

## ALLEGATO 5 STIMA DEI CEDIMENTI DOVUTI ALLA COMPRESSIBILITÀ DEI TERRENI

Nel presente Allegato alla Relazione geologica, geotecnica e sismica è mostrata la stima dei cedimenti dell'opera dovuta alla compressibilità dei terreni di fondazione.

Le valutazioni si riferiscono alla scogliera di Levante, laddove la profondità del fondale è maggiore e quindi l'opera più pesante, per cui potrebbero risultare particolarmente cautelative (e quindi a favore di sicurezza) per la scogliera di Ponente.

Per il calcolo dei cedimenti verticali  $\delta$  si applica l'equazione di Hooke considerando gli incrementi di tensione indotti dai carichi ( $\Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y, \Delta\sigma_z$ ):

$$\delta = \sum \frac{H_i}{E_i} [\Delta\sigma_z - \nu \cdot (\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)]$$

dove:

$E_i$  = modulo di Young dello strato  $i$  (drenato e non drenato);

$\nu$  = coefficiente di Poisson (0.3 per strati di terreno drenati e 0.5 per strati non drenati);

$H_i$  = spessore dello strato  $i$ .

Il calcolo del cedimento è limitato agli strati di terreni sui quali agisce il carico applicato per uno spessore pari a  $h_c$ , dove si verifica la seguente disuguaglianza:

$$\Delta\sigma_z / \sigma'_{v0} > 0.15$$

dove:

$\Delta\sigma_z$  = incremento di tensione verticale indotto dal carico esterno applicato

$\sigma'_{v0}$  = tensione efficace verticale

Il calcolo degli incrementi di tensione normale, sia verticali che orizzontali, indotti nel terreno dall'applicazione del carico e del conseguente cedimento sono condotti applicando la formula con le seguenti ipotesi:

- Il terreno è modellato come uno semispazio lineare elastico isotropo
- L'area di carico è posizionata sulla superficie del semispazio ed è priva di rigidità.

Si considera un'area di carico rettangolare avente le dimensioni della proiezione orizzontale della scogliera di progetto.

La soluzione in termini di incremento di tensione lungo gli assi verticali al bordo dell'area rettangolare di carico è ottenuta applicando la formulazione di Holl (1940) come riportato in H. G. Poulos, E.H. Davis – Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics, 1974.

Per condizioni non drenate:

$$\Delta\sigma_x = \frac{\sigma_0}{2\pi} \left( \arctg \frac{a \cdot b}{z \cdot C} - \frac{a \cdot b}{A^2} \cdot \frac{z}{C} \right)$$

$$\Delta\sigma_y = \frac{\sigma_0}{2\pi} \left( \arctg \frac{a \cdot b}{z \cdot C} - \frac{a \cdot b}{B^2} \cdot \frac{z}{C} \right)$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{\sigma_0}{2\pi} \left[ \operatorname{arctg} \frac{a \cdot b}{z \cdot c} + a \cdot b \cdot \left( \frac{1}{A^2} + \frac{1}{B^2} \right) \cdot \frac{z}{c} \right]$$

Per condizioni drenate:

$$\Delta\sigma_x = \frac{\sigma_0}{4\pi} \left( \frac{a^3}{A^3} \cdot \operatorname{arctg} \frac{b}{A} + \frac{b}{B} \cdot \operatorname{arctg} \frac{a}{B} - \frac{a \cdot b}{A^2} \cdot \frac{z^2}{C^2} \right)$$

$$\Delta\sigma_y = \frac{\sigma_0}{4\pi} \left( \frac{b^3}{B^3} \cdot \operatorname{arctg} \frac{a}{B} + \frac{a}{A} \cdot \operatorname{arctg} \frac{b}{A} - \frac{a \cdot b}{B^2} \cdot \frac{z^2}{C^2} \right)$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{\sigma_0}{2\pi} \left[ \left( 1 + \frac{z^2}{2A^2} \right) \cdot \frac{a}{A} \cdot \operatorname{arctg} \frac{b}{A} + \left( 1 + \frac{z^2}{2B^2} \right) \cdot \frac{b}{B} \cdot \operatorname{arctg} \frac{a}{B} + \frac{a \cdot b}{2} \cdot \left( \frac{1}{A^2} + \frac{1}{B^2} \right) \cdot \frac{z^2}{C^2} \right]$$

dove:

$\sigma_0$  = carico verticale applicato;

$a$  = dimensione dell'area di carico in direzione x;

$b$  = dimensione dell'area di carico in direzione y;

$z$  = profondità.

$$A^2 = a^2 + z^2; \quad B^2 = b^2 + z^2; \quad C^2 = a^2 + b^2 + z^2;$$

$\Delta\sigma_z$  = incremento di tensione verticale;

$\Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y$  = incremento di tensione verticale.

La stratigrafia considerata per il sito in esame è la seguente:

- dal fondale ad una profondità di 8.0m dal fondale: sabbia limosa (SL);
- da 8.0m a 28.0m di profondità dal fondale: limo argilloso (LA), che nei primi 8.0m presenta caratteristiche di minore deformabilità;
- al di sotto di 28.0m da fondale: ghiaia alternata a strati limoso-sabbiosi e limoso argillosi (GA)

Per il calcolo dei cedimenti totali della scogliera sono stati considerati i seguenti parametri geotecnici di compressibilità:

| condizioni drenate |           |                     |                 |                 |                 |                                     |                                |
|--------------------|-----------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------|--------------------------------|
|                    | terreno   | spessore strato [m] | $E_{sup}$ [kPa] | $E_{inf}$ [kPa] | $\nu$ (Poisson) | $\gamma_{nat}$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ] |
| 1                  | granulare | 8,00                | 18.500          | 18.500          | 0,30            | 19,0                                | 9,0                            |
| 2                  | granulare | 8,00                | 7.400           | 7.400           | 0,30            | 18,0                                | 8,0                            |
| 3                  | granulare | 12,00               | 5.550           | 5.550           | 0,30            | 18,0                                | 8,0                            |
| 4                  | granulare | 10,00               | 37.000          | 37.000          | 0,30            | 19,0                                | 9,0                            |
| 5                  | granulare | 10,00               | 37.000          | 37.000          | 0,30            | 19,0                                | 9,0                            |
| 6                  | granulare | 20,00               | 37.000          | 37.000          | 0,30            | 19,0                                | 9,0                            |

Tabella 1 Stratigrafia e parametri geotecnici per il calcolo dei cedimenti

Sulle base della stima della quantità di materiale lapideo che costituisce la scogliera e della geometria della stessa, il sovraccarico sui terreni di fondazione è stato modellato come una pressione uniforme di 139.2 kPa su un'area d'impronta 118m x 34.4m.

| INPUT IMPRONTE DI CARICO |                 |                              |                               |                          |                          |
|--------------------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                          | pressione [kPa] | ascissa baricentro $X_G$ [m] | ordinata baricentro $Y_G$ [m] | semilato direzione x [m] | semilato direzione y [m] |
| 1                        | 82,2            | 0,000                        | 59,000                        | 17,200                   | 59,000                   |

Tabella 2 Geometria delle impronte di carico

I cedimenti sia totali che a lungo termine sono stati valutati su due allineamenti lungo l'asse x:

- In asse alla scogliera (A)
- Al piede della scogliera (B)

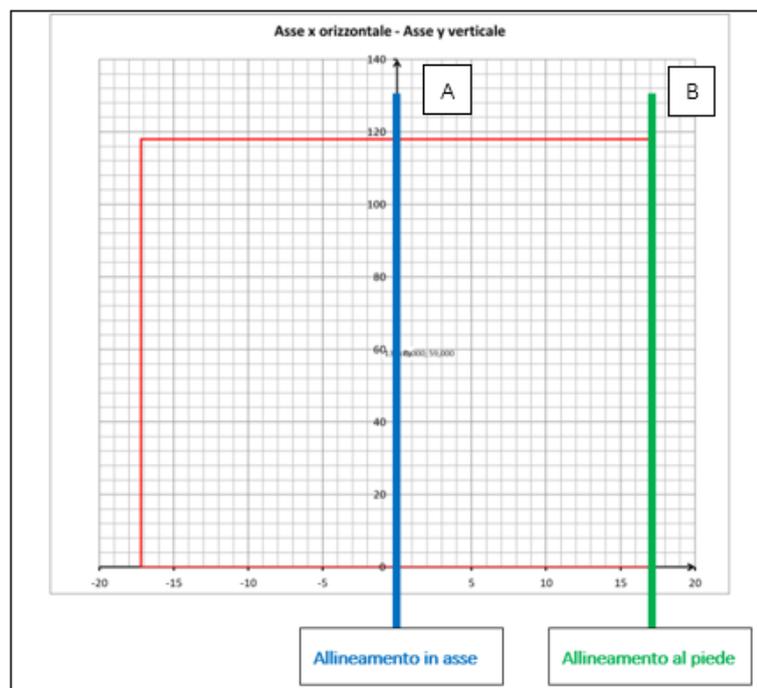


Figura 1 Impronta di carico con indicazione dei due allineamenti lungo asse y sui quali sono stati valutati i cedimenti totali.

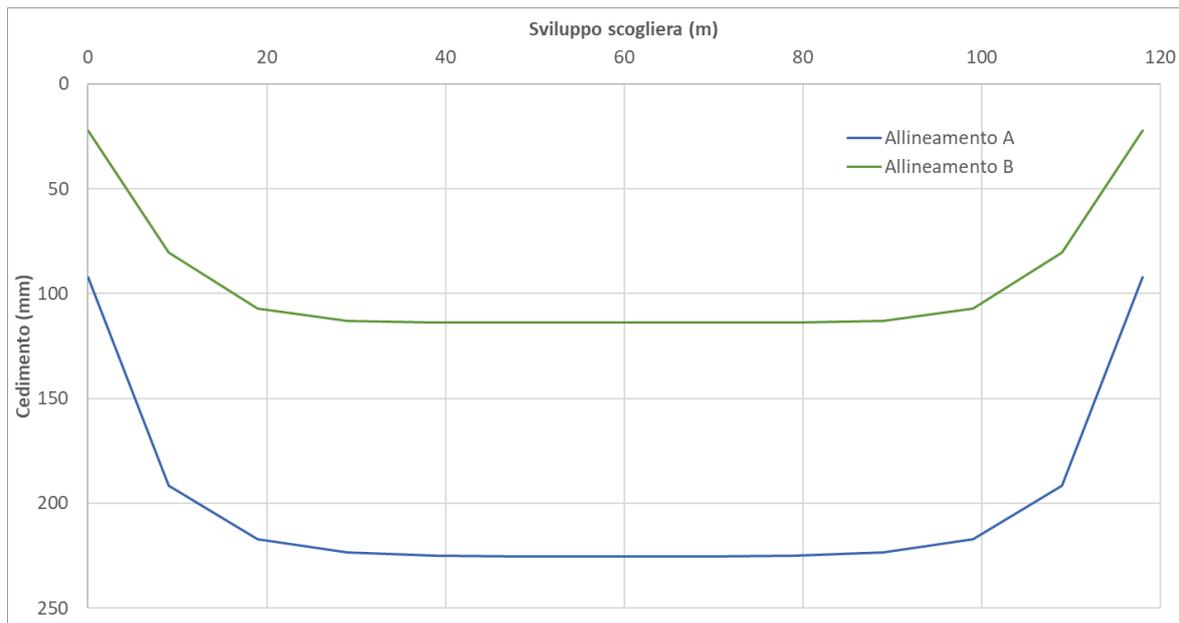


Figura 2 Andamento dei cedimenti totali lungo l'asse y della scogliera su due allineamenti

Il cedimento totale massimo lungo l'allineamento in asse alla scogliera è 225mm e quello lungo l'allineamento al piede 114mm.

In ottica progettuale è utile distinguere la quota parte di cedimenti che avviene istantaneamente all'atto dell'applicazione del sovraccarico e la quota parte che si esplica nel corso del tempo. I cedimenti che avvengono a lungo termine hanno maggiore importanza per la funzionalità dell'opera dal momento che i cedimenti istantanei sono compensati durante la costruzione.

Si considera che il cedimento delle sabbie avvenga nel breve periodo e che quello degli strati a comportamento coesivo (limo argilloso) avvenga a lungo termine. Pertanto per la valutazione del cedimento a lungo termine vengono considerate le caratteristiche deformative dei vari strati di seguito riportate.

| terreno   | spessore strato [m] | condizioni drenate |                 |                 | $\gamma_{nat}$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ] |
|-----------|---------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------|--------------------------------|
|           |                     | $E_{sup}$ [kPa]    | $E_{inf}$ [kPa] | $\nu$ (Poisson) |                                     |                                |
| granulare | 8,00                | 100.000.000        | 100.000.000     | 0,30            | 19,0                                | 9,0                            |
| coesivo   | 8,00                | 7.400              | 7.400           | 0,30            | 18,0                                | 8,0                            |
| coesivo   | 12,00               | 5.550              | 5.550           | 0,30            | 18,0                                | 8,0                            |
| granulare | 10,00               | 100.000.000        | 100.000.000     | 0,30            | 19,0                                | 9,0                            |
| granulare | 10,00               | 100.000.000        | 100.000.000     | 0,30            | 19,0                                | 9,0                            |
| granulare | 20,00               | 100.000.000        | 100.000.000     | 0,30            | 19,0                                | 9,0                            |

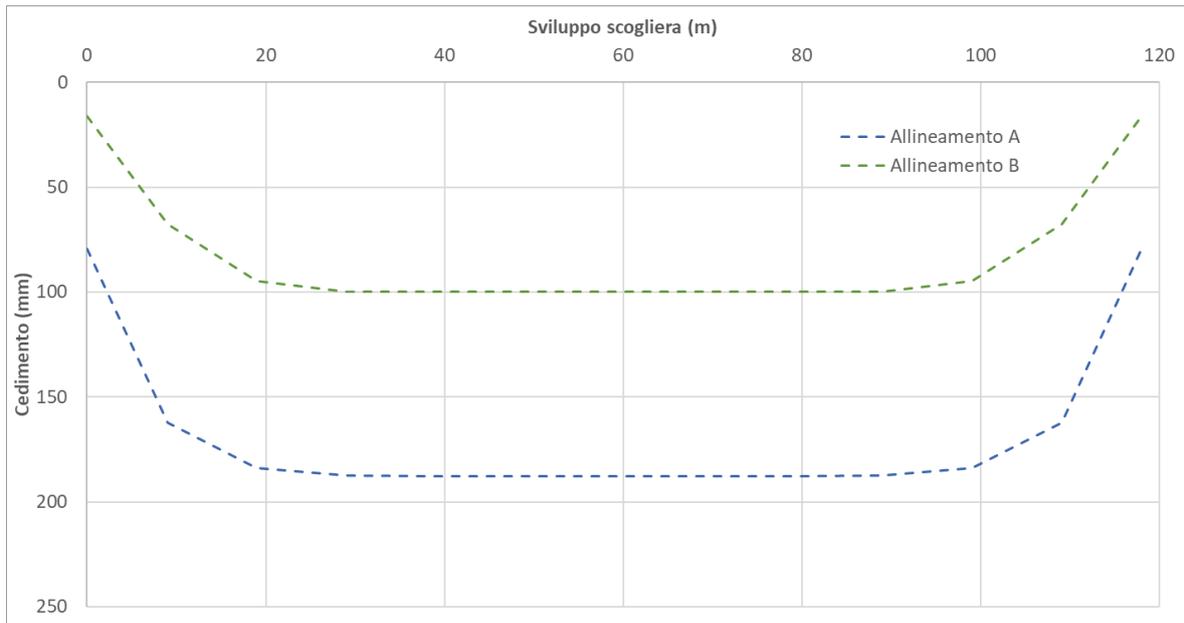


Figura 3 Andamento dei cedimenti a lungo termine lungo l'asse x della scogliera su due allineamenti

I cedimenti a lungo termine sono stati valutati anche trasversalmente alla scogliera (allineamento C).

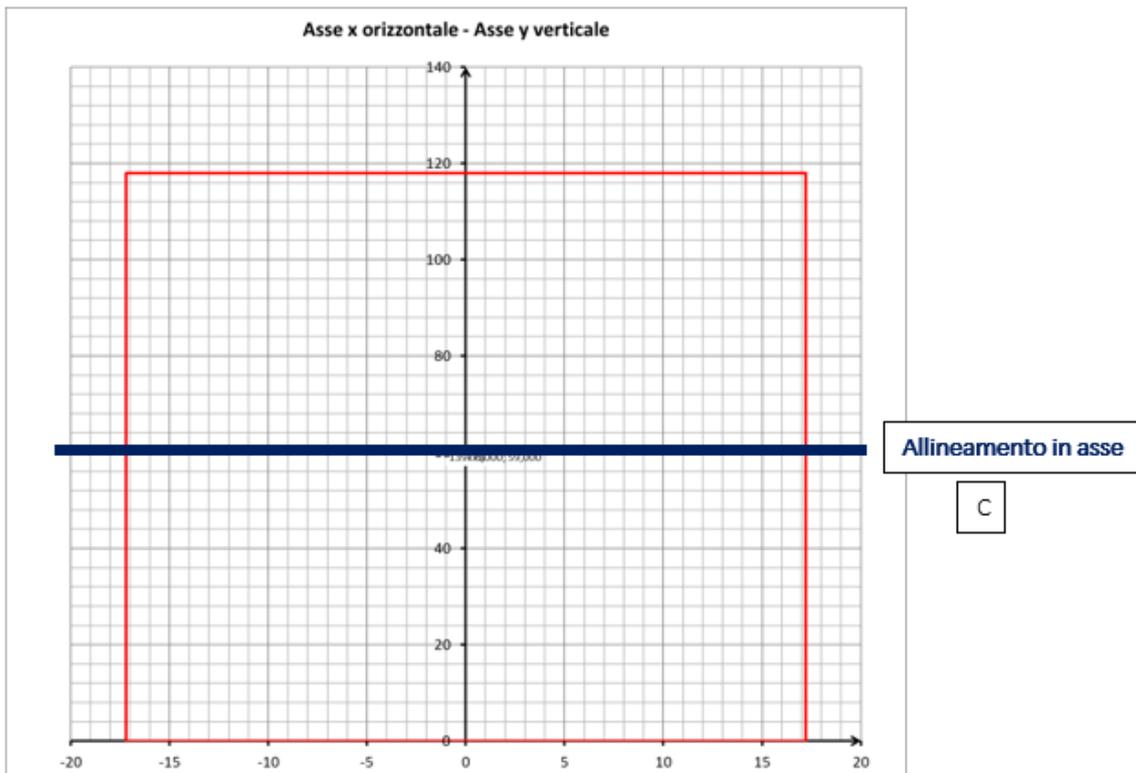


Figura 4 Impronta di carico con indicazione allineamento C

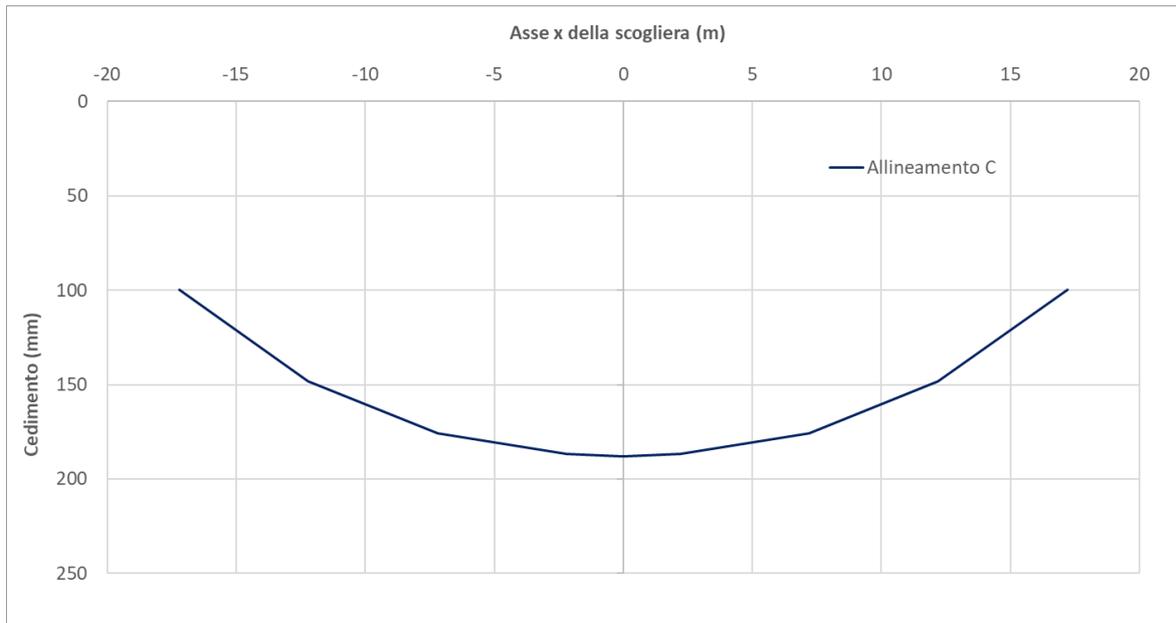


Figura 5 Andamento dei cedimenti lungo una sezione trasversale alla scogliera a lungo termine

Il cedimento a lungo termine lungo l'allineamento in asse è pari a 188mm.

| <i>Allineamenti</i>             | <i>Cedimento a lungo termine (mm)</i> |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| Allineamento asse x e y (A e C) | 188                                   |
| Allineamento piede (B)          | 100                                   |

Tabella 3 Sintesi dei risultati dei cedimenti