



Divisione Ambiente e Territorio di CESI S.p.A.



Data:	10/05/2010
Progettista:	Fabrizio Gatti
Redatto:	Giulia Bergamo
Verificato:	Fabrizio Gatti
Approvato:	Luigi Ferrari

REVISIONI	N.	DATA	DESCRIZIONE	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO
	00	10/05/2010	Prima emissione	M. Amarelli	V. Iuliani	E. Di Bartolomeo

TIPOLOGIA DELL'ELABORATO	CODIFICA DELL'ELABORATO	
Relazione di calcolo	R C DS3000 U ST 00047	
PROGETTO	TITOLO	
UNIFICATO STAZIONI TERNA	<b>STAZIONI ELETTRICHE A 132 kV</b>  SCHEMATICO DI RIFERIMENTO: B C DS3000 U ST 00045 rev. 02 COSTRUTTIVO DI RIFERIMENTO: D C DS3000 U ST 00047 rev. 02	
RICAVATO DAL DOC. TERNA		
---		
CLASSIFICAZIONE DI SICUREZZA		
---	<b>FONDAZIONE PER SEZIONATORI VERTICALI TG2022</b>	

NOME DEL FILE	SCALA CAD	FORMATO	SCALA	FOGLIO
R C DS3000 U ST 00047_02	---	A4	---	01/31

Questo documento contiene informazioni di proprietà Terna S.p.A. e deve essere utilizzato esclusivamente dal destinatario in relazione alle finalità per le quali è stato ricevuto. È vietata qualsiasi forma di riproduzione o di divulgazione senza l'esplicito consenso di Terna S.p.A.  
 This document contains information proprietary to Terna S.p.A. and it will have to be used exclusively for the purposes for which it has been furnished.  
 Whichever shape of spreading or reproduction without the written permission of Terna S.p.A. is prohibited.

**Cliente** TERNA S.p.A. Roma

**Oggetto** STANDARDIZZAZIONE DELLE OPERE STRUTTURALI E LORO PROGETTO ESECUTIVO (TIPIZZAZIONE) Scheda ING31 Rev. 00 TIPI  
**Lotto 150 kV**  
**Calcolo di verifica della fondazione per sezionatori verticali.**

**Ordine** Contratto 3000025378 Fornitura di servizi di ricerca, sviluppo e supporto specialistico per l'anno 2008

**Note** Rev. 02 – Lettera di trasmissione B0012627

PUBBLICATO B0011891 (PAD - 1331232)

La parziale riproduzione di questo documento è permessa solo con l'autorizzazione scritta del CESI.

**N. pagine** 30 **N. pagine fuori testo** 0

**Data** 10 maggio 2010

**Elaborato** SRC - Bergamo Giulia  
B0011891 114975 AUT

**Verificato** SRC - Gatti Fabrizio  
B0011891 114965 VER

**Approvato** TER - Il Responsabile - Ferrari Luigi  
B0011891 777241 APP

*Bergamo Giulia*  
*[Signature]*  
*[Signature]*



Mod. RISM v. 02

## Indice

<b>1</b>	<b>SCOPO .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>CARATTERISTICHE DELLA FONDAZIONE .....</b>	<b>4</b>
2.1	Caratteristiche dei materiali.....	4
2.2	Caratteristiche geometriche.....	4
2.3	Caratteristiche del terreno e capacità portante della fondazione .....	5
<b>3</b>	<b>DEFINIZIONE DELLE AZIONI ELEMENTARI.....</b>	<b>6</b>
3.1	Individuazione delle azioni .....	6
3.2	Condizione di carico di linea.....	7
3.3	Montaggio .....	7
3.4	Condizione di carico da vento .....	7
3.5	Perdita di carico per rottura di un conduttore.....	8
3.6	Condizione di carico sismica.....	8
3.6.1	Spettro di risposta elastico.....	8
3.6.2	Spettro di progetto per lo stato limite ultimo.....	10
3.6.3	Spettri impiegati nella verifica .....	10
3.6.4	Condizioni al contorno (collegamenti in corda e/o sbarra) .....	12
3.7	Condizione di carico da corto circuito.....	12
3.7.1	Definizione del carico da corto circuito .....	12
3.7.2	Condizioni al contorno (collegamenti in corda e/o sbarra) .....	12
<b>4</b>	<b>TIPO DI VERIFICA .....</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>COMBINAZIONI DELLE AZIONI .....</b>	<b>12</b>
5.1	Stati limite ultimi.....	12
5.1.1	Combinazione fondamentale.....	13
5.1.2	Combinazioni eccezionali .....	13
5.1.3	Combinazioni sismiche .....	14
5.2	Stati limite di esercizio .....	14
<b>6</b>	<b>CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE ULTIMI.....</b>	<b>15</b>
<b>7</b>	<b>CALCOLI DI VERIFICA .....</b>	<b>15</b>
7.1	Sollecitazioni massime sulle fondazioni .....	15
7.2	Verifica al ribaltamento.....	18
7.3	Verifica della capacità portante.....	18
7.4	Verifica a scorrimento sul piano di posa .....	19
7.5	Verifica strutturale.....	19
7.5.1	Verifica flessionale della piastra di base .....	20
7.5.2	Verifica a taglio della piastra di base .....	25
7.5.3	Verifica flessionale del batolo .....	25
<b>8</b>	<b>CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO .....</b>	<b>27</b>
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>28</b>
<b>10</b>	<b>DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>28</b>
	<b>APPENDICE 1: Prescrizioni e limiti di utilizzo .....</b>	<b>29</b>

## STORIA DELLE REVISIONI

Numero revisione	Data	Protocollo	Lista delle modifiche e/o dei paragrafi modificati
00	27/06/2008	A8018245	Prima emissione
01	10/12/2008	A8036246	Revisione generale a seguito commenti e precisazioni Terna
02	29/04/2010	B0011891	Aggiornamento

## 1 SCOPO

La presente relazione è relativa alla verifica strutturale della fondazione per sezionatori verticali della sezione 132 – 150 kV.

Per la taglia in studio la tipologia di isolatori utilizzati come colonnino portante è identificata dalla sigla J03/2, mentre il colonnino di manovra è identificato con la sigla J03/1. Per la schematizzazione della struttura all'apparecchiatura sono state assegnate le seguenti masse con i rispettivi baricentri:

ID	Altezza [mm]	Quota baricentro riferita alla flangia di interfaccia con la carpenteria di sostegno [mm]	Peso totale [kg]	Provenienza dati
<b>Parte ceramica colonnini portante e di manovra</b>	1500	750 <sup>1</sup>	175	Mail TERNA inviati in data 10-11/06/2008 con dati sulle apparecchiature e sui colonnini
<b>Piastre alla base dei colonnini carpenteria varia</b>		100	50	Disegno n. 32-5184-00 Sezionatore a pantografo 145 kV P RF2-145-KKL – Ruhrtal Hochspannungsgeräte GmbH & Co. OHG
<b>Piastre in testa ai colonnini carpenteria varia</b>		1600	76	
<b>Pantografo</b>		2755	50	
<b>Assieme polo sezionatore con pantografo alzato</b>	4055	1127 <sup>2</sup>	351	

Il valore del momento statico alla base del sezionatore verticale è quindi pari a 397 kgm.

La fondazione è dimensionata in modo da potere sollecitare il terreno con pressioni massime non superiori alle seguenti tensioni di rottura del terreno,  $\sigma_{rott}$ :

- 2,4 daN/cm<sup>2</sup>;
- 3,0 daN/cm<sup>2</sup>;
- 4,5 daN/cm<sup>2</sup>;
- 6,0 daN/cm<sup>2</sup>.

Tali tensioni di rottura, stimate secondo la normativa antecedente a [3] come il prodotto della tensione ammissibile  $\sigma_{amm}$  per un coefficiente di sicurezza  $F = 3$ , corrispondono alle tensioni ammissibili di 0,8 –

<sup>1</sup> Conservativamente, si è valutata la quota baricentro a metà altezza della parte ceramica.

<sup>2</sup> La quota del baricentro è stata calcolata sommando i prodotti dei pesi delle varie parti descritte con il loro baricentro e dividendo il tutto per il peso totale.

1,0 – 1,5 – 2,0 daN/cm<sup>2</sup> usualmente richieste da Terna nei dimensionamenti eseguiti secondo la normativa antecedente.

La verifica delle fondazioni è stata condotta in conformità ai criteri di:

- valutazione delle azioni elementari;
- combinazione delle azioni elementari;
- verifica agli stati limite ultimi;

esposti nel doc. [1].

## 2 CARATTERISTICHE DELLA FONDAZIONE

### 2.1 Caratteristiche dei materiali

Il calcestruzzo delle fondazioni è in classe  $R_{ck} \geq 40$  N/mm<sup>2</sup>, con le seguenti caratteristiche:

- Resistenza cilindrica a compressione  $f_{ck} = 332$  daN/cm<sup>2</sup>;
- Coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo  $\gamma_c = 1,5$  (Par. 4.1.2.1.1.1 di [3]);
- Coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata  $\alpha_{cc} = 0,85$  (Par. 4.1.2.1.1.1 di [3]);
- Resistenza di calcolo a compressione  $f_{cd} = f_{ck} \times \alpha_{cc} / \gamma_c = 188,1$  daN/cm<sup>2</sup>;
- Peso specifico  $\gamma_{cls} = 2500$  daN/m<sup>3</sup>;
- Classe di consistenza S4 (UNI-EN 2 06-1)
- Condizioni ambientali Aggressive (tab. 4.1.III di [3]), per classi di esposizione ambientale XC4, XD1, XS1, XF2, XF3, XA1, XA2 (UNI-EN 206-1);
- Copriferro  $c = 4$  cm.

La resistenza a taglio  $V_{Rd}$ , per elementi ipotizzati senza armatura trasversale resistente a taglio, viene calcolata in base alla formulazione 4.1.14 del Par. 4.1.2.1.3.1 di [3].

Il calcestruzzo del magrone di sottofondazione è di classe  $R_{ck} \geq 15$  N/mm<sup>2</sup>.

L'acciaio delle armature è B450C, con le seguenti caratteristiche:

- Tensione di snervamento  $f_{yk} = 4500$  daN/cm<sup>2</sup>;
- Coefficiente parziale di sicurezza relativo all'acciaio  $\gamma_s = 1,15$  (Par. 4.1.2.1.1.3 di [3]);
- Resistenza di calcolo  $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = 3913$  daN/cm<sup>2</sup>.

### 2.2 Caratteristiche geometriche

La fondazione di supporto per il sezionatore verticale è illustrata nel disegno di riferimento [2]. Essa è costituita da una piastra di base a contatto con il terreno sulla quale sono impostati tre batoli che costituiscono i plinti di appoggio delle carpenterie del sezionatore.

La piastra, a differenza dei batoli, è posizionata a 45° rispetto alla direzione longitudinale della linea. Essa ha dimensioni di 7,40 × 1,20 × 0,3 m; i batoli hanno dimensioni 0,6 × 0,8 × 0,5 m, sporgono dal terreno per 0,1 m, e sono provvisti di quattro tirafondi Ø 20 mm disposti a maglia quadrata con interasse di 400 mm, per l'installazione delle apparecchiature. Il batolo centrale è posizionato sulla mezzeria della piastra, mentre i due laterali hanno il loro centro geometrico posizionato a 3111 mm rispetto alla mezzeria della piastra. Gli assi principali dei batoli sono inclinati di 45° rispetto a quelli della piastra di base.

Le dimensioni della piastra di fondazione rimangono le stesse per tutti i livelli di tensione di rottura del terreno considerati in quanto le verifiche effettuate (rif. Par. 7.3) evidenziano come, nella condizione di combinazione di carico e di parametri  $M_i$  ed  $R_i$  più gravosa considerata, il valore di tensione massima scaricata sul terreno si mantenga entro il valore di  $\sigma_{rott} / R_i = 2,4 / R_i$  daN/cm<sup>2</sup>.

Le caratteristiche ponderali e di armatura della fondazione sono riportate nella tabella che segue.

Volume calcestruzzo [m <sup>3</sup> ]	Peso calcestruzzo armato (peso specifico di 2500 daN/m <sup>3</sup> ) [daN]	Ferri della piastra di base in direzione X: armatura inferiore e superiore	Ferri della piastra di base in direzione Y: armatura inferiore e superiore	Ferri verticali batolo centrale	Ferri verticali batoli laterali
3,384	8460	38Ø12	5Ø12	9Ø10	8Ø10

### 2.3 Caratteristiche del terreno e capacità portante della fondazione

Le verifiche sono state effettuate nell'ipotesi di terreno, avente le seguenti caratteristiche:

- Peso di volume  $\gamma_t = 1800 \text{ daN/m}^3$ ;
- Indice dei vuoti  $e = 0,11$ ;
- Peso di volume immerso  $\gamma' = 900 \text{ daN/m}^3$ .

Il livello di falda è stato considerato al piano campagna.

La capacità portante delle fondazioni è stata valutata in modo parametrico considerando caratteristiche di angolo d'attrito  $\phi'$ , coesione  $c'$  e indice dei vuoti variabili, fino ad un valore minimo di  $\phi'$ , in base alla formulazione contenuta nell'“Annex 4”, punto D.4 di [4]:

$$R/A' = c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q' \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i_q + 0.5 \cdot \gamma' \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma$$

con:

$$N_q = e^{\pi \cdot \tan \phi'} \cdot \tan^2(45 + \phi'/2)$$

$\phi'$  = angolo d'attrito

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot \phi'$$

$$N_\gamma = 2 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan \phi'$$

$$b_c = b_q - (1 - b_q) / (N_c \cdot \tan \phi')$$

$$b_q = b_\gamma = (1 - \alpha \cdot \tan \phi')^2$$

$$s_q = 1 + (B'/L') \cdot \sin \phi'$$

$B'$  = larghezza efficace della fondazione

$$s_\gamma = 1 - 0.3 \cdot (B'/L')$$

$L'$  = lunghezza efficace della fondazione

$$s_c = (s_q \cdot N_q - 1) / (N_q - 1)$$

$$i_c = i_q - (1 - i_q) / (N_c \cdot \tan \phi')$$

$$i_q = [1 - H / (V + A' \cdot c' \cdot \cot \phi')]^m$$

$H$  = carico orizzontale sulla fondazione

$$i_\gamma = [1 - H / (V + A' \cdot c' \cdot \cot \phi')]^{m+1}$$

$V$  = carico verticale sulla fondazione

$$m = m_L \cdot \cos^2 \theta + m_B \cdot \sin^2 \theta$$

$\theta$  = angolo di applicazione di  $H$  rispetto alla direzione di  $L'$

$$m_L = [2 + (L'/B')] / [1 + (L'/B')]$$

$$m_B = [2 + (B'/L')] / [1 + (B'/L')]$$

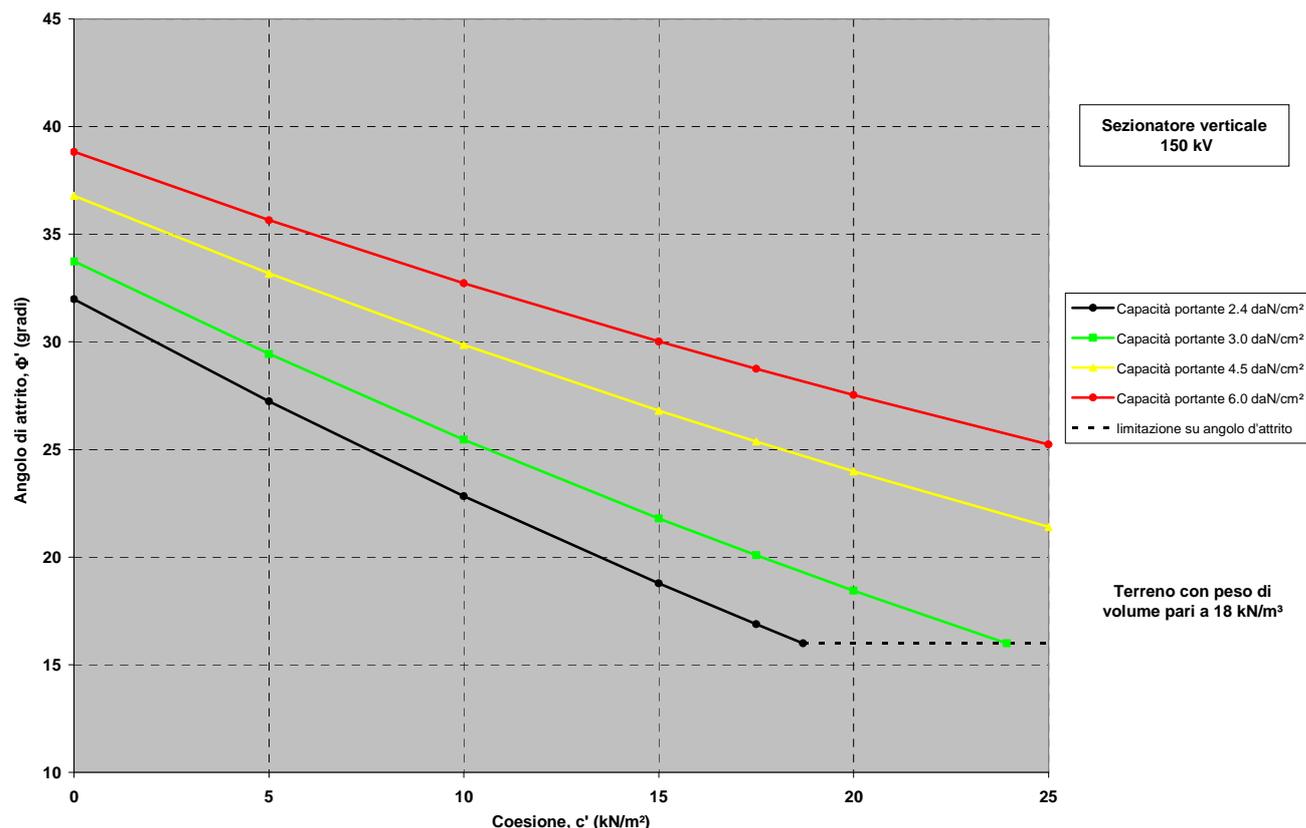
$$B' = B - 2 \cdot e_B$$

$e_B$  = eccentricità del carico in direzione della larghezza della fondazione

$$L' = L - 2 \cdot e_L$$

$e_L$  = eccentricità del carico in direzione della lunghezza della fondazione

ottenendo le seguenti curve.



I carichi considerati per le valutazioni sono quelli relativi alla combinazione di carico sismica, la più penalizzante per la struttura stessa (vedi Cap. 7).

Il valore d'angolo d'attrito minimo del terreno sul quale la fondazione è utilizzabile è pari a  $16^\circ$ , in corrispondenza ad una coesione pari a  $0,187 \text{ daN/cm}^2$ .

### 3 DEFINIZIONE DELLE AZIONI ELEMENTARI

#### 3.1 Individuazione delle azioni

Le condizioni di carico per le quali si effettua la verifica sono:

- Tiro di linea a  $-20^\circ\text{C}$  (zona B) – Tiro semplice;
- Tiro di linea più vento e ghiaccio (zona B) – Tiro composto;
- Montaggio (vedi Par. 3.2.2 del rif. [6]);
- Vento;
- Perdita di carico per rottura di un conduttore;
- Sismica;
- Corto circuito.

I carichi sismici, quelli da corto circuito e quelli da perdita di carico sono definiti come eccezionali in [6], par. 3.2.

I carichi eccezionali non sono considerati agenti simultaneamente.

### 3.2 Condizione di carico di linea

Per le apparecchiature analizzate sono stati applicati i carichi di linea sotto definiti:

- Tiro di linea a -20 °C (zona B), definito nel seguito “Tiro semplice”, il più oneroso secondo quanto richiesto nel rif. [5];
- Tiro di linea più vento e ghiaccio (zona B), definito nel seguito “Tiro composto”, il più oneroso secondo quanto richiesto nel rif. [5].

Tali valori, la cui entità è stata comunicata da Terna con il documento Rif. [7], essi sono considerati applicati bilateralmente in direzione della linea e sono i seguenti:

- Tiro semplice: 640 N;
- Tiro composto: 1080 N.

### 3.3 Montaggio

I valori dei carichi considerati sono stati considerati in base a quanto riportato nel Par. 3.2.2 del rif. [6].

### 3.4 Condizione di carico da vento

In accordo con quanto riportato in [3] la valutazione dei carichi da vento, è stata fatta in base alle ipotesi e considerazioni di seguito riportate.

La pressione del vento agente sulla struttura è pari a:

$$p = q_b \times c_e \times c_p \times c_d$$

con:

$q_b$  = pressione cinetica di riferimento;

$c_e$  = coefficiente di esposizione;

$c_p$  = coefficiente di forma;

$c_d$  = coefficiente dinamico.

Questo valore di pressione del vento moltiplicato per l'area di spinta dell'apparecchiatura e del supporto determina i valori di forza da vento da considerare nelle verifiche.

Per la valutazione dei parametri da inserire nella formulazione precedentemente indicata sono state fatte le seguenti ipotesi:

- il coefficiente di esposizione  $c_e$  è stato valutato per ogni singolo abbinamento sostegno/apparecchiatura, in base all'altezza dello stesso (Rif. 3.3.7 di [3]), con riferimento alla categoria di esposizione III;
- il coefficiente  $c_p$  di forma viene considerato pari a 0,7; tale valore è stato verificato, per ogni singolo abbinamento sostegno/apparecchiatura, in base alla formulazione di  $c_p$  per corpi cilindrici riportata al paragrafo C3.3.10.6 di [8];
- il coefficiente  $c_d$  dinamico è stato assunto cautelativamente uguale ad 1 (vedi paragrafo 3.3.8 di [3]);
- il valore della pressione cinetica di riferimento  $q_b$  è stato valutato in base alla formulazione:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2$$

con:

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3;$$

$v_b$  = velocità del vento di riferimento, identificata in modo da soddisfare le verifiche agli S.L.U. da eseguire sulla singola fondazione.

Nel dettaglio la velocità del vento,  $v_b$ , considerata è stata pari a: 48 m/s.

### 3.5 Perdita di carico per rottura di un conduttore

I valori di carico di linea definiti al paragrafo 3.2 ed in quel contesto applicati bilateralmente in direzione della linea, sono stati in questo caso applicati da un solo lato, sempre in direzione della linea.

### 3.6 Condizione di carico sismica

#### 3.6.1 Spettro di risposta elastico

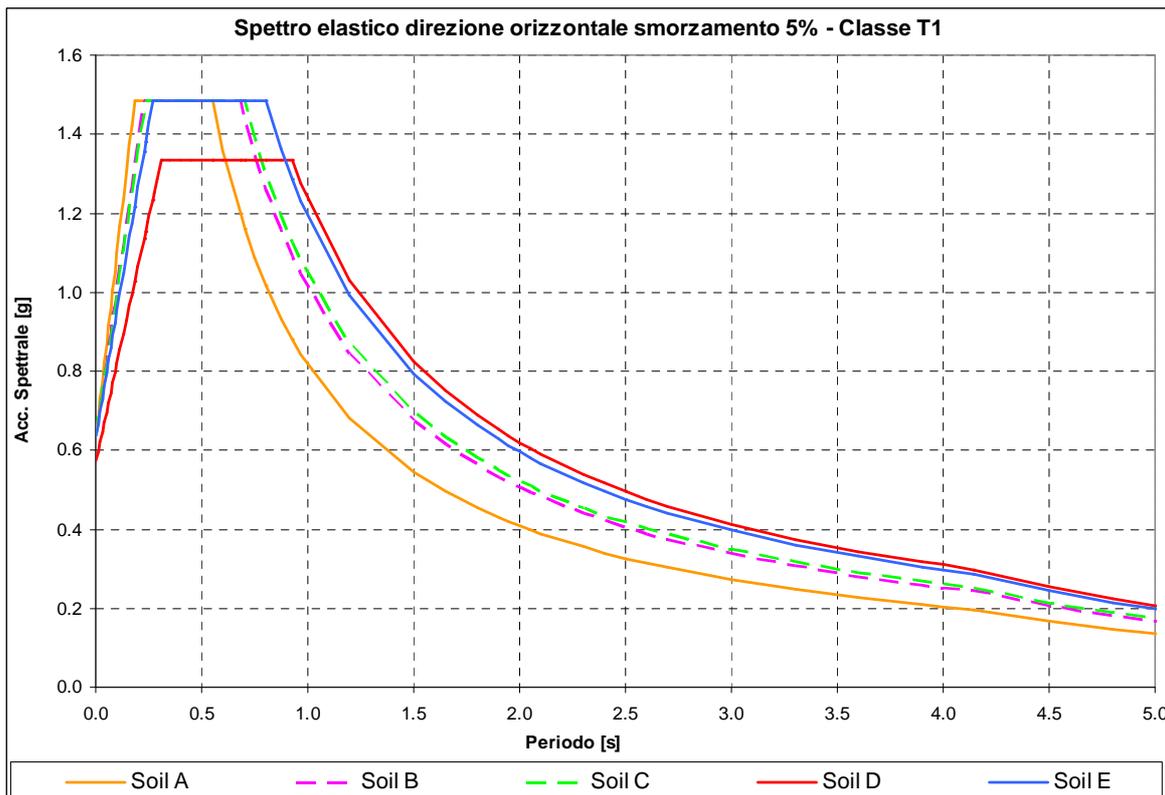
La normativa sismica (rif. [3]) prevede che l'azione sismica rappresentante il moto di un punto della superficie terrestre sia descritta da uno spettro di risposta elastico, uguale per entrambe le direzioni ortogonali orizzontali nelle quali si immagina scomposto il moto. In mancanza di studi specifici di sito, la normativa propone altresì uno spettro di risposta della componente verticale.

Nel corso delle attività svolte nel 2008 (scheda TIPI), per il dimensionamento del nuovo unificato, i valori di progetto di  $a_g$ ,  $F_o$  e  $T_C^*$ , disponibili per diversi periodi di ritorno nella tabella allegata al riferimento [3] in funzione di diversi punti griglia localizzati sul territorio nazionale, sono stati scelti, in accordo con il Committente, nella zona a più alta intensità del territorio nazionale.

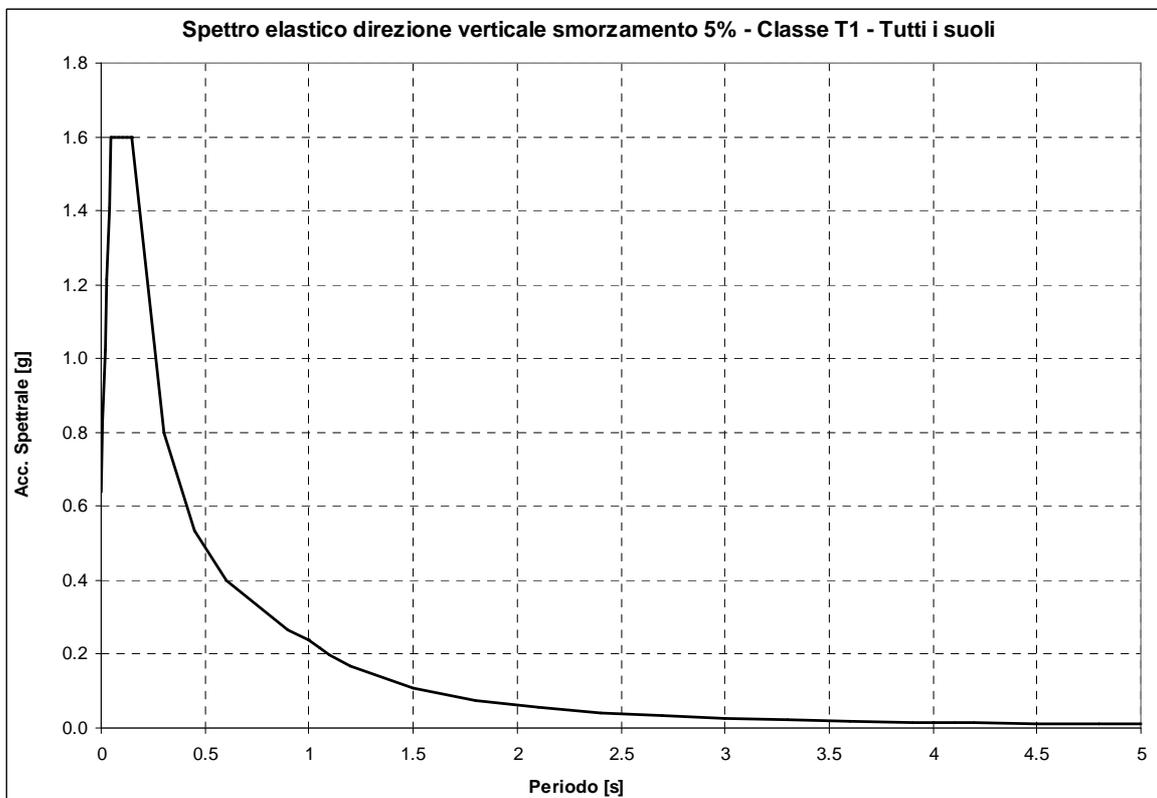
Nel diagramma sotto riportato sono rappresentati, per tutte le categorie di suolo, gli spettri relativi al periodo di ritorno di 2475<sup>3</sup> anni valutati nei due punti griglia (vedi tabella sottostante) a più alto valore di  $a_g$  individuati sul territorio nazionale (i due punti si trovano in Sicilia nella zona vicino a Cassaro Ferla).

ID	Lon	Lat	$a_g$ [g/10]	$F_o$	$T_C^*$ [s]
49418	14.929	37.175	6,247	2,33	0,55
49640	14.927	37.125	6,247	2,33	0,55

<sup>3</sup> Considerando, per le stazioni, una classe d'uso IV il periodo di ritorno di 2475 anni ci riporta ad una vita nominale dell'impianto di circa 130 anni.



Per quanto concerne la componente verticale, la sua forma è descritta nello spettro sotto riportato.



La necessità di installare le stesse apparecchiature e carpenterie in siti differenti, caratterizzati da condizioni del suolo e zone sismiche diverse ha reso necessario, con la vigente normativa, scegliere il periodo di ritorno più alto (2475 anni) e la classe topografica T1; poiché per la verifica si utilizza, per la direzione orizzontale, il valore del plateau dello spettro si osserva che esso è identico per tutti i suoli ad esclusione del suolo D che presenta un valore leggermente inferiore.

### **3.6.2 Spettro di progetto per lo stato limite ultimo**

Le capacità dissipative della struttura possono essere tenute in conto mediante un “fattore di struttura”  $q$ , riduttivo delle forze elastiche. Tale fattore dipende dal materiale e dalle tipologie strutturali in esame.

Le componenti sia orizzontali che verticali dell’azione sismica vengono ridotte dello specifico fattore di struttura  $q$ . Le formule che descrivono gli spettri di progetto sono le stesse già definite per lo spettro elastico divise per questo fattore di struttura  $q$ .

#### **3.6.2.1 Fattore di struttura**

##### **Componenti orizzontali**

In base a quanto descritto nel par. 7.5.2 di [3], le strutture delle apparecchiature di stazione possono definirsi come **Struttura a mensola o a pendolo invertito**, costituite da membrature pressoinflesse in cui le zone dissipative sono collocate alla base.

Il fattore di struttura  $q$  è definito dalla relazione seguente (vedasi equazione 7.3.1 del par. 7.3.1 di [3]):

$$q = q_0 \cdot K_R$$

nella quale:

- $q_0$  dipende dalla classe di duttilità (ossia dalla tipologia strutturale e dai criteri di dimensionamento adottati);
- $K_R$  dipende dalle caratteristiche di regolarità della costruzione (pari a 1 per costruzioni regolari in altezza e pari a 0,8 per costruzioni non regolari in altezza).

Nel caso in esame:

- $q_0 = 2$ , vedasi tabella 7.5.II, par. 7.5.2.2 di [3];
- $K_R = 1$ , vedasi par. 7.3.1 di [3];

da cui ne deriva, per le componenti orizzontali,  $q = 2$

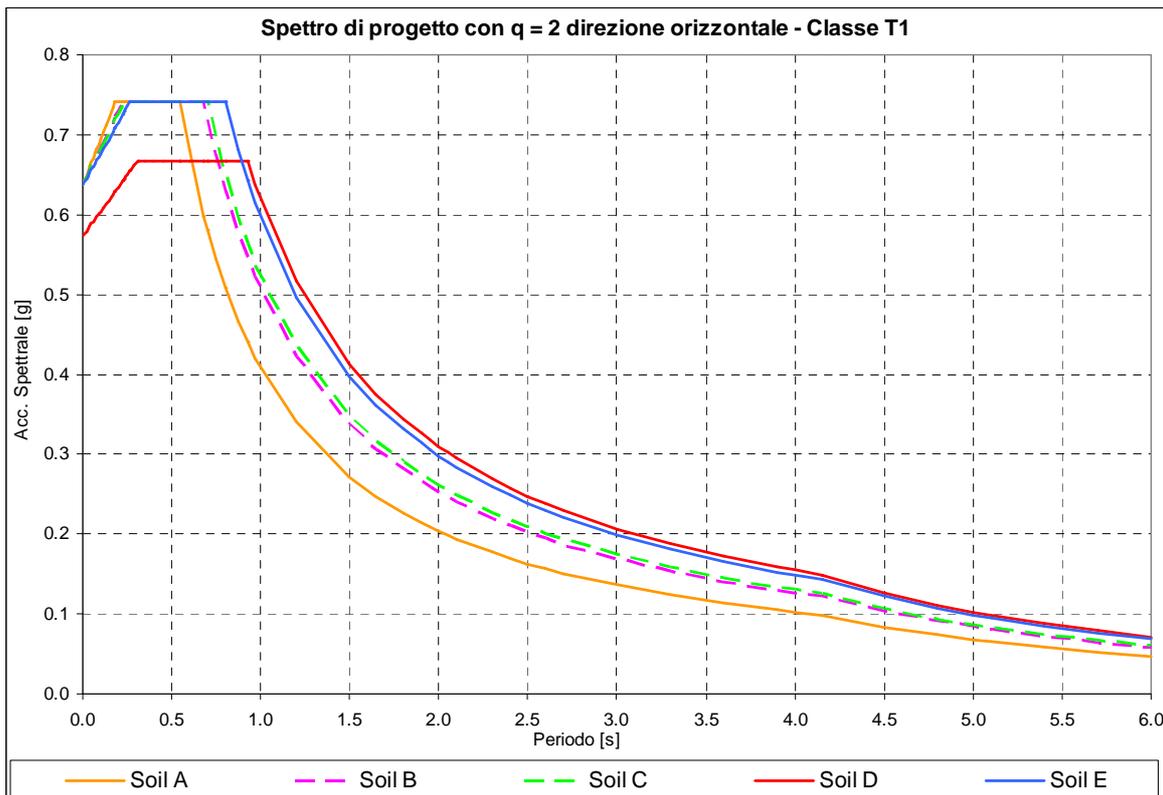
##### **Componente verticale**

Il fattore di struttura è assunto pari a 1,5 per qualsiasi materiale e tipologia strutturale (vedasi par. 7.3.1 di [3]).

### **3.6.3 Spettri impiegati nella verifica**

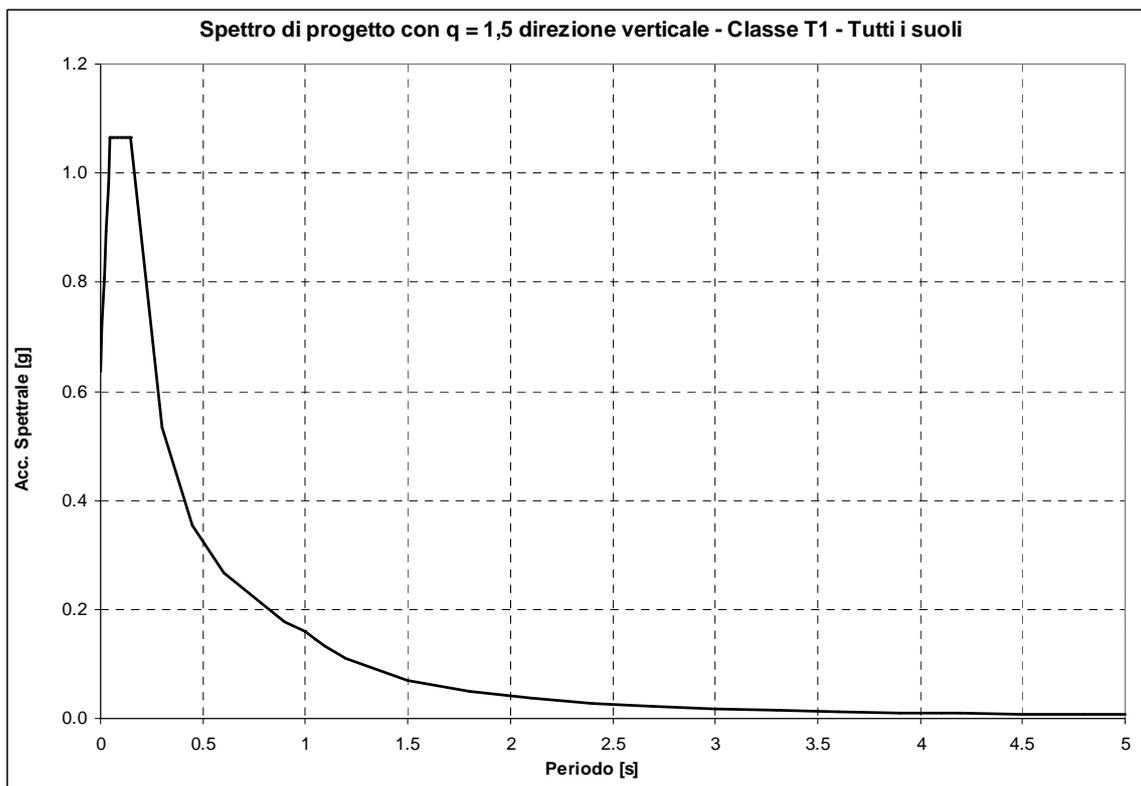
#### **3.6.3.1 Componenti orizzontali**

Il diagramma che segue riporta lo spettro di progetto relativo a tutti i suoli per le componenti orizzontali, con valore  $a_g$  pari a 6,247 g/10 e fattore di struttura pari a 2 (rispetto allo spettro elastico nelle formule si sostituisce  $\eta$  con  $1/q$ ).



3.6.3.2 Componente verticale

Il diagramma che segue riporta lo spettro (indipendente dal tipo di suolo) per la componente verticale, con valore  $a_g$  pari a 6,247 g/10 e fattore di struttura pari a 1,5 (rispetto allo spettro elastico nelle formule si sostituisce  $\eta$  con  $1/q$ ).



### 3.6.4 Condizioni al contorno (collegamenti in corda e/o sbarra)

I collegamenti con le altre apparecchiature sono del tipo flessibile; tuttavia, in prima approssimazione, non è stata considerata la quota parte della massa del cavo.

## 3.7 Condizione di carico da corto circuito

### 3.7.1 Definizione del carico da corto circuito

I carichi da corto circuito sono stati comunicati da Terna; i relativi valori sono tratti dai rif. [7]. Il corto circuito non viene considerato contestualmente al sisma, anche se potrebbe essere causato da quest'ultimo. Trattasi, in questa interpretazione, di due eventi eccezionali la cui probabilità combinata di accadimento può essere considerata scarsa, vedasi [6], par. 3.2.

In accordo a [7], si riconoscono sollecitazioni derivanti da tre tipi diversi di fenomeno, "pinch", "swing" e "drop", associati all'esplicarsi del corto circuito: tali fenomeni, dal punto di vista strutturale, si traducono in un aumento del tiro tra l'apparecchiatura in esame e quella ad essa adiacente. Tuttavia, essi hanno dinamiche molto diverse: dell'ordine delle decine di millisecondi per il pinch, delle centinaia di millisecondi per lo swing. Nella pratica, le rispettive sollecitazioni possono essere perciò considerate come temporalmente disaccoppiate. Inoltre, la rapidità dei fenomeni di pinch e swing consente, in linea di principio, ad entrambi i tipi di sollecitazioni di agire sull'assieme apparecchiatura + sostegno, mentre la fondazione non è praticamente interessata al pinch, ma, semmai, solo allo swing.

I valori di corto circuito, per cui le apparecchiature più sollecitate sono state verificate, sono stati desunti dai documenti di riferimento [7] derivano da un calcolo eseguito da Terna per una corrente di corto circuito pari a 40 kA. Gli effetti di corto circuito sono stati inoltre calcolati nelle condizioni di tiro iniziale più gravose tra quelle previste nel rif. [6], ossia -20 °C per il "pinch" e lo "swing" e +60 °C per il "drop". I valori comunicati da Terna per l'apparecchiatura in esame, con le relative direzioni di applicazione, sono i seguenti:

Apparecchiatura	Swing [N]	Pinch [N]		Drop [N]	
	X	Y (direzione di linea)		Z	Y
Sezionatore verticale	5320	6970		3810	9340

Tra i carichi sopra descritti, per la verifica della fondazione si sono utilizzati, in base a quanto detto in precedenza, i soli valori legati al fenomeno di swing.

### 3.7.2 Condizioni al contorno (collegamenti in corda e/o sbarra)

I collegamenti con le altre apparecchiature sono del tipo flessibile; tuttavia, in prima approssimazione, non è stata considerata la quota parte della massa del cavo.

## 4 TIPO DI VERIFICA

Le attività di verifica delle fondazioni, vengono condotte sulla base dei criteri degli *stati limite ultimi* e degli *stati limite di esercizio* (Rif. [3]), a partire dalle più gravose condizioni di carico derivanti dall'analisi delle carpenterie di sostegno ad esse afferenti.

## 5 COMBINAZIONI DELLE AZIONI

### 5.1 Stati limite ultimi

Le combinazioni delle azioni assunte per le verifiche agli stati limite ultimi delle fondazioni, in accordo a quanto previsto dall'attuale normativa (rif. [3]), sono elencate nei paragrafi che seguono.

### 5.1.1 Combinazione fondamentale

In accordo a [3] (Par. 2.5.3) le combinazioni fondamentali:

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

con:

- $\gamma_{G1}$  = coefficiente parziale per i carichi permanenti;
- $G_1$  = carichi permanenti;
- $\gamma_{G2}$  = coefficiente parziale per i carichi permanenti non strutturali;
- $G_2$  = carichi permanenti non strutturali;
- $\gamma_P$  = coefficiente parziale per pretensione e precompressione;
- $P$  = pretensione e precompressione;
- $\gamma_{Q1}$  = coefficiente parziale per l'azione variabile dominante;
- $Q_{k1}$  = azione variabile dominante;
- $\gamma_{Qj}$  = coefficienti parziali per le azioni variabili;
- $\psi_{0j}$  = coefficienti di combinazione;
- $Q_{kj}$  = azioni variabili.

sono state costruite considerando le azioni elementari definite al Paragrafo 3.1, i coefficienti di combinazione relativi alle relative azioni variabili (Rif. [3] Par. 2.5.3) ed i coefficienti parziali delle azioni contemplati per i diversi carichi (Rif. [3] Par. 2.6.1) rispettivamente per gli:

- stati limite ultimi di equilibrio (EQU);
- stati limite ultimi di resistenza della struttura (STR);
- stati limite ultimi di resistenza del terreno (GEO).

Il peso della fondazione ed il peso del terreno sovrastante sono stati considerati carichi permanenti.

I carichi sismici, quelli da corto circuito e quelli da perdita di carico non sono stati considerati in quanto eccezionali; nel caso in esame  $P$  è nullo.

Nella tabella che segue sono indicati i coefficienti applicati alle azioni nelle diverse combinazioni esaminate.

Tipo combinazione	Peso proprio	Tiro semplice	Tiro composto	Montaggio	Vento X	Vento Y	Perdita di tiro semplice	Perdita di tiro composto	Sisma X	Sisma Y	Sisma Z	Corto circuito
Fondamentale SLU_1	(*)	1.5	0	1.5	0.9	0.9	0	0	0	0	0	0
Fondamentale SLU_2	(*)	0	1.5	1.5	0.9	0.9	0	0	0	0	0	0
Fondamentale SLU_3	(*)	1.5	0	1.5	1.5	0.9	0	0	0	0	0	0
Fondamentale SLU_4	(*)	0	1.5	1.5	1.5	0.9	0	0	0	0	0	0
Fondamentale SLU_5	(*)	1.5	0	1.5	0.9	1.5	0	0	0	0	0	0
Fondamentale SLU_6	(*)	0	1.5	1.5	0.9	1.5	0	0	0	0	0	0

(\*) variabili: valori assunti in base al tipo di verifica da eseguire

Il peso della fondazione, del terreno sovrastante e della struttura del trasformatore sono stati considerati nelle combinazioni fondamentali delle azioni con coefficienti parziali diversi a seconda della verifica da condurre sulla fondazione, in base al fatto che fossero favorevoli o sfavorevoli per la verifica stessa.

### 5.1.2 Combinazioni eccezionali

In accordo a [3] (Par. 2.5.3) le combinazioni eccezionali:

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$

con:

- $G_1$  = carichi permanenti;
- $G_2$  = carichi permanenti non strutturali;
- $P$  = pretensione e precompressione;
- $A_d$  = azione eccezionale;
- $\psi_{2j}$  = coefficienti di combinazione;
- $Q_{kj}$  = azioni variabili.

sono state costruite considerando le azioni elementari definite al Paragrafo 3.1 ed i coefficienti di combinazione relativi alle relative azioni variabili (Rif. [3] Par. 2.5.3).

Il peso della fondazione ed il peso del terreno sovrastante sono stati considerati carichi permanenti.

I carichi eccezionali non sono considerati agenti simultaneamente; nel caso in esame P è nullo.

Nella condizione eccezionale relativa al corto circuito i carichi di linea sono da considerarsi già compresi nei carichi di corto circuito, costituendone il valore all'istante iniziale del fenomeno.

Nella tabella che segue sono indicati i coefficienti applicati alle azioni nelle diverse combinazioni esaminate.

Tipo combinazione	Peso proprio	Tiro semplice	Tiro composto	Montaggio	Vento X	Vento Y	Perdita di tiro semplice	Perdita di tiro composto	Sisma X	Sisma Y	Sisma Z	Corto circuito
Eccezionale Perdita Carico_1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Eccezionale Perdita Carico_2	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Eccezionale Corto Circuito	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

### 5.1.3 Combinazioni sismiche

In accordo a [3] (Par. 2.5.3) le combinazioni sismiche:

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$

con:

E = azione sismica;

G<sub>1</sub> = carichi permanenti;

G<sub>2</sub> = carichi permanenti non strutturali;

P = pretensione e precompressione;

$\psi_{2j}$  = coefficienti di combinazione;

Q<sub>kj</sub> = azioni variabili.

sono state costruite considerando le azioni elementari definite al Paragrafo 3.1 ed i coefficienti di combinazione relativi alle relative azioni variabili (Rif. [3] Par. 2.5.3).

Il peso della fondazione ed il peso del terreno sovrastante sono stati considerati carichi permanenti.

I carichi eccezionali non sono considerati agenti simultaneamente all'azione sismica; nel caso in esame P è nullo; il valore di  $\psi_{2j}$ , associato ai carichi da vento, è assumibile anch'esso come nullo (vedasi tab. 2.5.I in par. 2.5.3 di [3]).

Nella tabella che segue sono indicati i coefficienti applicati alle azioni nelle diverse combinazioni esaminate.

Tipo combinazione	Peso proprio	Tiro semplice	Tiro composto	Montaggio	Vento X	Vento Y	Perdita di tiro semplice	Perdita di tiro composto	Sisma X	Sisma Y	Sisma Z	Corto circuito
Sismica_1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0.3	0.3	0
Sismica_2	1	1	0	0	0	0	0	0	0.3	1	0.3	0
Sismica_3	1	1	0	0	0	0	0	0	0.3	0.3	1	0
Sismica_4	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0.3	0.3	0
Sismica_5	1	0	1	0	0	0	0	0	0.3	1	0.3	0
Sismica_6	1	0	1	0	0	0	0	0	0.3	0.3	1	0

## 5.2 Stati limite di esercizio

Le combinazioni delle azioni assunte per le verifiche agli stati limite di esercizio della fondazione, in accordo a quanto previsto dall'attuale normativa (rif. [3] Par. 6.4.2.2), sono quelle relative alle combinazioni sismiche menzionate in precedenza.

## 6 CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE ULTIMI

La fondazione è stata verificata nei confronti dei seguenti fenomeni:

- Ribaltamento della fondazione;
- Collasso per raggiungimento del carico limite dell'insieme fondazione- terreno;
- Scorrimento sul piano di posa;
- Collasso della struttura in cls della fondazione.

Le verifiche sono state effettuate considerando l'Approccio 1 con Combinazione 1 (A1+M1+R1) e Combinazione 2 (A2+M2+R2) e l'Approccio 2 con (A1+M1+R3) (Rif. [3] Par. 6.2.3.1 e 6.4.2.1).

Per le azioni eccezionali sono state eseguite le stesse verifiche considerando le combinazioni delle azioni ad esse relative. In particolare la verifica con azione sismica è stata condotta nei confronti dello Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV).

Per la verifica al ribaltamento della fondazione sono stati utilizzati i coefficienti parziali delle azioni EQU e valore del parametro R unitario.

## 7 CALCOLI DI VERIFICA

Nel seguito vengono espone le verifiche sulle fondazioni, citate al Paragrafo 6, nei confronti delle combinazioni di carico più penalizzanti per ogni singola verifica/apparecchiatura installata.

Per ciò che riguarda le verifiche strutturali, data la geometria della fondazione e l'entità delle forze e momenti trasmessi, si ritiene sufficiente verificare a flessione retta la fondazione lungo i due lati, considerandola come una trave continua su tre appoggi (in corrispondenza dell'applicazione delle sollecitazioni provenienti dalla struttura sovrastante), con due mensole laterali, lungo il lato lungo e come una trave su due appoggi di estremità lungo il lato corto; i momenti flettenti massimi sono stati calcolati assumendo che la forza di reazione dovuta alla pressione massima del terreno, diminuita del peso della fondazione e del peso del terreno, sia uniformemente distribuita sull'area della fondazione stessa.

Si verifica a presso-flessione deviata la sezione d'incastro del batolo meno armato, mentre non si ritengono necessarie le verifiche a taglio e punzonamento del batolo, dati la geometria e le entità dei carichi normali e di taglio trasmessi.

### 7.1 Sollecitazioni massime sulle fondazioni

Per la verifica delle fondazioni si sono considerate tre differenti condizioni estreme di carico trasmesso alle stesse:

- Massimo momento ribaltante attorno ad un asse trasversale a quello della linea;
- Massimo momento ribaltante attorno ad un asse parallelo a quello della linea;
- Minima azione verticale.

Dall'analisi delle combinazioni delle azioni citate al paragrafo 5.1 è risultato che le condizioni di carico più penalizzanti per la struttura sono relative alle combinazioni ed alle configurazioni sotto indicate, in funzione del tipo di verifica considerato.

Le tabelle che seguono riportano, per ogni condizione di verifica, i valori di  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $T_x$ ,  $T_y$  e  $N$  agenti sul sostegno metallico esaminato; tali valori sono le sollecitazioni applicate dalla struttura di supporto dell'apparecchiatura alla base superiore di ogni batolo.

Apparecchiatura	Condizione di sollecitazione	Combinazione di carico	Momento flettente Mx [N-m]	Taglio Ty [N]	Momento flettente My [N-m]	Taglio Tx [N]	Azione assiale massima N [N]
Sezionatore verticale	Massimo momento attorno ad un asse trasversale alla linea (X)	Sismica	1468	481	440	144	-440
	Massimo momento attorno ad un asse parallelo alla linea (Y)	Sismica	440	144	1468	481	-440
	Minima azione assiale	Sismica	440	144	440	144	-206

Apparecchiatura	Condizione di sollecitazione	Combinazione di carico	Momento flettente Mx [N-m]	Taglio Ty [N]	Momento flettente My [N-m]	Taglio Tx [N]	Azione assiale massima N [N]
Sezionatore verticale	Massimo momento attorno ad un asse trasversale alla linea (X)	EQU	1441	630	608	288	-487
	Massimo momento attorno ad un asse parallelo alla linea (Y)	EQU	1035	438	1013	480	-487
	Minima azione assiale	EQU	1035	438	608	288	-487

Come già indicato, detti Tx e Ty i tagli ed Mx, My i momenti flettenti alla base della carpenteria, i momenti flettenti:

- $MX = Mx + Ty \times H$
- $MY = My + Tx \times H$

con H spessore della fondazione, costituiscono i valori di momento ricondotti sul piano di base della fondazione stessa.

I valori del taglio si trasferiscono immutati, mentre lo sforzo normale N subisce un incremento dovuto al peso della fondazione e del terreno ad essa sovrastante; nel caso specifico di verifica sismica il peso viene ridotto di una quantità pari al peso moltiplicato per l'accelerazione massima del terreno in direzione verticale presa al 30% nelle condizioni di sollecitazione di momento massimo attorno ai due assi orizzontali e al 100% nella condizione di sollecitazione di minima azione assiale.

- $TX = Tx$
- $TY = Ty$
- $NZ = Nz + P$

Nella valutazione del peso P sono stati applicati i coefficienti parziali per le azioni relativi alla combinazione di carico utilizzata.

I carichi risultanti, utilizzati per la verifica della fondazione, definiti secondo gli assi X e Y sono quindi:

Apparecchiatura	Condizione di sollecitazione	Combinazione di carico	Momento flettente Mx [N-m]	Taglio Ty [N]	Momento flettente My [N-m]	Taglio Tx [N]	Azione assiale massima N [N]
Sezionatore verticale	Massimo momento attorno ad un asse trasversale alla linea (X)	Sismica	309	715	-1118	1327	-7314
	Massimo momento attorno ad un asse parallelo alla linea (Y)	Sismica	1452	-715	3242	1327	-7314
	Minima azione assiale	Sismica	446	0	490	613	-3308

Apparecchiatura	Condizione di sollecitazione	Combinazione di carico	Momento flettente Mx [N-m]	Taglio Ty [N]	Momento flettente My [N-m]	Taglio Tx [N]	Azione assiale massima N [N]
Sezionatore verticale	Massimo momento attorno ad un asse trasversale alla linea (X)	EQU	3765	725	-209	1947	-8127
	Massimo momento attorno ad un asse parallelo alla linea (Y)	EQU	4417	-89	1510	1947	-8127
	Minima azione assiale	EQU	3231	318	325	1540	-8127

Nella tabella che segue si riassumono le caratteristiche geometriche salienti della fondazione, nonché le caratteristiche del calcestruzzo e del terreno, necessarie per le successive verifiche.

Caratteristiche terreno	
Angolo attrito terreno, $\Phi$ [gradi]	16.0
Angolo attrito terreno, $\Phi$ [rad]	0.279
Coesione terreno, c [daN/cm <sup>2</sup> ]	0.187
Peso specifico terreno, $\gamma_t$ [daN/m <sup>3</sup> ]	1800
Indice dei vuoti, e [-]	0.11
Peso volume immerso, $\gamma'$ [daN/m <sup>3</sup> ]	900
Peso specifico acqua, $\gamma_a$ [daN/m <sup>3</sup> ]	1000

Caratteristiche calcestruzzo	
Rck calcestruzzo [daN/cm <sup>2</sup> ]	400
Peso specifico calcestruzzo, $\gamma_{cls}$ [daN/m <sup>3</sup> ]	2500
Peso volume immerso calcestruzzo, $\gamma'_{cls}$ [daN/m <sup>3</sup> ]	1500

Dimensioni fondazione	
Lato piastra in direzione X' [cm]	120
Lato piastra in direzione Y' [cm]	740
Lato batolo in direzione X, b [cm]	80
Lato batolo in direzione Y comprensivo di pozzetto, l' [cm]	60
Lato batolo in direzione Y senza pozzetto, l [cm]	60
Eccentricità batolo, $e_{BY'}$ [cm]	0
Eccentricità batolo, $e_{BX'}$ [cm]	0
Altezza batoli, D [cm]	50
Altezza piastra, d [cm]	30
Spessore fondazione, sp [cm]	80
Spessore fondazione fuori terra, $sp_{ft}$ [cm]	10

Nelle valutazioni che seguono, a tutte le ulteriori azioni che intervengono nelle verifiche, sono stati applicati i coefficienti parziali per le azioni relativi alla combinazione di carico utilizzata.

## 7.2 Verifica al ribaltamento

Di seguito si riportano i valori numerici relativi alle verifiche nelle tre condizioni di momento ribaltante massimo attorno ad un asse trasversale alla linea, ad un asse parallelo alla stessa e di carico verticale minimo.

Nelle verifiche si sono trascurati, globalmente a favore di sicurezza, i contributi delle spinte attiva e passiva del terreno agenti sulla fondazione, nonché l'attrito laterale sulla stessa, per il fatto che si ipotizza che lo scavo per la costruzione della fondazione non venga eseguito a sezione obbligata.

### Combinazione Sismica

Verifica a ribaltamento			
	Massimo momento attorno asse trasversale linea	Massimo momento attorno asse parallelo linea	Minima azione verticale
M rib X' [daNm]	309	1452	446
M stab X' [daNm]	27060	27060	12238
$\mu$ rib X' [-]	87.67	18.64	27.43
$\mu$ rib X' > 1 ?	SI	SI	SI
	Massimo momento attorno asse trasversale linea	Massimo momento attorno asse parallelo linea	Minima azione verticale
M rib Y' [daNm]	1118	3242	490
M stab Y' [daNm]	4388	4388	1985
$\mu$ rib Y' [-]	3.92	1.35	4.05
$\mu$ rib Y' > 1 ?	SI	SI	SI

### Combinazione EQU

Verifica a ribaltamento			
	Massimo momento attorno asse trasversale linea	Massimo momento attorno asse parallelo linea	Minima azione verticale
M rib X' [daNm]	3765	4417	3231
M stab X' [daNm]	30071	30071	30071
$\mu$ rib X' [-]	7.99	6.81	9.31
$\mu$ rib X' > 1 ?	SI	SI	SI
	Massimo momento attorno asse trasversale linea	Massimo momento attorno asse parallelo linea	Minima azione verticale
M rib Y' [daNm]	209	1510	325
M stab Y' [daNm]	4876	4876	4876
$\mu$ rib Y' [-]	23.33	3.23	15.01
$\mu$ rib Y' > 1 ?	SI	SI	SI

Le verifiche a ribaltamento attorno ai due assi ortogonali delle fondazioni X e Y risultano soddisfatte.

## 7.3 Verifica della capacità portante

Di seguito si riportano i valori numerici relativi alle verifiche nelle tre condizioni di momento ribaltante massimo attorno ad un asse trasversale alla linea, ad un asse parallelo alla stessa e di carico verticale minimo.

### Combinazione Sismica

Verifica a schiacciamento			
	Massimo momento attorno asse trasversale linea	Massimo momento attorno asse parallelo linea	Minima azione verticale
Eccentricità lungo Y', eY' [m]	0.04	0.20	0.13
Controllo parzializzazione	fondazione non parzializza	fondazione non parzializza	fondazione non parzializza
Eccentricità lungo X', eX' [m]	0.15	0.44	0.15
Controllo parzializzazione	fondazione non parzializza	fondazione parzializza	fondazione non parzializza
eY' / BY' [-]	0.006	0.027	0.018
Controllo massima parzializzazione	eccentricità ammissibile	eccentricità ammissibile	eccentricità ammissibile
eX' / BX' [-]	0.127	0.369	0.123
Controllo massima parzializzazione	eccentricità ammissibile	eccentricità ammissibile	eccentricità ammissibile
Area di base della fondazione, A [cm <sup>2</sup> ]	88800		
Coeff. moltiplicativo sforzo normale centrato, k [-]	1.799	5.562	1.850
Tensione terreno, $\sigma_t$ [daN/cm <sup>2</sup> ]	0.15	0.46	0.07
$\sigma_{rott\ terr} / \sigma_t$	16.20	5.24	34.83
sigma rott terr / sigma t > 1 ?	SI	SI	SI

## Combinazione EQU

Verifica a schiacciamento			
	Massimo momento attorno asse trasversale linea	Massimo momento attorno asse parallelo linea	Minima azione verticale
Eccentricità lungo Y', eY' [m]	0.46	0.54	0.40
<i>Controllo parzializzazione</i>	<b>fondazione non parzializza</b>	<b>fondazione non parzializza</b>	<b>fondazione non parzializza</b>
Eccentricità lungo X', eX' [m]	0.03	0.19	0.04
<i>Controllo parzializzazione</i>	<b>fondazione non parzializza</b>	<b>fondazione non parzializza</b>	<b>fondazione non parzializza</b>
eY' / BY' [-]	0.063	0.073	0.054
<i>Controllo massima parzializzazione</i>	<b>eccentricità ammissibile</b>	<b>eccentricità ammissibile</b>	<b>eccentricità ammissibile</b>
eX' / BX' [-]	0.021	0.155	0.033
<i>Controllo massima parzializzazione</i>	<b>eccentricità ammissibile</b>	<b>eccentricità ammissibile</b>	<b>eccentricità ammissibile</b>
Area di base della fondazione, A [cm <sup>2</sup> ]	88800		
Coeff. moltiplicativo sforzo normale centrato, k [-]	1.504	2.399	1.522
<b>Tensione terreno, <math>\sigma_t</math> [daN/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>0.14</b>	<b>0.22</b>	<b>0.14</b>
$\sigma_{rott\ terr} / \sigma_t$	<b>17.43</b>	<b>10.93</b>	<b>17.23</b>
<b>sigma rott terr / sigma t &gt; 1 ?</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>

Le verifiche di capacità portante del terreno di fondazione risultano soddisfatte.

## 7.4 Verifica a scorrimento sul piano di posa

Di seguito si riportano i valori numerici relativi alle verifiche nelle tre condizioni di momento ribaltante massimo attorno ad un asse trasversale alla linea, ad un asse parallelo alla stessa e di carico verticale minimo.

Nelle verifiche si sono trascurati, globalmente a favore di sicurezza, i contributi delle spinte attiva e passiva del terreno agenti sulla fondazione, nonché l'attrito laterale sulla stessa, per il fatto che si ipotizza che lo scavo per la costruzione della fondazione non venga eseguito a sezione obbligata.

### Combinazione Sismica

Verifica a scorrimento			
	Massimo momento attorno asse trasversale linea	Massimo momento attorno asse parallelo linea	Minima azione verticale
Forza attrito in direzione X', FX' [daN]	2662	2662	1204
$\mu$ sic X' [-]	<b>2.01</b>	<b>2.01</b>	<b>1.97</b>
<b>mu sic X' &gt; 1 ?</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>
Forza attrito in direzione Y', FY' [daN]	2662	2662	1204
$\mu$ sic Y' [-]	<b>3.72</b>	<b>3.72</b>	--
<b>mu sic Y' &gt; 1 ?</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>	--

### Combinazione EQU

Verifica a scorrimento			
	Massimo momento attorno asse trasversale linea	Massimo momento attorno asse parallelo linea	Minima azione verticale
Forza attrito in direzione X', FX' [daN]	2330	2330	2330
$\mu$ sic X' [-]	<b>1.20</b>	<b>1.20</b>	<b>1.51</b>
<b>mu sic X' &gt; 1 ?</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>
Forza attrito in direzione Y', FY' [daN]	2330	2330	2330
$\mu$ sic Y' [-]	<b>3.21</b>	<b>26.18</b>	<b>7.32</b>
<b>mu sic Y' &gt; 1 ?</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>

Le verifiche di scorrimento sul piano di posa delle fondazioni risultano soddisfatte.

## 7.5 Verifica strutturale

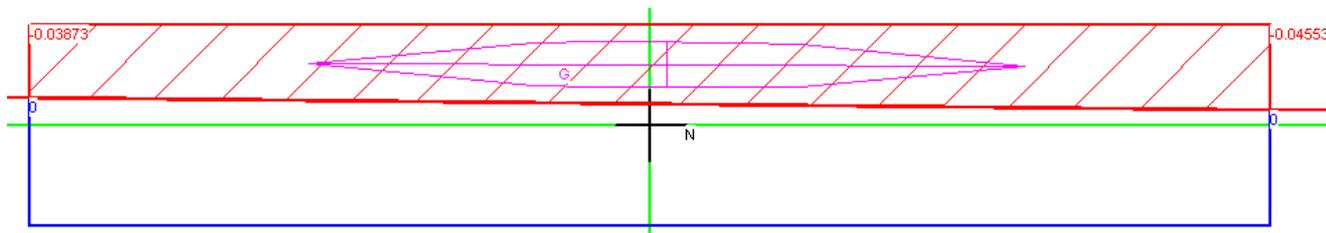
Gli schemi strutturali adottati per la verifica della fondazione sono quelli di:

- trave semplicemente appoggiata di luce 1,20 m (direzione X), larghezza 7,40 m (direzione Y) e spessore 0,30 m.
- trave continua su tre appoggi (direzione Y) con due luci di lunghezza 3,10 m e due mensole laterali di lunghezza 0,60 m (lunghezza complessiva 7,40 m), larghezza 1,20 m (direzione X) e spessore 0,30 m.

La trave si considera uniformemente caricata nel modo seguente:

- dal peso della piastra di fondazione stessa; il carico agisce dall'alto verso il basso;

- dal peso del terreno che insiste sulla piastra; dato che la sporgenza dal terreno dei batoli di fondazione è di 10 cm, lo spessore dello strato di terreno è di 40 cm; il carico agisce dall'alto verso il basso;
- dalla reazione del terreno, assunta corrispondente alla pressione massima, agente su tutta la superficie di base della trave, calcolata in base al diagramma effettivo delle tensioni visualizzato nella figura che segue; il carico agisce dal basso verso l'alto.



Il batolo viene verificato invece come una trave incastrata nella sezione di interfaccia tra il batolo stesso e la piastra di fondazione, assoggettata, a favore di sicurezza, solamente alle sollecitazioni trasmesse dalla struttura fuori terra sovrastante.

Il calcolo dei momenti massimi applicati alla sezione di verifica su tre appoggi è stato eseguito utilizzando il programma “Trave continua”, ver. 7.4 del 11/10/2009. La verifica delle sezioni in calcestruzzo armato è stata eseguita utilizzando il programma VcaSlu ver. 7.5 del 16/06/2009, sviluppato dal Prof. Piero Gelfi del Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio e Ambiente della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Brescia.

### 7.5.1 Verifica flessionale della piastra di base

La tensione media trasmessa al terreno, calcolata come indicato in precedenza, è pari a 0,276 daN/cm<sup>2</sup>.

I carichi per unità di lunghezza applicati alla trave sono:

#### in direzione X

- carico per unità di lunghezza dovuto al peso del terreno:  
 $q_t = 900 \times 10^{-6} \times 40 \times 740 = 26,64 \text{ daN/cm}$ ;
- carico per unità di lunghezza dovuto al peso del calcestruzzo:  
 $q_{cls} = 1500 \times 10^{-6} \times 30 \times 740 = 33,30 \text{ daN/cm}$ ;
- carico per unità di lunghezza dovuto alla reazione massima del terreno:  
 $q = 0,179 \times 740 = 132,77 \text{ daN/cm}$ .

#### in direzione Y

- carico per unità di lunghezza dovuto al peso del terreno:  
 $q_t = 900 \times 10^{-6} \times 40 \times 120 = 4,32 \text{ daN/cm}$ ;
- carico per unità di lunghezza dovuto al peso del calcestruzzo:  
 $q_{cls} = 1500 \times 10^{-6} \times 30 \times 120 = 5,40 \text{ daN/cm}$ ;
- carico per unità di lunghezza dovuto alla reazione massima del terreno:  
 $q = 0,179 \times 120 = 21,53 \text{ daN/cm}$ .

Il momento flettente massimo è quindi:

- in direzione X:  $(132,77 - 26,64 - 33,30) / 100 \times 120^2 / 8 = 1311 \text{ daN}\cdot\text{m}$ .
- in direzione Y (calcolato con “Trave continua”):  
M (-) = - 1312 daN·m per verifica armatura inferiore  
M (+) = 7,1 daN·m per verifica armatura superiore

**Titolo :** Sezionatore verticale 150 kV - Direzione Y

**Tipo di calcolo delle sollecitazioni:**  Esercizio  Stato Limite Ultimo

**Numero campate (Compresi Sbalzi) :** 4

Camp. N°	Luce	Perm.	Var.	Sez. N°
1	0.6	1181	0	1
2	3.1	1181	0	1
3	3.1	1181	0	1
4	0.6	1181	0	1

App.	Largh.
1	1.2
2	1.2
3	1.2
4	1.2
5	1.2

**Sezioni**

**Vincoli di estremità**

	Sinistra	Destra
Appoggio	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Incastro	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Libero	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Elastico	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

**Diagrammi**

Visualizza Deformata

Momento 1:

Scale fisse Taglio 1:

Freccia 1:

**N. Punti Plottaggio:** 100

Visualizza Stampa

M I M+T

DWG Esporta Blocco ?

**Risultati**

Sez.	Mmax	x Mmax	Mmin	x Mmin	f max	f min
1	0		0		-9.66E-04	-9.66E-04
m	0	0	0	0		
2	-212.6		-212.6			
m	709.5	1.255	709.5	1.255	1.56E-03	1.56E-03
3	-1.312		-1.312			
m	709.5	1.845	709.5	1.845	1.56E-03	-5.17E-26
4	-212.6		-212.6			
m	8.392E-11	0.6	8.392E-11	0.6		

Sez.	Tmax s	Tmax d	Rmax	Rmin
1		0	0	0
2	-708.6	1.476	2.184	2.184
3	-2.185	2.185	4.371	4.371
4	-1.476	708.6	2.184	2.184
5	0.000140		0	0

Si considerano due sezioni con le seguenti caratteristiche:

**in direzione X**

- Sezione: 740 x 30 cm;
- Copriferro: 4 cm;
- Armatura superiore: 38 Ø12;
- Armatura inferiore: 38 Ø12;

**in direzione Y**

- Sezione: 120 x 30 cm;
- Copriferro: 4 cm
- Armatura superiore: 4 Ø12
- Armatura inferiore: 4 Ø12;

e le si verificano nei confronti del rispettivo valore di momento calcolato.

in direzione X

**Titolo :** Sezionatore verticale 150 kV - Direzione X

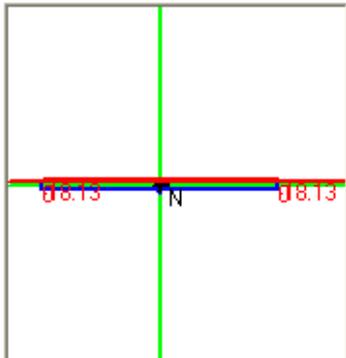
N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	740	30

N°	As [cm²]	d [cm]
1	42.98	4.6
2	42.98	35.4

**Tipo Sezione**

Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.



**Sollecitazioni**

S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub>  kN  
M<sub>xEd</sub>  kNm  
M<sub>yEd</sub>  kNm

**P.to applicazione N**

Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
yN

Tipo rottura  
Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

**Metodo di calcolo**

S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

**Tipo flessione**

Retta  Deviata

**Materiali**

**B450C** **C32/40**

$\epsilon_{su}$   %  $\epsilon_{c2}$   %  
 $f_{yd}$   N/mm²  $\epsilon_{cu}$    
 $E_s$   N/mm²  $f_{cd}$    
 $E_s/E_c$    $f_{cc}/f_{cd}$   ?  
 $\epsilon_{syd}$   %  $\sigma_{c,adm}$    
 $\sigma_{s,adm}$   N/mm²  $\tau_{co}$    
 $\tau_{c1}$

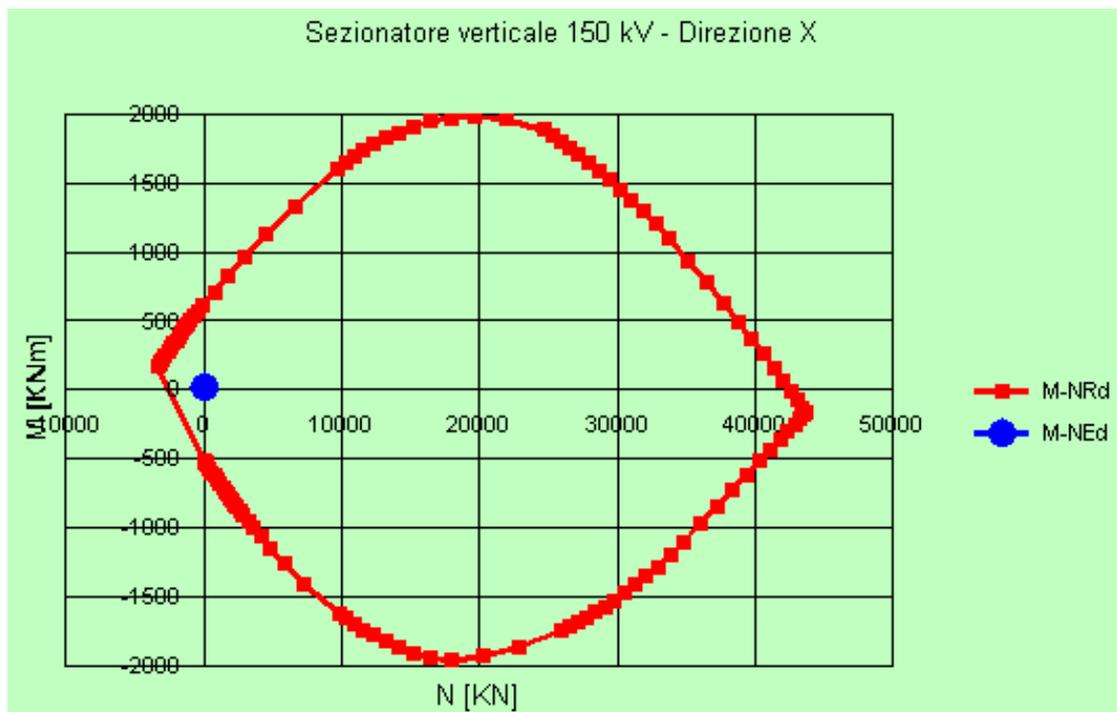
M<sub>xRd</sub>  kN m

$\sigma_c$   N/mm²  
 $\sigma_s$   N/mm²  
 $\epsilon_c$   %  
 $\epsilon_s$   %  
d  cm  
x  x/d   
 $\delta$

N° rett.

Calcola MRd Dominio M-N  
L<sub>0</sub>  cm Col. modello

Precompresso



in direzione Y  
Verifica armatura inferiore

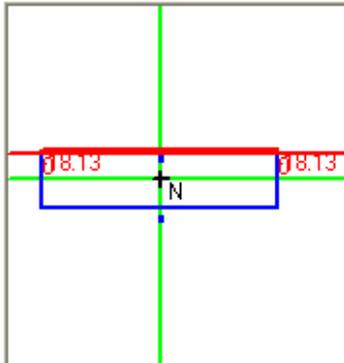
Titolo : Sezionatore verticale 150 kV - Direzione Y

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	120	30

N°	As [cm²]	d [cm]
1	5.65	4.6
2	5.65	35.4

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.



Sollecitazioni  
 S.L.U. Metodo n  
 N<sub>Ed</sub>  kN  
 M<sub>xEd</sub>  kNm  
 M<sub>yEd</sub>

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN  yN

Tipo rottura  
 Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

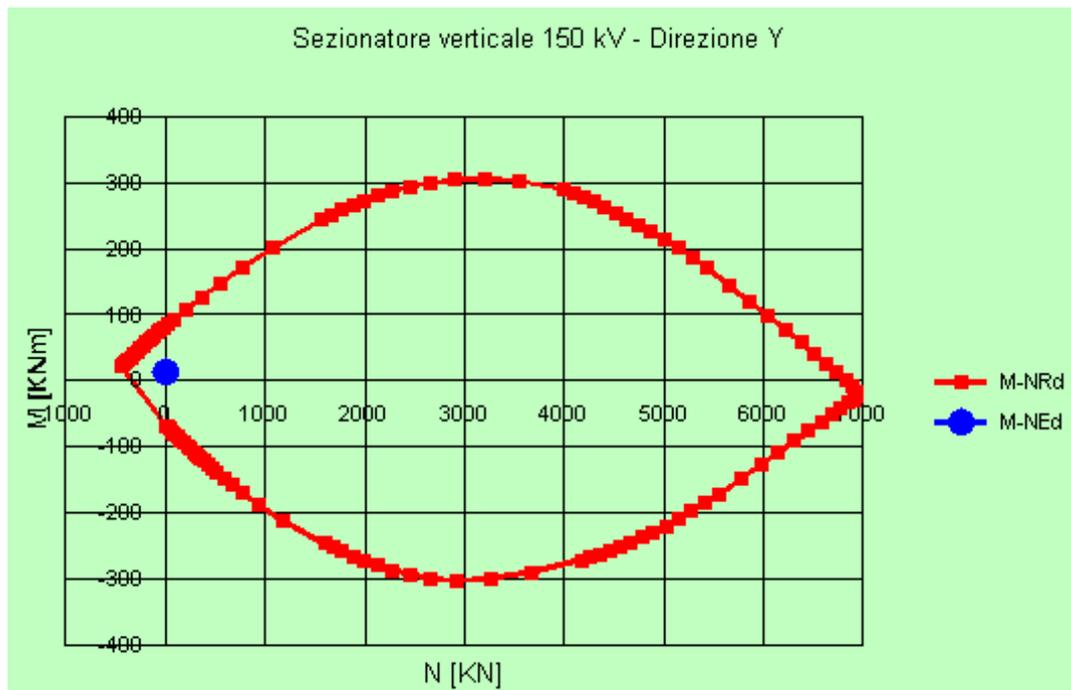
Tipo flessione  
 Retta  Deviata

Materiali  
**B450C** **C32/40**  
 $\epsilon_{su}$   ‰  $\epsilon_{c2}$   ‰  
 $f_{yd}$   N/mm²  $\epsilon_{cu}$   ‰  
 $E_s$   N/mm²  $f_{cd}$   N/mm²  
 $E_s/E_c$    $f_{cc}/f_{cd}$   ?  
 $\epsilon_{syd}$   ‰  $\sigma_{c,adm}$   N/mm²  
 $\sigma_{s,adm}$   N/mm²  $\tau_{co}$   N/mm²  
 $\tau_{c1}$   N/mm²

M<sub>xRd</sub>  kN m  
 $\sigma_c$   N/mm²  
 $\sigma_s$   N/mm²  
 $\epsilon_c$   ‰  
 $\epsilon_s$   ‰  
 d  cm  
 x  x/d   
 $\delta$

N° rett.   
 Calcola MRd Dominio M-N  
 L<sub>0</sub>  cm Col. modello

Precompresso



Verifica armatura superiore

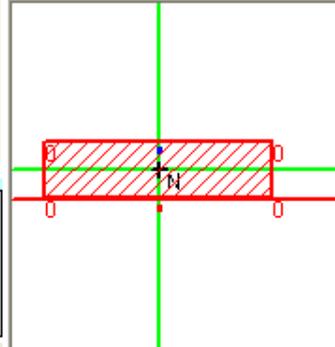
Titolo : Sezionatore verticale 150 kV - Direzione Y

N° figure elementari  Zoom N° strati barre  Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	120	30

N°	As [cm²]	d [cm]
1	5.65	4.6
2	5.65	35.4

Tipo Sezione  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.



Sollecitazioni  
 S.L.U.  Metodo n   
 N<sub>Ed</sub>  kN  
 M<sub>xEd</sub>  kNm  
 M<sub>yEd</sub>

P.to applicazione N  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Tipo rottura  
 Lato acciaio - Acciaio snervato

Metodo di calcolo  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

Tipo flessione  
 Retta  Deviata

**Materiali**

B450C		C32/40	
$\epsilon_{su}$	67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391.3 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$	3.5 ‰
$E_s$	200.000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$	18.13
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0.8
$\epsilon_{syd}$	1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	12.25
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$	0.7333
		$\tau_{c1}$	2.114

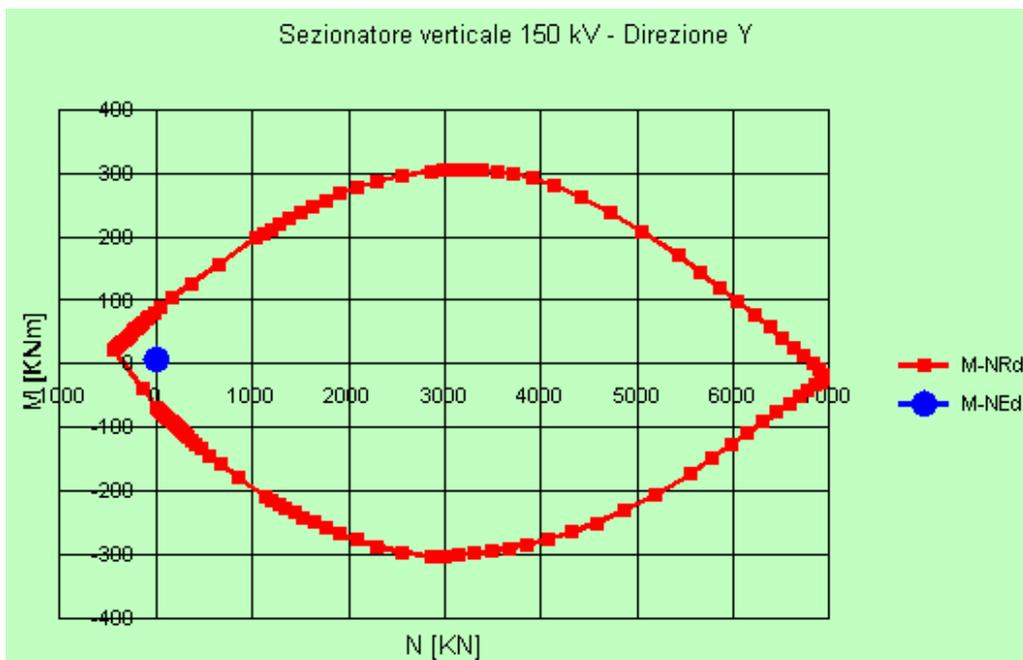
M<sub>xRd</sub> -68.09 kN m  
 $\sigma_c$  - N/mm<sup>2</sup>  
 $\sigma_s$  391.3 N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_c$  -1.277 ‰  
 $\epsilon_s$  67.5 ‰  
 d 25.4 cm  
 x -0.489 x/d -0.01928  
 $\delta$  0.7

N° rett.

Calcola MRd  Dominio M-N

L<sub>0</sub>  cm Col. modello

Precompresso



Essendo i momenti sollecitanti, M<sub>xSd</sub> M<sub>ySd</sub>, inferiori ai momenti resistenti, M<sub>xRd</sub> e M<sub>yRd</sub>, la verifica a flessione risulta soddisfatta.

### 7.5.2 Verifica a taglio della piastra di base

Il valore massimo del taglio è pari a:

- in direzione X:  $(132,77 - 26,64 - 33,30) / 100 \times 120 / 2 = 4370$  daN.
- in direzione Y: (vedi foglio di “Trave continua”) = 2185 daN;

Applicando la formulazione 4.1.14 di [3] al caso in esame:

#### **direzione X**

- Resistenza taglio su sezione normale:  $V_{Rd} = 31632$  daN
- Sollecitazione di taglio su sezione normale:  $V_{Ed} = 4370$  daN

#### **direzione Y**

- Resistenza a taglio su sezione normale:  $V_{Rd} = 50225$  daN
- Sollecitazione di taglio su sezione normale:  $V_{Ed} = 2185$  daN

Essendo, in entrambe le direzioni,  $V_{Ed} < V_{Rd}$  la verifica risulta soddisfatta.

### 7.5.3 Verifica flessionale del batolo

Si considera il batolo meno armato avente una sezione con le seguenti caratteristiche:

- Sezione: 80 x 60 cm;
- Copriferro: 4 cm
- I livello armatura: 3  $\varnothing 10$
- II livello armatura: 2  $\varnothing 10$
- III livello armatura: 3  $\varnothing 10$

A favore di sicurezza, si considerano solamente le sollecitazioni trasmesse dalla struttura fuori terra sovrastante il batolo ed il peso proprio del batolo, trascurando eventuali effetti globalmente favorevoli dovuti a spinta attiva e passiva.

Nelle figure che seguono è riportata la verifica della sezione.

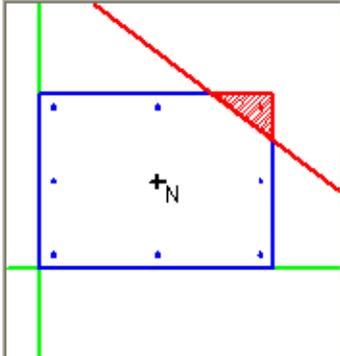
**Titolo :** Fondazione sezionatore verticale 150 kV

N° Vertici  Zoom N° barre  Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	0	0
2	80	0
3	80	60
4	0	60

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	0.79	4.5	4.5
2	0.79	4.5	30
3	0.79	4.5	55.5
4	0.79	40	4.5
5	0.79	75.5	55.5
6	0.79	40	55.5

**Tipo Sezione**  
 Rettan.re  Trapezi  
 a T  Circolare  
 Rettangoli  Coord.



**Sollecitazioni**  
 S.L.U.  Metodo n  
 N<sub>Ed</sub>  kN  
 M<sub>xEd</sub>  kNm  
 M<sub>yEd</sub>  kNm

**P.to applicazione N**  
 Centro  Baricentro cls  
 Coord.[cm] xN   
 yN

Tipo rottura  
 Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

**Metodo di calcolo**  
 S.L.U.+  S.L.U.-  
 Metodo n

**Tipo flessione**  
 Retta  Deviata

N° rett.

Calcola MRd  Dominio Mx-My

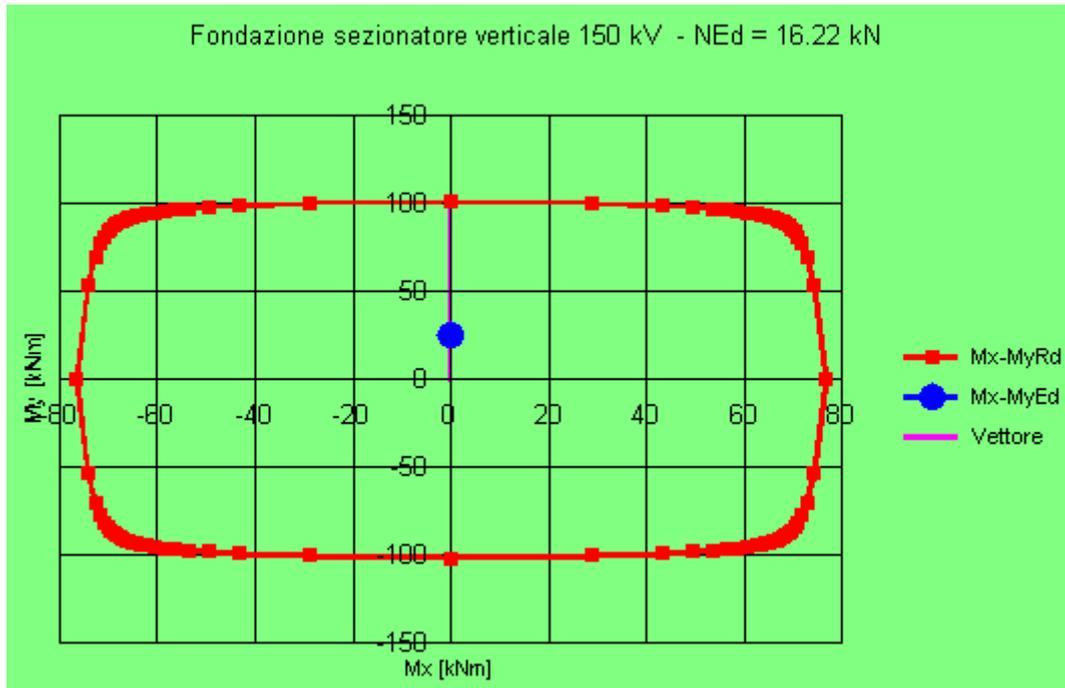
angolo asse neutro  $\theta^\circ$

Precompresso

**Materiali**

B450C		C32/40	
$\epsilon_{su}$	67.5 ‰	$\epsilon_{c2}$	2 ‰
$f_{yd}$	391.3 N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{cu}$	3.5 ‰
$E_s$	200,000 N/mm <sup>2</sup>	$f_{cd}$	18.13
$E_s/E_c$	15	$f_{cc}/f_{cd}$	0.8
$\epsilon_{syd}$	1.957 ‰	$\sigma_{c,adm}$	12.25
$\sigma_{s,adm}$	255 N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{co}$	0.7333
		$\tau_{c1}$	2.114

M<sub>xRd</sub>  kN m  
 M<sub>yRd</sub>  kN m  
 $\sigma_c$   N/mm<sup>2</sup>  
 $\sigma_s$   N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_c$   ‰  
 $\epsilon_s$   ‰  
 d  cm  
 x  x/d   
 $\delta$



La verifica a presso-flessione deviata risulta soddisfatta.

## 8 CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO

La verifica con azione sismica è stata condotta nei confronti dello Stato Limite di Danno (SLD).

Si verifica che gli spostamenti permanenti indotti dal sisma siano accettabili e compatibili con la funzionalità dell'opera.

I cedimenti immediati e le rotazioni della fondazione possono essere stimati con il ricorso alla teoria dell'elasticità facendo riferimento alle espressioni che seguono.

### *Cedimenti*

$$s = q \cdot B \frac{1 - \nu^2}{E'} \cdot I_w$$

essendo:

$s$  = cedimento della fondazione;

$q$  = pressione media sul terreno;

$B$  = dimensione laterale minore della fondazione;

$E'$  = modulo di Young del terreno immerso;

$\nu$  = coefficiente di Poisson del terreno;

$I_w$  = coefficiente di influenza che dipende dalla forma della fondazione e dalla sua rigidità.

Il valore calcolato è da intendersi come il cedimento medio della fondazione soggetta a carico verticale e baricentrico.

### *Rotazioni*

$$\tan \theta = \frac{1 - \nu^2}{E'} \cdot \frac{M}{B^2 \cdot L} \cdot I_\theta$$

essendo:

$\theta$  = angolo di rotazione;

$M$  = momento applicato nella direzione di verifica;

$B$  = dimensione della fondazione reale nella direzione di verifica;

$L$  = dimensione della fondazione reale nella direzione ortogonale a quella di verifica;

$E'$  = modulo di Young del terreno immerso;

$\nu$  = coefficiente di Poisson del terreno;

$I_\theta$  = coefficiente di influenza (Bowles 1982).

Nell'ipotesi di  $E' = 2$  MPa (valore riferibile ad argille poco consistenti),  $\nu = 0,3$ ,  $I_w = 1,83$  (valore associabile ad una fondazione rigida avente  $L/B = 6,17$ ; il valore è stato ricavato per interpolazione dei valori indicati da Bowles 1982),  $q = 8,24$  kPa, si ricava:

$$s = q \cdot B \frac{1 - \nu^2}{E'} \cdot I_w = 8,24 \cdot 1,20 \cdot \frac{1 - 0,3^2}{2000} \cdot 1,83 = 0,0082 \text{ m} = 0,82 \text{ cm}$$

Rotazione attorno all'asse y: 
$$\tan \theta = \frac{1 - 0,3^2}{2000} \cdot \frac{32,42}{1,2^2 \cdot 7,40} \cdot 4,90 = 0,0068$$

a cui corrisponde un cedimento pari a  $s = \tan \theta \cdot B = 0,81$  cm

Rotazione attorno all'asse x: 
$$\tan \theta = \frac{1 - 0,3^2}{2000} \cdot \frac{14,52}{7,40^2 \cdot 1,20} \cdot 4,90 = 0,0005$$

a cui corrisponde un cedimento pari a  $s = \tan \theta \cdot L = 0,36$  cm

Il cedimento massimo risultante dalla somma di cedimento medio e rotazioni è pari a 2,00 cm.

Tale valore è il cedimento massimo ipotizzabile con il peggior tipo di terreno per cui risulta verificata la fondazione; risulta compatibile con la funzionalità dell'opera e perciò lo risulta tanto più la parte di esso di carattere permanente.

## 9 CONCLUSIONI

La fondazione in oggetto risulta adeguata ad essere impiegata, nelle condizioni specificate nel Par. 2.3 e nell'Appendice 1 del presente rapporto.

## 10 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

- [1] Rapporto CESI A8024476 *STANDARDIZZAZIONE DELLE OPERE STRUTTURALI E LORO PROGETTO ESECUTIVO (TIPIZZAZIONE) Scheda ING31 Rev. 00 TIPI, Lotti 150 kV – 220 kV – 380 kV. Descrizione dello svolgimento delle attività di verifica*, settembre 2008.
- [2] TERNA *Stazioni elettriche A.T. 132-150 kV. Fondazione per sezionatore verticale TG2022 Rev. 00 dell'aprile 2010; doc. TERNA DC DS3000 U ST 00047.*
- [3] “Norme Tecniche per le Costruzioni”, D.M. 14/01/2008.
- [4] UNI EN 1997-1, “Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica”, febbraio 2005.
- [5] CEI 11-4 – 1998 “Esecuzione delle linee elettriche aeree esterne”.
- [6] CEI 11-1 – 1999 “Impianti elettrici con tensione superiore a 1 kV in corrente alternata”.
- [7] Documento TERNA, “Calcolo delle sollecitazioni indotte sulle strutture – Prospetto riassuntivo”, inviato via e-mail in data 11/04/2008.
- [8] Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, *Bozza di istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche per le Costruzioni*, del 07/03/2008.

## **APPENDICE 1: Prescrizioni e limiti di utilizzo**

## Condizioni di utilizzo della fondazione

Questa fondazione per il sezionatore verticale è adeguata per:

- vento con:
  - zona da 1 a 8
  - categoria di esposizione da III a V
  - $v_b = 48$  m/s
- sisma con:
  - periodo di ritorno 2475 anni
  - accelerazione spettrale secondo NTC costruita per suoli A, B, C o E con i valori:
    - $a_g = 6,247$  g/10      $F_o = 2,33$       $T_C^* = 0,55$  s
    - valore orizzontale del plateau  $\leq 0,728$  g – fattore di struttura  $q = 2$
    - valore verticale dello ZPA  $\leq 0,624$  g – fattore di struttura  $q = 1,5$
- momento statico massimo dell'apparecchiatura (rispetto alla superficie superiore della flangia di interfaccia):  $\leq 395$  kgm
- corto circuito con:
  - $I_{cc} \leq 40$  kA
- terreno con tensione di rottura non inferiore a  $2,4$  daN/cm<sup>2</sup>, peso di volume non inferiore a  $1800$  daN/m<sup>3</sup>, angolo d'attrito minimo di  $16^\circ$ , in corrispondenza a coesione pari a  $0,187$  daN/cm<sup>2</sup>
- livello di falda a quota del piano campagna (**terreno saturo**)
- calcestruzzo in classe  $R_{ck} \geq 40$  N/mm<sup>2</sup>
- classi di esposizione ambientale: XC4, XD1, XS1, XF2, XF3, XA1, XA2 (UNI-EN 206-1).
- acciaio delle armature B450C