

VALUTAZIONE PRELIMINARE DELLA RISPOSTA SISMICA DELLE OPERE SOTTERRANEE PRESSO IL PUNTO 5 DEL CERN

Ugo Carmando¹ (ugo.carmando@unina.it), Gianluca Bella² (gianluca.bella@pini.group), Antonio Bilotta¹ (antonio.bilotta@unina.it), Emilio Bilotta² (emilio.bilotta@unina.it), Marco Andreini³ (marco.andreini@cern.ch), Luca Sironi³ (luca.sironi@cern.ch), Jonathan Knappett⁴ (j.a.knappett@dundee.ac.uk), Ahmed Mubarak⁴ (a.mubarak@dundee.ac.uk), Pieter Mattelaer³ (pieter.mattelaer@cern.ch), Saverio La Mendola³ (saverio.la.mendola@cern.ch), Martin Gastal³ (martin.gastal@cern.ch), Matteo Falanesca² (matteo.falanesca@pini.group), Filippo Gianelli² (filippo.gianelli@pini.group), Davide Merlini² (davide.merlini@pini.group)

¹ Università di Napoli Federico II, Napoli, Italia

² Pini Group SA, Lugano, Svizzera

³ CERN - European Organisation for Nuclear Research, Ginevra, Svizzera

⁴ Università di Dundee, Dundee, Regno Unito

ABSTRACT. Situato presso il CERN di Ginevra, il *Large Hadron Collider* (LHC) è il più grande acceleratore di particelle al mondo ed è costituito da un anello sotterraneo di 27 km dotato di 8 punti sperimentali. In tale contesto, l'*High-Luminosity Large Hadron Collider* (HL-LHC) è un recente progetto finalizzato al miglioramento dell'esistente LHC che richiede nuove strutture sotterranee presso i punti sperimentali 1 (ATLAS, Svizzera) e 5 (CSM, Francia). Il presente articolo illustra i risultati preliminari della risposta sismica di alcune opere al punto 5. A tal fine sono state eseguite analisi dinamiche agli elementi finiti (FE), modellando il comportamento non lineare delle differenti unità geologiche incontrate, applicando una serie di segnali di ingresso conformi allo spettro di progetto. I risultati trovano la loro applicazione nella definizione dei requisiti di sicurezza sismica per le infrastrutture e gli impianti sensibili situati all'interno delle opere sotterranee in condizioni geologiche complesse.

1. INTRODUZIONE

Il CERN è un'organizzazione internazionale dotato del più grande acceleratore di particelle sotterraneo ad oggi esistente, posto su entrambi i lati del confine tra Svizzera e Francia (Figura 1). Le ricerche scientifiche saranno ulteriormente implementate grazie alla realizzazione di nuove opere in superficie e sotterranee presso i punti 1 e 5 (Tabella 1) nell'ambito del progetto HL-LHC.

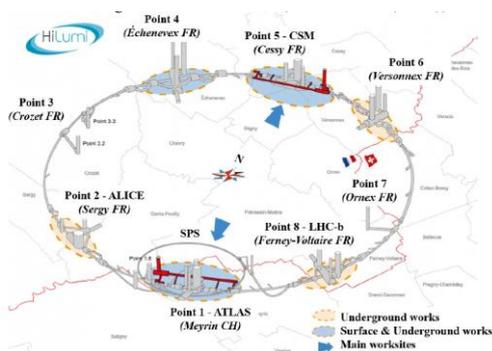


Tabella 1. Principali opere sotterranee al Punto 5.

| ID | Opera sotterranea | Specifiche |
|-------------|-----------------------------|--|
| PM57 | Pozzo | H≈60m, Ø 12m |
| US57/UW57 | Caverne | L≈50m, A _{scavo} ≈270m ² |
| UR55 | Galleria tecnica | L≈300m, A _{scavo} ≈40m ² |
| UA57/UA53 | Gallerie di servizio | L≈50m, A _{scavo} ≈45m ² |
| UL57/UL53 | Gallerie di servizio | L≈50m, A _{scavo} ≈20m ² |
| UPR53/UPR57 | Gallerie d'emergenza | L≈25m, A _{scavo} ≈25m ² |
| - | 16 cunicoli di collegamento | H≈5m, Ø 1.7 m |

Figura 1. Vista globale del Progetto HL-LHC (Merlini et al., 2022).

Il presente lavoro illustra i risultati preliminari di uno studio volto a investigare il comportamento alle azioni sismiche di due caverne profonde ravvicinate in corrispondenza del Punto 5, poste in formazioni geologiche complesse ed eterogenee. Gli obiettivi finali delle analisi sono la definizione dei requisiti di sicurezza sismica per le opere sotterranee così come la definizione dei requisiti per le strumentazioni situati al loro interno.

2. LOCALIZZAZIONE DEL SITO E DESCRIZIONE DEL MODELLO NUMERICO

Il sito è ubicato in una zona costituita da uno strato superiore di morena quaternaria che sovrasta una formazione sedimentaria costituita da molasse caratterizzate dalla presenza di orizzonti eterogenei di arenarie e

marne con possibile presenza di minerali argillosi potenzialmente rigonfianti (illite/smectite) e potenzialmente contenente idrocarburi (Kurzweil, 2004; Merlini *et al.*, 2022). Le opere in sotterraneo in questione hanno una copertura di ca. 60 m e sono state realizzate all'interno della molassa, ad eccezione dei primi 20 m del pozzo PM57 il quale ricade nelle unità moreniche. Le molasse sono caratterizzate da bassa permeabilità. Il punto 5 ricade in zona 3 ("sismicità moderata") secondo le norme Francesi applicabili e l'azione sismica, definita in termini di accelerazione di picco al suolo di riferimento (PGA) su terreno di tipo A, è valutata pari a 0.090 g, 0.112 g, 0.135 g e 0.159 g per periodi di ritorno rispettivamente pari a 243 anni, 475 anni, 821 anni e 1303 anni.

2.1 Modellazione agli Elementi Finiti

Lo studio della risposta all'azione sismica è stato eseguito con riferimento a due caverne tecniche esistenti denominate UXC55, ricorrendo ad analisi numeriche bidimensionali agli elementi finiti mediante il codice di calcolo PLAXIS v.20 (Figura 2). I rivestimenti delle cavità sono modellati con elementi elastici a piastra (Tabella 2). Il modello è suddiviso in tre strati principali, a partire dall'alto: *i*) depositi morenici da 0 m a -50 m; *ii*) molassa suddivisa in sotto-strati, da -50 m a -100 m; *iii*) molassa di media rigidità, da -100 m a -170 m. A ciascuna litologia di terreno/roccia sono state assegnate le rispettive proprietà geotecniche valutate sia da indagini geognostiche che dal riscontro degli scavi. Tutti le unità sono state modellate mediante con criterio di rottura Hardening Soil isotropo elasto-plastico, non lineare e incrudimento isteretico come riportato in Tabella 3 (Benz *et al.* 2009).

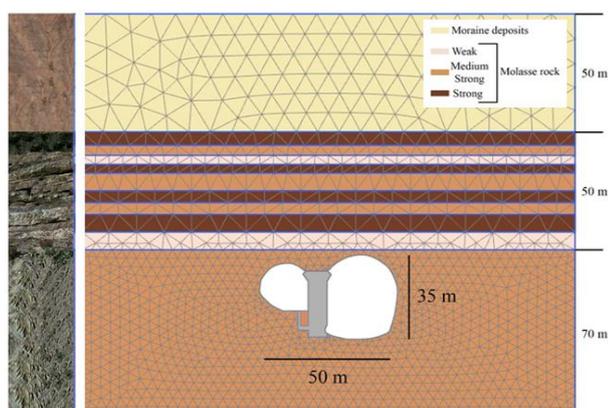


Tabella 2. Proprietà meccaniche per le cavità UXC55.

| Parametro | Unità | Shotcrete C35/54 | Concrete C50/60 |
|-----------|----------------------|--------------------|--------------------|
| γ | kN/m ³ | 25 | 25 |
| E | kN/m ² | $34.63 \cdot 10^6$ | $37.24 \cdot 10^6$ |
| EA | kN/m | $45 \cdot 10^6$ | $230 \cdot 10^6$ |
| EI | kN/m ² /m | $6.34 \cdot 10^6$ | $739 \cdot 10^6$ |

Figura 2. Modello 2D Plaxis: stratigrafia e mesh in corrispondenza delle due caverne UXC55.

Tabella 3. Proprietà geotecniche delle unità al Punto 5.

| Parametro | Unità | Morena | Molassa | | |
|-----------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | | Weak | Medium strong | Strong |
| γ_{sat} | [kN/m ³] | 23 | 24 | 24 | 24 |
| E_{50}^{ref} | [kN/m ²] | $30 \cdot 10^3$ | $340 \cdot 10^3$ | $1.2 \cdot 10^6$ | $2.42 \cdot 10^6$ |
| E_{oed}^{ref} | [kN/m ²] | $30 \cdot 10^3$ | $340 \cdot 10^3$ | $700 \cdot 10^3$ | $1.8 \cdot 10^6$ |
| E_{ur}^{ref} | [kN/m ²] | $60 \cdot 10^3$ | $680 \cdot 10^3$ | $2.4 \cdot 10^6$ | $4.84 \cdot 10^6$ |
| G_0^{ref} | [kN/m ²] | $92 \cdot 10^3$ | $2.24 \cdot 10^6$ | $2.72 \cdot 10^6$ | $4.1 \cdot 10^6$ |
| $\gamma_{0.7}$ | [-] | $0.09 \cdot 10^{-3}$ | $1.2 \cdot 10^{-3}$ | $1.2 \cdot 10^{-3}$ | $1.2 \cdot 10^{-3}$ |
| c'_{ref} | [kN/m ²] | 0 | 140 | 792 | 1660 |
| ϕ' | [°] | 35 | 18 | 50 | 53 |
| ψ | [°] | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ν | [-] | 0.30 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| m | [-] | 0.5 | 0.0 | 0.7 | 0.7 |

Sono state definite inoltre le condizioni al contorno statiche che limitano gli spostamenti orizzontali e verticali alla base e gli spostamenti orizzontali su entrambi i lati. È stata adottata una maglia di elementi triangolari opportunamente infittita nelle zone d'interesse. I bordi verticali del modello sono stati impostati a cinque volte la profondità della caverna per ridurre l'effetto della riflessione delle onde al contorno nell'area di interesse (Visone *et al.*, 2010). Gli input sismici sono stati recuperati dall'Engineering Strong-Motion Database (ESM) in modo da essere compatibili con lo spettro orizzontale di progetto previsto dall'Eurocodice 8 per un terreno di tipo "A" con vita nominale di 100 anni; pertanto, l'accelerazione di picco al suolo è stata scalata a 0.15 g. La storia temporale dell'accelerazione in ingresso è stata applicata alla base del modello e le condizioni al contorno laterali sono state impostate come equivalenti a una condizione di campo libero. Opportune fasi di calcolo preliminari hanno consentito di riprodurre lo stato geostatico, mentre successive fasi hanno simulato lo scavo delle cavità e l'installazione dei rivestimenti/supporti.

2.2 Segnali sismici in ingresso

In Tabella 4 sono riportati i cinque accelerogrammi selezionati dal database ESM (Luzi *et al.*, 2020) ed applicati alla base del modello: nello specifico, è stata applicata la componente orizzontale dell'accelerazione massima prodotta da un evento sismico e registrata su roccia (PGA) Nelle simulazioni è utilizzato lo schema di integrazione di Newmark, stimando un passo temporale pari a 0.005s tale da modellare accuratamente la propagazione delle onde e ridurre l'errore dovuto all'integrazione delle funzioni della storia temporale in base alle proprietà del materiale e alle dimensioni dell'elemento.

Tabella 4. Segnali sismici selezionati.

| Accelerogramma | Data evento | Etichetta componente di registrazione | PGA [g] | Intensità di Arias [m/s] | Durata Significativa [s] |
|----------------|-------------|---------------------------------------|---------|--------------------------|--------------------------|
| Friuli | 15/09/1976 | HNN | 0.128 | 0.095 | 2.850 |
| Centro Italia | 30/10/2016 | HNE | 0.146 | 0.183 | 7.255 |
| Islanda_1 | 17/06/2000 | HN2 | 0.123 | 0.165 | 3.595 |
| Islanda_2 | 17/06/2000 | HN3 | 0.155 | 0.192 | 3.795 |
| Islanda_5 | 29/05/2008 | HN2 | 0.130 | 0.112 | 3.935 |

3. RISULTATI

3.1 Applicazione dell'accelerazione pseudo-spettrale del sisma del Friuli 1976

La Figura 5 mostra un confronto in termini di accelerazione pseudo-spettrale (PSA) in funzione del suo periodo di vibrazione (T): essa è calcolata lungo tre assi verticali, ossia lungo la cavità principale, a 90 m e a 300 m di distanza da essa. L'amplificazione dell'accelerazione rispetto al basamento roccioso ("Bedrock"), è calcolata in punti rappresentativi del modello, ubicati alla base delle alternanze ("Bottom border molasse-molasse"), al bordo superiore delle alternanze ("Upper border moraine-molasse") e al piano campagna ("Ground level"). I due assi centrali (0 e 90 m) sono interessati dalla presenza delle cavità. Il basamento della cavità UXC55 mostra un'amplificazione maggiore rispetto alla roccia circostante a periodi molto bassi (picco a 0.15s). Dal confronto con un punto in calotta, appare chiaro che gli spettri di risposta cambiano con la posizione lungo il perimetro della sezione trasversale della cavità.

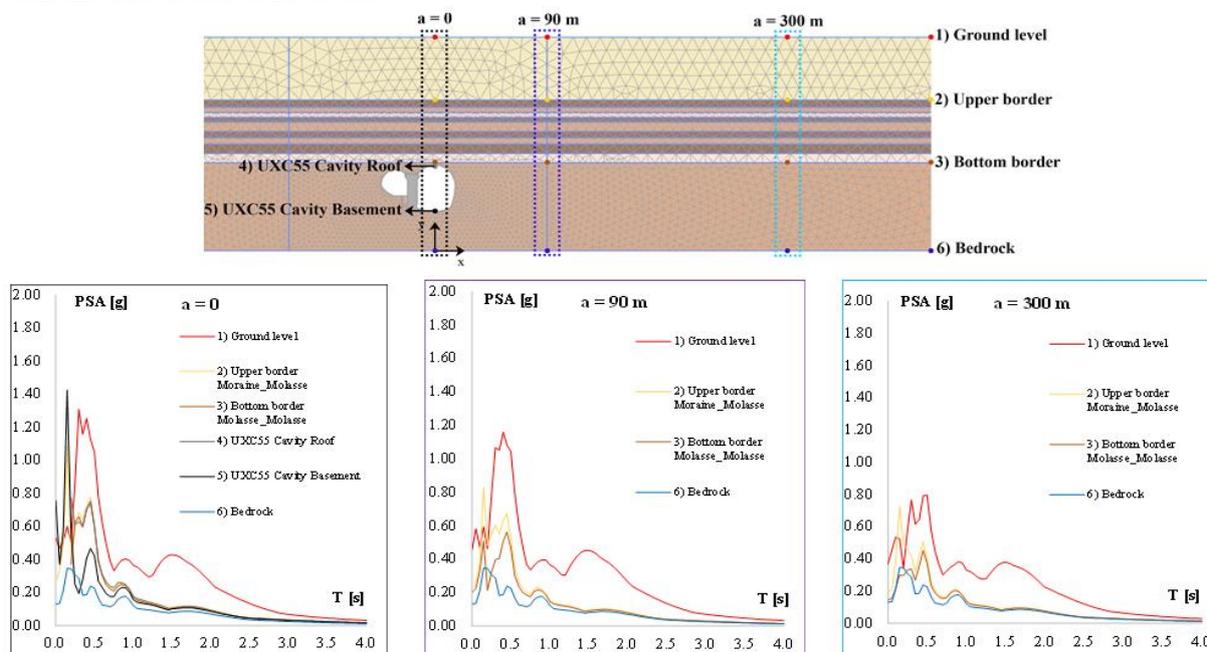


Figura 3. Valori di PSA lungo tre assi verticali, relativi al segnale del Friuli 1976, in punti significativi del modello.

3.2 Confronto tra i segnali in ingresso

I risultati ottenuti utilizzando l'intero set di segnali in ingresso sono riportati nella Figura 4 in termini di spettri di risposta. Sul perimetro della cavità (sia al basamento che in calotta) gli spettri di risposta mostrano un

picco maggiore intorno a 0.15s, che corrisponde al periodo predominante dei segnali di ingresso; un secondo picco, intorno a 0.5s, appare predominante nella risposta degli strati rocciosi ("Upper border" e "Bottom border"). Ciò sembra indicare una risposta piuttosto rigida del sistema di cavità che potrebbe essere influenzata dal comportamento rigido del pilastro in calcestruzzo largo 7 m e alto 28 m che separa le due cavità. Un confronto diretto tra gli spettri medi in corrispondenza del basamento e della calotta della cavità UXC55 conferma che la risposta spettrale è influenzata dalla posizione lungo il perimetro della sezione trasversale della cavità.

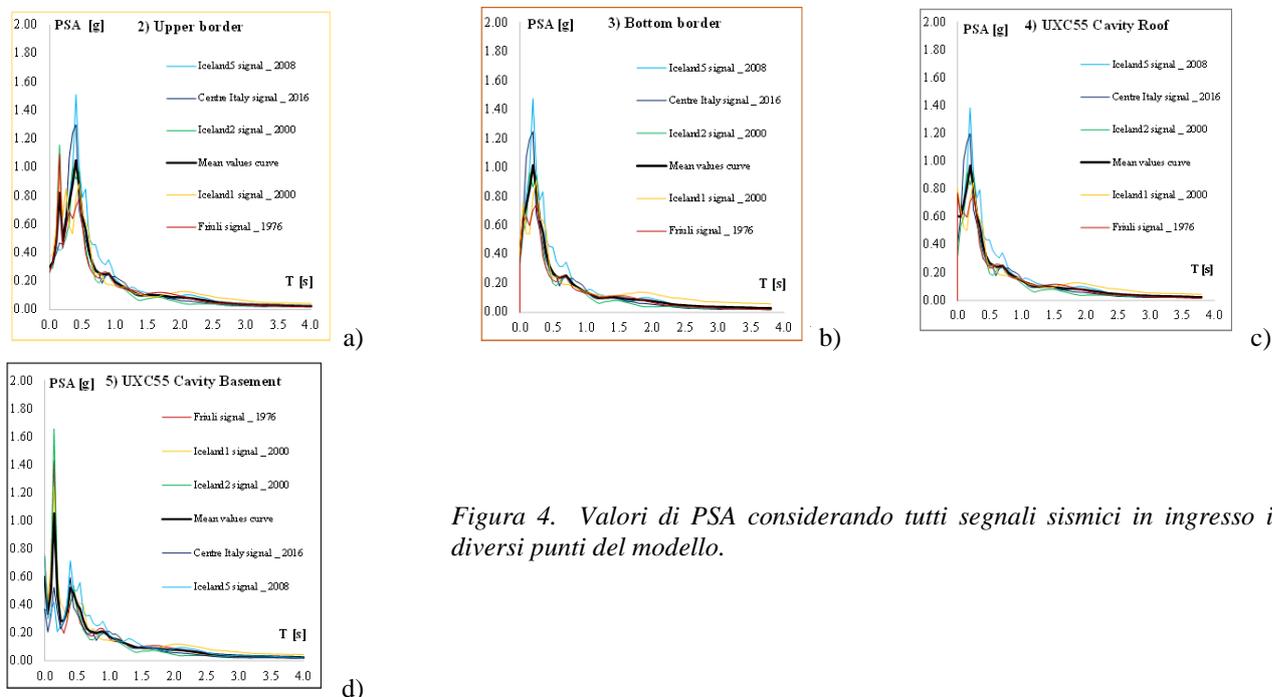


Figura 4. Valori di PSA considerando tutti segnali sismici in ingresso in diversi punti del modello.

4. CONCLUSIONI

Nel presente studio vengono espone le analisi numeriche preliminari applicate ad un'ampia infrastruttura sotterranea ubicata presso il CERN. Differenti segnali sismici in ingresso sono stati applicati al *bedrock* e propagati fino al piano campagna, valutando gli effetti sulle opere in oggetto. I risultati delle analisi dinamiche mostrano come la risposta sismica varia lungo il perimetro delle cavità studiate. Pertanto, una valutazione approfondita di tale risposta sismica delle opere sotterranee del CERN contribuisce a una stima più accurata della sicurezza strutturale e dei requisiti di integrità funzionale delle apparecchiature e impianti, unici nel loro genere, ivi ospitati. Sviluppi futuri terranno faranno uso di un maggior numero di segnali di ingresso per tenere in opportuna considerazione le incertezze del rischio sismico dell'area. Verranno infine effettuate analisi FEM tridimensionali per valutare la risposta delle cavità anche lungo il proprio asse longitudinale.

5. BIBLIOGRAFIA

- Benz T., Vermeer P.A., Schwab R. (2009). A small – strain overlay model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 33(1): 25-44.
- Kurzweil H. C. (2004). The LHC-Project of CERN – Large Caverns in Soft Rock. A Challenge for Scientists and Engineers, GEOCONSULT Consulting Engineers, 2004.
- Luzi L., Lanzano G., Felicetta C., D'Amico M. C., Russo E., Sgobba S., Pacor F. & ORFEUS Working Group 5. (2020, July 10). Engineering Strong Motion Database (ESM), version 2.0 (Version 2.0). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).
- Merlini D., Gianelli F., Falanesca M., Bella G., Hernandez A.L. (2022). CERN, HL-LHC Project: Numerical Modelling and Design Challenges for the New Underground Facilities at Point 5. *Proc. IACMAG 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, 3: 413-421, Springer.
- Vivone C., Bilotta E., De Magistris F. S. (2010). One – Dimensional Ground Response as a Preliminary Tool for a Dynamic Analyses in Geotechnical Earthquake Engineering. *Journal of Earthquake Engineering*, 14: 131-162.