

JORNADAS SOBRE OBRAS DE INTERÉS GEOTÉCNICO CICLO: EMPRESAS CONSULTORAS

28ª Sesión. Madrid, 8 de Junio de 2004.



**SOCIEDAD ESPAÑOLA DE
MECÁNICA DEL SUELO
E INGENIERÍA GEOTÉCNICA**

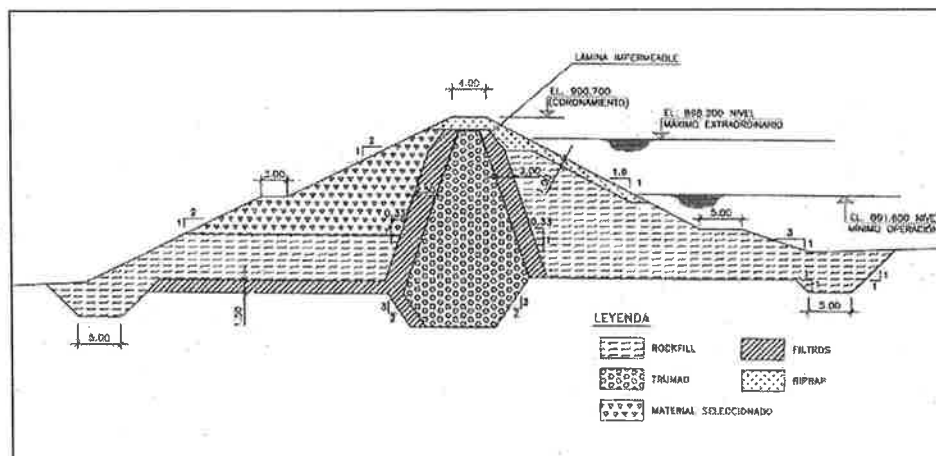
Empleo de cenizas volcánicas en el núcleo de la presa de Las Juntas (Río Duqueco, Chile)

Entorno Geológico (II)

- Suelos de arrastre y deposición: morrénicos, fluviales y coluviales. Extensas gamas granulométricas, clastos métricos, tramos limosos, etc. Son préstamos dispersos y de calidad mediocre.
- Suelos "in situ": jabres de alteración y "trumao" (denominación local de limos arcillosos procedentes de la descomposición de cenizas volcánicas).



Presa de Las Juntas (I)



Presa de Las Juntas (II)

- **Altura máxima 25 metros. Ancho coronación 4 m.**
- **Materiales sueltos con zonación clásica.**
- **Filtros de 2,50 y 2,00 metros (de planta de tratamiento de arido fluvial).**
- **Espaldones de escollera granítica (voladura de desmontes).**
- **Cimientos en arenas laháricas, finamente estratificadas, muy impermeables y densas. Algunos canales gruesos erráticos.**
- **Pantalla de inyecciones L=10-12 metros. Admisiones pequeñas. No se detectan pérdidas.**

Presa de Las Juntas (III)

- **Desvío del río mediante ataguía hacia aliviadero.**



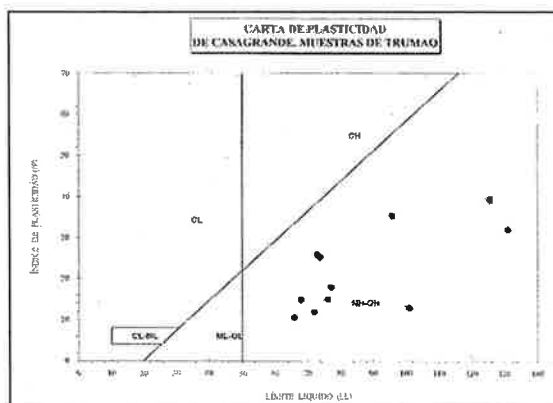
Características del trumao (I)

- Potencias de acumulación de 3-5 metros en morfologías variadas: vaguadas, paleocauces, coronación de mesetas, etc.
- Préstamos irregulares. Se investigaron varios hasta encontrar uno de extensión y homogeneidad suficiente en el Sector Las Arañas II, a unos 6 kilómetros de la presa.
- Granulometría ligada a las cenizas de las que procede: en nuestro caso dominan los finos, pero hay zonas más arenosas.



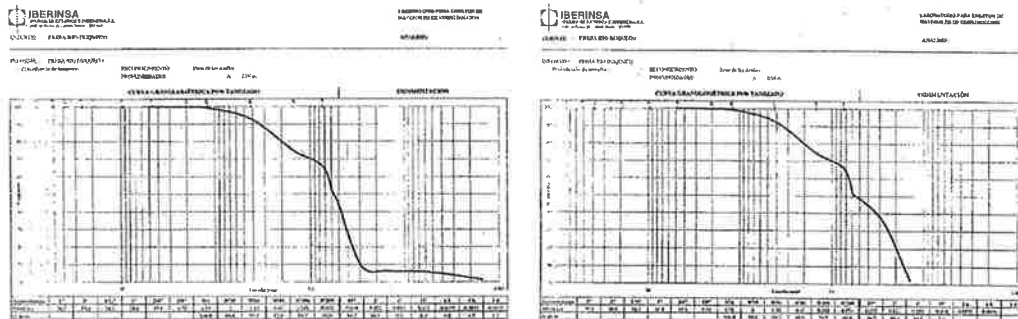
Características del trumao. (II)

- Minerales arcillosos (vermiculita) y porcentajes de limos y arena.
- Porcentajes de finos: 65-85%.
- La actividad de las muestras era menor que la esperable.



Características del trumao (III)

- Ensayos por sedimentación con y sin dispersante. El dispersante aumenta el porcentaje de tamaños de arcilla.
- El remoldeo y la desecación alteran al alza la plasticidad (en laboratorio y en obra). Condicionó el proceso de puesta en núcleo.
- Impermeabilidad asegurada ($k < 10^{-7}$ cm/s).
- Baja dispersividad.



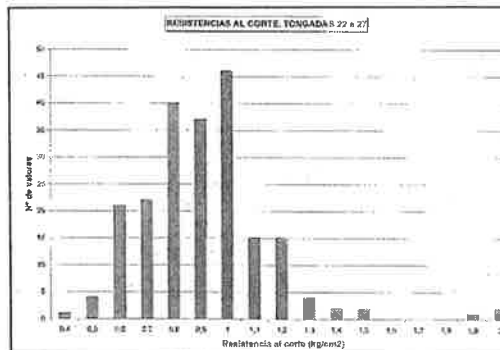
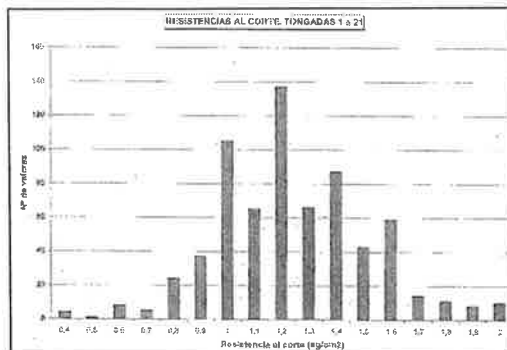
Método de puesta en obra (I)

- Humedades naturales elevadas.
- Método MCV (Moisture Content Value): valora la energía a transmitir a un suelo para que tenga la densidad máxima compatible con la humedad que tiene (Road Research Laboratory, Parsons, 1976). Ejemplo previo de uso en la presa de Barbate.
- Se mide la penetración de un pisón en un molde relleno de suelo, en tandas de golpeo de n y $4n$ golpes. Cuando la muestra asienta menos de 5 mm entre los golpes n y $4n$, se define $MCV = 10 \log n$.
- Se puede relacionar con la "traficabilidad" y c_u .
- En nuestro caso, arcillas CH:

$$\log c_u = 0,74 + 0,111 \text{ MCV (kN/m}^2\text{), con MCV=12}$$
 (buenas condiciones de apisonado)

Método de puesta en obra (II)

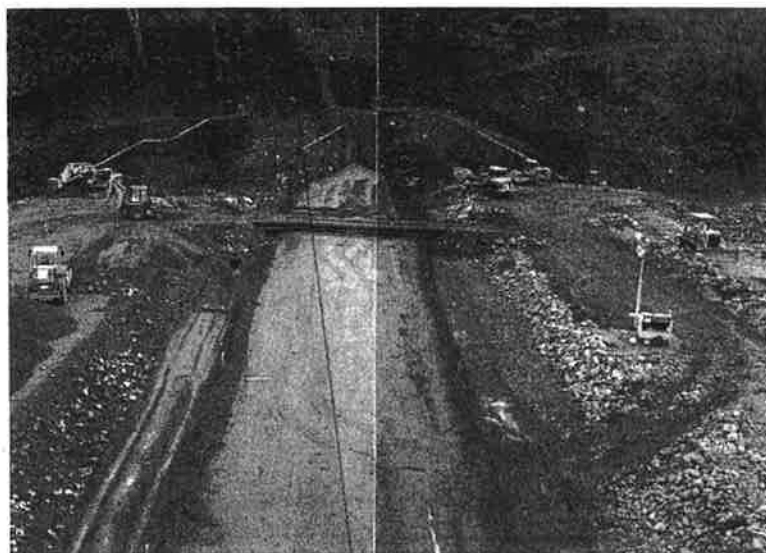
- Puesta en obra muy ligada a humedad natural en préstamo. Condiciones climatológicas difíciles.
- Control en tongada mediante torvane manual.
- Máximo tres pasadas rodillo liso sin vibración (el remoldeo producía peor trabajabilidad y más plasticidad del material).



Método de puesta en obra (III)

- Tongadas a lo sumo de 30 centímetros.
- Se rechazaron varias zonas de préstamo demasiado húmedas o tongadas en momentos de precipitación muy intensa.
- Máximo tres pasadas rodillo liso sin vibración (el remoldeo producía peor trabajabilidad y más plasticidad del material).
- Se efectuaron pruebas de permeabilidad in situ, y toma de muestras Shelby en núcleo para confirmar valores, ensayar dispersividad del material compactado (especialmente en tongadas de c_u más débil), observar unión entre tongadas, etc.
- Auscultación a base de PCV, células de presión y piezómetros abiertos.

Método de puesta en obra (IV)



**EMPLEO DE SUELOS MARGINALES E
INADECUADOS EN EL TRAMO I:**

**N-II – EJE O'DONNELL DE LA M-45 DE
MADRID**

Fernando Díez Rubio, Ingeniero de Caminos

EMPLEO DE SUELOS MARGINALES E INADECUADOS EN EL TRAMO I: N-II – EJE O'DONNELL DE LA M-45 DE MADRID



Fernando Díez Rubio.
Ingeniero de Caminos
Departamento de Geotecnia. IBERINSA

1. INTRODUCCION	2
2. TRABAJOS REALIZADOS	3
2.1. ESTUDIO DE ANTECEDENTES	3
2.2. CAMPAÑA DE CAMPO	4
2.3. ENSAYOS DE LABORATORIO	5
2.4. PROPIEDADES GEOTÉCNICAS	5
3. CLASIFICACION DE LOS MATERIALES	6
3.1. NORMATIVA ESPAÑOLA Y FRANCESA	6
3.2. CRITERIOS DE EXPANSIVIDAD	8
4. PROPUESTA DE UTILIZACION	10
4.1. NORMATIVA VIGENTE (EN EL AÑO 1999)	10
4.2. PROPUESTA FINAL	12
5. EJECUCION Y PROPUESTA DE CONTROL	14
6. CONTROL DEL TERRAPLEN. VALORES OBTENIDOS	16
7. AGRADECIMIENTOS	18
8. BIBLIOGRAFÍA	18

La M-45 es una nueva carretera de la Comunidad de Madrid, que realizada en régimen de concesión, unirá la N-II con la N-IV. Se ha adjudicado en tres tramos, siendo el tramo I el que une la N-II con la prolongación del Eje de O'Donnell, de una longitud total de 14.7 Km., atravesando los términos municipales de Madrid, San Fernando de Henares, Rivas-Vaciamadrid y Coslada.



El régimen de concesión es el denominado “peaje en sombra”, esto es que es la propiedad (Comunidad de Madrid) la que paga al concesionario (Concesiones de Madrid, S.A.) por cada vehículo que pase, sin que este tenga que pararse en ningún momento. La concesionaria está formada por Acciona, Dragados, FCC y Caja Madrid, siendo las empresas constructoras: Necso, Dragados y FCC, siendo Iberinsa la encargada de realizar el estudio de materiales.

G:\Conferencia SEMS (080604)\ConferenciaM-45.doc

momento de analizar el estudio (artículo 330 del PG-3/75) como materiales inadecuados.

El movimiento de tierras de la obra proyectada arroja el siguiente balance:

Desmante: 3.830.000 m³
Terraplén: 4.786.000 m³

Queda patente la gran descompensación de materiales, teniendo en cuenta la calidad de los materiales ya indicada. De esta forma, se pone de manifiesto la necesidad de realizar un estudio de la reutilización de algunos materiales, principalmente los ubicados entre los PK 7+150 y 8+140 y del 9+750 al 10+720 (únicos tramos en desmante del trazado), para que el impacto medioambiental sea el mínimo posible compatible con la calidad técnica de las obras a realizar.

Los trabajos realizados entre Enero y Mayo de 1999, tenían, como principal objetivo, plantear una metodología de utilización basada tanto en normativa extranjera como en las diferentes propuestas de revisión del artículo 330. Con esta perspectiva se podría plantear la reutilización de hasta 1.590.000 m³ reduciendo la aportación de materiales para terraplén procedentes de préstamo a unos 3.200.000 m³.

2. TRABAJOS REALIZADOS

2.1. ESTUDIO DE ANTECEDENTES

Se dispuso, como información preliminar, el Informe Geotécnico del proyecto de licitación (Intecsa, 1998) en donde se destacan una serie de unidades:

- **G-1, Yesos masivos, tableados y nodulares:** son paquetes de yesos alternando con algunos niveles de arcillas, aunque con predominio evidente de los primeros.
- **G-2, Arcillas y margas yesíferas:** estos materiales aparecen sobre los yesos masivos (G-1), en contacto gradual, en la margen derecha del río Jarama. Geotécnicamente son variables, predominando los limos de baja plasticidad (ML), y las arcillas poco plásticas (CL).
- **G-3, Arcillas verdosas con niveles de carbonatos y sílex (peñuelas):** constituyen un grupo geotécnico con características muy variables, predominando, en general, las arcillas y limos muy plásticos (CH y MH), con proporciones mucho menores de arcillas poco plásticas (CL) y limos poco plásticos (ML).
- **G-4, Terrazas altas y glacia:** de este nivel sólo se recoge la existencia de capas de pequeño espesor de arcillas y limos de elevada plasticidad.

2.2. CAMPAÑA DE CAMPO

Se analizaron principalmente los dos desmontes más importantes del trazado: del P.K. 7+150 al P.K. 8+140, con la ejecución de 5 sondeos a rotación entre 18,0 y 21,0 m de profundidad y 15 calicatas y del P.K. 9+700 al P.K. 10+720 se realizaron 5 calicatas, como se indica en el cuadro adjunto:

SONDEOS

Sondeo	P.K.	Profundidad (m)	Testigos parafinados
S-1	7+300	21,00	8
S-2	7+440	18,00	7
S-3	7+680	18,00	5
S-4	7+800	18,00	5
S-5	7+900	18,00	7

CALICATAS

Calicatas	P.K.	Profundidad (m)	Muestras obtenidas
C-1	7+260	1,65	1
C-2	7+340	5,00	2
C-3	7+460	5,00	2
C-4	7+520	4,80	2
C-5	7+600	3,20	1
C-6	7+740	5,10	2
C-7	7+840	5,00	2
C-8	9+770	4,70	3
C-9	9+840	3,40	1
C-10	10+180	3,80	1
C-11	10+300	3,70	1
C-12	10+460	3,90	2
C-13	Ramal	2,00	1
C-14	Ramal	2,40	1
C-15	Ramal	3,60	1
C-16	Ramal	2,60	-
C-17	Ramal	1,60	-

Calicatas	P.K.	Profundidad (m)	Muestras obtenidas
C-18	Ramal	2,60	1
C-19	Ramal	1,60	1
C-20	Ramal	3,00	-

2.3. ENSAYOS DE LABORATORIO

Los ensayos realizados fueron los siguientes:

- 51 ensayos granulométricos por tamizado
- 51 determinación de límites de Atterberg
- 47 determinación de la humedad natural
- 26 determinación de la densidad seca
- 4 ensayos de resistencia a la compresión simple
- 2 ensayos de carga puntual
- 10 ensayos de hinchamiento en edómetro bajo carga de $0,125 \text{ kg/cm}^2$ sobre muestra remoldeada
- 35 ensayos de Proctor Normal (aplicado en este caso por resultar más conveniente en materiales supuestamente expansivos)
- 28 ensayos de CBR
- 7 determinaciones del contenido de sales solubles
- 49 determinaciones del contenido de sulfatos
- 50 determinaciones del contenido de carbonatos
- 15 determinaciones del contenido de materia orgánica

2.4. PROPIEDADES GEOTÉCNICAS

De los ensayos anteriormente indicados, se dedujeron para cada uno grupos destacados los siguientes valores medios (con su correspondiente desviación estándar):

	Yesos masivos	Arcillas yesíferas	Limos de alta plasticidad (Glacis)	Peñuela (arcilla gris)
Contenido finos		60.7±15.3	52.4±16.8	77.5±20.9
Límite Líquido		63.9±17.5	75.4±19.4	83.7±20.9
Límite Plástico		25.3±6.3	43.4±8.4	39.1±11.4
Índice de Plasticidad		38.6±14.5	32.4±14.4	44.6±14.6
Humedad natural	7.57	19.8±5.5	35.1±19.4	42.2±13.0
Densidad seca (t/m ³)	1.89	1.66±0.22		1.24±0.18
Densidad aparente (t/m ³)	2.00	1.93		1.73±0.13
D _{máx} del P.N. (t/m ³)		1.50±0.11	1.19±0.22	1.18±0.17
H _{opt} del P.N. (%)		22.6±4.9	37.9±10.5	38.4±10.4
Índice C.B.R. (95%)		3.1±2.7	5.10±3.10	4.4±3.3
Índice C.B.R. (100%)		4.6±3.8	7.20±4.6	5.6±3.9
Hinchamiento C.B.R. (%)		3.94±2.44	4.10±4.19	5.42±2.91
Hinchamiento edómetro (%)				5.55±3.28
Sales solubles		0.50	0.30	0.43±0.07
Materia orgánica		0.42±0.09	1.15±0.35	0.38±0.15
Sulfatos		2.12±5.04	0.04±0.09	0.01±0.02
USCS		CH	MH	MH-CH

Comparando la humedad natural, la plasticidad y la humedad óptima del ensayo Proctor Normal podemos indicar, en cuanto a valores medios se refiere, con la normal variabilidad de estos materiales, las siguientes características:

- En las arcillas yesíferas, la humedad natural se mantiene por debajo del LP y de la humedad óptima.
- En los limos de alta plasticidad, es muy variable, aunque en general la humedad natural es inferior al LP y algo, poco, inferior a la humedad óptima.
- En las arcillas grises (peñuela) la humedad natural se mantiene por encima del LP y de la humedad óptima del ensayo PN.

3. CLASIFICACION DE LOS MATERIALES

3.1. NORMATIVA ESPAÑOLA Y FRANCESA

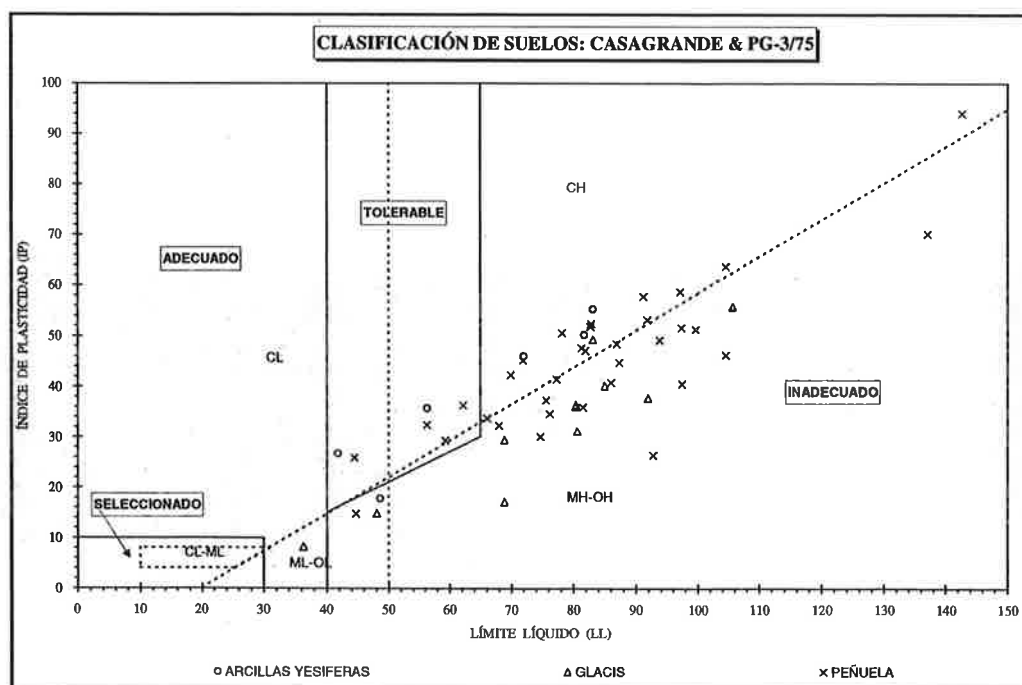
Con la totalidad de los ensayos realizados y con las muestras identificadas para cada una de las unidades destacadas se han analizado y clasificado los diferentes suelos desde diferentes criterios, fundamentalmente basados en la normativa española

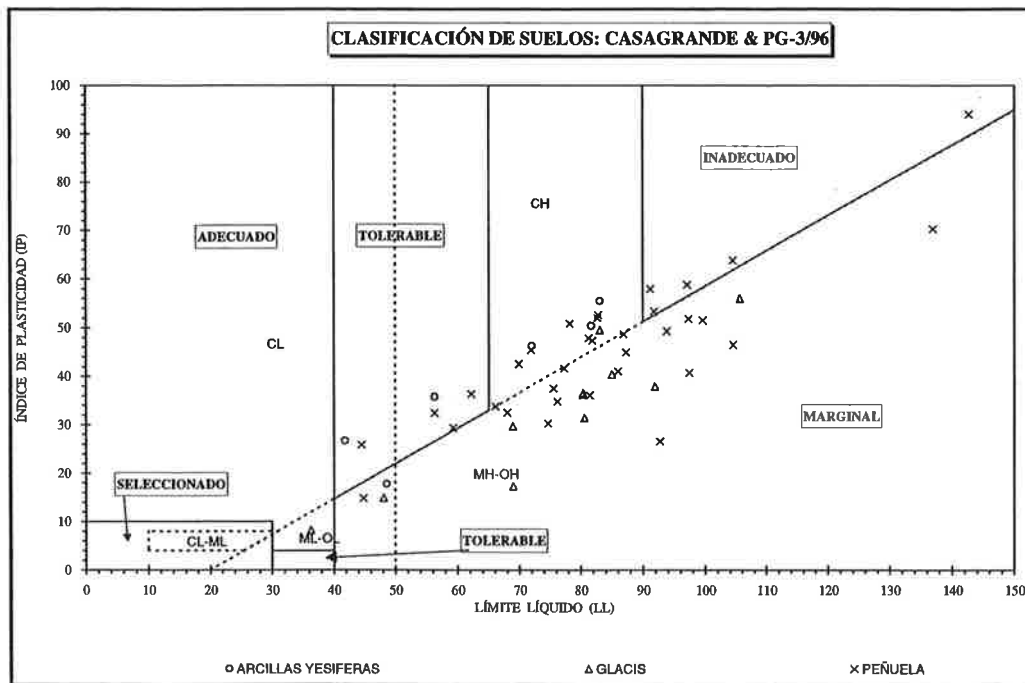
(artículo 330 del PG3 vigente en su momento, así como las propuestas de modificación publicadas en los años 1994 y 1996), y desde la normativa francesa publicada en el año 1992.

Bajo el punto de vista del artículo 330, la clasificación de los materiales sería:

	PG3/75	PG3/94 y 96
Arcillas yesíferas	Tolerable: 33 % Inadecuado: 67 %	Tolerable: 33 % Marginal: 67 % Inadecuado: 0 %
Limos de alta plasticidad (Glacis)	Tolerable: 9 % Inadecuado: 91 %	Tolerable: 9 % Marginal: 91 % Inadecuado: 0 %
Arcilla gris verdosa (Peñuela)	Tolerable: 12 % Inadecuado: 88 %	Tolerable: 12 % Marginal: 74 % Inadecuado: 14 %

A excepción de la peñuela en donde una pequeña parte se sigue clasificando como inadecuado, en el resto de los casos, todo lo que se clasificaba como INADECUADO pasa a clasificarse como MARGINAL. Lo anteriormente indicado se puede sintetizar en los gráficos siguientes:





La normativa francesa, por su parte, se puede resumir, por lo que respecta a granulometría y plasticidad, son mayoritariamente del tipo A (con un contenido en finos superior al 35%) y con la numeración 3 y 4 dependiendo si el índice de plasticidad está entre 25 y 40 o si es superior a 40, respectivamente. De esta forma, las diferentes unidades se clasifican en:

- Arcillas yesíferas: A3: 60%
 A4: 40%
- Glacis: A3 ó menor: 72,7%
 A4: 27,3%
- Peñuela: A3 ó menor: 38,2%
 A4: 61,8%

3.2. CRITERIOS DE EXPANSIVIDAD

Se ha realizado una clasificación de los materiales desde el punto de vista de su expansividad, mediante diversos criterios:

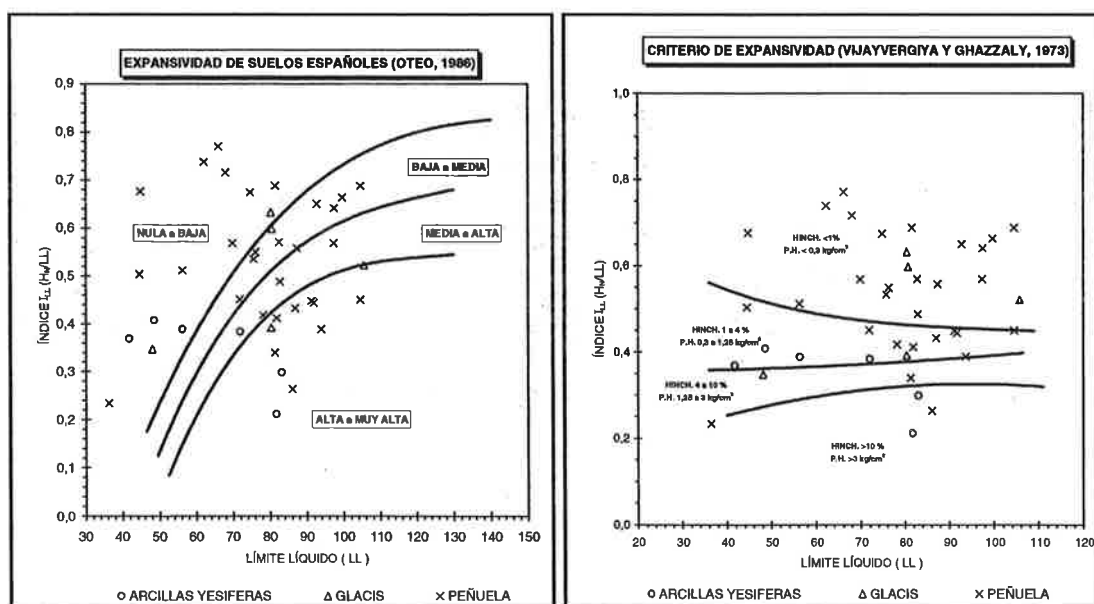
- Criterio de Vijayvergiya y Ghazzaly (1973) que se basa en la relación entre el límite líquido (LL) y en el índice I_{LL} que es el cociente entre la humedad natural y el propio LL.
- Criterio de Oteo (1986), basado en datos de suelos españoles, comparando los mismos parámetros que el criterio anterior, esto es, el LL y el I_{LL} .

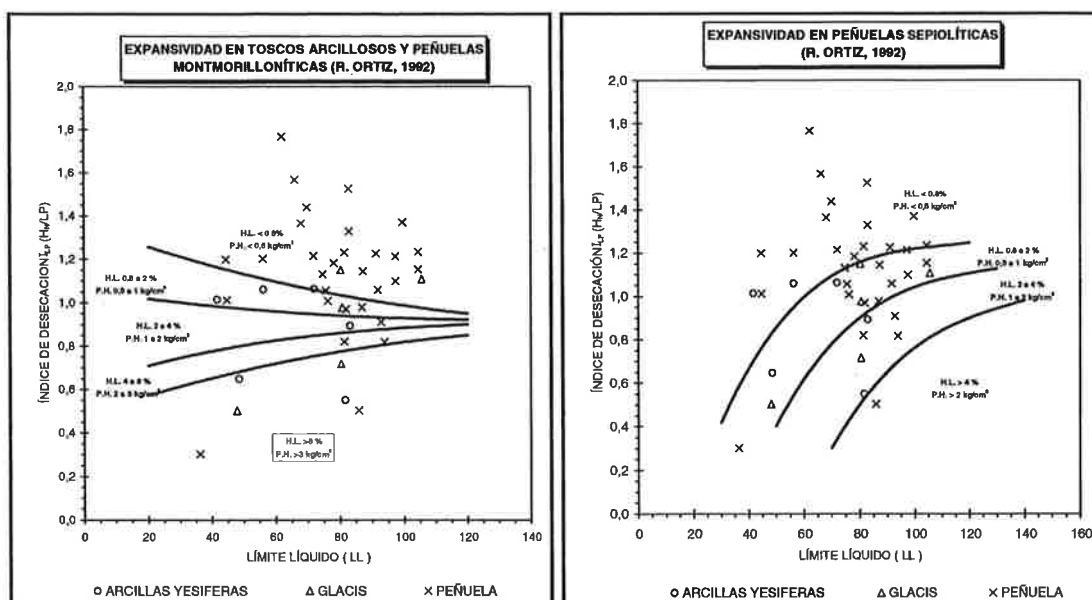
- Criterio de Cuéllar (1978), que se basa en la relación entre el límite plástico (LP) y el índice de desecación (I_{LP}), que es el cociente entre la humedad natural y el límite plástico.
- Criterio de diversos autores, recopilado por R. Ortiz (1975), basado en la relación entre el límite líquido y el índice de plasticidad, sin tener en cuenta la humedad natural.
- Criterios de R. Ortiz (1992), propios para los suelos de Madrid, tanto toscos arcillosos como peñuelas (montmorilloníticas y sepiolíticas), con una comparación muy similar al criterio de Cuéllar.

De acuerdo con dichos criterios, se pueden clasificar los diferentes niveles en:

- Arcillas yesíferas: de acuerdo a los criterios de Vijayvergiya y de Oteo: de media a alta expansividad; por los criterios de Cuéllar y R. Ortiz: de alta a muy alta expansividad y por los criterios de R. Ortiz propios para suelos de Madrid de media a alta.
- Glacis: de acuerdo a los criterios de Vijayvergiya y de Oteo: de media a baja expansividad. Criterio de Cuéllar y R. Ortiz: de alta a muy alta expansividad y por los criterios de R. Ortiz propios para suelos de Madrid de media a alta.
- Arcillas gris verdosa (peñuela): Criterio de Vijayvergiya y de Oteo: se observa mucha dispersividad en los datos. Se puede corresponder con una expansividad media-baja. Criterios de R. Ortiz y Cuéllar: de alta a muy alta y por los criterios de R. Ortiz propios para suelos de Madrid de media a baja.

Se adjuntan algunos de los criterios indicados:





4. PROPUESTA DE UTILIZACION

4.1. NORMATIVA VIGENTE (EN EL AÑO 1999)

a) Criterios de utilización según la normativa francesa

Además de clasificarlo por su granulometría (A, B) y por plasticidad (1, 2, 3) clasifica el material en muy húmedos (th), húmedos (h), medios (m), secos (s) o muy secos (ts) según como sea la relación entre la humedad natural y la humedad óptima del ensayo Proctor normal, exigido en dicha normativa.

Las diferentes unidades indicadas, tienen las siguientes clasificaciones:

- Arcillas yesíferas: A3_m, humedad óptima próxima a la natural y A4
- Glacis: A3_m, A3_s, A3_{ts}, humedad natural inferior a la óptima y A4
- Peñuela: A3_m, A3_h y A3_{th}, humedad natural es superior a la óptima y A4

Los criterios de utilización para condiciones de puesta en obra de similar humedad natural (ni evaporación ni precipitación importante) o para evaporaciones importantes son:

- A3_m:
 - Ni evaporación ni precipitación importante sólo impone dos requerimientos especiales: compactación media y altura de terraplén moderada ($\leq 10,0$ m)
 - Evaporación importante, admite dos posibles soluciones: Solución 1: riego superficial, tongadas pequeñas (20 a 30 cm.), compactación media y alturas moderadas ($\leq 10,0$ m). Solución 2: utilización en su estado de humedad, compactación intensa y altura de terraplén pequeñas ($\leq 5,0$ m)
- A3_s:

- Ni evaporación ni precipitación importante: riego superficial para mantener la humedad, tongadas pequeñas (20 a 30 cm.), compactación intensa y altura de terraplén pequeña ($\leq 5,0$ m)
- Evaporación importante: igual que el anterior añadiendo una extracción frontal del material.
- A_{3ts} y A_{3th} : no son utilizables en dicho estado
- A_{3h} :
 - Ni evaporación ni precipitación importante, admite dos posibles soluciones: Solución 1: tratamiento con cal y compactación media. Solución 2: utilización en su estado de humedad, compactación intensa y altura de terraplén pequeña ($\leq 5,0$ m)
 - Evaporación importante, admite dos posibilidades de utilización: Solución 1: con tratamiento, al igual que en el caso anterior. Solución 2: reducción de la humedad por aeración, extracción por capas, tongadas pequeñas (20 a 30 cm.) y altura de terraplén moderada ($\leq 10,0$ m)

Por lo que respecta a suelos tipo A4 indica que no deben utilizarse o bien que se realice un estudio específico de su comportamiento una vez puesto en obra, esto es, de un terraplén de prueba.

b) Normativa española

De acuerdo al PG3/75 ninguna de las unidades podría ser utilizada por considerarse suelos inadecuados en su mayoría.

Por lo que respecta a la propuesta presentada en el año 1994 se podrán utilizar todos los suelos marginales que presenten un índice CBR superior a 3. En la propuesta de 1996 se indica que los suelos clasificados como marginales o con un índice CBR inferior a 3 pueden ser utilizados siempre que se justifique, lo que nos lleva a que los materiales presentes en el trazado podrían ser utilizados en su totalidad.

El principal problema por lo que se clasifican estos materiales como marginales es, como ya ha sido analizado, por su plasticidad, lo que conlleva a ciertos riesgos de expansividad.

La propuesta de normativa del año 1996 considera que pueden ser utilizados en aquellas zonas donde las variaciones estacionales de la humedad no los afecte, por lo que sólo podrían ser utilizados en el núcleo, asegurando que tanto la coronación como espaldones y cimiento está formado por materiales que carecen de expansividad y que presentan unas características adecuadas de permeabilidad.

Además impone que deberán ser compactados del lado húmedo con respecto a la humedad óptima del ensayo Proctor.

En los suelos muy húmedos o en aquellos suelos que deben compactarse con un cierto grado de humedad, puede ocurrir que al extender y compactar una tongada del suelo, el material quedará saturado y con presiones intersticiales negativas. Al ir

colocando sucesivas capas por encima, va aumentando la presión vertical y en parte la horizontal, con lo que, si el material es impermeable, como ocurre en los arcillosos aquí contemplados, la presión intersticial que originalmente era negativa pasa a ser positiva. Si el contenido en humedad es pequeño, este valor será reducido, pero si es elevado, el valor de dicha presión puede ser muy significativo, por lo que puede producir, en la capa, asientos diferidos de considerable importancia.

Los suelos marginales aquí analizados, con límites líquidos superiores a 30, pueden presentar cambios importantes de volumen si se modifica su humedad una vez puestos en obra. Esta modificación depende de las condiciones climáticas en la zona en donde se ubique la obra, en particular con el número de meses con déficit en la cantidad de agua caída y evaporada, que están recogidas por el índice de Thornthwaite. Estudios de diversos autores determinan que la máxima profundidad a la que pueden presentarse estos fenómenos de modificación de la humedad, para el territorio peninsular, y por tanto cambios significativos de volumen, pueden llegar hasta los 1,5 m en zona de los espaldones. Bajo la coronación estas modificaciones pueden verse reducidas por el efecto favorable de la explanada y el firme.

4.2. PROPUESTA FINAL

De acuerdo a lo anteriormente expuesto se recomendó su utilización, eliminando la sepiolita, de la forma siguiente:

- Compactar del lado húmedo de la curva del ensayo Proctor en un mínimo del 2% por encima, lo que puede exigir: aumentar la humedad en los limos de alta plasticidad (glacis) y en las arcillas yesíferas y utilizarlas en su estado natural en la peñuela.
- Por lo que respecta a la densidad, se recomienda compactar entre el 95 y el 98% de la máxima obtenida en el P.N., compatible con la condición anterior, ya que las curvas obtenidas, son en general planas, y un aumento de la humedad no se debe corresponder con una pérdida de densidad.
- Se deberá compactar con pata de cabra y en tongadas de 30 cm. de espesor máximo. Deben eliminarse los bloques de sílex o carbonatos que puedan exceder, en su tamaño, los 2/3 de dicho valor.



1,5
3

Compactador "pata de cabra"

- Se dispondrán en el núcleo, convenientemente encapsulados, por espaldones, cimientos y coronación de un material inerte (entendiéndose como tal el no expansivo) e impermeable (con un contenido de finos del 15 al 35%). Además, el espesor será de 1,50 m en los espaldones (lo que exige, con un talud 2(H) : 1(V) un espesor mínimo de 3 m), y de 1,00 m en coronación y cimientos. *ancho*
- No se dispondrán en espesores superiores a 3,0 m. Cuando la altura del terraplén resultante sea superior se dispondrá de una capa intermedia de un material de características similares a los espaldones de un metro de espesor. X
- Se evitará su colocación en las proximidades de las estructuras y en las obras de drenaje. X

El análisis de las características geotécnicas de los materiales, así como las características de puesta en obra exigidas, desaconseja el uso de diferentes unidades por las siguientes razones:

- Los yesos masivos, no es recomendable su empleo como pedraplén, que puede acarrear asientos diferidos y de colapso de considerables magnitudes. Pero sí podrían utilizarse como un todo uno yesífero, bien graduado, con un coeficiente de uniformidad superior a 10 y en aquellos casos en que se detecte una proporción de arcilla o marga, in situ, suficiente como para asegurar que los bolos de yeso queden totalmente envueltos. Como tal proporción de finos no se detecta, su utilización queda descartada.
- Las arcillas yesíferas que recubren a las anteriores, no deben usarse por su contenido en sulfatos.
- Los limos de alta plasticidad (glacis) no se aconseja su uso por las bajas densidades presentadas y por la variabilidad de las propiedades detectadas.

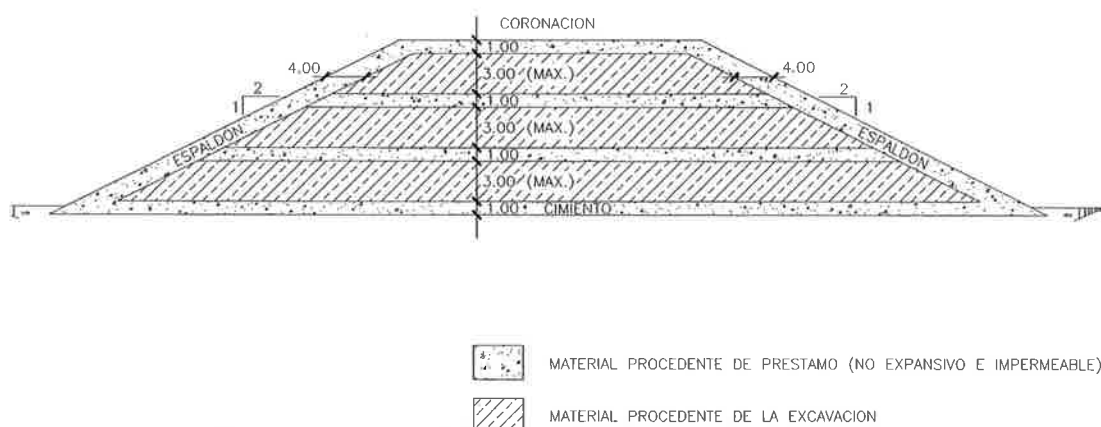
Por lo tanto, la única unidad de posible utilización son las arcillas gris verdosas, Peñuelas, siendo además la unidad que mayor volumen presenta.



Aspecto del material utilizado

5. EJECUCION Y PROPUESTA DE CONTROL

El terraplén se realizó de acuerdo al esquema:



El material de los espaldones (en un ancho mínimo de 4.0 m), del cimiento (en un espesor mínimo de 1 m) y en las capas intermedias dispuestas como máximo cada 3 m (en un espesor mínimo de 1.0 m) deberá cumplir las siguientes características:

- Densidad seca: $\gamma_d \geq 1.65 \text{ t/m}^3$
- Límite líquido: $LL < 40\%$
- Finos: # 200 del 15 al 35 %
- CBR al 95% del $PN > 5$

Las condiciones de compactación: espesor de tongada, número de pasadas de la maquinaria, humectación, deformabilidad, fueron fijadas por las bandas de ensayo realizadas.

En principio se realizaron pruebas con 25, 30 y 35 cm. de espesor y en cada una de ellas con 4, 6 y 8 pasadas, añadiendo agua en pasadas intermedias, todas ellas con rodillo o tractor de "pata de cabra", obteniéndose los mejores resultados con las siguientes características:

- Número óptimo de pasadas 7 dobles (determinado fundamentalmente por el ensayo de la huella)
- Espesor de 30 cm. y añadiendo agua (entre un 2 al 3% aproximadamente) en dos o tres pasadas intercaladas, en lugar de hacerlo en una única pasada previa a la compactación.

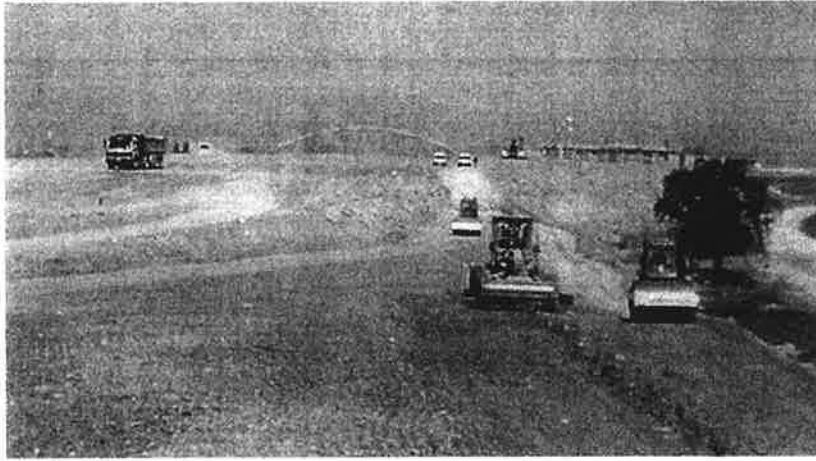
De esta forma, se fijó la compactación de estos materiales de acuerdo a los siguientes criterios:

- Espesor de la tongada: 30 ± 2 cm.
- Compactación por el lado húmedo del PN, teniendo en cuenta que la humedad resultante no exceda el valor: $w \leq (LP - 5) \pm 2 \%$
- Número de pasadas: siete dobles con rodillo o tractor pata de cabra.
- Densidad aparente (obtenida in situ por el método de arena o por nuclear) mayor que 1.70 t/m^3

Al terminar la jornada de trabajo o en coronación se deberá realizar un pasada con rodillo liso de sellado, para que el material compactado no pierda la humedad. Si se requiere disponer tongadas superiores, se ejecutará una pasada con la pata de cabra, para darle trabazón con la capa ya dispuesta.

Además, para que se considere apta cada capa, en cuanto su deformabilidad, deberá cumplirse:

- Ensayo con placa de carga (realizado cada 20.000 m^3): módulo en el primer ciclo de carga mayor de 30 MPa y relación de módulos (rama de recarga/rama de carga) menor de 3,5.
- Ensayo del método de la huella (realizado cada 10.000 m^2): flecha menor o igual de 6 mm.



Compactación simultánea del núcleo y del espaldón



Disposición de una capa de suelo “inerte” en el núcleo

6. CONTROL DEL TERRAPLEN. VALORES OBTENIDOS

El control sobre las propiedades del material utilizado, arcillas gris verdosas (Peñuelas), se realizó tanto en el punto de origen como una vez dispuesto en obra, analizándose tanto su plasticidad como su humedad y sus características del ensayo PN y una vez colocado la densidad y humedad de compactación así como sus propiedades deformacionales.

a) Procedencia del material: de las 150 muestras analizadas, los ensayos realizados dieron los siguientes valores:

	LL	LP	W _n	D _{max}	W _{opt}	W _n -W _{opt}
MEDIA	86	44	39.1	1.22	41.1	-1.1
MAXIMO	130	68	59.8	1.46	79.2	15.7
MÍNIMO	58	26	18.5	0.83	24.6	-19.4
DESV. TIP.	6.3	9.1	6.6	0.12	8.6	7.3

b) Ensayos de puesta en obra: los ensayos de compactación realizados presentaron los valores:

	Dap	Dsec	% Comp.	W	W-W _{opt}	W-(LP-5)
MEDIA	1.75	1.26	105	38.9	-5.3	-0.9
MAXIMO	1.96	1.49	124	54.1	1.4	6.4
MÍNIMO	1.65	1.13	94	25.3	-20.3	-17.3
DESV. TIP.	0.05	0.08	6.1	6.3	3.8	4.4

La densidad aparente, resultante de la compactación, resultó en algunos casos inferior a la exigida. Por lo que respecta al grado de compactación (densidad seca obtenida/densidad seca de referencia) es buena, con valores por encima del 95 %. Este hecho era de esperar, debido a que las curvas del ensayo como ya hicimos notar anteriormente, son en general muy planas y compactando del lado húmedo no implica, como se ha visto, una pérdida de densidad. En general, la humedad de compactación ha estado muy próxima al óptimo del ensayo de referencia (PN), sin que por ello se obtuviera un material de difícil trabajabilidad, con valores de dicha humedad por debajo del límite plástico, como se exigía a estos materiales.

c) Ensayos de deformabilidad: los ensayos con placa de carga (43 determinaciones según NLT 357/86) y los asientos del ensayo de la huella (78 determinaciones) dieron los valores:

	E ₁ (Mpa)	E ₂ (MPa)	K	ASIENTO (mm)
MEDIA	61	150	2.6	3
MAXIMO	129	321	3.5	9
MÍNIMO	29	88	1.4	1
DESV. TIP.	23	45	0.5	1.5

Como se puede observar, de todas las determinaciones del ensayo de placa realizadas en ningún caso se han medido valores no admitidos. En el caso del ensayo de la huella solo en cinco de ellos (lo que supone un 6.40 %) se ha producido el rechazo de la capa realizada, lo que indica el buen comportamiento del material compactado.

De esta forma se ha obtenido un terraplén que podemos considerar de buenas características, como el tiempo lo ha corroborado, con un respeto al medioambiente fundamental.

7. AGRADECIMIENTOS

El trabajo llevado a cabo no hubiera sido posible sin la asesoría geotécnica de Carlos Oteo, como asesor de la Comunidad de Madrid ni la dirección de obra de Eduardo Sahuquillo e Isidoro Carretero, de la Dirección General de Carreteras de la Comunidad de Madrid. Tampoco queremos olvidarnos de la propia concesionaria, representada por su Director Técnico, Vicente de Paz y a los ingenieros de las constructoras, Rafael Gómez del Río, Manuel Jiménez y Soledad Pérez Galdos.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Jiménez Salas y otros: Geotecnia y Cimientos I, II y III
- Realisation des remblais et des couches de forme, LCPC, Septiembre de 1992
- Revisión de Artículos del PG3. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Marzo 1996.
- Terraplenes y pedraplenes. MOPU, Febrero 1989
- E. Dapena: "Pedraplenes y todo uno", Geotecnia de las obras lineales. CEDEX. Madrid 1995.
- L. Sopena: "Terraplenes", Geotecnia de las obras lineales. CEDEX. Madrid 1995.

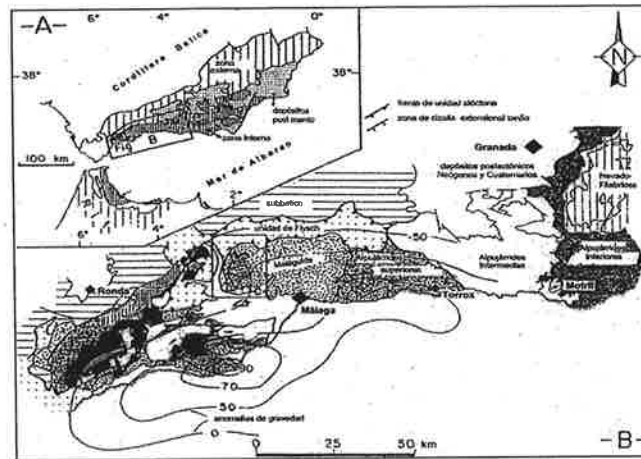
- C. Oteo: "Problemas especiales de relleno: Materiales no convencionales y suelos blandos". Geotecnia de las obras lineales. CEDEX. Madrid 1995.
- V. Escario: "Materiales para la construcción de terraplenes" Simposio sobre terraplenes y pedraplenes, y otros rellenos. Madrid 1986.
- Miguel A. Rodríguez-Miranda: "Diseño, construcción y comportamiento de rellenos tipo "Sándwich" en la autopista Bilbao-Behovia". Simposio sobre terraplenes y pedraplenes y otros rellenos. Madrid 1986.
- J.L. Justo Alpañés: "Auscultación y comportamiento de pedraplenes y presas de materiales sueltos". Simposio sobre terraplenes y pedraplenes y otros rellenos. Madrid 1986.
- A. Soriano: "Puesta en obra y compactación de rellenos en obra de infraestructura viaria". Simposio sobre el agua y el terreno en las infraestructuras viarias. Torremolinos, 1989.
- E. Alonso: "Efectos del agua en el comportamiento de terraplenes y pedraplenes": Simposio sobre el agua y el terreno en las infraestructuras viarias. Torremolinos, 1989.
- E. Dapena: "Ensayos de caracterización geotécnica". III Simposio Nacional de Geotecnia Vial: Construcción y comportamiento de terraplenes. Vigo 1994.
- J.M. Rodríguez Ortiz: "Empleo y comportamiento de materiales yesíferos gruesos en rellenos". III Simposio Nacional de Geotecnia Vial: Construcción y comportamiento de terraplenes. Vigo 1994.
- C. Oteo: "Reglas generales de proyecto". III Simposio Nacional de Geotecnia Vial: Construcción y comportamiento de terraplenes. Vigo 1994.
- A. Soriano: "Características del comportamiento de terraplenes y pedraplenes". III Simposio Nacional de Geotecnia Vial: Construcción y comportamiento de terraplenes. Vigo 1994.
- P. Sola: "Empleo de suelos singulares en los terraplenes de la planta de R.S.U. de Valdemingómez (Madrid). III Simposio Nacional de Geotecnia Vial: Construcción y comportamiento de terraplenes. Vigo 1994.
- Miguel Fe: "Diseño de un terraplén de la autovía Zaragoza-Huesca con materiales miocenos evolutivos". III Simposio Nacional de Geotecnia Vial: Construcción y comportamiento de terraplenes. Vigo 1994.
- J.A. Hinojosa: "Terraplenes con materiales margosos y yesíferos". Curso sobre obras de materiales sueltos no convencionales. CEDEX. Madrid 1987.
- C. de las Heras: "Geotecnia Vial". Cimentar en Madrid. CEDEX. Madrid 1992.

- V. Cuellar: "Análisis crítico de los métodos existentes para el empleo de arcillas expansivas en obras de carreteras y recomendaciones sobre técnicas más idóneas para su uso habitual en España". Laboratorio de Transportes. 1978.
- C. Oteo: "Las arcillas expansivas en España. Distribución y propiedades". Cimentaciones en terrenos metaestables: Expansivos y colapsables. Madrid 1986.
- V. Escario: "Problemas de arcillas expansivas en carreteras". Cimentaciones en terrenos metaestables: Expansivos y colapsables. Madrid 1986.

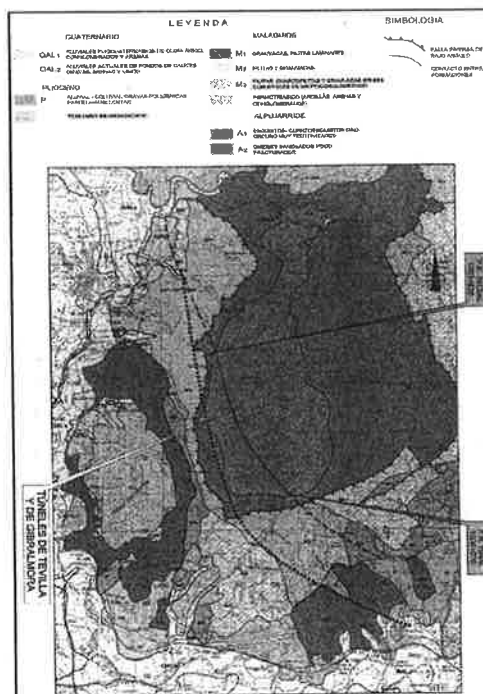
Los Túneles de Gibralmora y Tevilla de la Línea de Alta Velocidad Córdoba-Málaga



Los Tunnels de Tevilla y Gibralmora atraviesan el núcleo del Anticlinorio de Sancti Petri (Unidades Maláguide-Alpujárride, Cordillera Bética, Málaga).

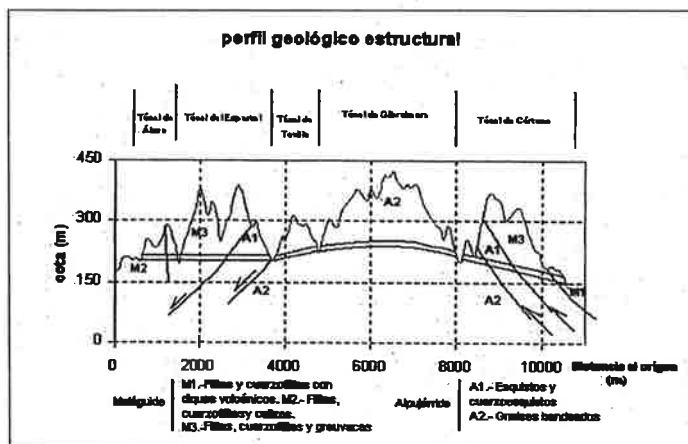


El desmantelamiento de esta estructura geológica en la unidad alóctona metamórfica Maláguide da lugar a una ventana tectónica que pone al descubierto los gneises de la UAM Alpujárride.



En el Proyecto Constructivo, los Túneles de Tevilla y Gibralmora formaban el proyecto central de los tres en que fue dividido el Subtramo X del Anteproyecto de la LAV Córdoba-Málaga. Todos ellos fueron redactados por IBERINSA.

En el Anteproyecto la traza se situaba próxima al flanco occidental de la estructura.



En los flancos del anticlinorio se encuentran los contactos del manto de corrimiento plegado (pliegue de flexión de falla, FBF) Maláguide sobre el Alpujárride y el contacto muy tectonizado entre las dos formaciones alpujárrides.

En el Proyecto de Trazado del Subtramo X se propuso al Ministerio de Fomento un cambio en planta en la traza del Anteproyecto, desplazándola hacia el Este.

La razón fundamental del desplazamiento propuesto era el alejamiento de la traza del flanco occidental del anticlinorio de Santi Petri para un ataque frontal en lugar de oblicuo de la rasante con el contacto Maláguide-Alpujárride en primer lugar y con el contacto Alpujárride esquistoso con Alpujárride gneúvico en segundo lugar.



Ambos contactos, extremadamente tectonizados, hacían prever, con la traza del Anteproyecto, pasos kilométricos de la sección del túnel por formaciones de falla de prácticamente todos los tipos (protocataclastitas, brechas de falla (lámina delgada), protomilonitas, filonitas, cataclastitas etc).

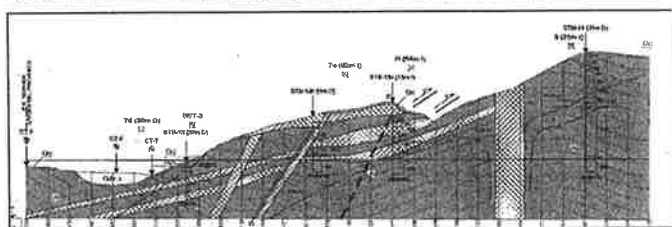


Esta situación era muy desfavorable desde el punto de vista constructivo puesto que hacía imposibles de cumplir los plazos y los presupuestos que se estaban exigiendo.

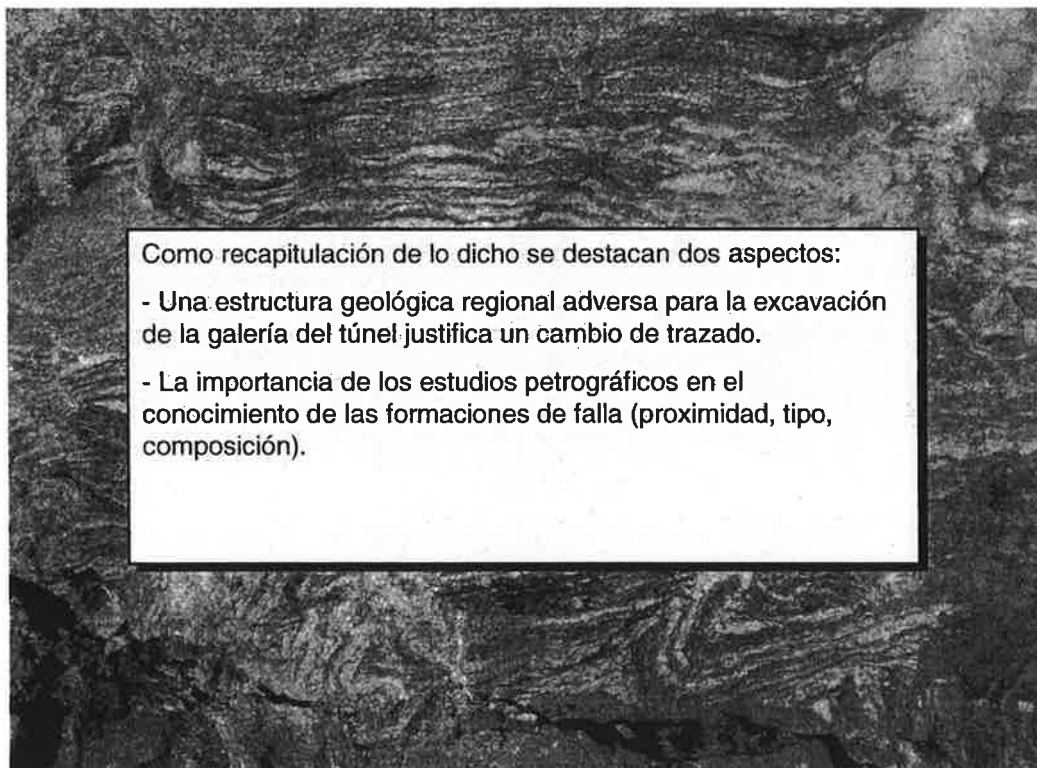
Alejando la traza del flanco del anticlinorio y aproximándola a su núcleo se conseguiría reducir la longitud de los pasos de falla y aumentar los pasos en roca de buena calidad (textura granoblástica o en mosaico en la lámina delgada), al menos en los túneles del segmento central.



No obstante, los pasos de falla de los contactos entre unidades o entre formaciones eran ineludibles, de este modo el emboquille de entrada al Túnel de Tevilla se realiza en roca de falla.



Tal y como estaba previsto en el Proyecto, en los primeros avances fue necesaria la colocación de paraguas de micropilotes (sostenimiento clase V) hasta que progresivamente la formación fue mejorando de calidad y permitió el uso del sostenimiento clase I (bulones y gunita).



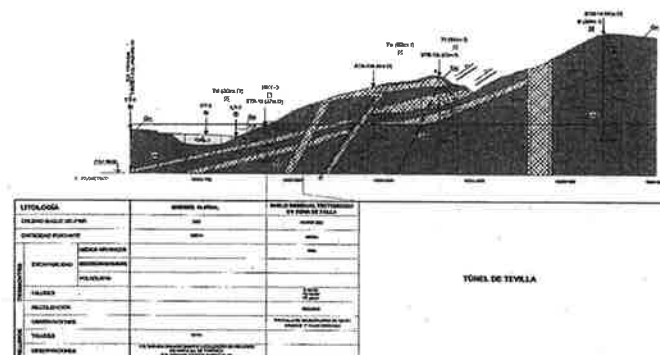
Como recapitulación de lo dicho se destacan dos aspectos:

- Una estructura geológica regional adversa para la excavación de la galería del túnel justifica un cambio de trazado.
 - La importancia de los estudios petrográficos en el conocimiento de las formaciones de falla (proximidad, tipo, composición).
-

Túneles de Tevilla y Gibralmora

	TÚNEL DE TEVILLA	TÚNEL DE GIBRALMORA
LONGITUD EN TÚNEL	890 m	3.155 m
COBERTERA MÁXIMA	100 m	198 m
TERRENO	Gneises y brechas de falla	Gneises y brechas de falla
SECC. LIBRE	110 m ²	85 m ²
SECC. DE EXCAVACIÓN SIN CONTRABÓVEDA	149,861 m ²	121,141 m ²
SECC. DE EXCAVACIÓN CON CONTRABÓVEDA	182,726 m ²	134,463 m ²

	TÚNEL DE TEVILLA	TÚNEL DE GIBRALMORA
LONGITUD EN TÚNEL	890 m	3.155 m
COBERTERA MÁXIMA	100 m	198 m
TERRENO	Gneises y brechas de falla	Gneises y brechas de falla
SECC. LIBRE	110 m ²	85 m ²
SECC. DE EXCAVACIÓN SIN CONTRABÓVEDA	149,861 m ²	121,141 m ²
SECC. DE EXCAVACIÓN CON CONTRABÓVEDA	182,726 m ²	134,463 m ²

[illegible]

- GNEISES (DIQUES)
- BRECHAS DE FALLA
- SUELO TECTÓNICO RESIDUAL EN ZONA DE FALLA

- GNEISES (DIQUES)
- BRECHAS DE FALLA
- SUELO TECTÓNICO RESIDUAL EN ZONA DE FALLA

Túneles de Tevilla y Gibralmora

LITOLOGÍA	TÚNEL DE TEVILLA	TÚNEL DE GIBRALMORA
	RMR	RMR
GNEISES	32 (Roca mala)	39-50 (Roca media)
	44-49 (Roca media)	55-69 (Roca buena-media)
	51-71 (Roca buena-media)	
BRECHA DE FALLA	22-35 (Roca mala)	22-35 (Roca mala)

	TEVILLA	GIBRALMORA
A (RMR > 55)	31%	55%
B (RMR = 45-55)	21%	28%
C (RMR = 35-45)	16%	13%
D (RMR < 35)	24%	4%
E	8%	

Túneles de Tevilla y Gibralmora

MÉTODO DE EXCAVACIÓN

- PERFORACIÓN Y VOLADURA
- AVANCE Y DESTROZA
- MARTILLO ROMPEDOR

CÁLCULOS DE SOSTENIMIENTOS

- CRITERIOS EMPÍRICOS (Clasificaciones geomecánicas)
- CÁLCULOS DE ESTABILIDAD GENERAL
 - Modelo Tridimensional con programa de Elementos Finitos (ANSYS)
- CÁLCULOS DE ESTABILIDAD DE CUÑAS
 - Programa UNWEDGE

Túneles de Tevilla y Gibralmora

SOSTENIMIENTOS

TIPO TERRENO	S O S TENIMIENTO
A (RMR > 55)	I
B (RMR = 45 - 55)	II
C (RMR = 35 - 45)	III
D (RMR < 35)	IV
E (Tevilla)	V
Boquillas	Boquillas

Túnel de Gibralmora: Espesores de H.P. variables según monteras

Túneles de Tevilla y Gibralmora



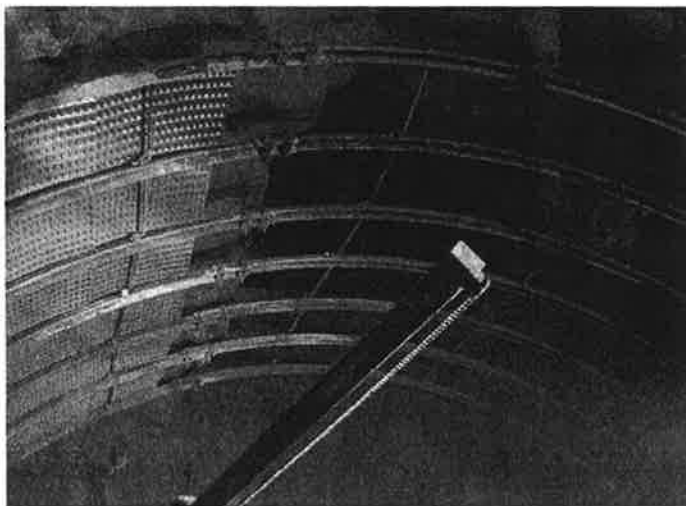
SOSTENIMIENTOS I y II

- Long. de pase de 4 m
- 2 avances sin sostener
- 1 ó 2 pases diarios (avance)
- 2 ó 3 pases diarios (destroza)
- Bulonado (2x2 / 1,5 x 1,5) y H.P. (5 ó 10 cm)

SOSTENIMIENTO III

- Long. de pase de 4 m
- Bulonado (1,5 x 1) y H.P. (10-25 cm)

Túneles de Tevilla y Gibralmora



SOSTENIMIENTO IV y Boquillas

- Martillo/voladura
- Long. de pase de 2,5 m
- Bulonado (1 x 1)
- H.P. (15-35 cm)
- Cerchas TH-29/m (IV) ó HEB-160/m (Boquillas)
- 2 ó 3 cerchas diarias (avance y destroza)
- Paraguas de 15 m en emboquilles
- Campanas y sobreexcavaciones

Túneles de Tevilla y Gibralmora



SOSTENIMIENTO V (Tevilla)

- Martillo/voladura
- Long. de pase de 2,5 m
- H.P. (30 cm)
- Cerchas HEB-160/m
- Contrabóveda
- 2 ó 3 cerchas diarias (avance y destroza)
- Paraguas de 15 m en emboquille

Túneles de Tevilla y Gibralmora

PROBLEMAS DE AGUA

- TEVILLA: Zonas de falla con goteos y macizo sano seco
- GIBRALMORA: Zonas de falla con goteos y grandes caudales en diaclasado del macizo sano (mitad sur del túnel)



Túneles de Tevilla y Gibralmora

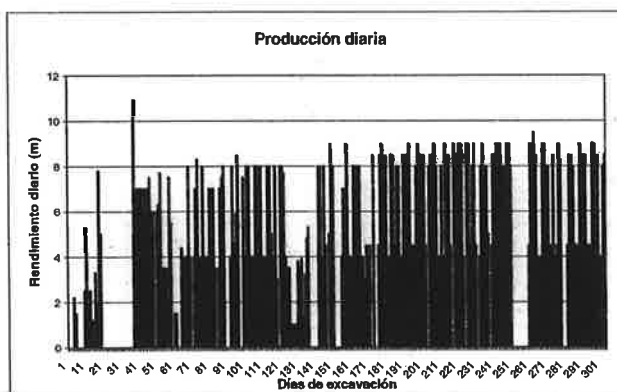
RENDIMIENTOS

AVANCE

- Tevilla Sur: 5 m/día
- Tevilla Norte: 4 m/día
- Gibralmora: 6,5 m/día

DESTROZA

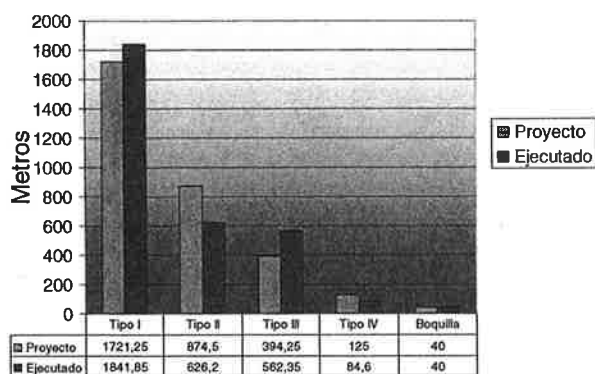
- Tevilla Sur: 8,2 m/día
- Tevilla Norte: 4,3 m/día
- Gibralmora: 14,7 m/día



Túneles de Tevilla y Gibralmora

TÚNEL DE GIBRALMORA

COMPARACIÓN DE SOSTENIMIENTOS



Túneles de Tevilla y Gibralmora

TÚNEL DE TEVILLA

COMPARATIVO DE SOSTENIMIENTOS

