

PROGETTO DI IMPIANTO IDROELETTRICO DI REGOLAZIONE SUL BACINO DI CAMPOLATTARO (BN)

MARZO 2011



COMMITTENTE



R.E.C. S.r.l.
Via Uberti 37-20129 Milano

RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI IMPRESE

Mandataria :

ETATEC S.R.L.
SOCIETA' DI INGEGNERIA

20133 MILANO - via Bassini, 23 - tel.(02) 26681264
fax (02) 26681553 - E-Mail: ETATEC@ETATEC.IT

AZIENDA CON SISTEMA DI QUALITA' CERTIFICATO UNI EN ISO 9001:2008
SICV - SC 00-07/EA 34




PROGETTISTA: Prof. Ing. Alessandro Paoletti

Mandante :

CeAS

SISTEMA QUALITA'
UNI EN ISO 9001:2008
CERTIFICATO K031 RILASCIATO
DA

CENTRO DI ANALISI STRUTTURALE S.R.L.
AZIENDA CON SISTEMA QUALITA'

SERVIZI DI INGEGNERIA CIVILE
CIVIL ENGINEERING SERVICES




PROGETTISTA: Dott. Ing. Giovanni Canetta

TITOLO ELABORATO

RELAZIONE SULLA SISMICA DEI MANUFATTI IN SOTTERRANEO

Revisione	Data	Descrizione					Redazione	Verifica	Approvazione
A	30/07/2012	EMISSIONE PER RECEPIMENTO INTEGRAZIONI VIA					M.CARNI	CANETTA	CANETTA
B									
C									
CODICE COMMESSA		TIPOLOGIA COMMESSA	TIPOLOGIA ELABORATO	FASE PROGETTAZIONE	PARTE DI IMPIANTO	PROGRESSIVO ELABORATO	SCALA:		
10062		PG	R	D	A	076	—		

INDICE

1. SCOPO	3
2. RIFERIMENTI	4
2.1 Riferimenti Normativi	4
2.2 Riferimenti bibliografici	4
3. CARATTERIZZAZIONE SISMICA	5
3.1 Indicazioni sulla pericolosità sismica di base dell'area di Campolattaro / Pontelandolfo	5
3.2 Database di accelerogrammi sismici	6
3.3 Rexel	6
3.4 Aggiornamento del database di accelerogrammi naturali italiani e diffusione dei segnali sismici mediante il portale web "sisma"	6
3.5 Definizione dell'input sismico di riferimento	7
3.5.1 Definizione del "target spectrum"	7
3.5.2 Ricerca nel database degli accelerogrammi da considerare nell'analisi (Preliminary database search)	7
3.5.3 Definizione delle specifiche della selezione (Spectrum matching parameters and analysis options)	7
3.5.4 Ricerca delle combinazioni	7
3.5.5 Analisi dell'output	8
3.6 Definizione dell'input sismico per la sezione di galleria	8
4. EFFETTI DEL SISMA SUI MANUFATTI IN SOTTERRANEO	9
4.1 Effetti del sisma sul rivestimento della galleria	9
5. METODOLOGIA DI VALUTAZIONE DELL'AZIONE SISMICA PER LE GALLERIE NATURALI	10
5.1 Generalità	10
5.2 Definizione dell'input sismico	10
5.3 Modelli di calcolo	10
5.3.1 Modelli al continuo	10
5.3.2 Modellazione della roccia come mezzo discontinuo	11
6. DIMENSIONAMENTO DEL RIVESTIMENTO DI GALLERIA IN CALCESTRUZZO ARMATO	12

1. Scopo

Scopo del presente documento è illustrare la metodologia di dimensionamento e verifica dei rivestimenti delle gallerie e dei manufatti sotterranei previsti nella progettazione dell'impianto idroelettrico di regolazione di Campolattaro (BN).

Come già evidenziato nei documenti di progetto, e in particolare nelle Relazioni Geologica e Geotecnica, la zona che ospiterà l'impianto è soggetta ad un rischio sismico molto rilevante, della cui presenza si è tenuto conto in tutte le fasi di progettazione finora sviluppate.

In particolare, per quanto si riferisce ai rivestimenti di galleria, la presenza del carico sismico non è stata esplicitamente evidenziata in calcoli o disegni, ma è implicitamente considerata nella presenza in tutti i manufatti di rivestimenti in calcestruzzo, per lo più armato.

In sede di sviluppo del progetto esecutivo, dunque, verranno esplicitati e dettagliati tutti i calcoli di verifica sismica.

Va precisato che il tema della verifica sismica di manufatti sotterranei non è ad oggi normata in modo specifico né a livello nazionale (il D.M. 14 gennaio 2008, rif. [2] contiene solo indicazioni di indirizzo generale), né internazionale.

Ci si riferirà quindi a riferimenti specifici di letteratura e alle raccomandazioni AGI (rifer. da [5] a [17]), secondo una linea progettuale qui presentata.

La presente relazione, dunque:

- illustra le metodologie di definizione dell'input sismico per i manufatti sotterranei, che è molto diverso da quello assunto per i manufatti di superficie,
- illustra inoltre gli effetti che l'onda sismica può avere sui manufatti stessi e
- descrive i criteri che verranno adottati nello sviluppo del progetto definitivo per far fronte ai requisiti di resistenza imposti da questo tipo di carico.
- illustra le sezioni tipiche di rivestimento in progetto concepite per resistere alle sollecitazioni sismiche. Quest'ultima parte viene sviluppata con specifico riferimento ad una delle sezioni di galleria più critiche del progetto, ovvero quella della galleria di restituzione.

2. Riferimenti

2.1 Riferimenti Normativi

- [1] Legge 5-11-1971 n. 1086. Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso e a struttura metallica
- [2] D.M. 14/01/2008. Norme tecniche per le costruzioni. (G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008)
- [3] Circ. Min. Infrastrutture e Trasporti n.617 del 02/02/2009. Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 Gennaio 2008.
- [4] CEN, European Committee for Standardization (2003). Eurocode 8. Design provisions for earthquake resistance of structures. Part 1.11: general rules, seismic actions and rules for buildings. EN 1998-1.

2.2 Riferimenti bibliografici

- [5] SEED, H.B and Idriss, I.M. "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis", Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Report n° UBC/EERC-70/10 p. 48, December 1970.
- [6] HOEK & BROWN, 1997. Practical Estimates of Rock Mass Strength. Int. J. Rock Mech. – Vol.34(8) – pagg. 1165-1186
- [7] A.G.I. (2005) –Associazione Geotecnica Italiana, Aspetti Geotecnici della Progettazione in Zona Sismica- Linee Guida, ed. Pàtron, Bologna - <http://www.associazionegeotecnica.it/~agi/>
- [8] Barla G. (Coord.). RELUIS. Scientific Report 2007. Research Line N° 6. Innovative methods for the design of geotechnical systems.
- [9] Barla G. (2005), Sviluppi nell'analisi progettuale delle opere in sotterraneo. V Conferenza Annuale dell'Associazione Geotecnica Italiana "Arrigo Croce", dicembre 2004, pubblicata sulla Rivista Italiana di Geotecnica, 3, pp. 11-67
- [10] Lai C.G., Foti S., Rota M., (2009) "Input Sismico e Stabilità Geotecnica dei Siti di Costruzione" Collana dei Manuali di Progettazione Antisismica – Vol. 6, IUSS Press, Pavia
- [11] Schnabel, P. B., J. Lysmer and H. Bolton Seed. "SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites," University of California, Berkeley, Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-71/12, 1972.
- [12] Itasca C.G. – FLAC, Fast Lagrangian Analysis of Continua. Rel. 6.0, 2009. Itasca C.G., Minneapolis, Minnesota US
- [13] Itasca C.G. – UDEC Universal Distinct Element Code, rel. 5.0 2010. Itasca C.G., Minneapolis, Minnesota US
- [14] Iervolino I., Chioccarelli E., Convertito V. (2011) Engineering design earthquakes from multimodal hazard disaggregation, Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 31(9): 1212–1231.
- [15] Iervolino I., Maddaloni G., Cosenza E. (2010). A note on selection of time-histories for seismic analysis of bridges in Eurocode 8. Journal of Earthquake Engineering, 13 (8):1125-1152
- [16] Iervolino I., Maddaloni G., Cosenza E. (2008). Eurocode 8 compliant real record sets for seismic analysis of structures. Journal of Earthquake Engineering, 12(1):54-90.
- [17] Iervolino I., Cornell C.A. (2005). Record selection for nonlinear seismic analysis of structures. Earthquake Spectra, 21(3):685-713.

3. Caratterizzazione sismica

3.1 Indicazioni sulla pericolosità sismica di base dell'area di Campolattaro / Pontelandolfo

Con riferimento all'allegato A delle Norme Tecniche per le Costruzioni (rif. [2]), e a quanto calcolato e descritto nella Relazione Geologica e nella Relazione Geotecnica, si ottengono le seguenti informazioni sulla pericolosità sismica di base:

T_R [anni]	a_g [g]	F_o [-]	T_C^* [s]
30	0.062	2.431	0.280
50	0.083	2.372	0.296
72	0.101	2.344	0.314
101	0.121	2.338	0.324
140	0.144	2.327	0.334
201	0.174	2.317	0.344
475	0.266	2.304	0.372
975	0.364	2.321	0.392
2475	0.503	2.455	0.433

Tabella 1 – Valori dei parametri a_g , F_o e T_c^* per i periodi di riferimento.

Considerando le informazioni di pericolosità sismica ottenute nel corso del progetto S1 DPC-INGV riferite al nodo più vicino, lo spettro di risposta elastico che se ne ricava è rappresentato nella figura sottostante. Come si può notare lo spettro mostra un picco di accelerazione spettrale approssimativamente per periodi intorno a 0.2s.

Lo spettro di riferimento sarà quello correlato alla vita di progetto dell'impianto, assunta in 50 anni.

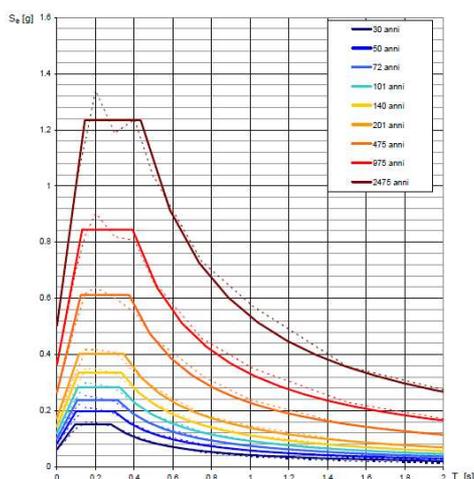


Figura 1 – Spettri di risposta elastici per periodi di ritorno T_r di riferimento (le linee continue rappresentano gli spettri di Normativa, le linee tratteggiate si riferiscono a agli spettri di progetto S1-INGV da cui sono derivati).

Tale caratterizzazione non è però sufficiente alla definizione dell'input sismico di progetto di un manufatto sotterraneo. Le vigenti norme raccomandano l'esecuzione di analisi della risposta sismica locale e la definizione di accelerogrammi di progetto, basati su dati sismici relativi al sito (registrazioni di eventi sismici su affioramenti rocciosi e deconvoluzione del segnale sismico attraverso gli strati del terreno e della roccia, fino alla profondità del manufatto). Tale metodologia è descritta ai paragrafi seguenti.

3.2 Database di accelerogrammi sismici

Sono disponibili più data base per selezionare accelerogrammi compatibili con il sito, e di origine sperimentale. In Italia sono disponibili le banche dati fornite dagli organismi Itaca, e Rexel. In campo internazionale le più note ed affidabili sono Cosmos, Peer e SIMBAD, che comprendono dati raccolti durante terremoti italiani.

E' stata stabilita anche una corrispondenza tra gli accelerogrammi forniti dalla diverse banche dati, pertanto il ricorso all'una o all'altra non costituisce fonte di sostanziali differenze. Nel lavoro proposto si farà riferimento alle banche dati Itaca, e Rexel,

3.3 Rexel

Il 28/07/2011 è stata rilasciata la versione 3.2 beta di REXEL che sostituisce la versione 3.1 beta. REXEL permette la ricerca di combinazioni di accelerogrammi naturali compatibili con gli spettri delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC '08), dell'Eurocodice 8.

Gli accelerogrammi possono rispecchiare caratteristiche di sorgente di interesse in termini di magnitudo e distanza epicentrale e misure d'intensità del terremoto.

Le registrazioni accelerometriche alle quali si fa riferimento sono quelle dell'European Strong Motion Database (ESD), quelle dello Italian Accelerometric Archive (ITACA).

E' stabilita inoltre una corrispondenza tra le registrazioni di ITACA con i codici degli accelerogrammi restituiti da REXEL, o del database con record da tutto il mondo: Selected Input Motions for Displacement-Based Assessment and Design (SIMBAD).

Le registrazioni di queste banche dati sono contenute all'interno di REXEL.

3.4 Aggiornamento del database di accelerogrammi naturali italiani e diffusione dei segnali sismici mediante il portale web "sisma"

Il database di accelerogrammi naturali italiani, sviluppato a partire dal 2005, è costituito da registrazioni strong-motion che sono state sottoposte, singolarmente, ad un processo di correzione ex-novo per eliminare il rumore di tipo strumentale o ambientale. Tale operazione di correzione è stata effettuata nell'ambito di un progetto di ricerca congiunto tra l'Università di Roma La Sapienza e la University of California Los Angeles.

Attualmente si dispone quindi di una base di dati omogenea e non affetta da errori di filtraggio e conseguentemente i valori dei parametri del moto sismico ricavati dalle registrazioni sono risultati caratterizzati da un elevato grado di affidabilità.

Per quanto riguarda le postazioni accelerometriche, sono state aggiornate le informazioni riguardanti la localizzazione delle stazioni di registrazione (latitudine e longitudine), necessarie per una corretta definizione della distanza sorgente-sito. In particolare, per tutte le coppie sorgente-sito, sono stati ricalcolati i valori di distanza epicentrale e ipocentrale; inoltre, nel caso di eventi per i quali si è potuto disporre di informazioni sulla geometria del piano di faglia, è stato possibile calcolare i valori della closest distance (intesa come distanza minima tra sito e piano di rottura della faglia) e della Joyner & Boore distance (intesa come distanza minima tra il sito e la proiezione in superficie del piano di rottura di faglia).

Per il lavoro in oggetto importa segnalare che è stata posta particolare attenzione alla caratterizzazione geologica e geotecnica del sottosuolo delle stazioni di registrazione. Le informazioni reperite hanno riguardato l'acquisizione di cartografia geologica a varie scale, sondaggi geognostici, risultati di

prove in sito e in laboratorio per la caratterizzazione fisica e meccanica dei materiali costituenti il sottosuolo delle stazioni di registrazione.

L'interesse è parimenti rivolto ai profili della velocità delle onde di taglio VS, in modo da pervenire ad una classificazione del sottosuolo delle stazioni in accordo con la normativa sismica europea (Eurocodice 8, rif. [4]) e italiana (NTC2008, rif. [2]). A seguito di una valutazione critica dei dati raccolti, è stata effettuata una classificazione del sottosuolo di tutte le stazioni annoverate nella banca dati basata sul valore del parametro Vs30, menzionato nell'Eurocodice.

3.5 Definizione dell'input sismico di riferimento

La ricerca di combinazioni di accelerogrammi naturali compatibili con gli spettri NTC o EC8 avviene secondo quattro passi successivi, brevemente descritti nel seguito. Per i dettagli, si rimanda a [17].

3.5.1 Definizione del "target spectrum"

Tale definizione coincide con quanto già descritto al precedente paragrafo 3.1. Tale spettro costituisce lo spettro elastico di risposta per il sito di riferimento.

Su tale spettro viene quindi effettuata una *disaggregazione*, ovvero una procedura di tipo statistico che permette di conoscere il contributo alla sismicità (hazard) di un dato sito di ogni coppia di magnitudo (M) e distanza (R).

L'analisi di disaggregazione può fornire importanti indicazioni per la definizione degli intervalli da utilizzare nella successiva fase di selezione dei record.

3.5.2 Ricerca nel database degli accelerogrammi da considerare nell'analisi (Preliminary database search)

L'utente può selezionare record da due diversi database (ESD o ITACA) scegliendo intervalli di

1. M (magnitudo momento per record di ESD associati a suoli di classe da A a D, magnitudo locale per associati a suoli di classe E; magnitudo momento per tutti i record ITACA) e distanza epicentrale R in chilometri (la scelta degli intervalli di M ed R può essere guidata dalla disaggregazione dell'hazard);
2. Picco di accelerazione al suolo (PGA) della componente orizzontale del moto (espresso in g);
3. Picco di velocità (PGV) della componente orizzontale del moto (in m/s);
4. Indice di Cosenza e Manfredi (ID) della componente orizzontale del moto (tale scelta può essere guidata dalle curve di ID condizionate alla PGA).
5. Intensità di Arias (IA) della componente orizzontale del moto (in m/s).

3.5.3 Definizione delle specifiche della selezione (Spectrum matching parameters and analysis options)

In questa fase si specifica la tolleranza con cui lo spettro medio della combinazione deve rispettare il target in un arbitrario intervallo di periodi, comunque compreso tra 0 e 4 sec.

Più precisamente, è necessario specificare la sottostima (Limite inferiore) e la sovrastima (Limite superiore) massime (in termini percentuali) rispetto allo spettro di riferimento e l'intervallo di periodi [T1, T2] (in secondi) di interesse.

3.5.4 Ricerca delle combinazioni

A questo punto si passa ad analizzare tutte le possibili combinazioni di sette spettri che si possono costruire a partire dai risultati del passo 3.5.2 al fine di verificarne la compatibilità con lo spettro di normativa.

3.5.5 **Analisi dell'output**

Per ciascuna combinazione visualizzata, si ottengono le informazioni sismologiche sui singoli accelerogrammi (insieme ai valori medi di magnitudo e distanza della combinazione) e vengono calcolate, per tutte le combinazioni della lista di output, la deviazione dello spettro medio della combinazione rispetto allo spettro elastico target:

$$\delta_{medio} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Sa_{medio}(T_i) - Sa_{target}(T_i)}{Sa_{target}(T_i)} \right)^2}$$

e la deviazione di ciascun accelerogramma della combinazione rispetto allo spettro target:

$$\delta_j = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Sa_j(T_i) - Sa_{target}(T_i)}{Sa_{target}(T_i)} \right)^2}$$

3.6 **Definizione dell'input sismico per la sezione di galleria**

Tutto quanto sopra si riferisce alla definizione di un accelerogramma significativo per il sito, riferito ad una superficie rocciosa affiorante.

Poiché il segnale sismico si modifica profondamente sia con la profondità, sia con la stratigrafia, è necessario trasformare gli accelerogrammi selezionati in altri riferibili alla tipologia di terreno o roccia e alla profondità del manufatto sotterraneo.

Tale operazione si definisce *deconvoluzione* e viene effettuata con software appositi, che restituiscono un accelerogramma riferito ad un "bedrock" ovvero ad un letto roccioso profondo sottostante il manufatto in esame.

Tale metodologia è descritta brevemente nel successivo cap. 5.

4. Effetti del sisma sui manufatti in sotterraneo

I tunnel rientrano tra le strutture meno vulnerabili ai sismi: difatti la verifica sismica dei tunnel non è diffusa nella pratica professionale corrente.

Ciò è dovuto in parte all'elevato grado di confinamento dei tunnel, in parte all'elevata capacità statica di accettare cerniere plastiche nei rivestimenti.

Nonostante ciò, sono riportati danneggiamenti importanti in tunnel profondi a seguito, ad esempio, dei terremoti di Kobe (J), Loma Prieta(USA) e Düzce (T).

Alla luce di queste case histories, sarebbe auspicabile l'adozione di criteri antisismici nella progettazione di tunnel in zone sismiche, specialmente in prossimità di importanti faglie.

Il riferimento qui adottato sono le Raccomandazioni AGI del 2005 (rif.[7]), alle quali si rimanda per l'approfondimento degli effetti del sisma sulle strutture, che a loro volta si rifanno al ISO TC 98/SC 3 N229 – *Seismic actions for designing geotechnical works, 2003*. Altri riferimenti rilevanti sono Barla, 2005 e Barla, 2007, rife. [8] e [9].

4.1 Effetti del sisma sul rivestimento della galleria

Quando le onde sismiche investono una galleria, il rivestimento si deforma sia in direzione trasversale, sia in direzione longitudinale.

1. In direzione trasversale la sezione della galleria si ovalizza per effetto delle deformazioni di taglio del terreno e dei conseguenti momenti flettenti.
2. In direzione longitudinale gli effetti del terremoto possono essere decomposti in azioni di compressione-trazione lungo l'asse della galleria e in azioni di taglio-flessione trasversali all'asse della galleria. L'effetto delle azioni sismiche agenti in direzione longitudinale può essere analizzato assumendo che il segnale sismico sia perfettamente coerente, cioè che differenti punti nello spazio siano soggetti allo stesso segnale con differenti tempi di arrivo.

Le onde incontrano la superficie del tunnel causando distorsioni del rivestimento del tunnel stesso, come schematizzato nella figura seguente. In generale le sollecitazioni dovute alla propagazione delle onde nella direzione longitudinale del tunnel (casi a e b in figura) inducono fessure radiali, meno pericolose e non critiche per la stabilità dell'opera.

Le sollecitazioni indotte invece dalle onde di taglio hanno l'effetto di ovalizzare la sezione della galleria (caso c), ciò causa fessure longitudinali che possono arrivare a compromettere la stabilità del rivestimento stesso.

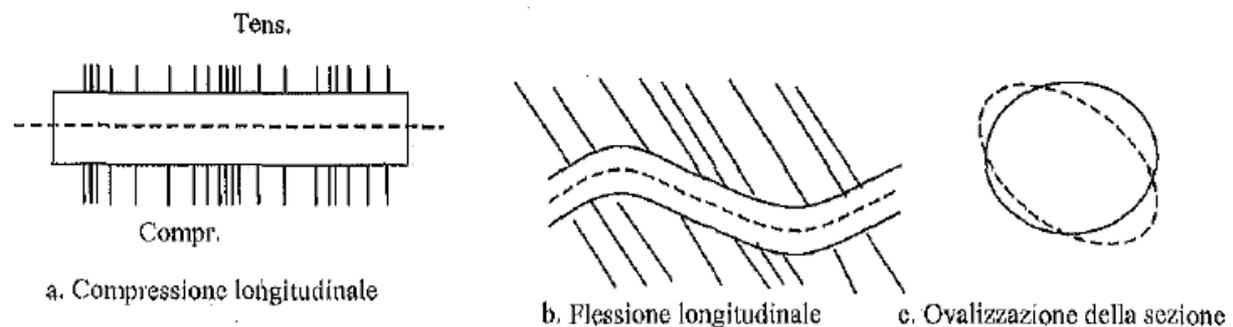


Figura 2 - Sollecitazioni indotte sui rivestimenti.

In generale, quindi, le metodologie di calcolo dell'azione sismica tenderanno ad evidenziare questa tipologia di sollecitazioni. Ciò è descritto al seguente cap.5.

5. Metodologia di valutazione dell'azione sismica per le gallerie naturali

5.1 Generalità

Per ciascuna sezione di galleria vengono sviluppati uno o più modelli numerici che rappresentano solitamente il manufatto e la roccia circostante in due o in tre dimensioni. I modelli sono finalizzati ad evidenziare gli effetti di cui al precedente cap. 4.

Tali modelli vengono quindi assoggettati ad un'analisi dinamica nel dominio del tempo, assumendo come input uno o più accelerogrammi imposti alla base del modello (bedrock).

I risultati espressi in termini di spostamenti e sollecitazioni dei rivestimenti di galleria vengono poi utilizzati per la verifica di resistenza degli stessi.

5.2 Definizione dell'input sismico

L'input sismico locale, definito su un suolo roccioso affiorante con le metodologie di cui al precedente cap. 3. , deve quindi venire "trasformato" per essere riportato ad un "bedrock" profondo rispetto al manufatto in esame.

Esistono due approcci a questo problema:

- un approccio più tradizionale, nato nell'University of California nei primi anni '70, basato su un'ipotesi di comportamento lineare della roccia o del terreno (codice SHAKE, rif.[11]); poiché la roccia e il terreno non sono elastici lineari a livelli di deformazione sismica, è necessario definire un comportamento elastico equivalente, adottando dei moduli elastici di taglio compatibili con i livelli di deformazione dei singoli strati di terreno. Questo approccio è molto veloce (anche facendo variare i moduli di taglio iterativamente) perché, grazie all'ipotesi di linearità, applica la sovrapposizione degli effetti conducendo un'analisi armonica del segnale. La dissipazione di energia causata dal comportamento non lineare del terreno è interamente affidata ai parametri di smorzamento;
- un approccio più complesso, reso applicabile dalla grande velocità dei moderni computer, si è diffuso a partire dagli anni '90, impiegando codici non lineari agli elementi finiti o alle differenze finite; oltre a poter considerare la non linearità del terreno (limiti di resistenza e leggi sforzi - deformazioni non lineari), questo tipo di codici consente di tenere conto dell'interazione struttura - terreno. Definizione del modello di calcolo. Uno di questi codici, al quale si farà riferimento prevalente in questo progetto è FLAC (rif. [12]), appositamente concepito per lo studio delle opere geotecniche anche in condizioni sismiche.

5.3 Modelli di calcolo

5.3.1 Modelli al continuo

Per le sezioni di calcolo, verranno allestiti dei modelli numerici a due e tre dimensioni impiegando il codice di calcolo FLAC, che rappresenta la roccia come un continuo elasto-plastico.

FLAC implementa tutte le caratteristiche e le metodologie di analisi descritte nei paragrafi precedenti.

Si prevede in particolare di sviluppare:

- 1) modelli della sezione trasversale di galleria e della roccia circostante, piani alle deformazioni, mediante i quali definire le sollecitazioni massime nelle sezioni di rivestimento (azione assiale, flessione e taglio sismico – "ovalizzazione");
- 2) modelli tridimensionali del sistema galleria terreno, nei quali la galleria è schematizzata come una sequenza di elementi finiti di tipo "trave" elasto-plastici a due nodi, molto semplici ed espressivi di comportamento longitudinale e in grado di simulare la propagazione tridimensionale dell'onda si-

smica; questi modelli servono a determinare gli ordini di grandezza delle sollecitazioni longitudinali nel rivestimento (“beccheggio”);

- 3) eventuali modelli di dettaglio in due o tre dimensioni di tratti particolari dei manufatti interrati e della roccia circostante, ai quali imporre condizioni al contorno ricavate dai modelli tipo 1) e 2) per la determinazione di dettaglio delle sollecitazioni in casi particolari.

Per ciascun modello si procederà ai seguenti passi:

- a) definizione del reticolo del modello, delle caratteristiche geometriche della galleria ecc.
- b) definizione dei contorni “artificiali” (inferiore e superiore)
- c) definizione delle condizioni al contorno statiche
- d) applicazione dei carichi statici e definizione (attraverso una modellazione numerica per fasi) delle sollecitazioni statiche nel rivestimento. In questo tipo di modellazione, solitamente, il rivestimento di prima fase e gli interventi di presostegno, considerati nel calcolo delle fasi di scavo della galleria, vengono “eliminati” dal modello dopo la formazione del rivestimento finale, perché considerati strutture provvisorie e non durevoli
- e) definizione delle condizioni al contorno dinamiche che includono:
 - condizioni al contorno di tipo “quiet boundary” per impedire la riflessione delle onde sui contorni in quiete
 - condizioni al contorno “free field” per simulare il moto sismico del terreno soggetto al sisma ai lati del modello
- f) definizione del moto “free field” alla base del modello (bedrock) attraverso il procedimento di *deconvoluzione*
- g) analisi sismica del modello nel dominio del tempo e definizione delle sollecitazioni dinamiche nel rivestimento di galleria e degli spostamenti indotti dal sisma
- h) registrazione e restituzione grafica di tutti i dati di interesse. In particolare, verranno ricercate le massime sollecitazioni a flessione, taglio e compressione assiale nel rivestimento.

5.3.2 Modellazione della roccia come mezzo discontinuo

L’approccio fornito da FLAC è valido e completo a condizione che il comportamento della roccia sia governato essenzialmente dai parametri d’ammasso, ovvero che la fratturazione della roccia sia tale da rendere ininfluente l’effetto del giunto singolo (fratturazione decimetrica).

Laddove la spaziatura dei giunti sia su scala metrica, occorrerà tenere conto degli effetti del singolo giunto e della sua collocazione rispetto al manufatto sotterraneo. Si potranno allora implementare le medesime procedure di calcolo statico e dinamico, facendo però riferimento a codici agli “elementi distinti” (DEM).

Queste analisi verranno sviluppate laddove necessario impiegando il codice UDEC (rif. [13]).

6. Dimensionamento del rivestimento di galleria in calcestruzzo armato

Le sollecitazioni calcolate secondo il metodo descritto nel capitolo precedente vengono adottate come base per il dimensionamento del rivestimento di galleria, che verrà sviluppato in sede di progettazione esecutiva.

I criteri di base per tale dimensionamento sono i seguenti:

- la presenza di forti flessioni e tagli porta all'esigenza di rivestimenti armati, essenzialmente con armature circolari e staffe / spilli;
- le sollecitazioni di distorsione longitudinale, prevedibili soprattutto nelle zone di attraversamento di faglie, possono richiedere un consistente incremento delle armature longitudinali;
- nel complesso, le armature devono conferire al rivestimento un comportamento di tipo duttile, per evitare importanti perdite di resistenza (e conseguente collasso della sezione) a seguito di deformazioni di una certa entità. Le armature devono quindi svilupparsi in tutte le direzioni e deve sempre essere presente una armatura di legatura efficace fra armature esterne e interne.

I criteri di dimensionamento sono quelli riportati nelle vigenti norme (rif. [2]) per le convenzionali strutture in c.a., con riferimento ai par. 4.1 "Costruzioni civili e industriali – costruzioni in calcestruzzo", 6.7 "Progettazione geotecnica – opere in sotterraneo" e 7.11 "Progettazione per azioni sismiche – Opere e sistemi geotecnici".

La tabella seguente riporta il calcolo delle resistenze ultime a flessione pura e taglio della sezione trasversale di galleria (effetto "ovalizzazione"), e della flessione pura della sezione longitudinale d'assieme (effetto di deformazione longitudinale, "beccheggio") per tre soluzioni tipo di armatura:

1. Sezione 1: sezione normale, con doppia armatura circolare sull'intero sviluppo, e una normale armatura longitudinale e spinottatura a taglio; la sezione è del tipo "strombato" per la presenza di una coronella di infilaggi in avanzamento (spessore da 50 a 115 cm) e corrisponde alla sezione in flysch presentata nel progetto definitivo;
2. Sezione 2: sezione di spessore maggiorato (costante 80 cm) e con armatura molto rinforzata, sia in direzione circolare che longitudinale, che infine di spillatura a taglio; le resistenze ultime di calcolo si incrementano 2,5 a 4,5 volte quelle della Sezione 1. Questa sezione è progettata per zone nelle quali le caratteristiche della roccia possono essere tale da amplificare le sollecitazioni sismiche sia di ovalizzazione che di beccheggio
3. Sezione 3 (blindata): è identica alla Sezione 2, ma in più è rivestita internamente da una virola di acciaio S355J di spessore 20mm, ancorata al calcestruzzo con sistematica piolatura in chiodi di tipo Nelson. Le resistenze ultime sono per questa sezione da 9 a 23 volte quelle della Sezione 1. Questa sezione potrebbe essere richiesta nelle zone di attraversamento di faglie, laddove possa essere prevista una dislocazione.

Le sezioni illustrate hanno essenzialmente lo scopo di evidenziare le grandi possibilità di incremento delle resistenze di calcolo, per fronteggiare gli effetti del sisma in condizioni di roccia difficile.

La scelta delle effettive resistenze di calcolo verrà fatta in sede di progetto esecutivo, per tutte le sezioni delle gallerie e opere sotterranee, e sulla base degli studi di determinazione della risposta sismica locale alla quota del manufatto sotterraneo.

SEZIONE TIPO	MATERIALI		sezione di verifica	Dim.1	Dim.2	Armature		Resistenza ultima	
	C28/35	B450C		cm	cm	diam (mm)/passo		kNm/m, kN/m	
Sezione 1 (corrente)	flessione sezione trasv. media taglio		rettangolare, parete	50-105	100	fi 22/20	fi 22/20	Mr(trasv)=	517,8
						fi 12 40x40		Tr=	262,0
Sezione 2 (maggiorata)	flessione sezione long. minima		rettangolare, parete	50	Rm = 325	fi 12/25	fi 12/25	Mr(long)=	22.774,0
	taglio					fi 30/15		Mr(trasv)=	1.230,0
Sezione 3 (blindata)	flessione sezione trasv.		rettangolare, parete	80	100	fi 16 30x30		Tr=	574,0
	taglio								
Sezione 3 (blindata)	flessione sezione long.		circolare, globale	80	Rm = 340	fi 20/15	fi 20/15	Mr(long)=	108.000,0
	flessione sezione trasv.					fi 30/15		Mr(trasv)=	4.790,0
	taglio					virola int. sp 20 mm			
						fi 16 30x30			
flessione sezione long.		fi 20/15		Mr(long)=	496.000,0				
		virola int. sp 20 mm							