

“TACCU SA PRUNA”

Impianto di accumulo idroelettrico mediante pompaggio
ad alta flessibilità

Comune di Esterzili (SU)

COMMITTENTE



COORDINAMENTO / MANDANTE



Progettisti: Ing. Luigi Lorenzo Papetti

PROGETTAZIONE GEOTECNICA /
MANDATARIA

GEODES



Progettista: Ing. Luisella Vai

Relazione sulla sismica dei manufatti in sotterraneo

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	PRIMA EMISSIONE	Mag. 22	SP	LV	PAC
Codice commessa: 1351		Codifica documento: 1351-A-GD-R-03-0			

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
2. EFFETTI DEL SISMA SULLE OPERE IN SOTTERRANEO	2
2.1 Effetti del sisma sul rivestimento delle gallerie	2
2.2 Parametri sismici che influenzano il danno	5
3. DEFINIZIONE DELL'INPUT SISMICO PER LE OPERE IN SOTTERRANEO.....	8
3.1 Indicazioni sulla pericolosità sismica di base dell'area di Nuraghe Arrubio	8
3.2 Metodi di analisi sismica	8
3.3 Definizione dell'input sismico per le gallerie in progetto	10
3.3.1 Vita utile dell'opera	10
3.3.2 Periodo di ritorno dell'azione sismica TR e accelerazione massima attesa su suolo rigido	10
3.3.3 Determinazione della deformazione massima di taglio γ_{max}	11
4. MODELLI DI CALCOLO PER IL DIMENSIONAMENTO DEL RIVESTIMENTO DELLE OPERE IN SOTTERRANEO.....	13
4.1 Considerazioni aggiuntive ed ulteriori precauzioni da adottare in fase esecutiva.....	16
5. BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI NORMATIVI	19
5.1 Normativa di riferimento.....	19
5.2 Bibliografia di riferimento	19

TABELLE

Tabella 2.1 – Correlazione causa/effetti secondo lo studio di Wang et al. (2001)

Tabella 3.1 – Tabella 2 Allegato A. Valori di a_g , F_0 , T_c per le isole

Tabella 3.2 – Tempi di ritorno e parametri a_g , F_0 e T_c

Tabella 3.3 – Valori descrittivi dello spettro di risposta elastico validi in caso di $M_w < 5.5$ (Tipo 1) e $M_w > 5.5$ (Tipo2) secondo l'Eurocodice 8

Tabella 3.4 – Coefficiente riduttivo (C) dell'accelerazione del terreno con la profondità del tunnel (Power et al., 1996)

Tabella 3.5 – Rapporto tra velocità ed accelerazione sismica di picco per diversi materiali a diverse distanze dalla sorgente della sollecitazione sismica (Power et al., 1996)

Tabella 4.1 – Riassunto dei dati di input sismico impiegati nei modelli di calcolo

FIGURE

Figura 2.1 – Sollecitazioni indotte sui rivestimenti

Figura 2.2 – Schemi di rottura proposti dallo studio di Wang et al. (2001)

Figura 2.3 – Livello di danno in funzione di PGV, distanza e magnitudo di un sisma secondo lo studio di Dowding e Rozen (1978)

Figura 2.4 – Livello di danno associato ai valori di PGA e PGV secondo lo studio di Owen e Scholl (1981)

Figura 3.1 – Applicazione delle deformazioni di taglio sui bordi del modello per l'applicazione del Metodo delle deformazioni di taglio puro in campo libero

Figura 4.1 – Modello relativo alla Centrale in Caverna per le condizioni statiche all'ultimo step di analisi

Figura 4.2 – Modello relativo alla Centrale in Caverna per le condizioni sismiche all'ultimo step di analisi

Figura 4.3 – Isolamento esteso del tunnel (Kawashima, 2000)

1. INTRODUZIONE

La presente relazione è stata redatta per conto di FROSIO NEXT S.r.l. nell'ambito del progetto per approvazione di un sistema di accumulo idroelettrico situati nel comune di Esterzili (SU) nella parte sommitale della provincia Sud Sardegna. L'impianto in progetto prevede la realizzazione di un bacino artificiale a monte dell'esistente invaso di Nuraghe Arrubiu (Flumendosa) e di un impianto di pompaggio delle acque del lago verso il nuovo bacino.

La presente relazione ha lo scopo di illustrare la metodologia di dimensionamento e verifica, in riferimento alle condizioni sismiche, dei rivestimenti dei cavi in progetto. Data l'importanza dell'opera, infatti, la presenza del carico sismico è stata esplicitamente considerata, in modo semplificato, nelle simulazioni numeriche effettuate volte al predimensionamento delle opere in progetto.

Per la verifica sismica ci si riferirà a riferimenti specifici di letteratura e alle raccomandazioni AGI in quanto ad oggi la verifica sismica di manufatti sotterranei non è normata in modo specifico né a livello nazionale (il D.M. 17 gennaio 2018 contiene solo indicazioni di indirizzo generale), né internazionale.

Nello specifico la presente relazione illustra al Capitolo 2 gli effetti che l'onda sismica può avere sui manufatti sotterranei, mentre al Capitolo 3 illustra le principali metodologie di definizione dell'input sismico per i manufatti sotterranei, il quale è molto diverso da quello assunto per i manufatti di superficie. Il capitolo 4, infine, descrive i criteri che sono stati adottati nello sviluppo del progetto per far fronte ai requisiti di resistenza imposti da questo tipo di carico.

2. EFFETTI DEL SISMA SULLE OPERE IN SOTTERRANEO

I tunnel, e più in generale le opere in sotterraneo, rientrano tra le strutture meno vulnerabili ai terremoti: difatti, nel progetto di tali opere, l'azione sismica ha sempre avuto un ruolo secondario al punto che tutt'oggi la verifica sismica dei tunnel non è affatto diffusa nella pratica professionale corrente.

La maggior parte dell'esperienze passate ha dimostrato come tali strutture siano in grado di sopportare le tensioni e gli spostamenti indotti dal sisma, senza subire danni significativi, specialmente se confrontate con le strutture in elevazione realizzate fuori terra. Ciò è dovuto alla compresenza di differenti aspetti quali la diversa propagazione dell'onda sismica in sotterraneo rispetto alla superficie, l'elevato grado di confinamento dei tunnel ed infine l'elevata capacità statica di questi ultimi di accettare cerniere plastiche nei rivestimenti.

Nonostante ciò, in letteratura, sono riportati diversi casi di danneggiamenti importanti delle opere in sotterraneo dovuti all'azione dinamica del sisma, ad esempio tra i casi più importanti si ricordano i terremoti di Kobe (Giappone, 1995), Loma Prieta (USA, 1989) e Chi-Chi (Cina, 1999).

Queste "case histories" evidenziano la necessità di adottare criteri antisismici evoluti anche nella progettazione delle opere in sotterraneo, in particolar modo se situate in zone fortemente sismiche, nelle vicinanze delle grandi faglie ed al crescere dell'importanza dell'opera stessa specialmente nel caso in cui è da considerarsi strategica e, quindi, essere fruibile anche a seguito di un evento sismico.

2.1 Effetti del sisma sul rivestimento delle gallerie

Quando le onde sismiche investono una galleria, il rivestimento si deforma secondo due diversi meccanismi:

- in direzione trasversale la sezione della galleria si ovalizza per effetto delle deformazioni di taglio del terreno e dei conseguenti momenti flettenti;
- 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.

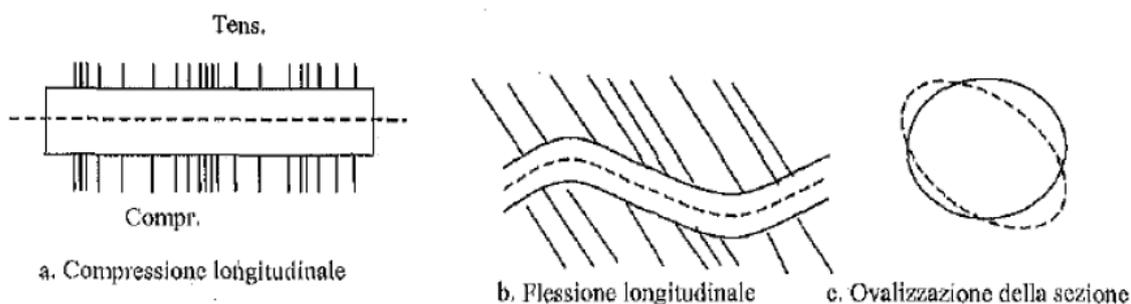


Figura 2.1 – Sollecitazioni indotte sui rivestimenti

Attualmente si dispone di un numero estremamente limitato di dati relativi all'effettivo danneggiamento delle strutture in sotterraneo per effetto del sisma precedentemente al 1970. Di fatto il danneggiamento delle strutture sotterranee veniva accuratamente documentato solamente nei casi più severi dovuti ai terremoti più forti. Ad esempio, dopo il terremoto di San Fernando (USA, 1971) l'American Society of Civil Engineers (ASCE) pubblicò alcuni dati relativi ai danni riscontrati sulle strutture sotterranee nell'area di Los Angeles. Inoltre in molti casi mancava un accurato monitoraggio delle fessure del rivestimento esistenti prima del terremoto, ragion per cui non era possibile risalire al vero danno subito dalle strutture durante il terremoto.

A partire dal 1974 sono stati condotti diversi studi (Dowding & Rozen (1978), Owen & Scholl (1981), Sharma & Judd (1991), Power et al. (1998)) basati sulla raccolta sistematica dei dati relativi ai danni riportati dalle opere sotterranee durante diversi terremoti, al fine del riconoscimento delle caratteristiche comuni e delle cause simili.

Sulla base di questi studi è stato possibile creare un database molto eterogeneo, costituito da una moltitudine di casi distinguibili per tipologia di rottura riscontrata, livello di danneggiamento, caratteristiche del terreno e del rivestimento. In particolare, lo studio condotto da Power et al. (1998) distingue tre tipologie di strutture interrato le quali mostrano comportamenti differenti durante l'evento sismico:

- tunnel;
- strutture "cut and cover";
- condotte sotterranee in acciaio o polimeri

e tre tipologie di lesioni che possono essere ricondotte alle seguenti cause:

- cedimenti del suolo, come liquefazione o smottamenti in corrispondenza degli imbocchi;
- spostamenti lungo le faglie;
- scuotimento o vibrazione del terreno.

Lo studio condotto da Wang et al. nel 2001 ha aggiornato la classificazione di Dowding e Rozen del 1978 basata sul livello del danno e distingue i seguenti casi:

- nessun danno;
- danno leggero
- danno moderato
- danneggiato.

Inoltre ha suggerito diversi schemi di rottura e fessurazione indotti nel rivestimento del tunnel durante un terremoto, come mostrato in Figura 2.2, correlati alle relative possibili cause di rottura (Tabella 2.1).

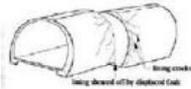
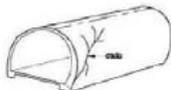
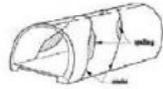
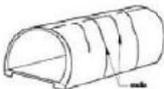
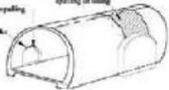
Type of cracks	Pattern	Type of cracks	Pattern
a) Sheared off lining		e) Inclined cracks	
b) Slope failure induced tunnel collapse		f) Extended cross cracks	
c) Longitudinal cracks		g) Wall deformation	
d) Transverse cracks		h) Cracks nearby opening	

Figura 2.2 – Schemi di rottura proposti dallo studio di Wang et al. (2001)

Tabella 2.1 – Correlazione causa/effetti secondo lo studio di Wang et al. (2001)

Possibile factors	a	b	c	d	e	f	g	h
Passing through fault zones	*							
Unfavourable ground conditions				°		*		
Interface hard-soft ground						*		
Nearby slope surface and portals		*		*	*	*		
Collapse during construction			°		°		°	
Lining cracks before earthquake			°	°				
Poor structural arrangements				°	°			*
Unreinforced concrete lining	°	°		°	°	°	°	*
Deteriorated lining material			°	°				
Cavity existed behind lining			*		°			

* decisive link ° weak link (Wang *et al.* 2001)

2.2 Parametri sismici che influenzano il danno

Attraverso un'attenta analisi degli eventi del passato e dei relativi danneggiamenti provocati nelle strutture presenti nelle aree vicine, diversi autori hanno avuto la possibilità di evidenziare le principali condizioni, sia del sisma ma anche dell'opera e del terreno, che hanno portato a determinati tipi di problematiche.

Dowding e Rozen nel 1978 hanno messo in evidenza l'effetto dovuto allo scuotimento del terreno, per scavi sotterranei in roccia, concentrando la loro attenzione soprattutto sul contributo della velocità di picco del terreno (PGV), la magnitudo (M) e la distanza dell'epicentro dall'opera. Come mostrato in Figura 2.3, i due autori hanno messo in relazione questi tre parametri, associando ad ogni particolare combinazione dei tre, un livello di danno.

Owen e Scholl nel 1981 hanno cercato di migliorare il precedente studio, associando un livello di danno, oltre che con il valore di picco di velocità anche con quello di accelerazione di picco al suolo (PGA), calcolando questi ultimi tenendo conto delle leggi di attenuazione. Essi, come mostrato in Figura 2.4, hanno riportato per ogni caso studio analizzato, il valore di PGA e PGV, correlando ad ognuno di essi un livello di danno.

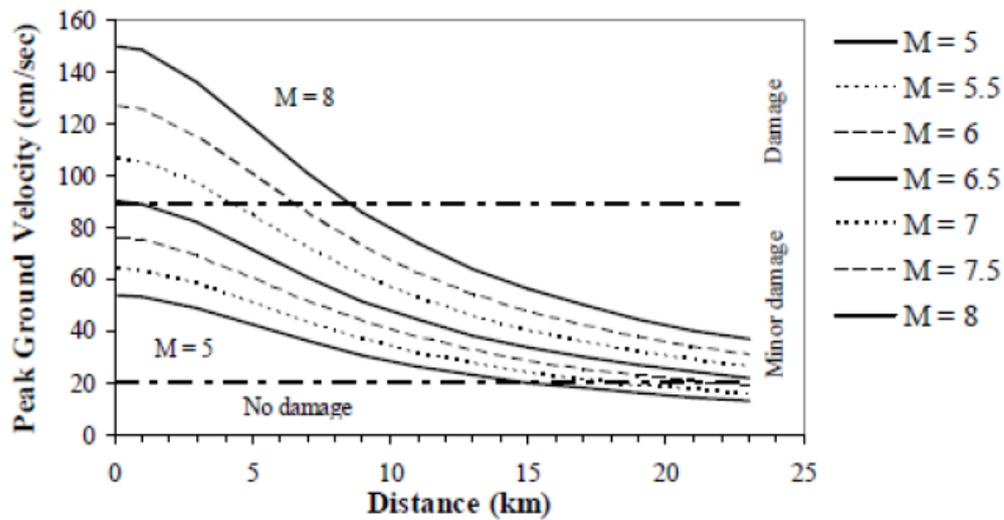


Figura 2.3 – Livello di danno in funzione di PGV, distanza e magnitudo di un sisma secondo lo studio di Dowding e Rozen (1978)

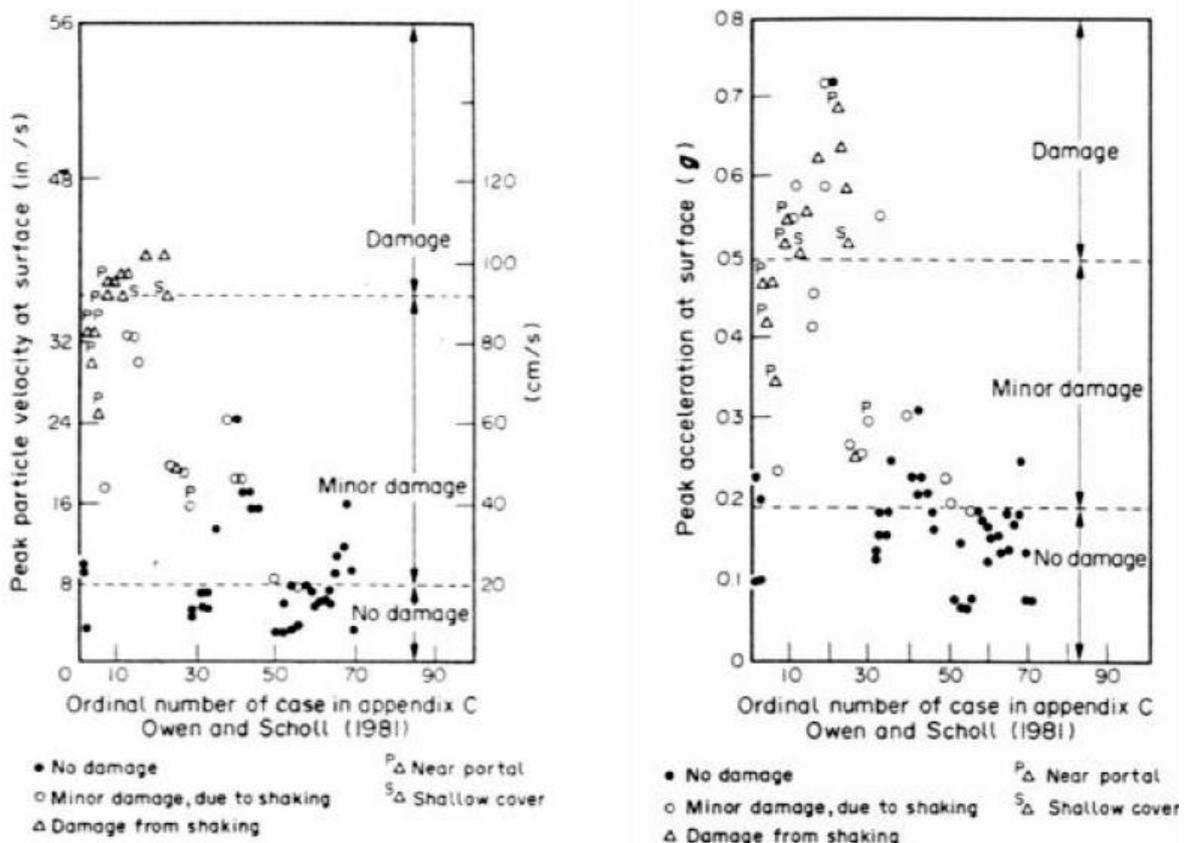


Figura 2.4 – Livello di danno associato ai valori di PGA e PGV secondo lo studio di Owen e Scholl (1981)

In particolare, nel grafico possono essere evidenziate due soglie di PGA: la prima al valore di 0,2 g, che separa i casi di lieve danno dai casi di danno moderato, mentre la seconda al valore di 0,5 g, usato per distinguere i casi di danno moderato dai casi di danno

grave. È importante sottolineare come il limite di 0.5 g sia relativamente alto rispetto ai valori che usualmente causano danni alle strutture in superficie, tale aspetto conferma quindi che le strutture sotterranee sono molto meno esposte al rischio di danneggiamento causato dai terremoti.

Sharma & Judd nel 1991 hanno esteso il lavoro di Dowding & Rozen aggiungendo allo studio, altri parametri rilevanti per il comportamento dei tunnel. Oltre alla PGA e alla magnitudo, infatti, essi hanno preso in considerazione la distanza epicentrale, la profondità del tunnel, il tipo di terreno e la tipologia del rivestimento di supporto. I risultati dello studio possono essere così riassunti:

- Forma, dimensione e profondità della struttura: le gallerie profonde appaiono meno vulnerabili agli scuotimenti dei terremoti di quanto lo siano tunnel poco profondi, in particolare risentono di più dell'effetto sismico le gallerie superficiali e quelle che hanno una forma diversa da quella circolare o comunque non simmetrica;
- Proprietà meccaniche del terreno o della roccia circostante: per quanto riguarda il tipo di roccia, le analisi suggeriscono che il danno maggiore si verifichi nella roccia compatta. Tuttavia dallo studio effettuato non risulta chiara la correlazione tra le rigidezze relative del terreno e del rivestimento;
- Proprietà meccaniche della struttura: i maggiori danni si hanno nel caso di assenza di rivestimento o rivestimenti in calcestruzzo non armati. Il danno dovuto a questi eventi, può essere ridotto andando a stabilizzare il terreno attorno al tunnel attraverso interventi di consolidamento, in modo da migliorare l'interazione tra il rivestimento ed il terreno circostante;
- PGA, magnitudo e distanza epicentrale del terremoto: l'analisi dell'influenza di questi fattori confermano i risultati precedenti, evidenziando come solo intensi terremoti possano causare gravi danni alle opere in sotterraneo, aumentando la loro pericolosità all'aumentare della magnitudo, dell'accelerazione di picco al suolo e per minori valori della distanza epicentrale.

3. DEFINIZIONE DELL'INPUT SISMICO PER LE OPERE IN SOTTERRANEO

La caratterizzazione sismica di un'opera in sotterraneo si differenzia marcatamente da quella abitualmente svolta per le opere in superficie, poiché come si è visto nel precedente capitolo l'evento sismico ha sulle opere interrato effetti completamente differenti rispetto alle opere in elevazione.

Nel presente capitolo viene presentata una metodologia generale per effettuare la caratterizzazione sismica di un'opera in sotterraneo.

3.1 Indicazioni sulla pericolosità sismica di base dell'area di Nuraghe Arrubio

Con riferimento all'allegato A delle Norme Tecniche per le Costruzioni si ottengono le seguenti informazioni sulla pericolosità sismica di base:

Tabella 3.1 – Tabella 2 Allegato A. Valori di a_g , F_0 , T_c per le isole

Isole	$T_R=30$			$T_R=50$			$T_R=72$			$T_R=101$			$T_R=140$			$T_R=201$			$T_R=475$			$T_R=975$			$T_R=2475$		
	a_g	F_0	T_c	a_g	F_0	T_c	a_g	F_0	T_c	a_g	F_0	T_c	a_g	F_0	T_c	a_g	F_0	T_c	a_g	F_0	T_c	a_g	F_0	T_c	a_g	F_0	T_c
Arcipelago Toscano, Isole Egadi, Pantelleria, Sardegna, Lampedusa, Linosa, Ponza, Palmarola, Zannone	0,186	2,61	0,273	0,235	2,67	0,296	0,274	2,70	0,303	0,314	2,73	0,307	0,351	2,78	0,313	0,393	2,82	0,322	0,500	2,88	0,340	0,603	2,98	0,372	0,747	3,09	0,401
Ventotene, Santo Stefano	0,239	2,61	0,245	0,303	2,61	0,272	0,347	2,61	0,298	0,389	2,66	0,326	0,430	2,69	0,366	0,481	2,71	0,401	0,600	2,92	0,476	0,707	3,07	0,517	0,852	3,27	0,564
Ustica, Tremiti	0,429	2,50	0,400	0,554	2,50	0,400	0,661	2,50	0,400	0,776	2,50	0,400	0,901	2,50	0,400	1,056	2,50	0,400	1,500	2,50	0,400	1,967	2,50	0,400	2,725	2,50	0,400
Alicudi, Filicudi,	0,350	2,70	0,400	0,558	2,70	0,400	0,807	2,70	0,400	1,020	2,70	0,400	1,214	2,70	0,400	1,460	2,70	0,400	2,471	2,70	0,400	3,212	2,70	0,400	4,077	2,70	0,400
Panarea, Stromboli, Lipari, Vulcano, Salina	0,618	2,45	0,287	0,817	2,48	0,290	0,983	2,51	0,294	1,166	2,52	0,290	1,354	2,56	0,290	1,580	2,56	0,292	2,200	2,58	0,306	2,823	2,65	0,316	3,746	2,76	0,324

3.2 Metodi di analisi sismica

L'analisi in condizioni sismiche di un'opera generica, sia essa in superficie o in sotterraneo può essere effettuata secondo due principali modalità differenti:

1. **Analisi dinamica completa:** è il metodo più rigoroso e consiste nell'effettuare un'analisi dinamica (in campo lineare o non lineare) basata direttamente sugli accelerogrammi di progetto. Tali metodi di analisi avanzata richiedono una simulazione nel dominio del tempo della risposta strutturale alla forzante sismica e consentono di valutare in maniera completa l'interazione tra il terreno e la struttura. Nell'analisi dinamica completa di una galleria dunque gli incrementi di sollecitazione indotti nel rivestimento da un sisma sono ottenuti direttamente come risultato della simulazione dello scuotimento del sistema terreno-galleria.
2. **Analisi semplificata:** nei metodi semplificati (pseudo-statici o pseudo-dinamici) l'interazione cinematica terreno-struttura viene trascurata e l'analisi è disaccoppiata. In letteratura e nella pratica progettuale esistono diversi metodi semplificati formulati da diversi

autori sulla base degli studi da essi condotti. Nel caso specifico delle gallerie, in generale, viene applicato al contorno della galleria un campo di spostamenti, ottenuto da un'analisi monodimensionale di risposta sismica locale, in cui vengono trascurati gli effetti dovuti alla forma e alla rigidezza della galleria sul comportamento sismico del terreno. Inoltre, anche gli effetti delle onde di compressione vengono trascurati, mentre vengono considerate esclusivamente le onde S, che si propagano nei piani verticali inducendo deformazioni tangenziali γ . Successivamente, le deformazioni vengono usate per calcolare gli incrementi sismici delle sollecitazioni sul rivestimento della galleria, tramite soluzioni elastiche in forma chiusa.

Nel presente progetto, per l'analisi sismica delle gallerie si è fatto riferimento all'analisi semplificata basata sul metodo pseudo-statico formulato da Power et al. (1996) noto anche come *free-field shear deformation method*. Tale metodo prevede l'applicazione di uno spostamento derivato dalle deformazioni di taglio ed applicato sui bordi del modello come mostrato in Figura 3.1. Tale spostamento genera a sua volta una deformazione di *ovalizzazione* della galleria ed un conseguente incremento delle sollecitazioni agenti sul rivestimento. Le soluzioni in forma chiusa studiate dagli autori per la definizione dell'incremento di sollecitazione sul rivestimento sono riferite al caso di galleria circolare, tuttavia il metodo risulta facilmente utilizzabile applicando gli spostamenti calcolati secondo le formulazioni empiriche sui bordi di un modello di tipo numerico, nel quale la galleria può avere una forma generica.

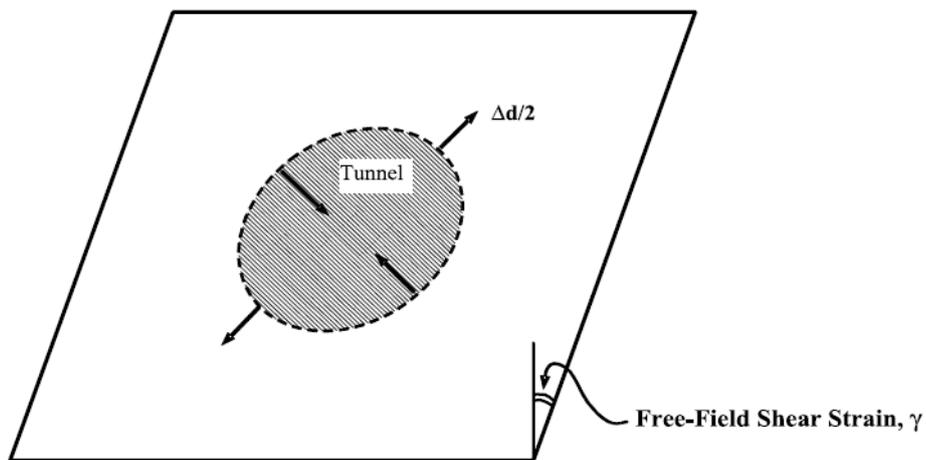


Figura 3.1 – Applicazione delle deformazioni di taglio sui bordi del modello per l'applicazione del Metodo delle deformazioni di taglio puro in campo libero

Nei paragrafi seguenti vengono illustrati i parametri di caratterizzazione sismica impiegati per la determinazione delle deformazioni di taglio da applicare al modello di calcolo.

3.3 Definizione dell'input sismico per le gallerie in progetto

Nei seguenti paragrafi viene illustrata la procedura impiegata per la definizione dell'input sismico da applicare alle gallerie in progetto. Per l'analisi dei risultati derivanti dalle simulazioni numeriche condotte e per le verifiche strutturali effettuate sulle strutture di rivestimento si rimanda ai seguenti elaborati:

- 1351-A-GD-R-03 - Relazione descrittiva e di calcolo della Galleria Idraulica e delle Gallerie di Accesso;
- 1351-A-GD-R-04 - Relazione descrittiva e di calcolo della Centrale in Caverna e della Sottostazione Elettrica
- 1351-A-GD-R-05 - Relazione descrittiva e di calcolo dei pozzi verticali

3.3.1 Vita utile dell'opera

La Vita Nominale dell'opera, in accordo al punto 2.4.1 delle NTC-18 è assunta pari a $VN = 100$ anni.

La Classe d'Uso utilizzabile per le verifiche oggetto del presente studio è definita in accordo al punto 2.4.2 delle NTC-18. Per le finalità dell'opera si assume la classe d'uso IV, ne consegue un coefficiente d'uso $CU = 2$.

Di conseguenza, il periodo di riferimento per l'azione sismica risulta pari a:

$$VR = VN * CU = 200 \text{ anni.}$$

3.3.2 Periodo di ritorno dell'azione sismica T_R e accelerazione massima attesa su suolo rigido

Definita la vita di riferimento dell'opera, in funzione della probabilità di superamento P_{VR} nel periodo di riferimento considerato è possibile, per ogni Stato Limite, calcolare il Periodo di Ritorno T_R dell'azione sismica e quindi i parametri a_g , F_0 e T_c ad esso legati interpolando i valori forniti nella Tabella 2 dell'allegato B alle Norme Tecniche secondo le formule:

$$T_R = - \frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})}$$

$$\text{Log}(p) = \text{Log}(p_1) + \text{Log}\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \cdot \text{Log}\left(\frac{T_R}{T_{R1}}\right) \cdot \frac{1}{\text{Log}\left(\frac{T_{R2}}{T_{R1}}\right)}$$

dove:

- V_R è il periodo di riferimento
- P_{VR} è la probabilità di superamento relativa
- p è uno dei parametri a_g , F_0 o T_c che si desidera calcolare
- T_R è il tempo di ritorno

Si ottengono quindi i seguenti valori (Tabella 3.2):

Tabella 3.2 – Tempi di ritorno e parametri a_g , F_0 e T_c

	T_R	a_g	a_g/g	F_0	T_c
SLO	120	0.3330	0.03394	2.7563	0.3102
SLD	201	0.3930	0.04006	2.8200	0.3220
SLV	1898	0.7028	0.07164	3.0582	0.3925
SLC	2475	0.7470	0.07615	3.0900	0.4010

3.3.3 Determinazione della deformazione massima di taglio γ_{max}

E' possibile calcolare il valore di γ_{max} nel seguente modo:

- si determina l'accelerazione a_g per il sito su cui risulta ubicata l'opera;
- si calcola l'accelerazione massima attesa al suolo in funzione della categoria di sotto-suolo, il coefficiente amplificativo S può essere ottenuto mediante le tabelle proposte dall'Eurocodice 8 e riportate in Tabella 3.3;
- si calcola l'accelerazione di picco riferita alla profondità del manufatto $a_{z,max}$ utilizzando la tabella di Power et al (1996) (Tabella 3.4);
- si calcola la velocità di picco del terreno V_s tramite la tabella di Power et al. (1996) (Tabella 3.5). Poiché i dati raccolti dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia non sono sufficienti per effettuare uno studio di disaggregazione della pericolosità sismica si sono selezionati, tra quelli presenti in letteratura, i valori di magnitudo e distanza dalla sorgente che minimizzano l'azione sismica. Si è considerata dunque una magnitudo ≤ 5.5 ed una distanza media dei sismi compresa tra 0 e 20 km.
- si calcola la deformazione massima γ_{max} considerando il valore della velocità apparente di propagazione delle onde S , C_s (sono stati impiegati i valori ottenuti dalle prove geofisiche condotte o in loro assenza sono state sviluppate delle ipotesi conservative).

Le formule applicate sono di seguito riepilogate:

$$\begin{aligned}
 a_{max,s} &= S \cdot a_g \\
 a_{z,max} &= C \cdot a_{max,s} \\
 V_s &= k \cdot a_{z,max} \\
 \gamma_{max} &= \frac{V_s}{C_s}
 \end{aligned}$$

Tabella 3.3 – Valori descrittivi dello spettro di risposta elastico validi in caso di $M_w < 5.5$ (Tipo 1) e $M_w > 5.5$ (Tipo2) secondo l'Eurocodice 8

Spettro di risposta terreno Tipo 1 (EC) ($M_w < 5.5$)					Spettro di risposta terreno Tipo 2 (EC) ($M_w > 5.5$)				
terreno	S	T_b	T_c	T_d	terreno	S	T_b	T_c	T_d
A	1	0.05	0.25	1.2	A	1	0.15	0.4	2
B	1.35	0.05	0.25	1.2	B	1.2	0.15	0.5	2
C	1.5	0.1	0.25	1.2	C	1.15	0.2	0.6	2
D	1.8	0.1	0.3	1.2	D	1.35	0.2	0.8	2
E	1.6	0.05	0.25	1.2	E	1.4	0.15	0.5	2

Tabella 3.4 – Coefficiente riduttivo (C) dell'accelerazione del terreno con la profondità del tunnel (Power et al., 1996)

Tunnel depth (m)	Ratio of ground motion at tunnel depth to motion at ground surface
≤ 6	1.0
6 – 15	0.9
15 – 30	0.8
> 30	0.7

Tabella 3.5 – Rapporto tra velocità ed accelerazione sismica di picco per diversi materiali a diverse distanze dalla sorgente della sollecitazione sismica (Power et al., 1996)

Moment Magnitude (M_w)	Ratio of peak ground velocity (cm/s) to peak ground acceleration (g)		
	Source-to-site distance (km)		
	0 - 20	20 - 50	50 - 100
Rock*			
6.5	66	76	86
7.5	97	109	97
8.5	127	140	152
Stiff soil*			
6.5	94	102	109
7.5	140	127	155
8.5	180	188	193
Soft soil*			
6.5	140	132	142
7.5	208	165	201
8.5	269	244	251

*In this table, the sediment types represent the following shear wave velocity ranges: rock ≥ 750 m/s; stiff soil is 200 – 750 m/s; and soft soil < 200 m/s. The relationship between peak ground velocity and peak ground acceleration is less certain in soft soils.

4. MODELLI DI CALCOLO PER IL DIMENSIONAMENTO DEL RIVESTIMENTO DELLE OPERE IN SOTTERRANEO

Per ciascuna sezione di calcolo sono stati realizzati due differenti modelli numerici bidimensionali, in deformazioni piane, agli elementi finiti:

1. Modello in condizioni statiche: questi modelli (Figura 4.1) sono stati sufficientemente estesi nelle due direzioni per permettere di ritenere del tutto trascurabili le condizioni di vincolo introdotte e vengono usati per la verifica della galleria in condizioni statiche;
2. Modello in condizioni sismiche: questo secondo modello numerico (Figura 4.2), specifico per la simulazione delle condizioni sismiche, simula con più efficacia la “scatola di taglio” tipica del *Metodo delle deformazioni di taglio puro in campo libero*. In questo caso la dimensione del modello è stata ridotta ad un quadrato di lato pari a circa 4 volte il diametro equivalente della galleria. Per verificare la coerenza tensionale e deformativa tra il modello in condizioni statiche e quello in condizioni sismiche si è verificato che su quest’ultimo i principali parametri tensionali e deformativi avessero, nell’ultimo step immediatamente precedente l’applicazione del carico sismico, una variazione non superiore al 5% rispetto al primo modello.

Le analisi numeriche sono state condotte tramite il codice di calcolo Phase 2 (v. 8.024 della Rocscience Inc. Toronto, Canada), software largamente impiegato a livello globale nella progettazione geotecnica e di comprovata validità.

Tramite le simulazioni numeriche della sezione trasversale di galleria e della roccia circostante è stato possibile definire efficacemente le sollecitazioni massime nelle sezioni di rivestimento (azione assiale, flessione e taglio sismico – “ovalizzazione”) utili per le verifiche strutturali.

Ciascun modello si compone di una successione di fasi (stage) idonei a simulare le diverse fasi realizzative dell’opera:

- a. definizione del reticolo del modello, delle caratteristiche geometriche della galleria ecc.
- b. definizione delle condizioni al contorno statiche
- c. applicazione delle fasi di scavo accompagnate da rilasci tensionali parziali;
- d. applicazione delle strutture di sostegno provvisorie e definitive;
- e. solo per i modelli in condizioni sismiche si ha un ulteriore step in cui vengono applicati, come condizioni al contorno, gli spostamenti calcolati secondo la procedura indicata al paragrafo precedente.

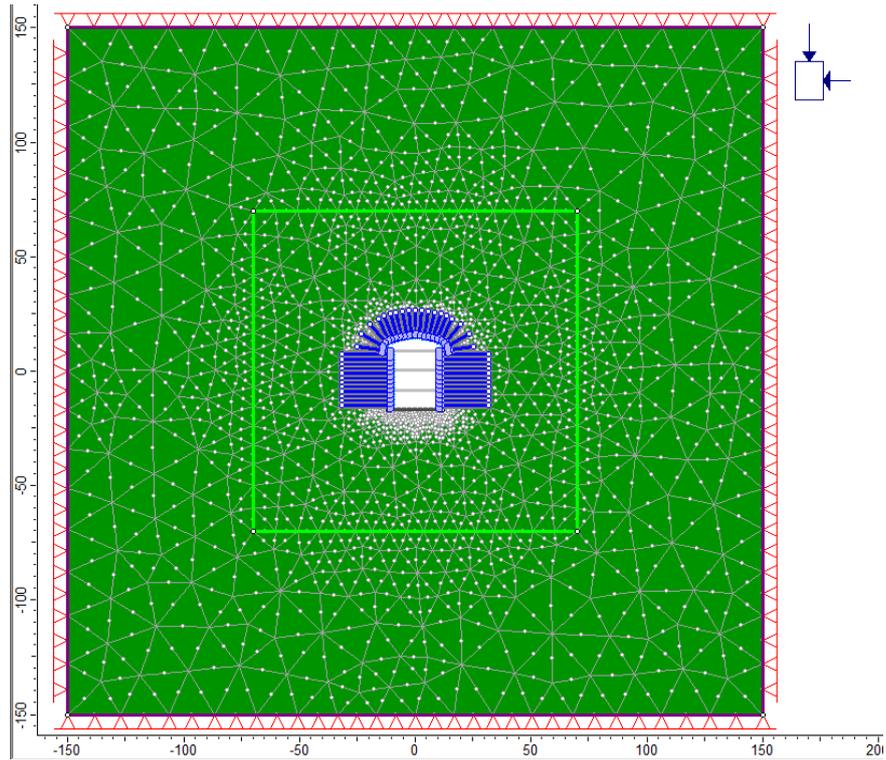


Figura 4.1 – Modello relativo alla Centrale in Caverna per le condizioni statiche all'ultimo step di analisi

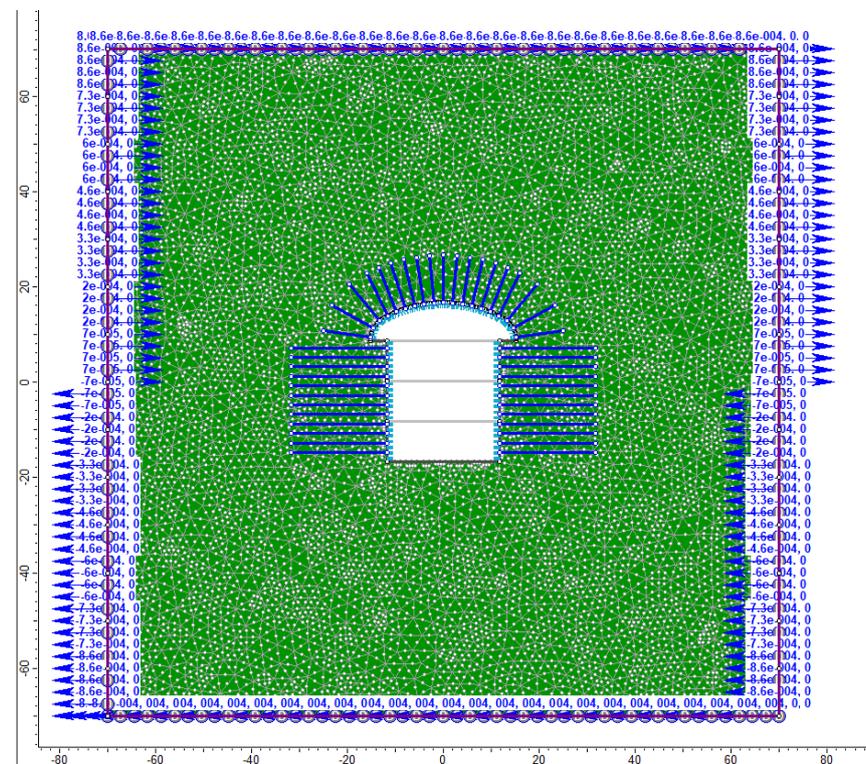


Figura 4.2 – Modello relativo alla Centrale in Caverna per le condizioni sismiche all'ultimo step di analisi

In Tabella 4.1 sono stati riassunti i dati utilizzati per il calcolo della deformazione ed i valori dello spostamento Δx applicati ad ogni scatola di taglio. Per l'analisi dei risultati derivanti dalle simulazioni numeriche condotte e per le verifiche strutturali effettuate sulle strutture di rivestimento, sia in campo statico sia in campo sismico, si rimanda alle seguenti relazioni:

- 1351-A-GD-R-03 - Relazione descrittiva e di calcolo della Galleria Idraulica e delle Gallerie di Accesso;
- 1351-A-GD-R-04 - Relazione descrittiva e di calcolo della Centrale in Caverna e della Sottostazione Elettrica;
- 1351-A-GD-R-05 - Relazione descrittiva e di calcolo dei pozzi verticali

Tabella 4.1 – Riassunto dei dati di inputi sismico impiegati nei modelli di calcolo

Opera	Sez. tipo	Litotipo	cat suolo	S	$a_{max,s}$	copertura (m)	C	$a_{z,max}$	k	V_s (m/s)	C_s (m/s)	γ_{max}	h/2 (m)	Δx_{max} (m)
Galleria Idraulica	SGI1	Arenarie di S. Vito (medie)	A	1.0	0.0716	78 / 490	0.7	0.0501	66	0.033	2500	0.000013	20	0.000232
	SGI2	Arenarie di S. Vito (fratturate / faglia)	A	1.0	0.0716	78	0.7	0.0501	66	0.033	2500 / 1000	0.000013 / 0.000033	20	0.000232 / 0.000579
	SGI3	Arenarie di S. Vito (fratturate)	A	1.0	0.0716	490	0.7	0.0501	66	0.033	2500	0.000013	20	0.000232
	SGI4	Arenarie di S. Vito (faglia)	A	1.0	0.0716	490	0.7	0.0501	66	0.033	1000	0.000033	20	0.000579
Galleria accesso alla Centrale	SGC1	Arenarie di S. Vito (medie)	A	1.0	0.0716	78 / 490	0.7	0.0501	66	0.033	2500	0.000013	30	0.000364
	SGC2	Arenarie di S. Vito (fratturate)	A	1.0	0.0716	78	0.7	0.0501	66	0.033	2500	0.000013	30	0.000364
	SGC3	Arenarie di S. Vito (fratturate / faglia)	A	1.0	0.0716	490 / 78	0.7	0.0501	66	0.033	2500 / 1000	0.000013 / 0.000033	30	0.000364 / 0.000910
Galleria accesso al Pozzo Piezometrico	SGPz1	Arenarie di S. Vito (medie)	A	1.0	0.0716	300	0.7	0.0501	66	0.033	2500	0.000013	20	0.000232
	SGPz2	Arenarie di S. Vito (fratturate)	A	1.0	0.0716	300	0.7	0.0501	66	0.033	2500	0.000013	20	0.000232
	SGPz3	Arenarie di S. Vito (faglia)	A	1.0	0.0716	300	0.7	0.0501	66	0.033	1000	0.000033	20	0.000579
Centrale in Caverna e SSE	-	A medi	A	1	0.0716	460	0.7	0.0501	66	0.033	2500	0.00001	70	0.0009

Opera	Sez. tipo	Litotipo	cat suolo	S	$a_{max,s}$	copertura (m)	C	$a_{z,max}$	k	V_s (m/s)	C_s (m/s)	γ_{max}	h/2 (m)	Δx_{max} (m)
Caverna Pozzo Paratoie	-	A medi	A	1	0.0716	30	0.7	0.050	66	0.033	2500	0.00001	35	0.0005
		A minimi									1000	0.00003		0.0012
Caverna Pozzo Piezometrico	-	A medi	A	1	0.0716	350	0.7	0.050	66	0.033	2500	0.00001	35	0.0005
		A minimi									1000	0.00003		0.0012

4.1 Considerazioni aggiuntive ed ulteriori precauzioni da adottare in fase esecutiva

Come si è visto nei precedenti paragrafi le principali strutture interraste (gallerie e caverne) sono state dimensionate considerando nei calcoli, in maniera esplicita, le forzanti di tipo sismico. Le strutture costituenti il rivestimento di queste opere pertanto sono state dimensionate in modo da sopportare gli incrementi di carico attesi dovuti al sisma.

Nel seguito del presente paragrafo si riportano una serie di informazioni sulle ulteriori precauzioni che potranno essere valutate durante la fase esecutiva per garantire la stabilità delle opere sotto il profilo sismico. In particolare vengono definiti alcuni interventi aggiuntivi che, eventualmente, potranno essere predisposti in corrispondenza delle connessioni tra le diverse opere ed in corrispondenza delle discontinuità (sotto il profilo della rigidità) del terreno o del rivestimento. Nella fase attuale del progetto tali interventi aggiuntivi vengono solo illustrati dal punto di vista teorico, rimandandone la valutazione tecnica e la eventuale progettazione ingegneristica alle successive fasi di progettazione.

Come si è visto nei precedenti capitoli, le forzanti sismiche sono state implementate all'interno delle simulazioni numeriche svolgendo un'analisi dinamica semplificata secondo i criteri precedentemente illustrati. Tuttavia è bene sottolineare come tale analisi sia in grado di simulare realisticamente solamente gli effetti legati all'ovalizzazione del cavo in direzione trasversale, che come si è visto risulta essere la condizione più gravosa per la sezione corrente di una galleria. Il metodo impiegato, dunque, non è in grado di cogliere eventuali effetti deformativi in direzione longitudinale, né effetti localizzati in punti "critici" legati brusche variazioni di rigidità della struttura o del terreno circostante.

Il primo punto, legato alla propagazione delle deformazioni in direzione longitudinale, risulta meno rilevante per le gallerie, in quanto la struttura di rivestimento non presenta solitamente una continuità strutturale in direzione longitudinale e pertanto è solitamente in grado di accettare le deformazioni dovute al sisma senza che esse producano danni significativi.

Più complesso è invece il tema legato ai bruschi cambi di rigidità della struttura o del terreno circostante, circostanze entrambe presenti lungo il tracciato dell'impianto in progetto. Tale condizione è rappresentata principalmente dalle seguenti situazioni:

1. collegamenti tra gallerie ed altre strutture sotterranee o superficiali;
2. giunzioni di gallerie il cui rivestimento presenta una variazione di rigidità dovuta al cambio di spessore o ad una variazione del materiale strutturale con cui viene realizzato il rivestimento;
3. passaggio attraverso mezzi geologici distinti di diversa rigidità (impedenza).

Le situazioni 1 e 2 riguardano principalmente l'aspetto puramente strutturale del rivestimento dell'opera o delle zone di connessione tra le diverse opere sotterranee. In queste situazioni, la differenza di rigidità può sottoporre la struttura a movimenti differenziali e generare delle concentrazioni anomale di sollecitazioni. Per evitare questo aumento delle sollecitazioni la soluzione più comune è quella di permettere gli spostamenti differenziali predisponendo l'impiego localizzato di giunti sismici, solitamente costituiti da lamiere di acciaio piegate e polimeri. La progettazione di questi particolari giunti ha tre obiettivi fondamentali:

- consentire i movimenti differenziali in direzione longitudinale, trasversale e le rotazioni relative tra le diverse strutture o parti di esse;
- garantire la resistenza, sia in condizioni statiche sia in condizioni dinamiche, nei confronti delle spinte dovute al terreno ed eventualmente all'acqua in esso presente;
- garantire la tenuta idraulica.

La situazione 3 del precedente elenco numerato coinvolge invece anche l'interazione terreno-struttura. Tale condizione si verifica quando la struttura attraversa due terreni diversi in termini di rigidità (impedenza). In questo caso Kawashima (2000) propone, oltre alla soluzione del giunto sismico, un isolamento esteso del tunnel dal terreno circostante (Figura 4.3). Tale metodo prevede che venga interposto uno strato di materiale maggiormente deformabile tra la struttura sotterranea e il mezzo circostante, in questo modo la trasmissione della deformazione sismica può essere mitigata, riducendo le forze agenti sul rivestimento della galleria.

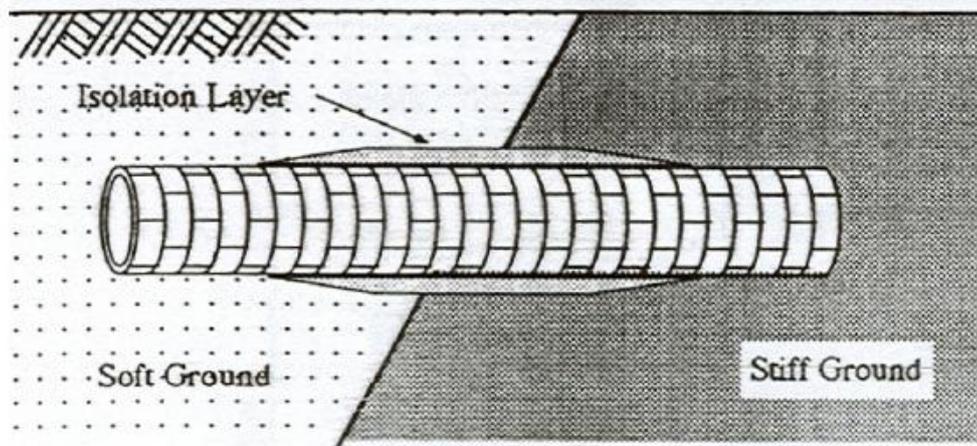


Figura 4.3 – Isolamento esteso del tunnel (Kawashima, 2000)

Un discorso assolutamente analogo a quello relativo alle gallerie può essere sviluppato anche in merito ai pozzi. Tali opere sotterranee difatti possono essere considerate alle stregua di gallerie le quali si sviluppano però in direzione verticale. Analogamente alle gallerie il rivestimento dei pozzi è costituito da anelli e non si ha una completa continuità strutturale tra gli stessi, per questa ragione tali opere sono in grado di accettare un certo livello di deformazione relativa senza compromettere l'integrità strutturale dell'opera nel suo complesso. Analogamente al caso delle gallerie infine è possibile realizzare dei giunti sismici in corrispondenza delle zone di collegamento con altre opere sotterranee ed anche degli isolamenti estesi nel caso in cui l'opera attraversi terreni con diversa rigidità o zone di intenso disturbo tettonico.

Le misure sopra descritte, unite ad una corretta progettazione dei rivestimenti in condizioni sismiche, risultano particolarmente efficaci nel garantire la stabilità delle strutture sotterranee durante gli eventi sismici. Nella fase di progetto corrente si è tenuto conto in maniera esplicita dell'azione sismica per il pre-dimensionamento del rivestimento delle sezioni correnti delle principali opere sotterranee. L'eventuale dimensionamento dei giunti sismici da predisporre in corrispondenza delle connessioni tra le diverse opere, così come l'eventuale dimensionamento e le specifiche realizzative dell'isolamento esteso da realizzare in corrispondenza delle zone di contatto tra unità geotecniche differenti, vengono rimandati alle successive fasi di progetto, in quanto il dimensionamento di tali particolari costruttivi esula dagli scopi dell'attuale livello di progettazione.

Un'ultima considerazione viene infine proposta sulla fase transitoria legata alla cantierizzazione delle opere sotterranee. Secondo la normativa vigente le verifiche sismiche possono essere omesse nei casi di strutture provvisorie e durante le fasi temporanee quali appunto quelle legate alla realizzazione delle opere stesse. Si sottolinea inoltre come le strutture di rivestimento siano state verificate nei confronti dello SLU statico in tutte le fasi realizzative, ivi comprese le opere di rivestimento di prima fase delle opere sotterranee.

5. BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI NORMATIVI

5.1 Normativa di riferimento

- Legge 5 Novembre 1971 N° 1086 – “Norme per la disciplina delle opere in calcestruzzo cementizio, normale e precompresso ed a struttura metallica”;
- Legge 2 Febbraio 1974 n.64: “Provvedimenti per le costruzioni, con particolari prescrizioni per le zone sismiche”;
- “Norme tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 17 Gennaio 2018
- “Circolare esplicativa” del 11 febbraio 2019 n° 7/C.S.LL.PP.
- 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.

5.2 Bibliografia di riferimento

- A.G.I. (2005) - Associazione Geotecnica Italiana, Aspetti Geotecnici della Progettazione in Zona Sismica - Linee Guida, ed. Pàtron, Bologna
- Bilotta, E., Lanzano, G., Russo, G., Santucci da Magistris, F., Aiello, V., Conte, E., Silvestri, F., Valentino, M. “*Analisi pseudostatica e dinamica di gallerie in aree sismiche*” – Atti XII Convegno ANIDIS “L’ingegneria Sismica in Italia”, Pisa, giugno 2007
- Chiarelli, M. “*Dinamica delle opere in sottoterraneo*”, pubblicazione sulla rivista “INGENIO web” del 12 Ottobre 2017, INGENIO n°57 Ottobre 2017, Imready Srl – RSM
- Dowding C.H., Rozen A., “*Damage to rock tunnels from earthquake shaking*”, American Society of Civil Engineers, Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol.104, p. 175-191 (1978)
- Gaspari, G.M., Quaglio, G. e Floria, V. “*Design and construction of tunnel under severe seismic conditions. The case study of Kadikoy-Kartal metro line in Istanbul*”, pubblicazione su Rivista Italiana di Geotecnica, 2/2011, pp.80-102
- Hashash, Y.M.A., Hook, J.J., Schmidt. B. e Yao, J. “*Seismic design and analysis of underground structures*”, pubblicazione su Tunnelling and Underground Space Technology, 16 (2001), pp.247-293
- Lai C.G., Foti S., Rota M., “Input Sismico e Stabilità Geotecnica dei Siti di Costruzione” Collana dei Manuali di Progettazione Antisismica – Vol. 6, IUSS Press, Pavia (2009)
- Lanzano, G., Bilotta, E. e Russo, G. “*Tunnels under seismic loading: a review of damage case histories and protection methods*”, pubblicazione su Strategies for reduction of the seismic risk, Publisher StreGa, 65-75 (2008)
- Penzien, J., Wu, C., “*Stresses in linings of bored tunnels*”. Int. J. Earthquake Eng. Struct. Dyn. 27, pp. 283-300 (1998)

- Penzien, J., “*Seismically induced racking of tunnel linings*”. Int. J. Earthquake Eng. Struct. Dyn. 29, pp. 683-691 (2000)
- Power M.S., Rosidi D., Kaneshiro J.Y. “*Seismic vulnerability of tunnels and underground structures revisited*”, Proceedings of North American Tunneling '98, Newport Beach, CA, Balkema Rotterdam, p. 243-250. (1998)
- Sharma S.W.R., Judd, “*Underground opening damage from earthquakes*”, Engineering Geology, vol.30, p. 263-276. (1991)
- Wang, J. N. “*Seismic design of tunnel – A simple state of the art design approach*”. Parson Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc., New York, Monograph 7 (1993)