

ALGUNOS ASPECTOS A TENER EN CUENTA EN LA DECISION DE NO REVESTIR UN TUNEL CARRETERO:

ESTUDIO PARA LOS TUNELES DE «EL PADRUN», ASTURIAS

Ignacio García-Arango, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos*.
Fernando Hacar, Ingeniero Técnico de Obras Públicas*.
Alberto Abellá, Ingeniero Técnico de Minas*

Introducción

El New Austrian Tunnelling Method (N.A.T.M.) justifica, en principio, un sistema de comportamiento del sostenimiento de túneles tal que parece deducirse que el revestimiento (también llamado «sostenimiento definitivo») con el que normalmente se terminan los túneles aporta una «seguridad adicional», tal vez superabundante, al ser el sostenimiento, por sí sólo, capaz de soportar los empujes del terreno.

Por otro lado, la posibilidad de un incendio en un túnel es un aspecto que debe ser siempre analizado. En aquellos en los que hay riesgo de daños a las personas las consecuencias de un incendio adquieren otra dimensión (túneles de peatones, de ciclistas, carreteros o ferroviarios).

Según ello, veremos la posibilidad de eliminar el revestimiento de los túneles construidos según el N.A.T.M. (Fig. 1), tratando particularmente de los aspectos que en relación con un posible incendio deben de ser tenidos en cuenta.

Descripción de los túneles de El Padrún

Se exponen algunos estudios y conclusiones aplicadas a unos túneles en particular, los de «El Padrún», de una longitud y con un tráfico deter-

minado. No se pretende más que transmitir unos puntos de vista de aspectos concretos de éstos túneles.

Características generales y tráfico

En las obras de la Autovía Oviedo-Campomanes, CN-630 de Gijón a Sevilla, entre Las Segadas y Baiña (Cardeo), Asturias (Fig. 2), se están finalizando los túneles de «El Padrún», que pasan bajo la montaña de «El Padrún», antigua ruta muy conocida en Asturias (Fig. 3).

Camino «de siempre», por el que de muy antiguo se entraba desde León. Referencias sobre las peregrinaciones a San Salvador de Oviedo por ese camino se encuentran, entre otros escritos, en la narración que se hace en el siglo XII-XIII del traslado del Arca de las Reliquias; Fernando II de León (1137-1188, rey de León 1157-1188) hizo en 1164 una donación a la San Salvador de Oviedo; Alfonso IX (1171-1230, rey de León 1188-1230) hizo la peregrinación a Santiago a través del «camino francisco»; Alfonso X El Sabio (1221-1284, rey de Castilla y León 1252-1284) en las Partidas ya habla de los peregrinos de San Salvador de Oviedo; Alfonso XI El Justiciero (1311-1350, rey de Castilla y León 1312-1350) da gracias en San Salvador por la

* M.D.P.T. Demarcación de Carreteras de Asturias

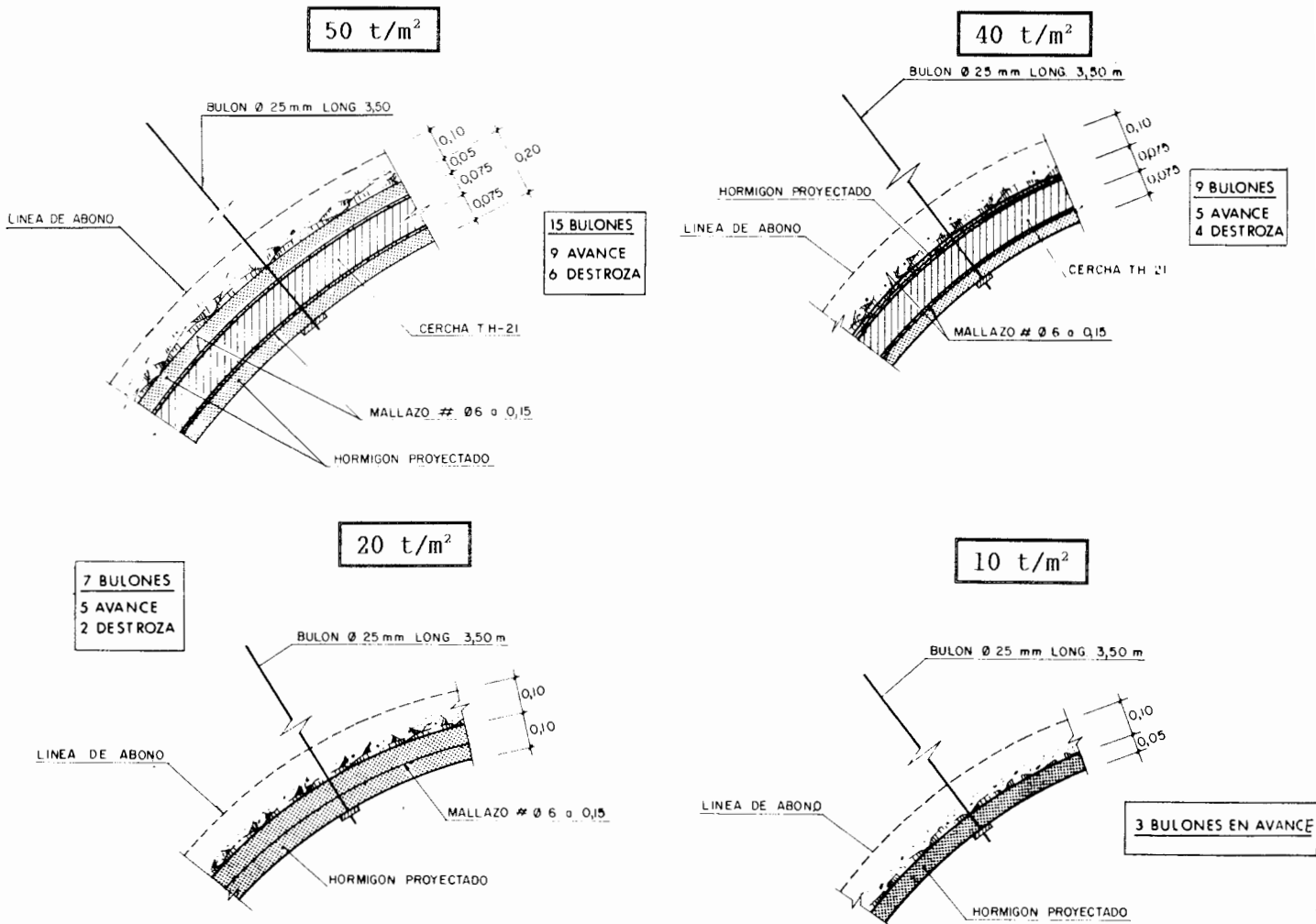


Figura 1.a. Secciones básicas de sostenimiento (N.A.T.M.) empleadas en los túneles de «El Padrún», Asturias (para presiones de estabilización de 50 t/m², 40 t/m², 20 t/m² y 10 t/m²).

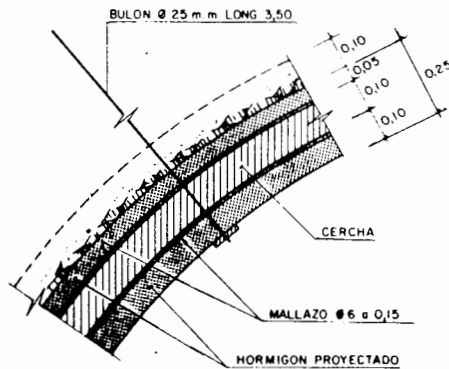
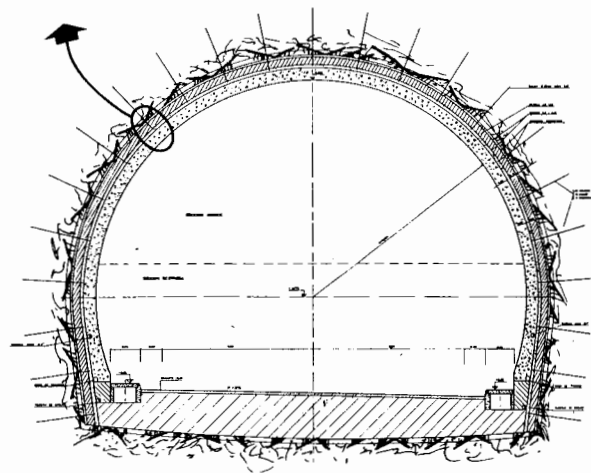


Figura 1.b. Sección de sostenimiento con cercha TH-21 o HEB-180 y contrabóveda. Empleadas en terrenos difíciles.



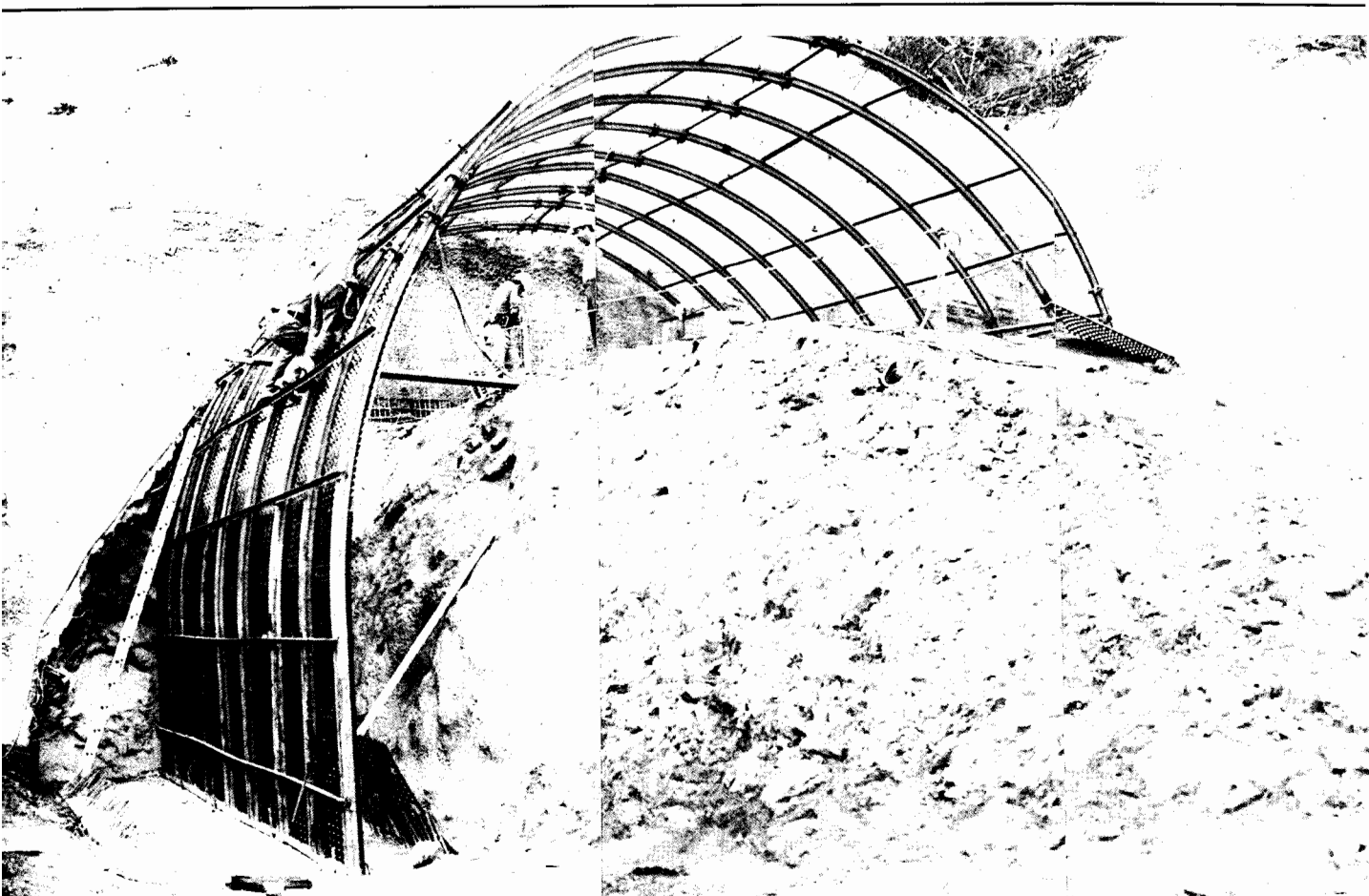
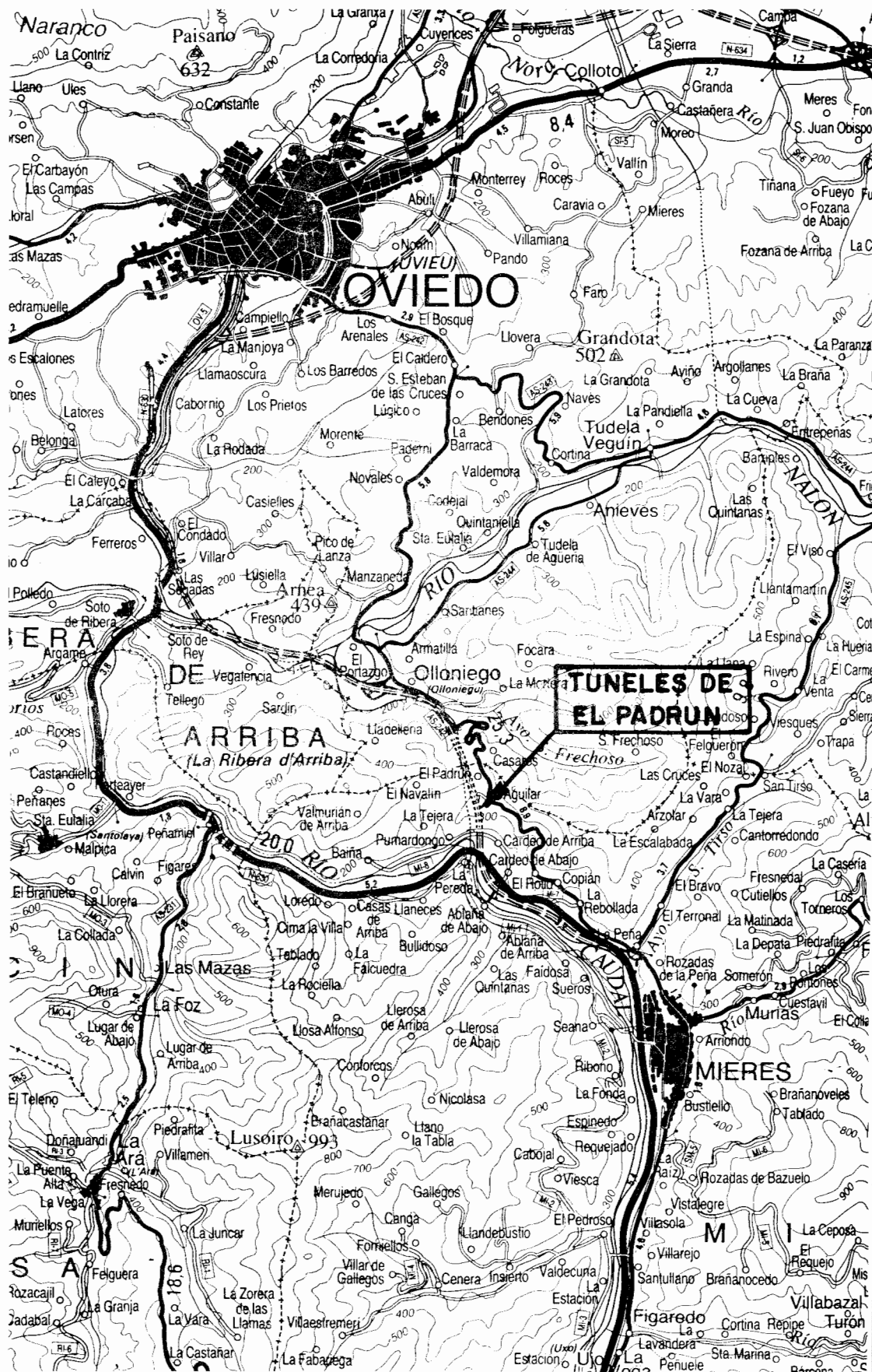


Figura 1.c. Boca lado Mieres (bocas Sur) del tubo correspondiente al sentido Mieres-Oviedo. (21 de mayo de 1989).



Figura 1.d. Colocación de bulones en una sección de avance excavada con «machón central», (29 de junio de 1989).

Figura 2. Situación de los túneles de «El Padrún», Asturias.



«En la Huerta de Olloniego, Corona, o Perspectiva hermosa de su Antigua Casa, ay Limones, Naranjas ordinarias, y de la China; muchas diferencias de sazonadas Frutas, sabrosas Hortalizas, y fragrantés Flores, que risueñas, y festivas, del Ayre que las peyna, de el Sol que las matiza, del Crystal que las riega, y el Alva que las cria, dån que embidiar, con su variedad, y hermosura, à la Copia de Amaltea, à los Pensiles Ibleos, y à los Jardines de Chipre... (Felipe Bernaldo de Quirós, 1689).



Figura 3. Conjunto Medieval en Olloniego (Puente, Torre y Casa-Fuerte). (Boca Norte de los túneles de «El Padrún»).

victoria de Salado; Juan I El Cazador (1358-1390, rey de Castilla 1379-1390) en 1383 hace una donación a San Salvador: algunos reos en Bélgica eran condenados a ir de peregrinación a San Salvador de Oviedo en la baja Edad Media...

En el siglo XVI los peregrinos de León a Oviedo decían:

Qui a eté a Sainct Jacques
Et n'eté a Sainct Salvateur
A visité le serviteur
Et a laissé le seigneur

Los dos túneles, prácticamente gemelos, uno para cada sentido de circulación, son de 1.762.000 m.

De sección tipo (Fig. 4) con dos carriles y aceras en ambas márgenes. El perfil longitudinal es el clásico, en rampa del 1 % hasta su mitad y en pendiente, también del 1 %, en su otra mitad.

El tráfico previsto para el momento de la apertura de los túneles (1992-1993) es de 20.000 vehículos/día, la mitad para cada tubo. El porcentaje de vehículos pesados será mayor de un 20 por ciento.

Geología del terreno atravesado por los túneles

Los túneles de El Padrún (Fig. 5) se encuentran en la llamada «Zona Cantábrica del Macizo Ibérico», en la región de la Cuenca Carbonífera Central (Fig. 6), pudiendo dividirse en dos unidades de características geológicas diferentes (Fig. 7):

■ La Unidad Occidental o de Riosa-Olloniego —por la que discurren los túneles— está integrada por las Formaciones:

- Canales.
- Pudinga de Mieres.
- Esperanza (Westfaliense D inferior, ligeramente más antigua que la Formación Olloniego).

Sucesivas alternancias de areniscas, limolitas y lutitas, con niveles de conglomerados y microconglomerados cuarcíticos. Presenta capas de carbón intercaladas. Se atravesó por los túneles en el tramo correspondiente a las boquillas del lado Mieres (Sur).

■ Olloniego (Westfaliense D inferior-medio). Conglomerados poligénicos, formados por

Proximidades de las bocas lado Oviedo (Bocas Norte, Olloniego) de los túneles de «El Padrún» (12 de marzo de 1992).

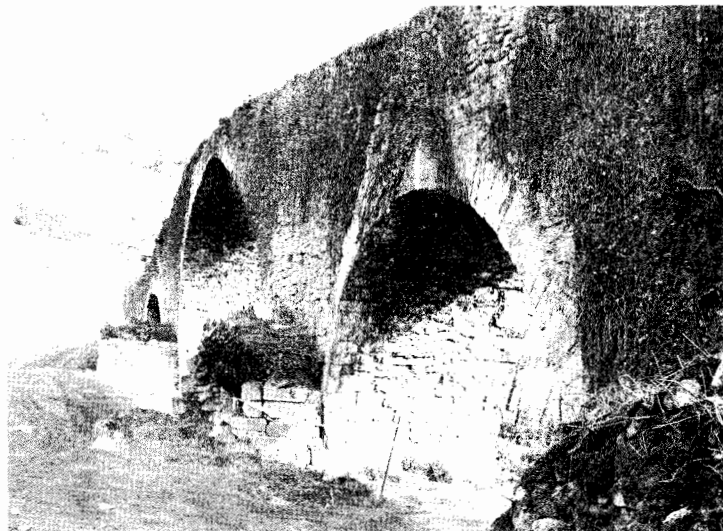


Figura 4. Sección tipo de los túneles de «El Padrún», Asturias.

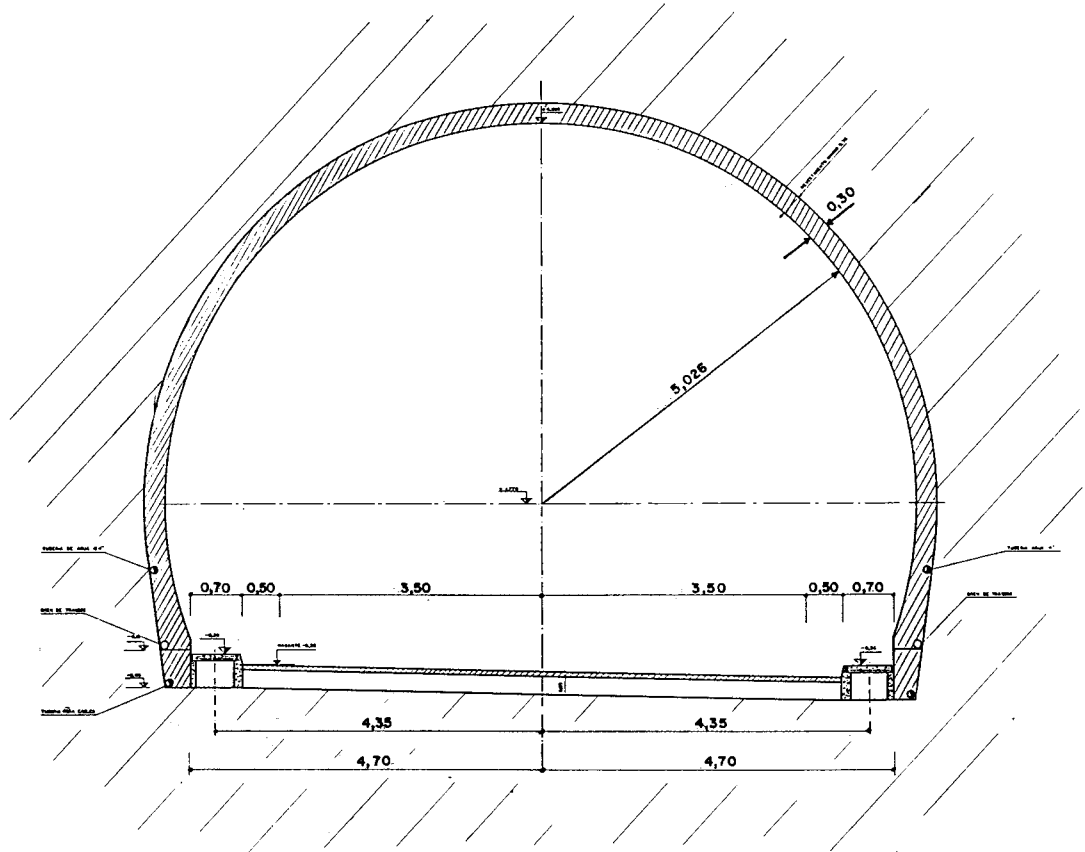
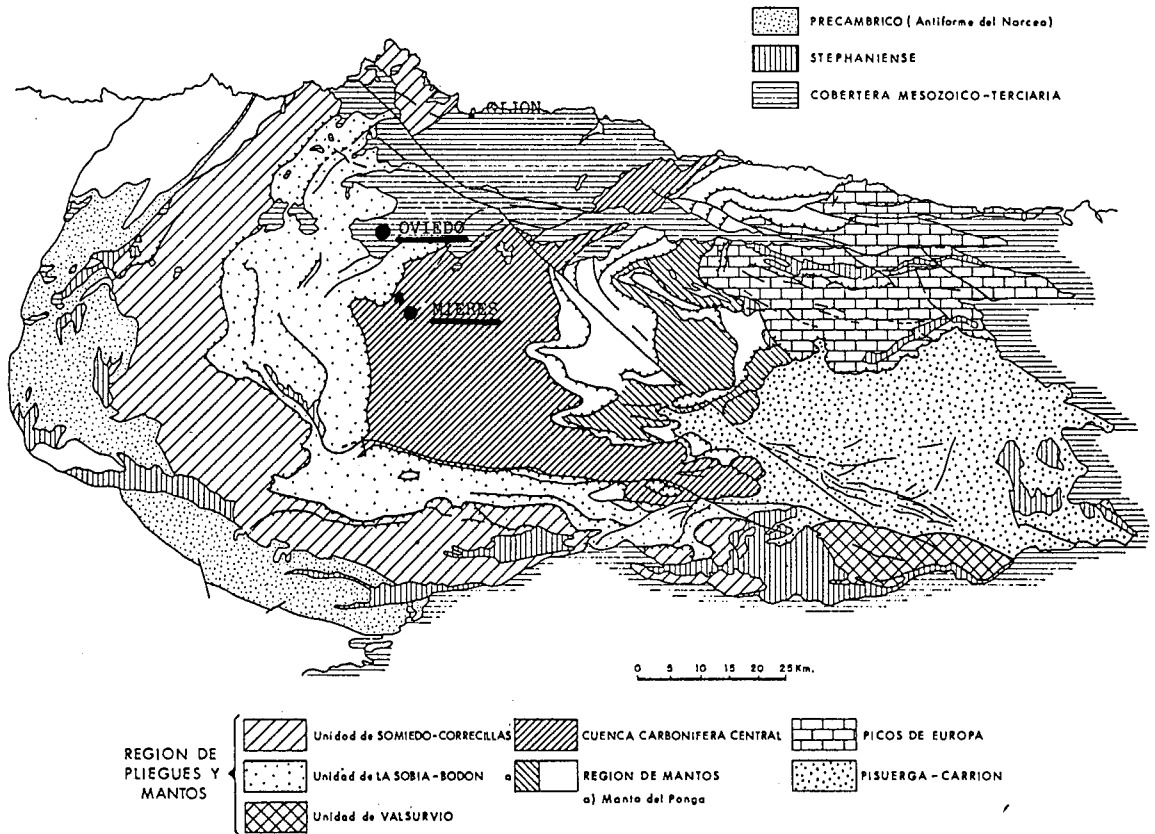


Figura 6. Unidades estructurales de la Zona Cantábrica y situación de los túneles de «El Padrún». Basado en Julivert; modificado de L. R. Rodríguez Fernández, 1983.



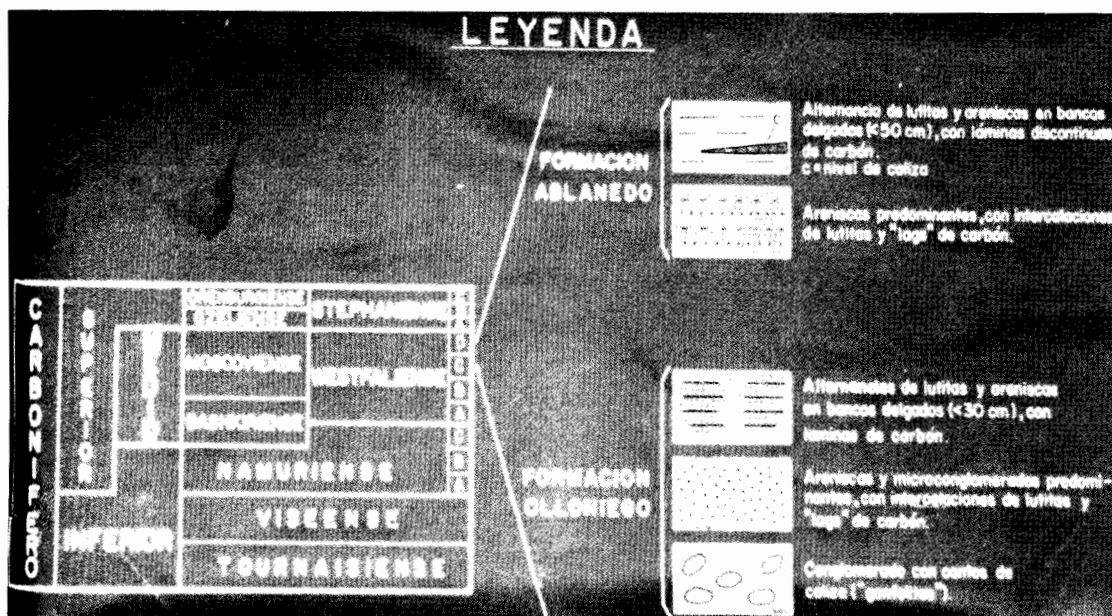
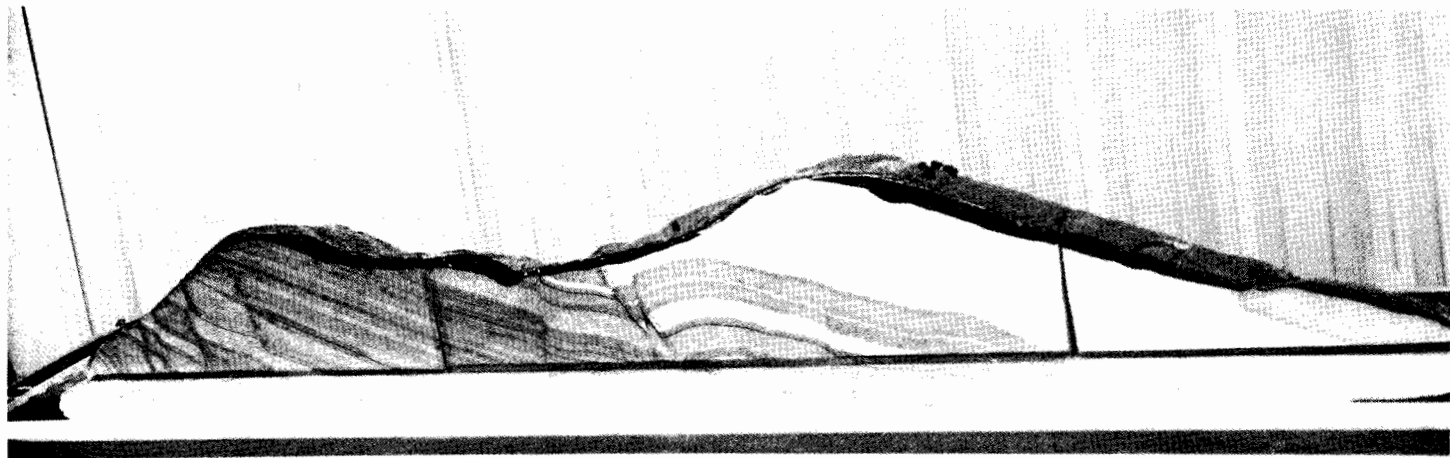
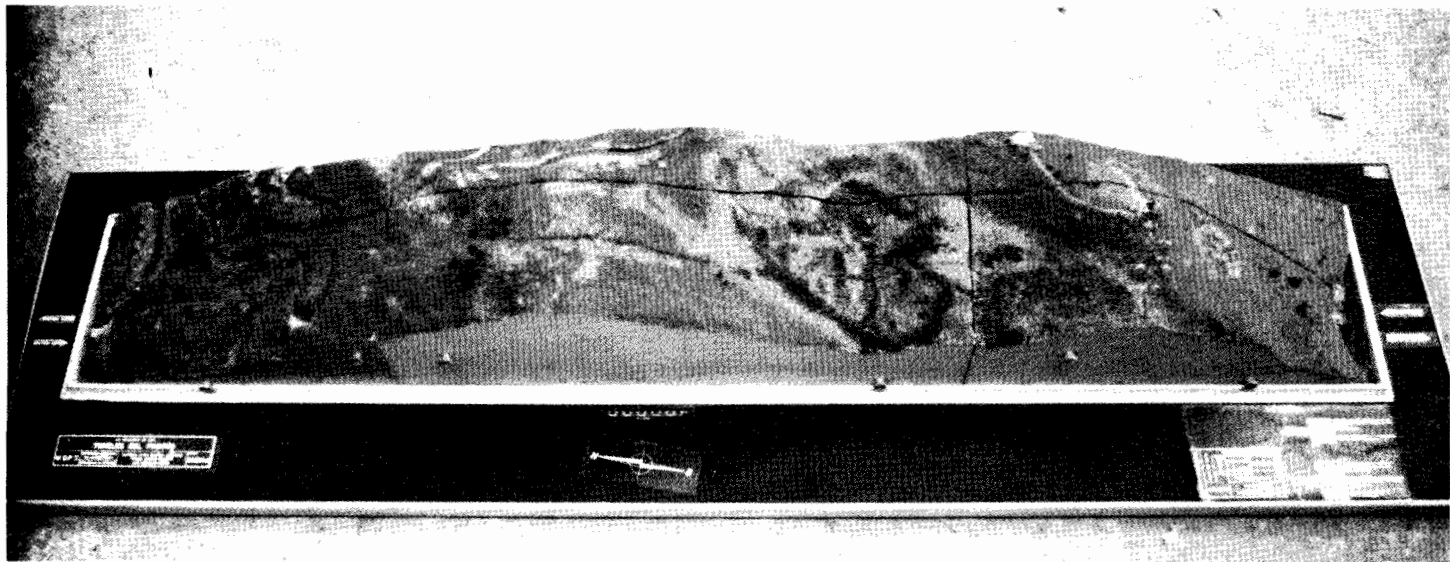


Figura 5. Maqueta geológica de los túneles de «El Padrún», Asturias. (6 de junio de 1992).

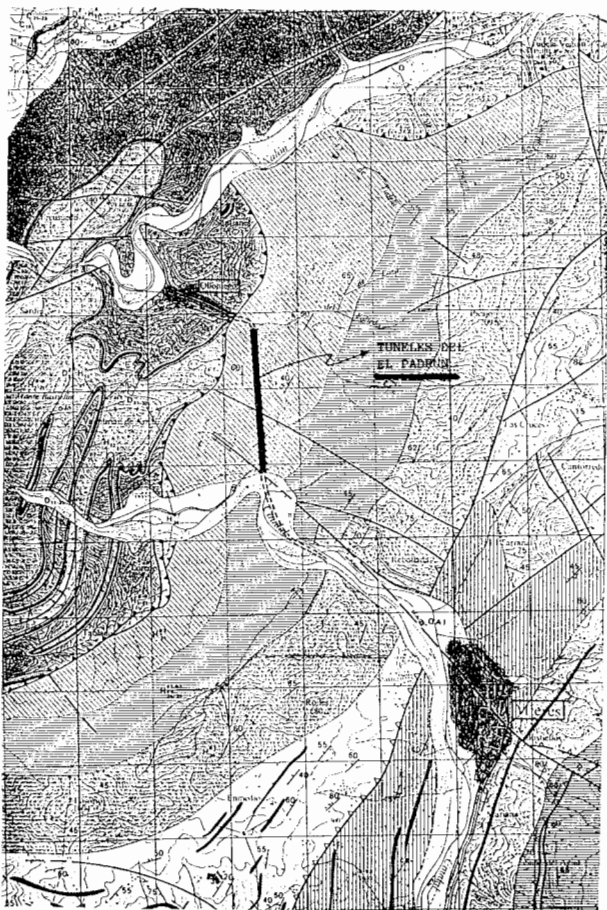


Figura 7. Cartografía del Mapa Geológico de España. Hoja de Mieres, Asturias. Caride, 1973.

cantos de caliza, areniscas, cuarcitas y trozos de carbón. Matriz areniscosa, tanto calcárea como silícea. Entre los paquetes de conglomerados calcáreos, llamados Gonfolitas, se disponen niveles alternantes desde areniscas a lutitas, con niveles finos y discontinuos de carbón. Los túneles atraviesan totalmente esta Formación.

■ Ablanado (Westfaliense D medio).

Alternancia de areniscas, de tamaño de grano variable, hasta lutitas, con alguna capa de carbón de poca potencia. Los túneles atraviesan esta Formación aproximadamente los primeros 200 m.

Las tres últimas son las que atraviesan total o parcialmente los túneles.

■ La Unidad Oriental o de Aller-Nalón.

Los datos de estratificación que se han obtenido durante la ejecución de los túneles, a grandes rasgos muestran que la dirección general de la serie es SSW-NNE, monoclinical con buzamientos hacia el W-NW.

Las fallas presentan una dirección general ONO-ESE, paralelas a la Falla de Mieres, situada en las proximidades de la boca lado Mieres (Sur).

Buzamientos entre los 65° y 80°. Esta fallas llevan asociados una banda de fracturación,

LEYENDA

| CUATERNARIO | | Q | QAI | O | Indiferenciado | |
|----------------------|--------------|--------------|--------------------|----------------------------------|---|--|
| CRETACICO | SUPERIOR | CONIACIENSE | C ₂₁₋₂₃ | QAI | Aluviones | |
| | | CENOMANIENSE | | C ₂₁₋₂₃ | Calizas, margas, arcillas y areniscas | |
| | INFERIOR | ALBIENSE | C ₁₄ | C ₁₄ | Arenas, conglomerados y arcillas | |
| TRIAS | | | T ₃ | T ₃ | Arcillas, areniscas y evaporitas | |
| PERMICO | | | | H ₂ ¹⁻³ -P | Pizarras, areniscas, conglomerados y vulcanitas | |
| CARBONIFERO SUPERIOR | STEPHANIENSE | | | H ₂ ¹⁻³ -P | Pizarras, areniscas y carbón (Intraterreñas y Soriego) | |
| | | | | PU | Pudingas | |
| | | | | H ₂ ¹⁻³ | Pizarras, areniscas y conglomerados (Espedraza) | |
| | WESTFALIENSE | SUPERIOR | | H ₂ ¹⁻³ | Pizarras, areniscas y carbón (M.ª Luisa) | |
| | | MEDIO | | H ₂ ¹⁻³ | Pudingas | |
| | | INFERIOR | | H ₂ ¹⁻³ | Pizarras, areniscas y calizas (Canetas) | |
| | NAMURIENSE | | | H ₂ ¹⁻³ | Pizarras, areniscas, carbón, calizas (Calizas-S. Antonio) | |
| | | | | C | Calizas | |
| | INFERIOR | DINANTIENSE | VISEIENSE | | H ₂ ¹⁻³ | Pizarras, calizas y areniscas (Subhullero de Rosa) |
| | | | TOURNASIENSE | | C | Calizas |
| | | | | A | Areniscas | |
| DEVONICO SUPERIOR | FAMENIENSE | SUPERIOR | | H ₂ ¹⁻³ | Pizarras, calizas y areniscas (Subhullero) | |
| | | | | C | Calizas | |
| | FRASNIENSE | | | CS | Calizas y areniscas | |
| | | | | H ₂ ¹⁻³ | Calizas (Caliza masiva) | |
| | | | | H ₂ ¹⁻³ | Pizarras y areniscas (Fresnedo) | |
| DEVONICO MEDIO | COUVINIENSE | | | H ₂ ¹⁻³ | Caliza (caliza de montaña) | |
| | | | | H ₂ ¹⁻³ | Calizas, radiolitas y pizarras | |
| | | | | D ₁₁₋₁₂ | Calizas (Candamo) | |
| DEVONICO INFERIOR | GEDIENSE | | | D ₁₁₋₁₂ | Cuarcita (Ermiza) | |
| | | | | D ₁₁₋₁₂ | Areniscas ferruginosas (Naranco) | |
| | | | | D ₁₁₋₁₂ | Caliza y margas apizarradas (Nionello) | |
| ORDOVIZIANO | MEDIO | | | D ₁₁₋₁₂ | Areniscas, pizarras, calizas y dolomías | |
| | | | | O ₂ | Pizarras | |
| ORDOVIZIANO INFERIOR | MEDIO | | | O ₁ | Cuarcitas | |
| | | | | CA, O ₁ | Areniscas y pizarras | |
| CAMBRIANO | MEDIO | | | CA, O ₁ | Areniscas y pizarras | |

donde se observan planos estriadados, rellenos arcillosos y de calcita, así como un aumento y dispersión del diaclasado. Normalmente planos satinados de la estratificación, favorecido por la presencia de láminas de carbón.

El «cabalgamiento» (que resultaría ser una falla de gran importancia) es una estructura muy importante dentro de la ejecución de los túneles. Es una fractura de dirección NNE-SSO, subparalela a la dirección de los túneles. Presenta ondulaciones, si bien puede ser considerada rectilínea.

El buzamiento en la zona de estudio es alto, entre 60° y 80°, hacia el oeste, con superficies alabeadas y rellenos, generalmente, arcillosos, siendo frecuente la calcita cuando ésta fractura atraviesa los conglomerados calcáreos.

La falla, de movimiento vertical —inversa— como horizontal —de desgarre y dextrógira—, va cortando los materiales correspondientes a la Formación Olloniego, subiendo en la serie hasta cortar los correspondientes a la Formación Ablanado.

Esta zona fracturada, en los túneles, se presenta entre materiales areniscosos-lutíticos, con deformación considerable debido a la plasticidad, con abundancia de planos satina-

dos y diaclasado intenso, con fracturas continuas de bajo espaciado y baja cohesión.

En numerosos puntos del túnel se produce agua, siempre asociada a una falla o en el muro de los conglomerados calcáreos (con materiales de contacto casi impermeables, formados por areniscas, limolitas y principalmente lutitas).

Decisión de revestir los túneles

La posibilidad de no revestir los túneles se analizó en detalle; parecía interesante pues, en principio, podría significar un ahorro de más del 20 % del coste total de las obras.

Fueron considerados aspectos muy diferentes en relación con las ventajas e inconvenientes, y se concluyó que había que revestirlos (Fig. 8). Esos aspectos pueden agruparse en:

- Verificar la posibilidad de dejar como estructura única el sostenimiento (Fig. 9), sin revestimiento, tal y como parece poder deducirse del N.A.T.M.

Para ello se procedió a:

- Consultar la documentación técnica tuneleira sobre el particular, tratando de profundizar en el conocimiento del N.A.T.M., las deformaciones a largo plazo y las posibles afecciones que pudieran producirse derivados de la explotación de los túneles (vibraciones, oxidación de elementos metálicos —cerchas y bulones—, averías que podría producir un accidente ...).

- Estudiar e intercambiar impresiones con los técnicos responsables de túneles similares (en longitud y tráfico) de España y resto de Europa. Especialmente se mantuvieron contactos con los técnicos austriacos más conocedores del N.A.T.M.
- Si bien se considera que las obras (excavación y sostenimiento) se estaban realizando satisfactoriamente y en conformidad con los principios del N.A.T.M., era preciso, para po-

Figura 8. Hormigonado del revestimiento de los túneles de «El Padrún», (8 de junio de 1992).

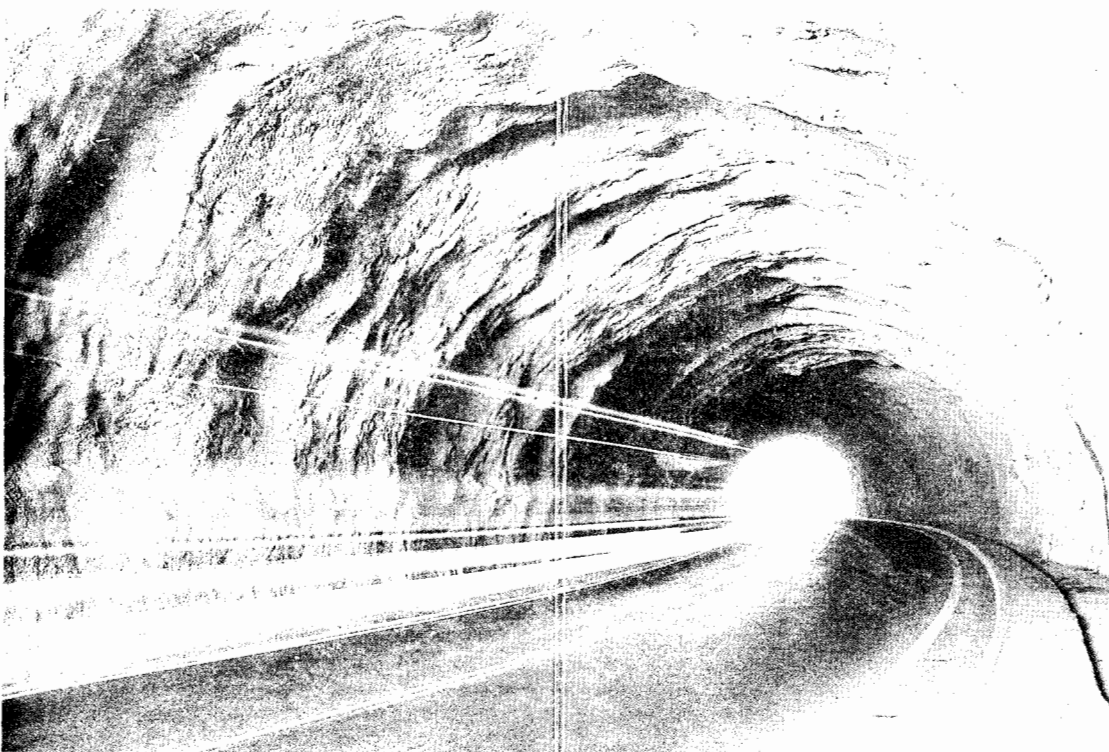
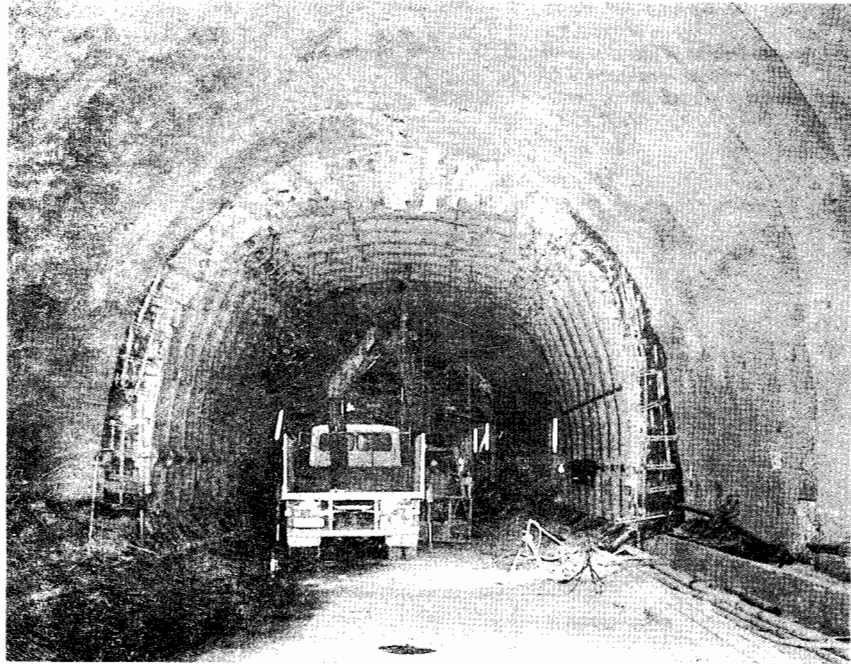
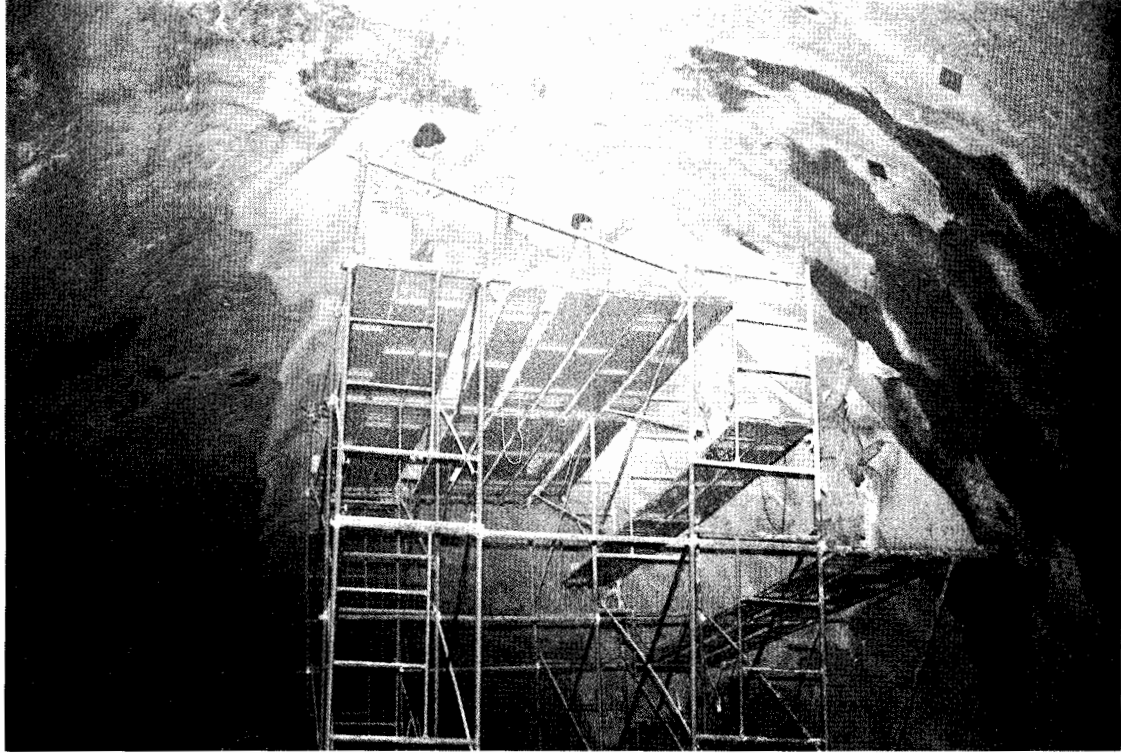


Figura 9. Túnel carretero en roca competente sin revestimiento.

Figura 10. Colocación de la lámina de impermeabilización entre el sostenimiento y el revestimiento. (8 de junio de 1992).



der comenzar a pensar en no revestir, hacer unas actuaciones adicionales que asegurasen que las características del sostenimiento se mantuvieran, destacando entre otras:

- Tapar todas las grietas y partes sueltas que pudiera haber en la gunita.
- Proteger de agentes agresivos (agua, gases...) todas las cabezas y placas de anclaje de los bulones.
- Asegurar una continuidad en la zona de contacto entre hastiales y contrabóveda, sin huecos.
- Asegurar que las aguas de filtración no puedan ser agresivas y ataquen al hormigón u otros elementos del sostenimiento.
- Mantener un seguimiento en la auscultación durante la vida de la obra, más intenso en zonas de difícil geología o importantes filtraciones.

■ Estudiar el sistema de impermeabilización que se construiría (Fig. 10), teniendo en cuenta que había que tratar, aproximadamente, la tercera parte de la longitud de los túneles.

- Se hizo un análisis de los sistemas de impermeabilización que podrían emplearse, dedicando atención a las láminas de impermeabilización que se vienen utilizando en túneles.
- Otros sistemas de impermeabilización, o no eran competitivos económicamente, o se consideró podrían presentar los mismos inconvenientes que se anotaron para la gunita (por ejemplo, las láminas que se cubren con un gunitado de débil espesor, aún con un mallazo, el riesgo de «desconches» se consideró inaceptable).

- Las láminas de impermeabilización que se pudieron encontrar en el mercado estaban previstas para ser empleadas en «sandwich», normalmente entre los hormigones del sostenimiento y el revestimiento. Si los túneles no se revestían, esas láminas quedarían «vistas» y expuestas directamente a la atmósfera del túnel así como al riesgo del incendio, lo que es fundamental tenerlo en cuenta cuando la superficie a impermeabilizar es importante (y por lo tanto la de la lámina a colocar).

■ Tratamiento final que se daría a los túneles, fundamentalmente por estética.

- El aspecto estético podía ser resuelto de varias formas, como puede ser el hormigonado sólo de hastiales, empleo de placas prefabricadas cubriendo hasta cierta altura... La disposición del alumbrado podría ser tal que favoreciera ese aspecto estético.
- Se hicieron valoraciones de algunas de esas soluciones. En algún caso resultaron más caras que el propio revestimiento.

En los túneles de El Padrún se decidió que había que revestir pues se consideró que:

- El ahorro no era tan elevado como en un principio parecía.
- Las ventajas que parece ofrecer el túnel sin revestir no parecieron significativas en estos túneles.
- Hay importantes incógnitas del comportamiento a plazo medio o largo, sin haber una respuesta con un riesgo determinado.
- Hay claras ventajas que apuntan a una garantía del túnel revestido.

Base de datos e instrumentación

Decidida la colocación del revestimiento y con el propósito de comprender el comportamiento del terreno-sostenimiento-revestimiento, verificando, en la medida de lo posible, las hipótesis del modelo (N.A.T.M.), y en base a la información geológica previa, se decidió recabar desde la fase de obra un cúmulo de datos con el fin de ser empleados tanto en la propia obra como en un seguimiento posterior, con los túneles en explotación y a plazo medio y largo.

La información geológica era procesada en la misma base de datos que la hidrogeológica y geotécnica, incluyéndose, además del tipo de sostenimiento empleado en cada perfil, las medidas de convergencias (Fig. 11), de células de presión (Fig. 12) y extensómetros (Fig. 13), así como los perfiles reales del túnel, tomados sistemáticamente cada 5 m (Fig. 14), y en detalle en todas las cuñas significativas (Fig. 15), así como tratamientos especiales (micropilotes formando paraguas, empquetados, empleo de chapa Bernold localizada...) o cualquier otro tipo de actuación realizada (resistencia a compresión de muestras de gunita —testigos de caja o extraídos del propio sostenimiento—, ensayos de tracción de bulones, rebulonados por averías localizadas...).

La geología fue objeto de un seguimiento constante en toda la fase de construcción de los túneles. En cada fase fue levantado un esquema del

frente de la excavación (Fig. 16), representándose la litología existente, disposición y familias de juntas (espaciado, continuidad, rellenos...), incluyéndose la representación en planta a escala 1:100. Igualmente se realizaron ensayos sistemáticos de rotura por compresión puntual, medidas esclerométricas, ensayos de compresión simple (Fig. 17), análisis de aguas... etc.

Los datos diarios eran objeto de un análisis sistemático, determinándose el R.M.R. y representando en un bloque diagrama las familias de juntas (Fig. 18) y sus representaciones estereográficas.

La campaña de sondeos, que complementaría los estudios geológicos, fue estudiada en combinación con la instrumentación que se consideraba más interesante instalar en los túneles.

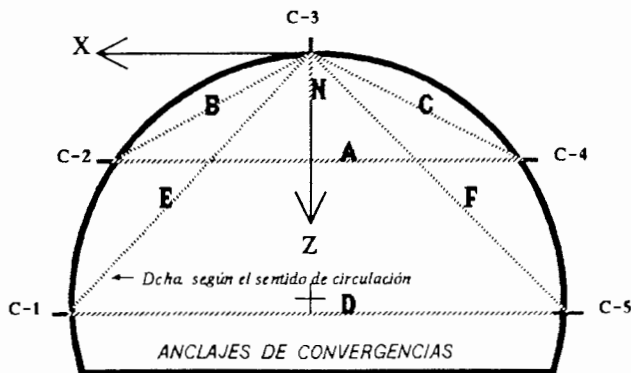
De los dos tubos se eligieron un total de 12 perfiles (6 en cada túnel), considerados representativos de las diferentes litologías que se presentarían en la excavación (Fig. 19).

En esas secciones se realizaron sondeos y se instaló una compleja instrumentación, que hacen un total de:

- 9 extensómetros múltiples (triples) de hilo.
- 29 extensómetros múltiples (10 dobles y 19 triples) de varilla, colocados desde el interior del túnel y radiales, con medidas a profundidades de 1,00 m, 4,00 m y 6,00 m.

Figura 11. Registro para las medidas de convergencias en los túneles de «El Padrún».

| | | | |
|---------------------------------------|-------|----------------------------|-------|
| CALZADA : Oviedo-Mieres | | P.K. 0.0000 | |
| DATOS GENERALES DE CONVERGENCIAS ALTA | | | |
| SITUACION DE LOS ANCLAJES | | | |
| No. | X(m) | Z(m) | |
| 1 | 0.000 | 0.000 | |
| 2 | 0.000 | 0.000 | |
| 3 | 0.000 | 0.000 | |
| 4 | 0.000 | 0.000 | |
| 5 | 0.000 | 0.000 | |
| AVANCE :—LECTURA INICIAL | | DESTROZA :—LECTURA INICIAL | |
| Fecha de Lectura: / / | | Fecha de Lectura: / / | |
| A(2-4): | 0.000 | A(2-4): | 0.000 |
| B(2-3): | 0.000 | D(1-5): | 0.000 |
| C(3-4): | 0.000 | B(2-3): | 0.000 |
| N(CLAVE): | 0.000 | E(1-3): | 0.000 |
| | | C(3-4): | 0.000 |
| | | F(3-5): | 0.000 |
| | | N(CLAVE): | 0.000 |



CALZADA : Oviedo-Mieres P.K. 0.0000

DATOS GENERALES DE CELULAS DE PRESION EN SOSTENIMIENTO
POSICION ALTA

| INTERFASE | | | HORMIGON | | |
|-----------|-------|-------|----------|-------|-------|
| No. | X (m) | Z (m) | No. | X (m) | Z (m) |
| S1-T | 0.00 | 0.00 | S1-R | 0.00 | 0.00 |
| S2-T | 0.00 | 0.00 | S2-R | 0.00 | 0.00 |
| S3-T | 0.00 | 0.00 | S3-R | 0.00 | 0.00 |
| S4-T | 0.00 | 0.00 | S4-R | 0.00 | 0.00 |
| S5-T | 0.00 | 0.00 | S5-R | 0.00 | 0.00 |
| S6-T | 0.00 | 0.00 | S6-R | 0.00 | 0.00 |
| S7-T | 0.00 | 0.00 | S7-R | 0.00 | 0.00 |
| S8-T | 0.00 | 0.00 | S8-R | 0.00 | 0.00 |
| S9-T | 0.00 | 0.00 | S9-R | 0.00 | 0.00 |

CALZADA : Oviedo-Mieres P.K. 0.0000

DATOS GENERALES DE CELULAS DE PRESION EN REVESTIMIENTO
POSICION ALTA

| INTERFASE | | | HORMIGON | | |
|-----------|-------|-------|----------|-------|-------|
| No. | X (m) | Z (m) | No. | X (m) | Z (m) |
| R1-T | 0.00 | 0.00 | R1-R | 0.00 | 0.00 |
| R2-T | 0.00 | 0.00 | R2-R | 0.00 | 0.00 |
| R3-T | 0.00 | 0.00 | R3-R | 0.00 | 0.00 |
| R4-T | 0.00 | 0.00 | R4-R | 0.00 | 0.00 |
| R5-T | 0.00 | 0.00 | R5-R | 0.00 | 0.00 |
| R6-T | 0.00 | 0.00 | R6-R | 0.00 | 0.00 |
| R7-T | 0.00 | 0.00 | R7-R | 0.00 | 0.00 |
| R8-T | 0.00 | 0.00 | R8-R | 0.00 | 0.00 |
| R9-T | 0.00 | 0.00 | R9-R | 0.00 | 0.00 |

CALZADA : Oviedo-Mieres P.K. 0.0000

DATOS GENERALES DE CELULAS DE PRESION EN SOSTENIMIENTO
MEDIDAS ALTA

FECHA DE MEDIDA : / /

| INTERFASE | | | HORMIGON | | |
|-----------|-------|------------------------------|----------|-------|------------------------------|
| No. | Canal | Presion(kg/cm ²) | No. | Canal | Presion(kg/cm ²) |
| S1-T | 0 | 0.000 | S1-R | 0 | 0.000 |
| S2-T | 0 | 0.000 | S2-R | 0 | 0.000 |
| S3-T | 0 | 0.000 | S3-R | 0 | 0.000 |
| S4-T | 0 | 0.000 | S4-R | 0 | 0.000 |
| S5-T | 0 | 0.000 | S5-R | 0 | 0.000 |
| S6-T | 0 | 0.000 | S6-R | 0 | 0.000 |
| S7-T | 0 | 0.000 | S7-R | 0 | 0.000 |
| S8-T | 0 | 0.000 | S8-R | 0 | 0.000 |
| S9-T | 0 | 0.000 | S9-R | 0 | 0.000 |

CALZADA : Oviedo-Mieres P.K. 0.0000

DATOS GENERALES DE CELULAS DE PRESION EN REVESTIMIENTO
MEDIDAS ALTA

FECHA DE MEDIDA : / /

| INTERFASE | | | HORMIGON | | |
|-----------|-------|------------------------------|----------|-------|------------------------------|
| No. | Canal | Presion(kg/cm ²) | No. | Canal | Presion(kg/cm ²) |
| R1-T | 0 | 0.000 | R1-R | 0 | 0.000 |
| R2-T | 0 | 0.000 | R2-R | 0 | 0.000 |
| R3-T | 0 | 0.000 | R3-R | 0 | 0.000 |
| R4-T | 0 | 0.000 | R4-R | 0 | 0.000 |
| R5-T | 0 | 0.000 | R5-R | 0 | 0.000 |
| R6-T | 0 | 0.000 | R6-R | 0 | 0.000 |
| R7-T | 0 | 0.000 | R7-R | 0 | 0.000 |
| R8-T | 0 | 0.000 | R8-R | 0 | 0.000 |
| R9-T | 0 | 0.000 | R9-R | 0 | 0.000 |

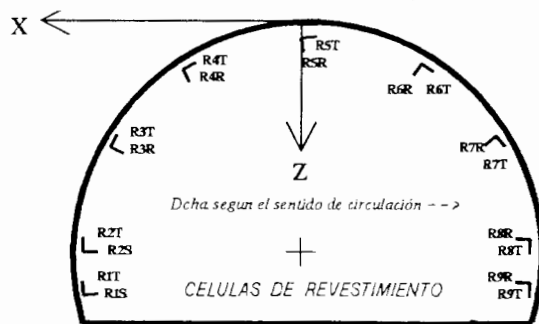
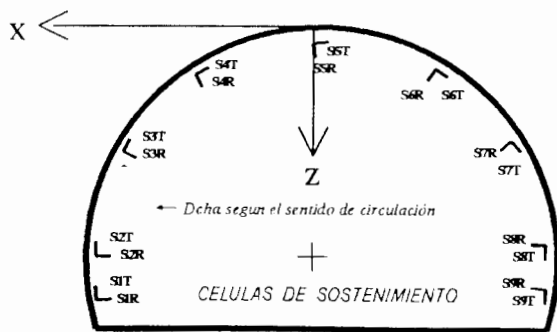


Figura 12. Registros para las medidas de las células de presión de mercurio en sostenimiento (en interfase y en hormigón) y en revestimiento (tangenciales y radiales) instaladas en los túneles de «El Padrún».

- 248 células de presión de mercurio:
- 176 en el sostenimiento. La mitad colocadas en el contacto terreno-sostenimiento y la otra mitad en el interior de la masa de hormigón.
- 72 en el revestimiento. La mitad radiales y la otra mitad tangenciales.

Toda la instrumentación se podrá medir con los túneles en servicio, habiéndose dispuesto los terminales agrupados para que las lecturas puedan hacerse sin dificultad.

Nota sobre la función estructural del revestimiento

Es habitual que en la ejecución de un túnel se construya un revestimiento de hormigón (entre 30-50 cm), normalmente encofrado, y que forma un anillo con el que se finaliza el túnel. La cara exterior de ese revestimiento será el «paramento visto» del túnel, al que se fijan los ventiladores, luminarias, bandejas portacables...

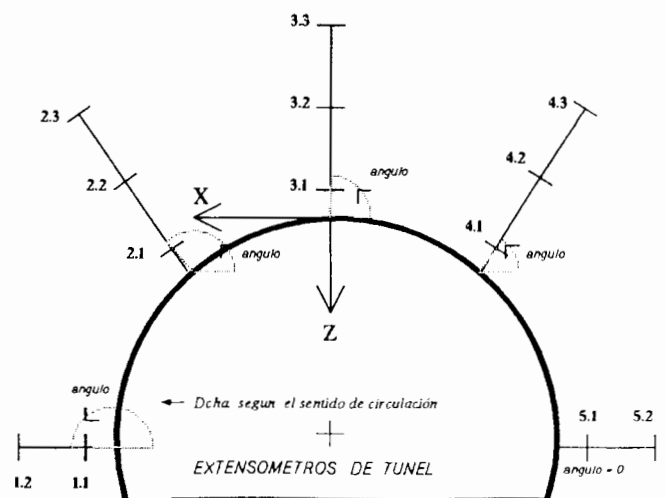
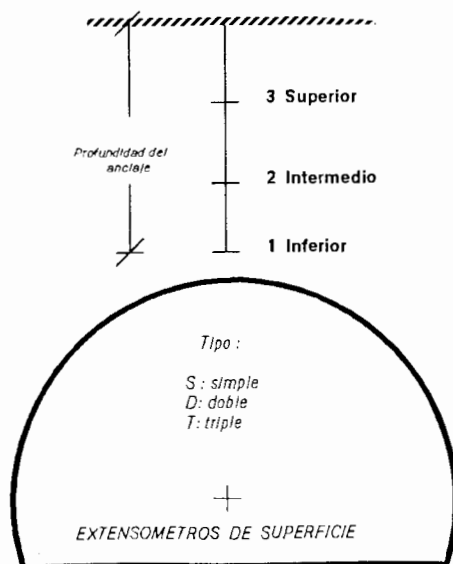
Oculto por ese revestimiento, normalmente se encontrarán las láminas de impermeabilización que se hubieran colocado en las zonas con filtraciones, así como todos los elementos que se usaron en el sostenimiento; bulones, gunita, mallas, cerchas...

En lo referente al papel resistente que juega el sostenimiento en el N.A.T.M., Müller indica 22 principios fundamentales de este método y Brown establece 7, entre ellos:

- El trabajo de sostenimiento fundamental lo realiza el propio terreno.
- El sostenimiento actúa fundamentalmente como confinamiento.
- Hay que controlar el proceso de deformación con el tiempo para asegurar la estabilidad a corto y largo plazo.
- Hay que provocar el cierre del anillo de terreno para que trabaje como un tubo de pared gruesa.

| CALZADA : Oviedo-Mieres P.K. 0.000 | | |
|---|-------|-------|
| DATOS GENERALES DE EXTENSOMETROS DE SUPERFICIE ALTA | | |
| SONDEO | | |
| Numero..... | 0 | |
| TIPO (S.D.T.) : | | |
| POSICION | | |
| - Coord. X : | 0.000 | |
| - Coord. Y : | 0.000 | |
| - Coord. Z : | 0.000 | |
| LECTURA INICIAL | | |
| Fecha : / / | | |
| M E D I D A S | | |
| 1 | 2 | 3 |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| PROFUNDIDAD DEL PUNTO DE ANCLAJE | | |
| - 1 (Inferior) : | 0.00 | |
| - 2 (Intermedio) : | 0.00 | |
| - 3 (Superior) : | 0.00 | |
| DISTANCIA SUPERFICIE-CLAVE : | 0.00 | |

| CALZADA : Oviedo-Mieres P.K. 0.000 | | | | | | | |
|--|------|-------------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|
| DATOS GENERALES DE EXTENSOMETROS DE TUNEL ALTA | | | | | | | |
| FECHA DE MEDIDA : / / | | | | | | | |
| No. TIPO PROFUNDIDAD DE ANCLAJE (m) | | | | | | | |
| 1 | 1 | 2 | 3 | | | | |
| 2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | | | |
| 3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | | | |
| 4 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | | | |
| 5 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | | | |
| No. Posicion cabeza Angulo Perforacion | | LECTURAS INICIALES (mm) | | | | | |
| No. | X(m) | Z(m) | Perforacion | No. | 1 | 2 | 3 |
| 1 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 2 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 4 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 5 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |



Ventajas e inconvenientes del revestimiento de hormigón

Aspectos constructivos del revestimiento

Normalmente, en los proyectos se establece una «línea de abono» para el perfil de excavación, en base a la que se hará su abono, y debe ser tal que, en función del terreno, represente un valor promedio «real» de lo que será el perfil de excavación (Fig. 20).

Igualmente se establece un perfil interior del túnel terminado (sección tipo) una vez revestido, con un espesor obligado mínimo de ese revestimiento (Fig. 21).

Ambos condicionantes —no exceder el perfil medio de excavación y hacer la sección tipo prevista para el revestimiento— requieren:

- Una definición correcta de la línea de abono (lo que no es fácil en proyecto y tampoco lo es en el momento de estudiar sus ofertas el constructor).

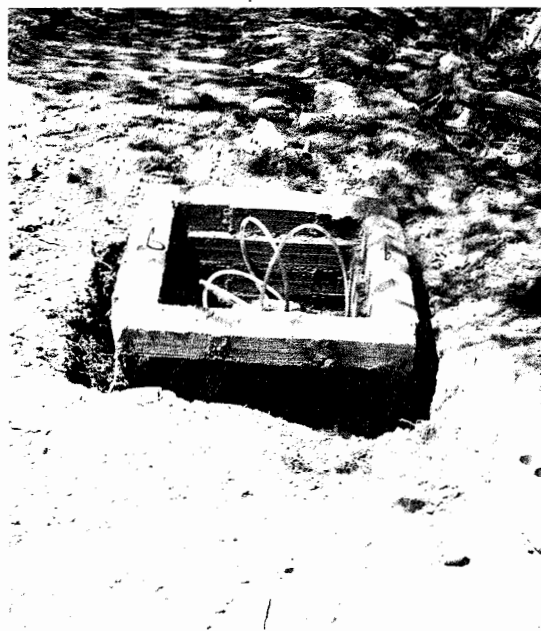


Figura 13. A la izquierda y abajo extensómetros de superficie (múltiples, de hilo) instalados en los túneles de «El Padrún», (18 de mayo de 1989). A la derecha extensómetros de interior (múltiples, de varillas).

Figura 14. Perfil de una sección con una sobre-excavación importante. (25 de mayo de 1992).

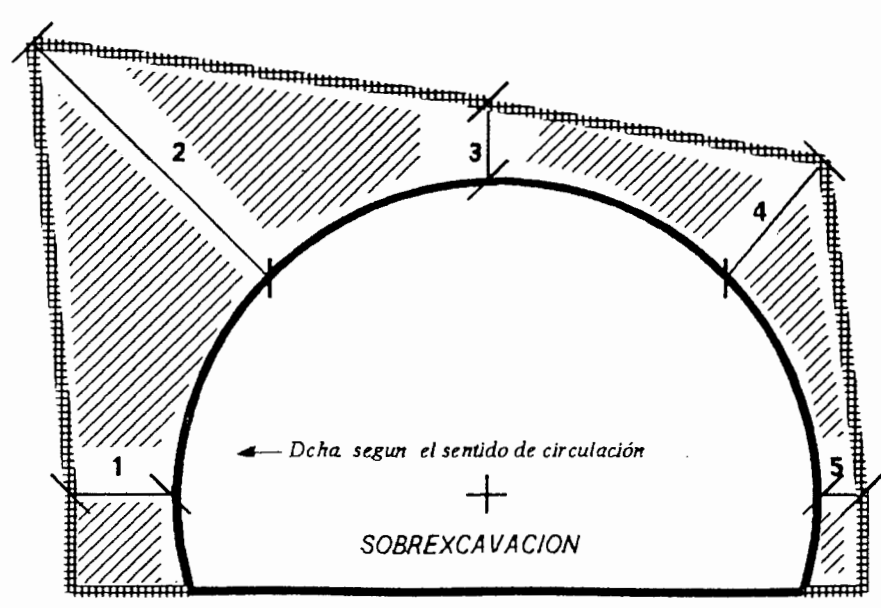
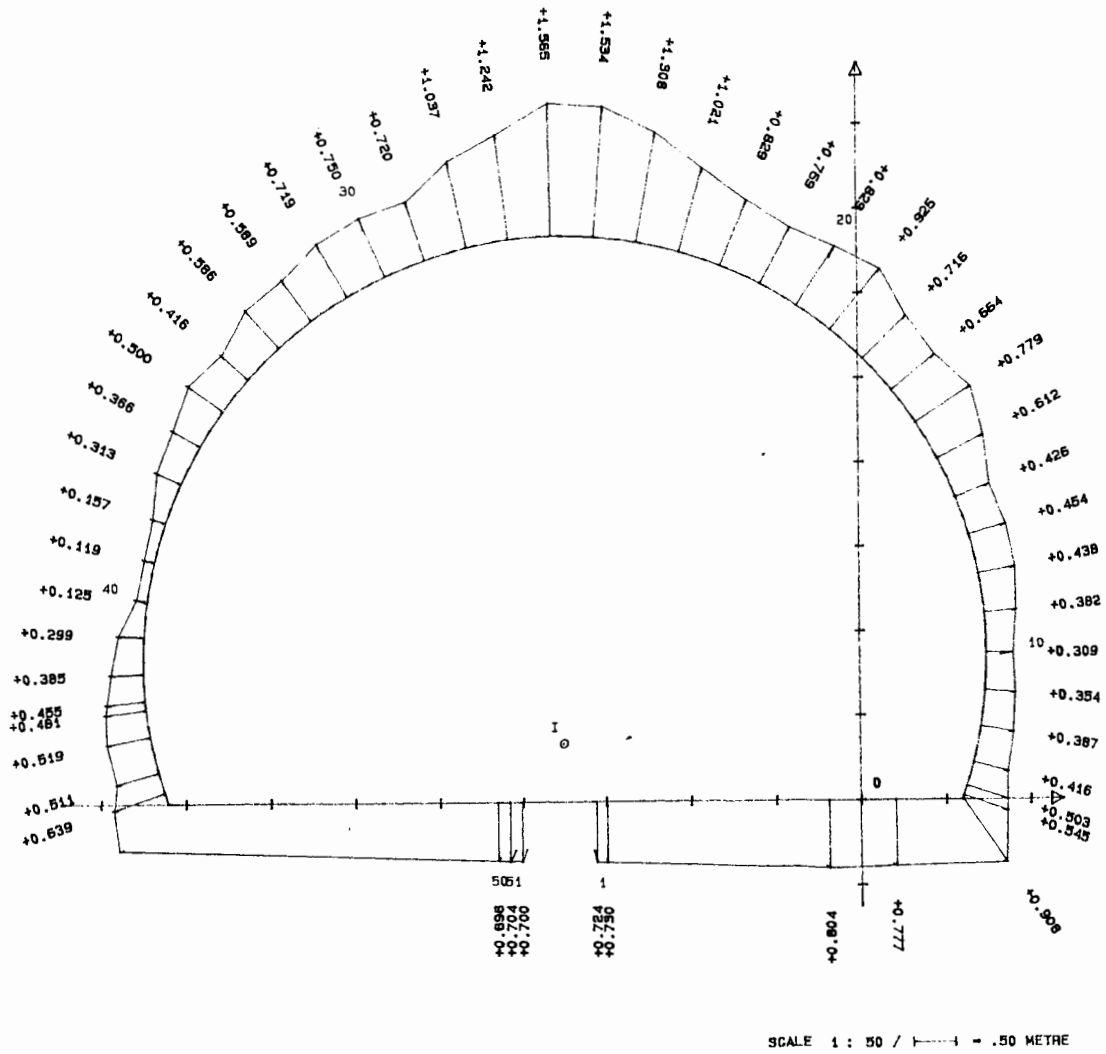


Figura 15. Registro para la toma de datos de sobre-excavaciones (causadas fundamentalmente por cuñas desprendidas en las voladuras).

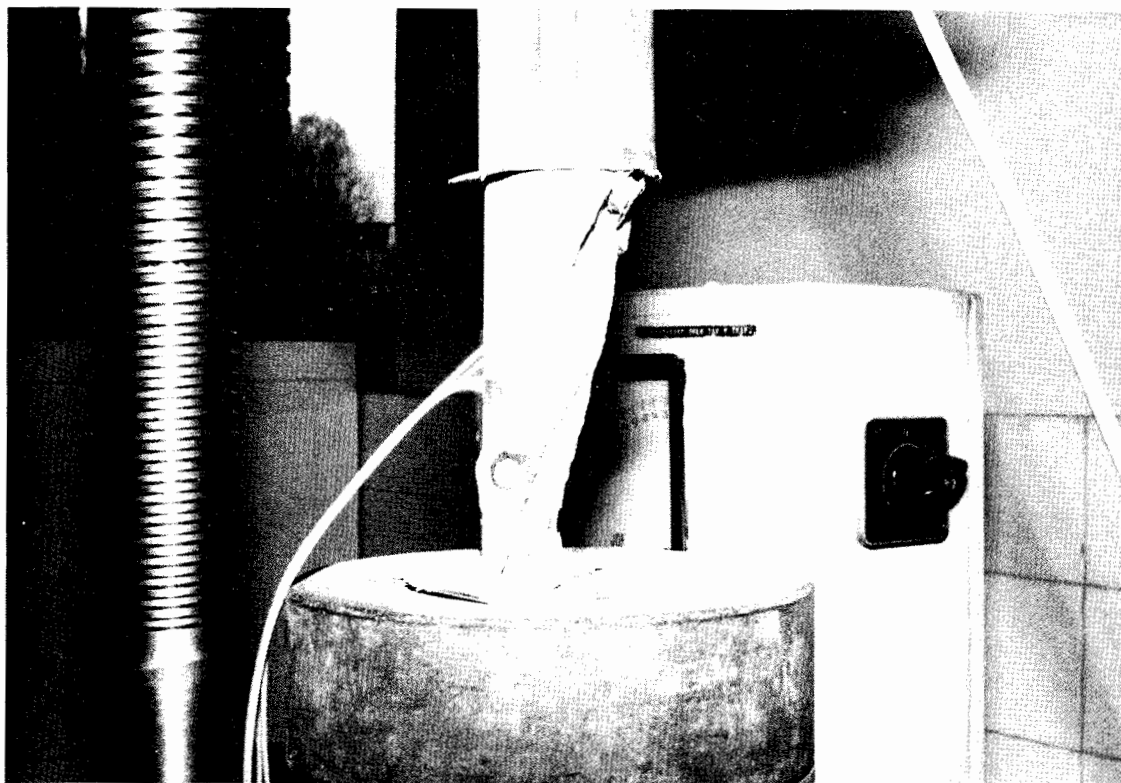
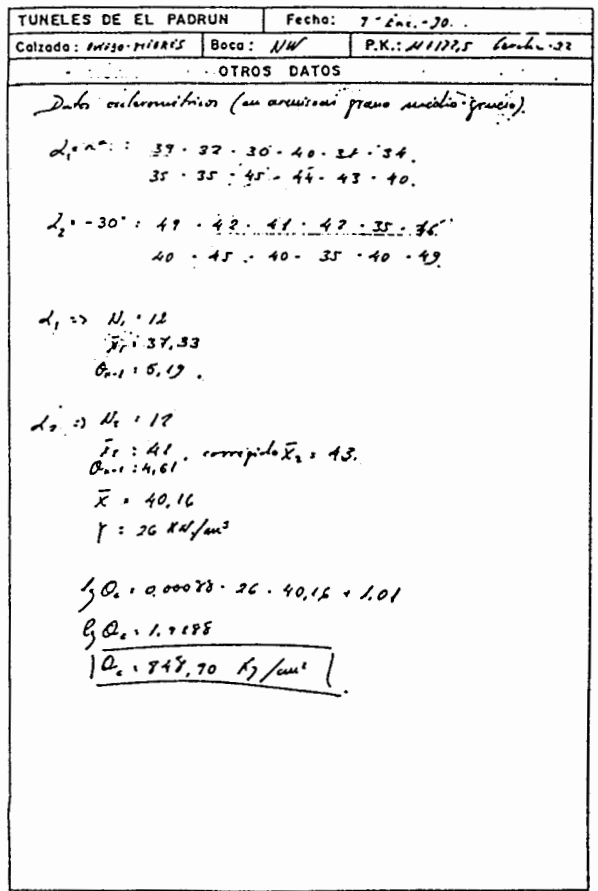
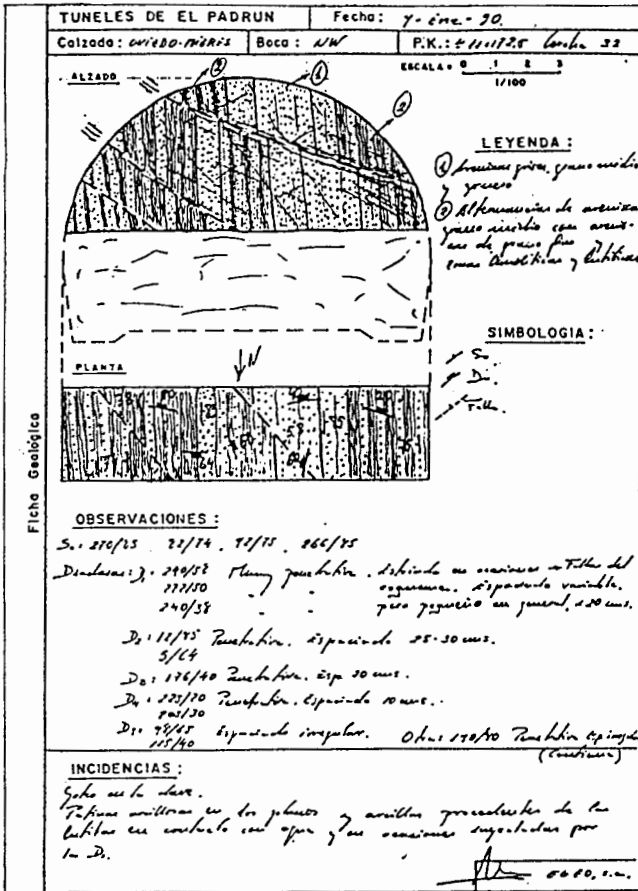


Figura 16. Ejemplo de los datos geológicos que fueron tomados en todos los «pases», según progresaba la excavación, quedando anotados los detalles del frente. (4 de enero de 1990).

Figura 17. Ensayo de compresión simple con medida de las deformaciones radial y tangencial en un testigo de roca (arenisca de grano fino). Laboratorio de la Demarcación de Carreteras de Asturias. (15 de marzo de 1990).

Figura 18. Ejemplo de bloques diagrama representativos de tramos de los túneles de «El Padrún» Calzada Mieres-Oviedo. Tramo entre los p.k. 11,600 y p.k. 11,650.

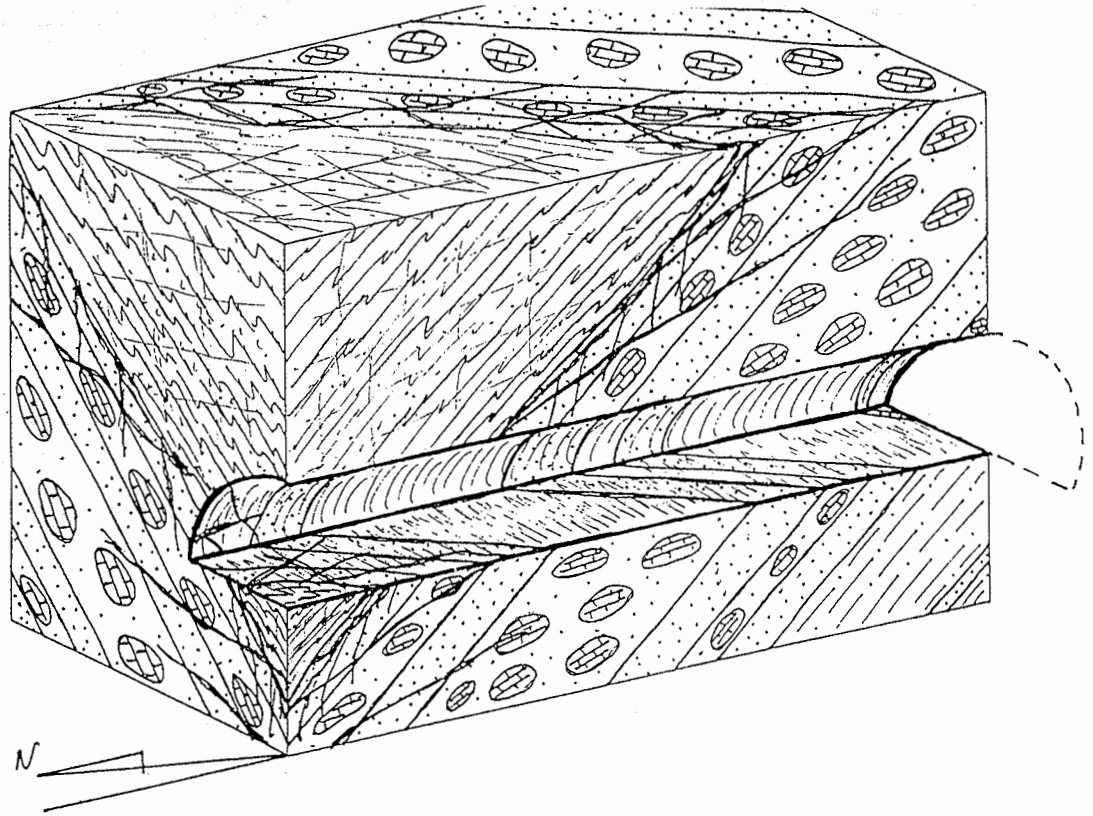
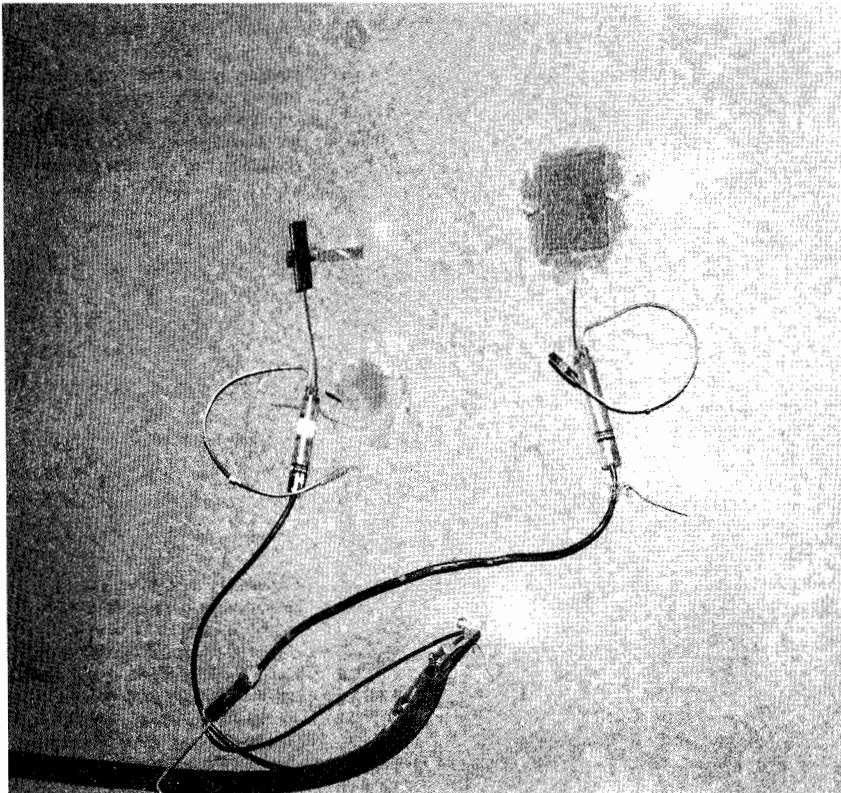


Figura 19. Ejemplo de una sección instrumentada del tubo correspondiente a la calzada Mieres-Oviedo (sección con el sostenimiento ya colocado) (8 de junio de 1992).



■ Una construcción muy cuidada (más si se emplean explosivos) para respetar esa línea de abono.

■ Si no ha sido limitada la excavación a esa línea de abono, el hormigón (normalmente del revestimiento) tendrá una cubicación que puede ser muy superior a la prevista.

Explotación, alumbrado y ventilación.

Con el túnel revestido son menores las pérdidas de carga en la ventilación (Fig. 22); ésta es más homogénea, con menores turbulencias, pudiendo lograrse con menor energía la ventilación de zonas más difíciles (bordes inferiores de los hastiales —aceras— en ventilación con aceleradores).

El atravesar un túnel obliga al conductor a una adaptación rápida a las nuevas condiciones del entorno. Con el túnel revestido las condiciones siempre son más homogéneas. En caso de no revestir la iluminación puede ser estudiada no sólo para hacer visible el propio túnel, sino también para que no perciba que existen discontinuidades en las paredes (hastiales y bóveda irregular).

La iluminación será de mayor rendimiento, pudiendo mantenerse con más facilidad las superficies de hastiales y bóveda limpias en túneles revestidos.



Figura 20. Ejemplo de dos secciones del túnel con el sostenimiento colocado y el revestimiento en ejecución. Izquierda: sección excavada con un perfil próximo al teórico. Derecha: sección excavada con una importante sobre-excavación. (8 de junio de 1992).



Figura 21. Sección del túnel con el revestimiento ya hormigonado (faltando la solera y cunetas). (8 de junio de 1992).

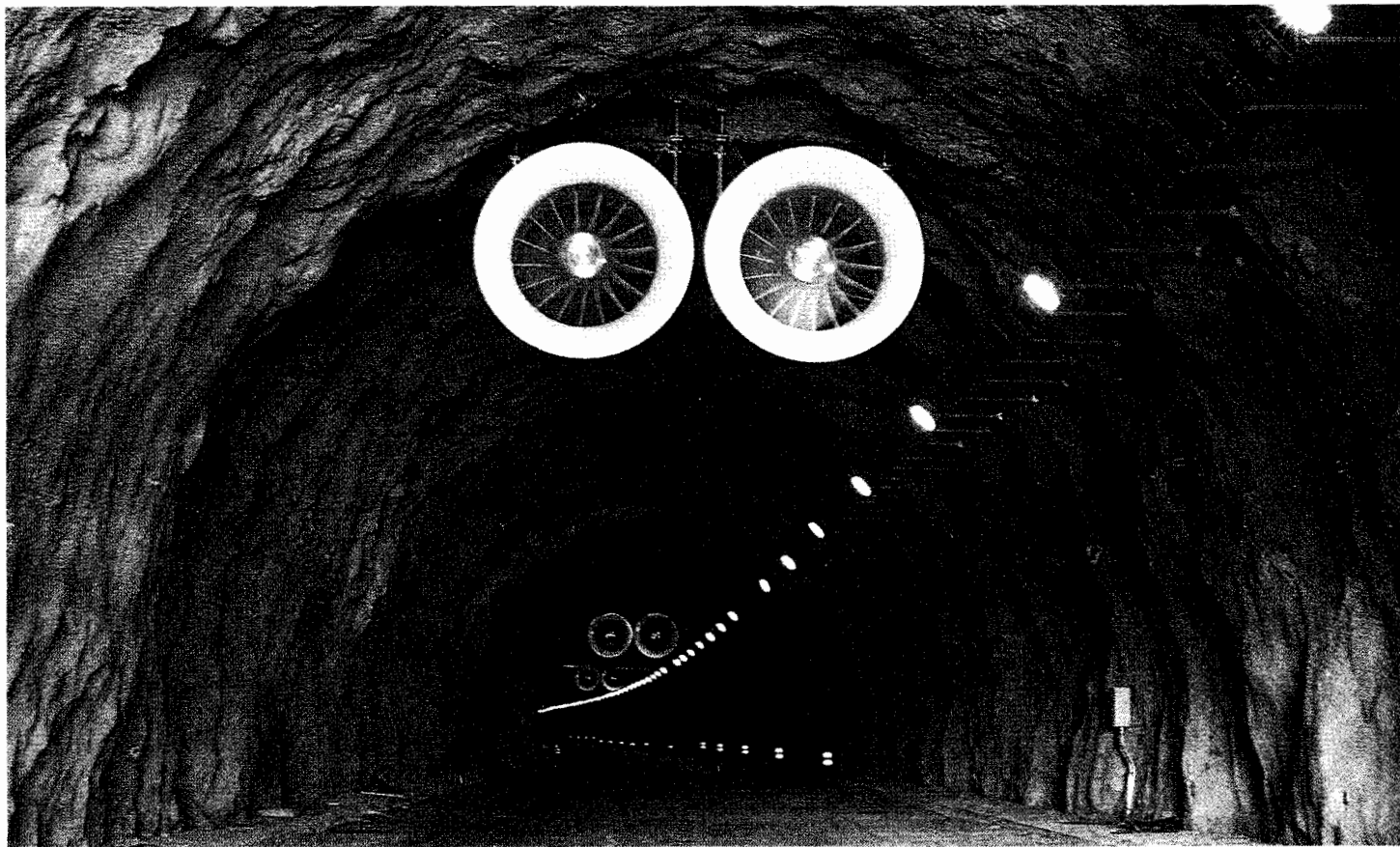


Figura 22. Túnel carretero sin revestimiento en roca competente.

Si no se reviste puede ser interesante hormigonar los hastiales (por estética, fundamentalmente) hasta cierta altura (o usar elementos prefabricados), lo que supone un coste importante.

Reparaciones y auscultación. Seguridad

Hay que tener en cuenta que con el túnel en servicio, el colocar, por ejemplo, unos bulones o un gunitado de refuerzo, es una labor que obliga a dejar fuera de servicio temporalmente el túnel.

El revestimiento de hormigón representa una garantía para evitar que pudiera caer algún elemento de gunita («desconche») o roca al interior (por efecto de cambios térmicos, por vibraciones...etc), que, aún siendo pequeños, podrían producir sobresalto en los usuarios, con reacciones imprevisibles.

Con el túnel en servicio los sistemas de auscultación se hacen más complejos; las medidas de convergencias (control importante en túneles no revestidos) pueden considerarse, en general, imposibles de realizar (con la frecuencia deseada para que puedan ser empleados como sistemas «preventivos» y de aviso de averías).

Frente a agentes agresivos (aguas, gases...etc), los elementos metálicos (cabezas de bulones, mallazos, cerchas...etc) se verán muy expuestos caso de no disponer del recubrimiento que aporta el revestimiento.

En principio, el tener el sostenimiento a la vista debe de permitir detectar rápidamente cualquier

anomalía en la estructura resistente del túnel (gunita, bulones y cerchas), pero debe de tenerse en cuenta que la inspección visual se vuelve muy compleja (la superficie será muy irregular, estará sucia...).

Debe de tenerse en cuenta que una lámina de impermeabilización colocada sobre el sostenimiento tampoco permite la inspección del mismo (las láminas son opacas).

Impermeabilización

En el caso de haber filtraciones el túnel, debe ser impermeabilizado en todas las zonas donde las hubiera. La impermeabilización se hace muy bien con láminas, dispuestas entre el sostenimiento y el revestimiento.

El revestimiento impide detectar de forma inmediata las posibles nuevas filtraciones o venas de agua que pudieran presentarse.

Láminas de impermeabilización

En un estudio que realizaron los autores de las presentes notas relativo a la posibilidad de no revestir los túneles, entre otros aspectos se analizó cual sería la impermeabilización adecuada para el túnel en esa hipótesis de no revestirlo.

Se estudiaron algunos tipos de láminas de impermeabilización, y no se alcanzaron resultados

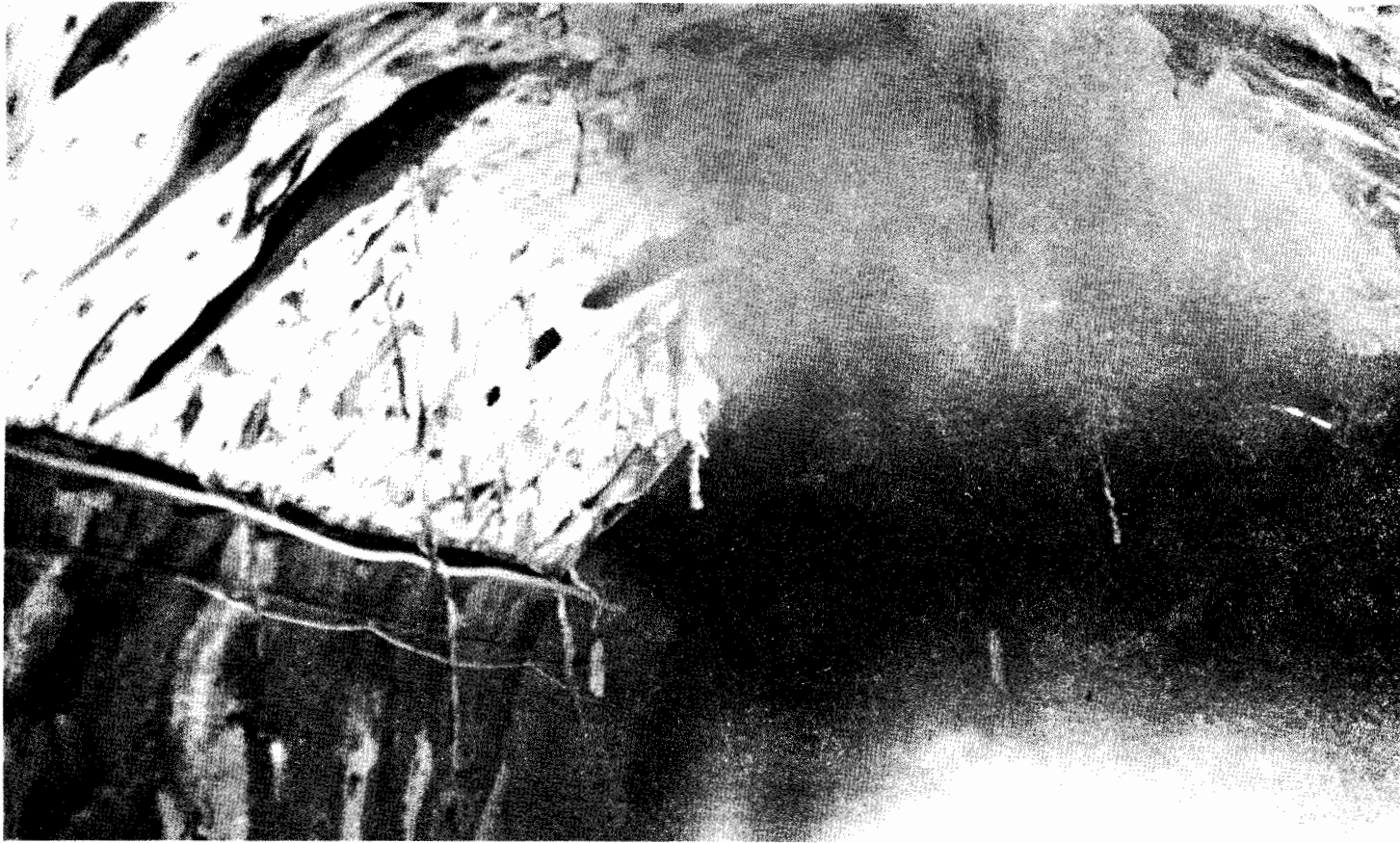


Figura 23. Averías en una lámina de impermeabilización ensayada. Ensayo de Incendio en los túneles de «El Padrún». (26 de marzo de 1992).

plenamente satisfactorios, pues si bien las láminas examinadas fueron las tradicionalmente empleadas en túneles revestidos (colocadas entre el sostenimiento y el revestimiento), esas mismas para quedar «vistas» requerían unas prescripciones que no se consideró se cumplieran en lo relativo a su comportamiento frente al fuego y al envejecimiento del conjunto lámina-anclajes-juntas.

Los materiales que componen la lámina así como sus elementos de anclaje y juntas tienen que ofrecer garantías suficientes para su colocación sin la protección del revestimiento, destacando:

- Las características físico-químicas de los componentes del conjunto lámina-anclajes-juntas será perfectamente conocido. Los ensayos relativos al comportamiento ignífugo, de propagación de llama y de envejecimiento son importantísimos si se pretende colocar la lámina «vista». (Fig. 23).

- Los ensayos relativos a los efectos de los agentes químicos deben de considerar:

- El conjunto lámina-anclajes-juntas.
- Capacidad de absorción de algunos agentes químicos.

Hay láminas que podrían actuar como «esponjas» elevando las concentraciones de materiales altamente tóxicos (en algún caso se han encontrado absorciones del $\approx 200\%$ de la gasolina y el $\approx 10\%$ de aceites lubricantes).

- La experiencia en túneles similares (por su longitud, tráfico...) es importante, debiendo conocerse la longitud del túnel, tráfico, metros cuadrados que fueron empleados a fin de tener conocimiento si fue una actuación local de impermeabilización o de grandes superficies, si la capa está vista o en sandwich con el revestimiento...

- Es importante conocer la adherencia del polvo en la lámina, del procedimiento de limpieza adecuado, de los tipos de pinturas que podrían emplearse...

- Debe de conocerse el comportamiento del conjunto lámina-anclajes en las zonas más próximas a las corrientes de aire, que a gran velocidad sale de los ventiladores.

Rugosidades excesivas en la bóveda y hastiales

Con los túneles de «El Padrún» en construcción, y con el sostenimiento terminado (y a falta del revestimiento) se realizó (el 26 de marzo de 1992) un «Ensayo de Incendio de 2 Vehículos Ligeros» (Fig. 24), habiéndose realizado medidas de gases emitidos, temperaturas alcanzadas, movimiento de humos, estudio del comportamiento de algunos elementos del túnel (bandejas porta-cables y láminas de impermeabilización)...

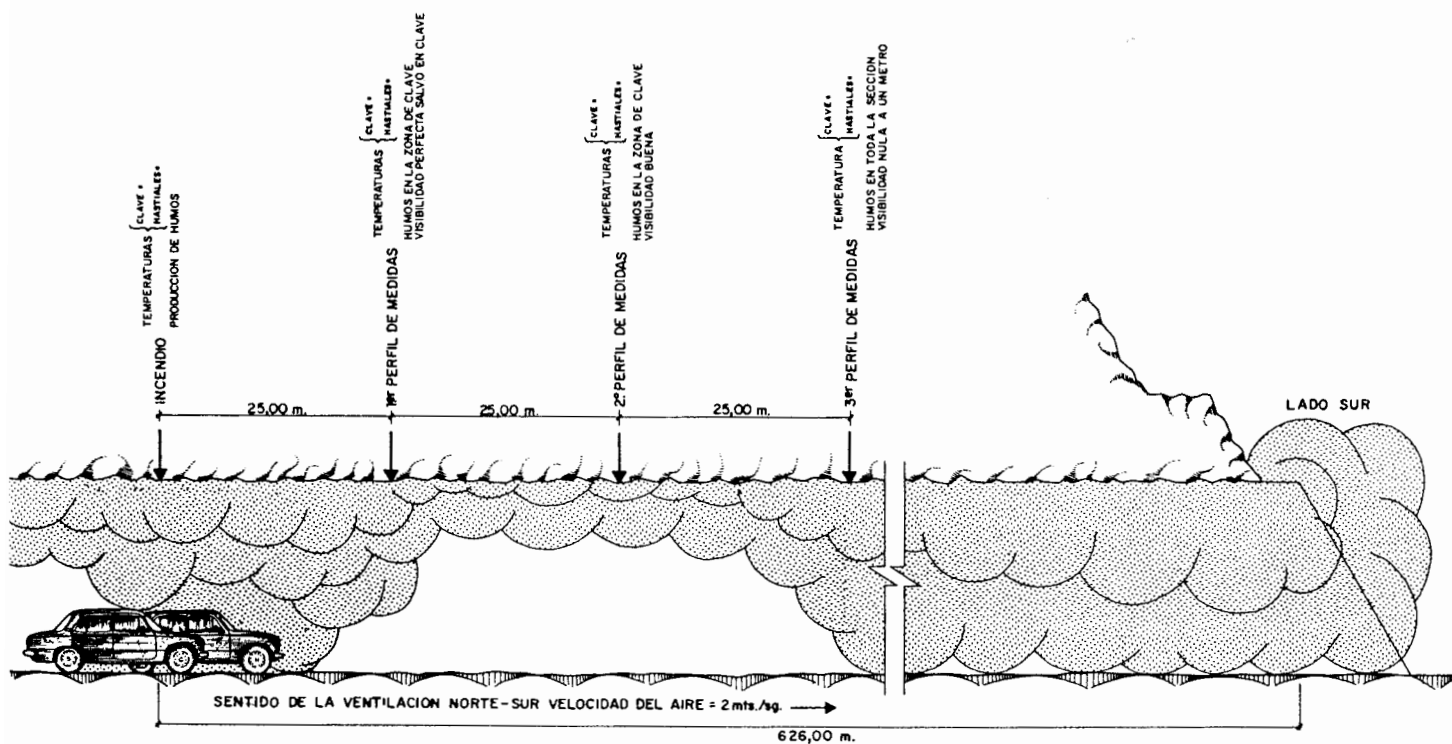


Figura 24.a. Esquema del Ensayo de Incendio en los túneles de «El Padrún», con indicación de las secciones de registros continuos de temperaturas.

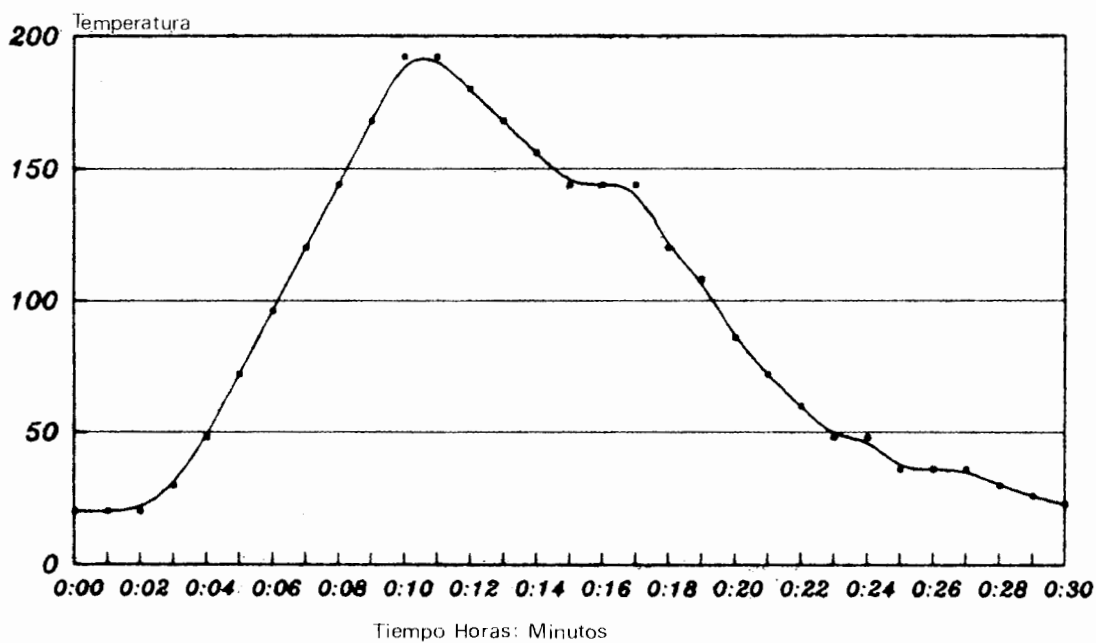


Figura 24.a. Registro temperatura-tiempo en la sonda situada en la vertical del lugar del incendio (26 de marzo de 1992).



Figura 24.b. Diferentes momentos del Ensayo de Incendio en los túneles de «El Padrún», (26 de marzo de 1992). A la izquierda llenado de los depósitos de gasolina con agua para evitar una explosión (se dispondrían bidones abiertos en los asientos traseros llenos de 50 litros de gasolina). Sobre estas líneas incendio simultáneo de los dos vehículos (Renault 5 y Seat 1.500). Abajo incendio de uno de los vehículos (Renault 5).



Figura 24.b.1. «Punta de incendio» con humos y gases avanzando por la bóveda del túnel en contracorriente del aire forzado por la ventilación.

En el avance de los humos calientes por la bóveda del túnel (el Ensayo se realizó con ventilación forzada, con velocidad del aire de 2 m/s), y en los tramos donde las «rugosidades» (ocasionadas por desprendimientos de cuñas en la excavación) eran más pronunciadas (con «huecos» del orden de 1, m de profundidad respecto al perfil teórico) se formaron zonas donde el campo de velocidades se alteraba, y con ello las temperaturas.

Posiblemente, el enfriamiento relativo a los humos que se iba acumulando en esos huecos, en algún momento descendía y obligaba a la lámina de gases más calientes que avanzaban por la bóveda igualmente a descender hacia la calzada, con lo que la mezcla con la capa fría inferior (en un principio del incendio aún respirable) se facilitaba, ocasionándose una zona de turbulencia y reducción de la sección de la lámina de gases calientes, con lo que la evacuación de éstos será más compleja.

En caso de un incendio en el túnel con vehículos, la superficie por la que pueden salir los humos podría verse reducida, no sólo por el obstáculo que crean esos vehículos, sino también por los efectos más arriba indicados.

Es un problema muy complejo de analizar (campo que parece bien abordable por medio de las estructuras fractales), pero parece poner de manifiesto que el cálculo de la ventilación en túneles sin revestir con la mera corrección de la rugosidad (aumentando las pérdidas de carga y obligando a más ventiladores) es demasiado simplista en caso de que existan esas «oquedades».

La geometría de esos huecos tiene una importancia fundamental. En nuestro caso, los había (localizados) que tenían algo más de 1 m de profundidad (valor normal en un túnel excavado con explosivos) respecto al perfil teórico.

Conclusiones

El eliminar el revestimiento de hormigón encofrado, con el que «se suelen» terminar los túneles construidos según los principios del Nuevo Método Austriaco, debe ser objeto de estudio en cada caso.

Debe de tenerse en cuenta que son muchos los túneles «tradicionales» (construidos según del N.A.T.M.) en los que ese revestimiento está construido, y su correcto comportamiento parece probado; por el contrario, menos documentados y numerosos son los casos en los que no se coloca.

Algunas de las implicaciones que presentaría el no construir ese revestimiento hay que analizarlas en profundidad, y tener en cuenta los comportamientos a largo plazo, así como las dificultades que podría suponer el obligar a un control delicado a lo largo de los años de, por ejemplo, las convergencias o un sistema complejo de auscultación.

Por último, es muy interesante analizar la información que se dispone de túneles construidos con un tipo u otro de sostenimiento y revestimiento, y correlacionarlo con el tipo de problemas que en cada caso hubieran tenido, como averías, necesidad de refuerzos... etc (en este sentido son muy interesantes los estudios sistemáticos realizados en los ferrocarriles chinos, dados a conocer por Gao Eryang, Zhu Guilian y Li Sihai).

Agradecimiento

Se agradecen los comentarios realizados por las Empresas Constructoras de los túneles de El Padrún, Obras y Construcciones Industriales S.A. y Ginés Navarro Construcciones S.A.

Igualmente nuestro agradecimiento a la Sociedad de Investigación, Estudios y experimentación S.A. (Sinex) y al Estudios Geológicos S.A. (Egeo), por los comentarios e ideas aportadas.

Para la realización del Ensayo de Fuego fue precisa la colaboración de Equipos del Gabinete de Seguridad e Higiene de Asturias, Protección Civil de Oviedo, Brigada de Salvamento de Hunosa y Equipos de Bomberos de Oviedo, así como Inmatein S.A. (suministradora de la instrumentación). ■

Referencias

1. García-Arango, I., Hacar, F. Demarcación de Carreteras de Asturias. Proyecto de Ventilación, Alumbrado y Seguridad de los Túneles de El Padrún, Asturias. Ene/1992, M.O.P.T. Madrid.
2. Huerta, C., Hacar, F., Laso, E., Abella, A. Control of Convergences in Tunnel Construction. 5th International Conference, Computational Methods and Experimental Measurements. Montreal, Canada. Jul/1991. International Society for Computational Methods in Engineering (ISCME).
3. Lobato Puente, J. L. Gabinete Técnico Provincial de Asturias. Informe sobre evaluación de contaminantes en el Ensayo de Incendio realizado en los túneles de El Padrún, Asturias el día 26/Mar/1992. Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. Instituto nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
4. Rusckstuhl, F. Statistics of Fire Accidents in five of the most important Road Tunnels in Switzerland. Technical Committee on Maintenance and Management, TC 6, pág. 156 y 157. XIX th World Road Congress, Marrakesh, 22 a 28/Sep/1991.
5. Brandversuche im Tunnel Ofenegg. Bundesamt für Straßenbau. Bern. 1985.
6. Cuaz, F. Fire Accidents in Mont-Blanc Tunnel. Technical Committee on Maintenance and Management, TC 6, pág. 127 a 130. XIX th World Road Congress. Marrakesh. 22 a 28/Sep/1991.
7. Whitworth, G. D. N. Seguridad contra incendio en túneles. Congreso AE, Lérida. 15 al 17/Jun/1989.
8. Working Group Director (Maintenance & Repair). Adhesión Failure of Air Jet Mortar in Aged Tunnel. Japan Tunnelling Association. Jun/1988.
9. Lo, K. Y., Yuen, C. M. K. Design of tunnel lining in rock for long term time effects. National Research Council of Cañada, 1981.
10. Sakurai, S. Aproximate time-dependent analysis of tunnel support structure considering progress of tunnel face. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. Vol. 2. 1978.
11. Rivas, J. L. Impermeabilización de túneles. Boletín Sika, Nº 18-10. Jun/1984.
12. Von Rabcewicz, L. El N.A.T.M. y su influencia sobre la presión de la roca y el dimensionamiento. Felsmechanik und Ingenieurgeologie, nº 3/4. 1964.
13. Von Rabcewicz, L. Die neue Osterreichische Tunnelbauweise. Der Bauingenieur. Ago/1965.
14. Von Rabcewicz, L. The New Austrian Tunnelling Method, Part One, Part Two, Part Three, Water Power. Nov/Dic/1964, Ene/1965.
15. Von Rabcewicz, L. Principles of dimensioning the supporting system for the New Austrian Tunneling Method. Water Power. Mar/1973.
16. Von Rabcewicz, L., Golser, J. Application of the N.A.T.M. to the underground works at Tarbela. Water Power. Sep/1974.
17. Von Rabcewicz, L. stability of tunnels under rock load, Part I, II, III. Water Power. Jun/Jul/Agos/1969.
18. Von Rabcewicz, L. Quelques problemes poses lors de l'execution de Cavites Souterraines par la Nouvelle Methode Autrichienne. Les Procédés Modernes de Construction des Tunnels. Journees d'Etudes. Association Francaise des Travaux en Souterrain. Nice. 17 a 18/Oct/ 1974.
19. What is the N.A.T.M.? Tunnels & Tunnelling. 1990.
20. Brown, E. T. Putting the N.A.T.M. into perspective. Tunnels & Tunnelling. 1990.
21. Muller, L. Removing misconceptions on the N.A.T.M. Tunnels & Tunnelling. 1990.
22. Braun, W. N.A.T.M. stands up for itself. Salzburg Colloquy, Tunnels & Tunnelling. Mar/1991.
23. Louis, C. Construction de tunnels par la nouvelle methode autrichienne. Les Procédés Modernes de Construction des Tunnels. Journees d'Etudes. Association Francaise des Travaux en Souterrain. Lyon. 14 y 15/Oct/1971.
24. Sauer, G. When an invention is something new: from practice to theory in tunnelling. Extracts from the Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section a: Mining industry. Volume 97. 1988.
25. Lombardi, G. Tunnel Support. International Symposium on Rock Mechanics. Madrid. 1968.
26. Lombardi, G. Dimensioning of tunnel linings with regard to constructional procedure. Tunnels & Tunnelling. Jul/1973.
27. Lombardi, G. La influencia de las características de la roca en la estabilidad de galerías subterráneas. Técnica Especial N.º 1 de las Sociedad Mexicana de Rocas. Nov/1973.
28. Freibauer, B. Investigación de Carreteras N.º 87, Bases de cálculo para la Ventilación de Túneles de Carretera. Ministerio Federal para Construcción y Técnica de Austria, Viena, 1978.
29. Roberts, A. F. Some aspects of fire behaviour in tunnels. Tunnels & Tunnelling. Ene/1973.
30. Incendios en Túneles. Forschung + Praxis n.º 32, págs. 157 a 164.
31. Technical Committe on Road Tunnels. Report 19.05 XIX th World Road Congress. A.I.P.C.R. Marrakesh. 22 a 28/Sep/1991.
32. d'Albrand, N., Cassini, P. Ventilation des tunnels et influence d'un incendie. Franchissements souterrains pour l'Europe (Underground Crossings for Europe). Comptes-Rendus des Journees d'Etudes Internationales. Lille, Francia. 16 a 18/Oct/1990.
33. International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. 2.º Cambridge 1976; 3.º Sheffield 1979; 4.º York 1982; 5.º Lille 1985; 6.º Durham 1988; 7.º Brighton 1991.
34. Lowndes, J. F. L., Rhodes, N. Smoke movement in transversely ventilated tunnels. XIX th World Road Congress. A.I.P.C.R. Marrakesh. 22 a 28/Sep/1991.
35. Chow, W. K., Leung, W. M. Application of field model to tunnel fire services design. International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. Durham, England. 27-29/Sep/1988.
36. Confederación Europea de Asociaciones de Protección contra Incendios (CFPA Europa). Editadas muchas normas, recomendaciones y estudios sobre prevención, evaluación de riesgos, extinción... de incendios y accidentes con materias peligrosas. CEPREVEN.
37. Gao Eryang, Zhu Guilan, Li Sihai. Rock bolt and shotcrete as a permanent support system in weak rock tunnel. Congreso Internacional «Hacia Nuevos Mundos en Túneles». Acapulco. Mayo de 1992.
38. Timothy Wegner, Mark Peterson. Fractal Creations. The Waite Group. Canada. 1991.
39. Jean-Francois Gouyet. Physique et structures fractales. Masson. Barcelona. 1992.