

Il progetto LHC al CERN di Ginevra

Lavori al P5, esperimento CMS

Paolo Patrizi*

Sommario

Il progetto LHC porterà un sostanziale aumento delle prestazioni dell'acceleratore di particelle del CERN di Ginevra (il LEP), e richiederà la realizzazione di strutture sotterranee per l'alloggio di macchinari di dimensioni senza precedenti. Sono previsti una serie di interventi sulla struttura esistente, e le opere civili da realizzare, molte delle quali in sotterraneo, daranno vita ad un cantiere che rimarrà aperto fino al 2005, data prevista per la fine dei lavori. Questa nota descrive gli interventi e dà un cenno sulle modalità esecutive ad oggi previste.

1. Introduzione

L'anello sotterraneo del LEP (acceleratore di particelle Large Electron Positron) è stato realizzato dal CERN negli anni 80 sotto la pianura di Ginevra, delimitata dalle Alpi e il Lago Lemano a Sud-Est e dalla catena del Jura a Nord-Ovest, a cavallo della frontiera franco-svizzera. Esso è costituito da un tunnel di 3.8 m di diametro, che percorre una circonferenza di circa 27 km su un piano inclinato (1.4%) con una copertura che varia tra i 170 e i 40 metri. Lungo tale circonferenza sono ubicati 8 punti di accesso, in corrispondenza dei quali il flusso di particelle accelerate viene usato a fini sperimentali.

Il progetto LHC (Large Hadron Collider), consiste in un suo sostanziale potenziamento, indispensabile per raggiungere gli obiettivi che si pone oggi la fisica delle particelle. Al suo finanziamento partecipano non solo i 19 Stati membri del CERN, ma anche Stati Uniti, Giappone e Russia. Esso si traduce in una serie di lavori per la realizzazione di nuove infrastrutture: ALICE, CMS, LHC-B e ATLAS (Fig. 1) sono i nomi di altrettanti esperimenti che verranno effettuati nel nuovo LHC, e che richiederanno l'installazione di nuovi *detector* (ATLAS in corrispondenza del Punto 1 e CMS in corrispondenza del Punto 5), o la modifica dei *detector* esistenti (ALICE e LHC-B). La maggior parte (più della metà) dei costi del progetto LHC sono rappresentati dall'installazione di magneti superconduttori e del relativo circuito criogenico di elio liquido (temperatura di -271°C per garantire la superconduttività). Le opere civili rappresentano invece il 13 % dei costi.

I lavori di ingegneria civile relativi ad uno dei due nuovi esperimenti (esperimento CMS dal nome del Compact Muon Solenoid, un *detector* del peso di

14.000 tonnellate) costituiscono un contratto di 112 milioni di Franchi Svizzeri della durata di almeno cinque anni, e sono stati appaltati alla joint venture italo-spagnola Dragados-SELI. Il cantiere è ubicato nel comune di Cessy (F), i lavori sono iniziati nell'ottobre 1998, e la Direzione Lavori è affidata alla joint venture GSG, che sta per Gibb (UK) - SGI (Svizzera) - GeoConsult (Austria).

2. Geologia del sito

La geologia della valle alluvionale degli affluenti in riva destra del Rodano nei pressi del Lago Lemano è stata investigata in profondità fin dagli anni '50, all'epoca della realizzazione delle prime infrastrutture sotterranee del CERN, e successivamente con la realizzazione del LEP. In corrispondenza dell'esperimento CMS (in cui la copertura del tunnel del LEP è di circa 100 m) è stata condotta inoltre una campagna preliminare costituita da 9 sondaggi profondi (120 m) e da una serie di prove in situ, su

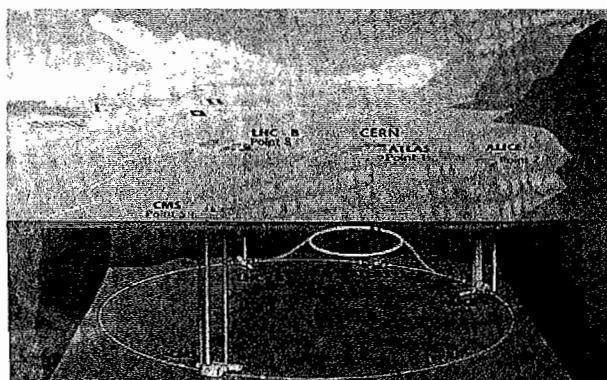


Fig. 1 - Il progetto LHC.
Fig. 1 - The LHC Project.

* Chantier CERN Point 5 - 01170 Cessy - France

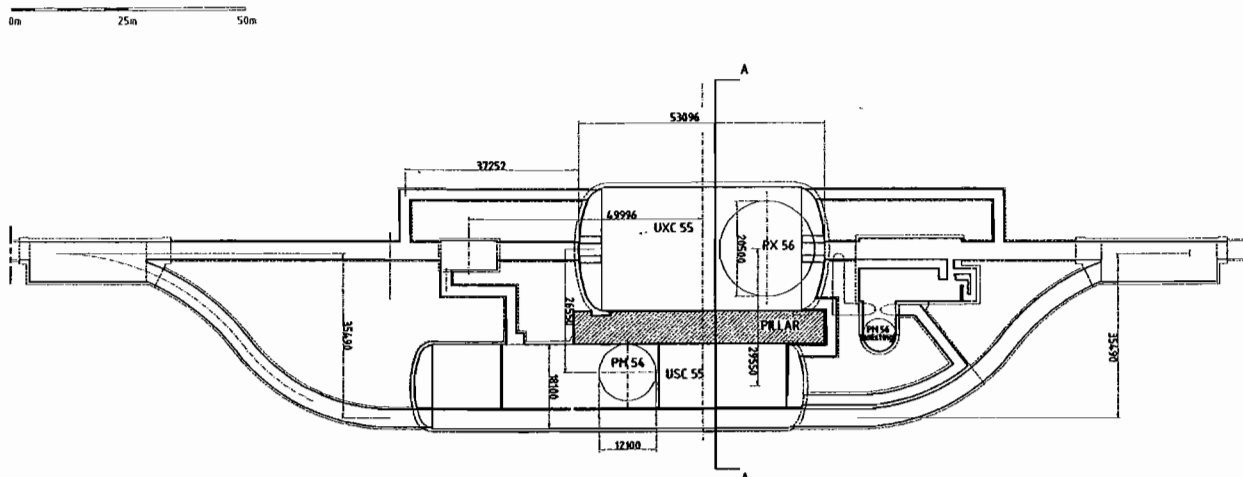


Fig. 2 - Esperimento CMS - pianta.
Fig. 2 - The CMS Experiment - Layout.

un'area di $\frac{3}{4}$ di ettaro. Questi hanno permesso di identificare e definire le due formazioni che saranno interessate dal progetto:

- dal piano di campagna, fino ad una profondità di circa 50 metri si trovano morene del quaternario, estremamente eterogenee (dalla ghiaia al limo debolmente argilloso, con intercalati ciottoli e trovanti metamorfici di grandi dimensioni). Tali terreni sono sotto falda fin dalla superficie. È stata inoltre accertata l'esistenza di uno strato impermeabile di limo argilloso in corrispondenza delle opere da realizzare, che da luogo, di fatto, a due falde distinte: una a pelo libero, da -4 m a -25 m da p.c., e una in pressione, da -30 a -50 m da p.c., il cui livello piezometrico medio è intorno ai -10 m da p.c.;
- oltre i 50 metri di profondità, si incontra uno strato di molassa del terziario costituito da alternanze di marne e gres nel quale fu scelto di ubicare l'anello del LEP per garantirne la stabilità. Tale strato prosegue ben oltre il limite inferiore delle strutture da realizzare, e le formazioni calcaree del secondario della catena del Jura non verranno interessate dai lavori.

3. Il progetto

I lavori principali oggetto del contratto in questione, visibili sul disegno in Fig. 2 consistono in:

- scavo di due pozzi (diametri interni di 20.58 metri per il PX56 e 12 metri per il PM54) fino alla profondità di 70 metri da piano campagna;
- a partire da uno dei due pozzi, scavo e getto di una struttura di sostegno in cemento armato, del volume complessivo di 13.000 metri cubi (il *pillar*). La roccia tenera viene sostituita dal cemento armato in un punto in cui le sollecitazioni

indotte dalle opere eccedono quelle sostenibili in sicurezza dalla roccia stessa;

- scavo di due cavegne che raggiungeranno il livello del LEP, per l'alloggio del CMS (UXC55, 28.000 metri cubi) e dell'informatica di controllo (USC 55, 15.000 metri cubi). Per queste cavegne è previsto il sostegno provvisorio con spritz beton e ancoraggi.

3.1. I pozzi

Il pozzo PX56 è rappresentato in Fig. 3 (il PM54 è in tutto simile, salvo il raggio). Per lo scavo in terreno incoerente sotto falda sono state valutate in sede di progetto preliminare due alternative, consistenti in paratie e congelamento. A prescindere dalle differenze di costo tra le due opzioni (la differenza, studiata sulla base dei costi nel Regno Unito è minima), le paratie pongono il problema della tolleranza di esecuzione in profondità, incompatibile con gli standard richiesti, nonché della difficoltà apportata dalla presenza di pali profondi nelle vicinanze dei pozzi, che potrebbero indurre eccessive sollecitazioni sulle paratie. Si è quindi optato per il congelamento.

3.1.1. Rivestimento

Il progetto prevede la realizzazione nei pozzi di due rivestimenti sovrapposti. Il rivestimento *primario* dovrà resistere alla sola spinta attiva del terreno, e può essere diviso in due tipologie di sostegno:

- in corrispondenza delle morene, esso è costituito da anelli di calcestruzzo non armato gettato in opera. Viene realizzato al riparo del muro di ghiaccio, che funge in questa fase da sostegno provvisorio e da riparo da venute d'acqua. Lo spessore richiesto per il muro di ghiaccio (3-4 m) è conseguenza di questo, mentre per questo

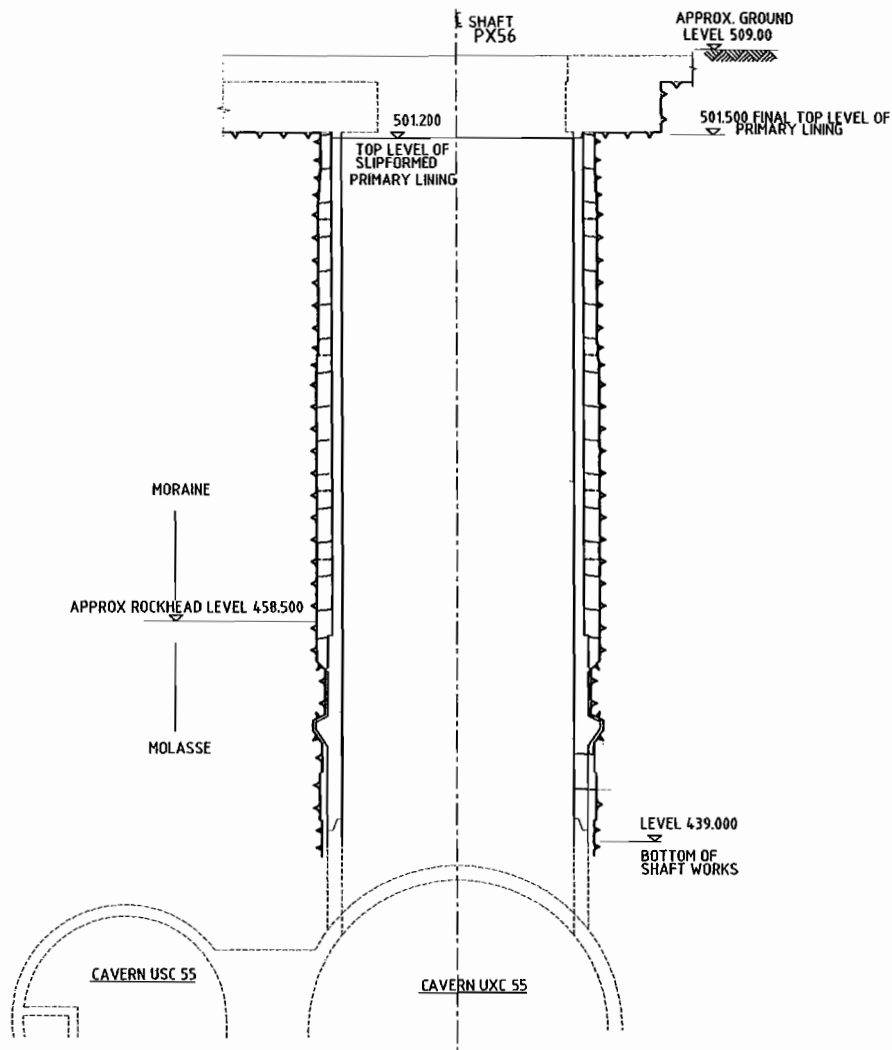


Fig. 3 - Pozzo PX56 - Sezione.

Fig. 3 - Shaft PX56 - Section.

primo tratto di rivestimento primario lo spessore richiesto varia dai 65 cm per gli anelli superficiali del PM54 a 1.4 m per gli anelli profondi del PX56;

- nella molassa il sostegno primario viene realizzato con spritz-beton (200 mm min) e ancoraggi.

Una volta raggiunta la quota finale, a -70 m circa da pc, al rivestimento primario viene sovrapposta una guaina impermeabile e viene gettato il rivestimento *secondario* con cassaforma scorrevole, da fondo pozzo alla superficie. Tale rivestimento secondario dovrà riprendere la sola spinta dell'acqua. Per il rivestimento secondario è richiesto uno spessore di 58 cm in corrispondenza delle morene, e di 82 cm minimo nella molassa. Gli allargamenti del rivestimento visibili nella figura a quota -60 m da pc svolgono il compito di ripartire sul terreno eventuali carichi verticali agenti sul rivestimento secondario, la

cui parte sottostante è invece sollecitata dal suo peso proprio in sola trazione.

La presenza di argille spingenti nella molassa è stata evidenziata in altri punti del LEP, ove la percolazione di acqua dal soprastante strato di morene lungo l'estradosso dei pozzi realizzati sta avendo l'effetto di danneggiare i rivestimenti eseguiti. A tre quote diverse nella molassa, sono previsti tre campi di iniezioni, ciascuno caratterizzato da due fasi:

- la formazione fra rivestimento e roccia, di vuoti che potrebbero diventare sede di percolazioni idriche, è contrastata con una corona di 20 fori per *contact-grouting*, ossia iniezioni cementizie in cannette predisposte nel rivestimento secondario, per trattare l'interfaccia rivestimento/terreno.
- sono inoltre previste iniezioni cementizie in roccia, con 20 fori per *consolidation grouting*, fino alla distanza di 5 m dall'estradosso del rivestimento.

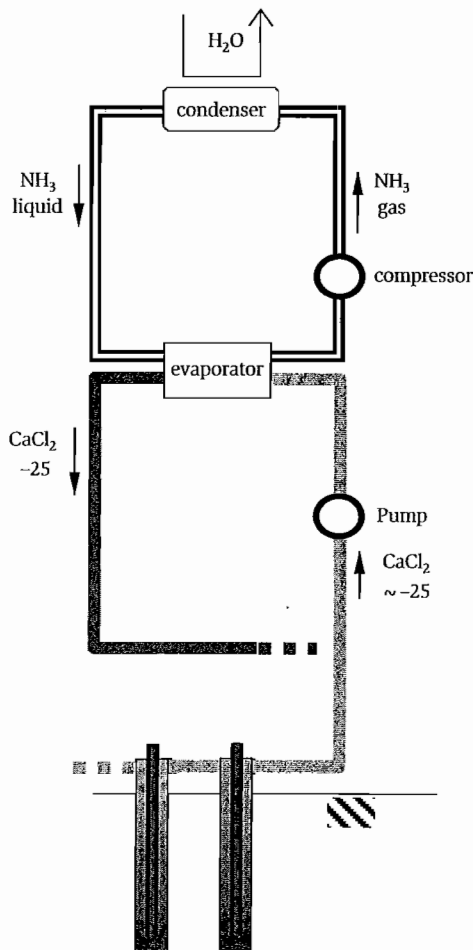


Fig. 4 - Freezing system.
Fig. 4 - Freezing system.

3.1.2. Congelamento

Le morene vengono congelate mediante circolazione di un fluido refrigerante in una serie di tubi verticali paralleli, trivellati dalla superficie con un determinato passo lungo la traccia dei due cilindri da congelare. Dati i tempi previsti per la durata del congelamento (circa 1 anno), è stata scelta la soluzione della salamoia (acqua e cloruro di calcio), fatta circolare in un circuito chiuso, fra tubi di congelamento e impianto di raffreddamento della salamoia stessa con ammoniaca. I tubi sono alimentati in parallelo da una sorgente di salamoia a -25°C , come si vede nello schema di Fig. 4, ed ogni tubo è costituito di fatto da due tubi coassiali: mandata di salamoia nel tubo centrale fino alla profondità massima, ritorno della salamoia e scambio di calore con il terreno lungo la risalita della salamoia fino alla superficie nel tubo anulare. Data la sensibilità dell'ambiente circostante, particolare attenzione è stata portata alla rumorosità dell'impianto di raffreddamento, che dovrà restare acceso giorno e notte. La

fotografia in Fig. 5 mostra la fase finale delle perforazioni per il pozzo PM54.

Durante i lavori, l'impermeabilizzazione dell'interfaccia morene/molassa è garantita dal muro di ghiaccio, che deve essere sufficientemente radicato nella molassa. Per questo, i primi tre fori di congelamento per ognuno dei pozzi, orientati a 120° sono serviti per determinare il livello della roccia intatta, dato indispensabile per fissare la lunghezza dei tubi di congelamento, il cui fondo deve trovarsi 1-1.5 m sotto il tetto del *bedrock*. Il tetto della molassa è deteriorato nei primi decimetri, e il livello di roccia intatta è stato determinato con l'ausilio di prove d'acqua (lugeon) in roccia.

3.1.3. Congelamento - condizioni al contorno

Il tempo di congelamento può essere suddiviso in due: un tempo necessario per la formazione del muro di ghiaccio, durante il quale l'impianto di raffreddamento funzionerà a pieno ritmo. Successivamente, per il mantenimento del muro di ghiaccio, sarà necessaria una energia minima. Fondamentale dato di progetto è il primo di detti tempi, trascorso il quale può iniziare la fase di scavo. Oltre naturalmente alla natura del terreno da congelare, la cui influenza è ben nota alle imprese specializzate e che può essere considerato un dato di progetto, due fattori tecnici condizionano tale tempo:

- mutue distanze tra tubi, e quindi verticalità del foro;
- influenza del movimento dell'acqua in falda. Questo problema si pone per esempio in prossimità di fiumi che drenano la falda, specialmente in tempo di pioggia.

La verticalità dei tubi installati può essere misurata con un inclinometro. La velocità dell'acqua deve essere stimata con una campagna di prove in situ, per confermare che essa si mantenga entro il limite di alcuni metri al giorno. Infatti movimento dell'acqua in questo caso essere può essere contrastato efficacemente con una campagna di iniezioni cementizie. Viene iniettato in pressione un misto cemento/bentonite, per riempire i vuoti del terreno, e costituire una barriera impermeabile ai flussi idrici osservati.

3.1.4. Congelamento - monitoraggio

La formazione del ghiaccio nel terreno viene seguita con l'ausilio di tubi di controllo, che sono in tutto e per tutto simili ai tubi di congelamento, salvo il fatto che non sono inseriti nel circuito di raffreddamento. In tali tubi, riempiti di salamoia e di cui viene parimenti misurata l'inclinazione, vengono calate a scadenze fissate delle catene termometriche che danno la temperatura del terreno circostante su tutta la profondità in una unica lettura. Si noti che non è necessario che i tubi di controllo siano verticali, anzi un tubo inclinato consente di fare misure

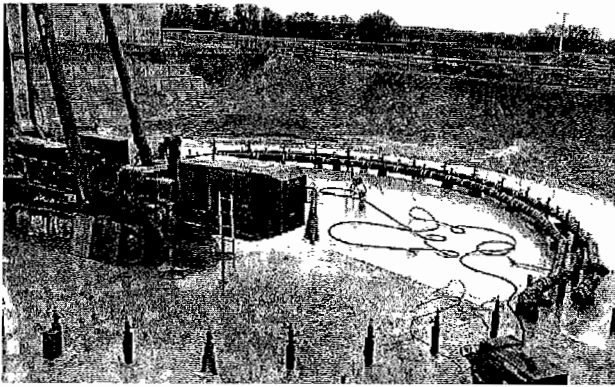


Fig. 5 - Ultime perforazioni per il PM54.
Fig. 5 - Last drilling for PM54.

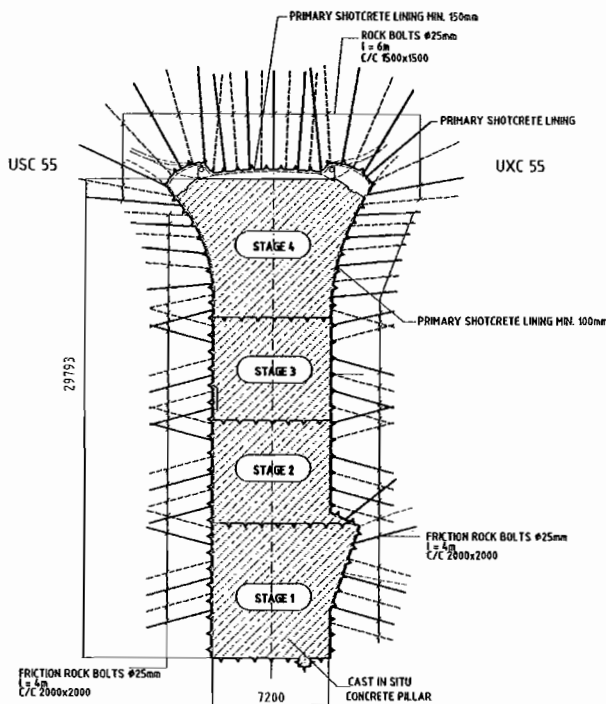


Fig. 6 - Pillar - Fasi costruttive.
Fig. 6 - Pillar - Construction stages.

di temperatura in direzione trasversale. È peraltro utile che vengano posizionati e installati per ultimi, in punti critici; per esempio, in corrispondenza di un notevole scarto misurato tra tubi di congelamento.

I livelli di falda durante il congelamento vengono letti in 8 piezometri (uno per ogni acquifero, dentro e fuori ciascun pozzo). La conferma della chiusura del muro può venire dall'osservazione di un innalzamento dei livelli di falda entro il pozzo, dovuta alla dilatazione dell'acqua nel passaggio dallo stato liquido a quello solido. Tuttavia, perché questo avvenga, occorre che il terreno sia abbastanza omogeneo perché la chiusura del muro avvenga in ogni suo punto in un lasso di tempo sufficiente-

mente breve. Se così non fosse, l'acqua disporrebbe di una via di fuga durante la formazione del muro di ghiaccio. La definitiva conferma dell'esistenza di un muro di ghiaccio chiuso può venire solo dall'osservazione di livelli di falda indipendenti dentro e fuori il pozzo (tale indipendenza può essere evidenziata da una prova di pompaggio).

Se la chiusura del muro può essere accertata in modo diretto, lo stesso non può dirsi del suo spessore, estremamente variabile da un punto all'altro. Solo un sufficiente numero di tubi di controllo permetterà di stabilire tale spessore in modo attendibile, e di autorizzare l'inizio dei lavori di scavo. È pur vero che l'accertamento dell'uniformità di tale spessore non è fondamentale quanto quello della effettiva chiusura del muro. Mentre infatti le parti più profonde e più sollecitate del muro avranno tempo di acquisire spessore durante i lavori di scavo più superficiali, lo scavo (e il conseguente pompaggio) entro un muro non chiuso avranno l'effetto di allargare le falle esistenti. Solo quando il calcestruzzo del rivestimento secondario avrà raggiunto la sua resistenza caratteristica, potrà essere spento l'impianto di congelamento, e potrà aver inizio lo scavo del *pillar*.

3.2. Il Pillar e le caverne

Le dimensioni e complessità dell'insieme delle cavità da realizzare, unito alla presenza di materiale rigonfiante hanno richiesto in fase di progettazione, l'uso di software di modellazione agli elementi finiti, in 2D come in 3D, per lo studio della struttura nel breve e nel lungo periodo.

Le esigenze di una comunicazione istantanea tra il detector CMS e la relativa informatica di controllo aveva portato i responsabili del CERN a fissare in 3 m la distanza minima fra gli estradossi delle due caverne USC e UXC. Su richiesta dei progettisti delle opere civili, è stato possibile incrementare tale distanza fino ai 7.20 m attuali.

Vincolo fondamentale nella progettazione del *pillar* è dato dalla necessità di mantenere il movimento del LEP esistente indotto dai lavori al di sotto dei 2 cm, e le fasi costruttive previste sono conseguenti a questa necessità, il cui rispetto viene verificato attraverso la modellazione agli elementi finiti (UDEC). Come indicato nella Fig. 6 è previsto di scavare, realizzare un sostegno provvisorio e infine gettare il *pillar* in 4 sezioni, dal basso verso l'alto, a partire di un pozzo di accesso scavato dalla base del PM54. Si tenga presente che ciascuna delle sezioni indicate è lunga 55 m. Le opere provvisorie di sostegno delle pareti laterali del *pillar* sono temporanee (lo stesso può dirsi della parte superiore del rivestimento delle sezioni 1, 2 e 3), e verranno rimosse durante lo scavo delle caverne UXC e USC.

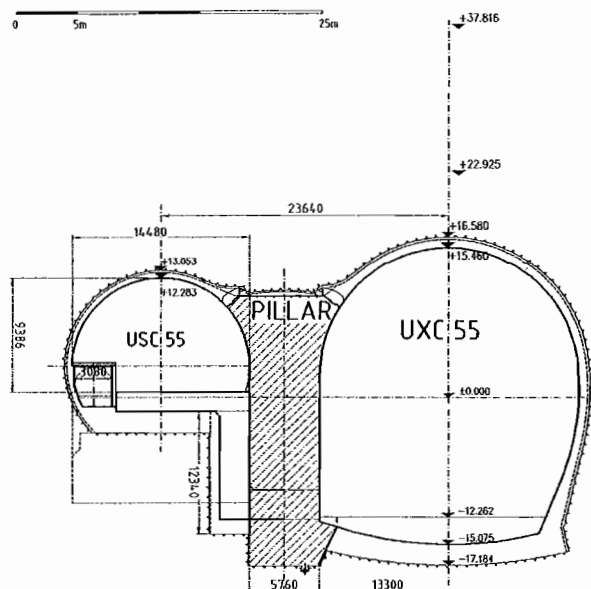


Fig. 7 - Esperimento CMS - Sezione AA.
Fig. 7 - The CMS Experiment - AA Section.

Particolare cura è stata osservata nella progettazione del monitoraggio dei movimenti di tali opere sotterranee in fase di realizzazione, e in fase di esercizio: è prevista la fornitura e posa in opera di strumentazione geomeccanica con un contratto che rappresenta circa il 4% dell'importo lavori.

La Fig. 7 mostra una sezione delle due caverne USC e UXC. Si noti la presenza dell'arco rovescio, su cui saranno ripartiti i carichi del *detector*, ma anche dell'eventuale argilla spingente. Come già accennato in precedenza, il sostegno provvisorio delle caverne si farà con tiranti in roccia e spritz-beton, ma questa fase è tuttora in fase di studio da parte dell'impresa e della DL, ed è troppo presto per poterla descrivere in modo compiuto. Si può fin d'ora notare che sono allo studio alcune varianti nella realizzazione del *pillar*, che ne rendano più agevole la realizzazione, pur avendo cura di mantenere il movimento del LEP entro limiti accettabili. Interessante è notare che il *detector* CMS, di cui un modello in scala ridotta è mostrato in Fig. 8 (nel cerchio le dimensioni degli operatori) verrà assemblato in superficie, collaudato, poi smontato e calato in fondo alla UXC 55 in dieci parti, la più pesante delle quali pesa 2.600 tonnellate.

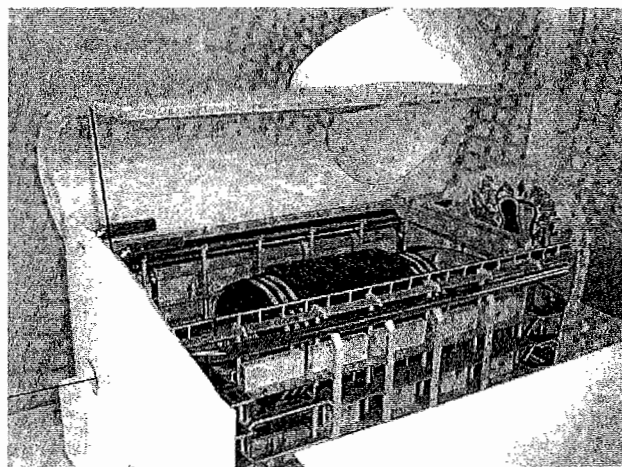


Fig. 8 - Modello in scala ridotta del CMS nella UXC55.
Fig. 8 - Scale model of CMS detector in UXC55.

4. Conclusioni

Questa nota ha lo scopo di dare una descrizione sommaria dei lavori in corso al P5 nell'ambito del progetto LHC del CERN. L'autore ringrazia il CERN e le imprese Dragados, SELI e Rodio nonché Gibb, SGI e GeoConsult per le informazioni fornite e per l'autorizzazione a pubblicarle.

LHC Project at CERN, Geneva Works at P5, CMS Experiment

Summary

The LHC project will increase the performance of the particle accelerator of the European Laboratory for Particle Physics (CERN) in Geneva, and it will involve the construction of new underground facilities of unprecedented size for this kind of works. A series of works are planned on the existing structure, many of which are underground, and this will give birth to a working site that will be opened until 2005, date at which the LHC is to be completed. This paper describes the project, and the construction methods that are anticipated.