓGICOS DE TÚNELES EN MACIZOS KARSTICOS (II)

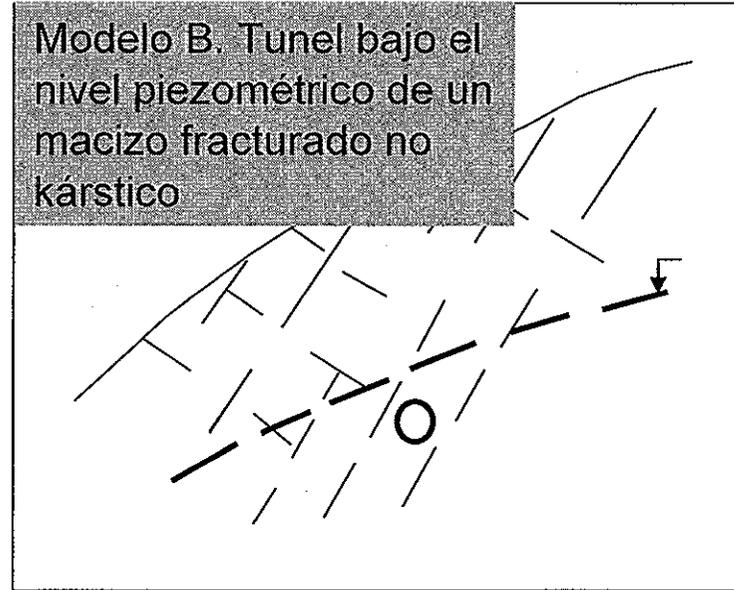
- Estudio geomorfológico y tectónico para evaluar variaciones ascensionales del nivel base.
→ geometría del nivel de base kárstico.
- Utilización de trazadores (tintes o isótopos)
 - Medición del retraso del flujo.
 - Interconexión de conductos kársticos.
 - Dispersión del flujo filtrante.
- Distribución geográfica de manantiales
→ refleja la intersección de tubos kársticos con la superficie del terreno
- Evolución de niveles de piezómetros profundos
→ refleja la transmisividad y capacidad drenante general difusa (pero no de los conductos kársticos)

Modelos hidrogeológicos de túneles en macizos rocosos con o sin karstificación

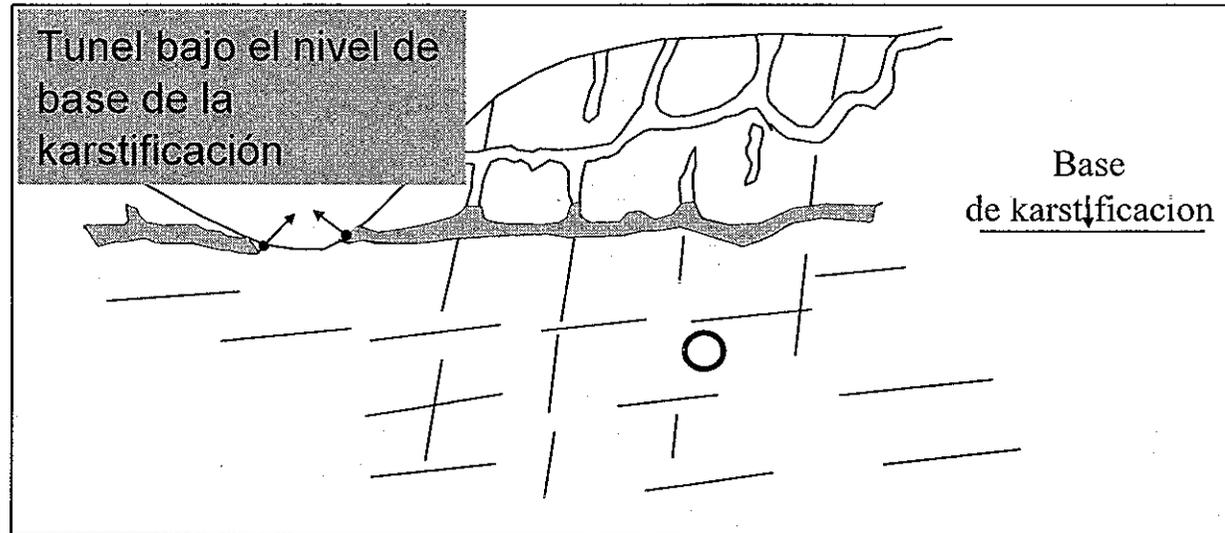
Modelo A. Túnel en la zona no saturada de infiltración en macizo fracturado no kárstico



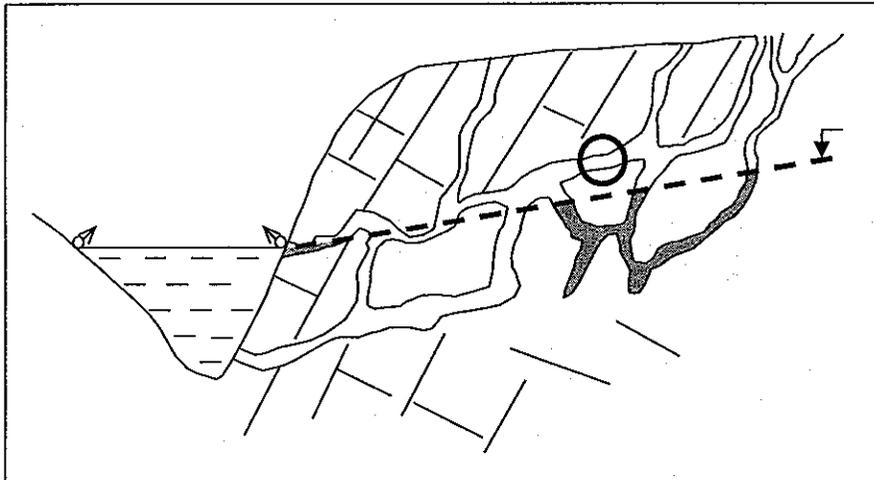
Modelo B. Túnel bajo el nivel piezométrico de un macizo fracturado no kárstico



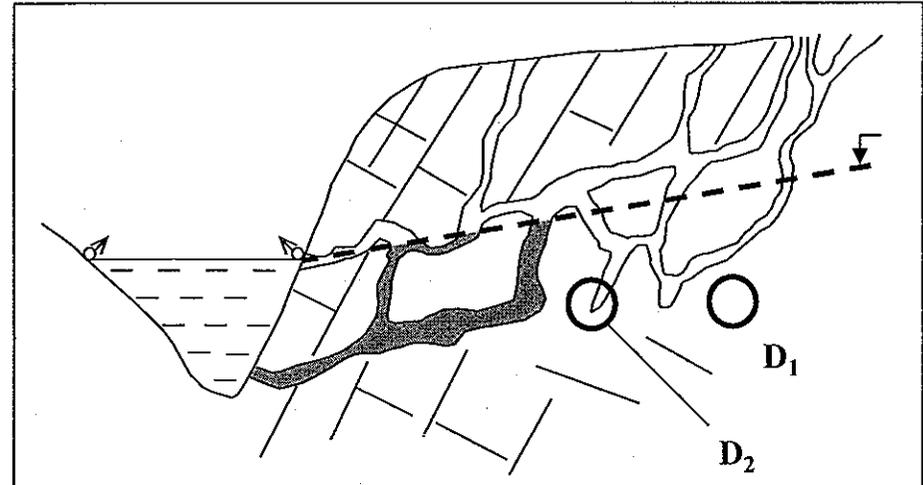
Túnel bajo el nivel de base de la karstificación



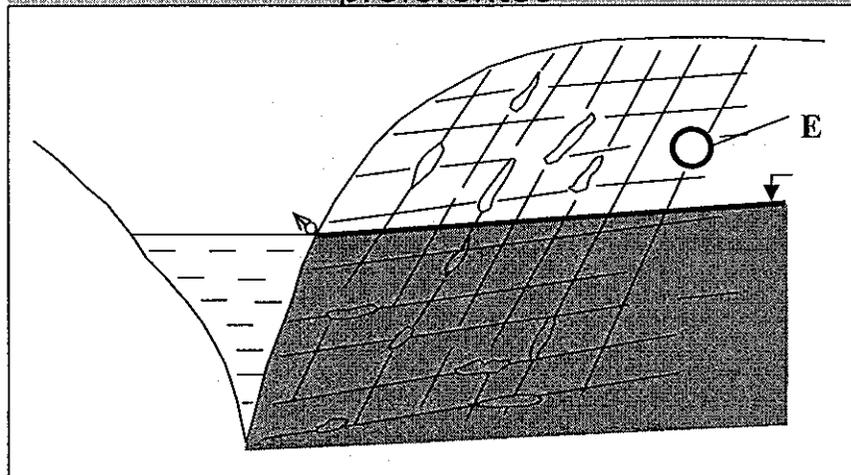
Modelos hidrogeológicos de túneles en macizos kársticos



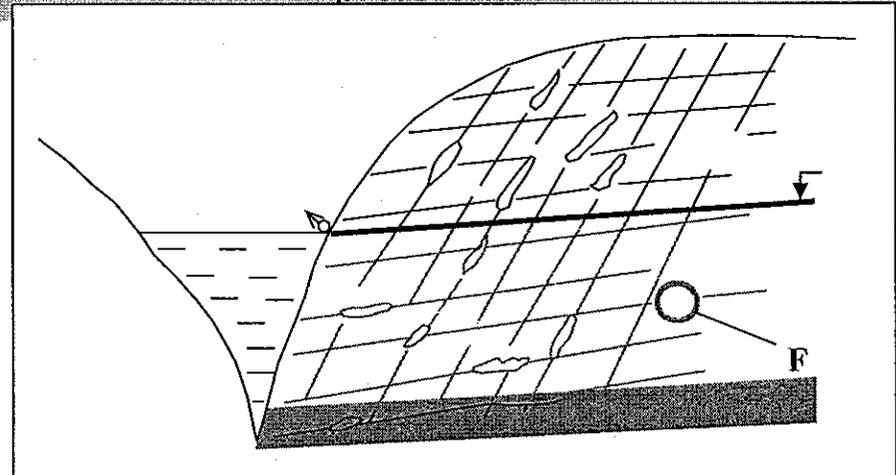
Modelo C. Túnel en la zona de infiltración de un macizo kárstico con conductos preferentes



Modelo D. Túnel en la zona de inundación de un acuífero kárstico con conductos preferentes



Modelo E. Túnel en la zona de infiltración en macizo de juntas abiertas y cavidades



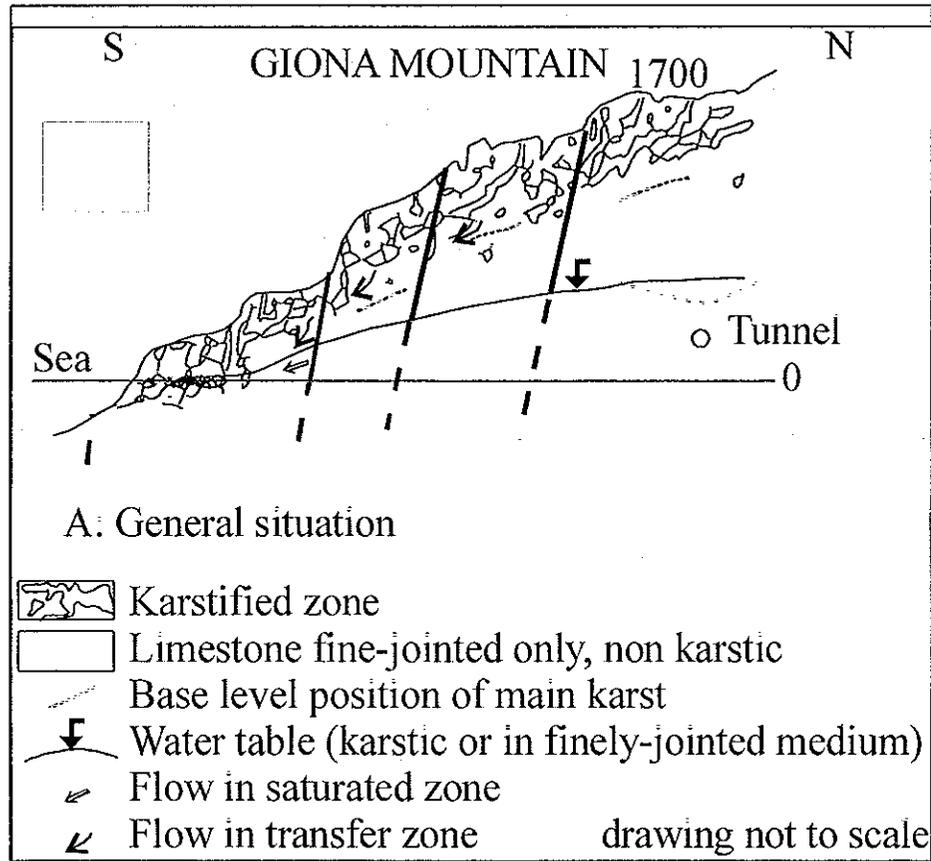
Modelo F. Túnel en la zona de inundación de un macizo de juntas abiertas y cavidades

Los modelos A y B no suponen riesgo especial. Ejemplo del Túnel de Giona



The karstic mountain (+2500) of Giona. Limestone continuously from Triassic to Eocene

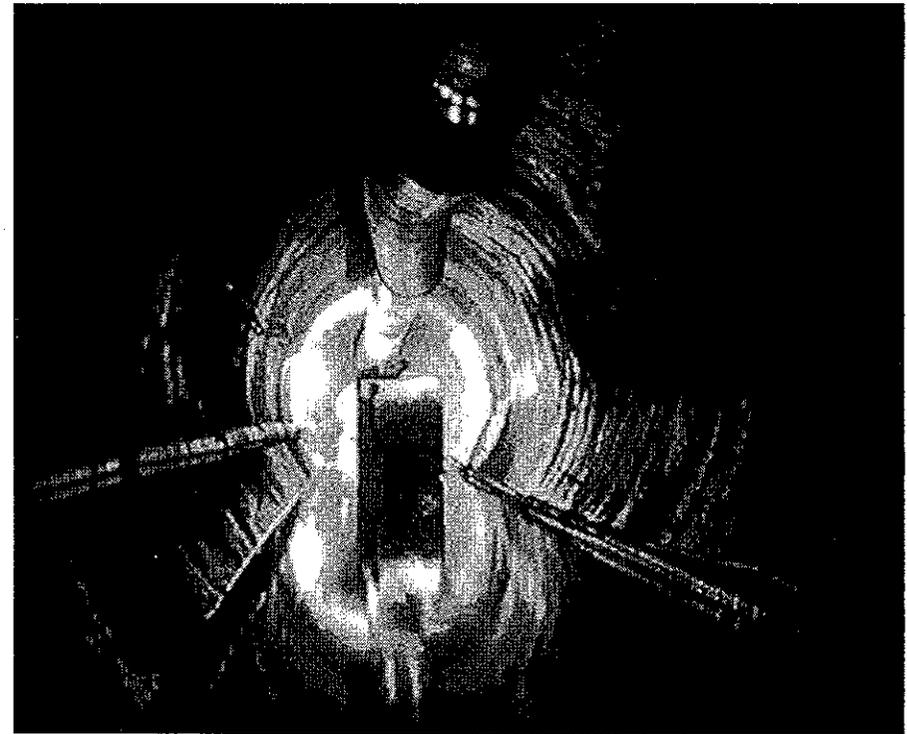
Túnel de Giona



MODELO HIDROGEOLÓGICO EN SECCIÓN TRANSVERSAL AL TÚNEL

Modelo B: Túnel bajo nivel de base karstico

Aspecto del túnel sin revestir

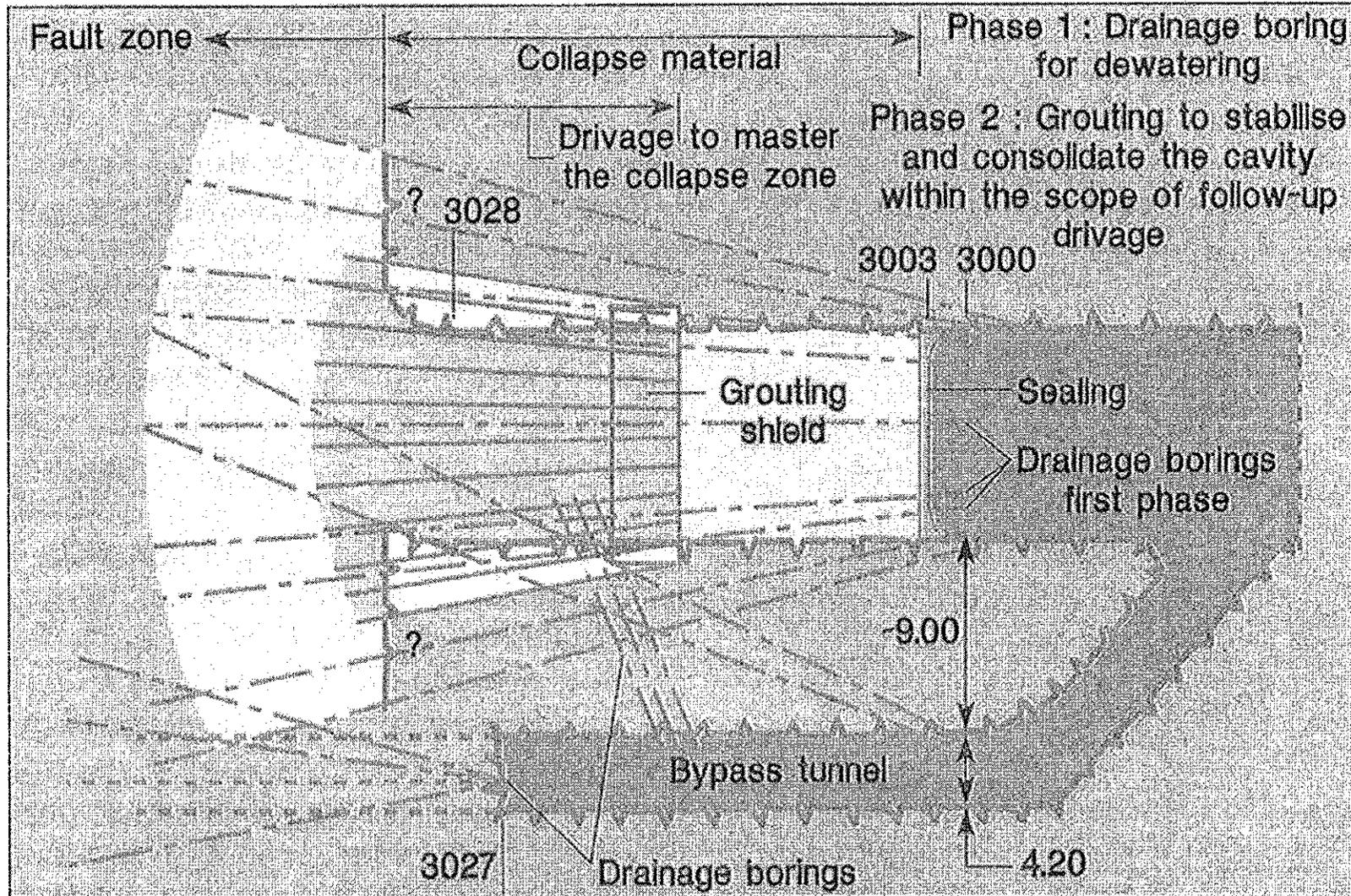


ENFRENTÁNDOSE AL AGUA DEL TERRENO

Necesidad absoluta de sondeos en el frente en los casos de los modelos C y D.

- Drenaje
 - Reducir la carga y caudal hacia el túnel.
- Aislamiento
 - Principalmente inyección
 - Otras técnicas (TBM presurizadas, congelación)
 - No es factible en calizas kársticas con conductos

EJEMPLO DE TRATAMIENTO DE INYECCIÓN Y DRENAJE

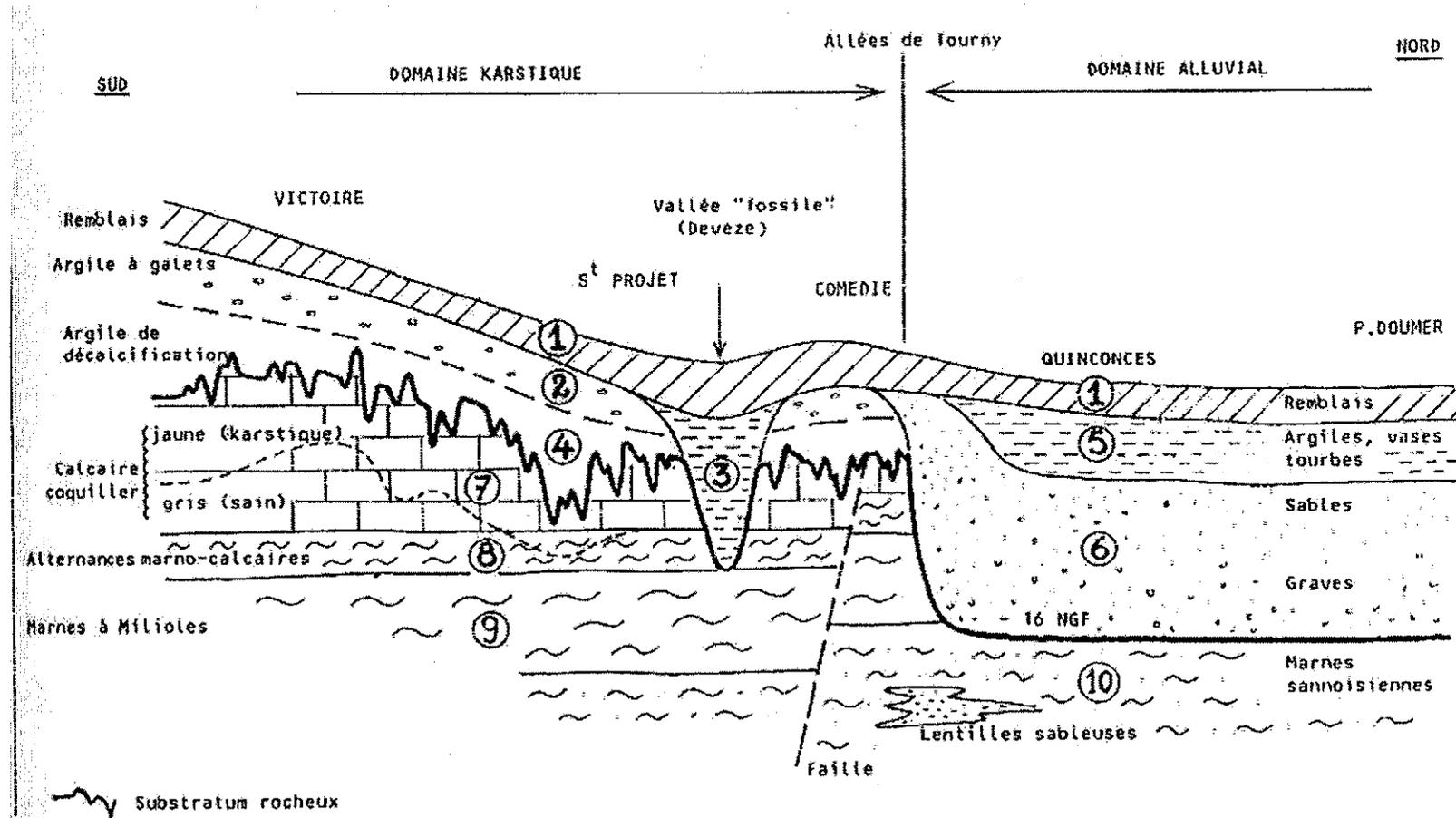


Dealing with the collapse zone in the 1987 tunnel (Maidl and Handke, 1993)

METRO DE BURDEOS. LINEA 2

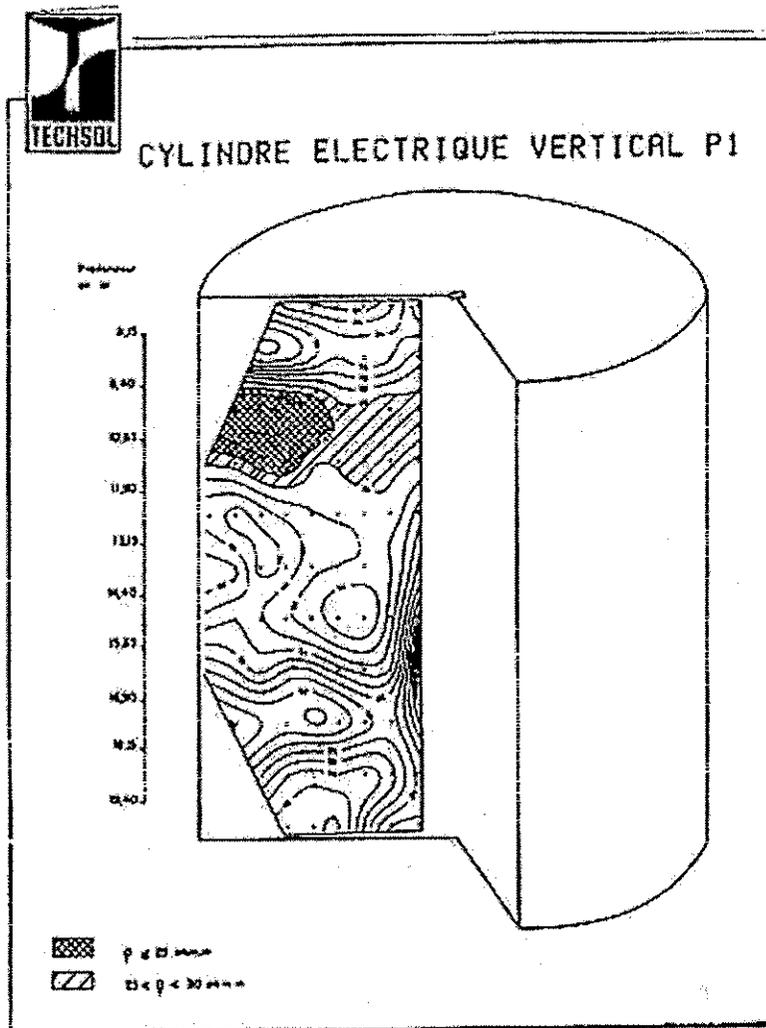
TÚNEL BITUBO, ϕ 5.2 M

EJEMPLO DE CONSTRUCCIÓN CON TBM PRESURIZADA



METRO DE BURDEOS

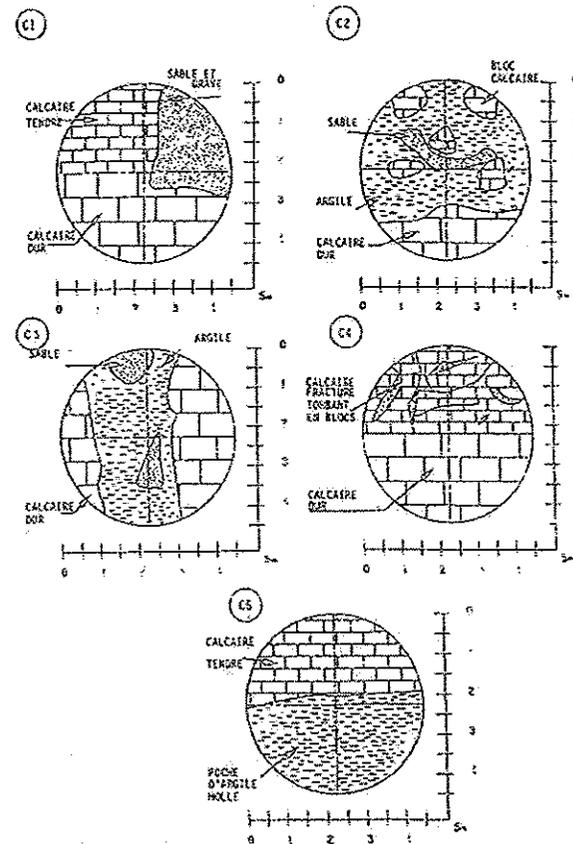
SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL: RECONOCE UN CILINDRO DE ϕ 10 M Y 15 M PROFUNDIDAD



METRO DE BURDEOS. LÍNEA 2.

EJEMPLO DE LA HETEROGENEIDAD DE LAS SECCIONES DE EXCAVACIÓN EN EL TRAMO KÁRSTICO

PRESIÓN DE AGUA: HASTA 26 M
CALIZA: RC = 5-100 MPa



METRO DE BURDEOS. LÍNEA 2

SELECCIÓN DEL MÉTODO CONSTRUCTIVO

- Excavación tradicional: desechada por la dificultad de conseguir un pretratamiento eficaz del terreno.
- Existen antecedentes de colectores construidos con escudos de aire comprimido de ataque puntual. Descartado por presiones de agua elevadas.
- Escudos presurizados de lodos. Descartado por la dificultad de estabilizar la presión del fluido.
- Escudos de presión de tierra. Solución retenida con estricto control del acondicionamiento del frente.

TÚNELES EN TERRENOS KÁRSTICOS

RESUMEN DE MÉTODOS CONSTRUCTIVOS EMPLEADOS EN EL KARST DE LA REGIÓN BORDELESA

Le tableau ci-après résume les caractéristiques essentielles des six chantiers au tunneller.

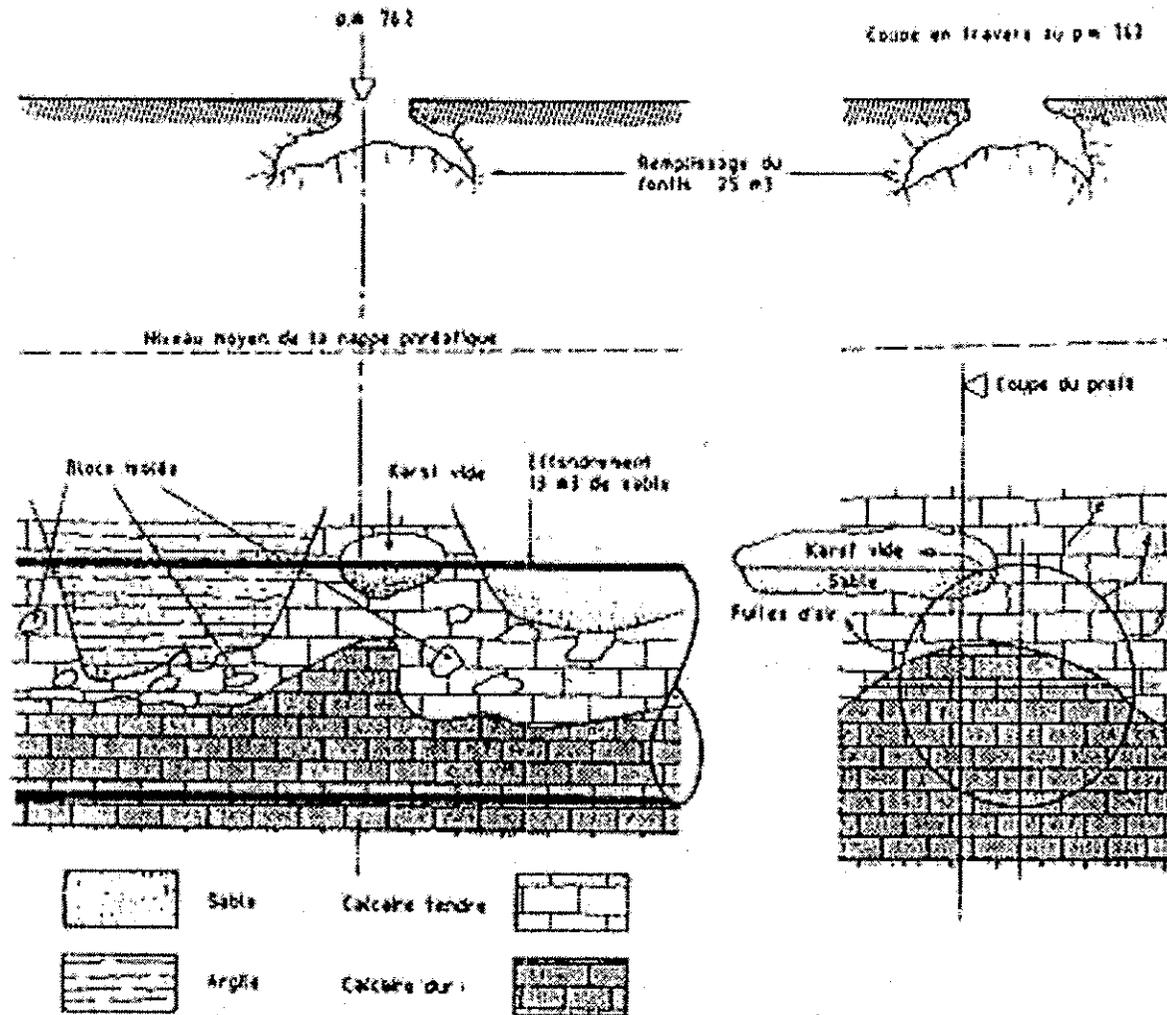
CHANTIERS (Bouclier)	ANNEES	Diamètre Creuse- ment	Longueur Forée (m)	GEOLOGIE Linéaire corresp.
AIR COMPRIME				Sables - Marnes (1000 m) (300 m)
CAUDERAN-NAUJAC Conduite forcée	86/88	5,02	1940	Calc. karstiques (640 m)
Avenue de la Libération	88/89	2,95	920	Calc. karstiques (920 m)
Boulevard Wilson	89/90	4,36	1460	C. Karst. 1210 m. alluvions (256 m)
Rue de la Liberté	91	3,84	154	Calc. karstiques (154 m)
PRESSION DE TERRE				
CAUDERAN-NAUJAC Amont Taudin (Ch. de Gaulle)	91	2,88	495	Alluvions (150m) C. Karst. (345m)
RUISSEAU D'ARS (*)	93	3,43	540	Calc. karstiques

METRO DE BURDEOS. LÍNEA 2. PROBLEMÁTICA DE LA CONSTRUCCIÓN MEDIANTE TUNELADORA EN TERRENO KÁRSTICO

- Estabilidad del frente en cavidades rellenas de material blando con carga de agua.
- Hundimiento de la tuneladora en caso de cavidad en solera.
- Excavabilidad del material constituido por bloques de roca en matriz blanda.
- En secciones mixtas caliza/arcilla blanda, sobreexcavación del material blando.
- Riesgo de vaciado de chimeneas kársticas aflorando en superficie.
- Dificultad de control de la inyección del trasdós ante la presencia de huecos.
- Control complejo del acondicionamiento del frente

TÚNEL EN TERRENOS KÁRSTICOS

RIESGO DE APARICIÓN DE CHIMENEAS EN SUPERFICIE. DIFICULTAD DE CONTROLAR VACIADO DE CAVERNAS POR ENCIMA DEL TÚNEL



USO DE TUNELADORAS EN TERRENOS KÁRSTICOS

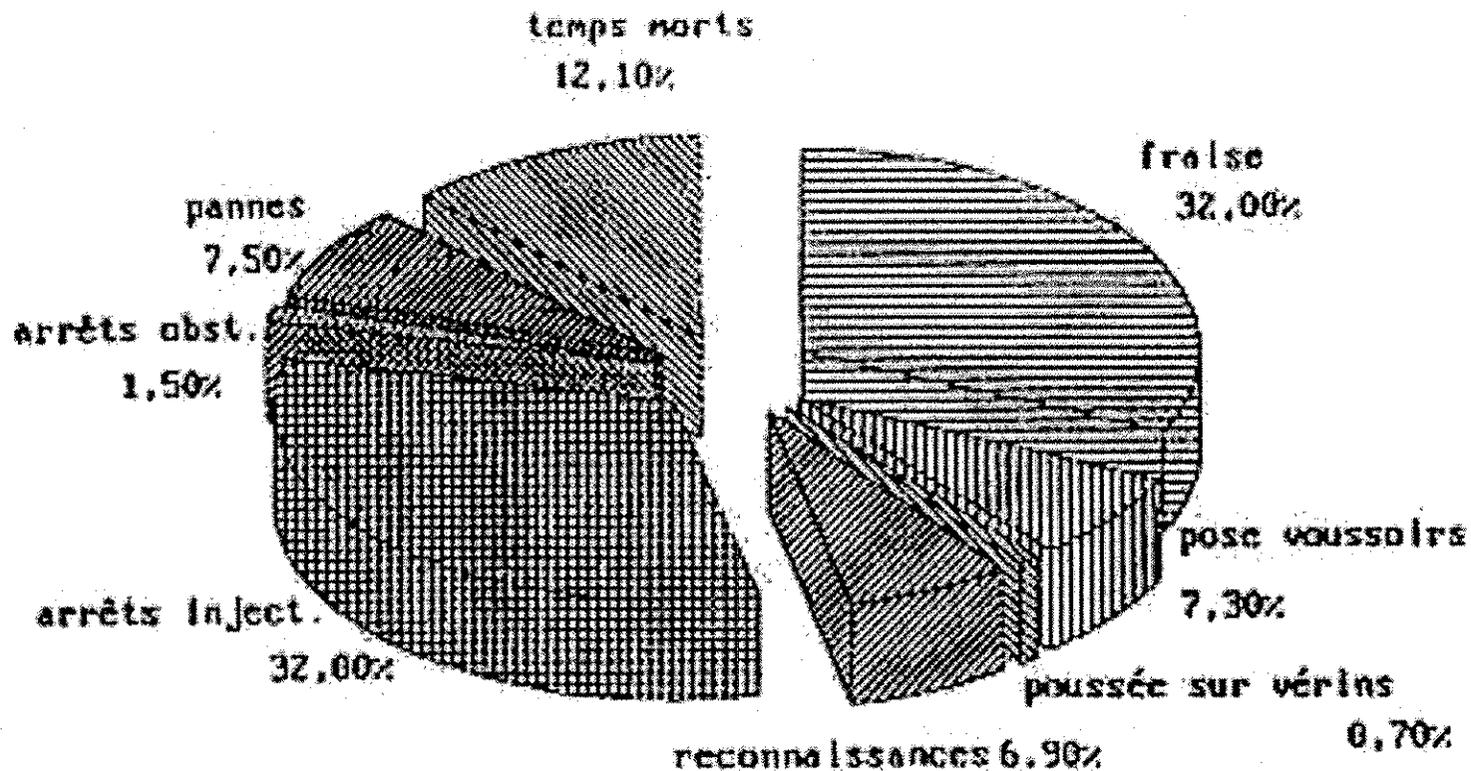
INYECCIÓN DE RELLENO EN TRASDÓS DE DOVELA. SUCESIVAS FASES.
 PARA UN ANILLO NOMINAL DE 20 CM, SE HAN MEDIDO LOS SIGUENTES EXCESOS DE VOLÚMEN EN TÚNELES DE LA REGIÓN BORDELESA.

CHANTIERS Diam. Creusement	COMPOSITION DU COULIS	Pression Maxi	Q > VIDE THEORIQUE	
			m ³ /ml	Anneau équiv
Cauderan-Naujac Diam 5 020 Voussoirs Fonte	330 kg ciment 40 kg bentonite 1 000 kg sable	3 bars	1,5 à 2,5 m ³ /m	9,5 à 15,8 cm
Brd Wilson Diam 4 360 Voussoirs Béton	200 kg ciment 100 kg bentonite 1 000 kg sable	5 bars	1,5 à 4 m ³ /m moy 2,5 m ³ /m	11 à 29 cm moy 18,2 cm
Libération Diam 2 950 Voussoirs Béton	Gravier 5/12 et coulis de B C en 2ème phase		1,9 m ³ /m coulis	20,5 cm
Taudin Av Ch de Gaulle Diam 2 880 Voussoirs Béton	355 kg filler 19 kg bentonite 800 kg gravier 900 kg sable	5 bars	0,86 m ³ /m moy 2 m ³ /m maxi	9,5 cm moy 22 cm maxi
Rue de la Liberté Diam 3 240 Voussoirs Fonte	200 kg ciment 60 kg bentonite 1 000 kg sable	3 bars	1,1 à 2,1 m ³ /m moy. 1,45 m ³ /m	9 à 17,5 cm 12 cm moy

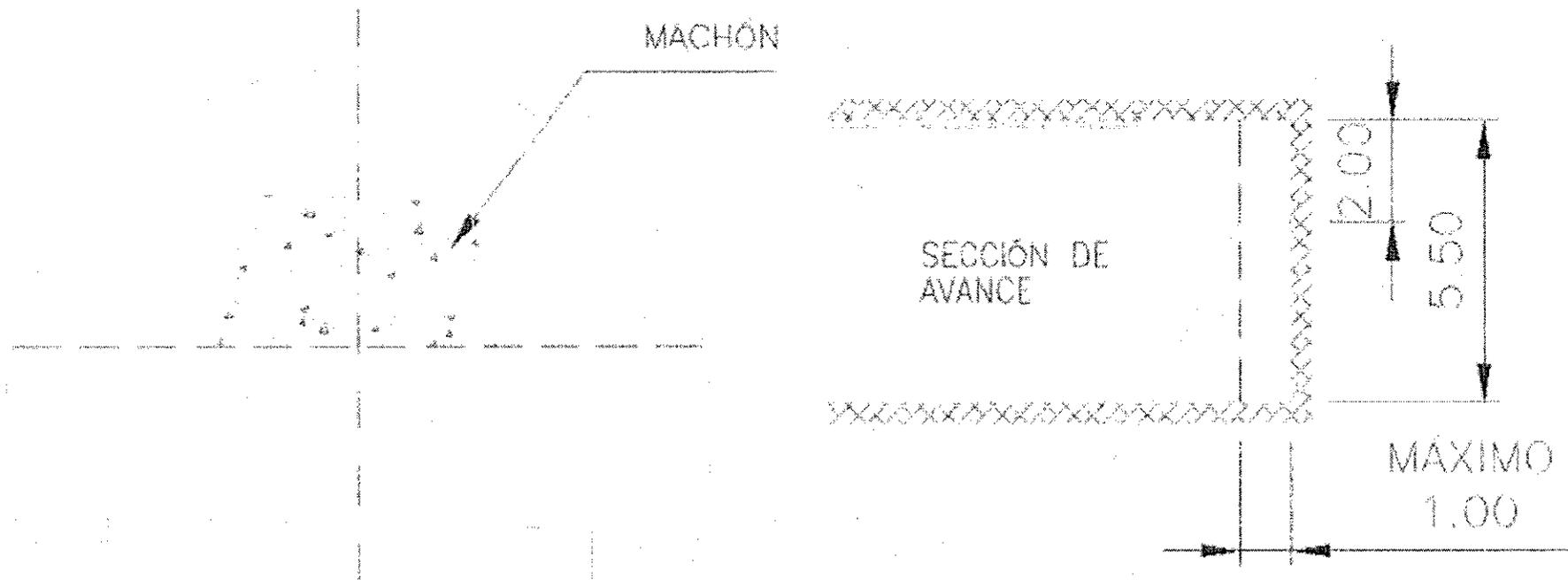
TÚNELES EN TERRENOS KÁRSTICOS

TIEMPOS MEDIOS DE CICLO DE UNA TUNELADORA DE AIRE COMPRIMIDO. RECONOCIMIENTO DEL TERRENO MEDIANTE SONDEOS DESTRUCTIVOS CON MEDIDA DE PARÁMETROS

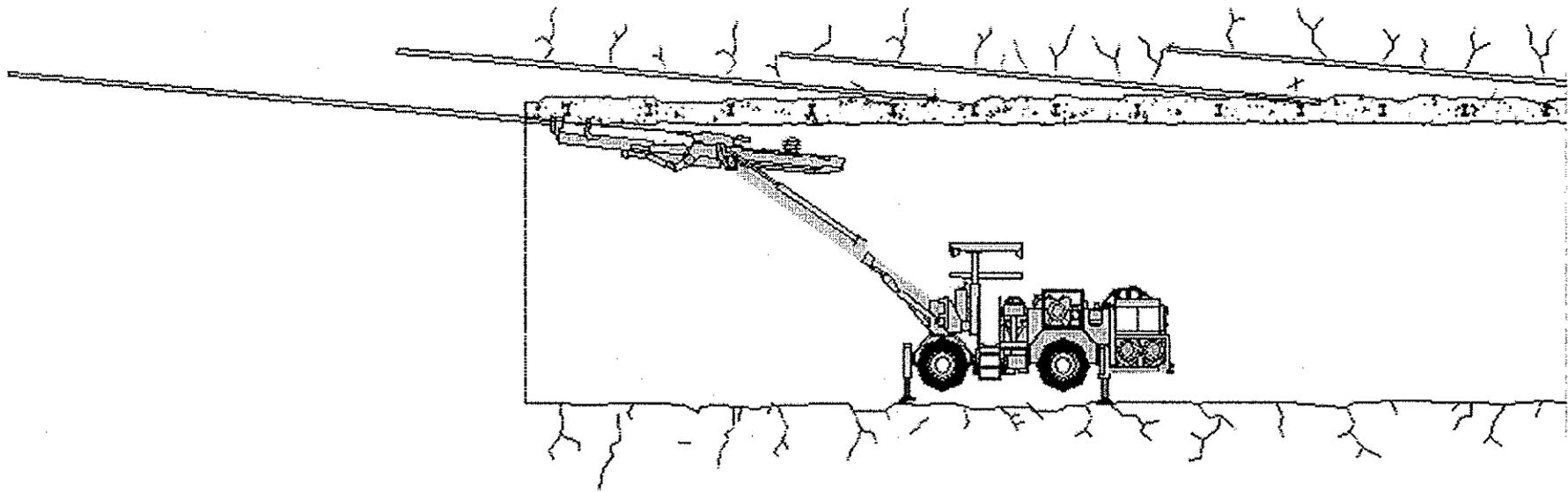
Utilisation du tunneller Diam. 3 800 WILSON



EXCAVACIÓN POR MÉTODOS CONVENCIONALES EN MACIZOS KÁRSTICOS. CREACIÓN DE UN MACHÓN CENTRAL PARA ESTABILIZACIÓN DEL FRENTE



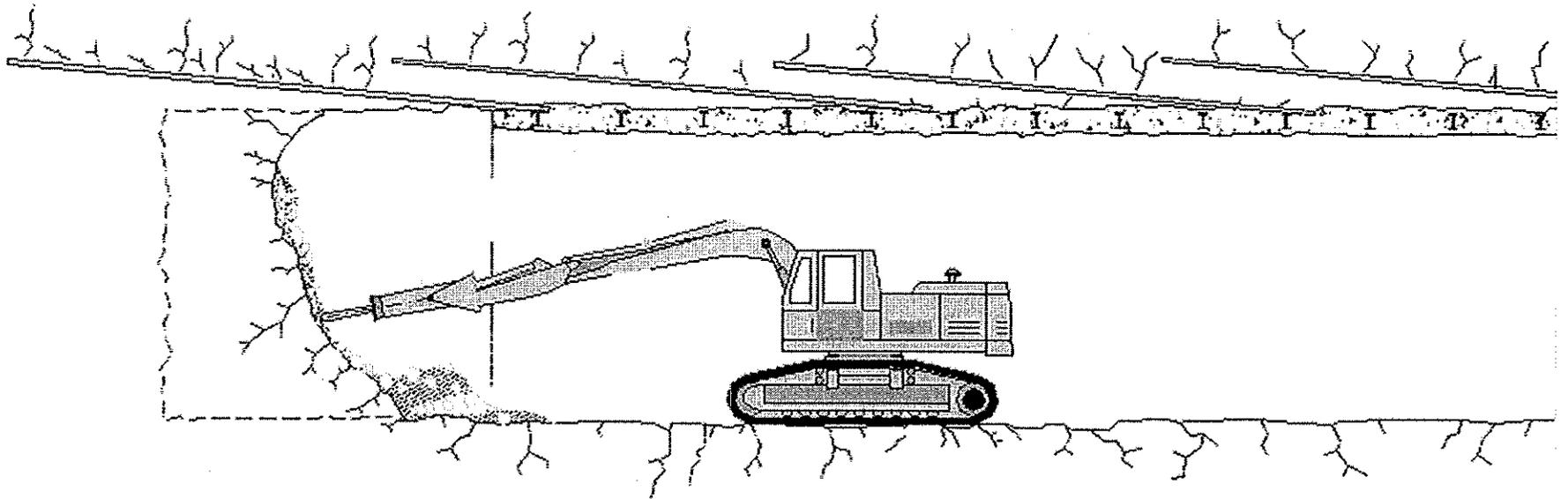
EXCAVACION POR METODOS CONVENCIONALES EN MACIZOS KÁRSTICOS. FASES CONSTRUCTIVAS



I. - EJECUCIÓN DE PARAGUAS DE MICROPILOTES SUBHORIZONTAL

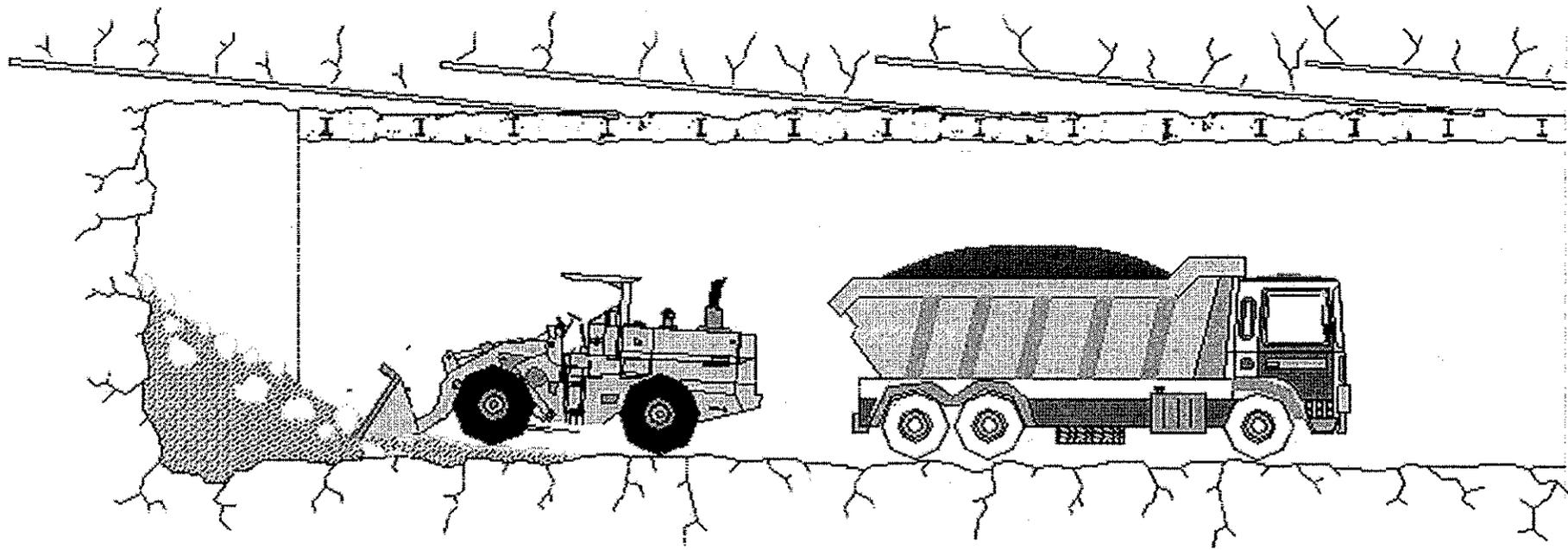
EXCAVACION CON MEDIOS CONVENCIONALES EN MACIZOS KÁRSTICOS.

FASES CONSTRUCTIVAS



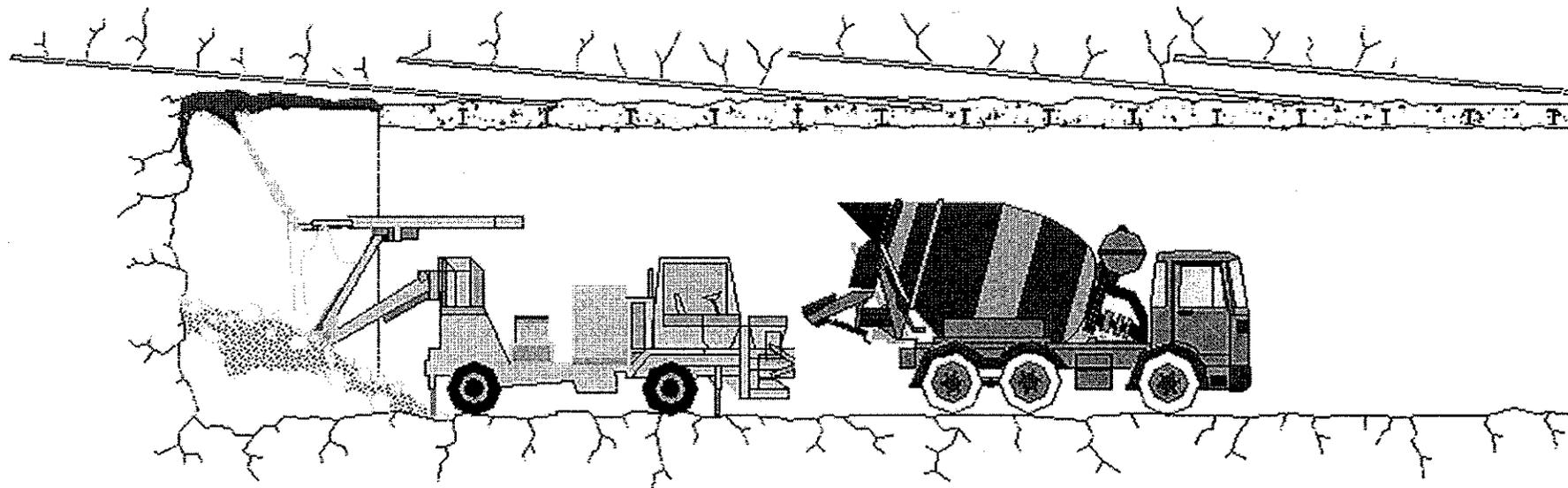
II. - EXCAVACIÓN CON MEDIOS MECANICOS AL AMPARO DE UN PARAGUAS DE MICROPILOTES PREVIAMENTE EJECUTADO

EXCAVACION POR METODOS CONVENCIONALES EN MACIZOS KÁRSTICOS. FASES CONSTRUCTIVAS



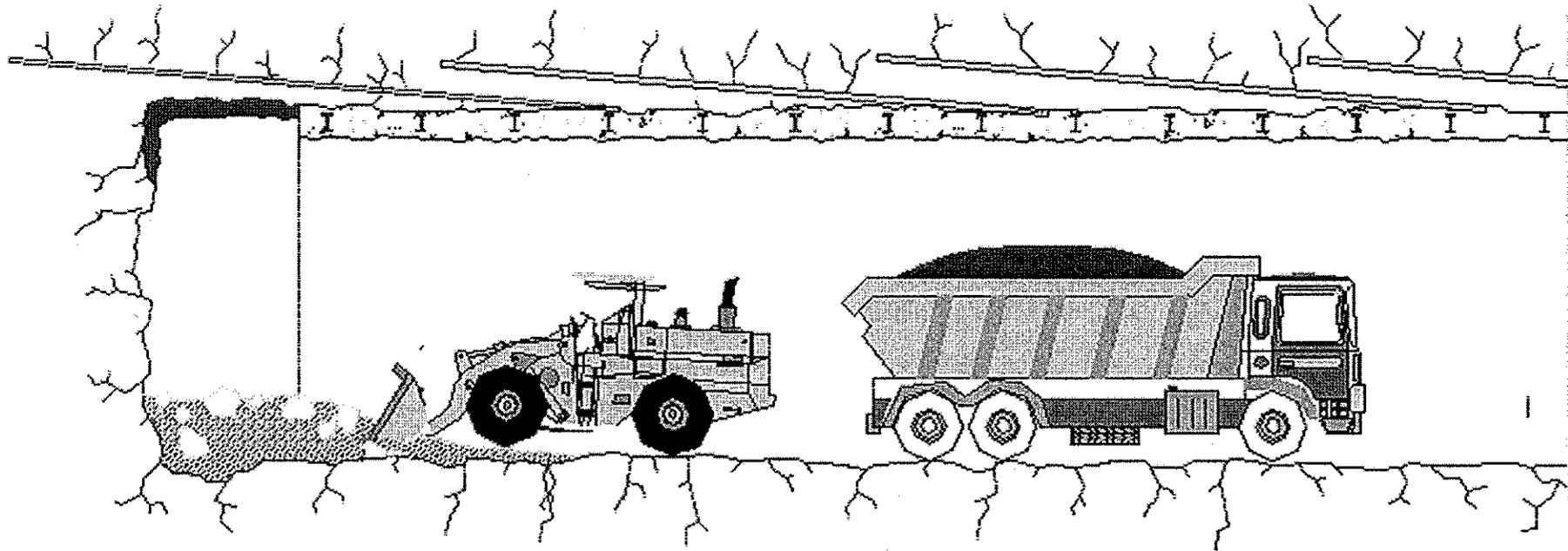
III. - SANEAMIENTO Y DESESCOMBRO PREVIO

EXCAVACION POR METODOS CONVENCIONALES EN MACIZOS KÁRSTICOS. FASES CONSTRUCTIVAS



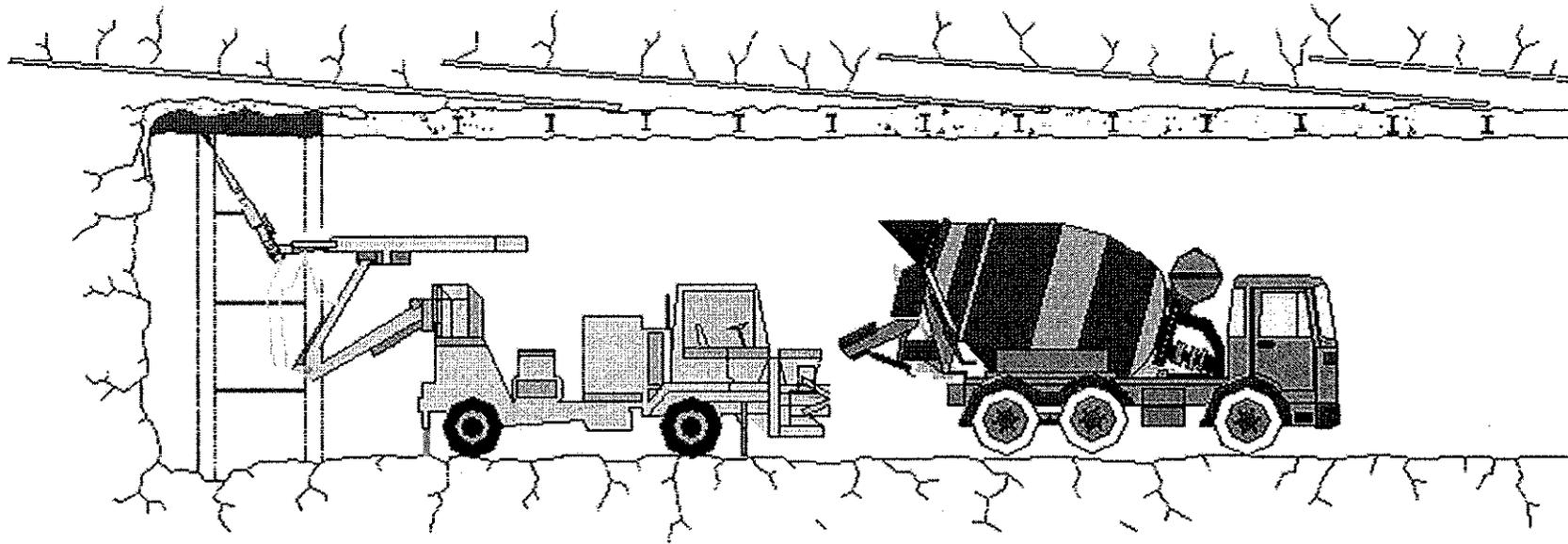
IV. - SELLADO. POSIBLE SELLADO DEL FRENTE.

EXCAVACION POR METODOS CONVENCIONALES EN MACIZOS KÁRSTICOS. FASES CONSTRUCTIVAS



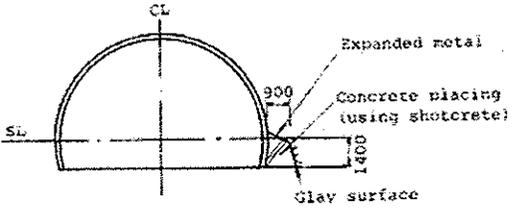
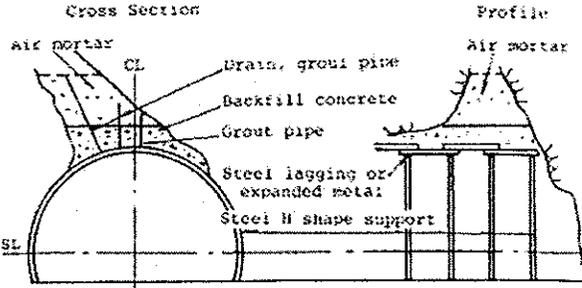
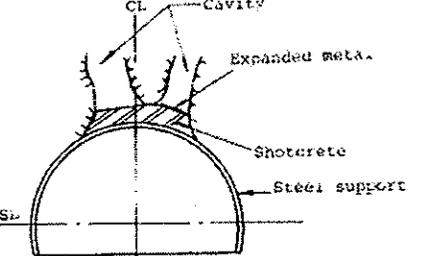
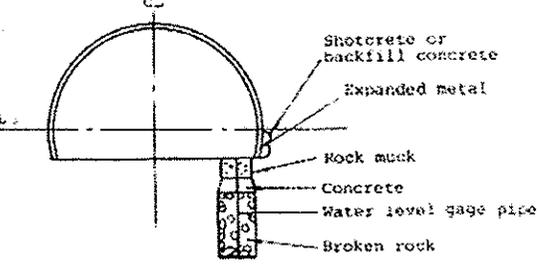
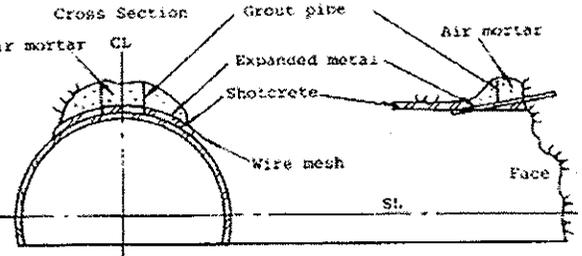
V. - FINALIZACIÓN DEL DESESCOMBRO

EXCAVACION POR METODOS CONVENCIONALES EN MACIZOS KÁRSTICOS. FASES CONSTRUCTIVAS



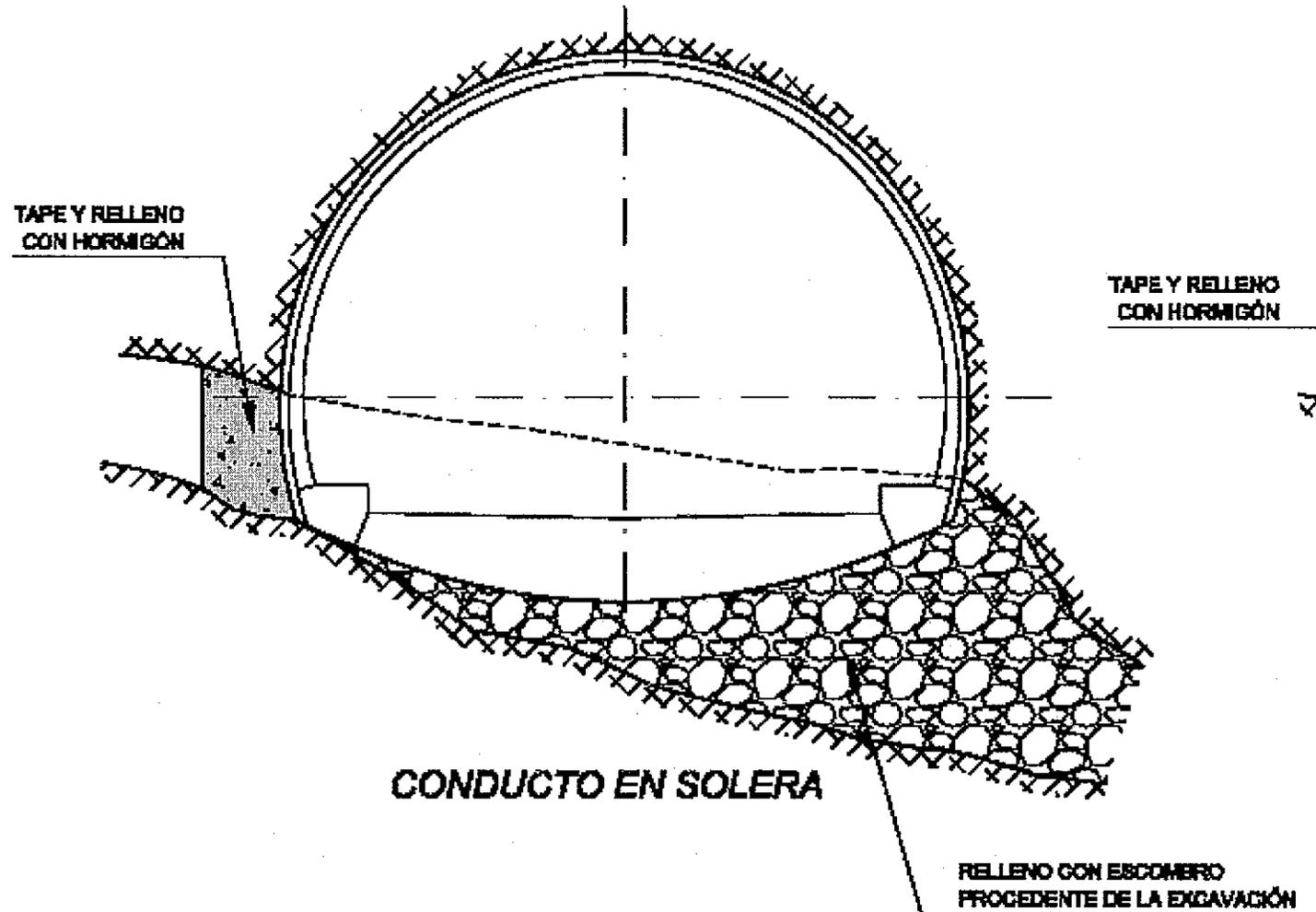
VI. - SOSTENIMIENTO MEDIANTE CERCHAS HEB-160 ó HEB-180
Y HORMIGÓN PROYECTADO

CRUCE DE CAVIDADES MEDIANTE NUEVO MÉTODO AUSTRIACO CATÁLOGO DE MEDIDAS CONSTRUCTIVAS

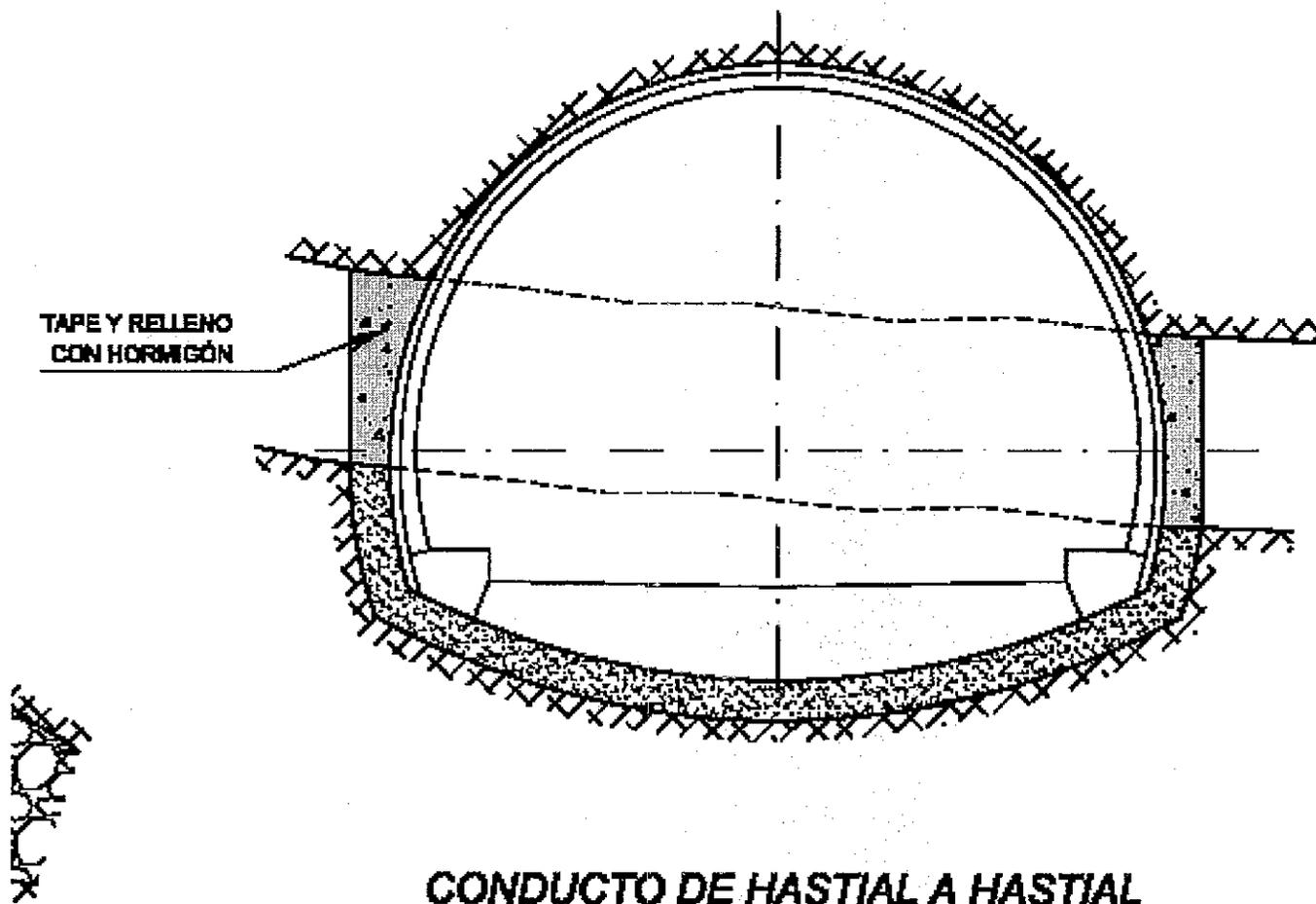
<p>Type-1</p>	 <p>Apply expanded metal lagging to ceiling of cavity and fill with shotcrete.</p>	<p>Type-4</p>  <p>Make an inner form using expanded metal lagging, light weight steel lagging and steel materials fixed to the supports, install drain pipes and grout pipes and apply shotcrete. Further, place backfill concrete as reinforcement of support and inject air mortar leaving open water channels into other voids.</p>
<p>Type-2</p>	 <p>Make an outer form using expanded metal lagging and deformed bars and apply shotcrete in several stages. install drain pipe.</p>	<p>Type-5</p>  <p>Install water level gage pipe (200mm dia.), backfill with broken rock so as not to cut off the water channel, place strengthening concrete at a position where it will not effect future construction and then further backfill with rock muck.</p>
<p>Type-3</p>	 <p>Make an outer form using expanded metal lagging and deformed bars and apply shotcrete in several stages. Fill voids with air mortar.</p>	

CRUCE DE ZONAS FALLADAS O KARSTIFICADAS

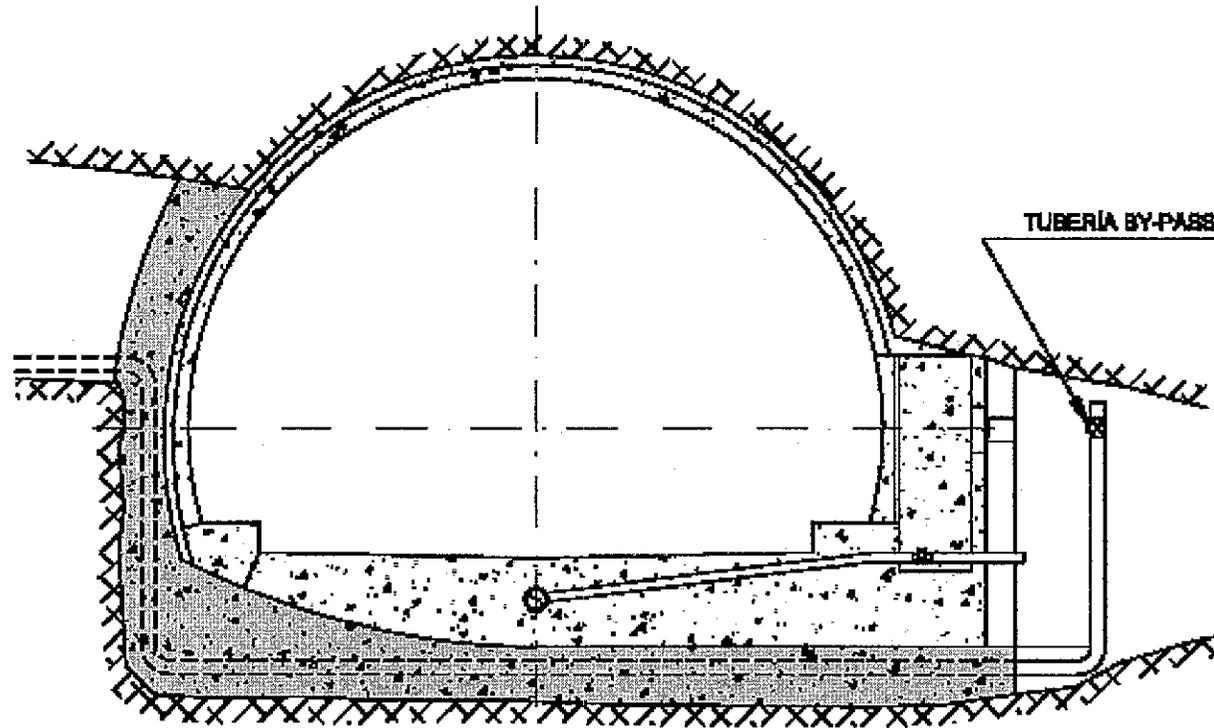
REVESTIMIENTO DE CONDUCTOS EN LA PARTE INFERIOR DE LA SECCIÓN



CRUCE DE ZONAS FALLADAS O KARSTIFICADAS REVESTIMIENTO DE CONDUCTOS A NIVEL DE HASTIAL

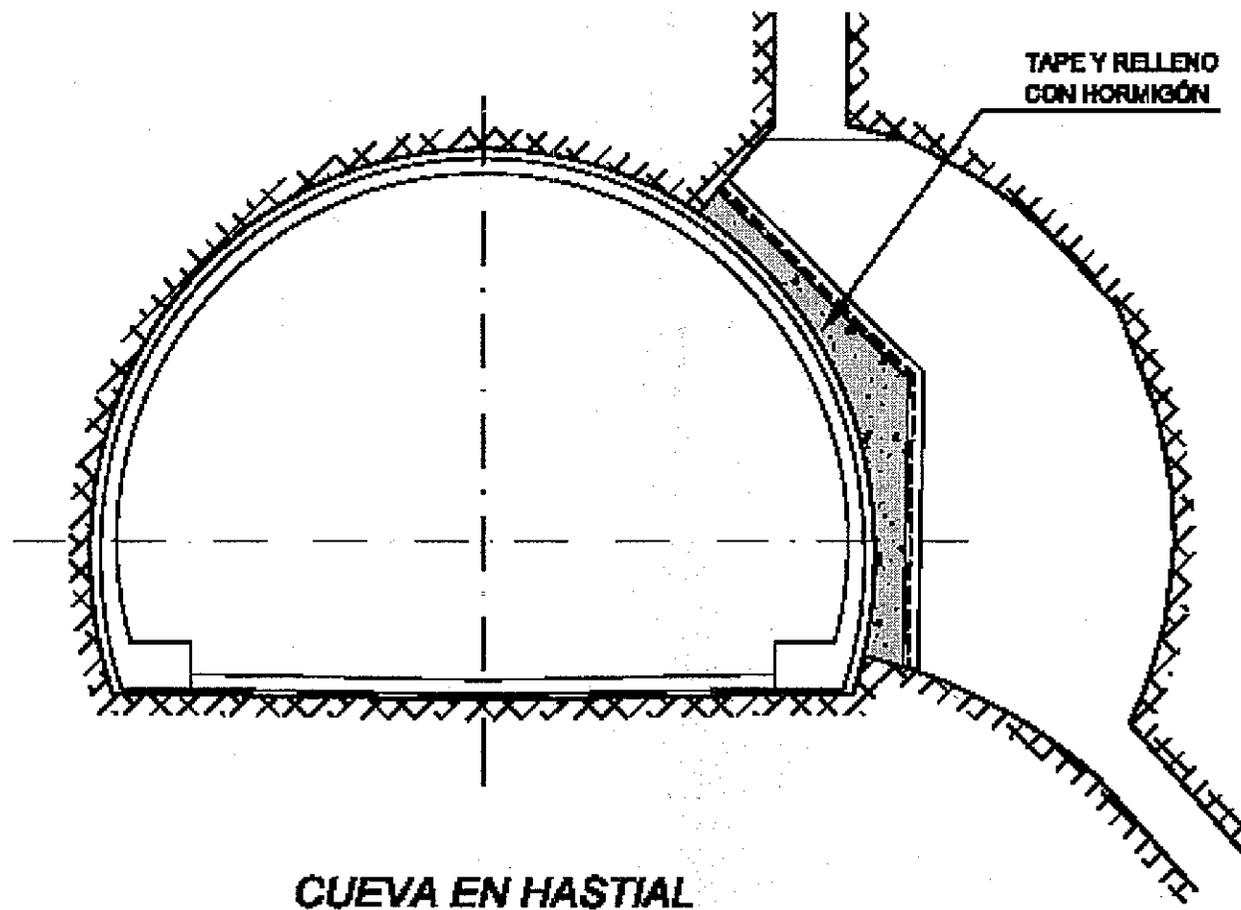


CRUCE DE ZONAS FALLADAS O KARSTIFICADAS DRENAJE DE CONDUCTOS

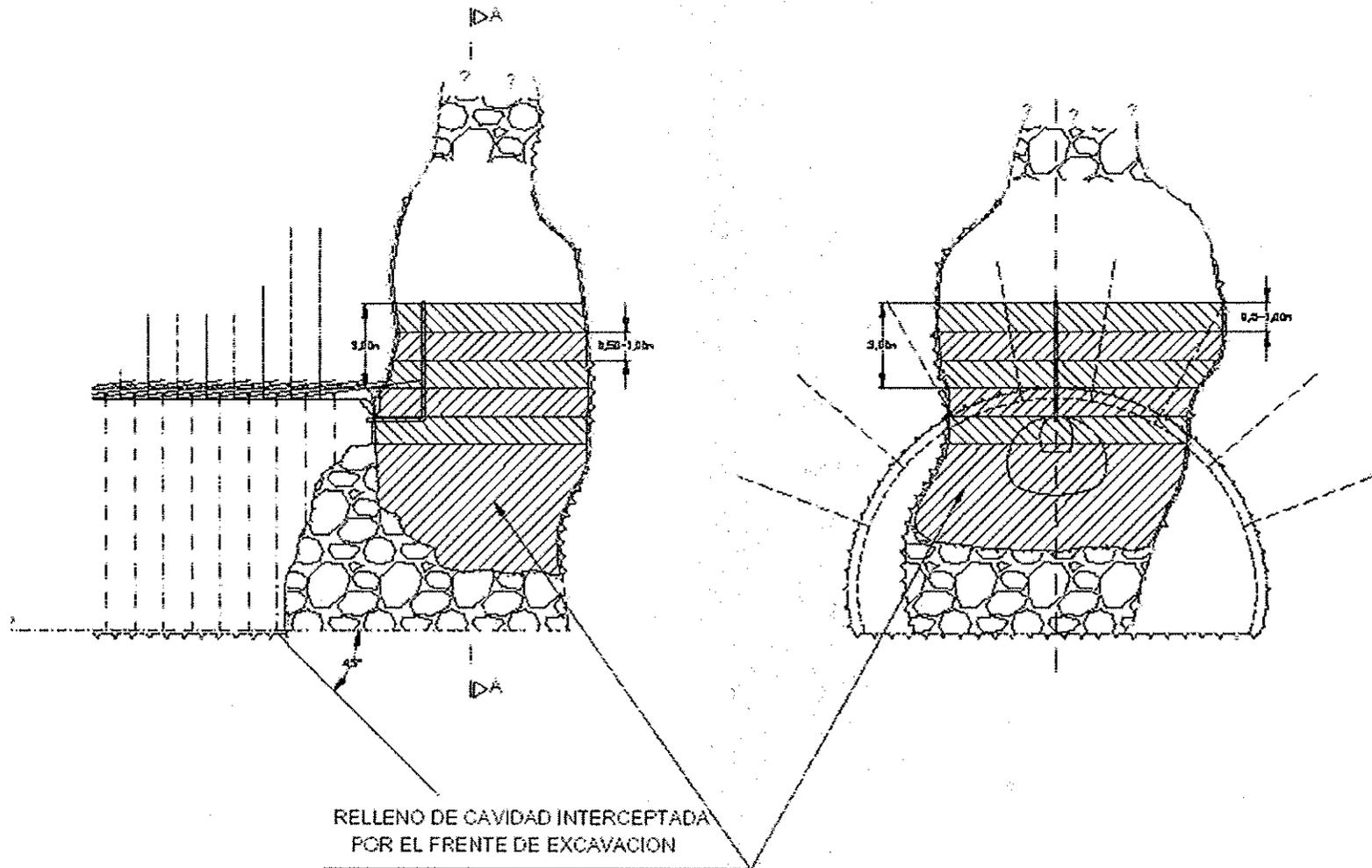


BY-PASS PARA CONDUCTO CARGADO DE AGUA

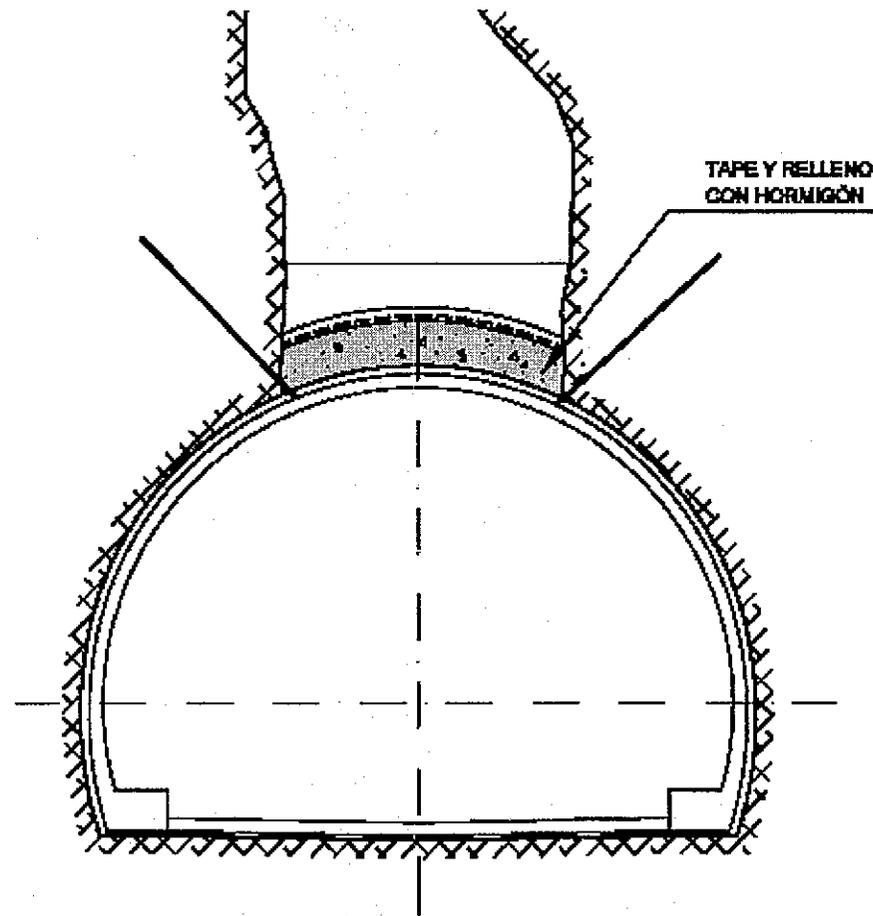
CRUCE DE ZONAS FALLADAS O KARSTIFICADAS REVESTIMIENTO DE CUEVAS



CRUCE DE ZONAS FALLADAS O KARSTIFICADAS RELLENO DE CUEVAS EN CLAVE



CRUCE DE ZONAS FALLADAS O KARSTIFICADAS REVESTIMIENTO DE CUEVAS EN CLAVE



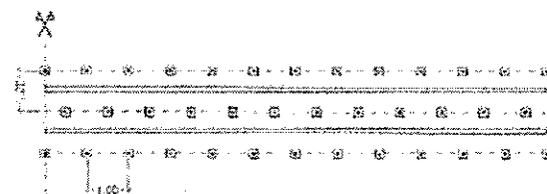
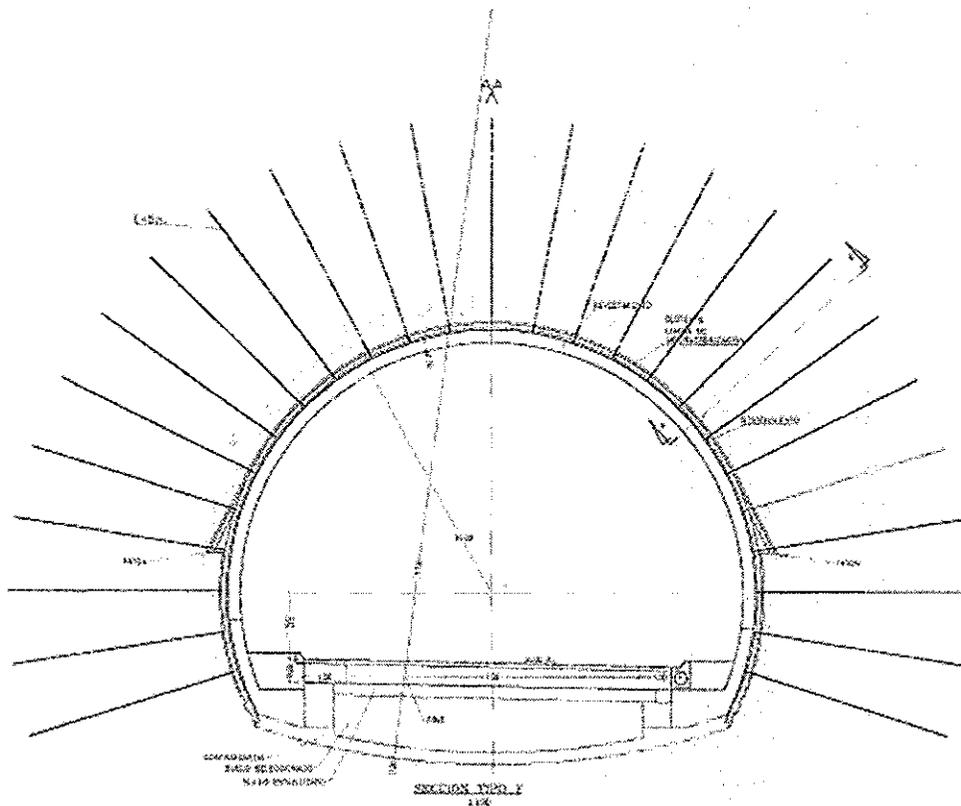
CUEVA EN CLAVE

POBLEMAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL SOSTENIMIENTO MEDIANTE NUEVO MÉTODO AUSTRIACO

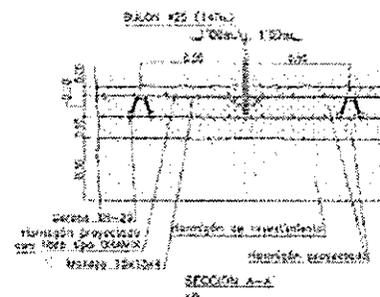
- Pérdida de adherencia de la gunita: drenaje por delante del frente
- Alteración de la calidad del hormigón proyectado: utilizar aditivos antisegregación.
- Colapso de los taladros para instalación de los bulones: bulones autoperforantes.
- Lavado de las inyecciones de los bulones: acelerantes de fraguado.

TÚNEL DE ARLABÁN

SOSTENIMIENTOS PREVISTOS

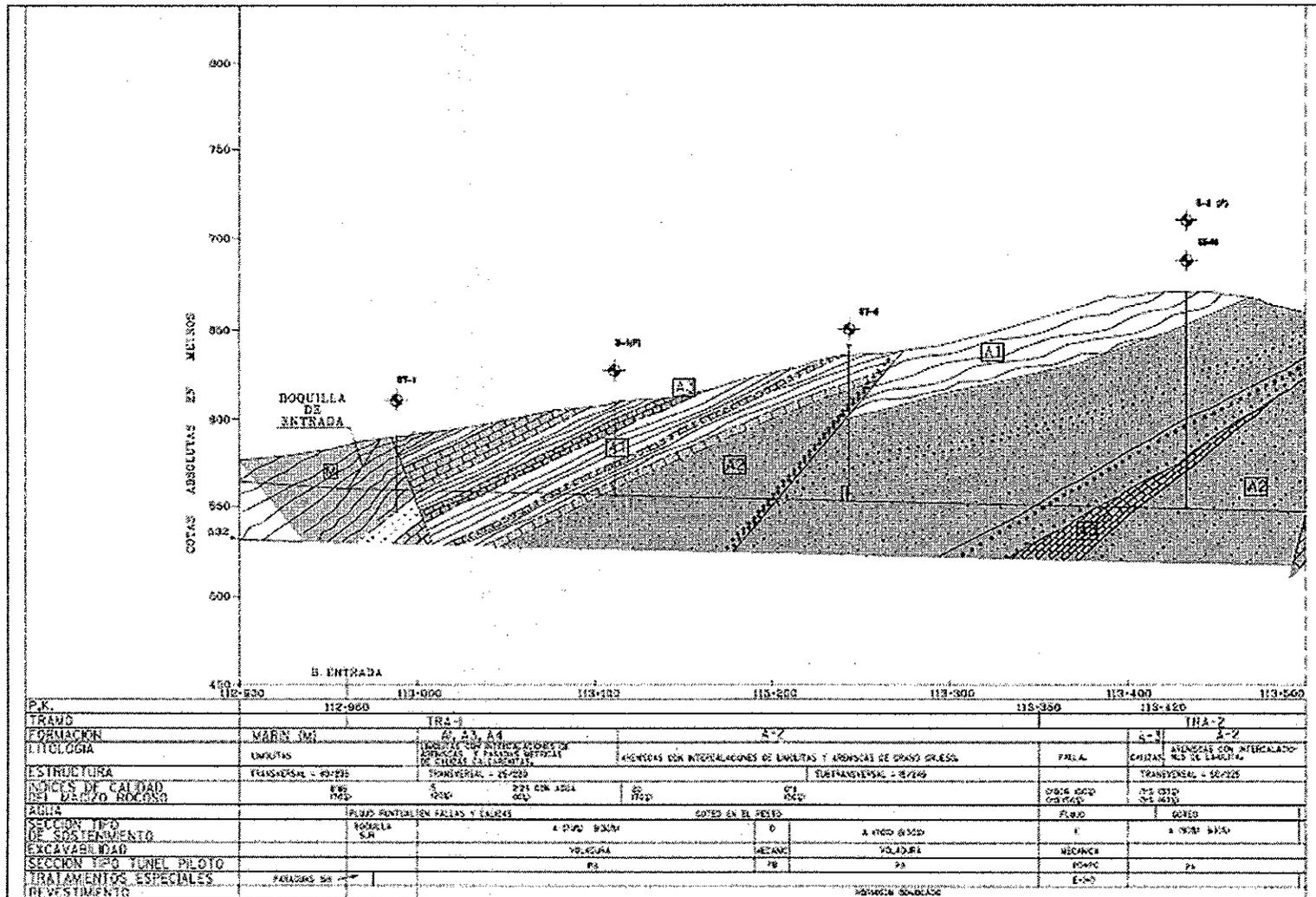


DESARROLLO DE LA SECCION TIPO F



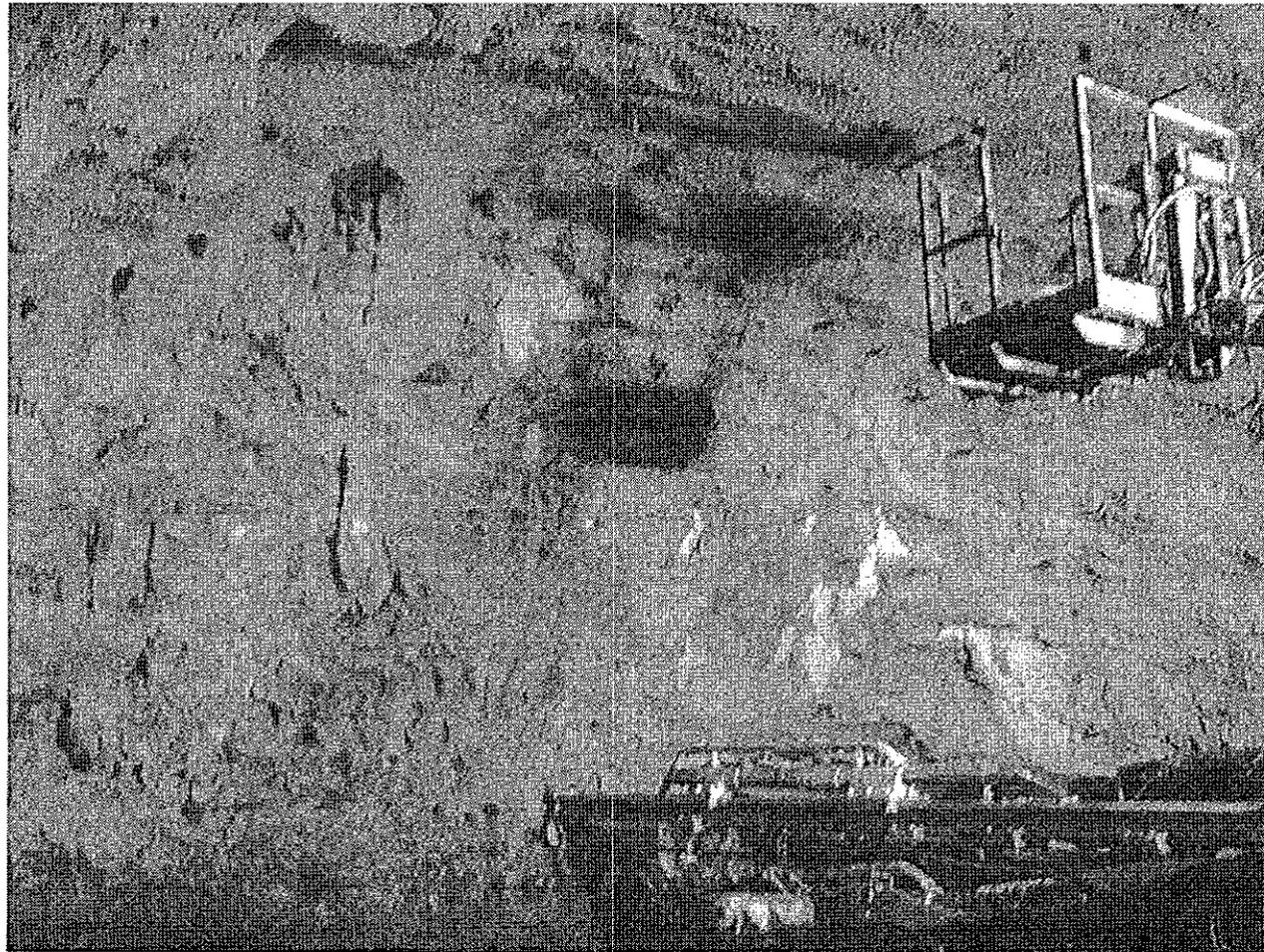
TÚNEL DE ARLABÁN

PERFIL GEOTÉCNICO DEL TÚNEL EN EL TRAMO DE CALIZAS (I)

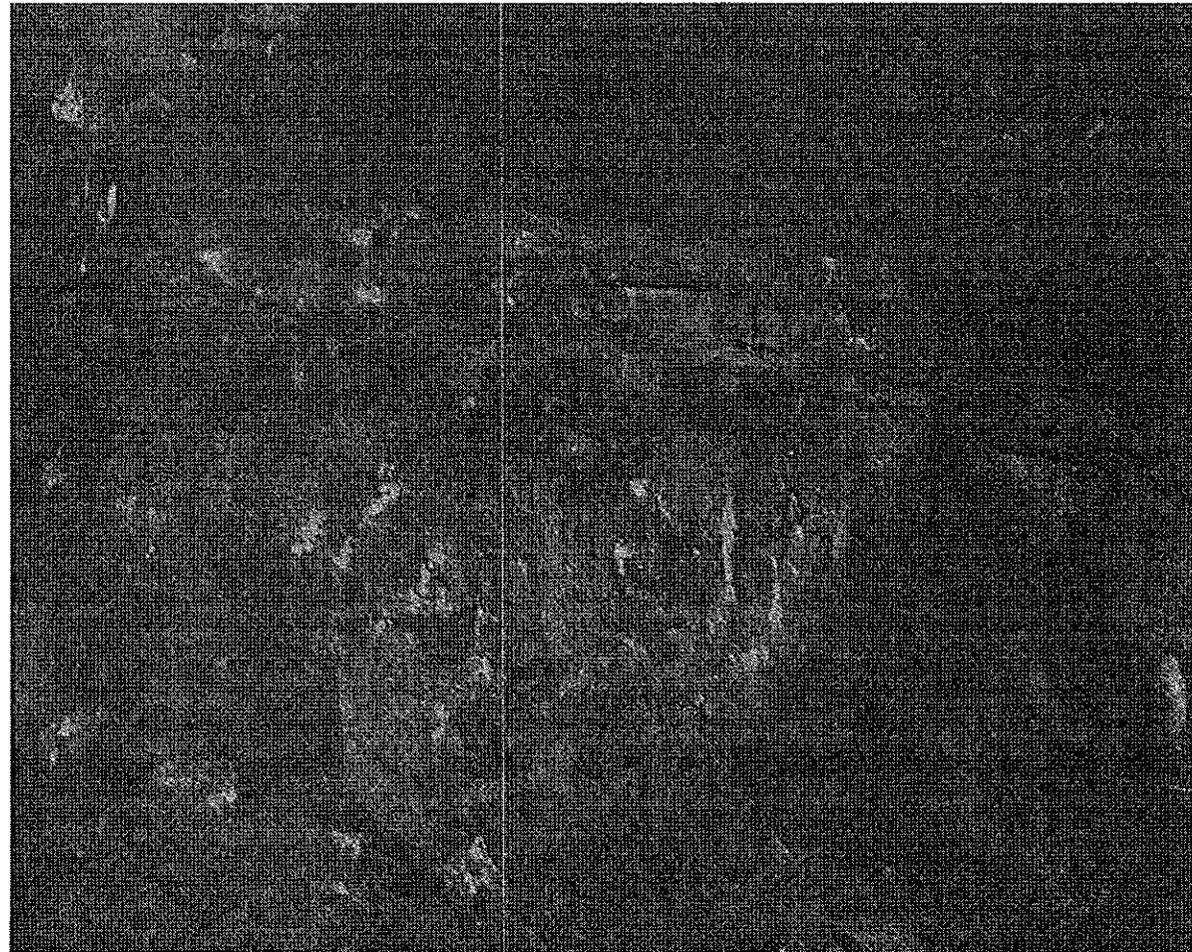


UNE A FIGURA 123224

**TÚNEL DE ARLABÁN
FRETE DE EXCAVACIÓN
TRANSICIÓN DE LAS LIMOLITAS A CALIZAS, SIN
INDICIOS DE KARSTIFICACIÓN**



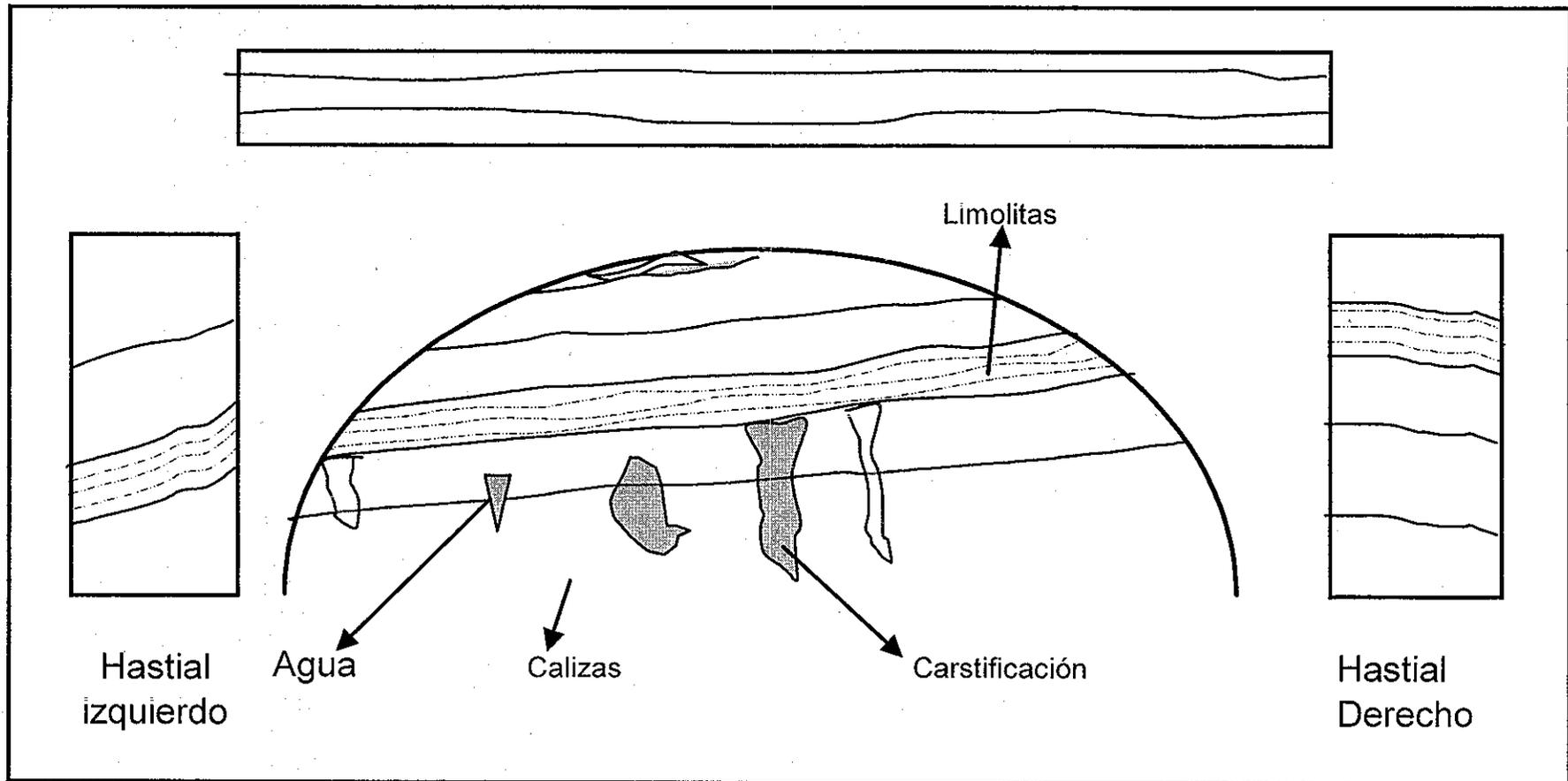
TÚNEL DE ARLABÁN
P.K. 113+308. FRENTE DE EXCAVACIÓN
INDICIOS DE KARSTIFICACIÓN DEL MACIZO EN LA
PRIMERA BARRA CALCÁREA



TÚNEL DE ARLABÁN

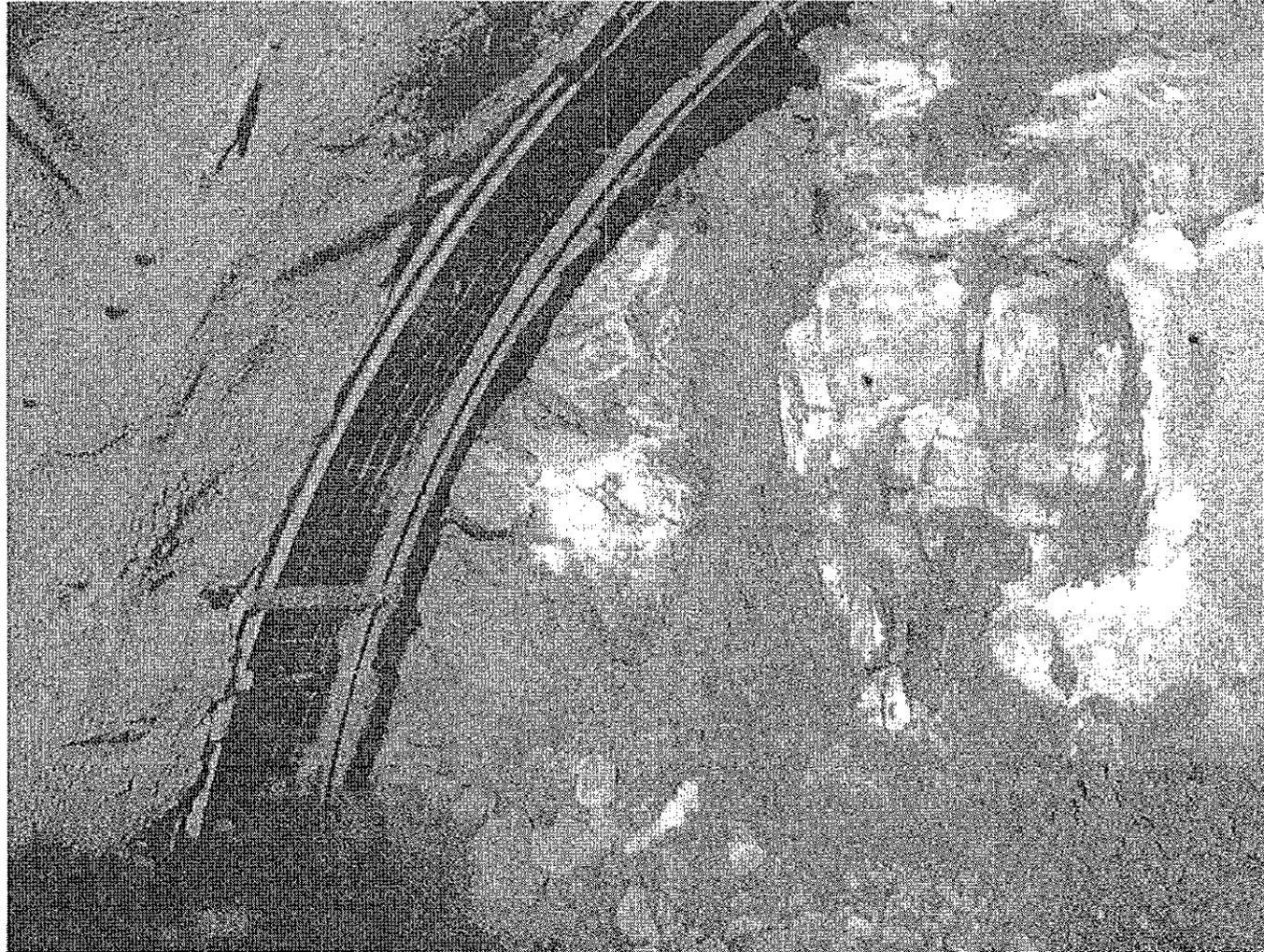
P.K. 113+308. FRENTE DE EXCAVACIÓN

LEVANTAMIENTO GEOLÓGICO



TÚNEL DE ARLABÁN

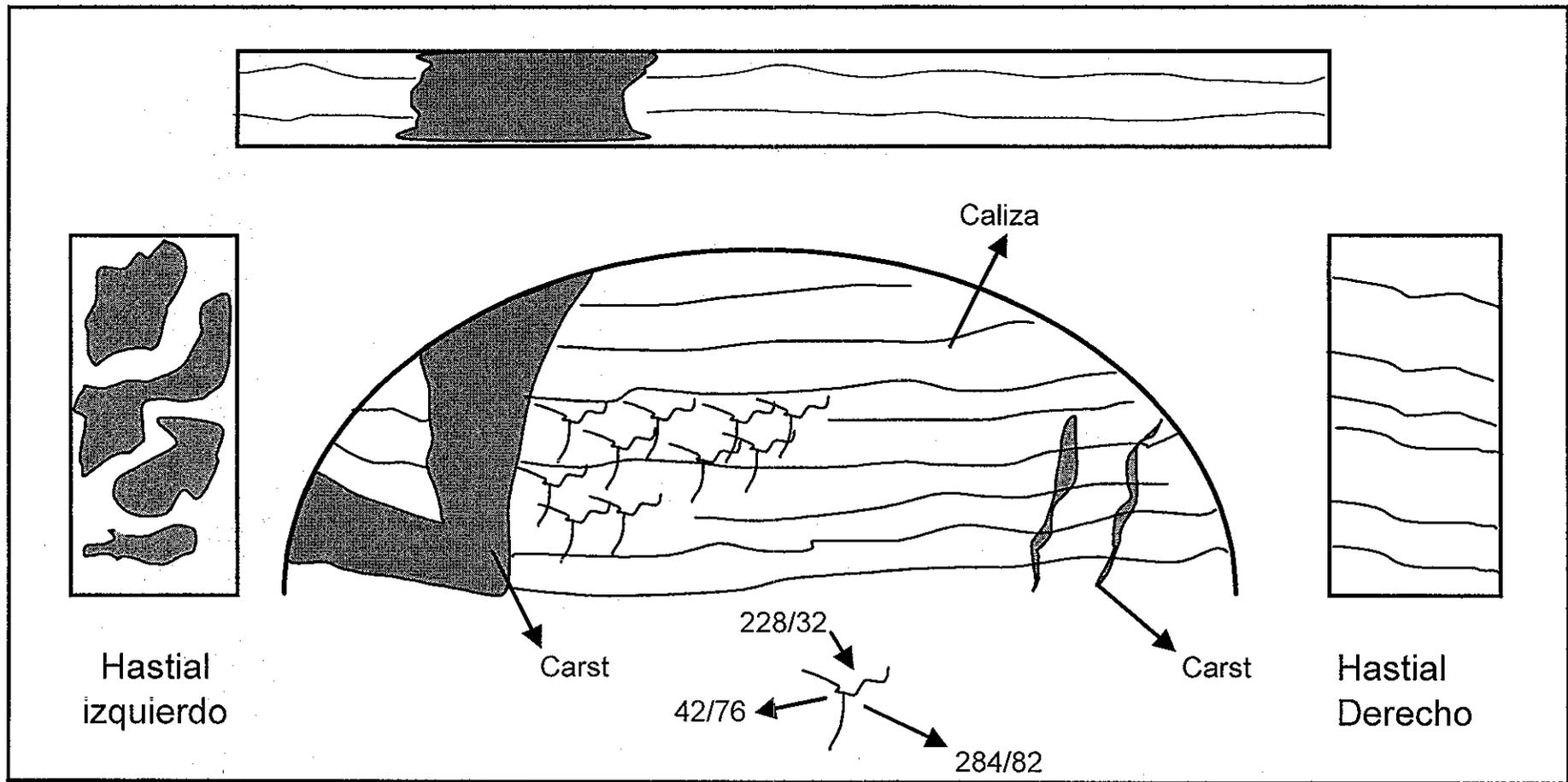
P.K. 113+315. FRENTE DE EXCAVACIÓN Y HASTIAL IZQUIERDO



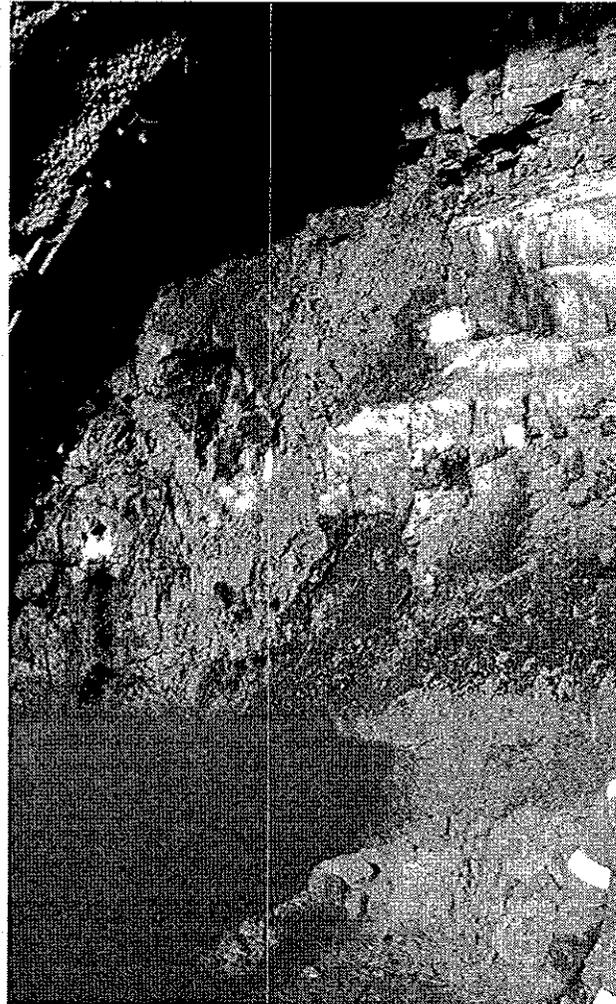
TÚNEL DE ARLABÁN

P.K. 113+315. FRENTE DE EXCAVACIÓN

LEVANTAMIENTO GEOLÓGICO



TÚNEL DE ARLABÁN
P.K. 113+317. HASTIAL IZQUIERDO
CAVIDADES RELLENAS CON ARCILLA EN EL
MACIZO DE LA PRIMERA BARRA CALCÁREA

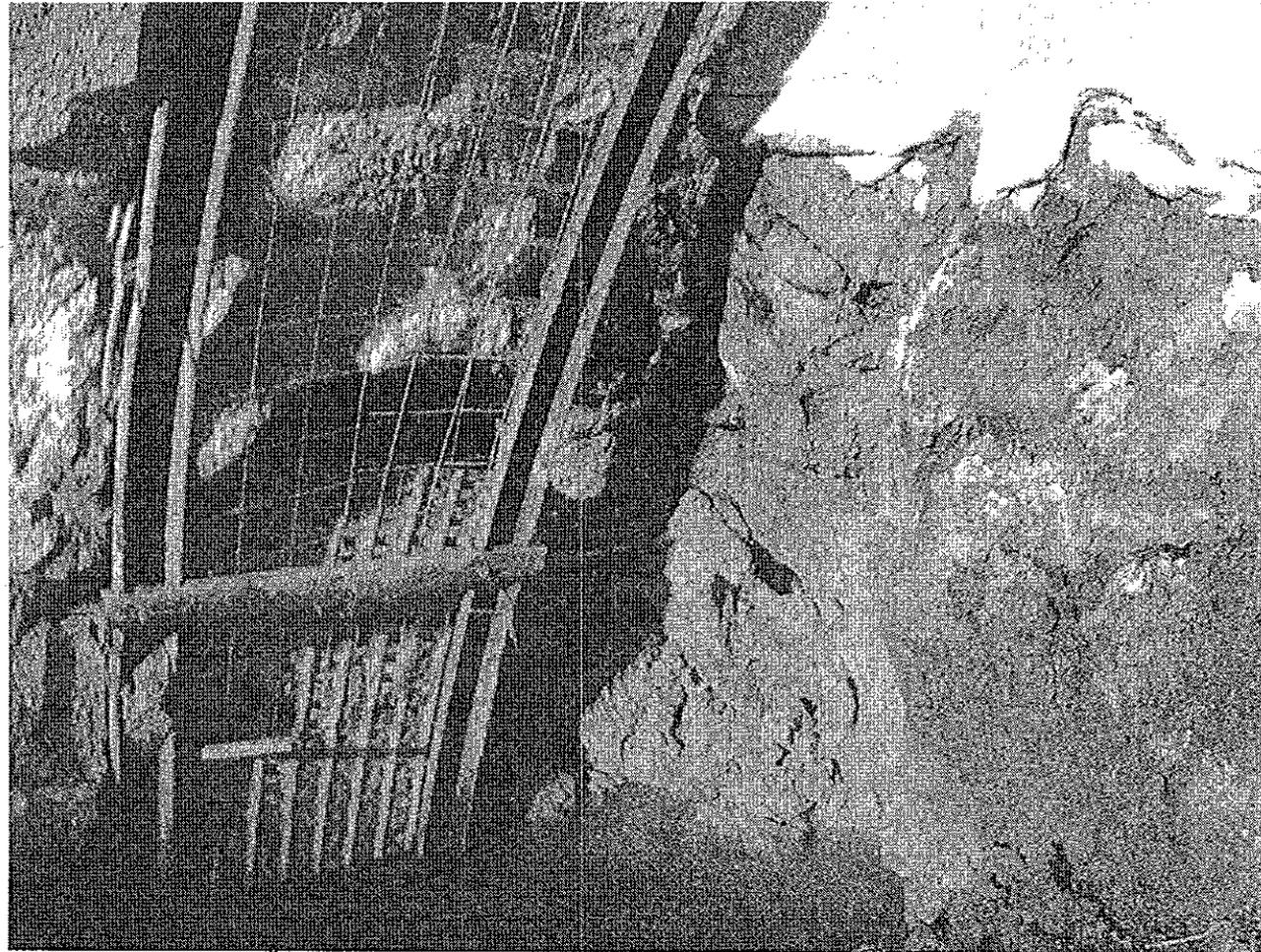


TÚNEL DE ARLABÁN

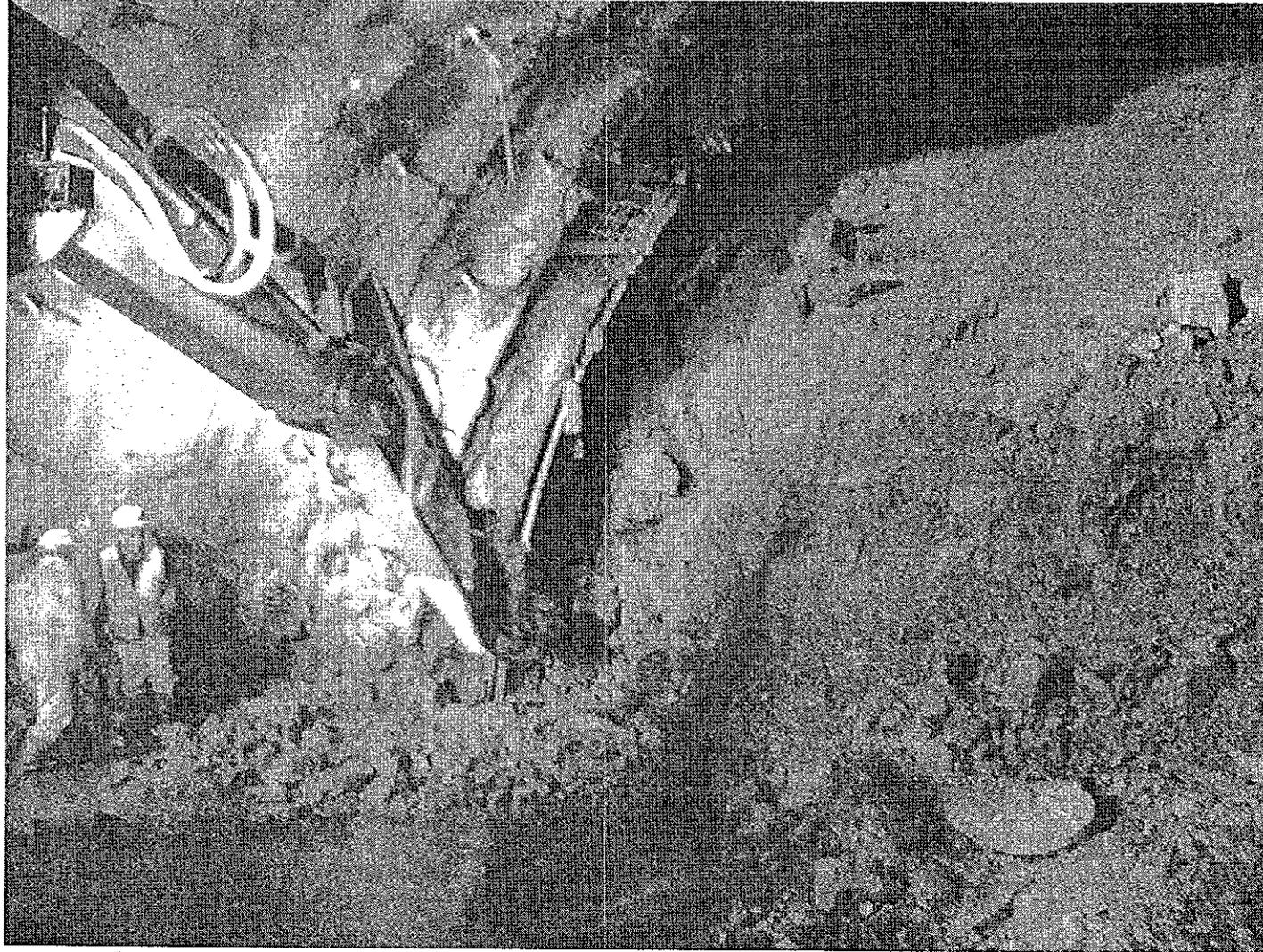
P.K. 113+315. HASTIAL IZQUIERDO

COLOCACIÓN DE CERCHAS Y MALLAZO DEL

SOSTENIMIENTO TIPO F



TUNEL DE ARLABÁN
P.K. 113+315. HASTIAL IZQUIERDO
APOYO DE LA CERCHA EN CAVIDAD RELLENA DE
ARCILLA CON AFLUENCIA DE AGUA



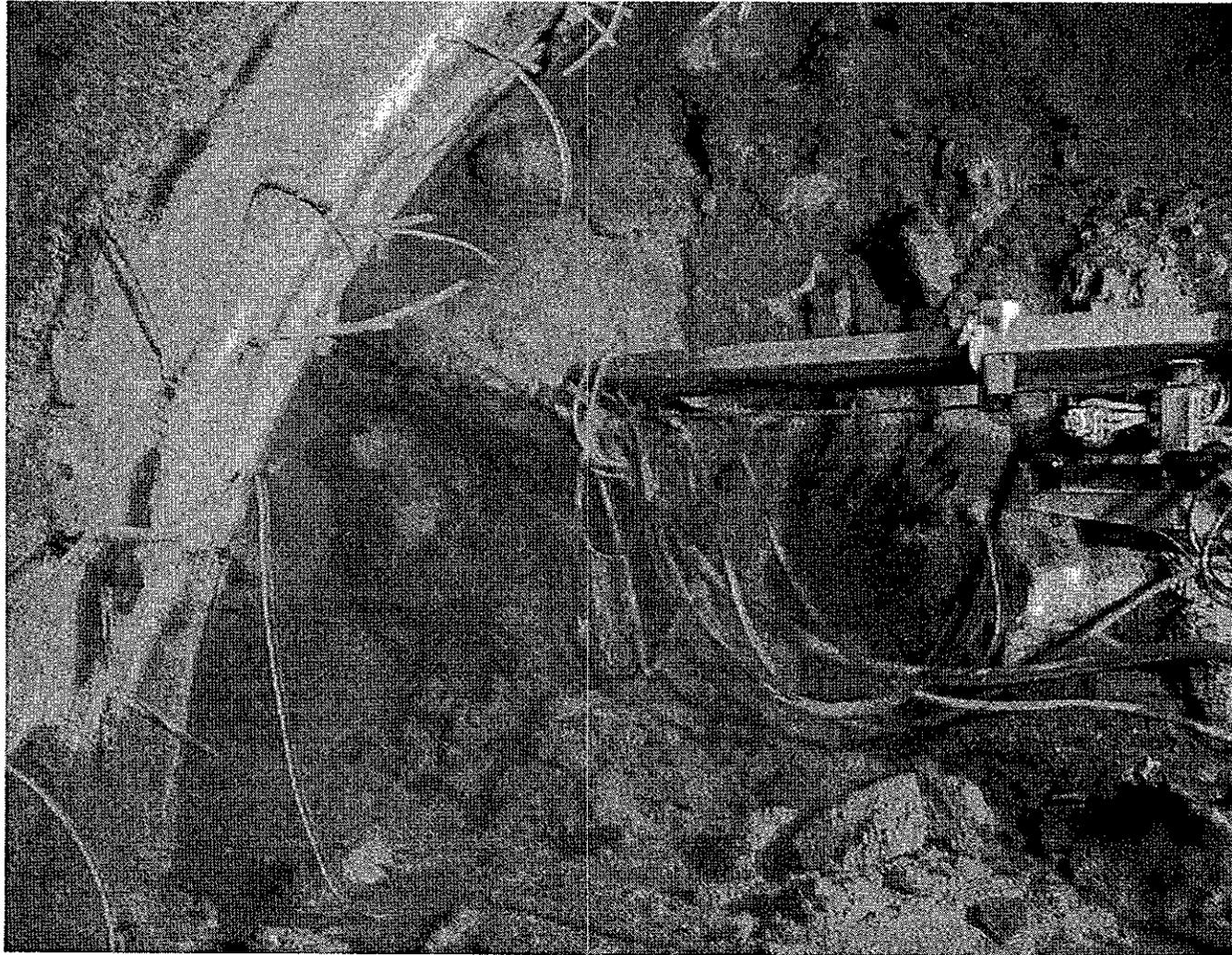
TÚNEL DE ARLABÁN
P.K. 113+315. HASTIAL IZQUIERDO
PLACA DE APOYO DE LA CERCHA



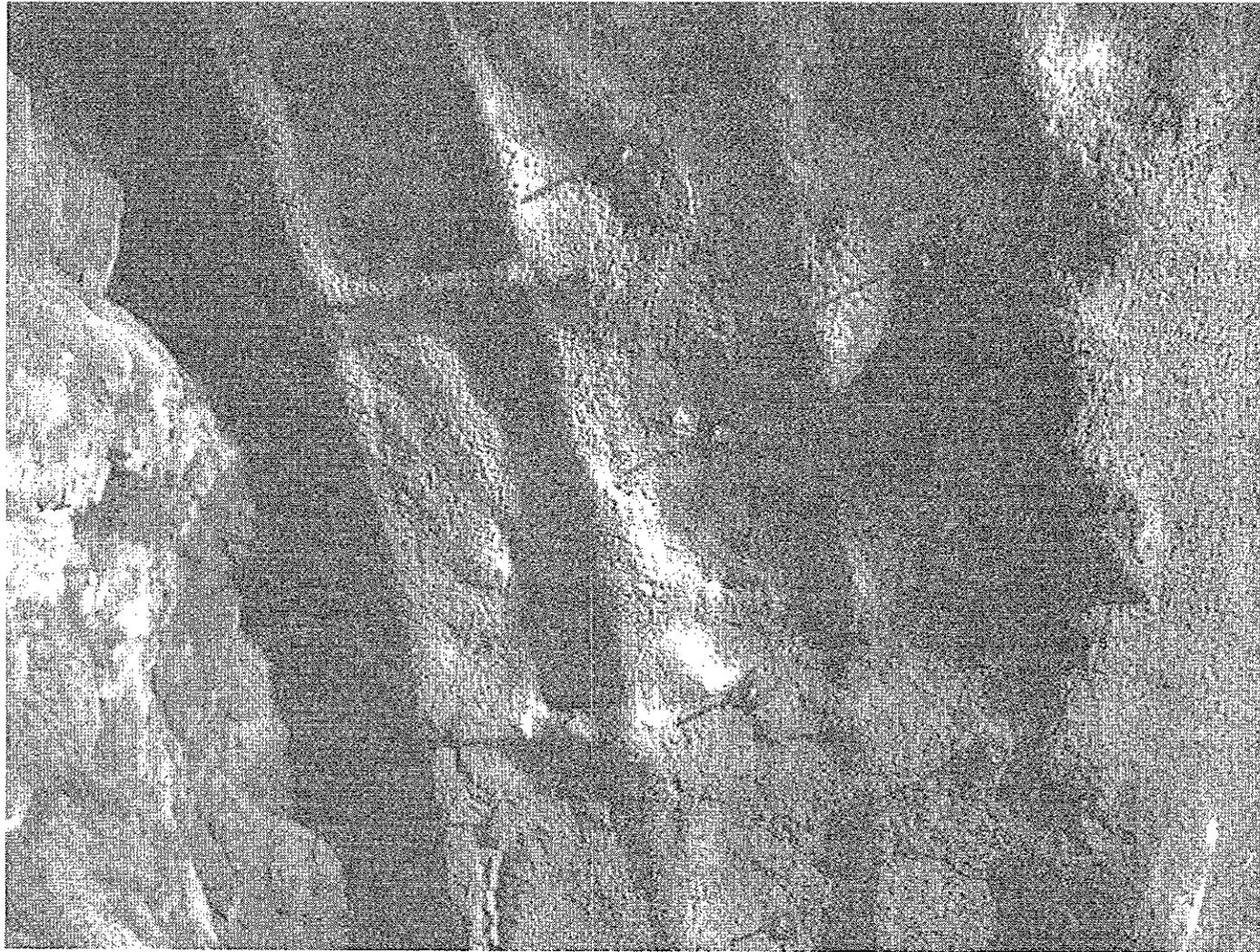
TÚNEL DE ARLABÁN

P.K. 113+315. HASTIAL IZQUIERDO

GUNITADO



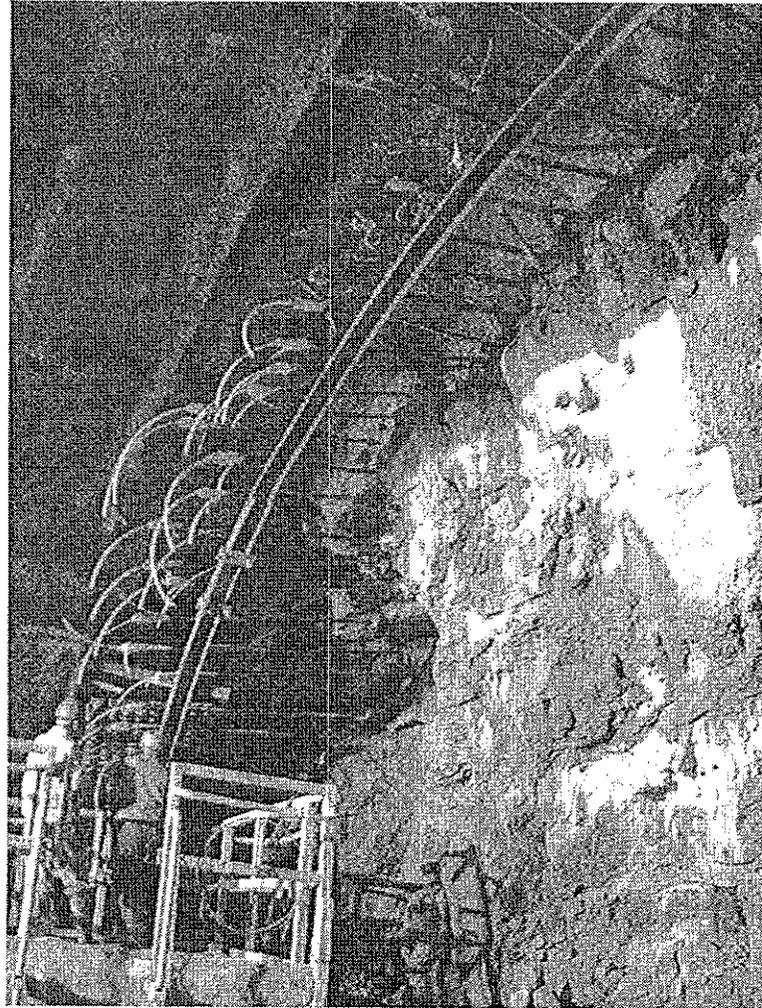
TÚNEL DE ARLABÁN
P.K. 113+315. HASTIAL DERECHO
GUNITADO



TÚNEL DE ARLABÁN

P.K. 113+315

**ENFILAJE DE BULONES AUTOPERFORANTES ϕ 32
Y 12 M DE LONGITUD SEPARADOS 30 CM**



TÚNEL DE ARLABÁN

P.K. 113+315

INYECCIÓN DE LOS BULONES DEL ENFILAJE



TÚNEL DE ARLABÁN

P.K. 113+315

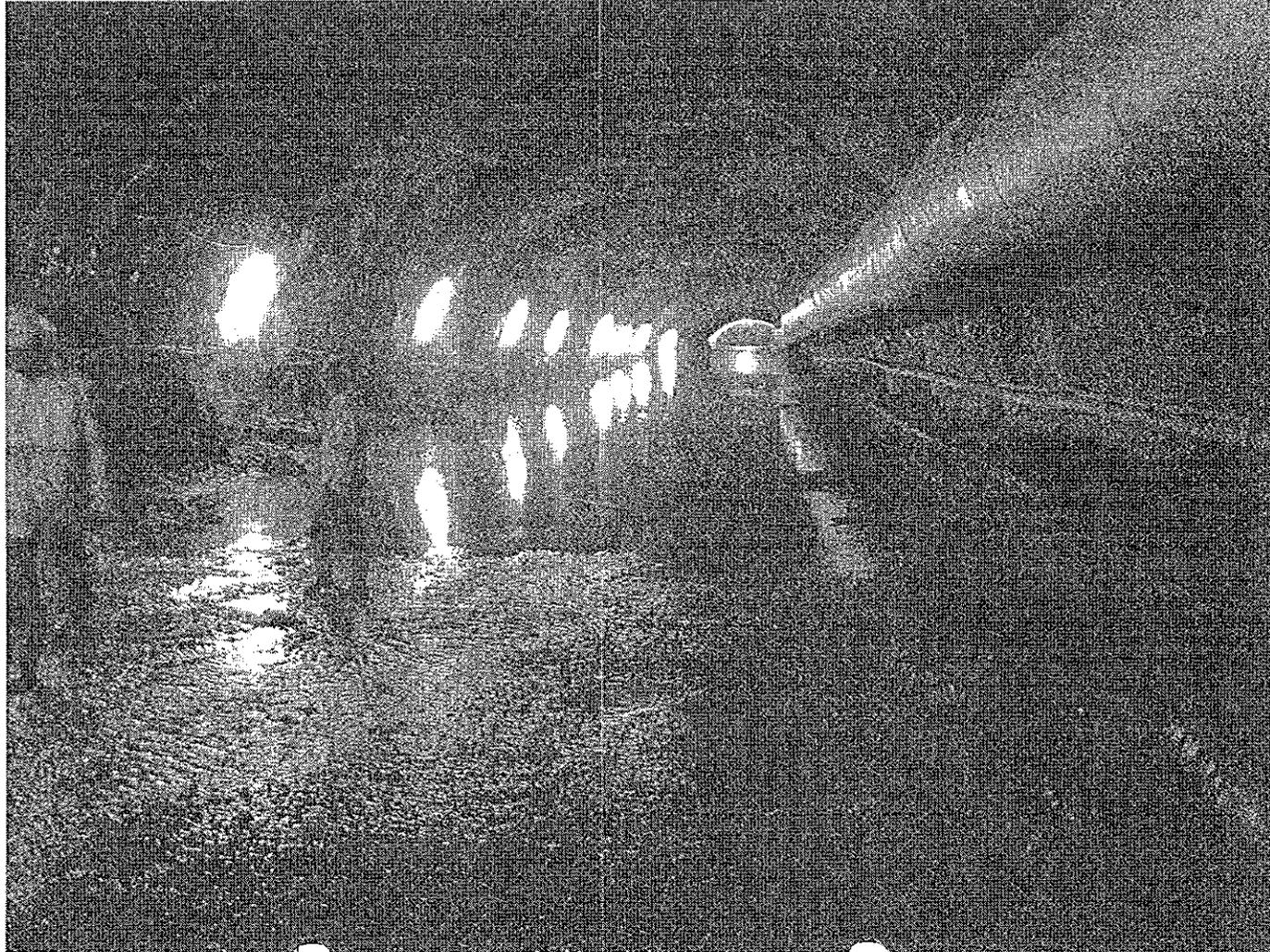
EJECUCIÓN DE UNA PERFORACIÓN EN EL FRENTE CON DIAGRAFÍA PARA INVESTIGACIÓN DE LAS CAVIDADES



TÚNEL DE ARLABÁN

P.K. 113+608

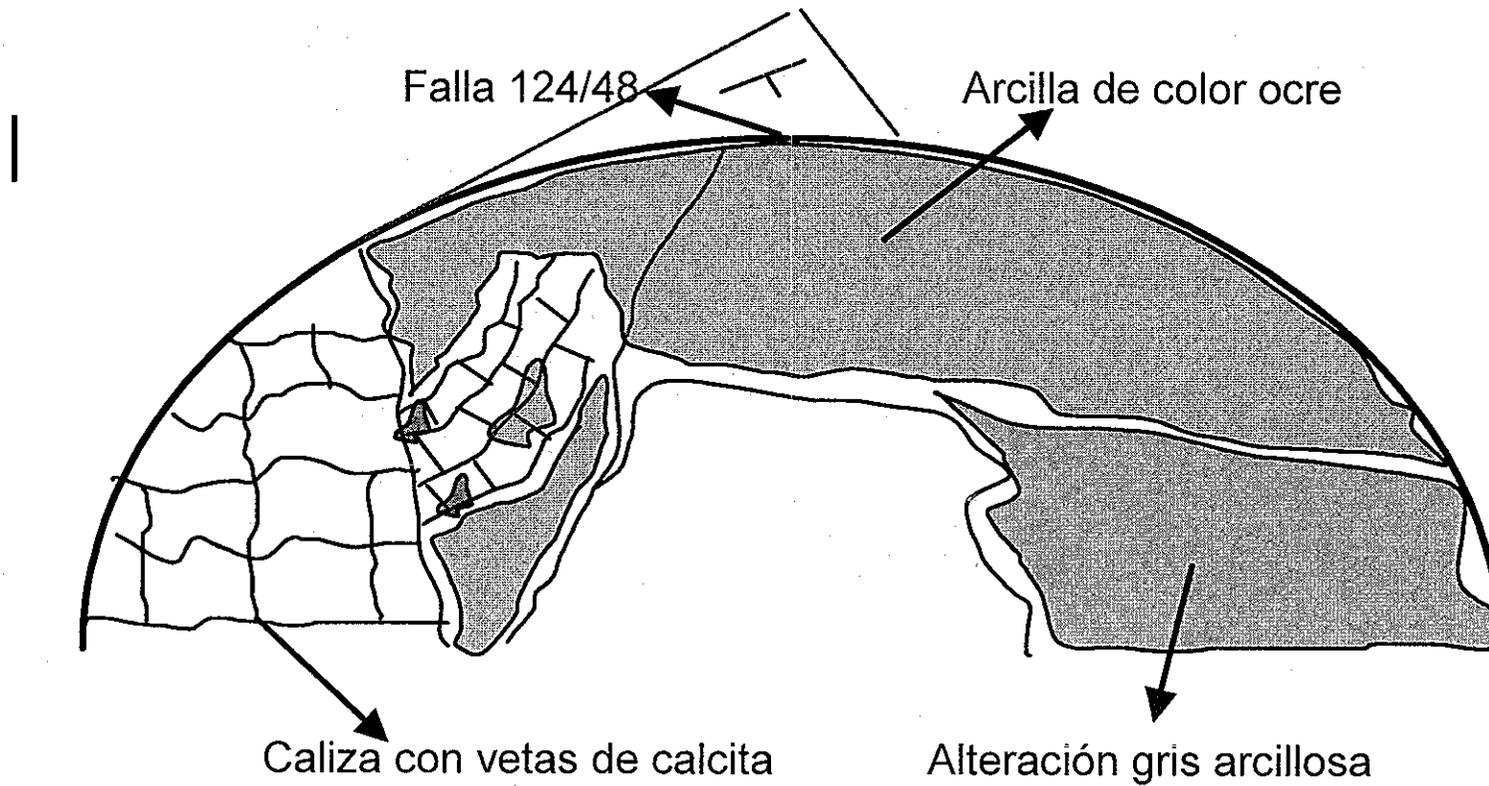
**INUNDACIÓN OCURRIDA CUANDO EL FRENTE SE
ENCUENTRA EN LA SEGUNDA BARRA CALCÁREA**



TÚNEL DE ARLABÁN

P.K. 113+608

LEVANTAMIENTO DEL FRENTE



TÚNEL DE ARLABÁN

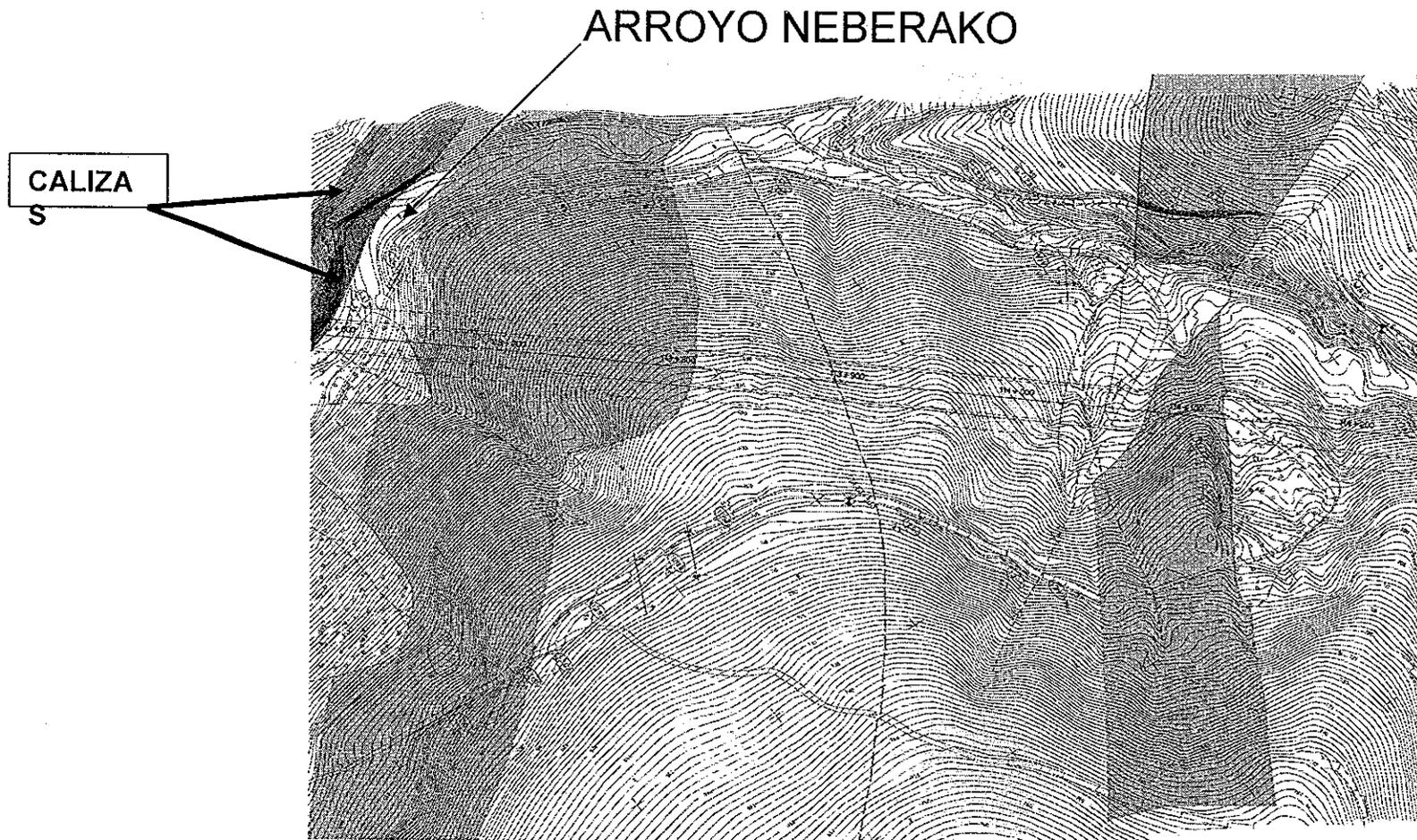
P.K. 113+608

ASPECTO DEL FRENTE DURANTE LA EXCAVACIÓN



TÚNEL DE ARLABÁN

GEOLOGÍA DE SUPERFICIE EN EL ENTORNO DEL P.K. 113+608



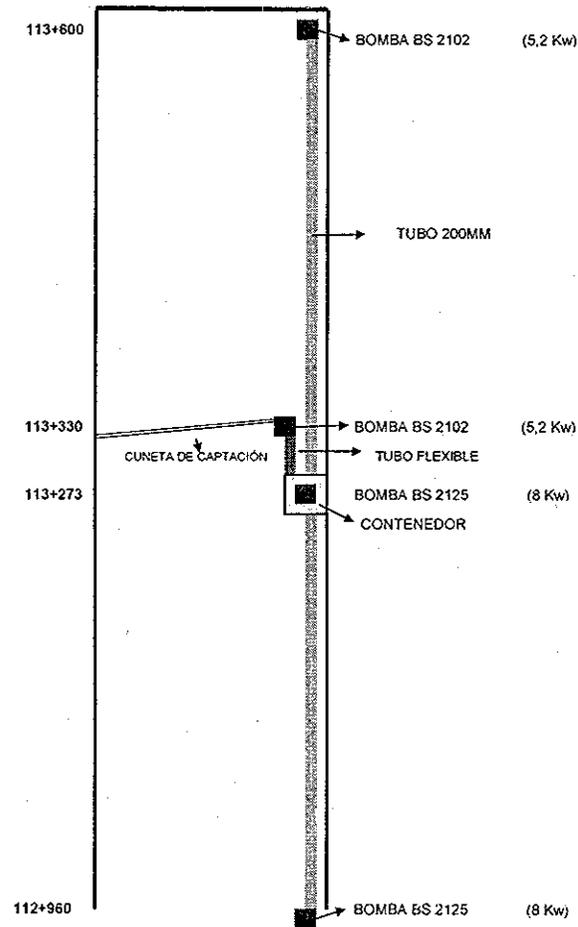
TÚNEL DE ARLABÁN

LABORES DE ENCAUZAMIENTO DEL ARROYO NEBERAKO

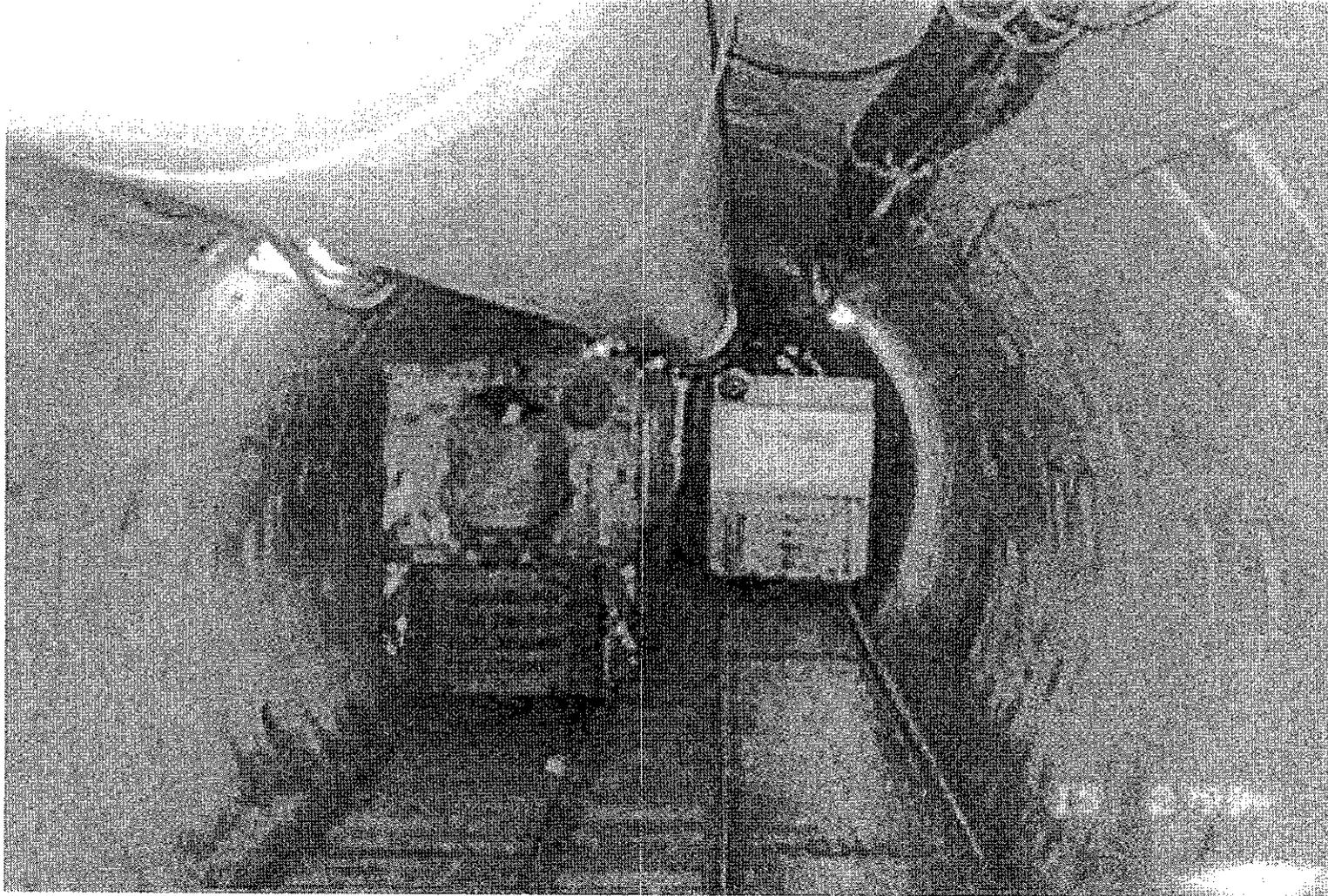


TÚNEL DE ARLABÁN

ESQUEMA DE BOMBEO EN EL FRENTE DEL TÚNEL INUNDADO

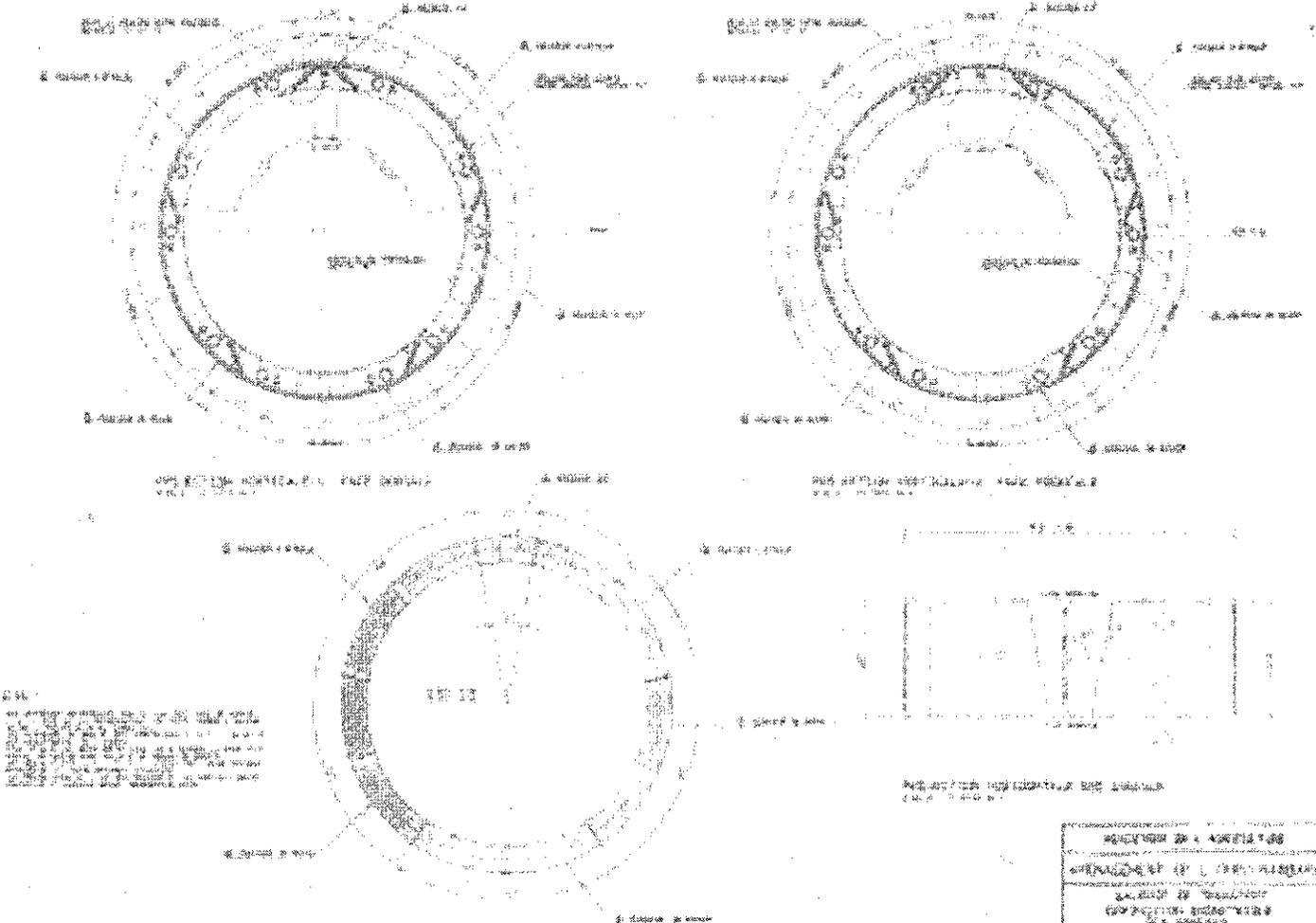


**EJEMPLO DE TÚNEL EN KARST YESÍFERO:
TÚNEL OUED BARBARA
LONGITUD: 6.864 M. $\phi_{INT} = 3,2$ M**



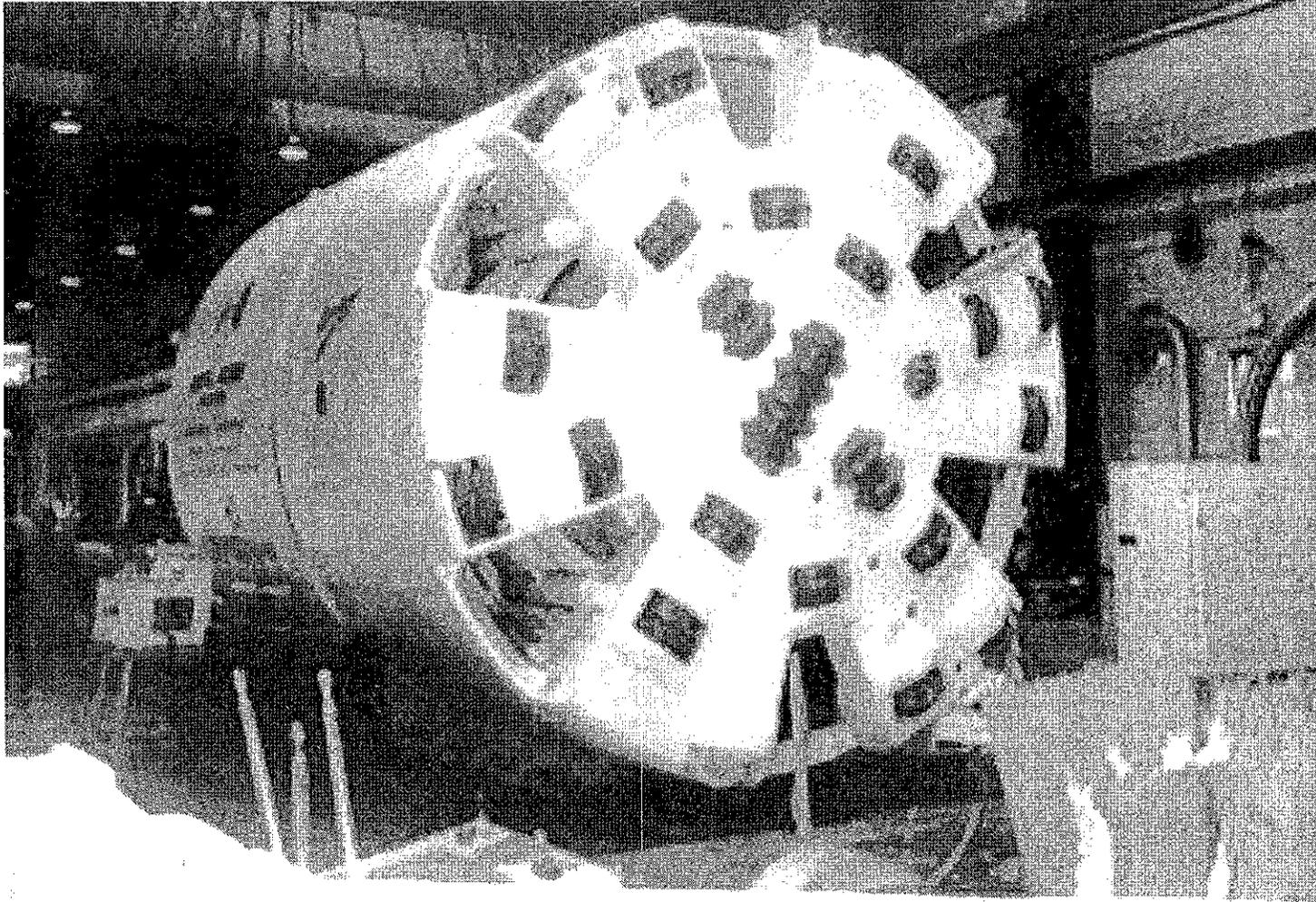
TÚNEL OUED BARBARA

ANILLO DE 6 DOVELAS. 1,3 M DE LONGITUD. 30 CM DE ESPESOR



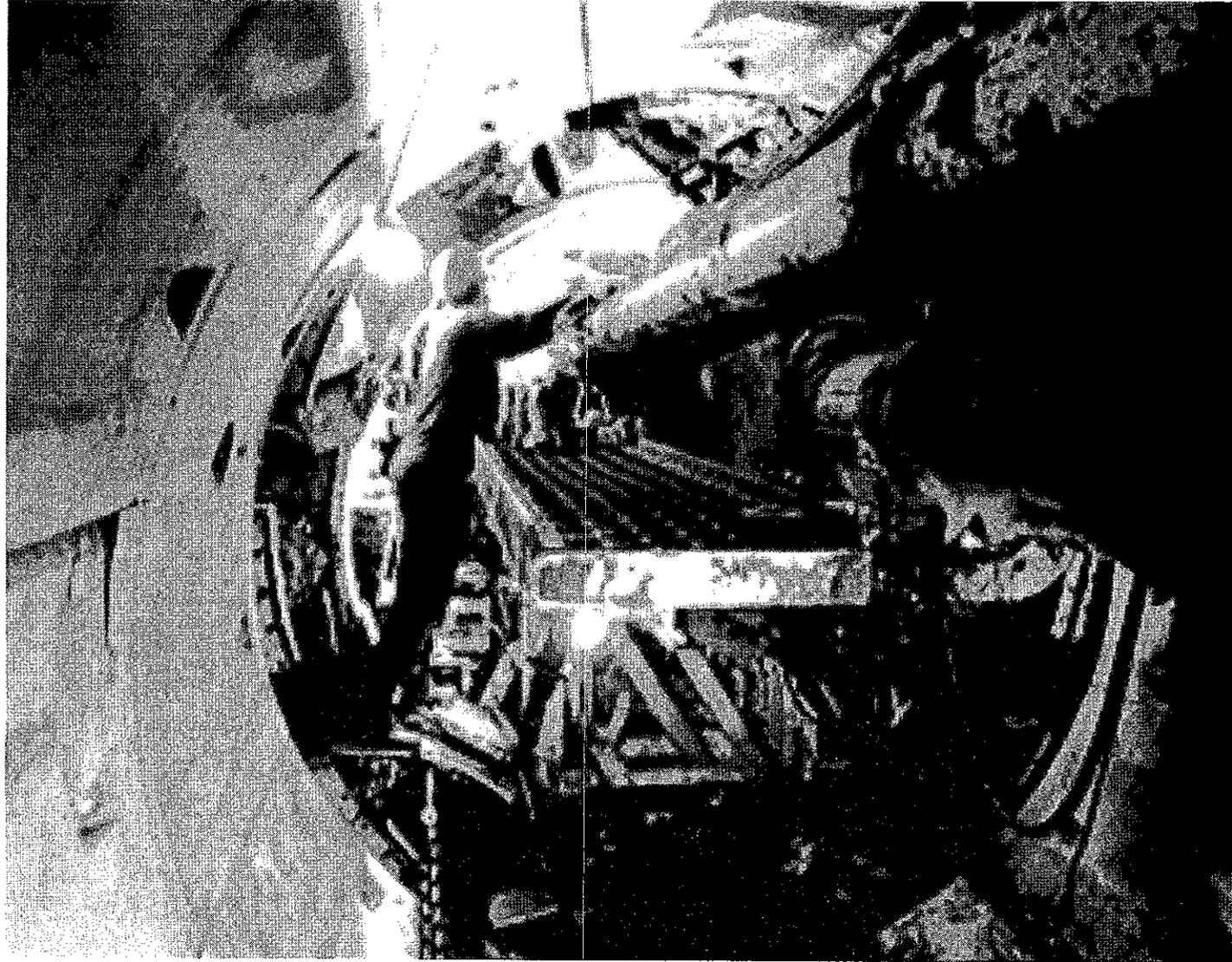
PROYECTO DE OBRAS DE RECONSTRUCCIÓN DEL TUNEL OUED BARBARA
ANILLO DE 6 DOVELAS. 1,3 M DE LONGITUD. 30 CM DE ESPESOR
DISEÑO Y CÁLCULO: [Illegible]
EJECUCIÓN: [Illegible]

TÚNEL OUED BARBARA
EPB ARTICULADA $\phi_{exc} = 3,98$ M
EMPUJE MÁXIMO: 2.400 T



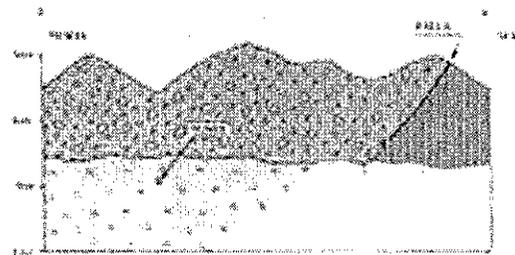
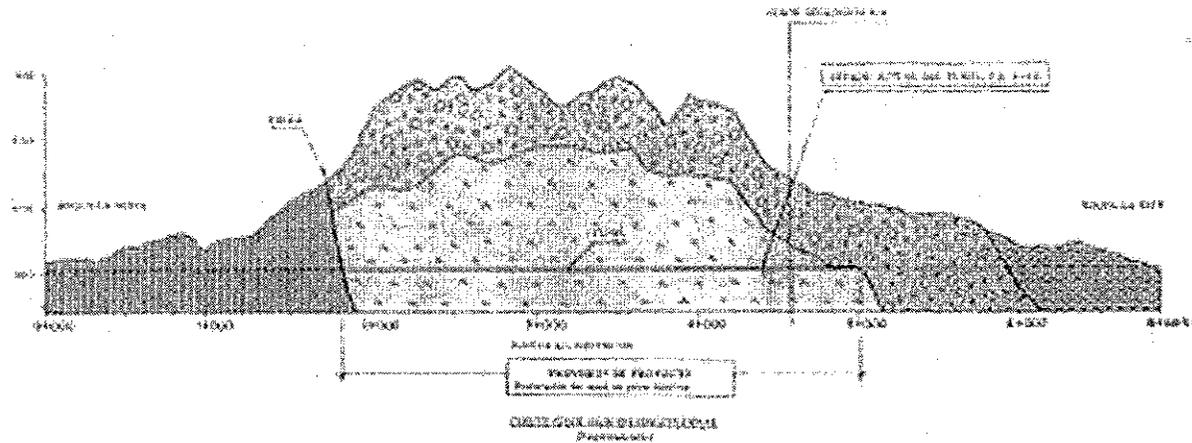
TÚNEL OUED BARBARA

VISTA POSTERIOR DE LA TUNELADORA



TÚNEL OUED BARBARA

PERFIL GEOTÉCNICO DE PROYECTO. TRIAS (ARGILITAS, DOLOMIÁS Y YESOS) CABALGANDO SOBRE EL CRETÁCICO (ARGILITAS)



- LEYENDA
- ARGILITAS (ESPESES Y DELGADAS)
 - DOLOMITAS (ESPESES Y DELGADAS)
 - YESOS (ESPESES Y DELGADAS)
 - ARGILITAS (CRETACICO)

PROYECTO DE TUNEL

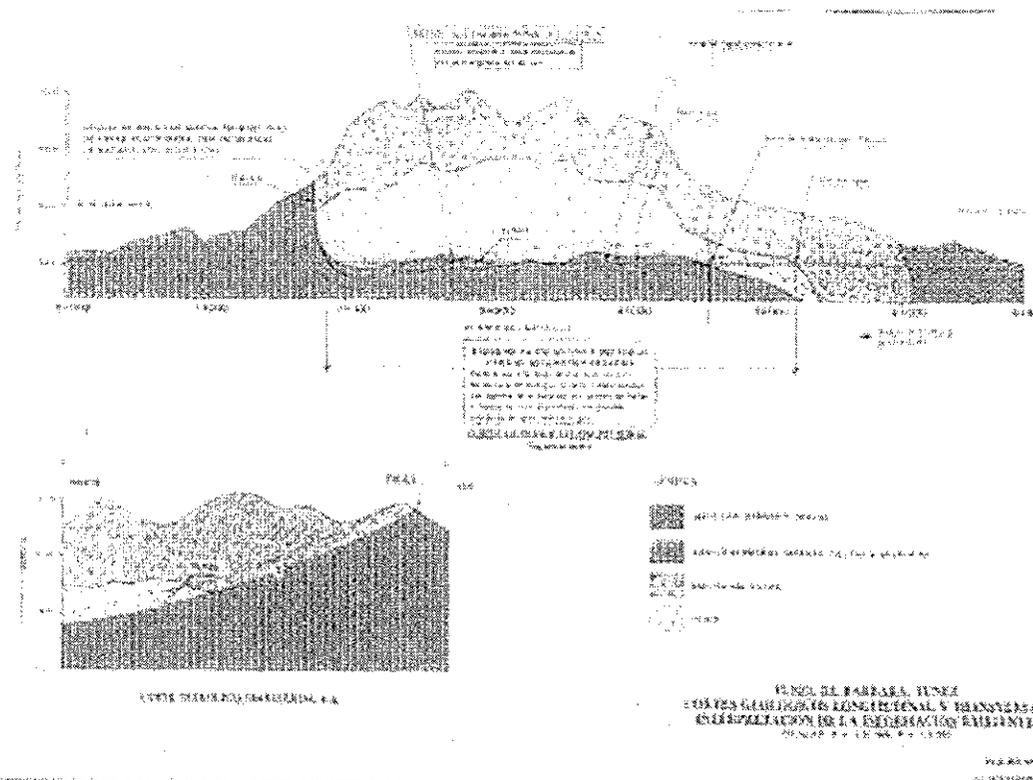
TUNEL DE BARBARA, TUNEL
 CONTRA GEOLÓGICOS LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL
 SECCIÓN GEOTÉCNICA
 ESCALA: 1:10000
 1980

Figura 104

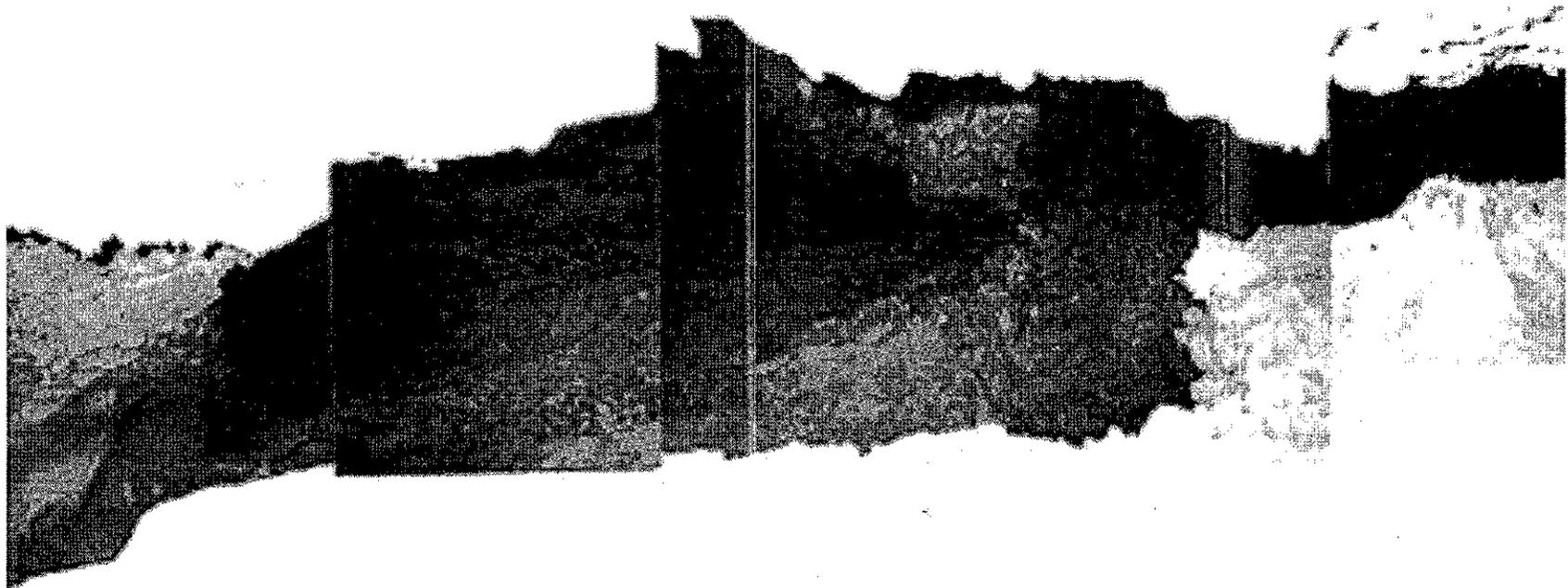
TÚNEL OUED BARBARA

PERFIL GEOTÉCNICO LEVANTADO CON LOS DATOS DEL TÚNEL

MENOR BUZAMIENTO DEL PLANO DE CABALGAMIENTO → COINCIDENTE CON EL TRAZADO DEL TÚNEL

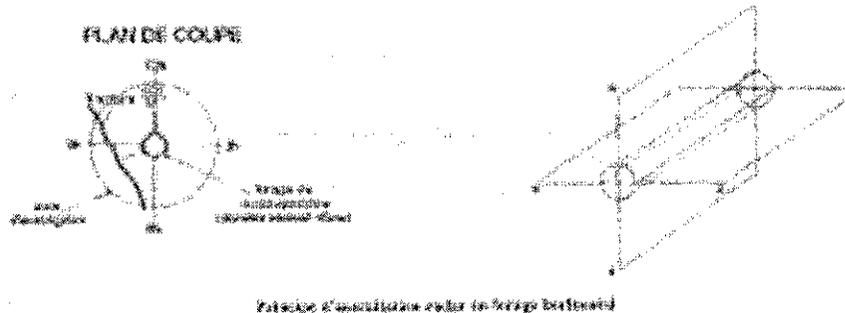
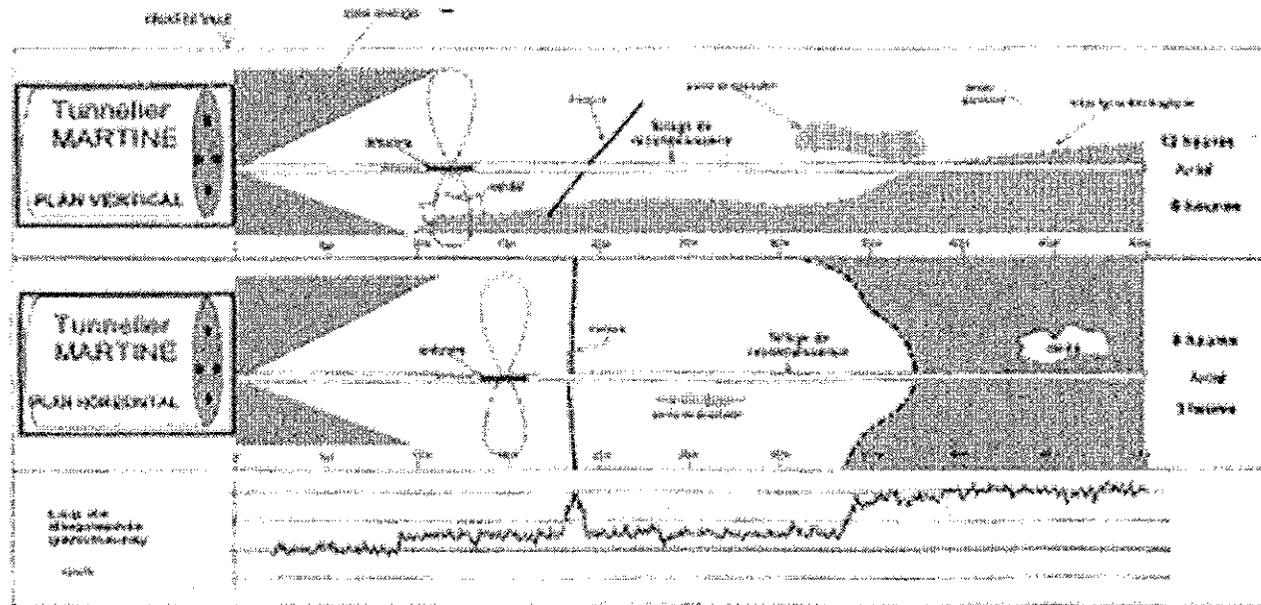


TÚNEL OUED BARBARA
MATERIAL DEL CABALGAMIENTO:
BRECHAS ARCILLO-YESÍFERAS (CANTOS
DE CALIZA Y DOLOMÍA EN MATRIZ DE YESO
Y ARCILLAS), YESOS CRISTALINOS Y
CAVIDADES DE DISOLUCIÓN.



TÉCNICA DEL GEORADAR

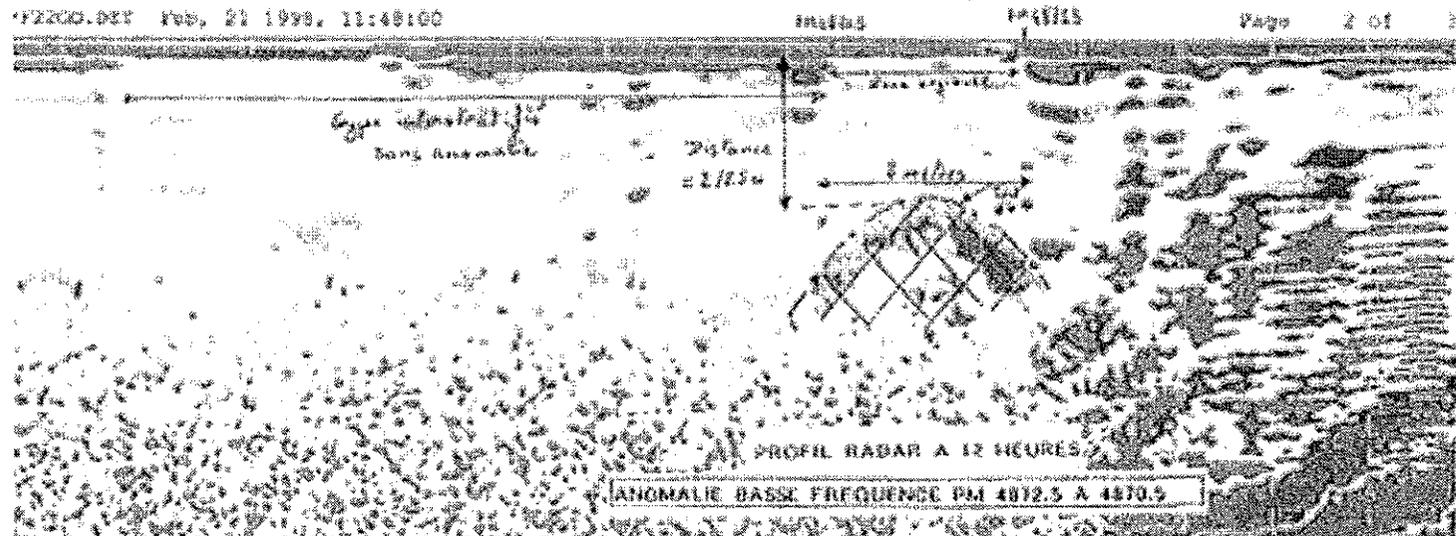
DETECTA CAMBIO DE LAS PROPIEDADES DEILÉCTRICAS DEL MACIZO EN 2 PLANOS ORTOGONALES



TÚNEL OUED BARBARA

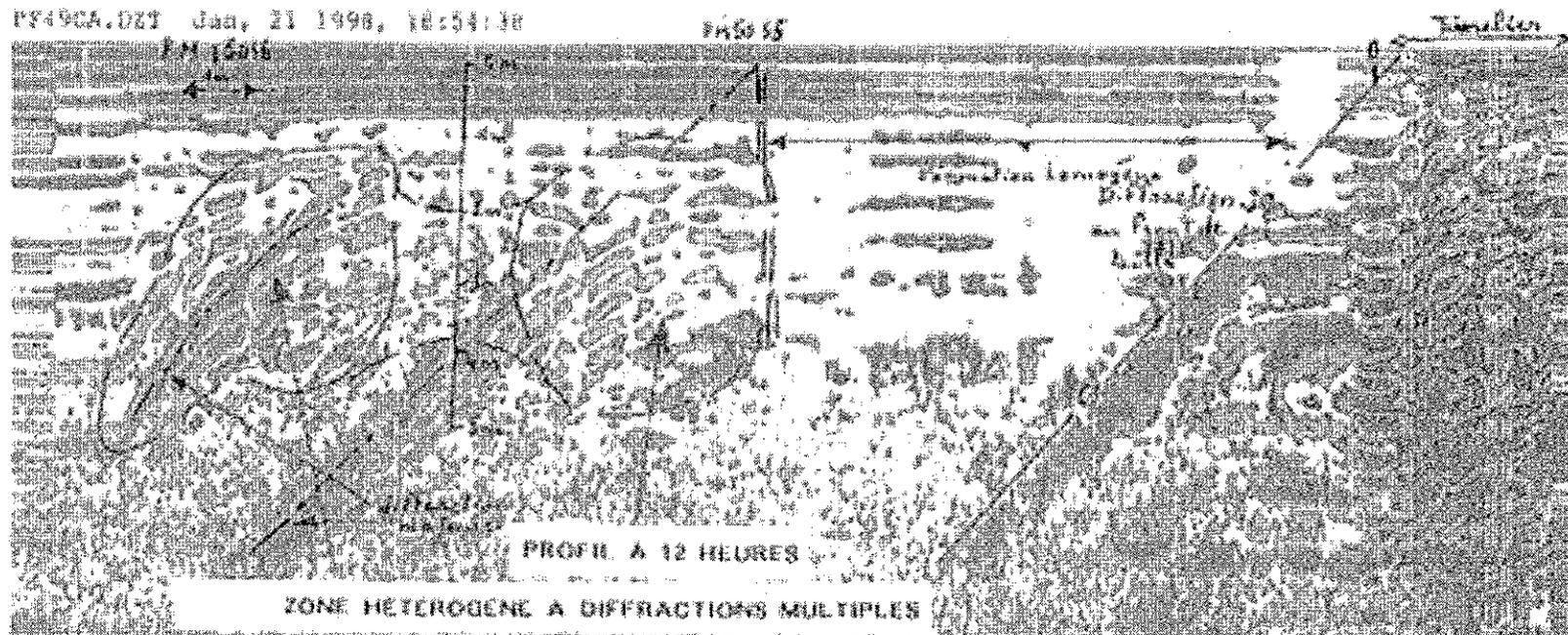
RECONOCIMIENTO AL AVANCE: TALADRO DE 80 M A DESTROZA EN EL FRENTE Y OTRO INCLINADO 15° HACIA ABAJO Y 40 M DE LONGITUD. TESTIFICACIÓN CON GEORRADAR

EXTRAIT de SECTION RADAR
Galerie de transfert
Aménagement de l'oued BARBARA
Figure 2



TÚNEL OUED BARBARA TESTIFICACIÓN CON GEORRADAR

EXTRAIT de SECTION RADAR
Galerie de transfert
Aménagement de l'oued BARBARA
Figure 1

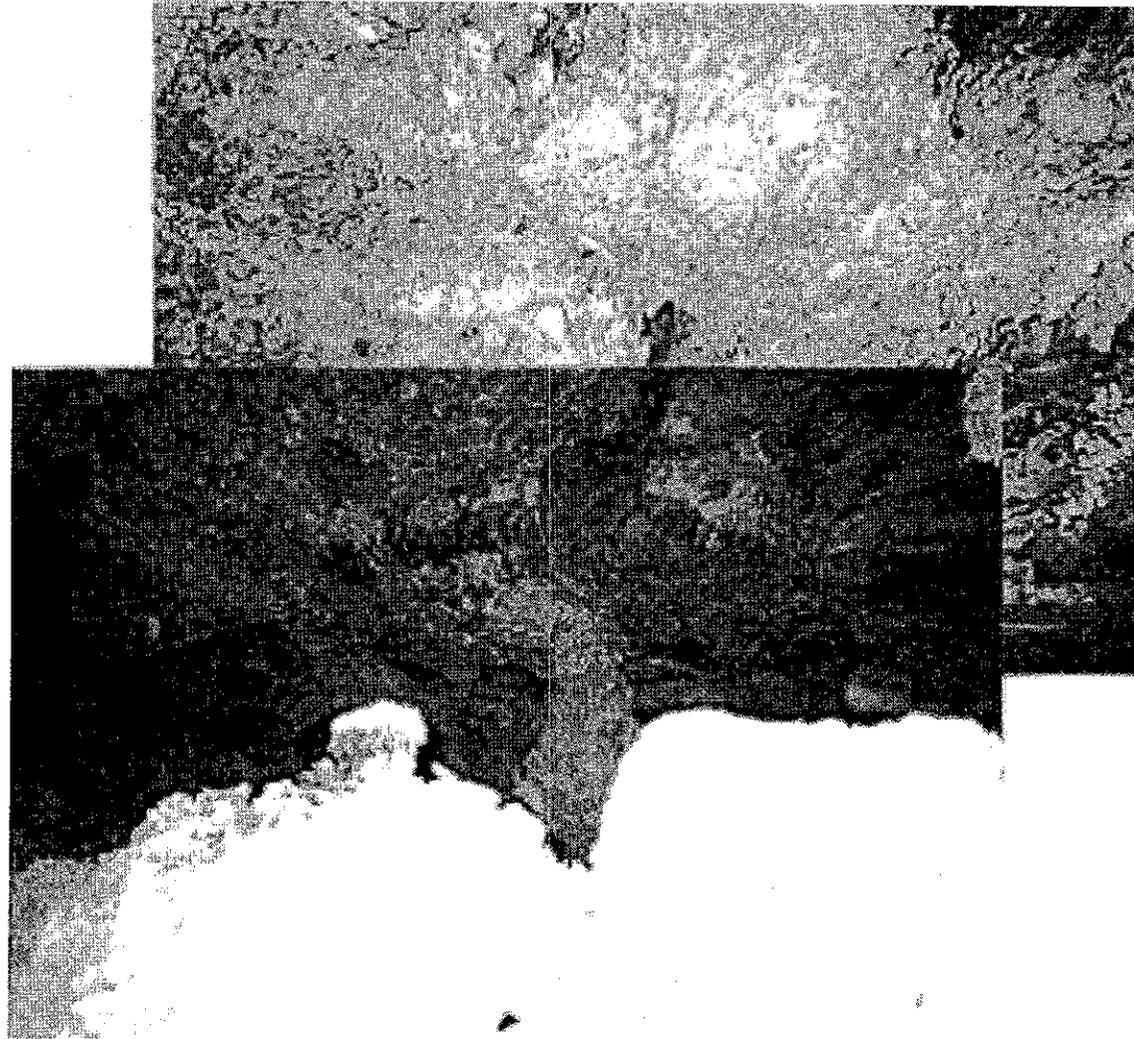


TÚNEL OUED BARBARA

INCIDENCIAS ASOCIADAS A LA KARSTIFICACIÓN DEL TERRENO

- **Tuneladora avanzando por la parte baja de una cavidad (inyección posterior de 240 m³ de mortero).**
- **Emanaciones de gas a presión (gas sulfuroso, tóxico pero no explosivo, supuso una evacuación de emergencia y 22 días ventilando).**
- **Taladro piloto detecta agua a presión (obtura a 21 bares, se avanzó drenando 25 l/seg y posterior inyección).**
- **Atrapamiento de la tuneladora en la zona de mayor recubrimiento.**
- **Pérdida de alineación**

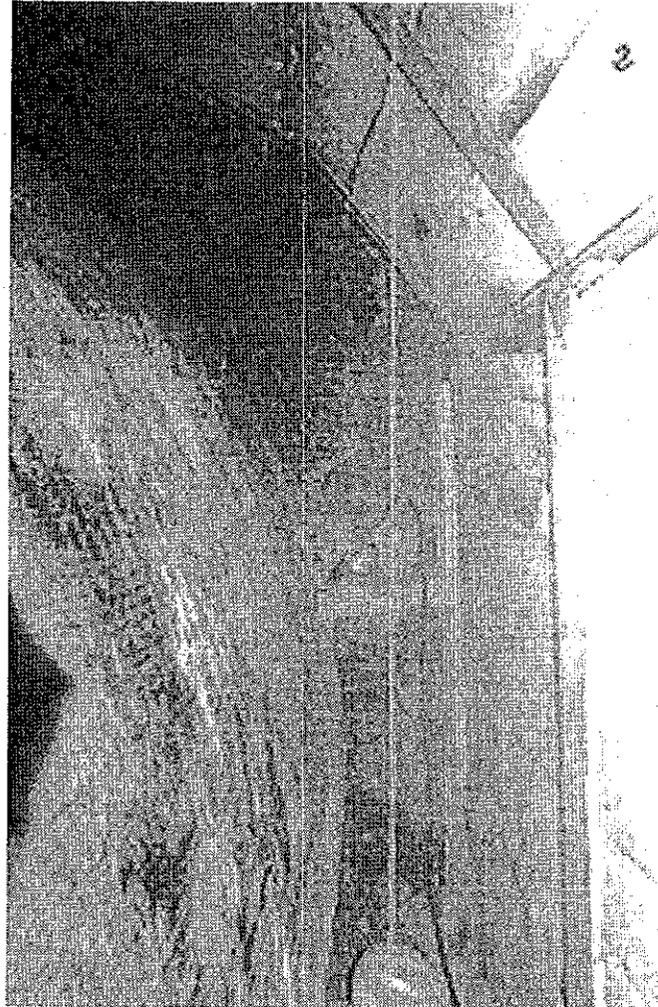
TÚNEL OUED BARBARA
ASPECTO DEL TECHO DE LA CAVERNA SOBRE LA
CORAZA DEL ESCUDO. APORTE INICIAL DE AGUA
DE 100 L/SEG.



**TÚNEL OUED BARBARA
PARTE SUPERIOR DE LA CORAZA DEL ESCUDO
VISTA DESDE LA CAVERNA. SE AVANZA
COMPROBANDO QUE SIEMPRE HAY TERRENO
BAJO EL ESCUDO**

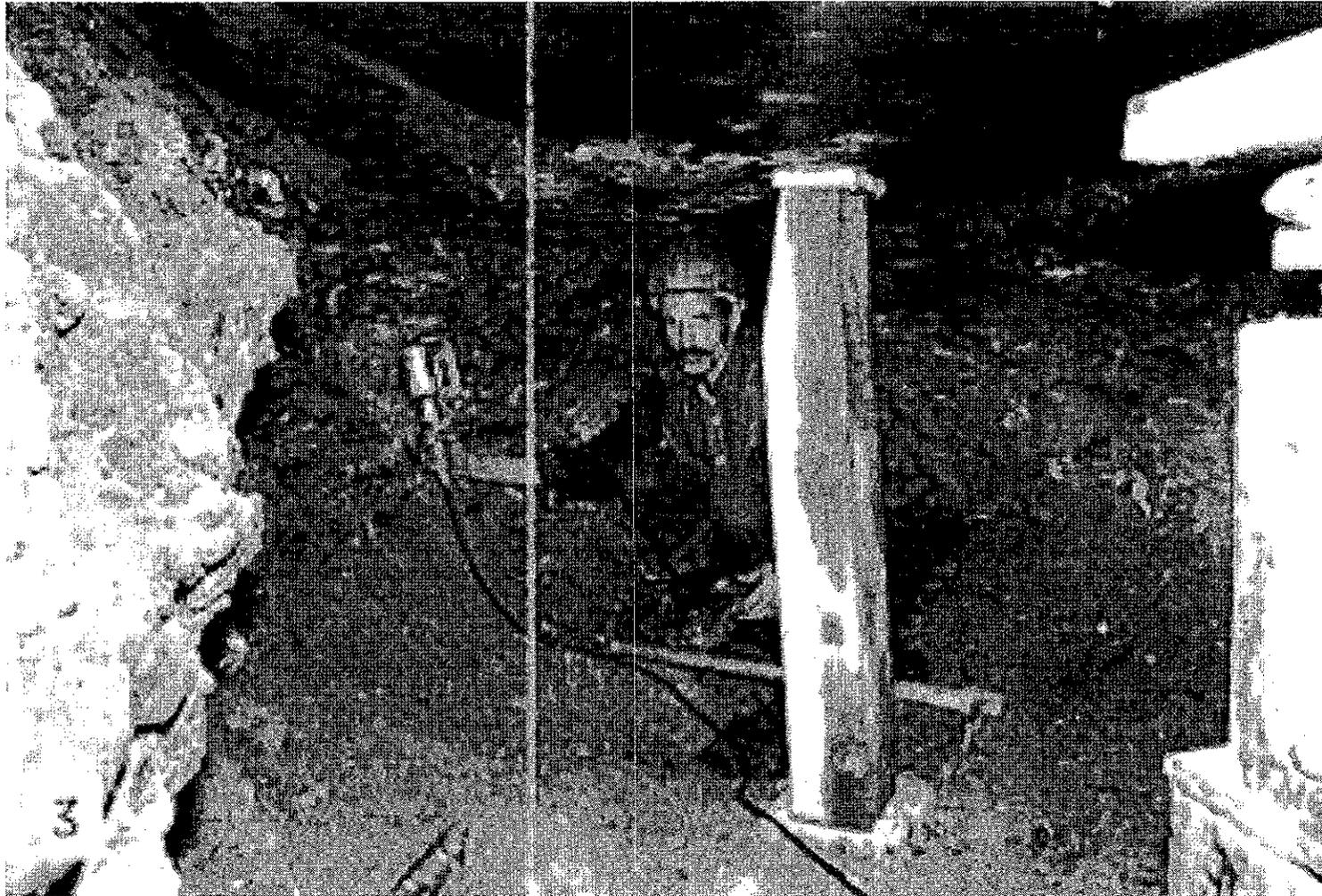


TÚNEL OUED BARBARA LIBERACIÓN DEL ATRAPAMIENTO DE LA TUNELADORA. EXCAVACIÓN LATERAL



TÚNEL OUED BARBARA

LIBERACIÓN DEL ATRAPAMIENTO DE LA TUNELADORA. EXCAVACIÓN SUPERIOR



TÚNEL OUED BARBARA

PLAZO TOTAL: 32 MESES

