

## OBRAS DEL ACELERADOR DE PARTÍCULAS LHC (CERN, GINEBRA)

# Proyectar y **construir** para la Física de partículas

Por FERNANDO ROMÁN. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

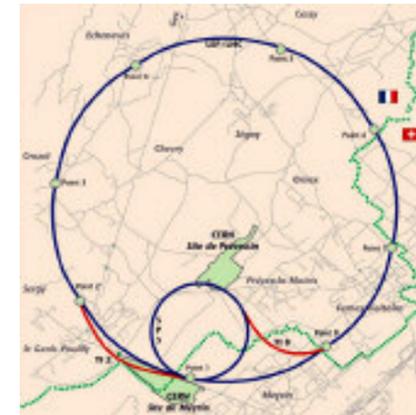
El **CERN**, European Organization for Nuclear Research, es el **mayor laboratorio mundial** de investigación en física de partículas. Fue creado en 1954, emplea actualmente unas 3.000 personas y es utilizado por casi **8.000 científicos** de unas 580 universidades de 80 naciones que son más de la mitad de los físicos de partículas del mundo. Está situado en la frontera franco-suiza, al oeste de Ginebra 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.

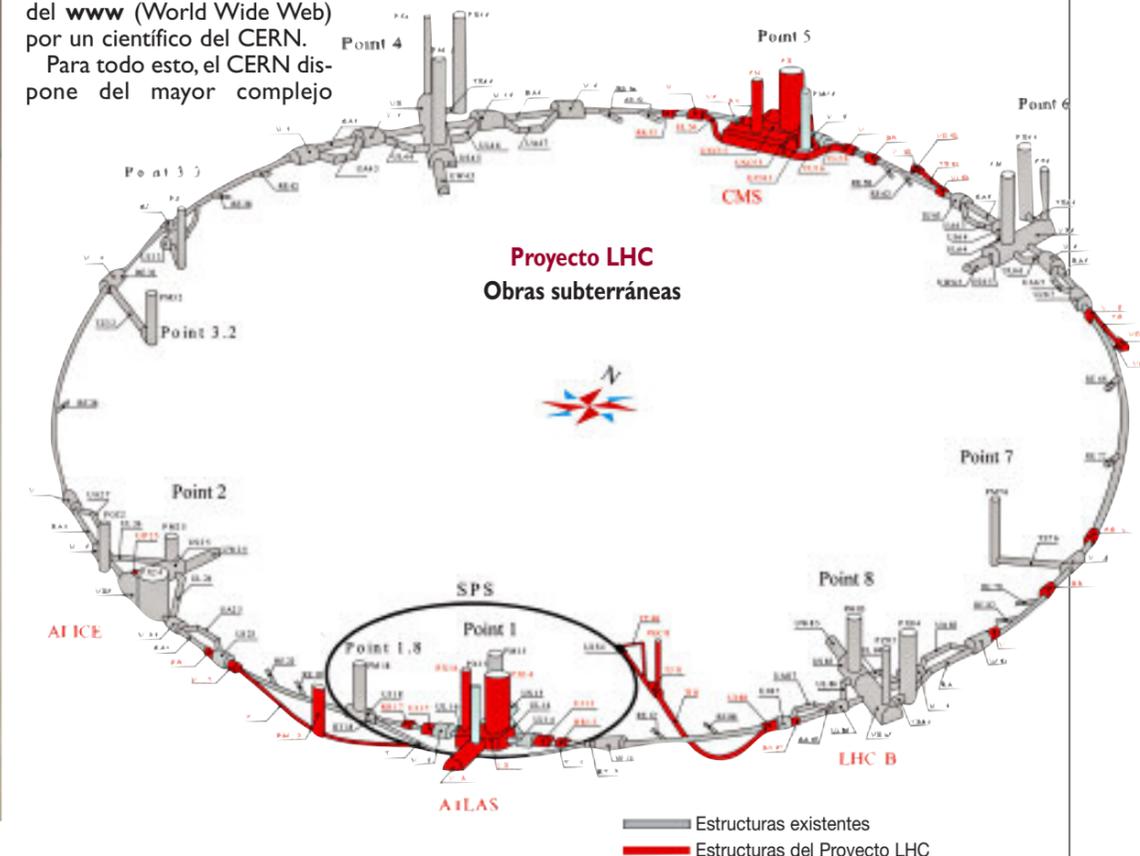
Para poder trabajar, ver y estudiar las partículas físicas los científicos necesitan los **aceleradores**, complicados equipos que son capaces de mover las partículas hasta altísimas energías antes de hacerlas colisionar con otras. En este proceso de aceleración y colisión los físicos pueden identificar 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



Arriba, vista aérea de la situación del CERN, desde el lado suizo. A la izquierda, planta de los aceleradores LHC y SPS. Debajo, esquema de las obras subterráneas del LHC.



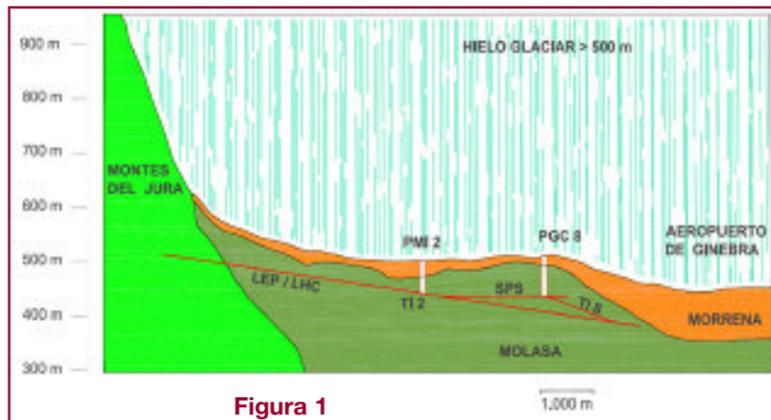
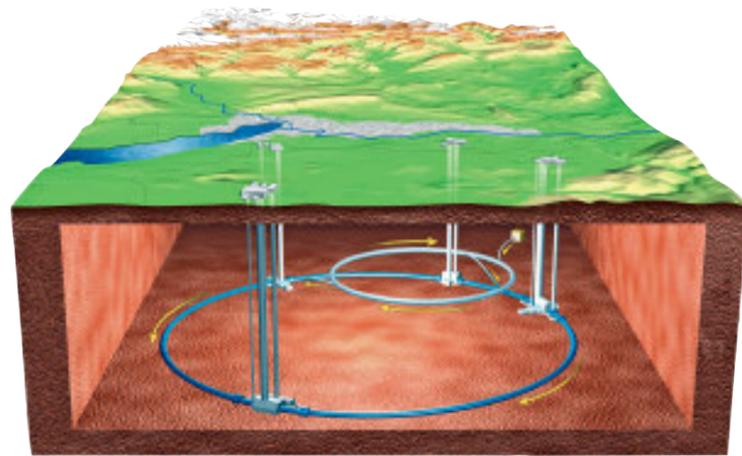


Figura 1

mundial de aceleradores de partículas interconectados entre sí. Los dos de mayores dimensiones son el SPS (Super Proton Synchrotron) 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 m de diámetro, a una profundidad variable entre 50 y más de 100 m. El último acelerador LEP ha tenido 4 Puntos de experimentación consistentes, cada uno, en un complejo de grandes cavernas, cámaras y galerías interconectadas.

Desde 1998 el CERN ha venido montando el nuevo y más potente acelerador LHC (Large Hadron Collider), aprovechando las instalaciones anteriores del LEP, para lo cual ha necesitado construir nuevas cámaras para alojar los nuevos imanes, nuevos túneles de inyección de partículas y nuevas cavernas de experimentación. El coste total del experimento LHC ronda los 4.000 millones de euros (6,1 billones de CHF) y su inauguración está prevista para mediados de este año 2008.

#### DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS DEL LOTE 3

Las obras de Ingeniería Civil de todo el proyecto LHC se dividieron en tres lotes. Nuestra participación en el Proyecto LHC se ha centrado en el Lote 3, que a su vez se divide otros dos lotes (3a y 3b).

El equipo de la Consultora autora del proyecto y directora de las obras (Engineer) en Ginebra estaba formado por dos ingenieros, de Minas y de Caminos, un geólogo, un ingeniero técnico de Minas y cuatro ingenieros

Arriba, diagrama en 3D de las instalaciones del CERN. Sobre estas líneas, corte geológico del LHC.

**EL COSTE TOTAL DEL EXPERIMENTO LHC RONDA LOS 4.000 MILLONES DE EUROS Y SERÁ INAUGURADO A MEDIADOS DE ESTE AÑO 2008**

Topógrafos, habiéndose rotado y sustituido varias personas en los más de cinco años que han durado las obras. En conjunto hay que decir que a lo largo de las obras han intervenido, con plena dedicación o parcialmente, hasta 30 personas entre los residentes junto al CERN y los apoyos de las empresas asociadas.

Las obras subterráneas del Lote 3 han consistido en:

- 2 pozos de acceso de 50 m de profundidad, uno con planta elíptica de 13 x 19 m libres interiores.
- 2 nuevos túneles de 2.700 y 2.300 m de longitud y de 3 a 4 m de diámetro, que permiten la inyección de partículas desde el acelerador SPS al acelerador LHC en ambos sentidos de circulación. El primero parte del acelerador SPS y enlaza con el denominado Punto 2 del antiguo LEP. El segundo enlaza el SPS con el denominado Punto 8 del LEP.
- 2 nuevos túneles de 330 y 350 m de longitud y de 3 a 4 m de diámetro, 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.
- 4 cámaras de nueva planta, de 25 a 90 m de longitud de hasta 10 m de anchura. Dos de ellas constituyen el alojamiento de las masas del nuevo colisionador. Las otras dos forman un tramo telescópico de uno de los nuevos túneles largos de inyección.
- 8 ensanches del actual túnel de LEP para formar nuevas cámaras de alojamiento de imanes y para uniones con los nuevos túneles, con anchuras de 6 a 10 m.
- 3 túneles cortos de conexión entre cámaras de 40 a 70 m de longitud.

Las obras se desarrollan a una profundidad variable de entre 50 y 90 m.

El Lote 3a, construido por el *Joint Venture* TWASB formado por las empresas británicas Taylor Woodrow y Amec, y por la francesa Spie Batignolles se desarrolla fundamentalmente bajo territorio francés. Los túneles y cavernas se han excavado con máquinas rozadoras. Se adjudicó con la modalidad de administración acotada.

El Lote 3b construido por el *Joint Venture* ATIC integrado por las empresas suizas Losinger, Prader y Scrasa y bajo territorio en gran parte suizo. Se adjudicó en un "lump sum" o precio cerrado. El túnel TI 8, pieza importante de este contrato, se ha excavado con una tuneladora de discos.

#### ENTORNO GEOLÓGICO

El CERN está emplazado en el denominado Basin de Génève ocupado por depósitos consolidados terciarios que rellenan un 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 adjunta (Figura 1) se ha representado un corte general que

muestra la disposición de estas formaciones si bien las mesozoicas calcáreas no afectan a ninguna de las obras del proyecto LHC.

En los depósitos de morrena aparecen desde gravas hasta limos arcillosos con cantos y bolos. Dentro de la morrena existen niveles acuíferos. La molasa es una roca (realmente es una facies) en la que se dan desde areniscas tenaces y muy cementadas hasta margas calificables como rocas blandas o suelos pre-consolidados. Desde la construcción del LEP se sabía que la facies más "blanda" denominada "marnes grumeleuses" había sido la causante de serios problemas.

Salvo los primeros treinta metros del pozo PMI 2 y los primeros metros del pozo PGC 8 que se excavaron en la morrena, la totalidad de las obras subterráneas se desarrollan por la molasa.

## ASPECTOS SINGULARES DE LA OBRA

**Importancia de la Esfericidad de la Tierra. Coordenadas Específicas del CERN.-** Cabe mencionar en primer lugar la dificultad de trabajar con las coordenadas del Proyecto LHC. Por una parte las dimensiones del anillo LEP ahora LHC obligan a considerar la esfericidad de la tierra de tal forma que las verticales no son paralelas. En la construcción del SPS (1970) las proyecciones ortográficas se basaban en un sistema tridimensional que tomaba como referencia una esfera de radio 6.371 km con un punto fijado de tangencia. Para el LEP y el LHC se usa un elipsoide tangente en el mismo punto. Por otra parte debe decirse que se ha trabajado en dos países con sistemas de coordenadas muy diferentes que ha obligado a las transformaciones pertinentes de los puntos de referencia que se complica aún más por el hecho de que se han realizado a profundidades entre 50 y 100 m para las que hay que manejar las desviaciones con la vertical. Finalmente, la transmisión y adecuación de las coordenadas del experimento necesarias por los físicos a una realidad de construcción, ha obligado también a realizar incontables aproximaciones.

Sección excavada del túnel TI 2.



## F I C H A T É C N I C A

### Nombre de la obra

OBRAS SUBTERRÁNEAS DEL LOTE 3 DEL PROYECTO LHC (NUEVO ACELERADOR DE PARTÍCULAS FÍSICAS). GINEBRA. SUIZA

### Promotor (Employer)

CERN. European Organization for Nuclear Research.

### Autores del proyecto de las obras subterráneas

FERNANDO ROMÁN y ANSELMO SOTO, Ingenieros de Caminos (INTECSA-INARSA en Joint Venture con Kellog Brown&Root Ltd e Hidrotécnica Portuguesa)

### Director del Proyecto

PEDRO D'AÇA CASTELBRANCO, ingeniero Civil (CERN. GROUPE ST / CE)

### Dirección de las obras (Engineer)

MIKE A. LEPPER, ingeniero Civil (KELLOG BROWN & ROOT).  
FERNANDO POLO, ingeniero de Minas (INTECSA-INARSA)  
SLOBODAN PETROVIC, ingeniero de Caminos (INTECSA-INARSA)

### Dirección de las obras (Employer)

TIMOTHY WATSON, ingeniero Civil (CERN. GROUPE ST / CE)  
L. ANASTASIA LÓPEZ, ingeniero de Caminos (CERN. GROUPE ST / CE)  
ROBERT FIELDER, ingeniero Civil (CERN. GROUPE ST / CE)

### Empresas Constructoras

Lote 3 A: TAYLOR WOODROW (UK), AMEC (UK), SPIE BATIGNOLLES (FR).

Lote 3 B: LOSINGER, PRADER y SCRASA (S).

### Presupuesto

82 millones CHF, 56 millones de euros (lote 3a)

22 millones CHF, 15 millones de euros (lote 3b)

### PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

Número de túneles largos (> 2 km) .....	2 ud
Número de túneles cortos (< 500 m) .....	2 ud
Número de galerías de conexión (40-80 m) .....	4 ud
Longitud total de túneles .....	5.840 m
Ensanches y cámaras .....	12 ud
Pozo de acceso elíptico (19x13 m) (50 m prof) .....	1 ud
Pozo de acceso circular (Ø 8 m) (49 m prof) .....	1 ud

**-Trabajando en zonas radiactivas y con materiales contaminados.-** Por una parte en un entorno radial del acelerador LEP existen materiales con determinado grado de contaminación radiactiva que han sido excavados y acopiados en vertederos que se han proyectado ex profeso para este fin. Todo este proceso ha exigido la observación de estrictas medidas de seguridad. Por otra parte los túneles TI 2 y TI 8 debían aproximarse para su futura conexión a los aceleradores SPS y LEP cuando aún estaban en servicio, lo que implicaba emisiones radiactivas. Esto obligó a planificar las obras de forma que los equipos humanos finalizaran una primera fase de excavación definida por el límite de unos 200 metros de la conexión final. La unión definitiva se realizó una vez parados definitivamente los aceleradores.

**-Precisiones y tolerancias geométricas en los túneles.-** Han tenido que conseguirse las precisiones y/o tolerancias siguientes.

- La sección excavada de los túneles debía tener su centro dentro de un círculo de 50 mm de radio respecto del eje teórico. Este margen de error viene impuesto por la geometría específica del haz de partículas.



- Las tolerancias del revestimiento final de hormigón en clave y hastiales eran de +20 mm hacia el exterior y -0 (cero) hacia el interior respecto de la geometría teórica. Estos márgenes han venido impuestos por la infinidad de elementos de precisión de medida que van fijos o colgados de los mismos.

- Las tolerancias en el hormigón de solera eran de +0 y -10 mm. En este caso era precisamente los soportes del "beam" del haz de partículas que solo permitían esa distancia de ajuste de montaje.

En el caso del túnel TI 8 la rigidez que ofrecía la excavación con tuneladora obligó a la reexcavación por "intolerancias" de tramos con longitudes que superaron más de 100 m.

#### -Control topográfico de los túneles.-

Piénsese en la dificultad de conseguir un "cale" de un túnel de 2.500 m en una diana virtual de 50 mm de diámetro situada entre 50 y 100 m de profundidad. En un túnel convencional de estas longitudes habían bastado medidas topométricas. En nuestro caso ha sido necesario la medición de varios azimutes giroscópicos y el uso de giro-teodolitos de última generación cuya calibración y las correcciones inherentes a las desviaciones de la vertical, a la convergencia de meridianos y a la desorientación del elipsoide de referencia fueron un problema felizmente resuelto.

Como ejemplo del buen hacer de replanteo topográfico, debe decirse que en el túnel TI 8 tras sus 2.500 m de perforación, se ha conseguido que en su extremo final se hayan medido tan solo 2 mm de error al conectar con la obra UJ 88 que lo unía con el anillo del LHC.

**-Requisitos y tolerancias geométricas en el pozo PMI 2.-** Se trata de un pozo de planta elíptica de ejes 19 y 13 m (21 y 15 exteriores) y de 50 m de profundidad

**Arriba a la izquierda, losa del pozo PMI 2. Arriba a la derecha, vista del mismo pozo desde superficie. Debajo, bajando los dipolos en el pozo PMI 2.**

que constituye el acceso al túnel TI 2 tanto para la construcción como para la introducción de los dipolos y aceleradores durante el ensamblaje del LHC.

En los primeros 30 m el terreno está formado por los depósitos morrénicos de gravas, bolos y arcillas bajo los cuales estaba la molasa. Se proyectó y realizó la excavación superior al abrigo de pantallas de hormigón armado de 1 m de espesor, empotradas en cabeza en la losa de cobertura y ancladas en su parte inferior. La curvatura en la parte más abierta equivalía a un diámetro de 30 m.

No es frecuente proyectar y construir paneles de pantallas de casi 30 m de "luz" entre coacciones, sin anclajes ni puntales intermedios. En pozos de sección circular, existen bastantes experiencias de este tipo pero con las suaves curvaturas de la sección del PMI 2 no existen muchas referencias.

Para que las hipótesis de cálculo se respetaran debía contarse con la interacción de un panel con otro en las juntas y la forma final fue tal que se llegaba a tener los elementos trabajando en compresión en un plano horizontal. Para ello era necesario una correcta ejecución de las juntas y una garantía de que, en el pie de las pantallas, la superficie de contacto entre paneles fuera de un 70% del espesor (1,00 m). Esto se tradujo en no admitir desviaciones en la vertical mayores del cinco por mil. La excavación que se auscultó con inclinómetros y convergencias demostró la verticalidad requerida y una ausencia prácticamente de deformaciones.

Bajo las pantallas se ejecutaron dos anillos in situ por bataches mediante la técnica que en Francia es denominada "paroi marocaine", enlazando las armaduras de la pantalla con barras longitudinales que conseguían un mayor arrostamiento, al tiempo que se lograba un cierto apoyo dentado del conjunto.



En los 20 m inferiores se usó una rozadora y pala con martillo hidráulico para la excavación de la molasa que se sostuvo con tres capas de gunita, mallazo y bulones. Se proyectó asimismo un revestimiento final por razones de impermeabilización que el CERN ha postpuesto a una fase posterior.

**-Particularidades de la molasa.-**

En la facies molasa existen niveles de lo que se denomina "marne grumeleuse" cuya particularidad a destacar es la posibilidad de presentar hinchamientos importantes al verse decomprimida por la excavación o con cambios de la humedad. Esto tiene explicación si consideramos la historia geológica del lugar. Sobre la superficie erosionada de la molasa han podido estar más de 500 m de glaciación, es decir ha podido estar actuando durante miles de años una sobrecarga de más de 5 Mpa "preconsolidándola". Con la erosión cuaternaria de los últimos miles de años, en la que solo quedaron los depósitos morrénicos, la molasa sufrió una decompresión en tensiones verticales del orden de 4 a cinco veces las actuales. Pero en la realidad la relajación no es completa y queda remanente una capacidad de hinchamiento por decompresión mucho mayor que la que correspondería a las tensiones verticales en la actualidad. A esto se suma cierta componente mineralógica en esmectitas de las arcillas de la marga. De ahí la inquietud de la Ingeniería en la resolución de los problemas asociados a los niveles de marga, fundamentalmente la "grumeleuse". Se resolvió con lo siguiente:

- Previendo espesores notables de soleras, incluso armadas, en los túneles y cavernas.
- Armando considerablemente los inevitables paramentos verticales planos.
- Llevando un control minucioso geológico



Arriba, cámara UJ 68. Debajo, rozadora en el túnel TI 2.

y de auscultación de deformaciones de todas las secciones, lo que permitió realizar las zonificaciones pertinentes y adoptar las medidas de saneo y refuerzo en el momento adecuado.

- Extremando al máximo las condiciones de drenaje de la obra durante la construcción

**-Trabajando en dos túneles similares con contratistas diferentes.-** Ambos túneles de inyección tenían en proyecto la misma sección y el mismo tipo de sostenimiento durante la excavación. 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 m diarios.

El TI 2 fue excavado con una rozadora Alpine AM50 cumpliéndose las previsiones del proyecto, con máximas de 249 m en un mes, mientras que el contratista del túnel TI 8 ofertó un precio cerrado comprometiéndose a excavarlo con una TBM. El riesgo, que fue penalizado frente al CERN en la adjudicación, se transformó en certeza pues nada más empezar los primeros 200 m, se produjeron importantes desplomes de bloques en la clave seguidos de tramos con hastiales incapaces de reaccionar frente a los empujes de los grippers; todo esto hizo que la tuneladora quedara atrapada por espacio de casi cuatro semanas.

Afortunadamente los problemas que se repitieron no fueron tan graves y se consiguió terminar la excavación claramente en el plazo inicial aunque con unos rendimientos bajos para estas máquinas, promedio de 9,5 m diarios con máximos de 359 m mensuales.

### CONTRIBUCIÓN FINAL AL LHC

Concluamos con que las obras del lote 3 han participado en la construcción de la infraestructura necesaria para alojar el haz de partículas cuyas colisiones se producirán en los detectores ALICE (A Large Ion Collider Experiment), el ATLAS, o el CMS (Compact Muon Solenoid) que se alojan en cavernas espaciadas en el anillo del LHC y cuyas magnitudes y complejidad llegan a enmascarar las obras de ingeniería. ▲

