

**NUOVA LINEA TORINO LIONE - NOUVELLE LIGNE LYON TURIN  
PARTE COMUNE ITALO-FRANCESE - PARTIE COMMUNE FRANCO-ITALIENNE  
SEZIONE TRANSFRONTALIERE PARTE IN TERRITORIO ITALIANO  
SECTION TRANSFRONTALIERE PARTIE EN TERRITOIRE ITALIEN**

**LOTTO COSTRUTTIVO 1 /LOT DE CONSTRUCTION 1  
CANTIERE OPERATIVO 04C /CHANTIER DE CONSTRUCTION 04C  
SVINCOLO DI CHIOMONTE IN FASE DI CANTIERE  
ECHANGEUR DE CHIOMONTE DANS LA PHASE DE CHANTIER  
PROGETTO ESECUTIVO - ETUDES D'EXECUTION  
CUP C11J05000030001 - CIG 6823295927**

**STUDIO GENERALE GEOLOGICO, GEOTECNICO, IDROGEOLOGICO E SISMICO  
RELAZIONE SISMICA**

| Indice | Date/ Data | Modifications / Modifiche                                                  | Etabli par / Concepito da   | Vérifié par / Controllato da | Autorisé par / Autorizzato da   |
|--------|------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 0      | 30/04/2017 | Première diffusion / Prima emissione                                       | C.BELTRAMI<br>(-)           | L.BARBERIS<br>(MUSINET ENG.) | C.GIOVANNETTI<br>(MUSINET ENG.) |
| A      | 30/09/2017 | Rèvision suite aux commentaires TELT/<br>Revisione a seguito commenti TELT | C.BELTRAMI<br>(-)           | L.BARBERIS<br>(MUSINET ENG.) | C.GIOVANNETTI<br>(MUSINET ENG.) |
| B      | 29/06/2018 | Modifica titolo progetto/<br>Modifications titre project                   | L.PERRONE<br>(MUSINET ENG.) | L.PERRONE<br>(MUSINET ENG.)  | L.BARBERIS<br>(MUSINET ENG.)    |
|        |            |                                                                            |                             |                              |                                 |
|        |            |                                                                            |                             |                              |                                 |

|                       |           |                   |   |   |   |              |   |   |   |                   |                 |   |   |   |   |
|-----------------------|-----------|-------------------|---|---|---|--------------|---|---|---|-------------------|-----------------|---|---|---|---|
| 1                     | 0         | 4                 | C | C | 1 | 6            | 1 | 6 | 6 | N                 | V               | 0 | 2 | 0 | 0 |
| Cat.Lav.<br>Cat.Trav. | Lotto/Lot | Contratto/Contrat |   |   |   | Opera/Oeuvre |   |   |   | Tratto<br>Tronçon | Parte<br>Partie |   |   |   |   |

|               |                                    |   |                   |                                        |   |   |   |                 |   |
|---------------|------------------------------------|---|-------------------|----------------------------------------|---|---|---|-----------------|---|
| E             | R                                  | H | G                 | E                                      | 0 | 1 | 1 | 2               | B |
| Fase<br>Phase | Tipo documento<br>Type de document |   | Oggetto<br>Object | Numero documento<br>Numéro de document |   |   |   | Indice<br>Index |   |

**SCALA / ÉCHELLE**

-

**IL PROGETTISTA/LE DESIGNER**



Dott. Arch. Corrado GIOVANNETTI  
Albo di Torino  
N° 2736

**L'APPALTATORE/L'ENTREPRENEUR**

**IL DIRETTORE DEI LAVORI/LE MAÎTRE D'ŒUVRE**

**SOMMAIRE / INDICE**

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| 1. OGGETTO E SCOPO .....                                    | 4  |
| 2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....                           | 5  |
| 2.1 Documenti di progetto esecutivo .....                   | 5  |
| 2.2 Riferimenti normativi .....                             | 5  |
| 2.3 Riferimenti bibliografici .....                         | 5  |
| 3. INQUADRAMENTO STRATIGRAFICO .....                        | 6  |
| 4. INDAGINI DI RIFERIMENTO .....                            | 7  |
| 5. CARATTERIZZAZIONE SISMICA .....                          | 8  |
| 5.1 Categoria di sottosuolo .....                           | 8  |
| 5.2 Vita nominale e classe d'uso dell'opera .....           | 13 |
| 5.3 Tempo di ritorno .....                                  | 14 |
| 5.4 Spettri elastici di risposta .....                      | 14 |
| 6. RIGIDEZZA DINAMICA DELLE FONDAZIONI .....                | 22 |
| 6.1 Matrici di rigidezza .....                              | 25 |
| 6.1.1 Fondazioni viadotto Clarea esistente .....            | 25 |
| 6.1.2 Fondazioni svincolo della Maddalena in progetto ..... | 26 |

**LISTE DES FIGURES / INDICE DELLE FIGURE**

|                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Figura 1 – Profilo <math>V_{S,30}</math> PVs-1</i> .....                                                                                                                               | 10 |
| <i>Figura 2 – Profilo <math>V_{S,30}</math> PVs-2</i> .....                                                                                                                               | 11 |
| <i>Figura 3 – Sondaggio <math>V_{S,30}</math>; nelle colonne a destra sono riportate le velocità <math>V_S</math> per i sismostrati e la corrispondente profondità degli stessi</i> ..... | 12 |
| <i>Figura 4 – Spettri di risposta (componenti orizzontale e verticale) per lo stato limite SLV ...</i>                                                                                    | 18 |
| <i>Figura 5 - Spettri di risposta (componenti orizzontale e verticale) per lo stato limite SLD ...</i>                                                                                    | 21 |
| <i>Figura 6 – Schemi di riferimento per il calcolo della rigidezza dinamica di fondazioni di forma arbitraria approfondite in un semispazio omogeneo (Gazetas, 1991) .....</i>            | 22 |
| <i>Figura 7 – Grafici adimensionali per la determinazione dei coefficienti di rigidezza dinamica (da consultare congiuntamente alla Tabella 5) .....</i>                                  | 24 |

## 1. OGGETTO E SCOPO

Questo documento è parte del progetto esecutivo dei due viadotti costituenti le rampe di ingresso e uscita del “Nuovo svincolo di La Maddalena”, lungo l’autostrada A32, in corrispondenza del cantiere di Chiomonte della linea ferroviaria Alta Velocità Torino-Lione in corso di realizzazione.

Le opere in progetto sono ubicate nell’area della Maddalena, nel comune di Chiomonte, allo sbocco Vallone Tiraculo - Rio Clarea, e in particolare sovrappassano il rio Clarea, sviluppandosi tuttavia per la maggior parte sul versante orografico destro del rio stesso, prima del tratto in cui lo stesso si immette nella Dora in prossimità delle “Gorge di Susa”.

La rampa di uscita in progetto si distacca dal viadotto Clarea esistente lungo l’A32, e in particolare dall’impalcato del viadotto di salita (carreggiata Nord) per poi sottopassarlo con un’ampia curva fino a raggiungere la sommità di un cumulo di deposito permanente dei materiali di smarino delle gallerie della linea TAV in costruzione, realizzato a ridosso del promontorio delle Vigne, a Sud del viadotto esistente; qui la rampa di uscita si raccorda con la viabilità di collegamento al cantiere e ai centri abitati più vicini, nonché con la futura rampa di ingresso dello svincolo in progetto, che, sempre partendo dalla sommità del deposito di materiali di smarino, rientra sul viadotto Clarea di discesa (carreggiata Sud).

Lo svincolo sarà utilizzato, in via provvisoria, per l’ingresso e l’uscita dei mezzi di lavoro dal cantiere TAV, fino alla chiusura del cantiere stesso, poi costituirà un nuovo svincolo sulla A32 aperto al traffico, a servizio di questa parte della valle.

Questo documento ha per oggetto specifico la caratterizzazione stratigrafica e geotecnica dei terreni interessati dalle opere in progetto, e in particolare, dopo un elenco dei documenti di riferimento richiamati nel testo, affronta i seguenti temi:

- elenco delle indagini di riferimento utilizzate;
- esposizione dei principali metodi e criteri di interpretazione delle indagini;
- caratterizzazione stratigrafica;
- caratterizzazione geotecnica;
- cenni sulla caratterizzazione sismica, coi principali parametri sismici da utilizzare nelle analisi e verifiche di carattere geotecnico.

La caratterizzazione sismica completa è riportata in un apposito documento separato; allo stesso modo, i risultati delle indagini sono riportati per esteso (“log” stratigrafici dei sondaggi, fotografie delle cassette catalogatrici, certificati delle prove in foro e di laboratorio, descrizione dei metodi e delle procedure di esecuzione adottati, nonché dei macchinari utilizzati, eccetera) in documenti specificamente dedicati, e ai quali si rimanda per ogni dettaglio in merito.

## 2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

### 2.1 Documenti di progetto esecutivo

- [1]. “Planimetria con ubicazione delle indagini geognostiche” Elab. E PL GE 0091
- [2]. “Profilo geologico-tecnico – Rampa di ingresso” Elab. E PR GE 0105
- [3]. “Profilo geologico-tecnico – Rampa di uscita” Elab. E PR GE 0106
- [4]. “Relazione descrittiva delle indagini eseguite” Elab. E RG GE 0092 (e allegati)

### 2.2 Riferimenti normativi

- [5]. D.M. 14.01.2008 “Norme Tecniche per le Costruzioni” Suppl. ord. n. 30 alla GU 4.02.2008, n. 29
- [6]. Circolare Min. 2/2/2009, n. 617 – “Istruzioni per l’applicazione delle Norme tecniche per le costruzioni”
- [7]. O.P.C.M. 20 Marzo 2003, n. 3274 “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica” Suppl. ord. alla G.U. 8.5.2003, n. 15

### 2.3 Riferimenti bibliografici

- [8]. Gazetas G. (1991) “Foundations vibrations” in “Foundation Engineering Handbook”, Springer US

### 3. INQUADRAMENTO STRATIGRAFICO

Sotto una discontinua presenza di materiale di riporto (Unità geotecnica UG1), concentrato in corrispondenza di strade e opere realizzate nell'ambito del cantiere TELT attuale, i terreni interessati dalle opere in progetto sono costituiti in larghissima prevalenza da ghiaie e sabbie e sabbie e ghiaie anche molto grossolane, con frequenti ciottoli e diffusa presenza di trovanti di diametro generalmente dell'ordine di qualche decimetro, fino a diametri massimi riscontrati dai sondaggi di circa 1-1.2m (Unità geotecnica UG3).

Nel corpo di questa unità si hanno intercalazioni e livelli discontinui caratterizzati da granulometria meno grossolana, in cui a luoghi prevale la frazione sabbiosa e la percentuale di ghiaia e ciottoli è più ridotta (Unità geotecnica UG2) e a luoghi si hanno anche limi sabbiosi e sabbie limose (Unità geotecnica UG4).

E' sempre presente una frazione fine, per lo più inferiore al 25 %, tranne nella UG4 nella quale può risultare prevalente: in genere si tratta in larghissima maggioranza di limo, essendo la frazione argillosa quasi sempre inferiore al 5 % (in casi molto sporadici è risultata superiore al 10% e solo in un caso è risultata attorno al 20 %).

Alla base delle sopra descritte unità di terreni sciolti, si ha un substrato roccioso (Unità geotecnica UG5), costituito da calcescisti filladici generalmente alterati e fratturati, con intercalazioni quarzose. Il substrato roccioso è stato raggiunto solo da pochissimi sondaggi, a profondità superiori a quelle di interesse per le opere in progetto.

Le unità geotecniche fondamentali possono essere così descritte:

- *unità geotecnica UG1*: riporti e orizzonti di alterazione superficiale, prevalentemente sabbioso-limosi con subordinata ghiaia e ciottoli; comprendono anche il deposito del materiale di smarino del tunnel della Maddalena, più grossolano;
- *unità geotecnica UG2*: depositi costituiti in prevalenza da sabbia e sabbia limosa con ghiaia e subordinati ciottoli e più sporadici blocchi e trovanti;
- *unità geotecnica UG3*: depositi quaternari più grossolani rappresentati principalmente da ghiaie con ciottoli e blocchi in matrice sabbiosa o sabbioso-limosa subordinata;
- *unità geotecnica UG4*: depositi limosi o limoso-sabbiosi (il contenuto in limo può arrivare attorno al 50%) con subordinata ghiaia e rari ciottoli;
- *unità geotecnica UG5*: substrato roccioso costituito dai calcescisti della zona piemontese.

## 4. INDAGINI DI RIFERIMENTO

In quanto segue si farà riferimento alle seguenti indagini:

- profili MASW PVs-1 e PVs-2 eseguiti nell'ambito della progettazione del tunnel della Maddalena facente parte della linea AV Torino-Lione;
- sondaggio  $V_{s,30}$  eseguito nel corso della medesima campagna di indagine citata;
- prove geofisiche all'interno dei fori di sondaggio CH4b-1, CH4b-2 e S4b-2, eseguite durante la campagna di indagini per la progettazione definitiva dello svincolo della Maddalena.

Si è inoltre tenuto conto di tutto il quadro delle indagini geognostiche disponibili, elencate nella relazione geotecnica allegata al presente Progetto Esecutivo.

## 5. CARATTERIZZAZIONE SISMICA

La normativa tecnica vigente (DM 14/01/2008) ha definito i valori dell'accelerazione orizzontale di picco  $a_g$  e dei principali parametri spettrali in presenza di suoli rigidi di tipo A (ammassi rocciosi affioranti, o terreni molto rigidi, con velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s > 800$  m/sec, eventualmente sovrastati da uno strato di alterazione superficiale di non più di 3 m di spessore), in forma puntuale, in funzione cioè delle coordinate geografiche del sito in esame. I valori dell'accelerazione  $a_g$  e dei parametri spettrali di riferimento possono essere determinati mediante un apposito foglio di calcolo fornito dal Ministero dei Lavori Pubblici, in funzione delle coordinate di qualsiasi sito sul territorio nazionale, che vengono "allacciate" a un reticolo di punti di riferimento in cui tali parametri sono già stati determinati (sono anche allegati in formato tabellare alle NTC 2008 stesse). Qualora, come spesso capita, il sito di interesse non ricada esattamente su un nodo del reticolo di riferimento, i parametri spettrali e l'accelerazione di picco su suolo rigido sono determinati per interpolazione fra i valori dei 4 nodi del reticolo più vicini.

I parametri spettrali per i due comuni interessati dal tracciato in progetto sono stati dunque calcolati secondo le NTC08 in funzione della categoria di sottosuolo, della vita nominale e della classe d'uso dell'opera, parametri di seguito definiti.

### 5.1 Categoria di sottosuolo

La normativa vigente (cfr. doc. rif. [5]) distingue 7 categorie di sottosuolo (cat. A÷E e categorie aggiuntive S1 e S2), secondo quanto indicato nella tabella sottostante.

| Categoria | Descrizione                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>A</b>  | <i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.                                                                                                                                                                                     |
| <b>B</b>  | <i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).      |
| <b>C</b>  | <i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina). |
| <b>D</b>  | <i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).                |
| <b>E</b>  | <i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m</i> , posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>S1</b> | Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.                                                                                                                              |
| <b>S2</b> | Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.                                                                                                                                                                                                                                                       |

**Tabella 1** – Categorie di sottosuolo (da NTC 2008, tabelle 3.2.II e 3.2.III)

Per poter assegnare un sito a una categoria di sottosuolo è dunque necessario calcolare una velocità equivalente  $V_{s,30}$  di propagazione nel terreno delle onde elastiche di taglio nei primi 30m da piano campagna, definita come:

$$V_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{S,i}}} \text{ [m/s]}$$

con:

$h_i$  = altezza dello strato a velocità  $V_S$  omogenea (sismostrato)  $i^{\text{esimo}}$

$V_{S,i}$  = velocità di propagazione delle onde elastiche di taglio all'interno del sismostrato  $i^{\text{esimo}}$

A tale scopo, nell'ambito della progettazione del tunnel della Maddalena facente parte della linea AV Torino-Lione, sono stati eseguiti due profili MASW PVs-1 e PVs-2 e un sondaggio  $V_{S,30}$ . Le figure seguenti riportano i risultati di queste indagini geofisiche.

Gli stendimenti PVs-1 e PVs-2 hanno rilevato velocità equivalenti  $V_{S,30}$  rispettivamente pari a:

$V_{S,30} = 350 \text{ m/s}$  PVs-1

$V_{S,30} = 323 \text{ m/s}$  PVs-2

I valori di  $V_{S,30}$  ottenuti dai due profili PVs-1 e PVs-2 assegnano dunque il sito del cantiere in esame alla categoria di sottosuolo C secondo la definizione della normativa vigente:

*“Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{S,30}$  compresi fra 180 m/s e 360 m/s [...]”* (la normativa consente anche valutazioni in base ai risultati delle SPT o ai valori della coesione non drenata ove pertinente, ma indica di utilizzare di preferenza determinazioni dirette della velocità  $V_S$ , quando disponibili).

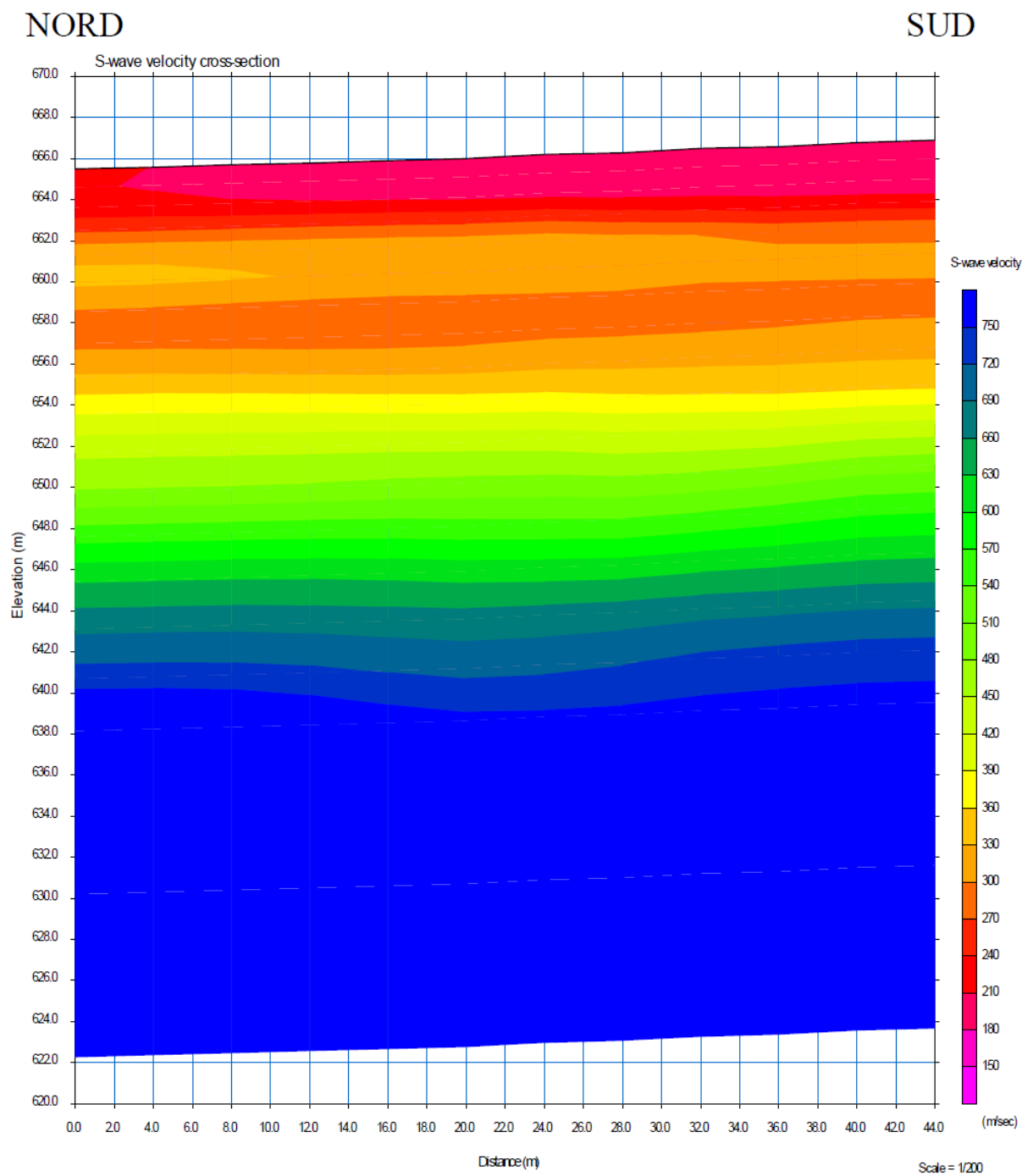
Il sondaggio  $V_{S,30}$  eseguito nell'ambito della medesima campagna di indagine ha restituito un valore maggiore, e cioè:

$V_{S,30} = 410 \text{ m/s}$

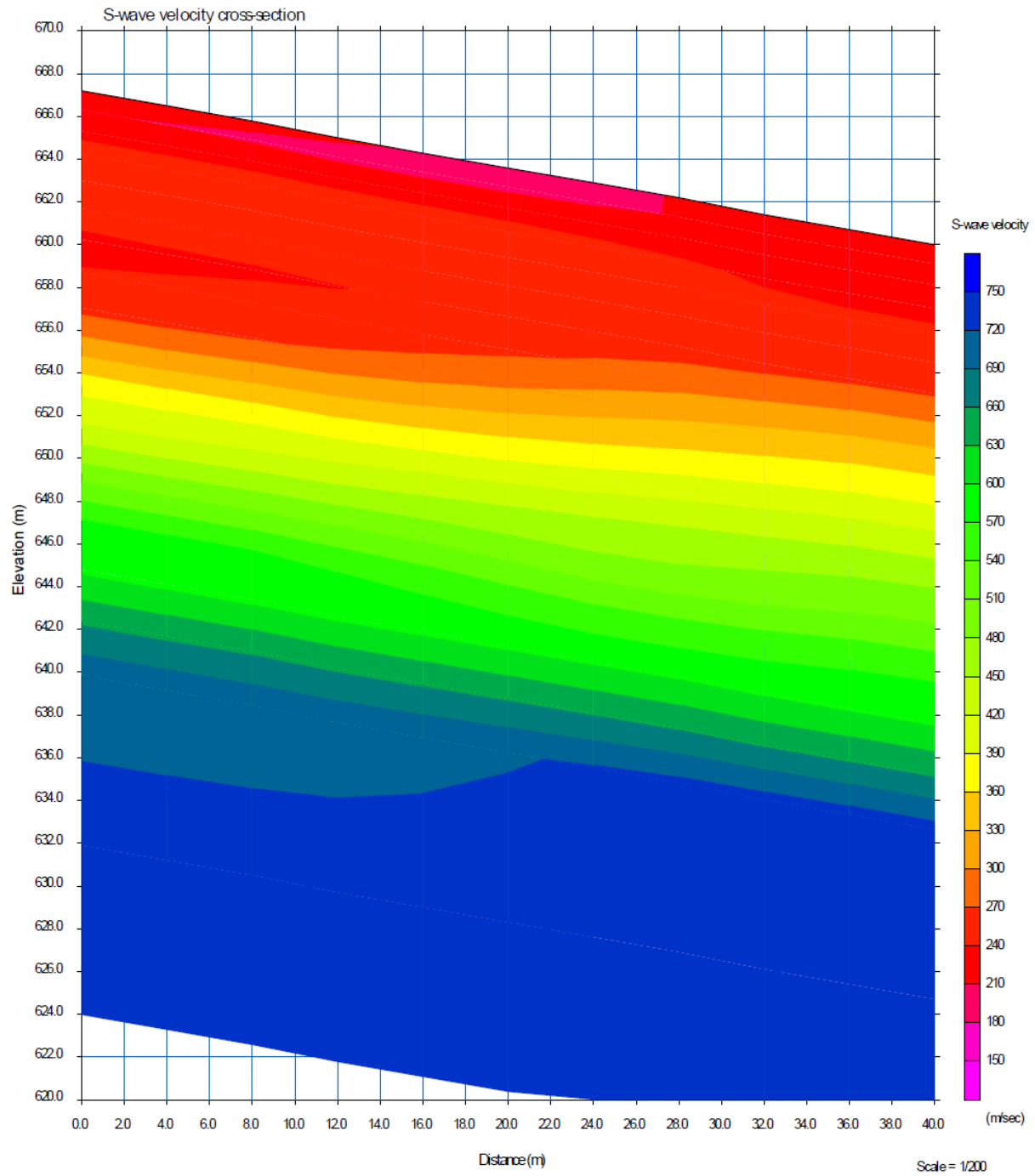
che porrebbe il sottosuolo in categoria B:

*“Depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{S,30}$  compresi fra 360 m/s e 800 m/s [...]”.*

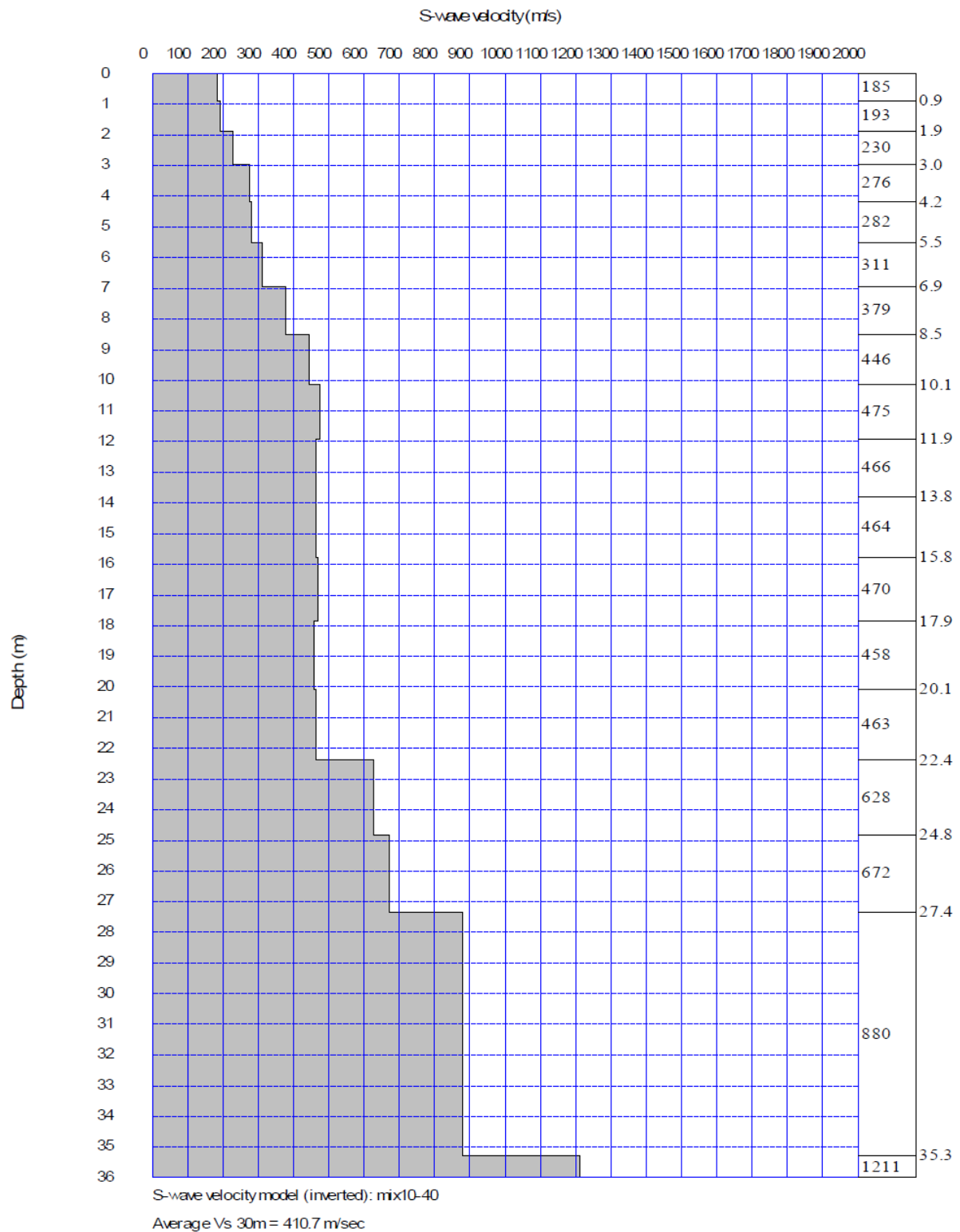
Le seguenti Figura 1 e Figura 2 riportano i corrispondenti profili  $V_{S,30}$ , rispettivamente per i profili PVs-1 e PVs-2, mentre la Figura 3 riporta quello ricavato dal sondaggio  $V_{S,30}$ .



**Figura 1** – Profilo  $V_{s,30}$  PVs-1



**Figura 2** – Profilo  $V_{s,30}$  PVs-2



**Figura 3 –** Sondaggio  $V_{s,30}$ ; nelle colonne a destra sono riportate le velocità  $V_s$  per i sismostrati e la corrispondente profondità degli stessi

Durante la campagna di indagini per la progettazione definitiva dello svincolo della Maddalena sono state eseguite prove geofisiche in foro tipo down hole all'interno dei fori di sondaggio CH4b-1, CH4b-2 e S4b-2, che hanno restituito i seguenti valori di  $V_{S,30}$ :

$$V_{S,30} = 330 \text{ m/s} \quad \text{CH4b-1}$$

$$V_{S,30} = 350 \text{ m/s} \quad \text{CH4b-2}$$

$$V_{S,30} = 385 \text{ m/s} \quad \text{S4b-2}$$

Per quanto sopra, quindi, le prove CH4b-1 e CH4b-2 hanno indicato una categoria di sottosuolo C, mentre la prova S4b-2 ha indicato una categoria B.

I terreni interessati dalle opere in progetto risultano dunque al limite fra le categorie B e C.

In via cautelativa –e in coerenza con il Progetto Definitivo- si è assunta per tutte le opere in progetto una categoria C.

## 5.2 Vita nominale e classe d'uso dell'opera

In base alla normativa vigente, “la vita nominale di un'opera strutturale  $V_N$  è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata” (cfr. doc. rif. [5], par. 2.4.1). La vita nominale è scelta, sempre in accordo alla normativa, dalle caratteristiche dell'opera, secondo quanto indicato nella tabella sottostante.

| TIPI DI COSTRUZIONE |                                                                                                        | Vita Nominale<br>$V_N$ (in anni) |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 1                   | Opere provvisorie – Opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva <sup>1</sup>                   | $\leq 10$                        |
| 2                   | Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale | $\geq 50$                        |
| 3                   | Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica    | $\geq 100$                       |

**Tabella 2** – Vita nominale per diversi tipi di opere (da NTC 2008, tabella 2.4.I)

Ai fini del calcolo delle azioni sismiche, si è considerata per le opere in progetto una vita nominale:

$$V_N = 100 \text{ anni}$$

La classe d'uso è definita dalla normativa (doc. rif. [5], par. 2.4.2.) in funzione delle prevedibili conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, come segue:

**Classe I:** Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.

**Classe II:** Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.

**Classe III:** Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.

**Classe IV:** Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al D.M. 5 novembre 2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

Nel caso in esame si è assunto  
classe d'uso: **IV**

### 5.3 Tempo di ritorno

A partire dal periodo di riferimento si determina il tempo di ritorno  $T_R$  per le diverse probabilità di superamento  $P_{VR}$  corrispondenti ai diversi Stati Limite Ultimi definiti nelle NTC 2008. In base all'Allegato A: "Pericolosità sismica" delle stesse NTC 2008, il tempo di ritorno  $T_R$  è dato, in funzione di  $P_{VR}$  da:

$$T_R = -V_R / [\ln(1-P_{VR})]$$

in cui:

$$V_R = V_N \cdot C_U \quad \text{periodo di riferimento}$$

in cui  $C_U$  è il coefficiente d'uso, dato da:

| CLASSE D'USO       | I   | II  | III | IV  |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|
| COEFFICIENTE $C_U$ | 0,7 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |

**Tabella 3** – Coefficiente d'uso (NTC 2008, tab. 2.4.II)

$\Rightarrow$  coefficiente d'uso  $C_U = 2.0$   $\Rightarrow$  periodo di riferimento  $V_R = 200$  anni

e le probabilità di superamento da considerare nel periodo di riferimento  $V_R$  sono, per i vari stati limite ultimi da considerare:

| Stati Limite              |     | $P_{VR}$ : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento $V_R$ |
|---------------------------|-----|------------------------------------------------------------------------|
| Stati limite di esercizio | SLO | 81%                                                                    |
|                           | SLD | 63%                                                                    |
| Stati limite ultimi       | SLV | 10%                                                                    |
|                           | SLC | 5%                                                                     |

**Tabella 4** – Probabilità di superamento nel periodo di riferimento (da NTC 2008, tab. 3.2.I)

### 5.4 Spettri elastici di risposta

Il periodo di riferimento per ciascuno stato limite considerato e i corrispondenti valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_o$ ,  $T^*_C$  possono essere ricavati da un apposito foglio di calcolo, fornito dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Per  $V_R = 200$  anni si ha:

$T_R = 120$  anni per  $P_{VR}=81\%$  SLO

|                   |                   |     |
|-------------------|-------------------|-----|
| $T_R = 201$ anni  | per $P_{vr}=63\%$ | SLD |
| $T_R = 1898$ anni | per $P_{vr}=10\%$ | SLV |
| $T_R = 2475$ anni | per $P_{vr}=5\%$  | SLC |

I valori dei parametri sismici  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T^*_C$  per lo risultano:

Stato Limite di Vita SLV

$$a_g/g = 0.202$$

$$F_0 = 2.530$$

$$T^*_C = 0.282 \text{ s}$$

Stato Limite di Danno SLD

$$a_g/g = 0.097$$

$$F_0 = 2.441$$

$$T^*_C = 0.254 \text{ s}$$

Il medesimo foglio di calcolo del C.S.LL.PP. restituisce gli spettri di risposta elastici delle componenti orizzontali e verticali al sito, riportati alle pagine seguenti assieme ai parametri di riferimento.

In quanto segue si è considerata una categoria topografica T2 (cfr. tabella seguente)

| Categoria | Caratteristiche della superficie topografica                                                                    |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| T1        | Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$                      |
| T2        | Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$                                                                    |
| T3        | Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$ |
| T4        | Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$                  |

Elaborazioni effettuate con "Spettri NTC ver. 1.0.2"

**Parametri e punti dello spettro di risposta orizzontale per lo stato limite: SLV****Parametri indipendenti**

| STATO LIMITE | SLV     |
|--------------|---------|
| $a_g$        | 0,202 g |
| $F_o$        | 2,530   |
| $T_C$        | 0,282 s |
| $S_S$        | 1,393   |
| $C_C$        | 1,595   |
| $S_T$        | 1,100   |
| $q$          | 1,000   |

**Parametri dipendenti**

|        |         |
|--------|---------|
| $S$    | 1,533   |
| $\eta$ | 1,000   |
| $T_B$  | 0,150 s |
| $T_C$  | 0,449 s |
| $T_D$  | 2,408 s |

**Espressioni dei parametri dipendenti**

$$S = S_S \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = \sqrt{10 / (5 + \xi)} \geq 0,55; \quad \eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5})$$

$$T_B = T_C / 3 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.8})$$

$$T_C = C_C \cdot T_C^* \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.7})$$

$$T_D = 4,0 \cdot a_g / g + 1,6 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.9})$$

**Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)**

$$0 \leq T < T_B \quad S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_c(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left( \frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

Lo spettro di progetto  $S_d(T)$  per le verifiche agli Stati Limite Ultimi è ottenuto dalle espressioni dello spettro elastico  $S_e(T)$  sostituendo  $\eta$  con  $1/q$ , dove  $q$  è il fattore di struttura. (NTC-08 § 3.2.3.5)

**Punti dello spettro di risposta**

|                  | T [s] | Se [g] |
|------------------|-------|--------|
|                  | 0,000 | 0,310  |
| $T_B \leftarrow$ | 0,150 | 0,783  |
| $T_C \leftarrow$ | 0,449 | 0,783  |
|                  | 0,543 | 0,649  |
|                  | 0,636 | 0,553  |
|                  | 0,729 | 0,483  |
|                  | 0,822 | 0,428  |
|                  | 0,916 | 0,384  |
|                  | 1,009 | 0,349  |
|                  | 1,102 | 0,319  |
|                  | 1,195 | 0,294  |
|                  | 1,289 | 0,273  |
|                  | 1,382 | 0,255  |
|                  | 1,475 | 0,239  |
|                  | 1,569 | 0,224  |
|                  | 1,662 | 0,212  |
|                  | 1,755 | 0,200  |
|                  | 1,848 | 0,190  |
|                  | 1,942 | 0,181  |
|                  | 2,035 | 0,173  |
|                  | 2,128 | 0,165  |
|                  | 2,221 | 0,158  |
|                  | 2,315 | 0,152  |
| $T_D \leftarrow$ | 2,408 | 0,146  |
|                  | 2,484 | 0,137  |
|                  | 2,560 | 0,129  |
|                  | 2,635 | 0,122  |
|                  | 2,711 | 0,115  |
|                  | 2,787 | 0,109  |
|                  | 2,863 | 0,103  |
|                  | 2,939 | 0,098  |
|                  | 3,014 | 0,093  |
|                  | 3,090 | 0,089  |
|                  | 3,166 | 0,085  |
|                  | 3,242 | 0,081  |
|                  | 3,318 | 0,077  |
|                  | 3,394 | 0,074  |
|                  | 3,469 | 0,070  |
|                  | 3,545 | 0,067  |
|                  | 3,621 | 0,065  |
|                  | 3,697 | 0,062  |
|                  | 3,773 | 0,060  |
|                  | 3,848 | 0,057  |
|                  | 3,924 | 0,055  |
|                  | 4,000 | 0,053  |

Elaborazioni effettuate con "Spettri NTC ver. 1.0.2"

**Parametri e punti dello spettro di risposta verticale per lo stato limite: SLV****Parametri indipendenti**

| STATO LIMITE | SLV     |
|--------------|---------|
| $a_{gv}$     | 0,123 g |
| $S_S$        | 1,000   |
| $S_T$        | 1,100   |
| $q$          | 1,000   |
| $T_B$        | 0,050 s |
| $T_C$        | 0,150 s |
| $T_D$        | 1,000 s |

**Parametri dipendenti**

|        |       |
|--------|-------|
| $F_v$  | 1,535 |
| $S$    | 1,100 |
| $\eta$ | 1,000 |

**Espressioni dei parametri dipendenti**

$$S = S_S \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 §. 3.2.3.5})$$

$$F_v = 1,35 \cdot F_0 \cdot \left( \frac{a_g}{g} \right)^{0,5} \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.11})$$

**Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.10)**

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

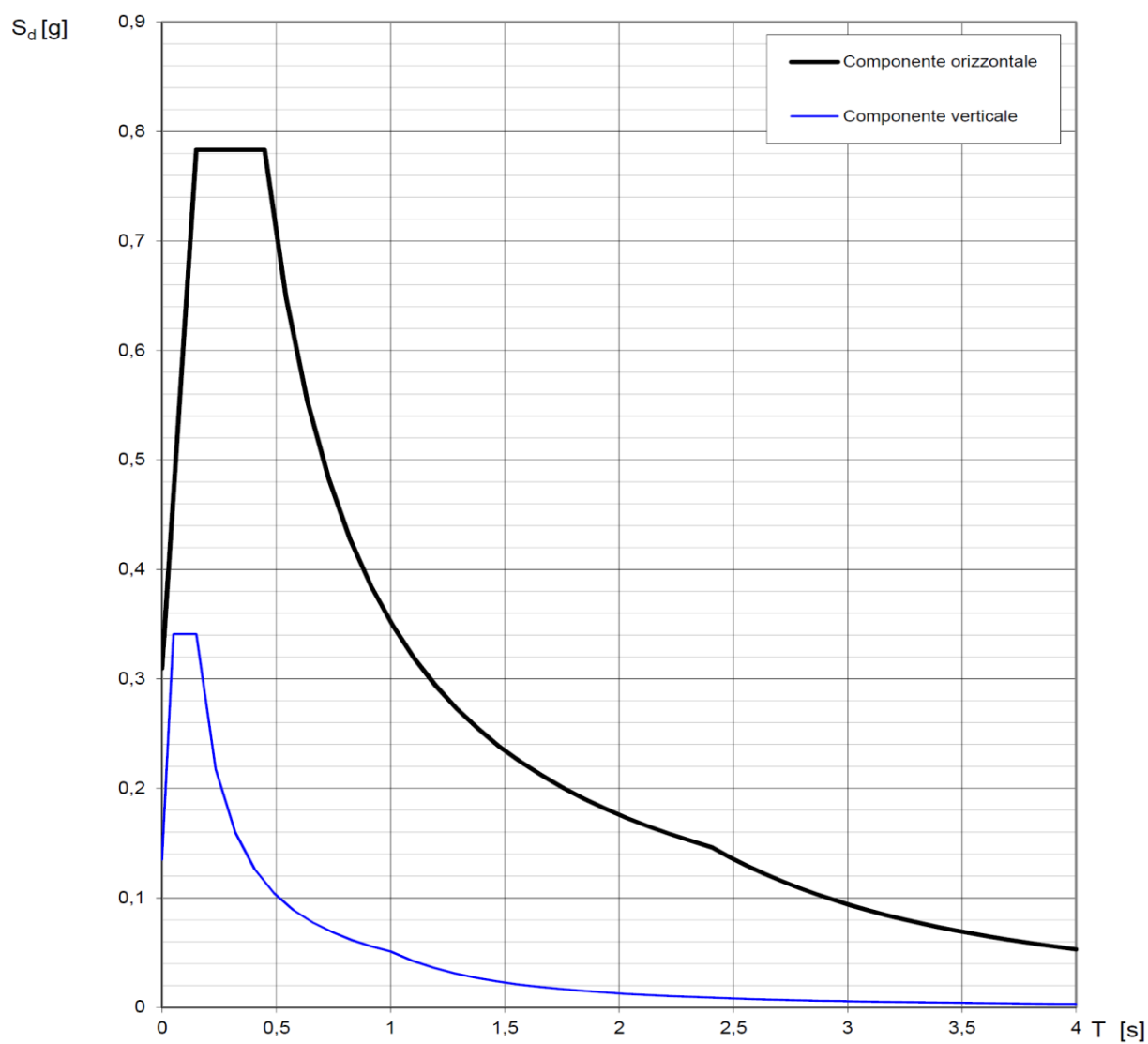
$$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left( \frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

**Punti dello spettro di risposta**

|                  | T [s] | Se [g] |
|------------------|-------|--------|
|                  | 0,000 | 0,135  |
| $T_B \leftarrow$ | 0,050 | 0,341  |
| $T_C \leftarrow$ | 0,150 | 0,341  |
|                  | 0,235 | 0,218  |
|                  | 0,320 | 0,160  |
|                  | 0,405 | 0,126  |
|                  | 0,490 | 0,104  |
|                  | 0,575 | 0,089  |
|                  | 0,660 | 0,078  |
|                  | 0,745 | 0,069  |
|                  | 0,830 | 0,062  |
|                  | 0,915 | 0,056  |
| $T_D \leftarrow$ | 1,000 | 0,051  |
|                  | 1,094 | 0,043  |
|                  | 1,188 | 0,036  |
|                  | 1,281 | 0,031  |
|                  | 1,375 | 0,027  |
|                  | 1,469 | 0,024  |
|                  | 1,563 | 0,021  |
|                  | 1,656 | 0,019  |
|                  | 1,750 | 0,017  |
|                  | 1,844 | 0,015  |
|                  | 1,938 | 0,014  |
|                  | 2,031 | 0,012  |
|                  | 2,125 | 0,011  |
|                  | 2,219 | 0,010  |
|                  | 2,313 | 0,010  |
|                  | 2,406 | 0,009  |
|                  | 2,500 | 0,008  |
|                  | 2,594 | 0,008  |
|                  | 2,688 | 0,007  |
|                  | 2,781 | 0,007  |
|                  | 2,875 | 0,006  |
|                  | 2,969 | 0,006  |
|                  | 3,063 | 0,005  |
|                  | 3,156 | 0,005  |
|                  | 3,250 | 0,005  |
|                  | 3,344 | 0,005  |
|                  | 3,438 | 0,004  |
|                  | 3,531 | 0,004  |
|                  | 3,625 | 0,004  |
|                  | 3,719 | 0,004  |
|                  | 3,813 | 0,004  |
|                  | 3,906 | 0,003  |
|                  | 4,000 | 0,003  |



**Figura 4** – Spettri di risposta (componenti orizzontale e verticale) per lo stato limite SLV

Elaborazioni effettuate con "Spettri NTC ver. 1.0.2"

**Parametri e punti dello spettro di risposta orizzontale per lo stato limite: SLD****Parametri indipendenti**

| STATO LIMITE | SLD     |
|--------------|---------|
| $a_g$        | 0,097 g |
| $F_o$        | 2,441   |
| $T_C$        | 0,254 s |
| $S_S$        | 1,500   |
| $C_C$        | 1,651   |
| $S_T$        | 1,100   |
| $q$          | 1,000   |

**Parametri dipendenti**

|        |         |
|--------|---------|
| $S$    | 1,650   |
| $\eta$ | 1,000   |
| $T_B$  | 0,140 s |
| $T_C$  | 0,419 s |
| $T_D$  | 1,988 s |

**Espressioni dei parametri dipendenti**

$$S = S_S \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55; \quad \eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5})$$

$$T_B = T_C / 3 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.8})$$

$$T_C = C_C \cdot T_C^* \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.7})$$

$$T_D = 4,0 \cdot a_g / g + 1,6 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.9})$$

**Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)**

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left( \frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

Lo spettro di progetto  $S_d(T)$  per le verifiche agli Stati Limite Ultimi è ottenuto dalle espressioni dello spettro elastico  $S_e(T)$  sostituendo  $\eta$  con  $1/q$ , dove  $q$  è il fattore di struttura. (NTC-08 § 3.2.3.5)

**Punti dello spettro di risposta**

|                  | T [s] | Se [g] |
|------------------|-------|--------|
|                  | 0,000 | 0,160  |
| $T_B \leftarrow$ | 0,140 | 0,391  |
| $T_C \leftarrow$ | 0,419 | 0,391  |
|                  | 0,494 | 0,331  |
|                  | 0,568 | 0,288  |
|                  | 0,643 | 0,254  |
|                  | 0,718 | 0,228  |
|                  | 0,793 | 0,206  |
|                  | 0,867 | 0,189  |
|                  | 0,942 | 0,174  |
|                  | 1,017 | 0,161  |
|                  | 1,091 | 0,150  |
|                  | 1,166 | 0,140  |
|                  | 1,241 | 0,132  |
|                  | 1,315 | 0,124  |
|                  | 1,390 | 0,118  |
|                  | 1,465 | 0,112  |
|                  | 1,540 | 0,106  |
|                  | 1,614 | 0,101  |
|                  | 1,689 | 0,097  |
|                  | 1,764 | 0,093  |
|                  | 1,838 | 0,089  |
|                  | 1,913 | 0,086  |
| $T_D \leftarrow$ | 1,988 | 0,082  |
|                  | 2,084 | 0,075  |
|                  | 2,179 | 0,068  |
|                  | 2,275 | 0,063  |
|                  | 2,371 | 0,058  |
|                  | 2,467 | 0,053  |
|                  | 2,563 | 0,050  |
|                  | 2,659 | 0,046  |
|                  | 2,754 | 0,043  |
|                  | 2,850 | 0,040  |
|                  | 2,946 | 0,037  |
|                  | 3,042 | 0,035  |
|                  | 3,138 | 0,033  |
|                  | 3,233 | 0,031  |
|                  | 3,329 | 0,029  |
|                  | 3,425 | 0,028  |
|                  | 3,521 | 0,026  |
|                  | 3,617 | 0,025  |
|                  | 3,713 | 0,024  |
|                  | 3,808 | 0,022  |
|                  | 3,904 | 0,021  |
|                  | 4,000 | 0,020  |

Elaborazioni effettuate con "Spettri NTC ver.1.0.2"

**Parametri e punti dello spettro di risposta verticale per lo stato limite: SLD****Parametri indipendenti**

| STATO LIMITE | SLD     |
|--------------|---------|
| $a_{gv}$     | 0,041 g |
| $S_S$        | 1,000   |
| $S_T$        | 1,100   |
| $q$          | 1,000   |
| $T_B$        | 0,050 s |
| $T_C$        | 0,150 s |
| $T_D$        | 1,000 s |

**Parametri dipendenti**

|        |       |
|--------|-------|
| $F_v$  | 1,026 |
| $S$    | 1,100 |
| $\eta$ | 1,000 |

**Espressioni dei parametri dipendenti**

$$S = S_s \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 §. 3.2.3.5})$$

$$F_v = 1,35 \cdot F_0 \cdot \left( \frac{a_g}{g} \right)^{0,5} \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.11})$$

**Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.10)**

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

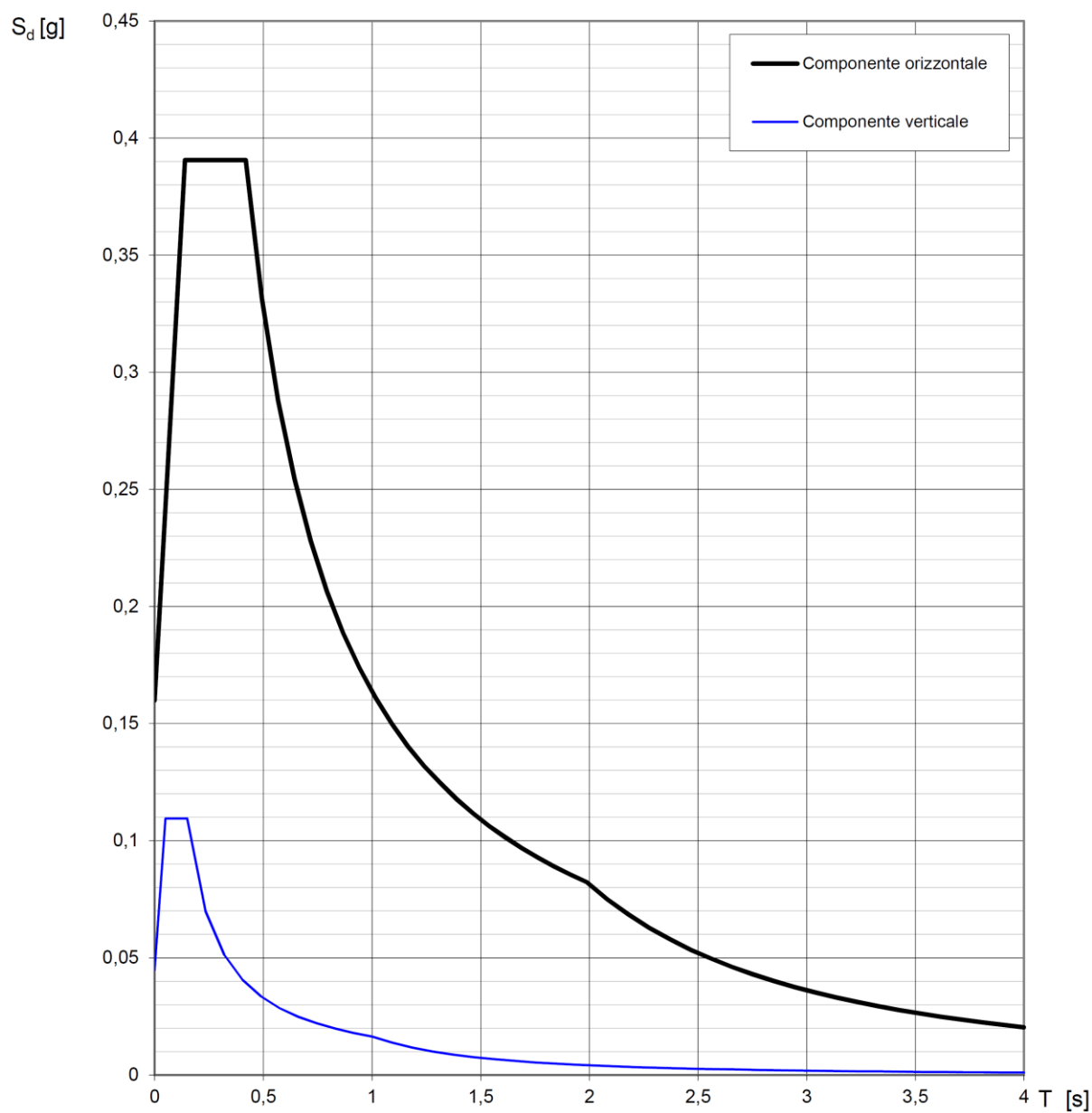
$$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left( \frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

**Punti dello spettro di risposta**

|                  | T [s] | Se [g] |
|------------------|-------|--------|
|                  | 0,000 | 0,045  |
| $T_B \leftarrow$ | 0,050 | 0,109  |
| $T_C \leftarrow$ | 0,150 | 0,109  |
|                  | 0,235 | 0,070  |
|                  | 0,320 | 0,051  |
|                  | 0,405 | 0,041  |
|                  | 0,490 | 0,034  |
|                  | 0,575 | 0,029  |
|                  | 0,660 | 0,025  |
|                  | 0,745 | 0,022  |
|                  | 0,830 | 0,020  |
|                  | 0,915 | 0,018  |
| $T_D \leftarrow$ | 1,000 | 0,016  |
|                  | 1,094 | 0,014  |
|                  | 1,188 | 0,012  |
|                  | 1,281 | 0,010  |
|                  | 1,375 | 0,009  |
|                  | 1,469 | 0,008  |
|                  | 1,563 | 0,007  |
|                  | 1,656 | 0,006  |
|                  | 1,750 | 0,005  |
|                  | 1,844 | 0,005  |
|                  | 1,938 | 0,004  |
|                  | 2,031 | 0,004  |
|                  | 2,125 | 0,004  |
|                  | 2,219 | 0,003  |
|                  | 2,313 | 0,003  |
|                  | 2,406 | 0,003  |
|                  | 2,500 | 0,003  |
|                  | 2,594 | 0,002  |
|                  | 2,688 | 0,002  |
|                  | 2,781 | 0,002  |
|                  | 2,875 | 0,002  |
|                  | 2,969 | 0,002  |
|                  | 3,063 | 0,002  |
|                  | 3,156 | 0,002  |
|                  | 3,250 | 0,002  |
|                  | 3,344 | 0,001  |
|                  | 3,438 | 0,001  |
|                  | 3,531 | 0,001  |
|                  | 3,625 | 0,001  |
|                  | 3,719 | 0,001  |
|                  | 3,813 | 0,001  |
|                  | 3,906 | 0,001  |
|                  | 4,000 | 0,001  |

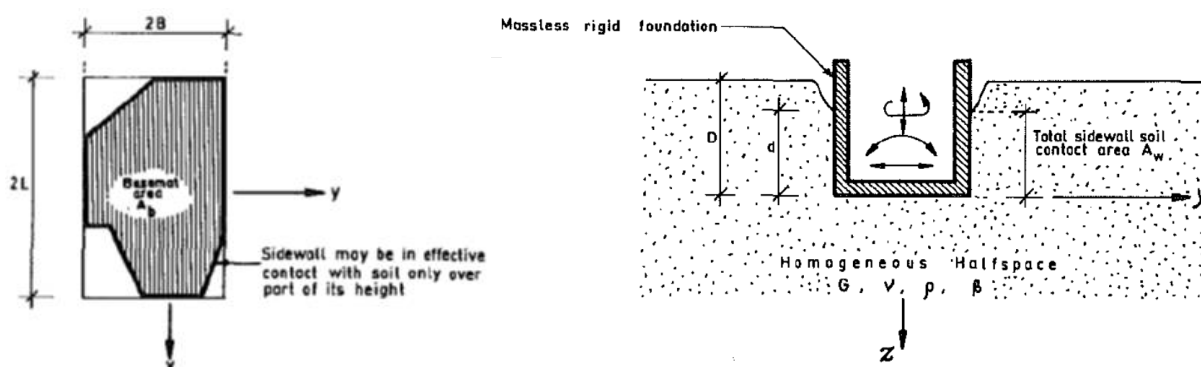


**Figura 5** - Spettri di risposta (componenti orizzontale e verticale) per lo stato limite SLD

## 6. RIGIDEZZA DINAMICA DELLE FONDAZIONI

Per le analisi delle fondazioni che richiedano maggiore affinamento in merito agli effetti cinematici, è stata calcolata la rigidezza dinamica delle fondazioni stesse in condizioni sismiche, seguendo la consolidata formulazione di Gazetas (1986, doc. rif. [8]).

In particolare, si è utilizzato lo schema indicato da Gazetas per fondazioni profonde di forma arbitraria in un semispazio omogeneo, riportato nella figura seguente, e le relative formule per il calcolo della rigidezza (o impedenza) dinamica, riportate nella successiva Tabella 5.



**Figura 6** – Schemi di riferimento per il calcolo della rigidezza dinamica di fondazioni di forma arbitraria approfondite in un semispazio omogeneo (Gazetas, 1991)

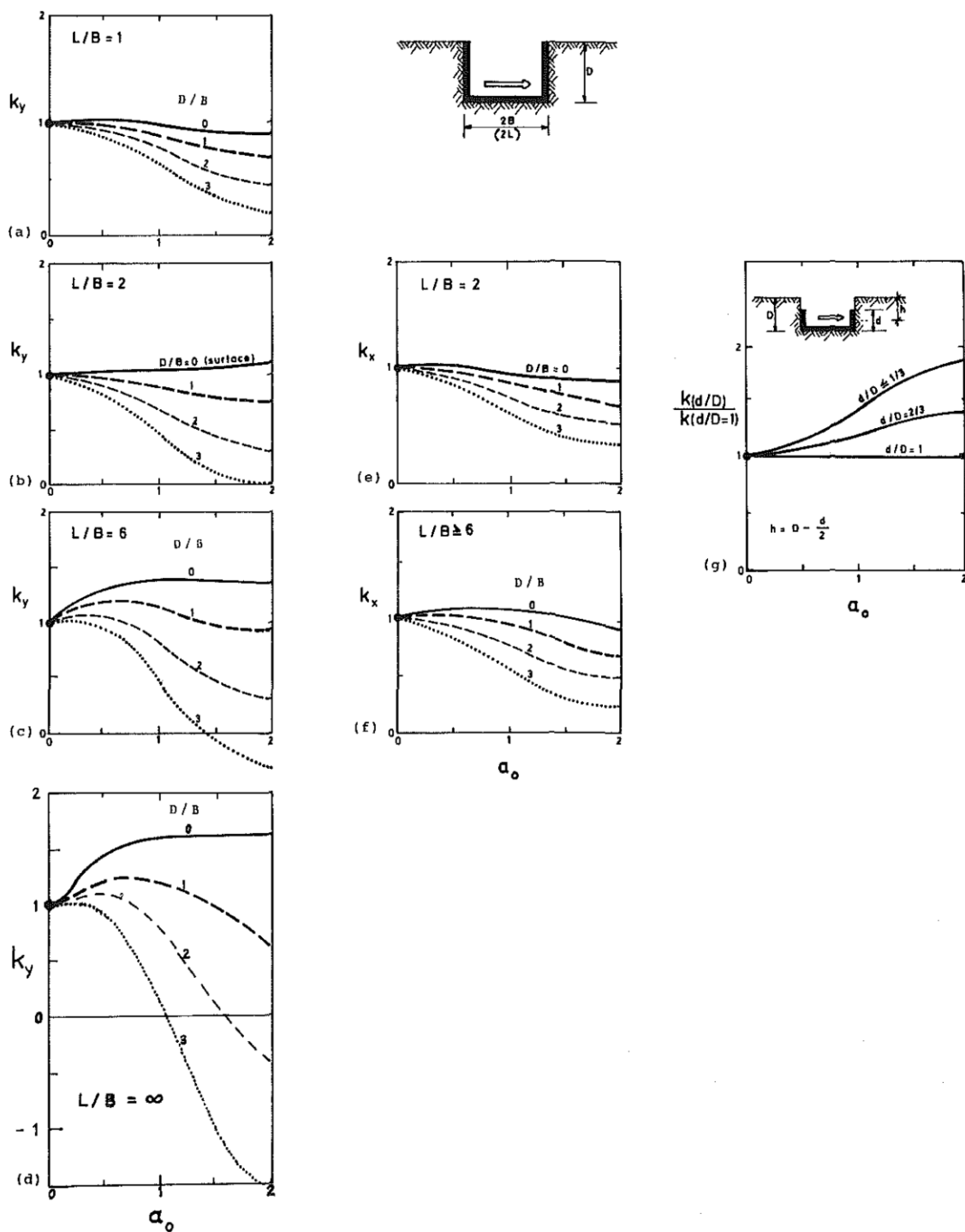
Alcuni dei termini che compaiono nella citata Tabella 5 sono determinabili in base agli abachi adimensionali in Figura 7 (richiamata nella tabella –tratta dalla pubblicazione originale di Gazetas- come fig. 3).

Si osserva che la matrice di rigidezza che risulta dall'approccio e dalla formulazione di Gazetas presenta 6 termini diagonali (3 traslazionali:  $k_{xx}$ ,  $k_{yy}$ ,  $k_{zz}$ ; 3 rotazionali, inclusa la rigidezza torsionale  $k_{tt}$  oltre a quelle nei piani  $yz$  e  $xz$ :  $k_{rx}$  e  $k_{ry}$ ) e 2 termini extra-diagonali ( $k_{xry}$  e  $k_{yrx}$ ) che accoppiano il grado di libertà traslazionale a quello rotazionale esprimendo cioè la rotazione che si genera a seguito di un'azione puramente orizzontale, come è tipico delle fondazioni profonde.

Nel paragrafo seguente si riportano le matrici di rigidezza risultanti dalla schematizzazione e formulazione adottata, rispettivamente per le fondazioni del viadotto Clarea esistente (modellato nelle analisi interessate) e per quelle dello svincolo in progetto.

| Vibration mode<br>(1)                          | Static stiffness, $K_{emb}$<br>(2)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Dynamic stiffness coefficient, $k_{emb}(\omega)$<br>(3)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Radiation dashpot coefficient, $C_{emb}(\omega)$<br>(4)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vertical (z)                                   | $K_{z,emb} = K_z[1 + (1/21)(D/B)(1 + 1.3\chi)[1 + 0.2(A_w/A_b)^{2/3}]$<br>where $K_z \equiv K_{z,surface}$ is obtained from Table 1. $A_w =$<br>actual sidewall-soil contact area; for constant effective-<br>contact height, $d$ , along the perimeter: $A_w = (d) \times$<br>(perimeter); $\chi = A_b/4L^2$                                                                                 | $(\nu \leq 0.40)$ :<br>fully embedded:<br>$k_{z,emb} \equiv k_z[1 - 0.09(D/B)^{3/4}a_0^2]$<br>in a trench: $k_{z,tre} \equiv k_z[1 + 0.09(D/B)^{3/4}a_0^2]$<br>$(\nu \approx 0.48)$ :<br>fully embedded with $L/B = 1 - 2$ :<br>$k_{z,emb} \equiv k_z[1 - 0.09(D/B)^{3/4}a_0^2]$<br>fully embedded with $L/B > 3$ :<br>$k_{z,emb} \equiv k_z[1 - 0.35(D/B)^{1/2}a_0^{3.5}]$<br>in a trench: $k_{z,tre} \equiv k_z$ , where $k_z \equiv k_{z,surf}$<br>from Table 1.<br>All $\nu$ , partially embedded: interpolate<br>$k_{y,emb}$ and $k_{z,emb}$ can be estimated in terms of<br>$L/B$ , $D/B$ , and $d/B$ for each value of $a_0$<br>from the plots in Fig. 3 | $C_{z,emb} \equiv C_z + \rho V_z A_w$ where $C_z \equiv C_{z,surface}$<br>is obtained from Table 1 and the<br>associated chart of Fig. 2.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Horizontal (y)<br>and (x)                      | $K_{y,emb} = K_y[1 + 0.15(D/B)^{0.5}][1 + 0.52[(h/B)(A_w/L^2)^{0.4}]^{0.4}]$<br>$K_{x,emb} = K_x \cdot (K_{y,emb}/K_y)$ where $K_y \equiv K_{y,surface}$ and $K_x \equiv$<br>$K_{x,surface}$ are obtained from Table 1.                                                                                                                                                                       | $k_{rx,emb} \equiv k_{rx}$<br>$k_{ry,emb} \equiv k_{ry}$<br>The surface-foundation $k_{rx}$ and $k_{ry}$ are<br>obtained from Table 1.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | $C_{y,emb} = C_y + 4\rho V_y B d + 4\rho V_L d$<br>$C_{x,emb} = C_x + 4\rho V_L B d + 4\rho V_L d$<br>where $C_y \equiv C_{y,surface}$ and $C_x \equiv C_{x,surface}$<br>are obtained from Table 1 and the<br>associated chart of Fig. 2.<br>$C_{rx,emb} = C_{rx} + \rho I_{bz}(d/B)\{V_L(d^2/B^2) +$<br>$3V_y + V_x(B/L)[1 + (d^2/B^2)]\} \cdot \eta_r$<br>where $\eta_r = 0.25 + 0.65 \sqrt{a_0}$<br>$(d/D)^{-0.072}(D/B)^{-1/4}$<br>$C_{ry,emb}$ is similarly evaluated from $C_{ry}$ after<br>replacing $x$ by $y$ , and interchanging $B$<br>with $L$ in the foregoing two<br>expressions. In both cases $a_0 = \omega B/V_s$ .<br>$C_{x-ry,emb} = (1/3)dC_{x,emb}$<br>$C_{y-rx,emb} = (1/3)dC_{y,emb}$<br>$C_{t,emb} = C_t + 4\rho d[(1/3)V_L(L^3 + B^3) +$<br>$V_y B(L + B)] \cdot \eta_t$ where $C_t \equiv C_{t,surface}$<br>is obtained from Table 1 and Fig. 2<br>$\eta_t \equiv (d/D)^{-0.5} \cdot a_0^2/[a_0^2$<br>$+ (1/2)(L/B)^{-1.5}]$ |
| Rocking (rx) and<br>(ry)                       | $K_{rx,emb} = K_{rx}\{1 + 1.26(d/B)[1 + (d/B)(d/D)^{-0.2}(B/L)^{0.5}]\}$<br>$K_{ry,emb} = K_{ry}\{1 + 0.92(d/L)^{0.6}[1.5 + (d/L)^{1.9}(d/L)^{-0.6}]\}$<br>where $K_{rx} \equiv K_{rx,surface}$ and $K_{ry} \equiv K_{ry,surface}$ are obtained from<br>Table 1.                                                                                                                              | $k_{rx,emb} \equiv k_{rx}$<br>$k_{ry,emb} \equiv k_{ry}$<br>$k_{t,emb} \equiv k_{t,surface}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $C_{x-ry,emb} \equiv (1/3)dK_{x,emb}$<br>$K_{y-rx,emb} \equiv (1/3)dK_{y,emb}$<br>$K_{t,emb} = K_t \cdot \Gamma_w \cdot \Gamma_{tre}$ where $K_t \equiv K_{t,surface}$ is obtained from<br>Table 1.<br>$\Gamma_w = 1 + 0.4(D/d)^{0.5}(j_s/j_r)(B/D)^{0.6}$<br>$\Gamma_{tre} = 1 + 0.5(D/B)^{0.1}(B^4/I_{bz})^{0.13}$<br>$j_s = (4/3)d(B^3 + L^3) + 4BLd(L + B)$<br>$j_r = (4/3)BL(B^2 + L^2)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Swaying-rocking<br>(x-ry)(y-rx)<br>Torsion (t) | $K_{x-ry,emb} \equiv (1/3)dK_{x,emb}$<br>$K_{y-rx,emb} \equiv (1/3)dK_{y,emb}$<br>$K_{t,emb} = K_t \cdot \Gamma_w \cdot \Gamma_{tre}$ where $K_t \equiv K_{t,surface}$ is obtained from<br>Table 1.<br>$\Gamma_w = 1 + 0.4(D/d)^{0.5}(j_s/j_r)(B/D)^{0.6}$<br>$\Gamma_{tre} = 1 + 0.5(D/B)^{0.1}(B^4/I_{bz})^{0.13}$<br>$j_s = (4/3)d(B^3 + L^3) + 4BLd(L + B)$<br>$j_r = (4/3)BL(B^2 + L^2)$ | $k_{x-ry,emb} \equiv k_{x-ry,emb} \equiv 1$<br>$k_{t,emb} \equiv k_{t,surface}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | $C_{x-ry,emb} = (1/3)dC_{x,emb}$<br>$C_{y-rx,emb} = (1/3)dC_{y,emb}$<br>$C_{t,emb} = C_t + 4\rho d[(1/3)V_L(L^3 + B^3) +$<br>$V_y B(L + B)] \cdot \eta_t$ where $C_t \equiv C_{t,surface}$<br>is obtained from Table 1 and Fig. 2<br>$\eta_t \equiv (d/D)^{-0.5} \cdot a_0^2/[a_0^2$<br>$+ (1/2)(L/B)^{-1.5}]$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

**Tabella 5 –** Formule per il calcolo della rigidità dinamica di fondazioni di forma qualsiasi approfondite in un semispazio omogeneo (Gazetas, 1991) – da consultare congiuntamente alla Figura 7



**Figura 7** – Grafici adimensionali per la determinazione dei coefficienti di rigidezza dinamica (da consultare congiuntamente alla Tabella 5)

## 6.1 Matrici di rigidezza

Di seguito si riportano le rigidezze calcolate secondo l'approccio e la formulazione di Gazetas sintetizzati nel paragrafo precedente.

Nelle tabelle, le singole rigidezze sono riferite alle seguenti componenti di spostamento o rotazione.

$K_{ii}$  = traslazione in direzione  $i$  a seguito di un carico nella medesima direzione

$K_{ri}$  = rotazione attorno all'asse  $i$  per un momento attorno allo stesso asse

$K_{tt}$  = rotazione attorno all'asse verticale per un momento attorno allo stesso (rigidezza torsionale)

$K_{irj}$  = rotazione attorno all'asse  $j$  per un momento in direzione  $i$

essendo:

$i, j = x, y, z$

$z$  = direzione verticale

$x$  = direzione longitudinale alla fondazione (e al viadotto corrispondente)

$y$  = direzione trasversale alla fondazione

### 6.1.1 Fondazioni viadotto Clarea esistente

| <b>Fondazioni su pozzo di diametro 12m</b>            |                       |                       |                       |
|-------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>Traslazionali</b>                                  | $K_{xx}$ [kN/m]       | $K_{yy}$ [kN/m]       | $K_{zz}$ [kN/m]       |
|                                                       | $1.019145 \cdot 10^7$ | $1.019145 \cdot 10^7$ | $7.488061 \cdot 10^6$ |
| <b>Rotazionali</b>                                    | $K_{rx}$ [kNm/rad]    | $K_{ry}$ [kNm/rad]    | $K_{tt}$ [kNm/rad]    |
|                                                       | $9.004777 \cdot 10^8$ | $8.588328 \cdot 10^8$ | $1.056838 \cdot 10^9$ |
| <b>Rotazionali per effetto di carichi orizzontali</b> | $K_{xry}$ [kN/rad]    | $K_{yrx}$ [kN/rad]    |                       |
|                                                       | $4.076579 \cdot 10^7$ | $4.076579 \cdot 10^7$ |                       |

Tabella 6 – Rigidezza dinamica fondazioni viadotto Clarea – Pile su pozzi  $\varnothing 12m$

| <b>Fondazioni su pozzo di diametro 14m</b>            |                       |                       |                       |
|-------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>Traslazionali</b>                                  | $K_{xx}$ [kN/m]       | $K_{yy}$ [kN/m]       | $K_{zz}$ [kN/m]       |
|                                                       | $1.636502 \cdot 10^7$ | $1.636502 \cdot 10^7$ | $1.157914 \cdot 10^7$ |
| <b>Rotazionali</b>                                    | $K_{rx}$ [kNm/rad]    | $K_{ry}$ [kNm/rad]    | $K_{tt}$ [kNm/rad]    |
|                                                       | $1.653294 \cdot 10^9$ | $1.670025 \cdot 10^9$ | $1.715228 \cdot 10^9$ |
| <b>Rotazionali per effetto di carichi orizzontali</b> | $K_{xry}$ [kN/rad]    | $K_{yrx}$ [kN/rad]    |                       |
|                                                       | $7.637009 \cdot 10^7$ | $7.637009 \cdot 10^7$ |                       |

Tabella 7 – Rigidezza dinamica fondazioni viadotto Clarea – Pile su pozzi  $\varnothing 14m$

### 6.1.2 Fondazioni svincolo della Maddalena in progetto

| <b>Fondazioni pile UP1 e UP2</b>                      |                       |                       |                       |
|-------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>Traslazionali</b>                                  | $K_{xx}$ [kN/m]       | $K_{yy}$ [kN/m]       | $K_{zz}$ [kN/m]       |
|                                                       | $8.683281 \cdot 10^6$ | $8.683281 \cdot 10^6$ | $6.028314 \cdot 10^6$ |
| <b>Rotazionali</b>                                    | $K_{rx}$ [kNm/rad]    | $K_{ry}$ [kNm/rad]    | $K_{tt}$ [kNm/rad]    |
|                                                       | $5.138020 \cdot 10^8$ | $5.688196 \cdot 10^8$ | $4.353621 \cdot 10^8$ |
| <b>Rotazionali per effetto di carichi orizzontali</b> | $K_{xry}$ [kN/rad]    | $K_{yrx}$ [kN/rad]    |                       |
|                                                       | $3.473312 \cdot 10^7$ | $3.473312 \cdot 10^7$ |                       |

Tabella 8 – Rigidezza dinamica fondazioni sv. La Maddalena – Pile UP1 e UP2

| <b>Fondazioni pile UP3 ÷ UP6 e IP1</b>                |                       |                       |                       |
|-------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>Traslazionali</b>                                  | $K_{xx}$ [kN/m]       | $K_{yy}$ [kN/m]       | $K_{zz}$ [kN/m]       |
|                                                       | $9.811025 \cdot 10^6$ | $9.811025 \cdot 10^6$ | $7.111227 \cdot 10^6$ |
| <b>Rotazionali</b>                                    | $K_{rx}$ [kNm/rad]    | $K_{ry}$ [kNm/rad]    | $K_{tt}$ [kNm/rad]    |
|                                                       | $7.909310 \cdot 10^8$ | $7.746934 \cdot 10^8$ | $8.673366 \cdot 10^8$ |
| <b>Rotazionali per effetto di carichi orizzontali</b> | $K_{xry}$ [kN/rad]    | $K_{yrx}$ [kN/rad]    |                       |
|                                                       | $3.924410 \cdot 10^7$ | $3.924410 \cdot 10^7$ |                       |

Tabella 9 – Rigidezza dinamica fondazioni sv. La Maddalena – Pile UP3÷UP6 e IP1

| <b>Fondazioni pile UP7 ÷ UP9 ; IP2 e IP5</b>          |                       |                       |                       |
|-------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>Traslazionali</b>                                  | $K_{xx}$ [kN/m]       | $K_{yy}$ [kN/m]       | $K_{zz}$ [kN/m]       |
|                                                       | $1.041076 \cdot 10^7$ | $1.102667 \cdot 10^7$ | $8.335911 \cdot 10^6$ |
| <b>Rotazionali</b>                                    | $K_{rx}$ [kNm/rad]    | $K_{ry}$ [kNm/rad]    | $K_{tt}$ [kNm/rad]    |
|                                                       | $9.102092 \cdot 10^8$ | $1.127148 \cdot 10^9$ | $1.651201 \cdot 10^9$ |
| <b>Rotazionali per effetto di carichi orizzontali</b> | $K_{xry}$ [kN/rad]    | $K_{yrx}$ [kN/rad]    |                       |
|                                                       | $4.164302 \cdot 10^7$ | $4.410668 \cdot 10^7$ |                       |

Tabella 10 – Rigidezza dinamica fondazioni sv. La Maddalena – Pile UP7÷UP9; IP2 e IP5

| <b><u>Fondazioni pile IP3 e IP4</u></b>               |                       |                       |                       |
|-------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>Traslazionali</b>                                  | $K_{xx}$ [kN/m]       | $K_{yy}$ [kN/m]       | $K_{zz}$ [kN/m]       |
|                                                       | $1.648818 \cdot 10^7$ | $1.746364 \cdot 10^7$ | $1.308538 \cdot 10^7$ |
| <b>Rotazionali</b>                                    | $K_{rx}$ [kNm/rad]    | $K_{ry}$ [kNm/rad]    | $K_{tt}$ [kNm/rad]    |
|                                                       | $1.851691 \cdot 10^9$ | $2.188295 \cdot 10^9$ | $2.825635 \cdot 10^9$ |
| <b>Rotazionali per effetto di carichi orizzontali</b> | $K_{xry}$ [kN/rad]    | $K_{yrx}$ [kN/rad]    |                       |
|                                                       | $8.244089 \cdot 10^7$ | $8.731821 \cdot 10^7$ |                       |

**Tabella 11** – Rigidezza dinamica fondazioni sv. La Maddalena – Pile IP3 e IP4