

**S.E.M.R.  
JORNADA TÉCNICA 2012  
INGENIERÍA EN ROCAS BLANDAS**

**LA MOLASA DE LAS OBRAS SUBTERRÁNEAS  
DEL CERN  
Curiosidades de esta roca blanda**

**Fernando Román  
UPM**

## INDICE

<b>1.</b>	<b><u>EL CERN</u></b> .....	<b>2</b>
<b>2.</b>	<b><u>DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS OBRAS</u></b> .....	<b>6</b>
<b>3.</b>	<b>GEOLOGÍA</b> .....	<b>7</b>
3.1.	<b>GENERAL</b> .....	<b>7</b>
3.2.	<b>ELECCION DEL EMPLAZAMIENTO POR RAZONES GEOLÓGICO- GEOTÉCNICAS</b> .....	<b>9</b>
3.3.	<b>ELECCION DEL EMPLAZAMIENTO POR RAZONES DE SISMICIDAD</b> ...	<b>10</b>
3.4.	<b>LA TECTÓNICA EN LA MOLASA</b> .....	<b>10</b>
<b>4.</b>	<b>PROPIEDADES DE LA MOLASA</b> .....	<b>13</b>
4.1.	<b>INFORMACIÓN DE PARTIDA</b> .....	<b>13</b>
4.2.	<b>MINERALOGÍA</b> .....	<b>14</b>
4.3.	<b>CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE CADA FACIES</b> .....	<b>15</b>
4.4.	<b>COMENTARIOS SOBRE ESTAS CARACTERÍSTICAS</b> .....	<b>15</b>
4.5.	<b>COMPORTAMIENTO EN LAS OBRAS</b> .....	<b>17</b>
4.5.1.	Excavabilidad de los túneles de inyección T12 y T18.....	<b>17</b>
4.5.2.	Estabilidad inmediata de la sección excavada en los túneles de inyección T12 y T18.....	<b>21</b>
4.5.3.	Estabilidad inmediata de las secciones excavadas en cámaras y cavernas	<b>22</b>
4.5.4.	Deformaciones registradas directamente .....	<b>23</b>
4.5.5.	Sobre el problema de hinchamiento en otros puntos del LHC.....	<b>27</b>
<b>5.</b>	<b>RESUMEN</b> .....	<b>28</b>
<b>6.</b>	<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>29</b>

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## 1. EL CERN

El CERN, European Organization for Nuclear Research, es el mayor laboratorio mundial de investigación en física de partículas. Fue creado en 1954, emplea actualmente unas 3.300 personas y es utilizado por más de 10.000 científicos de unas 500 universidades de 80 naciones que son más de la mitad de los físicos de partículas del mundo. Está situado en la frontera franco-suiza, al oeste de Génève y al pie de las montañas del Jura.

La misión del CERN es proporcionar a los físicos haces de partículas de alta energía para emplearlas en sus experimentos, cuyos fines van desde el desarrollo de tecnologías del futuro hasta la pura investigación para intentar comprender la evolución del universo desde hace 15.000 millones de años.

Para hacerse una idea de las personas que se ven involucradas en alguno de los experimentos del CERN citemos el experimento denominado ATLAS en el que un conjunto de detectores de partículas se aloja en un equipo que pesa más de 7.000 toneladas. En la construcción de este experimento intervienen 1700 colaboradores de 144 empresas o instituciones procedentes de 33 países.

Para poder trabajar, ver y estudiar las partículas físicas los científicos necesitan los **aceleradores**, complicados equipos que son capaces de mover las partículas hasta altísimas energías antes de hacerlas colisionar con otras. En este proceso de aceleración y colisión los físicos pueden identificar sus componentes o crear nuevas partículas investigando la naturaleza de las relaciones entre ellas. Envolviendo los lugares de colisión, se monta una compleja instrumentación constituida por variados tipos de **detectores**.

Ya que los aceleradores y detectores del CERN requieren la más alta tecnología, el CERN trabaja en estrecha conexión con el mundo industrial beneficiándose ambas partes de esta colaboración. De una manera indirecta podemos decir que una parte importante de la humanidad se siente favorecida por estas colaboraciones. Fruto de las tecnologías desarrolladas en el CERN durante las investigaciones sobre las partículas, se han logrado importantes avances en terapias del cáncer, oftalmología, descubrimientos médicos e industriales, manejo y fabricación de radiaciones, instrumentos de medida, sin olvidar la creación del **www** (World Wide Web) por un científico del CERN.

Para todo esto, el CERN dispone del mayor complejo mundial de aceleradores de partículas inter-conectados entre sí. Hasta hace unos años, los dos de mayores dimensiones eran el SPS (Super Proton Synchroton) de 450 GeV y 6,9 km de circunferencia; y el LEP (Large Electron Positron) de 87 + 87 GeV, y una circunferencia de 26.7 km. El conductor de los haces de partículas se aloja en túneles de 3 a 4 metros de diámetro, a una profundidad variable entre 50 y más de 100 metros, excavados en "molasa" (formación terciaria que abarca desde areniscas arcillosas hasta margas blandas).

En 1999 comenzaron las obras de ampliación de las instalaciones del LEP para el montaje de un nuevo y más potente acelerador LHC (Large Hadron Collider) para lo cual ha necesitado construir nuevas cámaras para alojar los nuevos imanes, nuevos túneles de inyección de partículas y nuevas cavernas de experimentación.



Foto 1.- Vista aérea de las instalaciones del CERN con el aeropuerto de Génève en primer plano, el acelerador LEP con los cuatro puntos de experimentación, el acelerador SPS más pequeño y en el lado izquierdo y la frontera franco-suiza señalada de puntos. (Cortesía CERN)

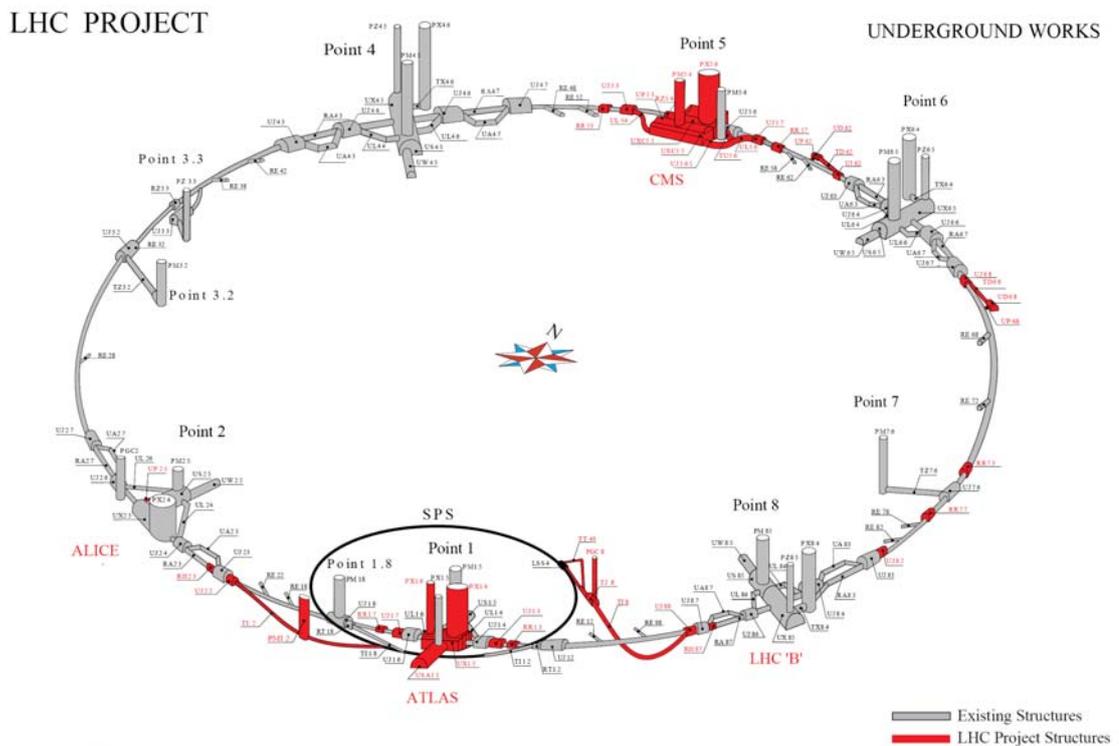


Figura 1. Esquema en perspectiva de las instalaciones subterráneas existentes del LEP y las ampliadas para el LHC. (Cortesía CERN)

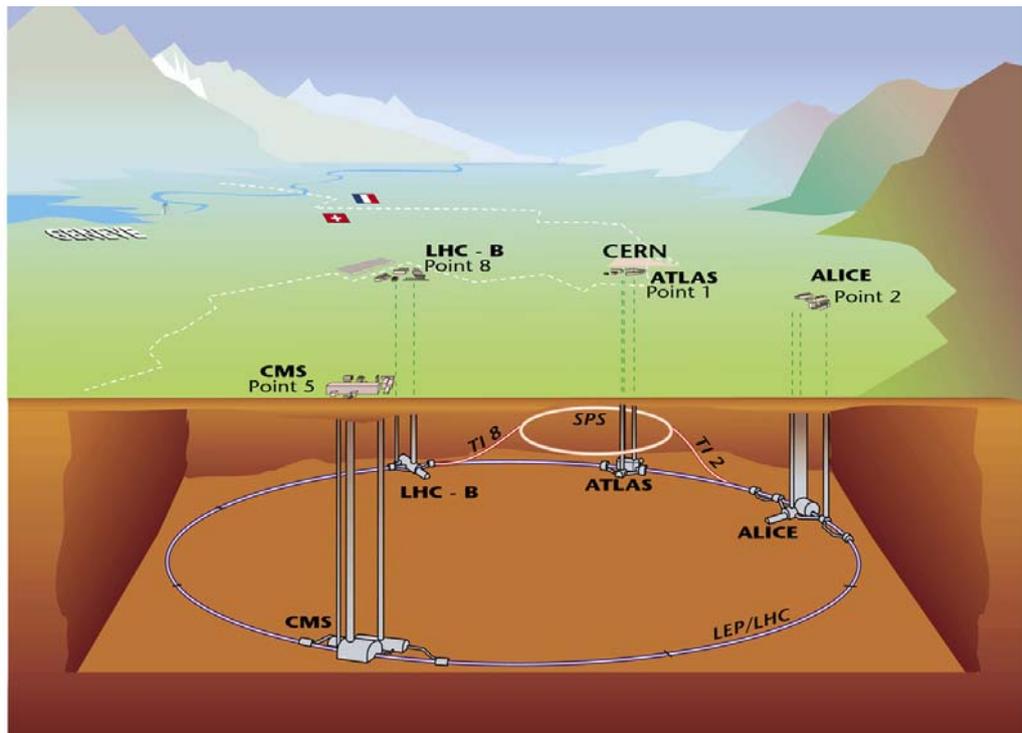


Figura 2. Bloque diagrama esquemático de las instalaciones subterráneas existentes del LEP y las ampliadas para el LHC. (Cortesía CERN)



Foto 2.- Caverna UX65 del Punto 6 del LEP



Foto 3.- Montaje del detector CMS en el Punto 5 (Cortesía CERN)



Foto 4.- Aspecto de uno de los túneles del LEP con una parte de un acelerador en primer plano (Cortesía CERN)



Foto 5.- Aspecto de uno de los túneles con el beam y acelerador montados para el LHC (Cortesía CERN)

**2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS OBRAS**

Las obras de Ingeniería Civil de todo el proyecto LHC se dividieron en tres “packages”. En el cuadro adjunto se incluye un resumen de los mismos, de los proyectistas y de los contratistas.

Packages	Location	Works	Engineering Consultant	Main Works Contractors
1	Point 1	* Caverns, tunnels, shafts, building for ATLAS * U + S Structures for LHC	EDF (F) KNIGHT & PIESOLD (GB)	TEERAG-ASDAG (A) BARESEL (D) LOCHER (CH)
2	Point 5	* Caverns, tunnels, shafts, building for CMS * U + S Structures for LHC	GIBB (UK) GEOCONSULT (A) SGI (CH)	DRAGADOS (E) SELI (I)
3a	Other areas (except TI 8)	* U + S Structures for ALICE (P2) and B-Physics (P8) * Transfer tunnels, TI 2, Beam Dump and other U + S Structures for LHC	BROWN & ROOT (UK) INTECSA (E) HIDROTECNICA PORTUGUESA (P)	TAYLOR-WOODROW (GB) AMEC (GB) SPIE-BATIGNOLLES (F)
3b	TI 8	Transfer tunnel TI 8	Dito	SCRASA (CH) LOSINGER (CH) PRADER (CH)

Tomado de CERN

Cuadro 1.- Conjunto de las obras del proyecto LHC (tomado de CERN)

Las obras subterráneas han consistido fundamentalmente en:

- a) Cuatro nuevos túneles de 2.700 m, 2.300 m, 330 m y 350 m de longitud, y de 3 a 4 metros de diámetro, que permiten la inyección de partículas desde el acelerador SPS al acelerador LHC en ambos sentidos de circulación o bien que forman parte de un conjunto de descarga y colisión de partículas de 750 m de longitud en cada sentido y que parten del denominado Punto 6 y terminan en sendas cámaras de colisión.
- b) Dos conjuntos de dos grandes cavernas en cada uno, con pozos de acceso a éstas y a los túneles anteriores de 50 a 100 m de profundidad. Las cavernas tienen de 15 a 30 m de ancho por 20 a 33 m de alto y de longitudes de hasta 65 m.
- c) Un elevado número de galerías auxiliares, de conexión y ensanches.

### 3. GEOLOGÍA

#### 3.1. GENERAL

El CERN está emplazado en el denominado Basin de Génève ocupado por depósitos terciarios que rellenan un cuasi-sinclinal en cuyos flancos afloran los macizos mesozoicos del Jura y del Salève. El terciario está recubierto por depósitos glaciares, morrenas.

En el esquema de la figura 4 se ha representado un corte general que muestra la disposición de estas formaciones. Los depósitos Las mesozoicas calcáreas no afectan a ninguna de las obras del proyecto LHC mientras que en las restantes, más modernas, se pueden distinguir los materiales siguientes:

#### Cuaternario (Morrena)

Está formado por materiales diversos que van desde depósitos fluvio-glaciares de gravas hasta limos arcillosos con cantos y bolos. Dentro de la morrena existen niveles acuíferos.

#### Terciario (Molasa)

Llamamos Molasa a una formación rocosa, o conjunto de varias facies sedimentarias, compuesta por finos arcillosos alternados con niveles arenosos y areniscosos, en donde la estratificación es someramente visible. En el denominado Basin de Génève existen distintos niveles estratigráficos de molasa, de distintos orígenes y antigüedad. En la zona de Génève sólo está la molasa continental, del Chatiense inferior (tardío Oligoceno) de una antigüedad próxima a unos 25 millones de años. Los materiales jurásicos y cretácicos que forman el muro de la molasa pueden estar – en el área del CERN – a profundidades que van desde algunos centenares de metros a más de mil metros junto a la ciudad de Génève,

La naturaleza y características de las facies en la molasa varían considerablemente desde areniscas tenaces y muy cementadas hasta margas calificables como rocas blandas o suelos preconsolidados. En la figura 3 se muestra una distribución de la proporción en que aparecen los distintos niveles o facies en la molasa sacadas del análisis de los testigos de sondeos. Como las obras subterráneas, fundamentalmente los túneles, tienen la dimensión horizontal mucho mayor que las otras dos puede

ocurrir que estas proporciones no se den en las obras; no obstante, la figura nos ofrece una buena idea de la presencia de cada facies.

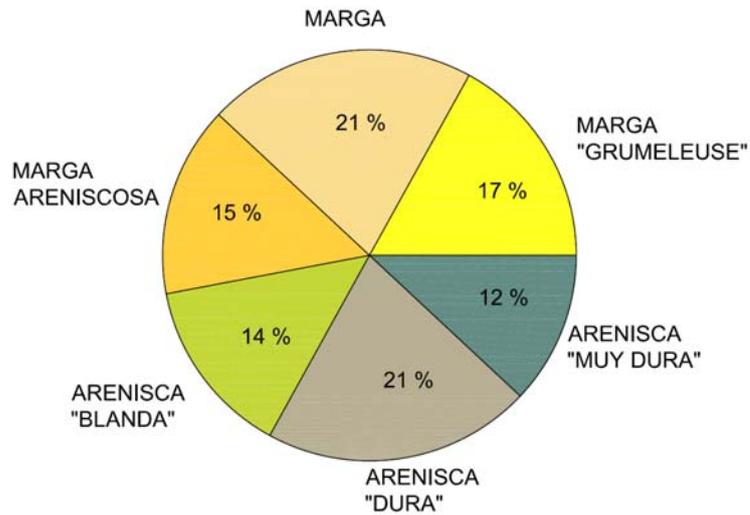


Figura 3.- Proporción de las distintas facies. (Tomado de BRI-JV)

En la construcción del LEP se sabía que la facies más “blanda” denominada “marnes grumeleuses” había sido la causante de serios problemas. En la construcción de las obras del LHC se han confirmado estos problemas.

Salvo la parte superior de los pozos de acceso excavados en la morrena, prácticamente la totalidad de las obras subterráneas se desarrollan por la molasa.

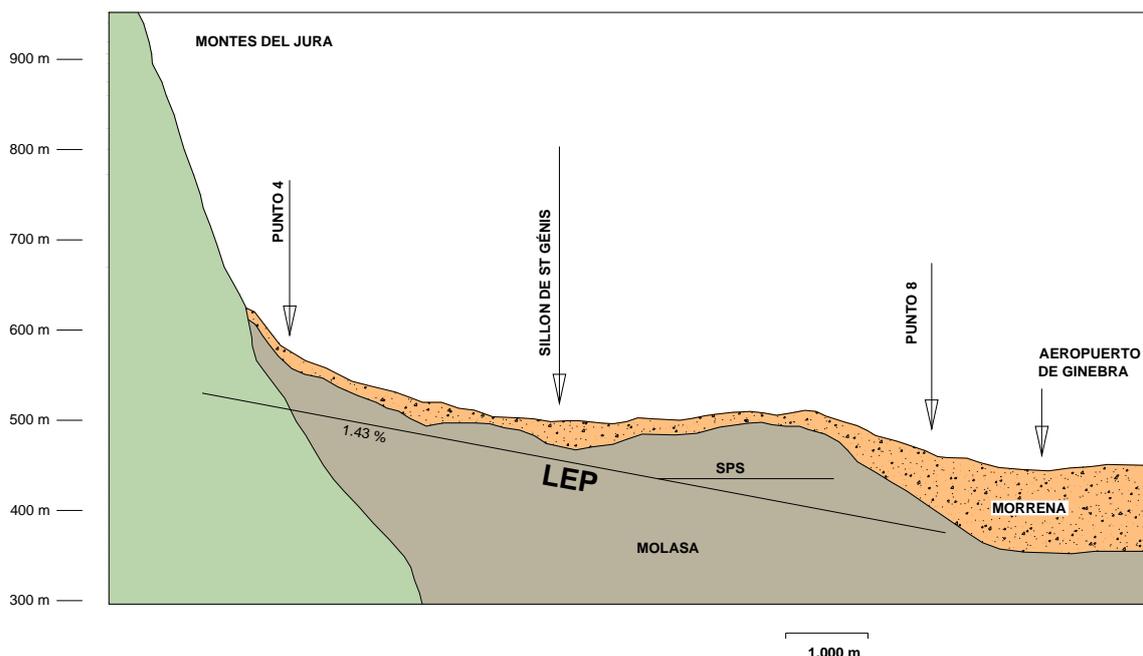


Figura 4.- Corte geológico esquemático del LEP (adaptado de Laporte, 1988)

### 3.2. ELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO POR RAZONES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS

Los primeros tanteos para situar el anillo del LEP lo situaban con un gran sector bajo los montes del Jura. La posición final no ha podido evitar excavar un reducido sector en las calizas jurásicas pero en su mayor parte discurre por la molasa terciaria. En la figura 5 se muestra una geología global de Suiza y en la 6 un de más detalle específica del anillo.

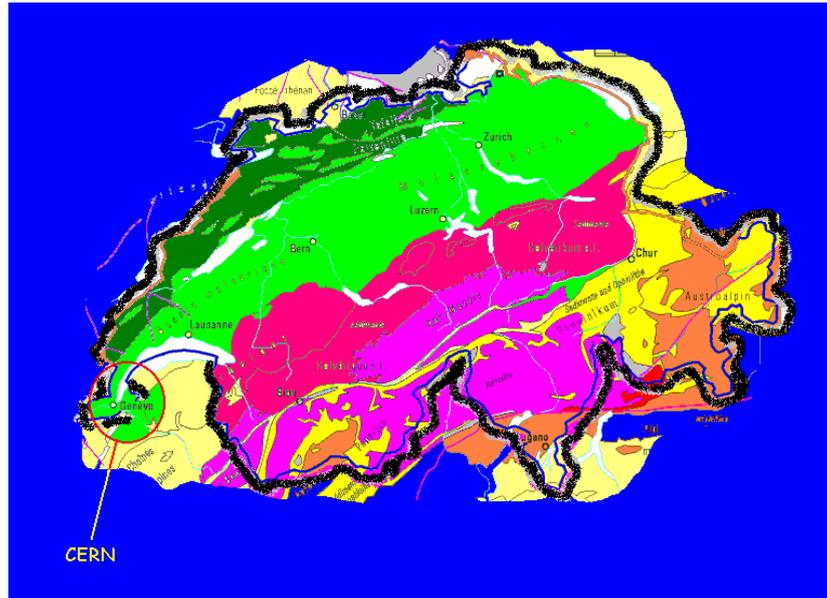


Figura 5.- Geología general de Suiza (tomado de CERN)

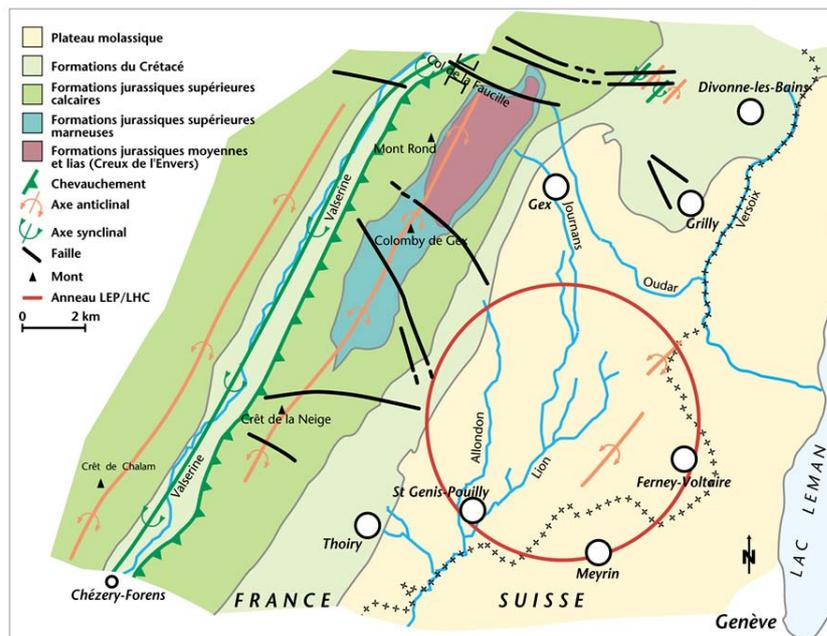


Figura 6.- Geología del anillo (tomado de CERN)

En la figura 7 se muestra una sección esquemática de los terrenos terciarios del Basin de Génève entre las cadenas de los Alpes y del Jura.

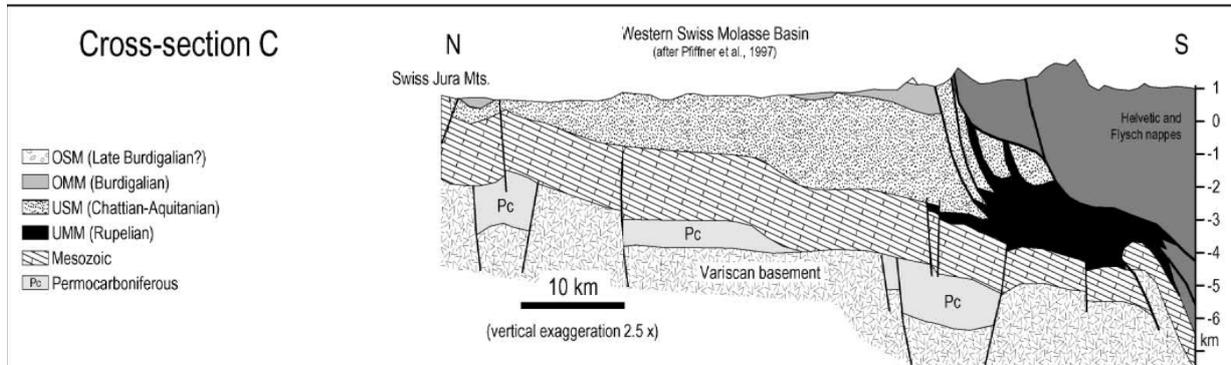


Figura 7.- Sección transversal del Basin de Génève. (Tomado de Kuhlemann, J. y Kempf, O., 2002)

Cuando se planificó el emplazamiento, se concluía que se trataba de una región de topografía suave, con pocas elevaciones, en la que existían terrenos en profundidad fáciles de excavar o perforar y con necesidades de sostenimiento razonablemente aceptables.

### 3.3. ELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO POR RAZONES DE SISMICIDAD

Se muestra en la figura 8 un esquema tectónico con las principales fallas que afectan a la región del CERN. No hay importantes accidentes tectónicos y, como más adelante se comenta, los terrenos molásicos reaccionan con pocas fracturas – aunque las hay – a los esfuerzos tectónicos y en conjunto ofrece un módulo de deformación mucho más bajo que las formaciones rocosas de su entorno. El resultado es que frente a los seísmos originados por los movimientos de las placas, la repercusión en la molasa es muy pequeña. En la figura 9 se muestra la sismicidad de Suiza en donde se ve que Génève queda en una zona de muy baja sismicidad.

### 3.4. LA TECTÓNICA EN LA MOLASA

En una formación terciaria como esta molasa no es común encontrar fenómenos relacionados con la tectónica. Su bajo módulo de deformación hace que se pliegue o se deformen plásticamente más que se fracture. En la orogenia Alpina las cadenas subalpinas surorientales (figura 10) cabalgan sobre los sedimentos mesozoicos en los que las capas triásicas actúan como niveles de despegue. El resultado es el plegamiento y elevación del Jura y la compresión de los incipientes sedimentos terciarios

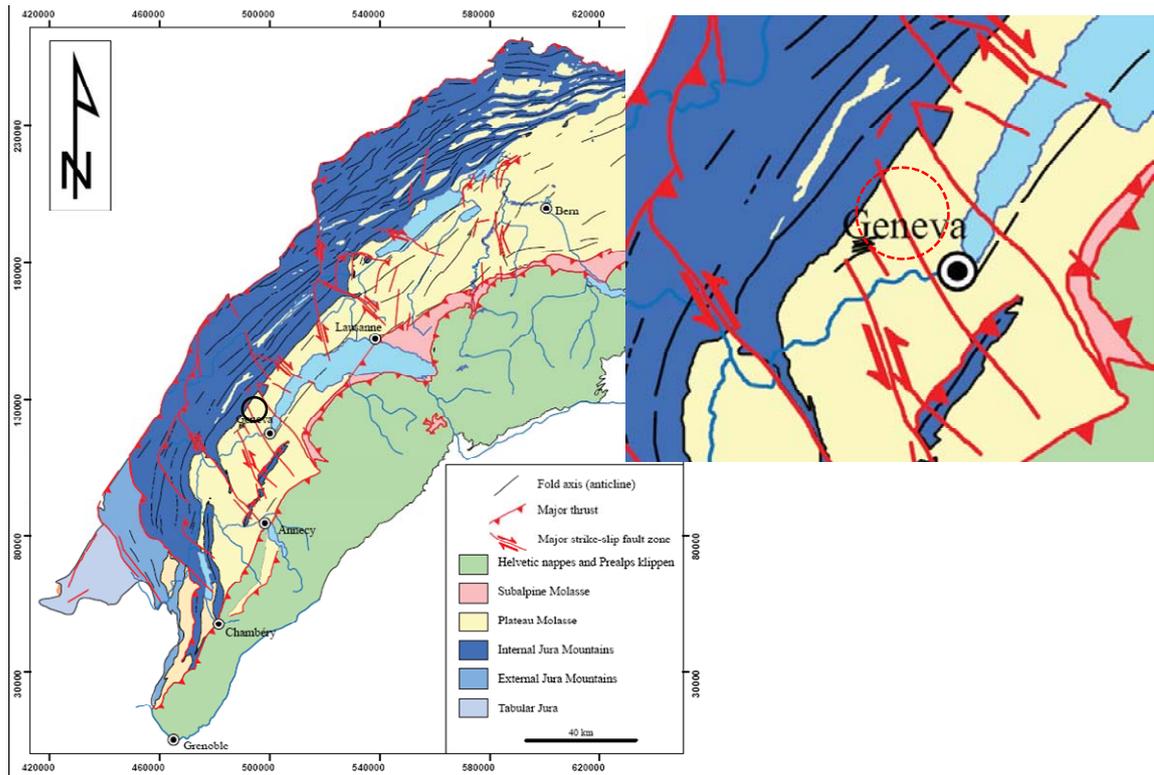


Figura 8.- Tectónica de la zona occidental del Basin de Génève (Tomado de Ibele, T. 2011)

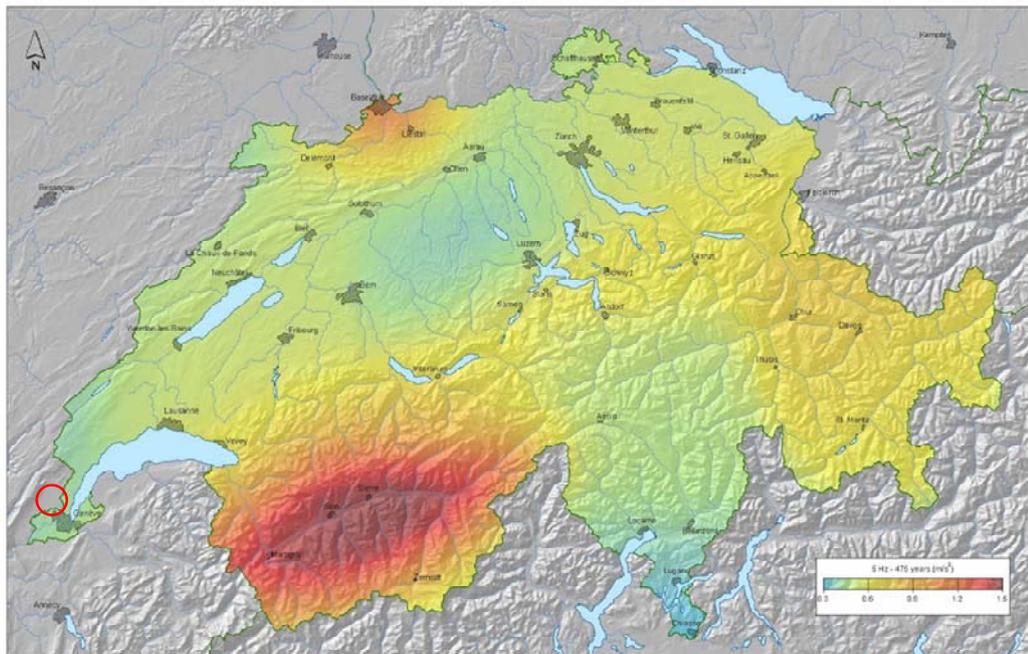


Figura 9.- Sismicidad de Suiza (Tomado de Swiss Seismological Service, 2004)

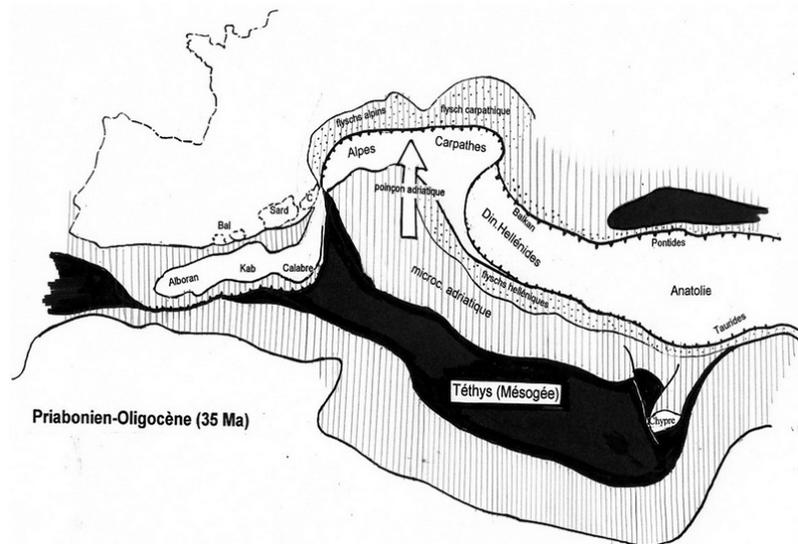


Figura 10.- Empujes de las cadenas alpinas surorientales (Tomado de Jaques Debelmas)

En la figura 11 se muestran una sección transversal al Basin molásico y un esquema de los dos despegues y comportamientos de los niveles existentes. La parte más occidental de la molasa queda menos perturbada por los esfuerzos.

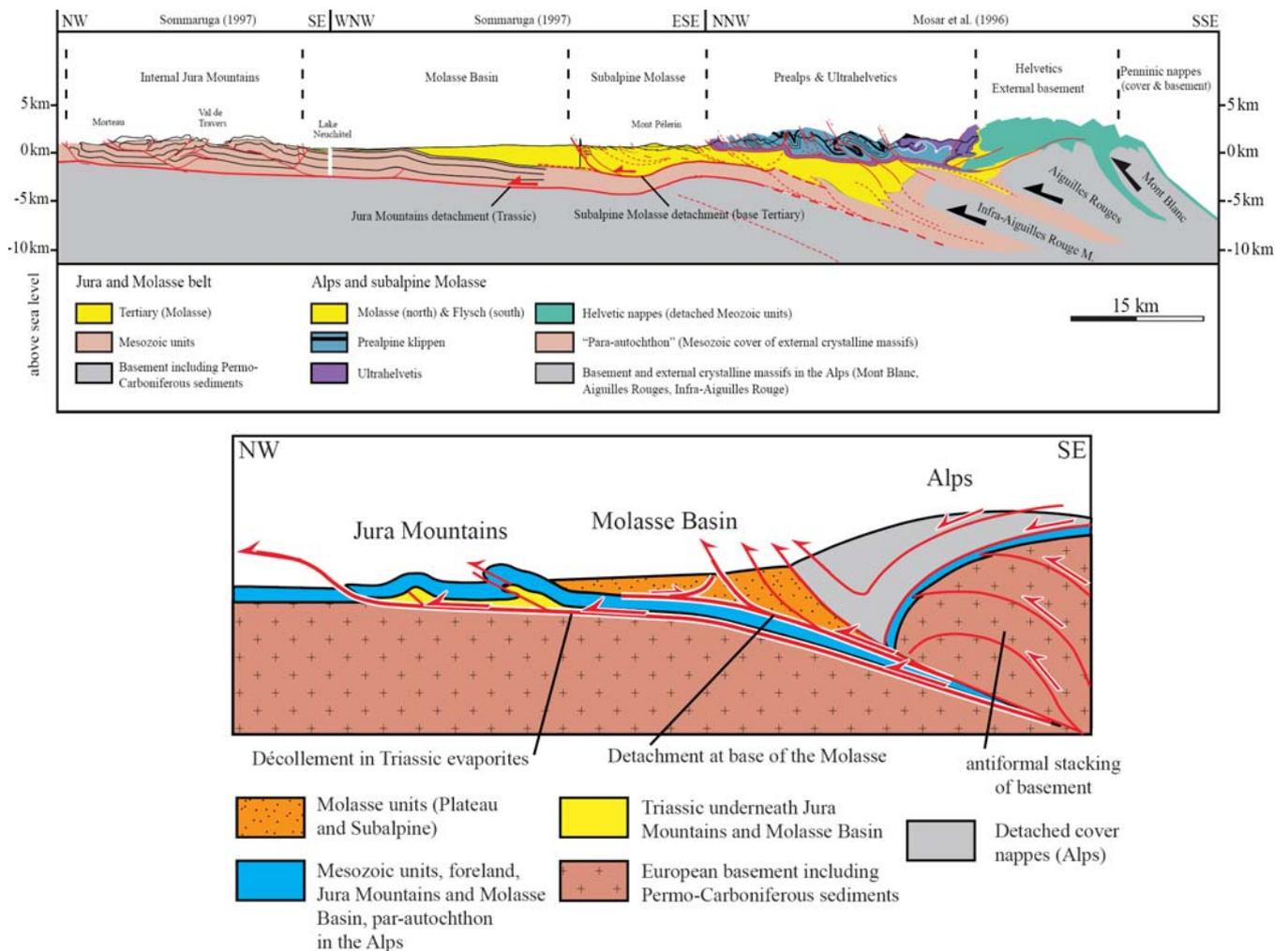


Figura 11.- Despegues y esfuerzos en los niveles del entorno de la molasa debidos al cabalgamiento alpino (Tomado de Ibele, T. (2011))

Sin embargo, aunque parezca que la molasa apenas queda perturbada, hay que mencionar que a escala menor en ella aparecen juntas que, en parte, se pueden achacar a la existencia de niveles más rígidos de arena intercalados.

Ibele, T. y Mosar, J. (2011) han estudiado las bandas de deformación frágil en las arenas de la molasa que llegan a acarrear verdaderas roturas en las margas intercaladas, ocasionando juntas de escasa resistencia al corte.

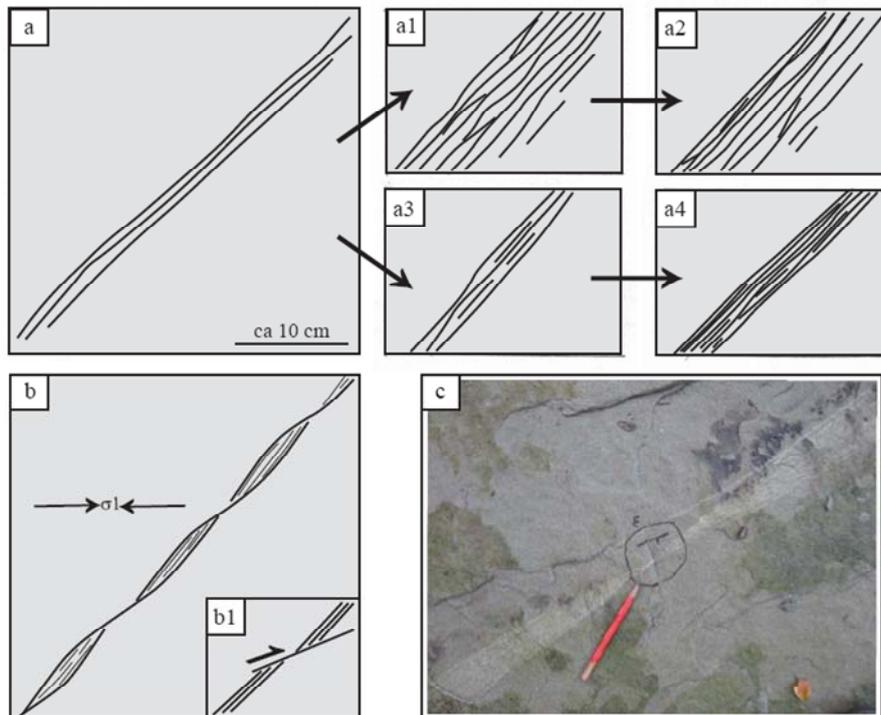


Figura 12.- Evolución de las bandas de deformación frágil en las arenas de la molasa (Tomado de Ibele, T. y Mosar, J., 2011)

#### 4. PROPIEDADES DE LA MOLASA

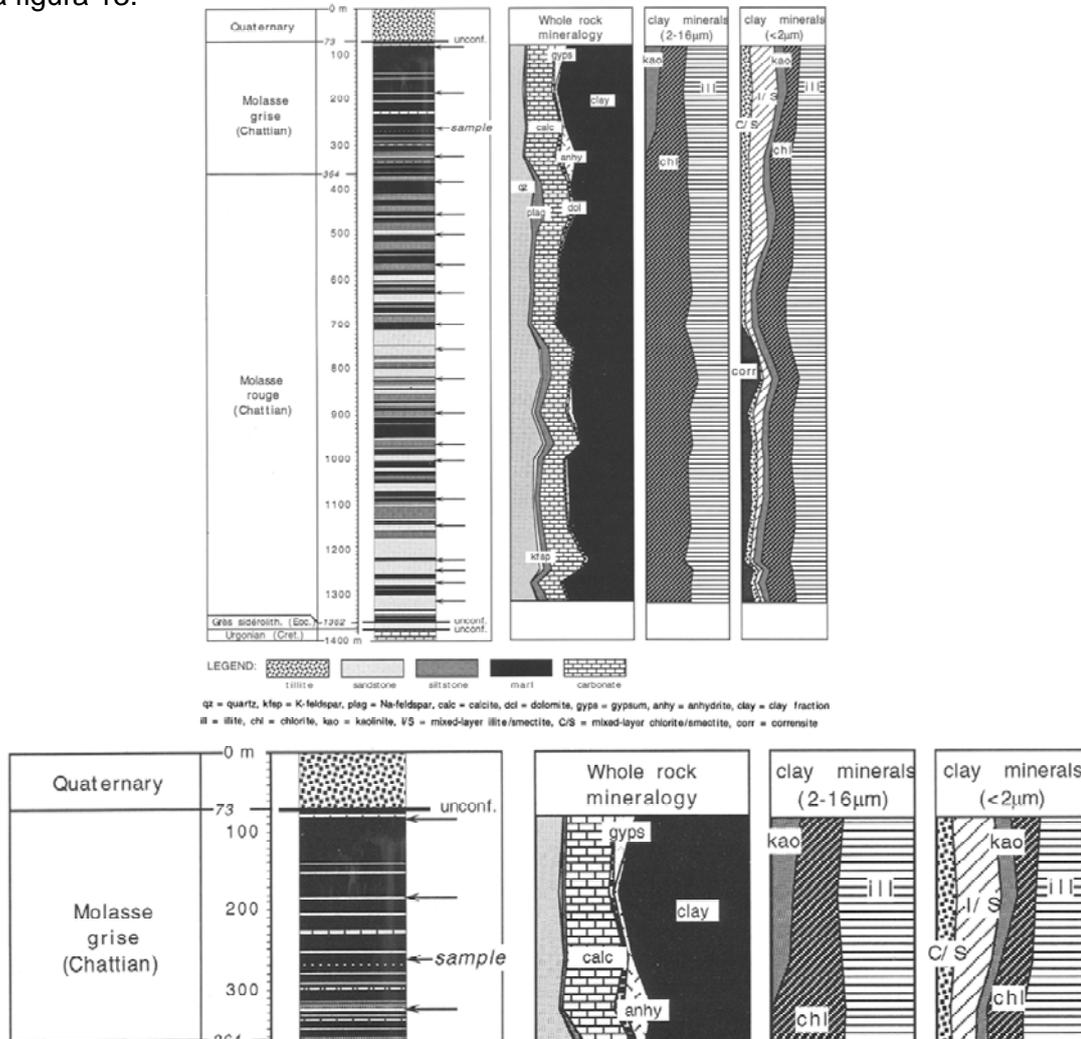
##### 4.1. INFORMACIÓN DE PARTIDA

Las características que se indican a continuación proceden del análisis de los resultados de una campaña de reconocimientos geotécnicos que, en el momento del proyecto, consistía en:

- 107 sondeos mecánicos con testificación continua de hasta 130 m de profundidad y un total de más de 3.000 metros de perforación.
- Ensayos de laboratorio con las muestras extraídas en los sondeos
- Ensayos de permeabilidad in situ

**4.2. MINERALOGÍA**

Schegg, R y Leu, W. (1996) han estudiado la composición mineralógica de los depósitos molásicos a lo largo de toda la profundidad de un pozo realizado en una investigación geotérmica en Thônex, al sureste de Génève. El resultado puede verse en la figura 13.



**Figura 13.- Mineralogía de la molasa en el pozo Thônex y una ampliación de los primeros 300 metros (Tomado de Schegg, R y Leu, W. ,1996)**

La composición mineralógica obtenida en el Package 3 es la del cuadro 2 siguiente:

Facies	COMPOSICIÓN MINERALÓGICA (%)					
	CUARZO	FELDESP.	CALCITA	ARCILLAS + MICAS		
ARENISCAS	40-70	5-10	20-45	5-20		
MARGAS	15-30	0-5	20-30	45-60	ILLITA	20-30
					CLORITA	15-18
					ESMECTITAS	10-18
MARGAS ARENISCOSAS	20-40	5	20-30	20-45	ILLITA	12-18
					CLORITA	10-14
					ESMECTITAS	8-13

**Cuadro 2.- Mineralogía de las facies en el package 3 (Tomado de CERN LHC Project)**

Debemos destacar la proporción de minerales del grupo de las esmectitas que puede llegar hasta el 18% del total de la roca. Es un alto porcentaje que se ha traducido en hinchamientos acusados parcialmente suavizados por la menor potencia de las margas que poseen estos minerales. No obstante hay casos en que estos hinchamientos han causado problemas de dimensionamiento de los sostenimientos y revestimientos.

#### 4.3. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE CADA FACIES

Se pueden distinguir las facies de la figura 3 que, con su porcentaje de presencia, son:

- marga "grumeleuse" 17%
- marga 21%
- marga arenosa 15%
- arenisca "blanda" 14%
- arenisca "dura" 21%
- arenisca "muy dura" 12%

Las características geotécnicas pueden resumirse en el siguiente cuadro

FACIES	RQD	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	W (%)	Rc (MPa)	Rt (MPa)	Ph max (MPa)	Ko	k (m/s)	Qz (%)	Rc/ Rm
Marga "grumeleuse"	100 (65-75)	24,4	8,4	3,05	0,56	1,4	0,5-2	10 <sup>-6</sup>	15-30	2
Marga	75-100 (0)	24,9	5,2	8,3	1,13	1,7	0,5-2	10 <sup>-6</sup>	15-30	3
Marga arenosa	100 (65-70)	25,4	5,2	14,9	1,2	1,26	0,5-2	10 <sup>-6</sup>	20-40	2
Arenisca "blanda"	100 (65-75)	23,7	7,3	12,2	0,9	---	0,5-2	10 <sup>-6</sup>	40-70	2
Arenisca "dura"	100	25,5	4,4	24,6	1,47	---	0,5-2	10 <sup>-6</sup>	40-70	2
Arenisca muy "dura"	100	25,9	3,4	40,9	3,51	---	0,5-2	10 <sup>-6</sup>	40-70	2

Nota: **Rc**, resistencia a compresión simple en muestras de roca; **Rt**, resistencia a tracción; **Ph**, presión de hinchamiento; **Ko** = Th/Tv; **k**, coeficiente de permeabilidad; **Qz**, contenido en cuarzo; **Rc/Rm**, relación entre la resistencia de la roca intacta y del macizo. Entre paréntesis se indican los valores de RQD que aparecen en zonas aisladas.

**Cuadro 3.- Características geotécnicas de la molasa**

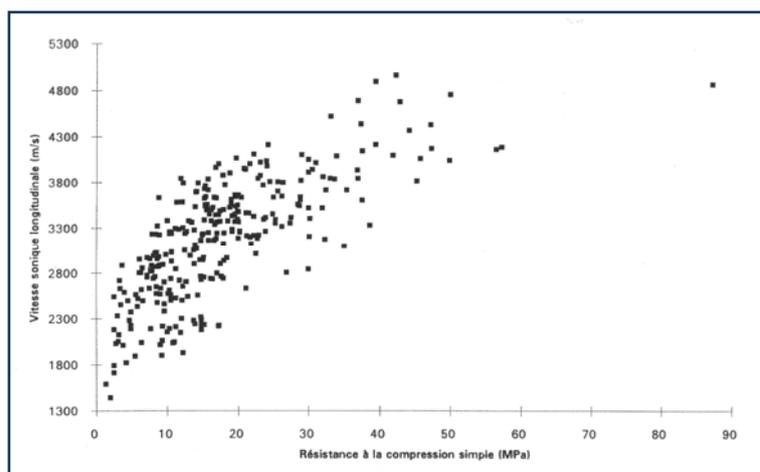
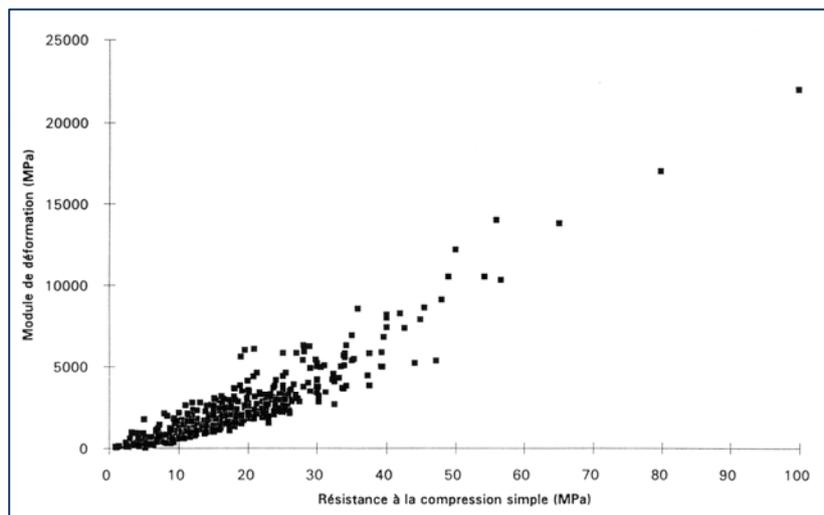
#### 4.4. COMENTARIOS SOBRE ESTAS CARACTERÍSTICAS

El **RQD** es indicativo de testigos continuos en capas subhorizontales, con pocas juntas y separación entre las juntas de estratificación de varios decímetros.

Son rocas de **densidad** media y baja **humedad** en promedio. Esta baja humedad media ha permitido que se excaven con eficacia con rozadoras aunque, en algún área, la humedad ha sido mayor llegando a embotar la picas de las cabezas y mermando los rendimientos.

Las **resistencias** están en un abanico muy grande, tanto más en cuanto que los valores del cuadro son promedios de cada facies; existen algunas muestras margosas con resistencias de menos de 2 MPa y muestras de arenisca de más de 50 MPa. En la figura 14 se representan en función del módulo de deformación. Es decir, nos encontramos con obras subterráneas en la que en pocos metros, tanto en horizontal como en vertical, se ha pasado de excavar casi un suelo (aunque muy consolidado) a una roca de resistencia superior a la de un hormigón de buena calidad.

El **módulo de deformación** (medido como tangente para  $R_c/2$ ) es inferior a 3.000 MPa en la mayor parte de las probetas ensayadas y aceptando una relación del orden de la mitad para el macizo – las juntas son escasas – estamos hablando de módulos de 1.000 a 2.000 MPa para la mayor parte de la “formación molasa”.



**Figuras 14 y 15.- Resistencia a la compresión simple en función del módulo de deformación y de la velocidad sísmica (Tomado de Hotellier, J.F. 1993)**

Las **velocidades sónicas** medidas en las probetas son las que se muestran en la figura 15. Aceptando una cierta minoración (2 o 3) para el macizo, se llega a velocidades que permiten asegurar, como así ha sido, que la mayor parte de la roca es excavable con rozadora.

En cuanto a la **permeabilidad** puede decirse que la molasa sana, en conjunto, puede considerarse como un material impermeable. A título ilustrativo los ensayos Lugeon realizados en el conjunto de los tres “packages” dieron valores de 0.03 a 0.006 UL.

Destacamos los valores del coeficiente  $k_0$  que pueden llegar a valores de 2. Tiene su explicación. La molasa es una formación claramente sobreconsolidada. De acuerdo con la información proporcionada por el CERN para el proyecto, durante el cuaternario antiguo se han erosionado más de 2000 m de depósitos terciarios. Es seguro que en cientos de miles de años hubo una importante recuperación de tensiones en los primeros cien metros donde se desarrolla el LHC pero no deben olvidarse los espesores de morrenas de las distintas glaciaciones y de hielo glaciar – más de 400 metros de hielo - que han recubierto el Basin de Génève hasta hace pocas decenas de miles de años. Si a esto unimos los empujes residuales del cabalgamiento alpino puede llegarse a estas anisotropías.

#### 4.5. COMPORTAMIENTO EN LAS OBRAS

##### 4.5.1. Excavabilidad de los túneles de inyección TI2 y TI8

Son túneles de unos 2.500 m de longitud. Ambos túneles tenían en proyecto la misma sección y el mismo tipo de sostenimiento durante la excavación como se indica en la figura 16. Ambos fueron pensados para ser excavados con una rozadora de 110 KW tipo EICHKOFF ET 110-L con unos avances del orden de 5 a 7 metros diarios. En la figura 16 se muestra la sección de proyecto.

El TI2 fue excavado con una rozadora Alpine AM50, de la forma establecida en el proyecto. La foto 7 muestra la rozadora y la sección excavada.

El uso de la rozadora en la excavación de la parte inferior del pozo de acceso (foto 6) fue una buena prueba de la excavabilidad de la molasa.



Foto 6.- Excavación con cabeza rozadora de la marga en el tercio inferior del pozo de acceso PMI2 (cortesía de Intecsa-Inarsa)

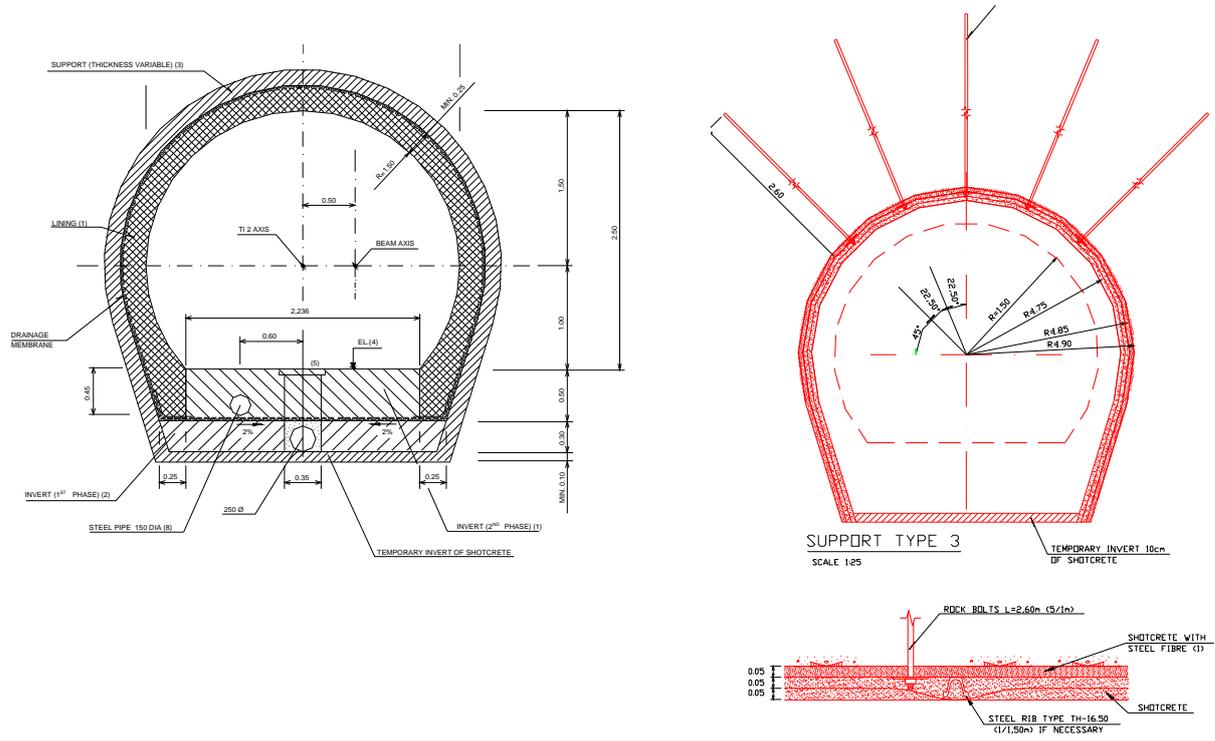


Figura 16.- Sección de proyecto y la del sostenimiento más denso del túnel T12 aplicable también al túnel T18 (BRI-JV)

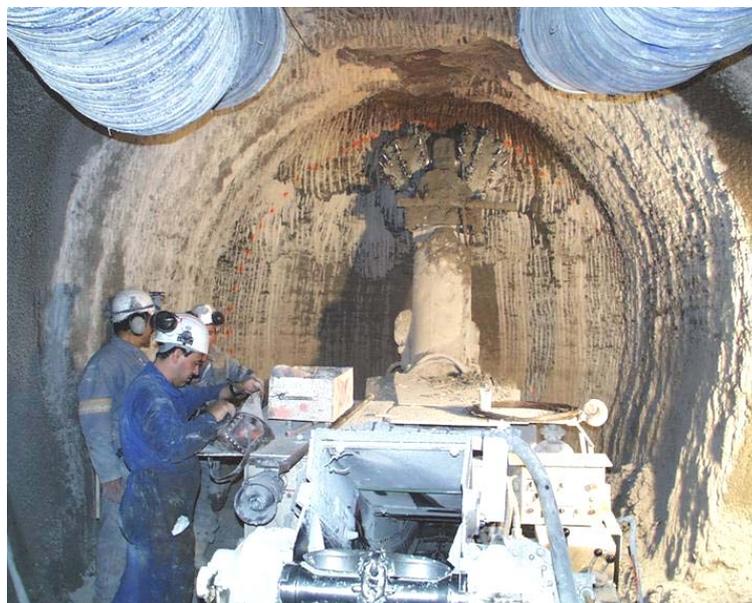


Foto 7.- Sección excavada con rozadora en el T12 (cortesía de Intecsa-Inarsa)

A diferencia con el T12, el contratista del túnel T18 ofertó un precio cerrado comprometiéndose a su realización con una TBM de discos.

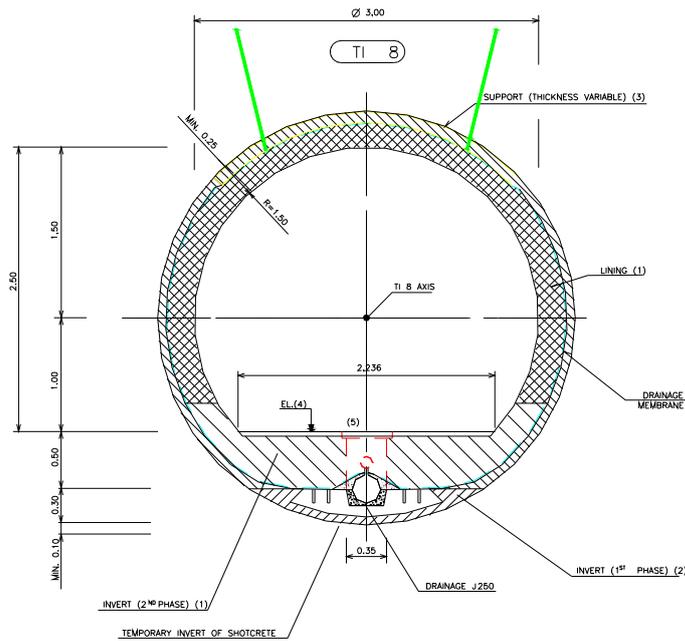


Figura 17.- Sección propuesta por el contratista del TI8 (BRI-JV)

Previa a la adjudicación se le plantearon serias dudas que una tuneladora de discos cortadores y grippers de empuje podría ser inadecuada para excavar en alguna facies margosa de la molasa y para que los hastiales resistieran los empujes laterales de los codales.

Efectivamente los presagios se cumplieron pues nada más empezar los primeros 200 metros se produjeron importantes desplomes de bloques en la clave que hicieron que la tuneladora quedara atrapada por espacio de casi cuatro semanas. Posteriormente tuvo serios problemas en el avance en otros tramos blandos y los hastiales denotaron su deformabilidad por los empujes. En estas zonas, los sostenimientos tuvieron que ser mucho más densos que los previstos. Ver fotos 8 y 9.

En la figura 18 puede verse la variación existente entre las condiciones del terreno – molasa – previstas como promedio en el proyecto, las específicas del túnel TI8 y las encontradas en la realidad. A la vista de este resumen puede deducirse que la molasa encontrada fue mejor de lo previsto.

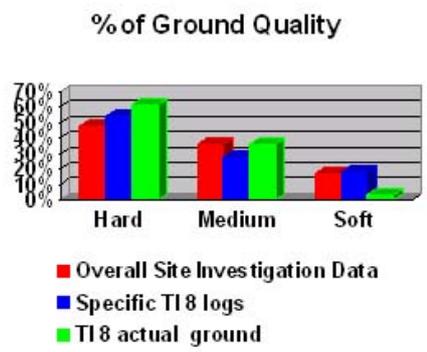
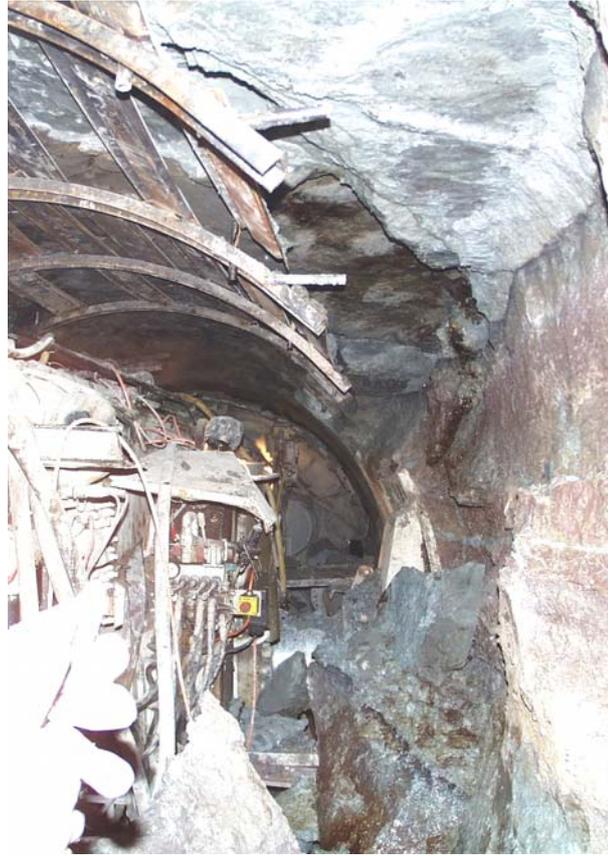


Figura 18.-Comparación entre terreno previsto en proyecto y el encontrado (BRI-JV)



**Foto 8.- Desprendimientos incluso con sostenimientos densos colocados (cortesía de Intecsa-Inarsa).**



**Foto 9.- Codales dañando los hastiales del T18 (cortesía de Intecsa-Inarsa).**

En el gráfico de la figura 19 se han dibujado los progresos habidos en la excavación – no en el revestimiento – de ambos túneles. En el túnel con rozadora se obtuvo un rendimiento similar al previsto en el proyecto (5-6 m/día) con máximas de 249 metros en un mes. En el túnel excavado con la TBM, pese a los problemas habidos, se consiguió un ritmo promedio de 9.5 metros diarios con máximos de 359 metros mensuales. Estas últimas cifras están claramente por debajo de los rendimientos de la TBM en parte por el extremo cuidado con que se tenía que avanzar en los tramos más margosos. Es cierto que el contratista jugaba con 6-7 meses de colchón sobre el plazo previsto en proyecto y, efectivamente, el plazo al final fue ampliamente cumplido.

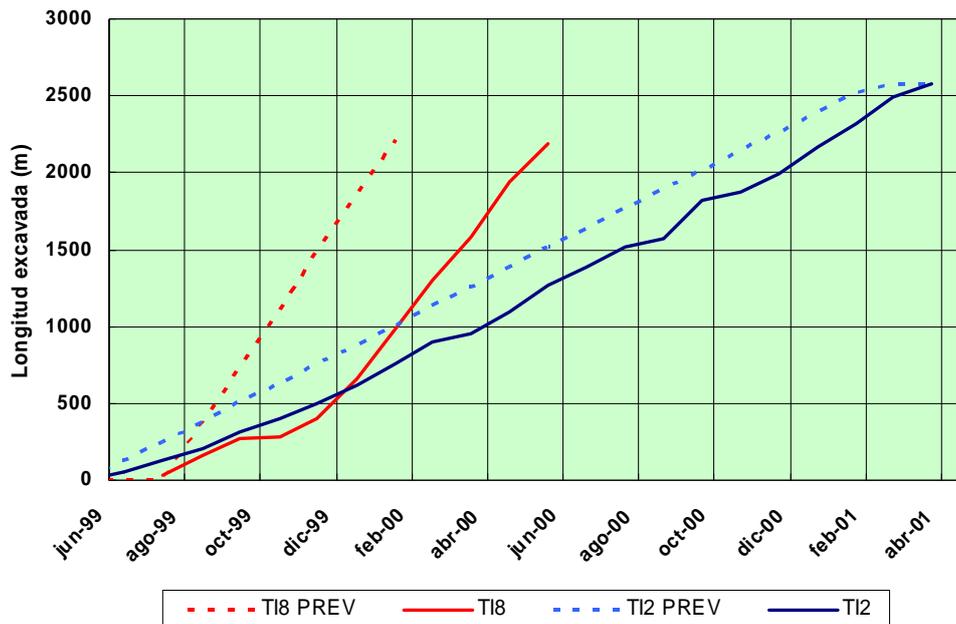


Figura 19.- Rendimientos comparativos previstos y reales de excavación con rozadora (T12) y con TBM (T18). (BRI-JV)

4.5.2. Estabilidad inmediata de la sección excavada en los túneles de inyección T12 y T18

En el túnel excavado con rozadora y con avances de 2-3 metros no ha habido problemas de estabilidad pues el sostenimiento con gunita y bulones colocado inmediatamente ha paliado cualquier intento de rotura.

Creemos importante destacar el problema que se manifestó en bastantes puntos en margas no muy dúctiles. Es la aparición de juntas de discontinuidad en clave con escasa resistencia al corte que provocaban la formación de bloques inestables sin tiempo de reforzarlo con los sostenimientos previstos (foto 10). Una explicación a esto puede encontrarse en lo comentado en el apartado 3.4. cuando se habla de la tectónica de la molasa.

Como ya se ha dicho, en el túnel T18, hubo desprendimientos en clave y hastiales, en parte causados por el excesivo vano que se producía antes de poder bulonar y gunitar.



Foto 10.- Bloque desprendido en clave del T12 (cortesía de Intecsa-Inarsa).

#### 4.5.3. Estabilidad inmediata de las secciones excavadas en cámaras y cavernas

Se tiene el dato de las cámaras del Contrato 3 en las que la excavación por fases y la colocación del sostenimiento previsto ha permitido contar con la estabilidad necesaria (ver foto 11). Se tenía cierto temor en las ampliaciones de cámaras y en las uniones entre obra antigua y la nueva a que el terreno se hubiera deformado en exceso incluso plastificado en la construcción del LEP. No ha sido así.



Foto 11.- Sostenimiento del ensanche para formar la cámara UX65 de acceso a los túneles TD62 y TD68 (cortesía de Intecsa-Inarsa).

Se sabe que en las grandes cavernas de los Puntos 1 y 5 no han existido problemas importantes (Foto 12).



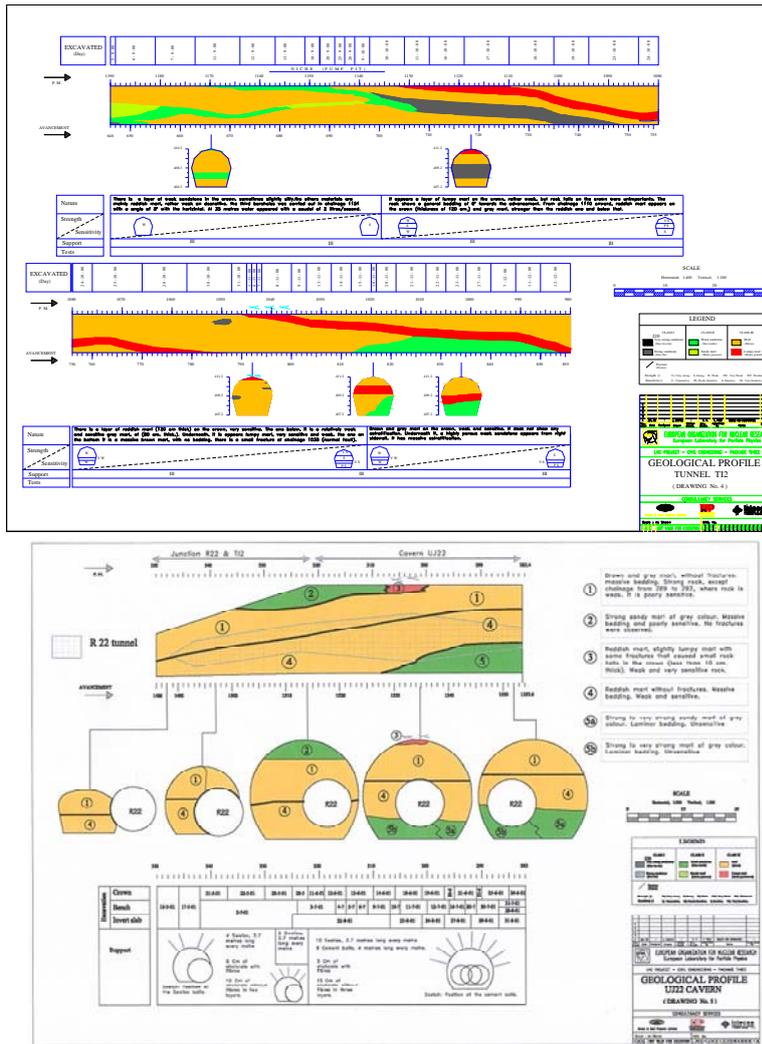
Foto 12.- Bulones y gunita en la caverna UXC 55 (Cortesía CERN)

#### 4.5.4. Deformaciones registradas directamente

Uno de los aspectos fundamentales que se planteó la Ingeniería (en los contratos FIDIC “the Engineer” es el responsable máximo de la ejecución) era el hinchamiento posible de las facies margosas de la molasa, bien por la presencia de montmorillonita bien por la sobreconsolidación geológica, o por ambas cosas.

En la sección de los túneles, se proyectó una solera de más de 90 cm de espesor que, en comparación con el ancho máximo de excavación 3.80 m, podría tacharse de desproporcionado, pero que resultaba fundamental para combatir la posibilidad de que se produjeran hinchamientos. En las cámaras, de mayor anchura, se analizó la posibilidad de aparición de los niveles margosos sensibles. Solo en la caverna UD68 se dio una situación algo más desfavorable que hizo que se aumentara el espesor de la solera.

Además, se llevó un minucioso control de la aparición de estos niveles margosos fundamentalmente de los de “marne grumeleuse” (o bien lumpy marl). Se confeccionaron levantamientos geológicos como los de las figuras 20 y 21 para posteriormente casarlos con las deformaciones medidas. Incluso, se llegaba a marcar con pintura en hastiales y clave la presencia de esta marga como se ve en la foto 13.



Figuras 20 y 21.- Levantamientos litológicos en túneles y cámaras de los niveles excavados (BRI-JV)

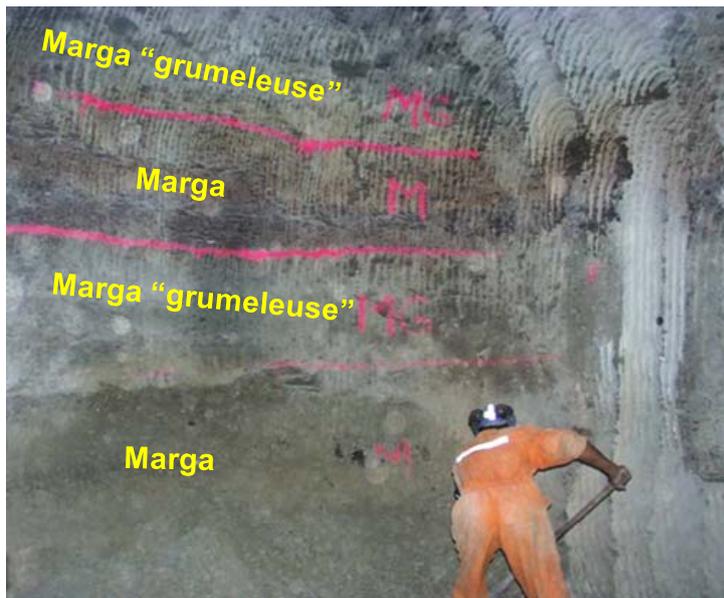


Foto 13.- Distintas facies de la molasa indicadas en el hastial, dos de margas "grumeleuse" sobre dos de margas (cortesía de Intecsa-Inarsa).

Debe decirse que en los túneles de inyección y en las cámaras del package 3 las deformaciones registradas estuvieron dentro de cierta normalidad en rocas blandas incluso sobreconsolidadas y expansivas. Como norma general, se han medido convergencias de máximos de 12-13 mm en secciones de 4 metros y algo mayores en las cámaras de 6-10 metros de diámetro equivalente.

Solamente en algunos tramos excavados en las margas grumeleuses se ha medido mayores deformaciones. Estos han sido:

- Levantamientos de soleras en el túnel TI2 asociadas a la presencia de agua de construcción en la solera. Se han alcanzado valores de hasta 15 cm, que tras un saneo inmediato al hormigonado de la solera, han dejado de manifestarse.
- Levantamientos en la solera de la cámara UJ68, que tiene 7 m de ancho y altura de excavación de 8 m. Los valores han variado de pocos centímetros a cifras próximas a 20 cm. En esta cámara no ha habido agua circulante de construcción y con los sondeos existentes el espesor de 1.50 metros de la solera se consideraba suficiente. Se decidió proceder a un saneo como se ve en la fotografía 14 y a la construcción de una solera armada conectada a los hastiales.
- Levantamientos en la solera de la cámara UD68 de 7.5 m de ancho en la solera de excavación y 11.50 m de altura excavada. Se midieron levantamientos de hasta 15 cm que inicialmente se achacaron a la decompresión de la marga pese a que los sondeos de reconocimiento no eran francos en este sentido. Sin embargo, la investigación de la aparición de fisuras en la gunita de la clave y de humedades dispersas en los hastiales descubrió que uno de los antiguos sondeos de reconocimiento no había sido sellado (Fotos 15 a 17) siendo el causante de las humedades y fisuras observadas y muy probablemente de una gran parte de los hinchamientos de la solera pues éstos se manifestaban en la sección correspondiente a la vertical del sondeo. Se reforzó el drenaje específico en el pie de los hastiales impidiendo que llegara al terreno bajo la solera, se sanearon las capas deformadas y se continuó con el hormigonado previsto de la solera. Hasta la fecha no ha habido signos de movimientos ni humedades.



Foto 14.- Saneo de la solera en la UJ 68 (cortesía de Intecsa-Inarsa).



Fotos 15 y 16.- Cámara UD68. Al fondo se observa en la clave la zona con daños. A la derecha foto del sondeo en clave (cortesía de Intecsa-Inarsa).



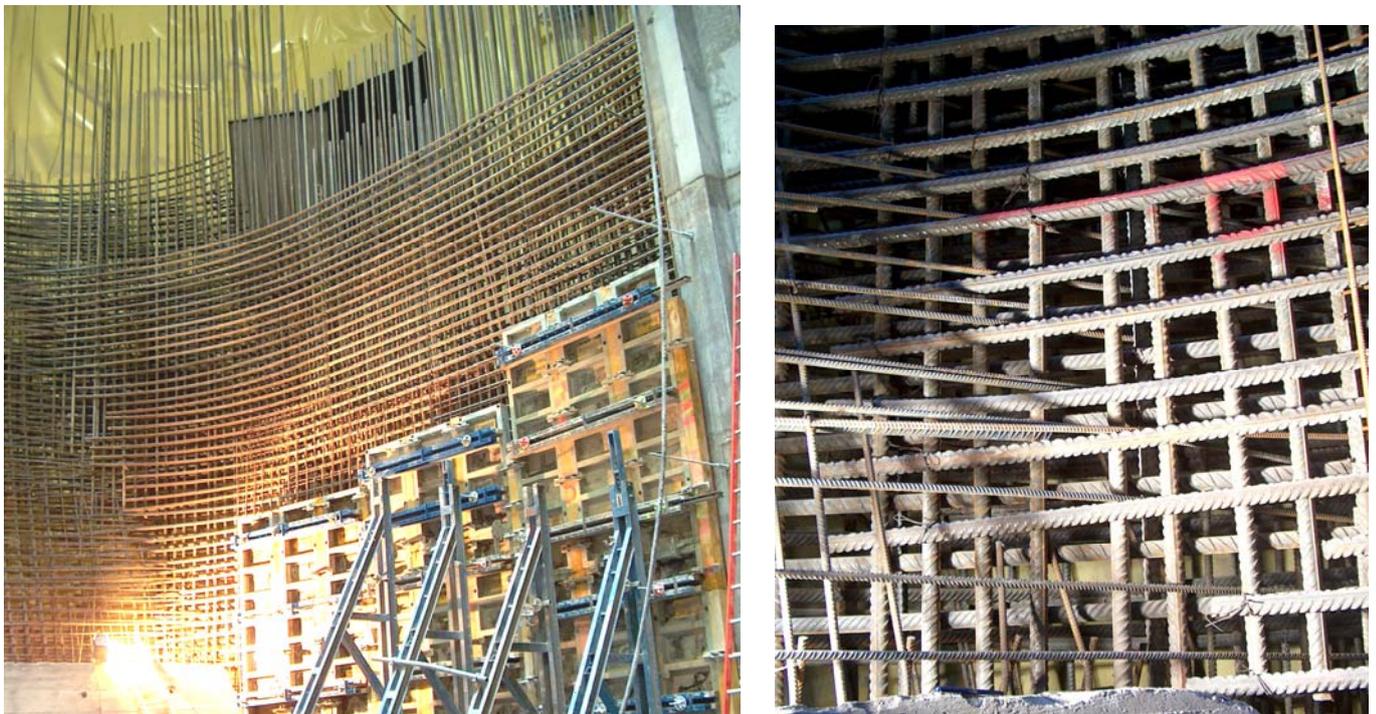
Foto 17.- Cámara UD68. Refuerzo del dren en el pie de hastiales. Véanse las humedades en segundo plano bajo la lámina (cortesía de Intecsa-Inarsa).

#### 4.5.5. Sobre el problema de hinchamiento en otros puntos del LHC

Las presiones de hinchamiento más altas – los del cuadro 3 – se han dado en los contratos de los “packages” 1 y 2 que han trabajado en los Puntos 1 y 5.

No se tienen datos de deformaciones medidas, pero sirvan las fotos 18 y 19 como ejemplo de las prevenciones tomadas en el diseño de las cavernas en el armado de los revestimientos.

Se puede uno imaginar las dificultades que han existido para conseguir un hormigonado correcto con la gran cantidad de armadura colocada.



**Fotos 18 y 19.- Caverna UXC55. Armaduras del revestimiento y detalle de hasta 4 filas de  $\phi$  42 mm (cortesía de CERN y de Intecsa-Inarsa).**

En el trasdós de la pared vertical del testero de la caverna UX85, construida hace ahora algo más de 30 años, se dejó un espacio vacío para absorber los desplazamientos del terreno. En teoría el espacio iba a ser de 30 cm pero en muchos casos fue mayor de 80 cm. En 2002 se tuvo que construir un refuerzo estructural de la pared pues los desplazamientos amenazaban empujar la mencionada pared. El refuerzo además de contemplar un buen número de anclajes ha consistido en una estructura reticulada de casi cuatro metros de fondo anclada con tetones en nichos excavados ex profeso en los hastiales curvos de la caverna. La foto 20 muestra el estado del refuerzo casi al terminar su construcción.



Foto 20.- Estructura de refuerzo de la pared vertical de la caverna UX85 (Cortesía CERN)

## 5. RESUMEN

La molasa es una formación terciaria constituida por distintas facies estratigráficas y, por otra parte, de distintos períodos terciarios. Pueden aparecer margas “grumeleuses”, margas arenosas, areniscas margosas y areniscas duras. Los cambios de facies pueden darse en pocos metros en vertical y en pocas decenas de metros en horizontal.

Su relativa facilidad de excavación y la buena estabilidad prevista – en principio - en la planificación inicial del laboratorio subterráneo del CERN fueron factores favorables en la decisión de este emplazamiento.

El conjunto de la formación molasa puede asociarse a un módulo de deformación bajo que hace que esta roca haya sido tectónicamente poco afectada. Asociado a esta condición, la sismicidad existente en el área del CERN es baja lo que hace que el emplazamiento del laboratorio sea muy adecuado frente a la notable exigencia de “tranquilidad” que la experimentación con las “partículas físicas” necesita.

En la realidad hay que hablar de que las facies que constituyen la molasa tienen un comportamiento muy dispar en lo relativo a la excavabilidad, al sostenimiento y a la capacidad de hinchamiento a medio y largo plazo.

Se trata de una roca sobreconsolidada por haber tenido encima hasta 2.000 metros de molasa erosionada y hasta 400 m de hielo glaciar. El porcentaje de minerales del

grupo de las esmectitas es de hasta el 18% respecto del total. El coeficiente  $k_0$  por esta razón puede llegar hasta valores de 2.

Se ha visto que una excavación con rozadora es lo más adecuado y que cuando se han usado TBMs de discos, han existido problemas de atrapamientos por despegues de cuñas en clave y riñones, y por la dificultad de progresar en los tramos margosos a causa de la falta de rigidez en los apoyos de los grippers. Con todo, se han conseguido rendimientos medios de hasta 9 metros diarios con estas TBMs de discos.

Pese a la ausencia de accidentes tectónicos, en la marga han aparecido frecuentes juntas de discontinuidad de muy baja resistencia al corte.

En los túneles de 4 m de ancho de excavación y 3 m de ancho libre final, los hinchamientos han sido reducidos.

En las cámaras de mayores anchuras se han medido hinchamientos de hasta 2-3 decímetros. Los hormigones de revestimiento de las grandes cavernas llevan un importantísimo refuerzo de armaduras que ha supuesto una gran dificultad en el hormigonado.

## 6. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece, en primer lugar, al CERN su autorización para la publicación de los datos, fotografías y esquemas usados. A las empresas Intecsa (hoy Intecsa-Inarsa SNC Lavalin) que junto con Brown & Root Ltd (hoy KBR, Kellogg Brown & Root) formaron el JV de Ingeniería (de acrónimo BRI) del package 3 del proyecto LHC por permitirnos haber usado información propia de dicho JV. Nuestro agradecimiento finalmente al Ing. Eliseo Pérez Dueñas de la dirección del departamento GS-SE-FMW Facility Maintenance and Small Works del CERN quien además de dirigirnos adecuadamente por la web del CERN fue una pieza insustituible dentro de BRI.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**BRI-JV. Brown & Root – Intecsa Joint Venture 1996-2003.** LHC Project. Civil Engineering. Package 03. Geneva, 1996 a 2003. (No editado)

**CERN.** LHC Project. Civil Engineering. Diversos documentos geotécnicos.

**Debelmas, Jacques.** <http://coursgeologie.com>

**Hotellier, J.F. 1993.** Projet LHC. Synthèse Géologique et Géotechnique.

**Ibele, T. (2011):** Tectonics of the Western Swiss Molasse Basin during cenozoic times. Thesis at the University of Fribourg.

**Ibele, T., Mosar, J. (2011):** Deformation bands in the sandstones of the western Swiss Molasse basin: Micromechanics and brittle deformation. (Journal of Structural Geology).

**Ibele, T., Sommaruga, A., Mosar, J. (2011):** Structural geology and tectonic evolution of the western Swiss Molasse Basin. In preparation.

**Intecsa-Inarsa, 2002.** Proyecto y construcción de las obras subterráneas del LHC. CDTI, Madrid, 2002. (No editado)

**Knights M., Jones K., Petrovic S., 2001.** Ever increasing circles. Construction of the LHC at CERN". Underground Construction Symposium. Londres 2001

**Kuhlemann, J y Kempf, O (2002).** Post-Eocene evolution of the North Alpine Foreland Basin. *Sedimentary Geology* 152 (2002) 45–78. Ed. Elsevier.

**Laporte, H., 1988.** "Présentation du Projet LEP, des études préliminaires à la réalisation". *Revue Travaux*, n° special Construction du LEP. Junio 1988

**Loo, Y (2011).** Update on "Task 2" progress. Ground model and 3D cavern layout. ARUP.

**Pérez-Dueñas, E., 2000.** Métodos topométricos y giroscópicos en la construcción de túneles de precisión del CERN (Proyecto LHC). Congreso de Topografía y Cartografía Topcart 2000. Madrid, 2000

**Schegg, R y Leu, W. (1996).** Clay mineral diagenesis and thermal history of the Thônex Well, Western Swiss Molasse Basin. *Clays and Clay Minerals*, Vol. 44, No. 5, 693-705. 1996.

**SITG.** Système d'Information du Territoire Genevois.  
<http://etat.geneve.ch/sitg/contact.html>

**Swiss Seismological Service, 2004.** Seismic hazard Assesment of Switzerland. Version 1.1 – November 25, 2004., ETH Zurich. Switzerland.  
<http://www.seismo.ethz.ch>.